



ALBERDINGK BOLEY

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: roman.zank@mail.de

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	7
2 Zielsetzung und Abgrenzung der Aufgabenstellung	7
2.1 Zielsetzung der Aufgabenstellung	7
2.2 Abgrenzung der Aufgabenstellung	7
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	9
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	17
3.3.3 Ermittlung des Dosierstroms	20
3.4 Rohrleitungsplanung und Zeichnerische Umsetzung	22
3.4.1 Rohrleitungsplanung	22
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 Angepasste Nutzenwertmaxime	31
4.2 Experimentelle Untersuchungen	32
4.2.1 Verifizierung der angegebenen Viskosität:	32
4.2.2 Untersuchung der Temperaturabhängigkeit:	33
4.2.3 Untersuchung der Verdünnungsabhängigkeit:	33
4.3 Lagerungsverhalten	34
4.3.1 Pumpversuche	35
4.4 Recherchearbeit: Literaturarbeit, Fachgespräche und Angebotsanfragen . .	36
4.5 Risikoanalyse	36
4.5.1 Risikomatrix nach NOHL	37
4.5.2 HAZOP-Verfahren kombiniert mit Risikomatrix	38
5 Ergebnisse	41
5.1 Verifizierung und Analyse des Dosierproblems	41
5.1.1 Ist-Zustand: Produktionsweise und aktuelles Dosierverfahren . . .	41
5.1.2 Soll-Zustand: Anforderung an die Dosierung	42
5.1.3 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen	43
5.2 Entscheidungsprobleme	49
5.2.1 Entscheidung für ein Grundverfahren	49
5.2.2 Entscheidung für Gebindetyp	51
5.2.3 Entscheidung für Pumpendosierung oder Dosierbehälter	51
5.2.4 Auswahl des Pumpentyps	51
5.2.5 Auswahl des Messverfahrens	51

5.3	Technische Planung für Verdickungsmitteldosierung	51
5.3.1	Verfahrensfließbild der Verdickerdosierung	51
5.3.2	R&I- Fließbild der Verdickerdosierung	51
5.3.3	Rohrleitungsplanung der Verdickerdosierung	51
5.3.4	EMSR-Plan der Messtechnik für die Dosierung	51
5.4	Gefährdungsbeurteilung der geplanten Verdickungsmitteldosierung	51
6	Diskussion	51
6.1	Diskussion der experimentellen Untersuchungen	51
6.2	Diskussion der Entscheidungen	51
6.3	Diskussion der Rohrleitungsplanung	51
6.4	Diskussion der Gefährdungsbeurteilung	51
7	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	52
Literaturverzeichnis		56
Abbildungsverzeichnis		58
Tabellenverzeichnis		58

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 28.02.2022

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 28.02.2022

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 derzeitig 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 zuzugebenen 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 Charakterisierung 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 Vor 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 betreuendem 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

Der Abschnitt der theoretischen Grundlagen umfasst Basiswissen bezüglich Verdickungsmitteln, Strömungslehre, genormte Viskositätsmessung, Verdrängungspumpen, Rohrleitungsplanung und Entscheidungsverfahren. Hierbei sollen jegliche benötigte Kenntnisse zur Bearbeitung der Untersuchungsaufgabe und zum Verständnis der genutzten Methoden geschaffen werden.

Optional Stand der Technik betrachten -> 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 Fertigungsstraße 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		mehrmais 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 techni-

schen 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 Betriebssicherheitsverordnung (kurz: BetrSichV), welche eine Gesamtbetriebssicherheitsverordnung darstellt und die eben genannten Gesetze zusammenfasst. Weitere zu beachtende Verordnungen sind die Explosionsschutzverordnung und die Gefahrstoffverordnung. Aus diesen Verordnungen setzen sich nun wiederum verschiedenste technische Regeln wie die EU-Richtlinie 94/9/EG (ATEX 95), 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 explosionsgefährdete 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 hiefür 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 Reaktionsgefäß, der nähere Bereich von leicht zerbrechlichen Armaturen (z.B. aus Glas) oder der Raum um Beschickungs- und Abfüllanlagen. Bereiche mit der größten Explosionsgefährdung werden mit Zone 0 gekennzeichnet. Hier sind explosionsfähige Atmosphären aus Luft und brennbaren Stoffen 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 Prozessstoffs sollte dabei mindestens 40 °C über der zulässigen Oberflächentemperatur des Betriebsmittels sein. Die Angabe der Explosionszone und der Temperaturklasse sind als Minimum der zu tätigen 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	≥ 450 °C → 490 °C
T 2	300 °C	≥ 300 °C → 340 °C
T 3	200 °C	≥ 200 °C → 240 °C
T 4	135 °C	≥ 135 °C → 175 °C
T 5	100 °C	≥ 100 °C → 140 °C
T 6	85 °C	≥ 85 °C → 125 °C

Aufgrund der hohen Explosionsgefährdung sind deshalb in den Zonen 0 und 1 nur Geräte erlaubt, die explosionssicher 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 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]

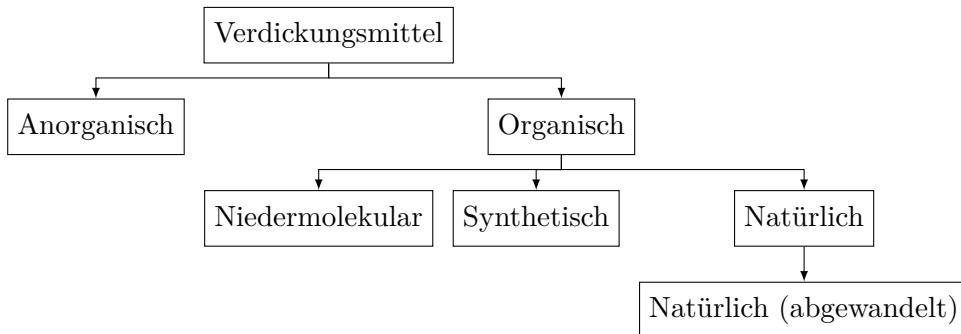


Abb. 1: Einteilung von Verdickungsmitteln nach Zusammensetzung [BRRS09]

Je nach Verdickungsmittel können verschiedene Effekte wie Gelbildung, 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).

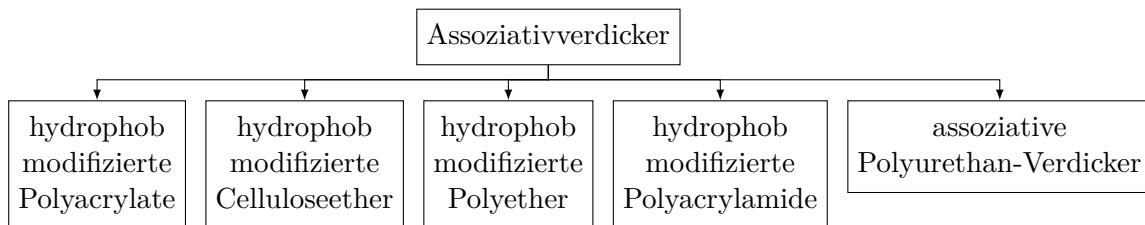


Abb. 2: Einteilung von Assoziativ-Verdickern nach chemischer Struktur [BRRS09]

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]

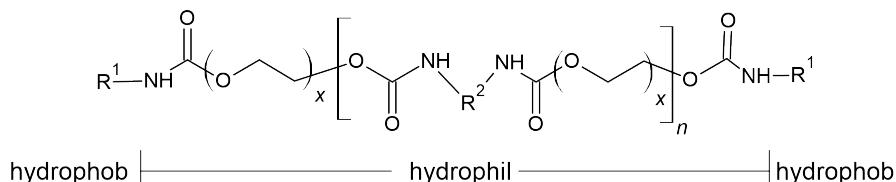


Abb. 3: schematische Struktur eines assoziativen Polyurethan-Verdickers, erstellt nach [BRRS09]

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]

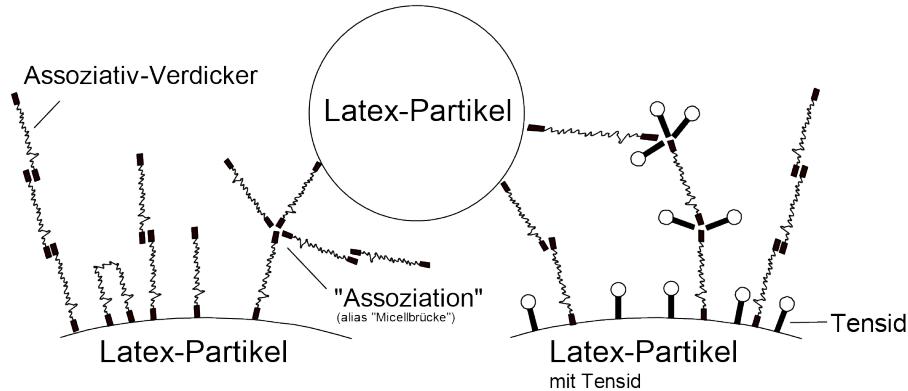


Abb. 4: Netzstruktur durch Verdickermittel in Latex-Dispersion (mit und ohne Tensid), erstellt nach [Mez16]

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 Additivs 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 nötigt 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.

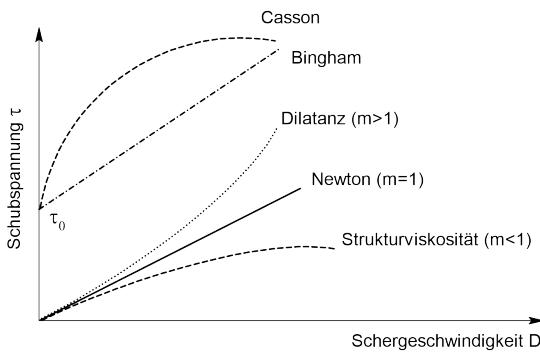


Abb. 5: Fließkurven für verschiedene Fluide, erstellt nach [Hol10]

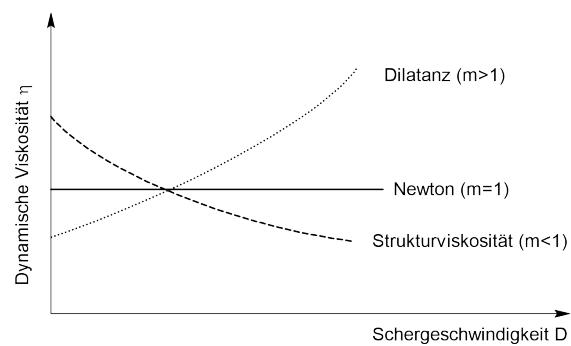


Abb. 6: Viskositätskurven für verschiedene Fluide, erstellt nach [Mun18]

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 Kappilarviskosimeter 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 Becherglasses zu nutzen. [RRM08, bro07, DIN18]

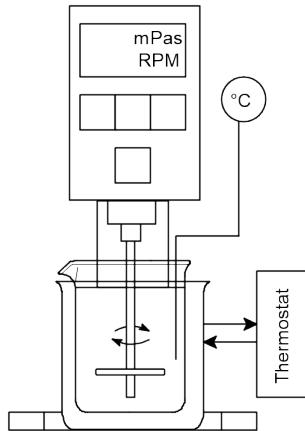


Abb. 7: Viskositätsmessung mit digitalem BROOKFIELD-Rotationsviskosimeter

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 Körpern. 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 Becherglasses, sowie der Spindel und der Drehzahl. Spindel und Drehzahl werden dabei unter Einbezug des Viskositätbereiches 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. [bro07]

Bestimmung der Strömungsform Nachdem die Viskosität bestimmt ist, lässt sich nun der Dosierstrom des Verdickermittels entsprechend seiner Strömungseigenschaften beschreiben. Hierfür 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

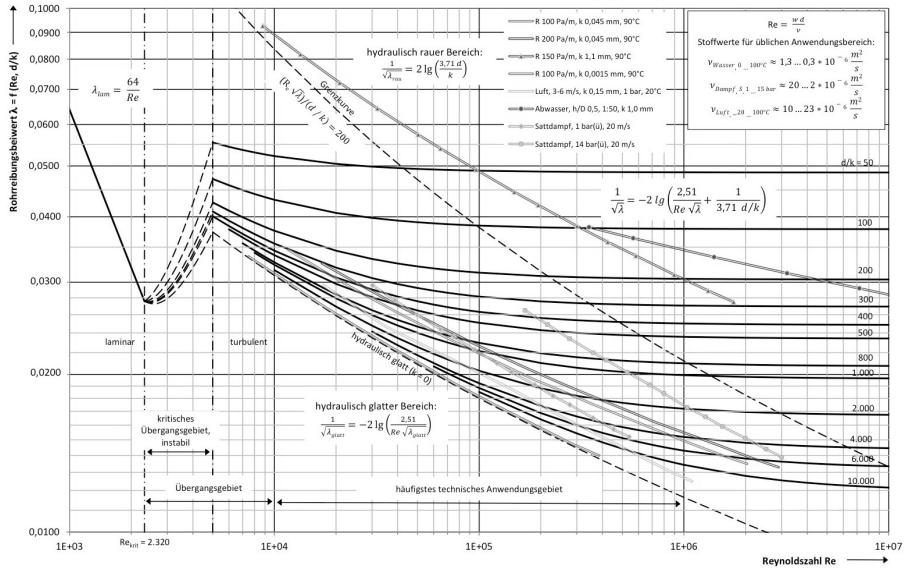


Abb. 8: NIKURADSE-COLEBROOK-MOODY-Diagramm [Msi17, CC BY]

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 ... Kamervolumen

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 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 9 und 10).

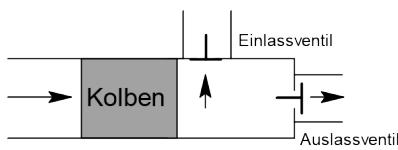
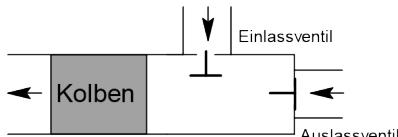


Abb. 9: Skizze einer Kolbenpumpe

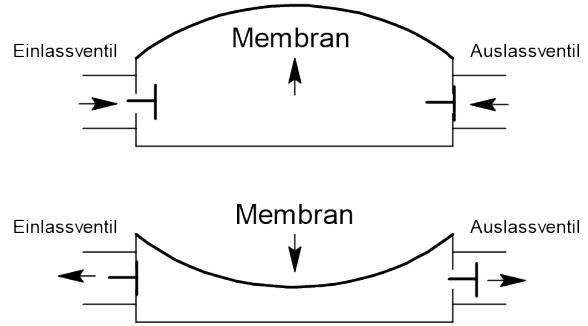


Abb. 10: Skizze einer Membranpumpe

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 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 11 dargestellt.

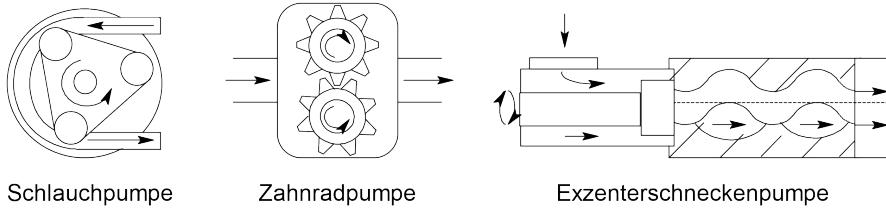


Abb. 11: Skizzen für Rotationspumpen

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 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, 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 Doserpumpe vertraut, um den geforderten Dosierstrom umzusetzen. Dosiert 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]

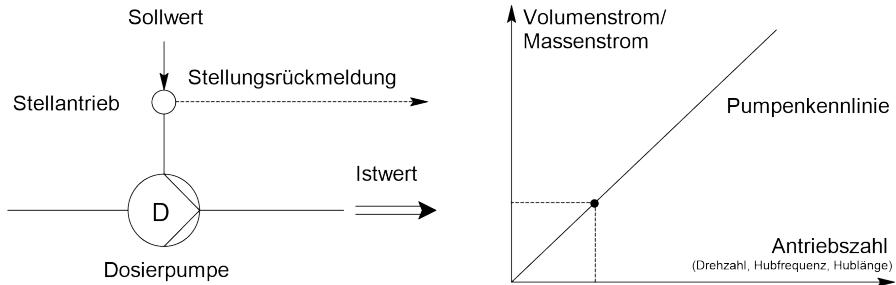


Abb. 12: Skizze für redundanzfreies Dosiersystem, erstellt nach [Vet02]

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 Dosiersystems mit Dosierpumpe und Durchflussmesser dargestellt. [Vet02]

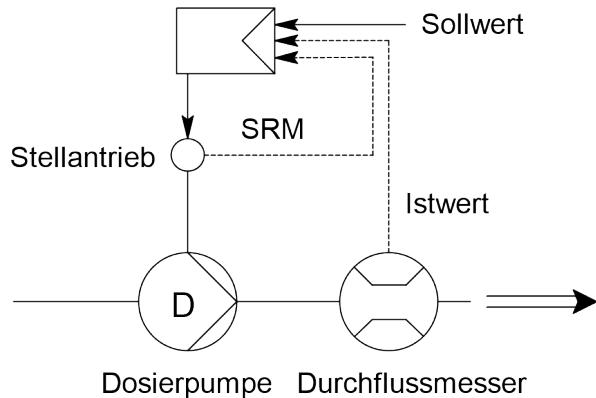


Abb. 13: Skizze für Dosiersystem mit Redundanz, erstellt nach [Vet02]

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. $0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ 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 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. [Ste, Wik21, Wik20]

Neben den bereits genannten Durchflussmessern gibt es auch so genannte Mengenmesser. 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 Radarfüllstandssensors 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 Dosiergeutoberfläche 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 Rohrleitungsplanung und Zeichnerische Umsetzung

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 Durchmessers 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 Rohrleitungsdimensionen für verschiedene 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 Rohrleitungsdimensionen 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 Rohrinnendurchmesser 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												
	25												
s	2,5												
	6												
	10	1,8	2,0	2,3	2,6	2,6	2,6	2,9	2,9	3,2	3,6	5,9	6,3
	16												
	25											6,3	7,1
d_i	2,5												
	6												
	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

$d_a \dots$ Außendurchmesser, $s \dots$ Wandstärke, $d_i \dots$ 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				Nummer		
	Typ	-	Material	-	DN	-	PN	-	Isolierung	-	Medium	-	Aggregatzustand	-	
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, Verfahrensfließbild 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. Beispielhaft ist in Abbildung 14 ein R & I - Fließbild dargestellt. [Ign15]

R & I - Fließbild (vereinfacht)

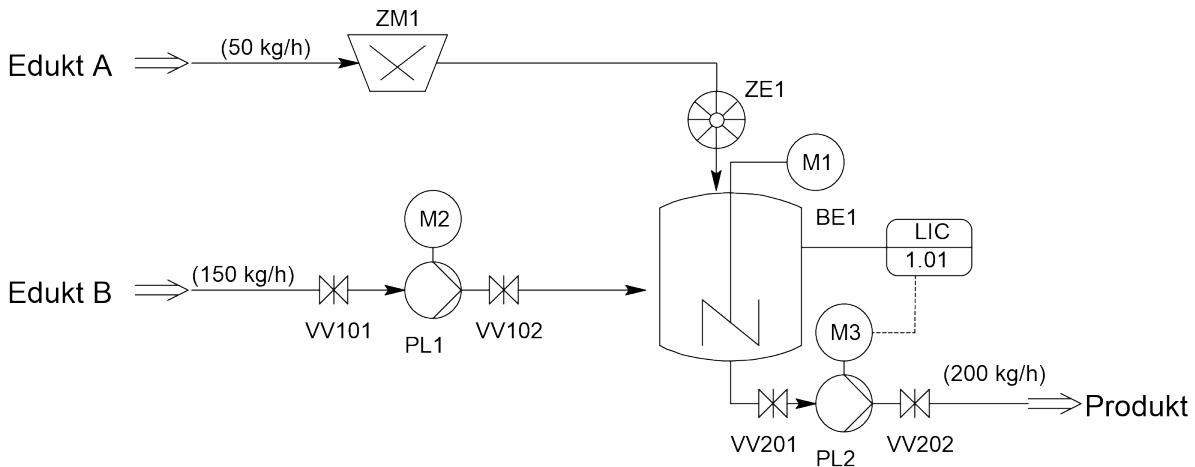


Abb. 14: Vereinfachtes R&I - Fließbild

3.4.3 EMSR-Stellenplan

EMSR-Stellenpläne, auch Instrumentation Loop Diagrams genannt, sind die detaillierte 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 fungieren dabei 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 Rangierschrankes zusammen und werden passend zur B-Seite des Schranks rangiert. Ein weiteres Stammkabel verbindet nun die Rangierseite B und das Distributed control system (DCS). In diesem münden die 4 bis 20 mA Messsignale dann in I/O-Karten, die die galvanische Trennung der eigensicheren Feldsignale für den sicheren Bereich sicherstellen. Montiert sind diese I/O-Karten zusammen mit mindestens einem Field Bus Module (FBM) auf Intrinsically Safety Termination Assembly Boards (ISTA Boards), welche eine einfache Verknüpfung der I/O Karten mit dem FBM ermöglichen. Das im DCS an kommende Messsignal wird durch den FBM in eine Binärstruktur übersetzt und dann über ein Bus-Kabel in das Prozessleitsystem eingepflegt und weiterverarbeitet. Beispielhaft ist ein solches Instrumentation loop diagram für einen Durchflussmesser in Abbildung 15 dargestellt. Es sei jedoch erwähnt, dass sich solche Pläne je nach Institution und Anwendung in ihren Bezeichnungen und ihrer Komplexität stark unterscheiden können.

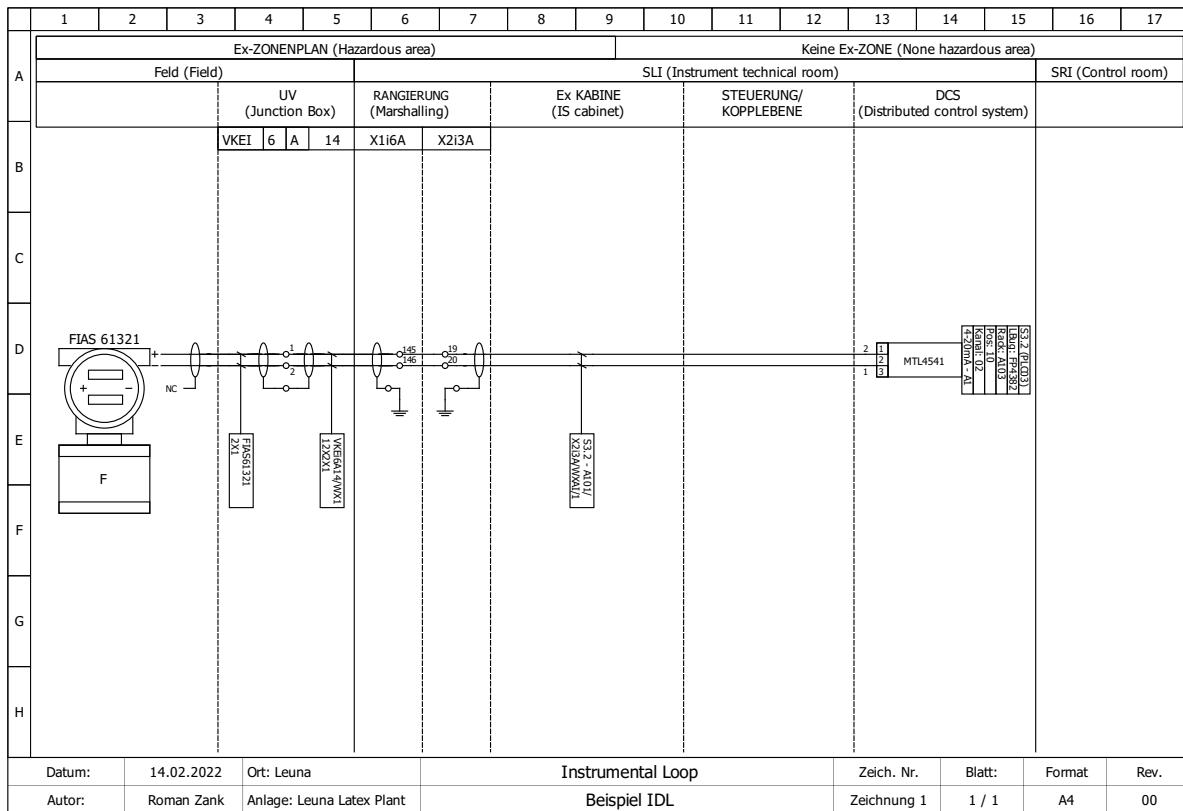


Abb. 15: Beispiel eines EMSR-Stellenplans bei der ALBERDINGK BOLEY LEUNA GMBH

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.

relative Standardabweichung einbauen ?

4 Material und Methoden

In diesem Abschnitt werden die genutzten Methoden zur Untersuchung einer Umsetzung für die Verdickungsmitteldosierung dargelegt. Er beinhaltet das allgemein heuristische Entscheidungsverfahren GRÜNING und KÜHN, experimentelle Untersuchungen, Recherche zur Dosierung hochviskoser Medien, sowie die Vorgehensweise zur Risikoanalyse eines Prozesses mit Hilfe des HAZOP-Verfahrens und einer Risikomatrix nach NOHL.

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).

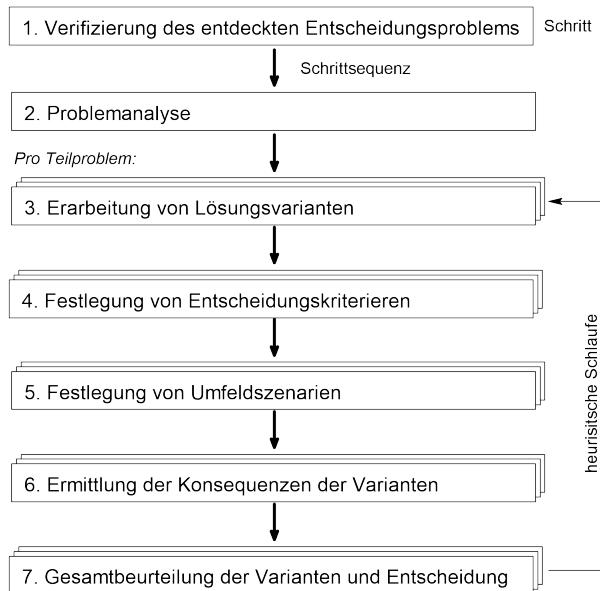


Abb. 16: Allgemein heuristisches Entscheidungsverfahren, erstellt nach [GK13]

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 Schlaufe“ 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 besticht dabei durch konkret definierte Maßstäbe anhand derer eine Einschätzung erfolgen kann.

Schritt 5: Festlegung von Umfeldszenarien Dieser optionale Schritt des Entscheidungsprozesses fordert den Aktor der Entscheidung dazu auf, falls nötig, verschiedene Szenarien des Umfeldes zu beschreiben und Eintrittswahrscheinlichkeiten dafür zu definieren. Beispielsweise findet eine solche Beurteilung des Umfeldes in der Risiko- und Gefahrenanalysen nach dem HAZOP-Verfahren unter zusätzlicher Nutzung einer Risikomatrix Anwendung.

Schritt 6: Ermittlung der Konsequenzen der Varianten: Die zuvor überlegten Entscheidungskriterien und die optionalen Umweltszenarios werden mit den erarbeiteten Lösungsvorschlägen in einer Entscheidungsmatrix zusammengefasst und die sich daraus ergebenen Konsequenzwerte eingetragen. Die Konsequenzwerte werden hierbei durch eingehende Recherchen und dem Wissen und der Erfahrung des Aktors 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] 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 Mehrwertigkeit, 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 Angepasste 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 Entscheidungssituationen keinen Nachteil mit sich bringen. Die Entscheidung einer Variante mittels Nutzenwertanalyse nach [GK13] wird in dieser Arbeit geringfügig angepasst. Die Konsequenzwerte werden dabei als „Bewertung“ und Nutzenwerte als „Erfüllungsstatus“ bezeichnet. Diese abgewandelte Vorgehensweise umfasst die folgenden vier Teilaufgaben:

Schritt 1: Umrechnung nicht-numerischer Bewertungen

Nicht-numerische Bewertungen sind anhand einer definierten Skala in Zahlenwerte umzurechnen. Die subjektive Bewertung hat so zu erfolgen, dass die günstigste Variante die höchste Bewertung erhält.

Schritt 2: Umrechnung der Bewertungen in einen Erfüllungsstatus

Der maximale Skalenwert einer jeden Bewertung entspricht dem idealen Erfüllungsstatus für ein Kriterium. Für die Bestimmung des Erfüllungsstatus einer Variante für ein Kriterium wird der Quotient aus der jeweilige Bewertung und dem maximalen Skalenwert gebildet. Der Definitionsbereich des Erfüllungsstatus liegt demnach zwischen 0 und 100 %, wobei 100 % der vollen Erfüllung der Anforderung entspricht.

Schritt 3: Gewichtung der Entscheidungskriterien

Die Summe der Gewichtungen der Entscheidungskriterien sollte 100 % betragen, um eine Vergleichbarkeit der Kriterien untereinander gewährleisten zu können. Die subjektiv bestimmten Gewichtungen sollten hierbei die relative Bedeutung für die Zielerreichung widerspiegeln.

Schritt 4: Bestimmung der Gesamtkonsequenzen

Der Erfüllungsstatus jeder Variante ist in Bezug auf ein Entscheidungskriterium mit der Gewichtung des Entscheidungskriterium zu multiplizieren und die Summe der gewichteten Erfüllungsstatus zu bilden. Es lässt sich nun erkennen zu welchem Anteil eine Variante den idealen Anforderungen entspricht und welche Variante diesem Idealbild am Nächsten kommt.

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 und das Verhalten bei offener Lagerung beobachtet. Das in den Experimenten verwendete TAFIGEL PUR 85 wird sicherheitstechnisch in [Mun20] beschrieben. Enhaltene Informationen sind zum Beispiel der nach DIN EN ISO 2719 bestimmte Flammpunkt über 100 °C liegt, der Stoff weder toxisch, abrasiv, oder ätzend ist und dass der pH-Wert sich nach DIN ISO 976 mit 6,5 als weitgehend neutral angeben lässt. Laut Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 werden demnach keine H- und P-Sätze für das TAFIGEL PUR 85 vergeben und das Verdickungsmittel somit als nicht gefährlich eingestuft. Es bleibt jedoch zu erwähnen, dass die Standard-Biozide CIT und MIT im Verhältnis (3:1) enthalten sind.

4.2.1 Verifizierung der angegebenen Viskosität:

Durch die Verfügbarkeit eines digitalen BROOKFIELD DV-I PRIME Rotationsviskosimeters sind die Messungen der dynamischen Viskosität im Labor der ALBERDINGK BOLEY LEUNA GMBH erfolgt. Um die für das Verdickermittel angegebene Viskosität von ca. 35 Pa · s aus dem Sicherheitsdatenblatt zu überprüfen, wurden zunächst Untersuchungen bei 20 °C nach DIN EN ISO 2555 durchgeführt. (vgl. [Mun20]) 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 laut Tabelle 6 für einen Viskositätsbereich von 8000 bis 80 000 mPa · s ausgelegt und wurde nach jeder Messreihe gespült und getrocknet. Im Anschluss an diese Messreihen ist eine Viskositätsmessung mit der gleichen Spindel, bei gleicher Drehzahl und Temperatur für ein 50 mL Becherglas durchgeführt worden. Analog zum TAFIGEL PUR 85 erfolgte im Anschluss eine Untersuchung des Verdickungsmittels Rheobyk-H 3300 VF mit Spindel 6 bei 20 rpm unter den selben Bedingungen. Eine Viskositätsangabe ist für dieses Verdickungsmittel im Sicherheitsdatenblatt nicht zu finden. [byk20]

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

Spindel		1	2	3	4	5	6	7	
Viskosität in mPa · s		20 rpm	<500	200-2000	500-5.000	1.000-10.000	2.000-20.000	5.000-50.000	20.000-200.000
		50 rpm	<200	80-800	200-2.000	400-4.000	800-8.000	2000-20.000	8.000-80.000
		100 rpm	<100	40-400	100-1.000	200-2.000	400-4.000	1000-10.000	4.000-40.000

4.2.2 Untersuchung der Temperaturabhängigkeit:

Nach der Überprüfung der im Sicherheitsdatenblatt angegebenen Viskosität des TAFIGEL PUR 85 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. Eine analoge Untersuchung mit Rheobyk-H 3300 VF ist nicht erfolgt. 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.

4.2.3 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 erneut 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. 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 Verdickermittel 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	<i>n</i> [rpm]	<i>m</i> _{VD} [g]	<i>m</i> _{H₂O} [g]	<i>m</i> _{ges} [g]	<i>w</i> % _{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	4	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*_{H₂O} . . . Masse an Wasser, *m*_{ges} . . . Gesamtmasse an Lösung, *w*%_{VD} . . . Massenanteil Verdickungsmittel

4.3 Lagerungsverhalten

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. Darauffolgend 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 (siehe Abbildung 28). 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.

4.3.1 Pumpversuche

Da im Laufe der Bearbeitung der Dosieraufgabe die Verarbeitbarkeit des Verdickungsmittels angezweifelt wurde und noch folgende Ausführungen die Nutzung einer Schlauchpumpe in Betracht ziehen ließen, wurden Pumpversuche mit einer PONNDORF Classic 25 durchgeführt. Da Hersteller solcher Pumpen für gewöhnlich die Pumpenkennlinien für Wasser angeben, konnten diese für den Polyurethanverdicker nicht genutzt werden. Stattdessen wurden die mit der Pumpe möglichen Fördermengen durch Volumen- und Zeitmessungen bei unterschiedlichen Drehzahlen gemessen und mit den angegebenen Wasserfördermengen verglichen. Das Setup für diese Versuchsreihen ist Abbildung 17 dargestellt. Die Schlauchpumpe wurde für den Versuchsaufbau mit 1" KAMLOCK-Anschlüssen versehen und jeweils eine ca. 2 m lange Saugleitung in Form eines 1" Schlauches mit Sauglanze, sowie eine ca. 6 m langem Druckleitung ebenfalls in Form eines 1" Schlauches angebracht. Die Sauglanze wurde für die Pumptests dann in eines der 200 L-Kunststofffässer mit Verdickungsmittel gegeben und das Ende des Druckschlauches in ein leerer 200 L-Kunststoff gehängt. Danach sind die Pumpversuche gestartet worden in dem am Getriebe der Pumpe die niedrigste Umdrehungsgeschwindigkeit eingestellt und der Hauptschalter der Pumpe betätigt wurde. Begannen die Rotationskörper der Pumpe sich zu drehen, konnte nun über das Getriebe die Drehzahl weiter angepasst und durch ein Sichtfenster die Anzahl der Umdrehungen der Rotationskörper innerhalb einer Minute bestimmt werden.



Abb. 17: Aufbau für Schlauchpumpenversuch

Sobald ein optisch konstanter Volumenstrom am Ende des Druckschlauches erkennbar war und die Drehzahl bestimmt wurde, ist die innerhalb von 3 min geförderte Masse bestimmt worden. Dafür wurde das Verdickungsmittel in einer leer gewogenen 1 L-Probenahmeflasche abgefüllt und danach erneut gewogen. Dieses Vorgehen ist für die Drehzahlen 33, 57, 73 und 97 rpm durchgeführt worden. Der Füllstand des Fasses aus dem

das Verdickungsmittel gefördert wurde, sank während dieser Testreihen und wurde nicht konstant gehalten.

4.4 Recherchearbeit: Literaturarbeit, Fachgespräche und Angebotsanfragen

Neben experimentellen Versuchen wurde zur Förderung des Verdickerungsmittels auch recherchiert. Aus Sicht der Literatur wurden vor allem die gefundenen Beiträgen von EBERHARD SCHLUCKER und GERHARD VETTER in [Vet02], sowie den Lehrinhalten in [Ign15] und [Bie19] genutzt. Darüber hinaus erfolgten Gespräche mit dem Vertrieb verschiedener Pumpen- und Messtechnikhersteller, sowie dem Produzenten des Verdickungsmittels der MÜNZING CHEMIE GMBH. Aber auch das Studium der Datenblätter des Verdickungsmittels floß in die Recherche mit ein. Beispiele für angefragte Hersteller waren die AXFLOW GMBH, ERICH NETZSCH GMBH & Co. HOLDING KG, LUTZ PUMPEN GMBH, VERDER DEUTSCHLAND GMBH & Co. KG, FLUX-GERÄTE GMBH für Pumpentechnik, sowie der SCHWING VERFAHRENSTECHNIK GMBH, ENDRESS+HAUSER (DEUTSCHLAND) GMBH+Co. KG, ABB ASEA BROWN BOVERI LTD für Messtechnik. Die Liste an angefragten Unternehmen könnte an dieser Stelle auch noch weiter fortgeführt werden. Grund für diese Vorgehen war die Hoffnung auf bereits vorhandene Erfahrung im Bereich der Pumpen- und Messtechnik zurück zu greifen und sich in der Umsetzung der Dosieraufgabe beraten zu lassen. Zum Teil wurden dafür auch Angebote bei den Herstellern erfragt, um auch eine preisliche Vorstellung zu bekommen. Beim Hersteller des Verdickermittels sind dessen Verarbeitungsmethoden zum Verdickungsmittel TAFIGEL PUR 85 erfragt und in den Datenblättern vor allem sicherheitstechnischen und physikalisch-chemische Eigenschaften herausgearbeitet worden. Die Ergebnisse dieser Arbeitsmethodik finden sich an verschiedenen Stellen der Auswertung wieder und fließen zu einem größeren Teil in die Bewertungen verschiedener Entscheidungsprobleme unter Abschnitt 5.2 mit ein.

4.5 Risikoanalyse

Die Risikoanalyse nutzt als systematisches Auswerteverfahren verfügbare Informationen um Gefährdungen und Risiken abzuschätzen und zu quantifizieren. Innerhalb dieser Analyse werden Gefährdungen identifiziert, die Ursachen für die Gefährdungen beschrieben und das Risiko abgeschätzt. Das Risiko R als Erwartungswert für einen Schaden in einem bestimmten Zeitraum berechnet sich in Gleichung (13) aus der Schwere S und der zu erwartenden Häufigkeit H . [NKT10]

$$R = S \cdot H \quad (13)$$

R ... Risiko

S ... Schwere

H ... Häufigkeit

Laut der Störfallverordnung (12. BImschV) wird von Anlagenbetreibern neben dem Sicherheitsbericht auch die Darlegung eines Konzeptes zu Verhinderung von Störfällen verlangt. Für die systematische Ermittlung der Gefahren durch Störfälle bei bestimmungsgemäßen und nicht bestimmungsgemäßen Betrieb werden qualitative Methoden und Verfahren wie zum Beispiel das PAAG-Verfahren (HAZOP-Verfahren)

zur Hilfe genommen. Zudem sind Risiken für die betrachteten Störfälle durch (semi-)quantitative Verfahren wie beispielsweise LOPA oder einer Risiko-Matrix nach Anhang II und III der Störfallverordnung zu bestimmen. [Neu10a]

4.5.1 Risikomatrix nach Nohl

Als ein Instrument der Risikoanalyse stellt die Risikomatrix eine heruntergebrochene Auftragung der Schadensschwere S über der Schadenshäufigkeit H in Form einer Tabelle dar. Dabei wird die Häufigkeit eines Schadens in verschiedene Stufen von „Sehr unwahrscheinlich“ bis „Sicher“ und die Auswirkungen nach Schweregrad von „keine Auswirkung“ bis „katastrophale Auswirkung“ eingeteilt. Die Auswirkungen unterscheiden sich zudem in die Kategorien „Personen“, „Umwelt“ und „Sachwerte oder Produktion“. Die Dimension einer solchen Matrix reicht von 4x4 bis 6x6. Durch eine solche Matrix lassen sich Risiken besser darstellen und bewerten und ermöglichen leichteres Festlegen von Maßnahmen hinsichtlich Dringlichkeit und Umfang. Im Bereich des Arbeitsschutzes wird häufig die Risikomatrix nach NOHL verwendet. [Neu10b] Die bei der ALBERDINGK BOLEY LEUNA GMBH verwendete Risikomatrix ist ebenfalls eine nach NOHL entlehnte Risikomatrix und in Abbildung 18 dargestellt.

Risiko-Matrix nach Nohl der Alberdingk Boley Leuna GmbH								
Auswirkungen	Wahrscheinlichkeit							
	Vorkommnisse pro Jahr						Leitwerte	
	1x10 ⁻⁶ -- 1x10 ⁻⁴ (10.000-1.000.000 Jahre)	1x10 ⁻⁴ -- 1x10 ⁻³ (1.000-10.000 Jahre)	1x10 ⁻³ - 1x10 ⁻² (100-1.000 Jahre)	1x10 ⁻² - 1x10 ⁻¹ (10-100 Jahre)	1x10 ⁻¹ - 1x100 (1-10 Jahre)	> 1x100 (> einmal im Jahr)		
	Niemals in der Branche vorgekommen	Einmaliges Vorkommen in der Branche	Einmaliges Vorkommen innerhalb des Unternehmens oder mehr als ein Vorfall in der Branche	Einmaliges Vorkommen innerhalb des Standortes oder wenige Vorfälle innerhalb des Unternehmens	Mehrfach auftretendes Vorkommen innerhalb des Standortes oder jährliche Vorkommen innerhalb des Unternehmens	Mehr als jährlich auftretendes Vorkommen am Standort oder mehrfaches Auftreten des Vorfalls innerhalb des Unternehmens		
	Sehr unwahrscheinlich	Unwahrscheinlich	Möglich	Gelegentlich	Regelmäßig	Sicher		
Auswirkungen auf Personen	Auswirkungen auf die Umwelt	Auswirkungen auf Sachwerte oder Produktion						
Keine Verletzung	Keine Auswirkungen	Keine Auswirkungen	0	0	0	0		
Leichte Verletzung oder leichter Gesundheitsschaden	Geringfügige Auswirkungen	Geringfügiger Schaden	1	0	1	2	3	4
Mäßige Verletzung oder mäßiger Gesundheitsschaden	Mäßige Auswirkungen	Mäßiger Schaden	2	0	2	4	6	8
Schwere Verletzung oder schwere Gesundheitsschaden	Schwere Auswirkung	Schwerer Schaden	4	0	4	8	12	16
Sehr schwere Verletzung	Sehr schwere Auswirkung	Sehr schwerer Schaden	8	0	8	16	24	32
Katastrophale Verletzung	Katastrophale Auswirkung	Katastrophaler Schaden	9	0	9	18	27	36
Risikostufe	Risikofaktor	Notwendige Erstmaßnahmen				Maßnahmen notwendig		
Akutes Risiko	Jede Situation die eine unvermeidbare Gefahr für Menschen oder die Umwelt darstellt.	Sofortige Maßnahmen zu Verringerung des Risikos notwendig, bis hin zum außer Betrieb nehmen bzw. Notabfahren einer Anlage.				Maßnahmen notwendig		
		Sofortige Benachrichtigung des Werkleiters, Produktionsleiters und des Leiters der EHS-Abteilung. Eine Ergebnisuntersuchung muss nach dem Grad der Gefährdung!						
Hoch - dringend	20 - 45	Sofortige Benachrichtigung des Werkleiters, Produktionsleiters und des Leiters der EHS-Abteilung. Für Gefahren, deren Wahrscheinlichkeit "sicher" oder "regelmäßig" eingestuft sind, müssen Übergangslösungen zur Reduzierung der Gefährdung auf ein mittlages Risiko schnellstmöglich, spätestens jedoch innerhalb von 15 Tagen umgesetzt werden, wenn nicht eine endgültige Maßnahme oder eine Änderung das Risiko sicher minimiert oder ausschließt. Die Wirksamkeit von Übergangslösungen muss regelmäßig überprüft werden. Innerhalb von 7 Tagen nach Entdecken des Risikos ist eine erste Besprechung mit dem Management durchzuführen um die endgültigen Maßnahmen und die Übergangslösung zur Risikominimierung festzulegen.				Durchführung der Maßnahmen, außer Betrieb nehmen oder Änderungen sind innerhalb von 30 Kalendertagen nach der ersten Managementbesprechung umzusetzen. Regelmäßige Überprüfung (nicht länger als 3 Monate) durch das Management bis die Maßnahmen umgesetzt sind.		
	Hoch	Für Gefahren, deren Wahrscheinlichkeit "sicher" oder "regelmäßig" eingestuft sind müssen Übergangslösungen, zur Reduzierung der Gefährdung, auf ein mittlages Risiko sind innerhalb von 30 Tagen umgesetzt werden, wenn nicht eine endgültige Maßnahme oder eine Änderung das Risiko sicher minimiert oder ausschließt. Innerhalb von 30 Tagen nach Entdecken des Risikos ist eine erste Besprechung mit dem Management durchzuführen um die endgültigen Maßnahmen und die Übergangslösung zur Risikominimierung festzulegen.				Durchführung der Maßnahmen, außer Betrieb nehmen oder Änderungen sind innerhalb von 6 Monaten nach der ersten Managementbesprechung umzusetzen. Regelmäßige Überprüfung (nicht länger als 6 Monate) durch das Management bis die Maßnahmen umgesetzt sind.		
Mäßig	5 - 9	Für Gefahren, deren Wahrscheinlichkeit "sicher" oder "regelmäßig" eingestuft sind müssen Übergangslösungen, zur Reduzierung der Gefährdung, auf ein mittlages Risiko sind innerhalb von 30 Tagen umgesetzt werden, wenn nicht eine endgültige Maßnahme oder eine Änderung das Risiko sicher minimiert oder ausschließt. Innerhalb von 30 Tagen nach Entdecken des Risikos ist eine erste Besprechung mit dem Management durchzuführen um die Maßnahmen zur Risikominimierung festzulegen.				Durchführung der Maßnahmen, außer Betrieb nehmen oder Änderungen sind innerhalb von 1 Jahr nach der ersten Managementbesprechung umzusetzen. Regelmäßige Überprüfung (nicht länger als 6 Monate) durch das Management bis die Maßnahmen umgesetzt sind.		
	3 - 4	Ein niedriges Risiko ist tolerierbar und kann vom Standortleiter akzeptiert werden, jedoch sollten auch hier Möglichkeiten zur Verringerung des Risikos in Betracht gezogen werden. Eine Managementbesprechung ist nur notwendig, wenn interne Vorschriften, wie z.B bei Empfehlungen aus Sicherheitsbetrachtungen oder PSM Audits, dies verlangen.				Durchführung der Maßnahmen ist innerhalb von 18 Monaten nach der ersten Managementbesprechung umzusetzen oder Genehmigung eines Ablaufplanes über die 18 Monate hinaus mit regelmäßiger Überprüfung durch das Management.		
Geringfügig	0 - 2	Ohne Einschränkungen akzeptierbar				Keine Maßnahmen notwendig		

Abb. 18: Risikomatrix nach NOHL der ALBERDINGK BOLEY LEUNA GMBH

4.5.2 HAZOP-Verfahren kombiniert mit Risikomatrix

Eine weit verbreitete, strukturierte Methode der Gefahrenanalyse ist das in der IEC 61882:2016 bzw. der DIN EN 61882:2017 beschriebene HAZOP-Verfahren (Hazard And Operability) zu deutsch PAAG-Verfahren (Prognose, Auffinden der Ursachen, Abschätzung der Auswirkungen und Gegenmaßnahmen). Das Verfahren eignet sich für die qualitative Gefahrenuntersuchung von Prozessanlagen mit dem Ziel mögliche Gefahren oder Abweichungen der angedachten Funktionalität des Systems festzustellen. Durch schrittweises Prüfen einzelner Prozessparameter und Nutzung von Leitwörtern zur Beschreibung der Abweichung (vgl. Tabelle 8) wird somit die Betriebsfähigkeit des Prozesses bewertet und anschließend Gegenmaßnahmen erarbeitet. [Hau20, Sch20, Ken17] In der folgenden Übersicht in Abbildung 19 ist ein grundlegendes Vorgehen für eine solche Analyse erfasst.

Tab. 8: Parameter und Leitwörter für die Beschreibung von Abweichungen [Ken17]

Grundparameter	
Durchfluss, Füllstand, Temperatur, Druck, Zusammensetzung, Reaktion	
weitere mögliche Parameter	
Mischen, Rühren, Transferieren, Viskosität, Zugabe, Trennung, Zeit, Phase, Geschwindigkeit, Partikelgröße, Messung, Steuerung, pH-Wert, Sequenz, Signal, Start/Stop, Service, Wartung	
Leitwörter	Bedeutung der Leitwörter
Nein (nicht, nichts)	Konstruktionsabsicht wird nicht erzielt
Mehr (hoch, mehr von)	quantitative Erhöhung des Parameters
Weniger (tief, weniger von)	quantitative Verringerung des Parameters
Ebenfalls (zusätzlich)	eine weitere Aktivität findet statt
Teil von	lediglich ein Teil der Konstruktionsabsicht wird erzielt
Umgekehrt	logisches Gegenteil der Konstruktionsabsicht tritt ein
Anders als (anders)	komplette Substitution, eine andere Aktivität wird genutzt
Alternativ	nutzbar für Durchflüsse, Transfers, Quellen und Ziele
Davor/Danach	der Schritt, oder ein Teil davon, ist außerhalb einer Sequenz betroffen
Früh/Spät	das Timing unterscheidet sich von der Planung
Schneller/Langsamer	der Schritt wird nicht in der richtigen Geschwindigkeit ausgeführt

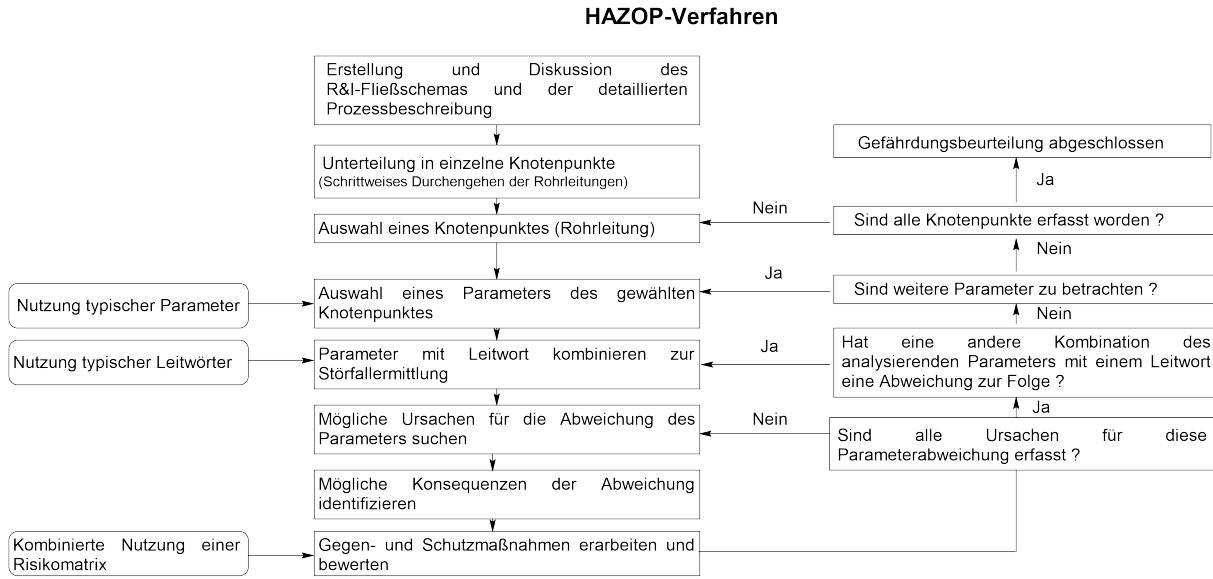


Abb. 19: Schema des HAZOP-Verfahrens, erstellt nach [Ken17, Sch20]

Im Regelfall wird dieses Verfahren mit einem interdisziplinärem Team durchgeführt und auf Basis deren Erfahrungen die möglichen Gefahren, Änderungen und Maßnahmen erarbeitet. In dieser Arbeit wird sich jedoch in verkürzter Form dennoch mit einer solchen Analyse beschäftigt. Umgesetzt wird das Ganze in Form einer Tabelle, ähnlich wie sie in Abbildung 20 dargestellt ist.

Item	Abweichung	Ursachen	Folgen	Matrix	S	UL	UR = S * UL	Schutzmaßnahmen (CP)	ML = UL * n * CP	MR = S * ML	Aktionen
1.1	High level	1. Wasserfüllen endet nicht automatisch, Bedienfehler	1. Druckerhöhung bis 12 bar; Übersteigt Designdruck von 6 bar; Behälter zerplatzt; Medium tritt aus; Stoffkontakt; Gesundheitsschaden mit lebenslängen Folgen	S	8	4	32	1. Füllstandsmessung (Waage) an RA 500.00 mit Alarm und Operator handelt 2. Füllstandsmessung (Waage) an RA 500.00 mit Schaltung Zuleitung schließen 3. Überfüllsicherung mit Schaltung bei 95% Füllgrad Zuleitung schließen 4. Druckmessung mit Schaltung bei Druck hoch (5,5 bar Behälterinnendruck)	0	0	
			2. Druckerhöhung bis 12 bar; Übersteigt Designdruck von 6 bar; Behälter zerplatzt; Medium tritt aus; Stoffaustritt mit Umweltschaden	E	4	4	16	1. Füllstandsmessung (Waage) an RA 500.00 mit Alarm und Operator handelt 2. Füllstandsmessung (Waage) an RA 500.00 mit Schaltung Zuleitung schließen 3. Überfüllsicherung mit Schaltung bei 95% Füllgrad Zuleitung schließen 4. Druckmessung mit Schaltung bei Druck hoch (5,5 bar Behälterinnendruck)	0	0	
		2. Wasserfüllen endet nicht automatisch, Ausfall PLS		E	4	4	16	1. Füllstandsmessung (Waage) an RA 500.00 mit Alarm und Operator handelt 2. Füllstandsmessung (Waage) an RA 500.00 mit Schaltung Zuleitung schließen 3. Überfüllsicherung mit Schaltung bei 95% Füllgrad Zuleitung schließen 4. Druckmessung mit Schaltung bei Druck hoch (5,5 bar Behälterinnendruck)	0	0	

Abb. 20: Ausschnitt einer HAZOP-Tabelle eines Behälters mit Bewertung durch eine Risikomatrix nach NOHL

Die in Abbildung 20 enthält neben der HAZOP-Analyse die Bewertung der Folgen und der Maßnahmen durch eine Risikomatrix nach NOHL. Hierfür wird zunächst in der Spalte *Matrix* festgelegt ob die Abweichung ein Risiko für die Sicherheit von

Personen (*S - Safety*) oder für die Umwelt (*E - Environment*) darstellt. In der Spalte *S* für *severity* wird dann aus der Matrix die Schwere der Abweichung und in der folgenden Spalte die nicht reduzierte Eintrittswahrscheinlichkeit (*UL - unmitigated likelihood*) eingetragen. Aus dem Produkt beider Werte ergibt sich in der Risikomatrix ein Zahlenwert, der die *unmitigated risk*, das nicht reduzierte Risiko darstellt und in die Spalte *UR* eingetragen wird. Je nach sich ergebenden Risiko kann anhand der einer Skala (vgl. Abbildung 18) die Risikostufe ermittelt und farblich kenntlich gemacht werden. Um nun das Risiko der mit dem HAZOP-Verfahren bestimmten Abweichung zu senken, kann die Schwere der eintretenden Abweichung nicht angepasst werden. Jedoch kann durch das Einführen von Schutzmaßnahmen die Wahrscheinlichkeit des Eintretens der Abweichung gesenkt werden. Pro Maßnahmen können hierfür Creditpoints (CP) vergeben werden, welche den Wert der reduzierten Eintrittswahrscheinlichkeit (*ML - mitigated likelihood*) senken lassen. Eine Maßnahme kann dabei nie mehr als einen CP wert sein. Im Beispiel in Abbildung 20 wird dies durch vier Maßnahmen umgesetzt und ergeben somit eine reduzierte Eintrittswahrscheinlichkeit *ML* mit dem Wert „0“. Das sich daraus ergebende reduzierte Risiko (*MR - mitigated risk*) beläuft sich daraus folgend ebenfalls auf den Wert „0“ und es besteht laut Skala nur noch ein geringfügiges Risiko.

5 Ergebnisse

In diesen Abschnitt werden die Ergebnisse zur Verdickungsmitteldosierung dargestellt. Nach Verifizierung des Problems und dessen Beschreibung erfolgen die Ergebnisse der Untersuchungsmethoden, sowie Entscheidungsverfahren für die Verfahrensplanung und schlussendlich die technische Umsetzung einer Dosiervariante mit einer Gefährdungsbeurteilung.

5.1 Verifizierung und Analyse des Dosierproblems

Im ersten Schritt wurde der Ist-Zustand der Dosierung erfasst, sowie die Gegebenheiten im Werk analysiert. Danach erfolgte das Zusammentragen der Anforderungen an eine halbautomatisch umgesetzte Dosierung.

5.1.1 Ist-Zustand: Produktionsweise und aktuelles Dosierverfahren

Das herzustellende Produkt für das eine halbautomatische Verdickerdosierung umgesetzt werden soll nennt sich *AC 548*. Es ist eine Acrylat-Copolymer Dispersion und kann als Betonschutz, Fassadenfarben, wärmeaktivierbare Klebstoffe, Putze und Buntsteinputze verwendet werden. Produziert wird *AC 548* im Batch-Betrieb à 14 t und die Planung erfolgt vorzugsweise in Kampagnen. [Alb22] Derzeit wird für dieses Produkt das Verdickungsmittel *Rheobyk-H 3300 VF* der BYK-CHEMIE GMBH eingesetzt, welches jedoch im Laufe des Jahres 2022 durch Einstellen der Produktion mit dem Verdickungsmittel *TAFIGEL PUR 85* der MÜNZING CHEMIE GMBH substituiert werden soll. Die aktuelle Dosierung beläuft sich dabei auf die Nutzung eines 0 L-Kunststofffasses als Dosierbehälter. Hierfür werden zunächst 22 kg des Verdickungsmittels in einem „Transportfass“ im Chemikalienlager abgewogen und dann am entsprechenden Einstelltank bereit gestellt. Für den Start der Dosierung wird das „Dosierfass“, welches mit einem Dosierloch an der Fassunterseite versehen ist, in das Fallschutzgitter des Mannlochs gehängt und der Inhalt des Transportfasses in das Dosierfass gekippt. Schematisch dargestellt ist diese Dosierung in Abbildung 21.

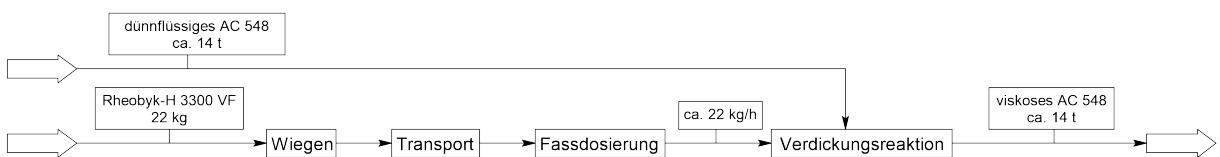


Abb. 21: Aktuelle Dosierung des Verdickungsmittels *Rheobyk-H 3300 VF*

Vorteile dieses Dosierverfahrens sind die einfache und kostengünstige Umsetzung. Dem entgegen steht jedoch, dass neben dem „Dosierloch“ und dem Fass selbst keine Einstellparameter vorhanden sind und der Dosierstrom weder messtechnisch erfasst noch im Prozessleitsystem (PLS) einsehbar ist. Zudem kann die Umsetzung für die Dosierung nur bedingt hygienisch erfolgen wie unter anderem in Abbildung 22 zu erkennen ist.



Abb. 22: Fotografien des Dosier- und des Transportfasses

5.1.2 Soll-Zustand: Anforderung an die Dosierung

Die Anforderungen an eine automatisierte Dosierung gliedern sich in mehrere Interessensgruppen auf. Beginnend mit der *Technik*, sollen unter diesem Begriff jegliche Anforderungen der Prozess- und Sicherheitstechnik beschrieben sein. Beispielsweise fallen darunter die Dosierrate, die Dosiergenauigkeit und der zu beachtende Ex-Schutz. Die zweite Gruppierung beschreibt die Anforderungen der *Produktion*, sprich die Interessen der auszuführenden Chemiefacharbeiter in der Anlage. Eine Forderung stellt dabei die einfache Bedienbarkeit dar. Zuletzt soll jedoch auch die *Wartung* entsprechend leichtgängig und der Verschleiß des Dosiersystems gering sein. Die Forderungen aus den verschiedenen Perspektiven sind in Tabelle 9 zusammenfasst und wurden durch erfragten des Personals ermittelt und durch vorgegebenen Prozessparametern festgelegt.

Tab. 9: Anforderungen an die Verdickungsmittel-Dosierung

Technik	Produktion	Wartung
Dosierrate: 22 bis 44 $\frac{\text{kg}}{\text{h}}$	einfache Bedienbarkeit	geringer Verschleiß
Dosiergenauigkeit: $\pm 200 \text{ g}$	leichte Reinigung	leichte Wartung
Ex-Schutz: Zone 2	Zeitersparnis	
Risiko: minimal		
Verdickungsmittel: TAFIGEL PUR 85		
Prozessleitsystem: im PLS einsehbar		
Adaptierbarkeit: für weitere Tanks adaptierbar		
Aufstellungsort: siehe Abbildung 23		
Einleitung: siehe Abbildung 24		

Da weder die geforderte Dosiergenauigkeit erfasst, noch der Dosierstrom in der aktuellen Dosierung gemessen wird, ist eine signifikante Differenz zwischen Ist- und Soll-Anforderung an die Dosierung aus Perspektive der Technik erfüllt und das Dosierproblem somit als solches verifiziert. Die Perspektive der Produktion unterstützt diese Verifikation, da Anforderungen aufgrund der benötigten Vorbereitungszeit und der Sauberkeit der Dosierprozesses derzeit nicht erfüllt werden. Aus Sicht der Wartung besteht kein Handlungsbedarf.



Abb. 23: Ort für Dosierung



Abb. 24: Flansch für eingehenden Dosierstrom

5.1.3 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen

In der zu planenden 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 der unter Abschnitt 3 formulierten Beschreibung der Assoziativverdicker. [Mun14] Die Ergebnisse der Viskositätsmessungen gliedern sich nach der Durchführung in Abschnitt 4 in die Verifizierung der angegebenen Viskosität, der Untersuchung der Temperaturabhängigkeit, der Untersuchung der Verdünnungsabhängigkeit und in Pumpversuche. Beginnend mit der Verifizierung der angegebenen Viskosität sind in Abbildung 25 die gemessenen Viskositäten des TAFIGEL PUR 85 und des Rheobyk-H 3300 VF dargestellt.

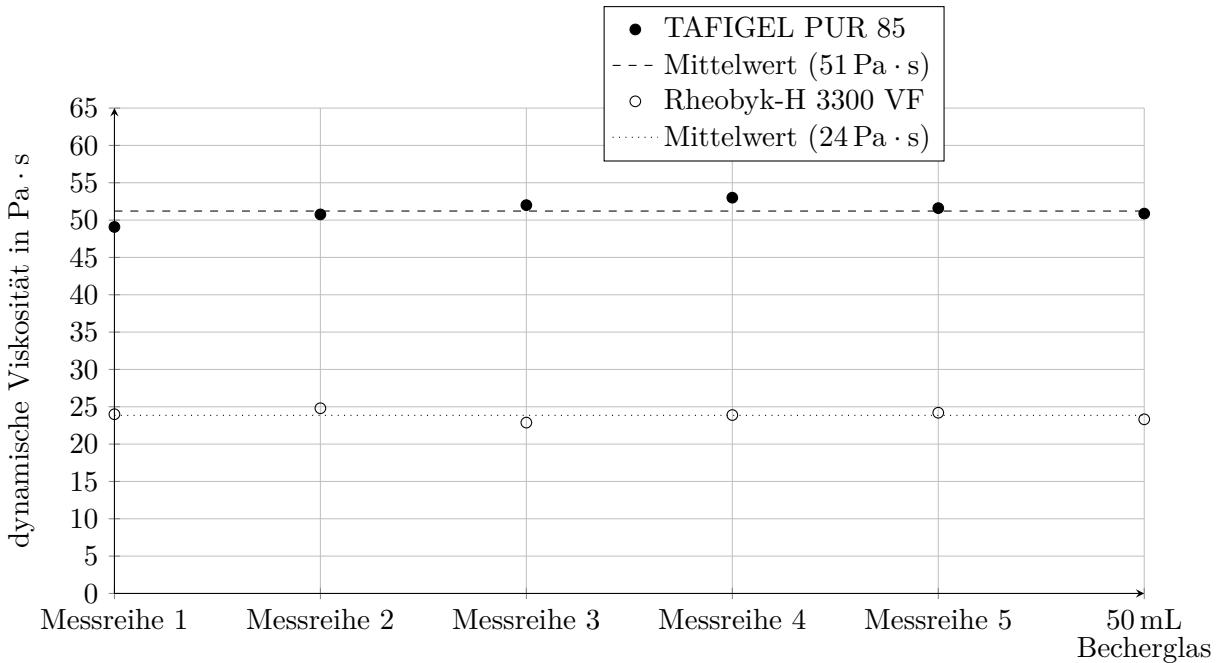


Abb. 25: Dynamische Viskositäten der Verdickungsmittel TAFIGEL PUR 85 und Rheobyk-H 3300 VF

Die sich aus den Messwerten ergebenden Mittelwerte ergeben eine Viskosität für

TAFIGEL PUR 85 mit $51 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ und für Rheobyk-H 3300 VF $24 \text{ Pa} \cdot \text{s}$. Zum Vergleich: Die Viskosität des TAFIGEL PUR 85 ist im Sicherheitsdatenblatt unter [Mun20] mit rund $35 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ angegeben. Auf Nachfrage beim Hersteller ist diese Schwankung produktionsbedingt und beeinträchtigt die Wirksamkeit des Verdickungsmittels nicht. Ebenfalls zu erkennen ist, dass die Messwerte Abweichungen vom Mittelwert aufzeigen. Statistisch ergeben sich daraus relativen Standardabweichungen für die Messwerte des TAFIGEL PUR 85 mit 2,4 % und für das Rheobyk-H 3300 VF mit 2,6 %. Die Messungen im 50 mL, statt im 600 mL Becherglas zeigten keine maßgeblichen Unterschiede. Eine weitere Untersuchung beschäftigte sich mit der Temperaturabhängigkeit des Verdickungsmittels. Dafür wurde zum einen der Verlauf der Dichte in Abhängigkeit von der Temperatur für das TAFIGEL PUR 85 bei der MÜNZING CHEMIE GMBH angefragt. Die erhaltenen Daten sind in Abbildung 26 zu sehen.

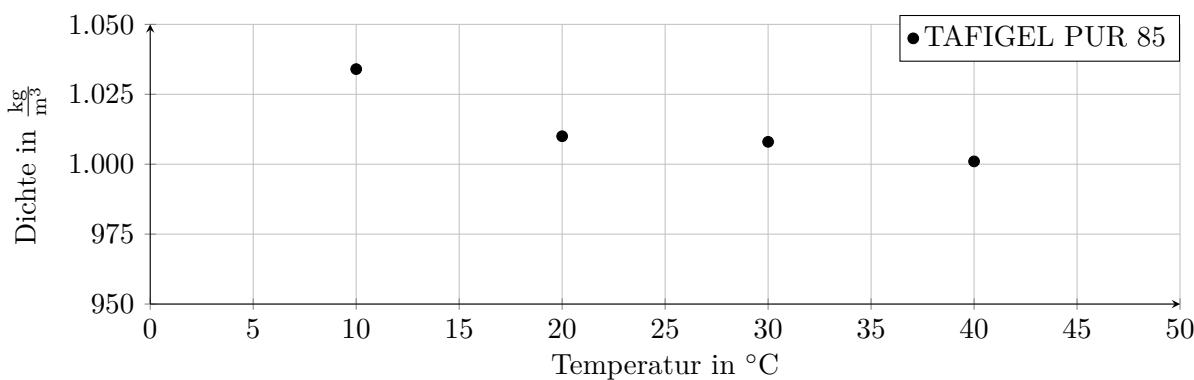


Abb. 26: Dichte des TAFIGEL PUR 85 in Abhängigkeit von der Temperatur

Zu erkennen ist, dass sich die Dichte im Bereich zwischen 10 und 40 °C mit steigender Temperatur verringert. Der Verlauf und der Umfang der Daten lässt nicht eindeutig auf einen linearen Zusammenhang zwischen Dichte und Temperatur schließen, jedoch ist erkennbar, dass ein signifikanter Unterschied in der Dichte für 10 und für 40 °C besteht. Im Bereich zwischen 20 und 30 °C bleibt die Dichte hingegen konstant. Aus den Daten wurde ermittelt, dass zwischen den Messungen eine relative Standardabweichung von 1,4 % vorliegt. Neben dem Erfragen des Zusammenhangs zwischen Dichte und Temperatur ist auch die Abhängigkeit der Viskosität von der Temperatur untersucht worden. Der Grund hierfür liegt in der zuvor bestimmten Viskosität des Verdickungsmittels bei rund $50 \text{ Pa} \cdot \text{s}$. Da im Regelfall bei der ALBERDINGK BOLEY LEUNA GMBH keine so hohen Viskositäten gefördert werden, bot sich die Überlegung an die Viskosität durch Wärmezufuhr zu reduzieren. Das Ergebnis der dafür genutzten Versuchsreihe ist in Abbildung 27 zu finden. Darin lässt sich erkennen, dass der Zusammenhang zwischen Viskosität und Dichte in diesem Temperaturbereich eine Linearität mit einem Bestimmtheitsmaß von 99,6 % aufweist. Mit steigender Temperatur sinkt dabei die Viskosität. Der negative Anstieg lässt zudem darauf deuten, dass bei einer Temperaturerhöhung um 5 K eine Verringerung der Viskosität um $10 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ stattfindet.

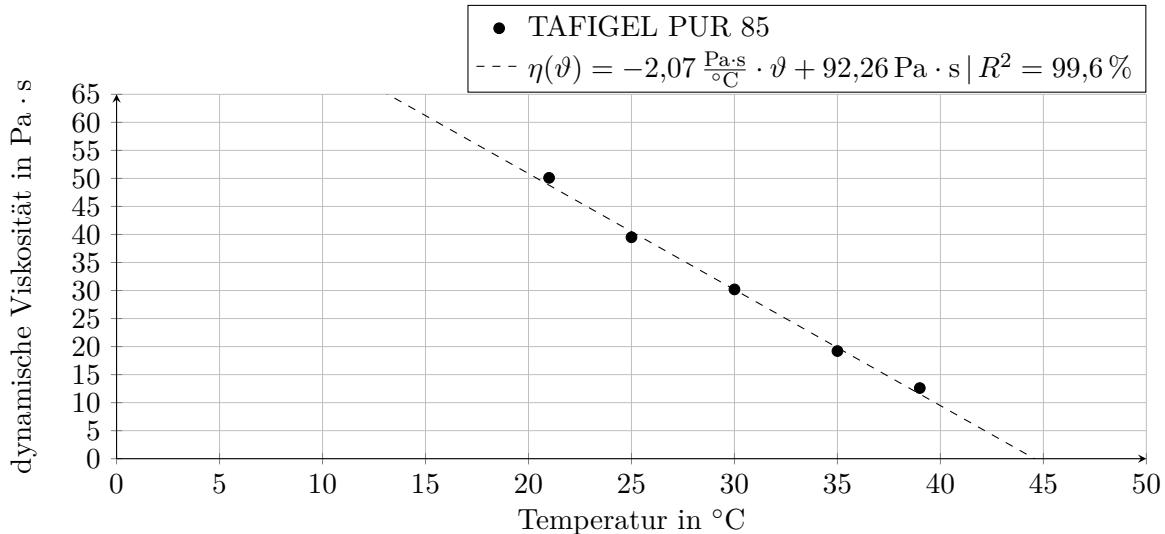


Abb. 27: Dynamische Viskosität des TAFIGEL PUR 85 in Abhängigkeit von der Temperatur

Zusätzlich wurde neben dem Aspekt der Erwärmung des Verdickungsmittels wurde auch der Effekt der Verdünnung auf die Viskosität untersucht. Es wird erwartet, dass mit sinkender Konzentration an Verdickungsmittel die Viskosität des Verdickungsmittels ebenfalls sinkt. In Abbildung 28 sind die Messergebnisse der Viskositäten beider Verdickungsmittel TAFIGEL PUR 85 und Rheobyk-H 3300 VF dargestellt. In separaten x-Achsen sind der Anteil an Verdickungsmittel und der Anteil an reiner Aktivsubstanz der Verdickungsmittels aufgetragen.

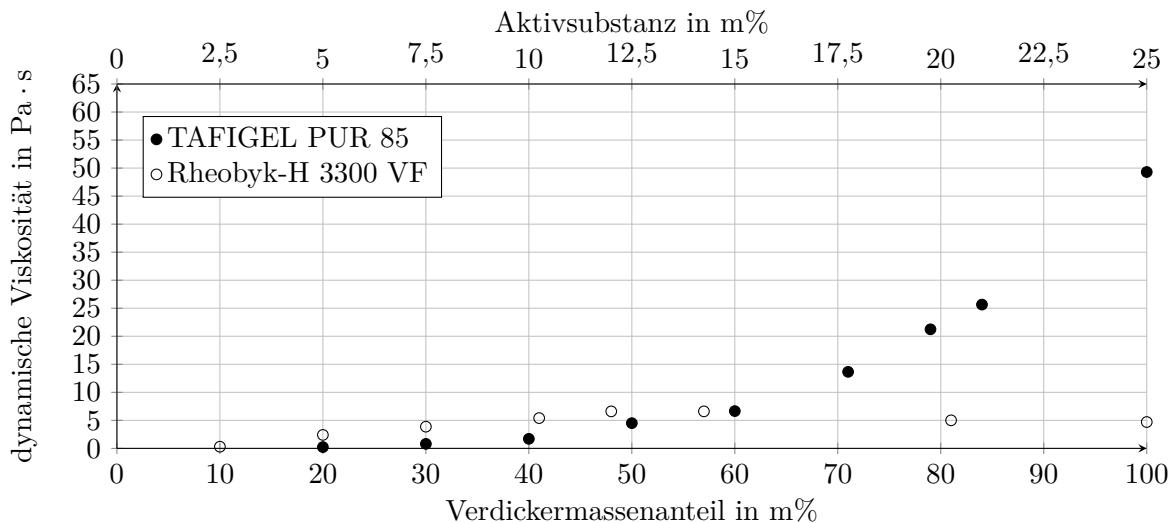


Abb. 28: Dynamische Viskositäten der Verdickungsmittel TAFIGEL PUR 85 und Rheobyk-H 3300 VF in Abhängigkeit vom Massenanteil des Verdickungsmittels bzw. dem Anteil an Aktivsubstanz

Durch dieses Diagramm zeigt sich, dass sich beide Verdickungsmittel in ihrem Verdünungsverhalten deutlich unterscheiden. Während das Rheobyk-H 3300 VF ab 40 m% eine

vergleichsweise stabile Viskosität in Abhängigkeit von der Verdünnung aufzeigt, lässt sich für das TAFIGEL PUR 85 eine starke Abhängigkeit zwischen Viskosität und Verdickermassenanteil festzustellen. Auffallend ist zudem, dass die Viskosität des Rheobyk-H 3300 VF im Bereich zwischen 50 und 60 m% höher ist als mit einem Verdickeranteil von 100 m%.

Um die Lagerungsfähigkeit des TAFIGEL PUR 85 zu überprüfen wurde vom 08.11.2021 bis zum 08.12.2021 eine vierteilige Bilderreihe aufgenommen, um eine mögliche Sedimentation des emulgierten Polymers im Verdickungsmittel festzustellen. Diese Bilderreihe ist Abbildung 29 zu sehen und die abgelesenen Volumina in Tabelle 10 zusammengefasst.



Abb. 29: Fotografien der offenen Lagerung



Abb. 30: Fotografie der Rahmschicht

In den Bildern des Versuches ist die Volumenabnahme des Verdickungsmittels über die Zeit festzustellen. Das Bild am Tag 9 zeigt, dass das Polymer des Verdickungsmittels zum Teil an der Zylinderwand haften bleibt. Im Verlauf der Zeit verändert sich das anhaftende Polymer von einem milchigen-weißen zu einer durchsichtigen Schicht, welche am Tag 30 noch durch Schlieren erkennbar sind. Des Weiteren ist ab der Beobachtung an Tag 9 auch die Bildung einer „Rahmschicht“ zu beobachten, welche auch in [Mun14] beschrieben ist (vgl. Abbildung 30). Der Hersteller rät für diese Beobachtung in [Mun14] zum Aufrühren des Verdickungsmittel vor der Nutzung. Derartige Veränderungen sind bei geschlossener Lagerung des TAFIGEL PUR 85 nicht zu erkennen.

Tab. 10: Volumina des Verdickungsmittels bei offener Lagerung

Datum	08.11.2021	11.11.2021	17.11.2021	08.12.2021
Tag	0	3	9	30
Volumen [mL]	150	150	125	80

Die im Zylinder übriggebliebenen 80 mL des TAFIGEL PUR 85 sind anschließend mit einer nicht definierten Wassermenge verdünnt und eine Viskosität von rund 3000 mPa · s bestimmt worden. Zusätzlich wurde mittels Trockenschrank und Waage ein Feststoffgehalt von 11 m% ermittelt und die Ergebnisse mit Abbildung 28 verglichen und ließen sich verifizieren. Daraus ließ sich ebenfalls Ablesen, dass die angemischte Probe einem Verdickungsmittelanteil von ca. 44 m% entspricht. Die optische Erscheinung der Probe am 08.12.2021 und am 08.02.2021 ist in Abbildung 31 aufgezeigt und wiesen keine makroskopischen Unterschiede auf.

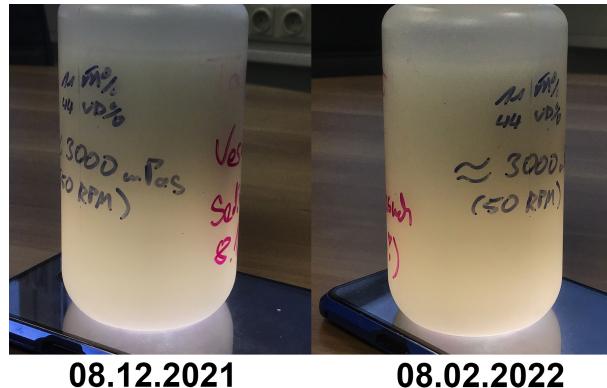


Abb. 31: Makroskopischer Vergleich des verdünnten TAFIGEL PUR 85

Im Laufe der Überlegungen zur Umsetzung der Dosierung wurde die Möglichkeit der Dosierung mit einer Pumpe in Betracht gezogen. Durch die hohe Viskosität und den Anforderungen an Sauberkeit und Wartung, sollte zunächst die Pumpbarkeit des TAFIGEL PUR 85 mit einer Schlauchpumpe überprüft werden. Die Ergebnisse der Massenströme bei verschiedenen Drehzahlen ist im Diagramm unter Abbildung 32 gezeigt. Zum Vergleich ist ebenfalls Pumpenkennlinie bei der Förderung Wasser mit einer Temperatur von 20 °C und einem Druck von 2 bar dargestellt. Diese bestimmte sich aus der vom Hersteller angegebenen Kennlinie für den Volumenstrom in [Pon20].

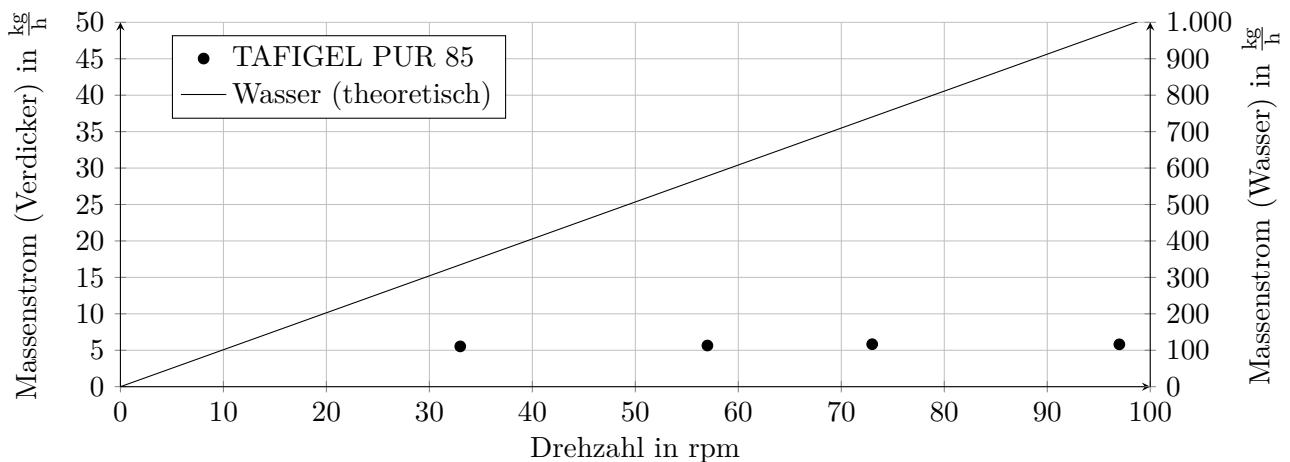


Abb. 32: Massenstrom in Abhängigkeit von der Drehzahl für TAFIGEL PUR 85 und Wasser mit einer PONNDORF P CLASSIC 25 Schlauchpumpe

Im Diagramm ist zu sehen, dass der Verlauf des theoretisch geförderten Massenstrom an Wasser linear zur Drehzahl steigt. Im Vergleich dazu zeigt sich der gemessene Förderstrom des Verdickungsmittels unabhängig von der Drehzahl konstant bei ca. 5 bis 6 $\frac{\text{kg}}{\text{h}}$. Es wäre zu erwarten gewesen, dass für das Verdickungsmittel ähnlich wie bei der Kennlinie für Wasser mit steigender Drehzahl der Massenstrom steigt. Zusätzlich dazu sind die Dimensionen der Förderströme zwischen Wasser und Verdickungsmittel komplett unterschiedlich. Dies ist unter anderem an den verschiedenen Skalen der beiden y-Achsen zu erkennen. Da die getestete Pumpe zunächst nur zum Testen der Pumpfähigkeit genutzt wurde, sind

weitere Auswertungen zum volumetrischen Wirkungsgrad erfolgt. Da keine Daten bezüglich dieses Fluids bei dieser Schlauchpumpe vorliegen, wird zunächst aufgrund der großen Viskositätsunterschiede zwischen Wasser und TAFIGEL PUR 85 angenommen, dass das Verdrängungsvolumen der Förderung von Wasser einem volumetrischen Wirkungsgrad von 100 % entspricht.

Die Berechnung des volumetrischen Wirkungsgrades erfolgt gemäß Gleichung (8), wobei der theoretische Volumenstrom dem vom Hersteller angegebenen Volumenstrom für Wasser bei 2 bar entspricht. In Gleichung (14) ist ein Beispiel für eine solche Berechnung dargestellt und die Ergebnisse sind in Tabelle 11 und Abbildung 33 zusammengefasst und veranschaulicht.

$$\eta_V = \frac{\dot{V}}{\dot{V}_{\text{theo}}} = \frac{\dot{V}_{\text{VD}}}{\dot{V}_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{\dot{m}_{\text{VD}} \cdot \rho_{\text{H}_2\text{O}}}{\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \rho_{\text{VD}}}$$

$$\eta_V(33 \text{ rpm}) = \frac{5,5 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{335 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 1040 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 1,64 \%$$
(14)

Tab. 11: Ergebnisse der Berechnung des volumetrischen Wirkungsgrades für TAFIGEL PUR 85 in Bezug auf Wasser für eine PONNDORF P CLASSIC 25

n [U/min]	\dot{m}_{VD} [kg/h]	$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}$ [kg/h]	ρ_{VD} [kg/m³]	$\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ [kg/m³]	η_V [%]
33	5,5	335			1,64
57	5,7	578			0,99
73	5,8	740	1040	1000	0,78
97	5,8	984			0,59

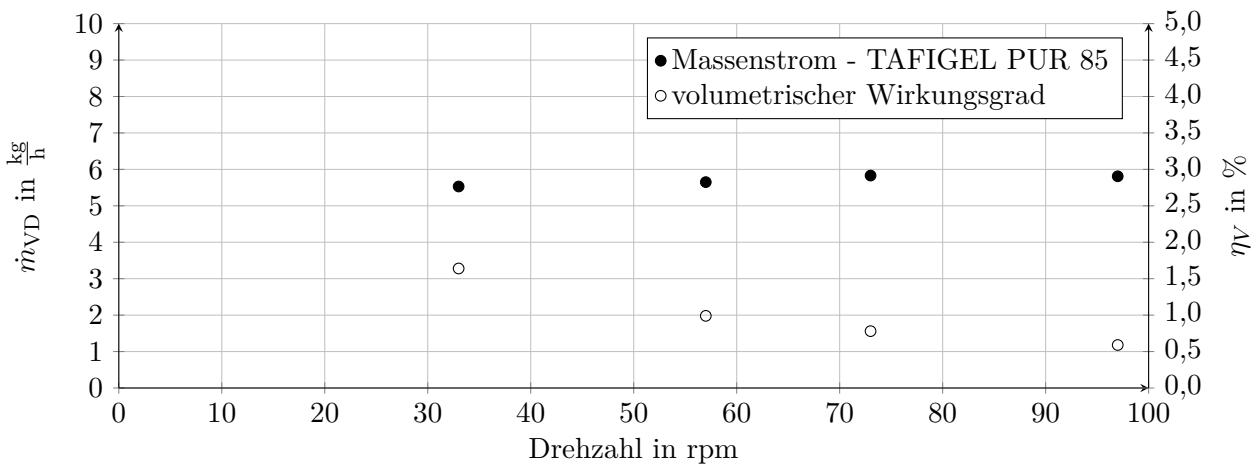


Abb. 33: Massenstrom und Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Drehzahl für TAFIGEL PUR 85 mit einer PONNDORF P CLASSIC 25 Schlauchpumpe

Aus der Bestimmung des volumetrischen Wirkungsgrades für verschiedene Drehzahlen lässt sich aufzeigen, dass mit steigender Drehzahl und damit steigendem Förderstrom der volumetrische Wirkungsgrad abnimmt. Da die Pumpe nicht unter 33 rpm einstellbar war,

stehen deshalb auch keine Messwerte unterhalb dieser Drehzahl zur Verfügung. Ansonsten bewegt sich der volumetrische Wirkungsgrad für Drehzahlen zwischen 33 bis 97 rpm für die untersuchte Schlauchpumpe im Bereich zwischen rund 0,6 bis 1,6 %.

5.2 Entscheidungsprobleme

Um nun eine Dosierung für das Verdickungsmittel TAFIGEL PUR 85 umzusetzen und den angegebenen Forderungen in Tabelle 9 gerecht zu werden ist eine Reihe an Entscheidungen zu treffen. Darunter zählen Teilprobleme wie der grundlegende Dosierablauf, die Auswahl des Gebindes, die Bestimmung des Messverfahrens, sowie weitere Punkte. Nachdem nun das Problem der Dosierung in den Abschnitten 5.1 und 5.1.3 verifiziert und analysiert wurde, sollen nun im folgenden Abschnitt Lösungsvarianten erarbeitet und Entscheidungen diesbezüglich getroffen werden. Das Entscheidungsverfahren nach GRÜNING und KÜHN ist hierfür abgewandelt worden, da sich Verifizierung und Analyse nicht auf Entscheidungsprobleme bezogen haben. Dennoch erfolgt die weitere Bearbeitung der Teilprobleme der Verdickungsmitteldosierung nach den Schritten 3 bis 7 des Verfahrens (siehe Abschnitt 4.1).

5.2.1 Entscheidung für ein Grundverfahren

Die möglichen Verfahren für die Umsetzung der Dosierung ergeben sich aus den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen in Abschnitt 5.1.3. Da das Verdickungsmittel in einem Gebinde kommt, muss es zunächst aus dem Gebinde gefördert werden. Dabei ist es unerheblich, welche Verarbeitung das Verdickungsmittel erfährt, da eine Dosierung direkt aus einem Gebinde durch die geringe Fließfähigkeit und den Abstand zum Einstelltank nicht sinnvoll möglich ist. Daher wird für jedes sich ergebende Verfahren die Nutzung einer Pumpe in einem Teil des Verfahrens vorausgesetzt.

Aus dieser Voraussetzung und den Untersuchungsergebnissen ergeben sich somit folgende vier Verfahrensvarianten:

1. ohne Vorbereitung
2. mit Erwärmung des Verdickungsmittels und warmer Förderung
3. mit Verdünnen des Verdickungsmittels
4. mit Verdünnen und Erwärmen des Verdickungsmittels, sowie warmer Förderung

Diese Verfahren sind jeweils in Form eines Grundfließbildes in Abbildungen 34 bis 37 dargestellt.

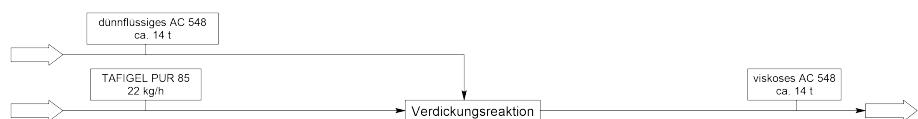


Abb. 34: Variante 1: ohne Vorbereitung

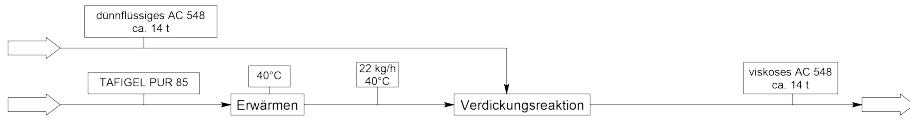


Abb. 35: Variante 2: mit Erwärmung des Verdickungsmittels und warmer Förderung

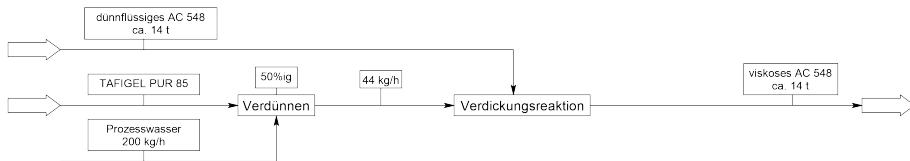


Abb. 36: Variante 3: mit Verdünnen des Verdickungsmittels

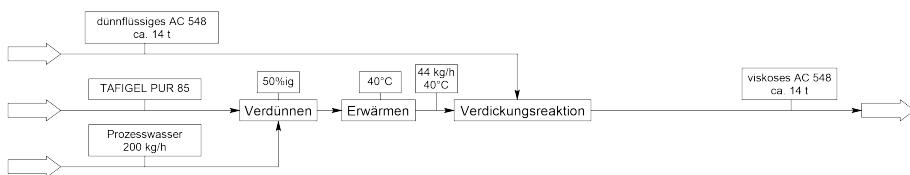


Abb. 37: Variante 4: mit Verdünnen und Erwärmen des Verdickungsmittels, sowie warmer Förderung

In Tabelle 12 sind nun in Form einer Entscheidungsmatrix die vier verschiedenen Verfahrensvarianten verschiedenen Kriterien gegenübergestellt. Hierbei erfolgte subjektiv eine Einschätzung der Konsequenzen des Verfahrens anhand des jeweils betrachteten Kriteriums. Bis auf die *Anzahl der Prozessschritte* gilt hierbei je höher der angegebene Konsequenzwert ist, desto höher fällt die Gewichtung für eine Positive Entscheidung der jeweiligen Variante. Die Summe der gewichteten Nutzenwerte einer Variante ist dann in der letzten Spalte der Matrix zu erkennen.

Tab. 12: Entscheidungsmatrix - Grundverfahren

Kategorie	Kriterium	Gewichtung [%]	Bmin	Bmax	Bewertung				Erfüllungsstatus [%]				gewichteter Erfüllungsstatus [%]			
					V1	V2	V3	V4	V1	V2	V3	V4	V1	V2	V3	V4
Prozessdesign	Anzahl der Prozessschritte	15,0	0	1	1	0,5	0,5	0,3	100	50	50	33	15,0	7,5	7,5	5,0
Prozessdesign	Dosiergenauigkeit	15,0	0	2	0	1	2	2	0	50	100	100	0,0	7,5	15,0	15,0
Hygiene	Sauberkeit Anlagenkomponenten	20,0	0	2	2	1	0	0	100	50	0	0	20,0	10,0	0,0	0,0
Hygiene	Spülbarkeit der Leitungen	20,0	0	2	0	1	2	2	0	50	100	100	0,0	10,0	20,0	20,0
Investition	Isolierung/Beheizung der Leitung	7,5	0	1	1	0	1	0	100	0	100	100	7,5	0,0	7,5	7,5
Investition	Höhe des Förderdrucks	7,5	0	2	0	1	2	2	0	50	100	100	0,0	3,8	7,5	7,5
Investition	Notwendigkeit eines Rührers	7,5	0	3	3	2	1	0	100	67	33	25	7,5	5,0	2,5	0,0
Investition	Notwendigkeit eines Vorlagebehälters	7,5	0	3	3	2	1	0	100	67	33	25	7,5	5,0	2,5	0,0
Summe		100,0											57,5	48,8	62,5	55,0

Anzahl der Prozessschritte: reziproke Anzahl der Schritte
Dosiergenauigkeit: (1 = ein Schritt; 0,5 = 2 Schritte; ...)
Saubерkeit Anlagenkomponenten: 2 - hygienisch, 2 - höher,
1 - teilweise hygienisch, 1 - mittel,
0 - unhygienisch 0 - niedriger
Spülbarkeit der Leitungen: 2 - gut spülbar, 0 - spülbar,
1 - nicht nötig, 0 - unhygienisch
Isolierung/Beheizung der Leitungen: 1 - nicht nötig, 0 - niedriger,
2 - niedriger, 1 - mittel,
Höhe des Förderdrucks: 2 - niedriger, 0 - höher
Notwendigkeit eines Rührers: 3 - nicht nötig, 2 - bedingt nicht nötig,
3 - nicht nötig, 1 - bedingt nötig,
Notwendigkeit eines Vorlagebehälters: 3 - nicht nötig, 2 - bedingt nicht nötig,
0 - nötig

Es zeigt sich, dass Variante 1 mit 39 % höchster Anteil, die Varianten 2 und 3 mit nahe zu gleichen Werten von 22 und 23 % sind im mittleren Bereich und die Variante 4 mit dem geringsten Anteil von 17 %. Die primäre Entscheidung liegt demnach laut Tabelle 12 bei Variante 1 der direkten Dosierung ohne weitere Vorbereitungen.

Aus

5.2.2 Entscheidung für Gebindetyp

5.2.3 Entscheidung für Pumpendosierung oder Dosierbehälter

5.2.4 Auswahl des Pumpentyps

5.2.5 Auswahl des Messverfahrens

5.3 Technische Planung für Verdickungsmitteldosierung

5.3.1 Verfahrensfließbild der Verdickerdosierung

5.3.2 R&I- Fließbild der Verdickerdosierung

5.3.3 Rohrleitungsplanung der Verdickerdosierung

5.3.4 EMSR-Plan der Messtechnik für die Dosierung

5.4 Gefährdungsbeurteilung der geplanten Verdickungsmitteldosierung

6 Diskussion

6.1 Diskussion der experimentellen Untersuchungen

6.2 Diskussion der Entscheidungen

6.3 Diskussion der Rohrleitungsplanung

6.4 Diskussion der Gefährdungsbeurteilung

Viskositätsmessung nach DIN EN ISO 2555, statt DIN EN ISO 3219 -> laut DIN EN ISO 2555 macht das Messverfahren für newtonsches Fluid keinen Unterschied
Trockenschränke 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

-> Dichte Somit könnten im betrachteten Temperaturbereich bereits Schwankungen von 5 K einen registrierbaren Einfluss auf die Genauigkeit einer rein volumetrischen Dosierung haben.

Vergleich der Viskositäten in der Diskussion

Verdrängungsvolumen Wasser nicht 100% Wirkungsgrad Wirkungsgrad wahrscheinlich schon niedrigerer Drehzahl erschöpft

7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Literatur

- [Alb22] ALBERDINGK BOLEY GMBH: *Produkte: Alberdingk Boley.* <http://www.alberdingk-boley.de/produkte.html>. Version: 22.02.2022, Abruf: 22.02.2022
- [BB18] BGN-BRANCHENWISSEN ; BERUFSGENOSSENSCHAFT NAHRUNGSMITTEL UND GASTGEWERBE (Hrsg.): *Leitfaden ATEX 137: 3. Technische Maßnahmen des Explosionsschutzes.* <https://www.bgn-brachenwissen.de/daten/gv/atex137lf/3.htm>. Version: 08.10.2018, Abruf: 08.02.2022. – Copyright: copyright BC GmbH Verlags- und Mediengesellschaft, 2010
- [bgc22] BERUFSGENOSSENSCHAFT 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-warngeraete/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. – Bierwerth, Walter (VerfasserIn)
- [bro07] 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>. Version: 2007, Abruf: 31.01.2007
- [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
- [byk20] BYK-CHEMIE GMBH (Hrsg.): *Sicherheitstechnisches Datenblatt - RHEOBYK-H 3300 VF.* <https://www.byk.com/de/produkte/additive-nach-namen/rheobyk-h-3300-vf>. Version: 3, 2020, Abruf: 22.02.2022
- [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_Plakat_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] GRÜNING, Rudolf ; KÜHN, Richard: *Entscheidungsverfahren für komplexe Probleme*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2013. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-31460-5>. – ISBN 978-3-642-31459-9
- [Hau20] HAUPTMANNS, Ulrich: *Prozess- und Anlagensicherheit*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2020. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-59709-5>. – ISBN 978-3-662-59708-8
- [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/market/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
- [Ken17] KEN PATTERSON, Phil E.: *Hazard identification and evaluation*. Harlow, 2017 (Fundamentals of Process Safety)
- [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>. – ISBN 9783748600121
- [Msi17] MSIMCA: *Reynoldszahl-Diagramm für gerade Rohrleitungen nach Prandtl-Colebrook*. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f3/R_Rohreibungsbeiwert.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
- [Neu10a] NEUMANN, Joachim: *Risikoanalyse.* Thieme Gruppe, 2010 <https://roempp.thieme.de/lexicon/RD-18-01493>
- [Neu10b] NEUMANN, Joachim: *Risikomatrix.* Thieme Gruppe, 2010 <https://roempp.thieme.de/lexicon/RD-18-02560>
- [NKT10] NEUMANN, Joachim ; KRUG, Harald F. ; THANHEISER, Marc: *Risiko.* Thieme Gruppe, 2010 <https://roempp.thieme.de/lexicon/RD-18-01489>
- [Pon20] PONNDORF GERÄTETECHNIK GMBH (Hrsg.): *Datenblatt Ponndorf P Classic.* https://www.ponndorf.de/fileadmin/documents/Downloads/Datenblaetter/Datenblatt_Data_Sheet_P_classic.pdf. Version: 2020, Abruf: 23.02.2022
- [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
- [Sch20] SCHUBERT, Ulf: *3.5 Methoden zur Identifizierung von Störungen und ihre Bewertung.* 2020 (Vorlesung Anlagen- und Sicherheitstechnik - Präsentation für BCUT)
- [Ste] STEPANEK, D. ; SCHWING VERFAHRENSTECHNIK (Hrsg.): *Was den Betreiber von Massedurchflussmessern nach dem CORIOLIS-Prinzip interessiert.* <http://www.inelektro.de/P051a.pdf>, Abruf: 06.02.2022
- [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 Ten- sid), 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, <td>17</td>	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 bei der ALBERDINGK BOLEY LEUNA GMBH	27
16	Allgemein heuristisches Entscheidungsverfahren, erstellt nach [GK13]	29
17	Aufbau für Schlauchpumpenversuch	35
18	Risikomatrix nach NOHL der ALBERDINGK BOLEY LEUNA GMBH	37
19	Schema des HAZOP-Verfahrens, erstellt nach [Ken17, Sch20]	39
20	Ausschnitt einer HAZOP-Tabelle eines Behälters mit Bewertung durch eine Risikomatrix nach NOHL	39
21	Aktuelle Dosierung des Verdickungsmittels Rheobyk-H 3300 VF	41
22	Fotografien des Dosier- und des Transportfasses	42
23	Ort für Dosierung	43
24	Flansch für eingehenden Dosierstrom	43
25	Dynamische Viskositäten der Verdickungsmittel TAFIGEL PUR 85 und Rheobyk-H 3300 VF	43
26	Dichte des TAFIGEL PUR 85 in Abhängigkeit von der Temperatur	44
27	Dynamische Viskosität des TAFIGEL PUR 85 in Abhängigkeit von der Temperatur	45
28	Dynamische Viskositäten der Verdickungsmittel TAFIGEL PUR 85 und Rheobyk-H 3300 VF in Abhängigkeit vom Massenanteil des Verdickungsmittels bzw. dem Anteil an Aktivsubstanz	45
29	Fotografien der offenen Lagerung	46
30	Fotografie der Rahmschicht	46
31	Makroskopischer Vergleich des verdünnten TAFIGEL PUR 85	47
32	Massenstrom in Abhängigkeit von der Drehzahl für TAFIGEL PUR 85 und Wasser mit einer PONNDORF P CLASSIC 25 Schlauchpumpe	47
33	Massenstrom und Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Drehzahl für TAFIGEL PUR 85 mit einer PONNDORF P CLASSIC 25 Schlauchpumpe . .	48
34	Variante 1: ohne Vorbereitung	49

35	Variante 2: mit Erwärmung des Verdickungsmittels und warmer Förderung	50
36	Variante 3: mit Verdünnen des Verdickungsmittels	50
37	Variante 4: mit Verdünnen und Erwärmen des Verdickungsmittels, sowie warmer Förderung	50

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 [?]	33
7	Messparameter und Massenanteile für verdünnte Viskositätsmessungen . .	34
8	Parameter und Leitwörter für die Beschreibung von Abweichungen [Ken17]	38
9	Anforderungen an die Verdickungsmittel-Dosierung	42
10	Volumina des Verdickungsmittels bei offener Lagerung	46
11	Ergebnisse der Berechnung des volumetrischen Wirkungsgrades für TAFIGEL PUR 85 in Bezug auf Wasser für eine PONNDORF P CLASSIC 25	48
12	Entscheidungsmatrix - Grundverfahren	51

Anhang

Abkürzungsverzeichnis