



Die Verantwortung für
den Inhalt dieser
Veröffentlichung liegt
beim Autor.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Modulares Equipment für die energieeffiziente Produktion (ENPRO Modularisierung)

Als Teil des Verbundvorhabens:
Energieeffizienz und Prozessbeschleunigung für die chemische
Industrie (ENPRO)

Gemeinsamer Abschlussbericht

Projektpartner	Förderkennzeichen
Technische Universität Dortmund August-Schmidt-Str. 4 44227 Dortmund	03ET1249A
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg Schloßplatz 4 91054 Erlangen	03ET1249B
Evonik Technology & Infrastructure GmbH Rellinghauser Str. 1-11, 45128 Essen	03ET1249C
Siemens Aktiengesellschaft - Industry Automation PD PA AE CIS Werner-von-Siemens-Straße 1 80200 München	03ET1249D
Netzsch Pumpen & Systeme GmbH Geretsrieder Str. 1 84478 Waldkraiburg	03ET1249E
Lewa GmbH Ulmer Str. 10 71229 Leonberg	03ET1249F
plantIng GmbH Steinmüllerallee 2 51643 Gummersbach	03ET1249G
D B I C International Diener-Brand Geräte- und Anlagenbau GmbH Kronthaler Str. 11 61462 Königstein im Taunus	03ET1249I
qonqave GmbH Stadtplatz 11 – 13 73249 Wernau	03ET1249J

Federführende Stelle:

TUDO-APT, Fak. BCI, LS APT
Emil-Figge Straße 70
44227 Dortmund

Verantwortlicher Projektleiter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Schembecker

Berichtszeitraum:

01.09.2014 - 31.12.2017

Fälligkeitsdatum:

30.06.2018

Einreichungsdatum:

21.02.2018



ENPRO Modularisierung
FKZ 03ET1249
Abschlussbericht

21.02.2018

Inhalt

1	Kurzdarstellung	5
1.1	Ausführende Stellen	5
1.2	Aufgabenstellung.....	5
1.3	Stand der Technik	5
1.4	Zielstellung des Teilprojekts „Modularisierung“	6
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	8
2	Ergebnisse	10
2.1	AP1 „Moduldefinition“	10
2.1.1	Ganzheitlicher Ansatz zur modulbasierten Anlagenplanung.....	10
2.1.2	Moduldatenbanken.....	15
2.2	AP2 „Standardisierung“	26
2.2.1	Standardisierung von Anschlussgeometrie und Betriebsbereich	26
2.2.2	Selbstregelnder Pulsationsdämpfer.....	33
2.2.3	Einheitliches Monitoring über das Drehmoment	45
2.3	AP3 „Modulbasiertes Engineeringtool“	51
2.3.1	Erstellung eines <i>Modularen R&I-Fließschemas</i>	59
2.3.2	Konfiguration eines <i>Modularen 3D Layouts</i>	64
2.4	AP4 „Energieeffizienz-Bewertungstool“	66
2.4.1	Bewertung einzelner Module.....	66
2.4.2	Bewertung kontinuierlich betriebener modularer Anlagen.....	72
2.4.3	Bewertung absatzweise betriebener modularer Anlagen.....	76
3	Zusammenfassung der Ergebnisse	80
4	Umsetzung und Nutzen in Industrie und Lehre	82
5	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	83
6	Fortschritte auf dem Gebiet bei anderen Stellen	84
7	Veröffentlichungen	85
7.1	Wissenschaftliche Veröffentlichungen	85
7.2	Vorträge auf Konferenzen	85
7.3	Posterbeiträge auf Konferenzen.....	87
7.4	Sonstige	87
8	Übersicht über die Treffen der Projektpartner	88
9	Literatur	93
10	Schutzrechtsanmeldungen.....	97



ENPRO Modularisierung
FKZ 03ET1249
Abschlussbericht

21.02.2018

1 Kurzdarstellung

1.1 Ausführende Stellen

	Kennzeichen
D B I C INTERNATIONAL Diener-Brand Geräte- und Anlagenbau Gesellschaft mit beschränkter Haftung, Königstein im Taunus	DBIC
NETZSCH Pumpen & Systeme GmbH, Waldkraiburg	Netzsch
Evonik Technology & Infrastructure GmbH, Essen	Evonik
Lewa GmbH, Leonberg	Lewa
plantIng GmbH, Köln	plantIng
qonqave GmbH, Wernau	Qonqave
Siemens Aktiengesellschaft - Industry Automation PD PA AE CIS, Bonn	Siemens
Technische Universität Dortmund - Fakultät Bio- und Chemieingenieurwesen, Lehrstuhl für Anlagen- und Prozesstechnik, Dortmund	TUDO-APT
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg - Technische Fakultät - Department Chemie- und Bioingenieurwesen - Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik, Erlangen	IPAT

1.2 Aufgabenstellung

Die Kombination aus Energieeffizienz und Prozessbeschleunigung stellt eine besondere Herausforderung für alle Beteiligten dar (Chemischen Industrie, Anlagenbauer, Zulieferer und Universitäten). Generelles Forschungs- und Entwicklungsziel ist die Demonstration des Energie- und Zeiteinsparpotenzials in der Anlagenplanung mit Hilfe wiederverwendbarer Standardmodule und einer software-unterstützten Methodik. Die Module und Komponenten müssen durchgängig und skalenübergreifend verwendbar sein, um eine beschleunigte Modellierung und Anlagenplanung zu ermöglichen. Die neu entwickelten Module sind in ein Planungswerkzeug einzubinden, das den gesamten Gestaltungsprozess von der frühen Prozessentwicklung im Labor bis zum 3D-Anlagenmodell unterstützt.

1.3 Stand der Technik

Die Optimierung chemischer Prozesse hinsichtlich ihres Energiebedarfs gehört heute zu den Standardaufgabenstellungen während der Entwicklung verfahrenstechnischer Prozesse [1]. Die apparative Umsetzung der für einen

chemischen Herstellprozess notwendigen verfahrenstechnischen Funktionen bleibt weitgehend unberücksichtigt, da die Anzahl an Varianten und Designvariablen zu groß und damit zu komplex ist. Konventionell werden daher sequentiell Entscheidungen von Apparatetyp über detaillierte Apparateauslegung bis hin zur 3D-Aufstellungsplanung getroffen, um somit die Komplexität handhaben zu können. Dabei werden potentielle Energieeinsparpotentiale möglicherweise nicht genutzt. Es macht deshalb im Hinblick auf die Optimierung des Energiebedarfs einer chemischen Produktion Sinn detaillierte Informationen aus späten Planungsphasen wie z.B. Apparatedimensionen schon in frühen Planungsphasen zu benutzen.

Zusätzlich lässt sich über die Wahl effizienter Apparate und Maschinen der Ressourcen-Verbrauch noch weiter senken. Pumpen als wesentliche Verbraucher elektrischer Energie benötigen 20-25% des weltweit erzeugten Stroms, wovon wiederum ein Viertel in Anlagen der Prozess- und Verfahrenstechnik verbraucht wird [2]. Allerdings entwirft bisher jeder Hersteller seine Pumpen individuell, so dass der Tausch einer Pumpe während des Planungsprozesses – wenn sich beispielsweise Anforderungen ändern – stets mit zusätzlichen Planungsarbeiten wie einer veränderten Rohrleitungsführung verbunden ist. Insbesondere gilt diese mangelnde Austauschbarkeit, wenn das Wirkprinzip der Pumpe geändert wird. Kreiselpumpen lassen sich nicht einfach durch Verdrängerpumpen ersetzen, obwohl sie für kleinere und mittlere Fördermengen vielfach deutlich effizienter wären.

1.4 Zielstellung des Teilprojekts „Modularisierung“

Im Rahmen des ENPRO Teilprojektes „Modularisierung“ sollen eine Methodik und zugehörige Werkzeuge entwickelt werden, die den Einfluss von Apparaten und Maschinen auf die Energieeffizienz schon in frühen Phasen der Anlagenplanung berücksichtigen. Dadurch wird zunächst einmal die Komplexität und damit die Menge an zu verarbeitenden Daten und Informationen sowie die Anzahl an zu treffenden Entscheidungen während der Planungsphase gesteigert, also de facto ein erhöhter Planungsaufwand erzeugt. Damit das nicht geschieht und der Forderung nach kürzeren Laufzeiten vom Laborprozess bis hin zur produzierenden Anlage Rechnung getragen wird, muss der bisher verfolgte konventionelle Planungsansatz verlassen werden zugunsten einer neuen Vorgehensweise. Eine Möglichkeit der aufgezeigten Komplexität zu begegnen, bietet die Verwendung einer begrenzten Anzahl von Modulen, die hinsichtlich ihrer Energieeffizienz bewertet sind. Als zusätzlichen Effekt dieser **Moduldefinition** lässt sich eine signifikante Laufzeitverkürzung erreichen durch Wiederverwendung einmal erbrachter Ingenieurleistungen. Dieses Wissen soll zusammen mit den Modulen in Moduldatenbanken hinterlegt werden. Für die Planung einer modularen Anlage unter Verwendung dieser Moduldatenbanken ist ein neuer methodischer Ansatz zu entwickeln.

Voll zum Tragen kommt dieser Effizienzgewinn in der Planungsphase aber erst, wenn Module mit gleicher verfahrenstechnischer Funktionalität austauschbar werden. Somit ist ein weiteres Ziel des beantragten Projektes die **Standardisierung** von Modulen. Am Beispiel von Pumpensystemen soll zudem demonstriert werden, dass Pumpen verschiedener Hersteller und verschiedenen Wirkungsprinzips austauschbar gestaltet werden können. Damit wird eine der Grundvoraussetzungen für einen modulbasierten Planungsansatz beispielhaft nachgewiesen. Dabei sind zwei Herausforderungen anzugehen. Die eine betrifft die 3D-Struktur der Module. Hier muss gewährleistet sein, dass beispielsweise die Anschlüsse immer an der gleichen Stelle angeordnet sind oder bestimmte Abmessungsraster sowie standardisierte regelungs- oder steuerungstechnische Anschlüsse und Kommunikationscodes eingehalten werden. Dies erfordert wiederum die Neuentwicklung von Pumpenmodulen, da geänderte Pumpengeometrien beachtet werden müssen. Die andere Herausforderung entsteht aus der Forderung, bei wechselndem Wirkprinzip dennoch immer die gleiche Funktionalität zu gewährleisten. Das erfordert beispielsweise einen pulsationsfreien Betrieb für alle Pumpenarten.

Für die neue Vorgehensweise in der Anlagenplanung ist ein **modulbasiertes Engineeringtool** zu entwickeln. Durch den Zugriff auf Moduldatenbanken sollen energieeffiziente apparative Umsetzungen und die Wiederverwendung einmal erbrachter Ingenieursleistungen ermöglicht werden.

Die Auswahl der energieeffizienten Module wird unterstützt durch ein **Energieeffizienzbewertungstool**. Insbesondere der Einfluss schwankender Prozessparameter auf den Energiebedarf soll betrachtet werden. Darüber hinaus soll eine ganzheitliche Energieeffizienzbewertung bei der Verwendung von Modulen sowohl in kontinuierlich als auch absatzweise betriebenen Prozessen erfolgen.

Um das gewünschte Projektziel der Planung energieeffizienter chemischer Produktionsanlagen bei gleichzeitiger Verkürzung der Projektlaufzeiten zu erreichen, sind Arbeiten auf allen vier beschriebenen Gebieten erforderlich. Wie in Abbildung 1 dargestellt wurden die Arbeitspakete entsprechend eingeteilt.

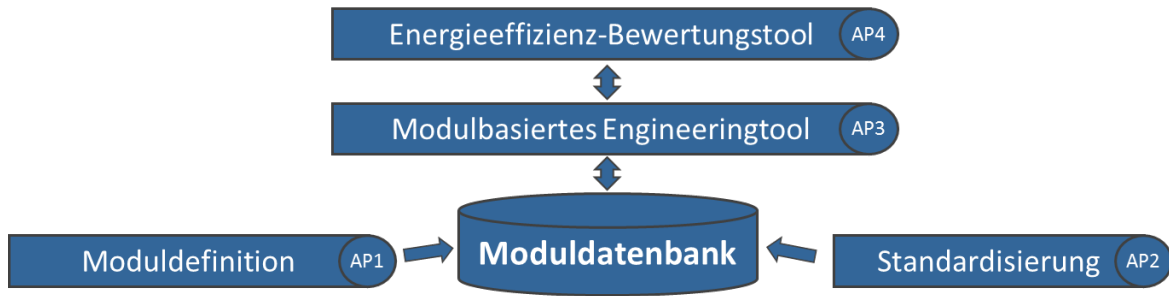


Abbildung 1: Übersicht über die Arbeitspakete des ENPRO Teilprojektes „Modularisierung“.

Mit dem neuen Planungsansatz gelingt ein Spagat zwischen energetischer Optimierung und zeitlichem Aufwand in der Anlagenplanung, der bei der konventionellen Planung bisher nicht erreicht wurde. Chemische Produktionsanlagen lassen sich energetisch optimal UND schnell planen.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Durch die gemeinsame Austauschplattform ENPRO-Connect wurde der Austausch zwischen den Partnern der einzelnen ENPRO Teilprojekte ermöglicht und somit die Zusammenarbeit gefördert.

Um die wissenschaftlichen Ergebnisse und erarbeiteten Methoden aller Teilprojekte des ENPRO Verbundes für eine nachhaltige Anwendbarkeit in Kontext zu stellen, wurde mit dem Teilprojekt SMeKT eine einheitliche Moduldefinition in einer wissenschaftlichen Veröffentlichung festgehalten [3].

Für die Anwendung des modulbasierten Engineeringtools (vgl. Abschnitt 2.3) müssen die relevanten Prozessinformationen sowie Moduldatenbanken strukturiert und softwareunabhängig verfügbar sein. Die Anforderungen an ein entsprechendes Datenmodell für das Beispiel modularer Pumpensysteme wurden mit dem Teilprojekt „Datenintegration“ abgestimmt. Eine datentechnische Modellierung des entwickelten modulbasierten Planungsansatzes ist daher mit den im Teilprojekt „Datenintegration“ erarbeiteten Methoden möglich.

Aber nicht nur innerhalb des ENPRO Verbundes gab es eine Zusammenarbeit zwischen Experten unterschiedlicher Fachrichtungen bzw. Partnern unterschiedlicher Teilprojekte.

In Kooperation mit der TU München wurde ein Prototyp zur Lösung mehrkriterieller Entscheidungsprobleme entwickelt. Dafür wurde das GECKO Tool (Generic constraint-based Konfigurator) untersucht, das von der MQM Arbeitsgruppe an der TU München (Prof. Struß) entwickelt wurde. GECKO verwendet den Conflict Directed A* (CDA*) Algorithmus zur Lösung der Entscheidungsprobleme. Das Verfahren der multikriterielle Entscheidungsanalyse (vgl. Tabelle 5) kann hierbei je nach Anforderung gewählt

werden. Es soll allerdings nicht verschwiegen werden, dass notwendige Anpassungen am Algorithmus deutlich zeitintensiver waren als geplant.

Mit Partnern des EU-Projektes TOP-REF (Grant agreement No 604140) gab es einen Austausch über Key Performance Indikatoren zur Effizienzbewertung von Prozessen.

2 Ergebnisse

Die Ergebnisse zum Teilprojekt ENPRO „Modularisierung“ sind entsprechend der Gliederung der Arbeitspakete in den folgenden Unterkapiteln dargestellt. Detaillierte Beschreibungen zu den entwickelten Methoden sind in den angegebenen Veröffentlichungen zu finden.

2.1 AP1 „Moduldefinition“

Evonik, Inosim, plantng, TUDO-APT

Basierend auf einer einheitlichen und konsistenten Moduldefinition, wurde ein genereller Ansatz für die modulbasierte Anlagenplanung entwickelt. Bei der modulbasierten Anlagenplanung werden demnach geeignete Module ausgewählt und zusammengestellt statt die erforderlichen Planungsdokumente wie im konventionellen Vorgehen zeitaufwändig und maßgeschneidert zu erstellen. Der entwickelte Ansatz wird im Folgenden detaillierter beschrieben. Eine Basis für die modulbasierte Anlagenplanung bilden Moduldatenbanken. Auf die Erstellung solcher Moduldatenbanken wird anschließend genauer eingegangen.

2.1.1 Ganzheitlicher Ansatz zur modulbasierten Anlagenplanung

Um eine erfolgreiche Zusammenarbeit zwischen den einzelnen Projektpartnern innerhalb des ENPRO Verbunds sicherzustellen, wurde in Kooperation mit dem Teilprojekt SMekT eine einheitliche Moduldefinition in einer wissenschaftlichen Veröffentlichung festgehalten [3]. Module wurden hierbei als unveränderliche, projekt-unabhängige und wiederverwendbare Elemente während der Anlagenplanung definiert [4]. Eine Zusammenstellung von zwei oder mehr Modulen wird als ‚modular‘ bezeichnet [3]. Im Fokus dieser Veröffentlichung stehen Informationsfluss und -speicherung im Lebenszyklus der modulbasierten Anlagenplanung. Da alle Phasen im Lebenszyklus einer Anlage berücksichtigt wurden, kann der Ansatz durchgehend angewendet werden.

Darauf aufbauend wurde eine detaillierte ganzheitliche Beschreibung der modulbasierten Anlagenplanung am Lehrstuhl TUDO-APT erarbeitet und an Abschnitten eines Beispielprozesses evaluiert. Die Ergebnisse wurden als wissenschaftlicher Artikel zur Veröffentlichung eingereicht [4].

Wie in Abbildung 2 dargestellt, startet die modulbasierte Anlagenplanung ausgehend vom Blockfließschema (BD) des Prozesses gemäß ISO 10628-1 [5]. Zusätzlich zu den Informationen, die laut ISO 10628-1 auf dem Blockfließbild enthalten sind, muss für jeden Block noch die *Aggregationsebene* festgelegt werden. Diese gibt an, auf welche Moduldatenbanken für den entsprechenden Block zugegriffen wird: ‚*Apparatuses & Machinery*‘, ‚*Plant Section*‘ und ‚*Plant*‘.

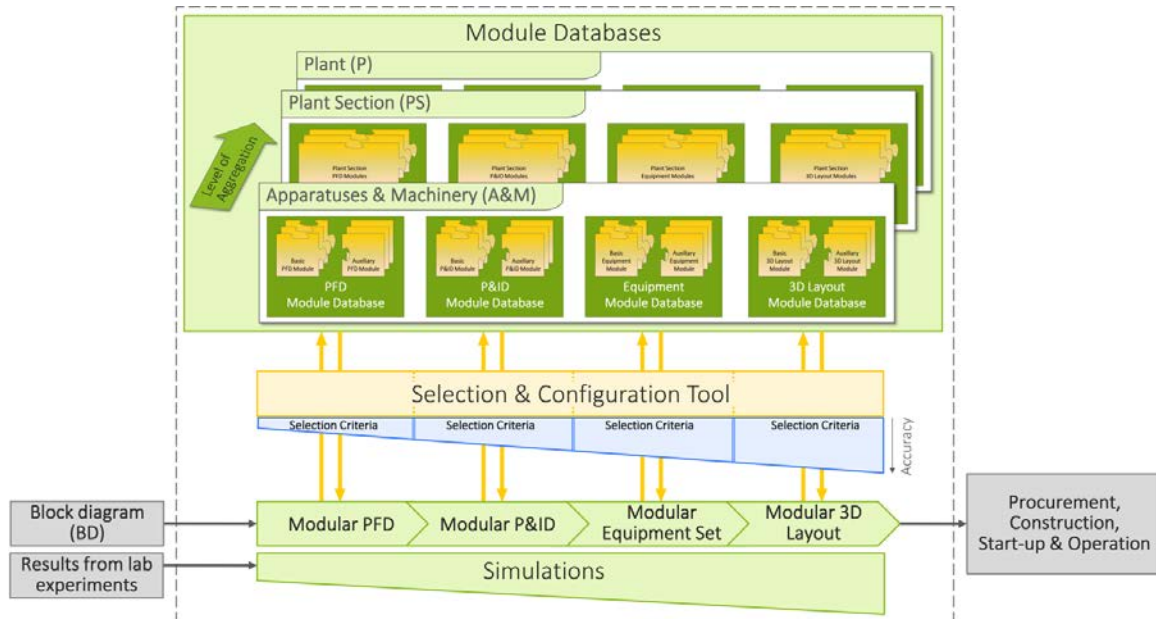


Abbildung 2: Übersicht über die modulbasierte Anlagenplanung [4].

Der entwickelte Ansatz für die modulbasierte Anlagenplanung ist in vier Planungsaufgaben eingeteilt, die in denselben Planungsdocumenten resultieren wie die konventionelle Anlagenplanung: Verfahrenfließschema (PFD), Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema (P&ID), Set an Equipment mit allen Equipment-Spezifikationsblättern sowie 3D Layout. Während jeder Planungsaufgabe werden geeignete Module aus der entsprechenden Moduldatenbank ausgewählt und zu den Planungsdocumenten zusammengestellt. Hierfür wird das *Auswahl- und Konfigurationstool* benötigt. Da die erstellten Planungsunterlagen aus Modulen zusammengesetzt sind, werden sie als ‚modular‘ bezeichnet.

Entsprechend der Planungsaufgaben existieren für jede *Aggregationsebene* Moduldatenbanken: PFD-Moduldatenbank, R&I-Moduldatenbank, Equipment-Moduldatenbank und 3D Layout-Moduldatenbank. Auf der untersten *Aggregationsebene* gibt es zwei Arten von Modulen: Grund- und Zusatzmodule. Grundmodule enthalten alle Apparate und Maschinen, die für die Erfüllung der verfahrenstechnischen Aufgabe eines Blockes benötigt werden. Zusatzmodule enthalten Instrumentierung und Regelungseinheiten, die je nach Prozessanforderung ergänzt werden können. Unterschiedliche Anforderungen zum Beispiel durch verschiedene Regelstrategien oder Sicherheitsrichtlinien können zu einer großen Vielfalt an ausgewählten und zusammengestellten Grund- und Zusatzmodulen führen. Daher wird die unterste *Aggregationsebene* benötigt um die große Vielfalt an Aufgaben in der Verfahrenstechnik abdecken zu können, während die Module an sich unverändert bleiben. Nur wenn die Module ohne manuelle Anpassung ausgewählt und somit wiederverwendet werden können, kann das volle Potential der modulbasierten Anlagenplanung ausgeschöpft werden.

Die Moduldatenbanken auf den höheren *Aggregationsebenen Anlagenteil (PS)* und *Anlage (P)* enthalten Module, die einer aggregierten Gruppe an Equipment (Apparate, Maschinen, Instrumentierung und Regelungseinheiten) entsprechen, um eigenständig die verfahrenstechnische Aufgabe eines Blockes zu erfüllen. Auf der *Aggregationsebene Anlagenteil* und *Anlage* gibt es demzufolge Anlagenteilmodule beziehungsweise Anlagenmodule. Hierdurch können beispielsweise Skid-Lösungen von Herstellern in die entsprechenden Moduldatenbanken aufgenommen werden.

Alle Module sind mit Attributen abgelegt, die diese selbst bzw. deren Einsatzbereich charakterisieren. Außerdem gibt es Bewertungsfunktionen für die Modulauswahl und Regeln für die Modulkonfiguration, die entweder in den Moduldatenbanken oder im *Auswahl- und Konfigurationstool* hinterlegt sein können.

Die Modulauswahl ist in zwei Schritte unterteilt: Ausschluss und Bewertung. Im Ausschluss-Schritt werden Module, die unter den gegebenen Prozessbedingungen nicht betrieben werden können, ausgeschlossen.

Im Bewertungs-Schritt werden die verbliebenen Module basierend auf benutzerdefinierten Bewertungskriterien bewertet. Für die Bestimmung der Werte der Auswahlkriterien werden Simulationen benötigt, welche die Basis für die Modulauswahl bilden. Da die Menge der zur Verfügung stehenden Informationen über die Planungsaufgaben ansteigt, steigt auch die Genauigkeit der Simulationen und damit die Genauigkeit der Auswahlkriterien.

Die ausgewählten Module müssen anschließend vom *Auswahl- und Konfigurationstool* zu verwendbaren Planungsunterlagen zusammengestellt, das heißt konfiguriert werden ohne dabei die Module zu verändern. In diesem Zusammenhang müssen Regeln für die Modulkonfiguration berücksichtigt werden, wie z.B. Regeln für die relative Reihenfolge von *R&I-Grund- und Zusatzmodulen* auf dem R&I-Fließschema.

Das Ergebnis der modulbasierten Anlagenplanung ist schließlich die Fertigstellung aller Planungsaufgaben, die für eine betreibbare Anlage benötigt werden. Anschließend können Bestellvorgänge, Anlagenbau und –betrieb beginnen.

Wie in Abbildung 3 skizziert, ist der entwickelte Ansatz für die modulbasierte Anlagenplanung auf allen *Realisierungsebenen* anwendbar.



Abbildung 3: Schematische Darstellung der modulbasierten Anlagenplanung auf verschiedenen Realisierungsebenen.

Generell gibt es drei *Realisierungsebenen*, die sich in ihrer Produktionsrate unterscheiden: Miniplant, Pilotanlage und Produktionsanlage. Auf jeder *Realisierungsebene* ist das Ziel die Fertigstellung aller Planungsaufgaben, die für eine betreibbare Anlage benötigt werden. Während der Anlagenplanung werden auf jeder *Realisierungsebene* dieselben Planungsdokumente erstellt. Daher unterscheidet sich der Ansatz für die modulbasierte Anlagenplanung auf den verschiedenen *Realisierungsebenen* nicht, die ausgewählten Module können sich jedoch unterscheiden. So könnten beispielsweise Equipment-Module aus Glas auf Miniplant-Ebene, aber Equipment-Module aus Stahl auf Pilotanlagen- oder Produktionsanlagen-Ebene, ausgewählt werden.

Die Erkenntnisse, welche auf den vorangehenden *Realisierungsebenen* gesammelt werden, werden im *Block-Repräsentations-Rahmen* gespeichert und können in nachfolgenden *Realisierungsebenen* während der Modulauswahl genutzt werden. Erkenntnisse über das Fouling-Verhalten, welches auf Pilotanlagen-Ebene gesammelt wurde, kann beispielsweise während der Modulauswahl auf Produktionsanlagen-Ebene genutzt werden.

Um die relevanten Informationen zu speichern, die während der modulbasierten Anlagenplanung gesammelt werden, wird für jeden Block auf dem Blockfließschema ein *Block-Repräsentations-Rahmen* erstellt. Eine schematische Darstellung eines solchen *Block-Repräsentations-Rahmen* ist in Abbildung 4 dargestellt.

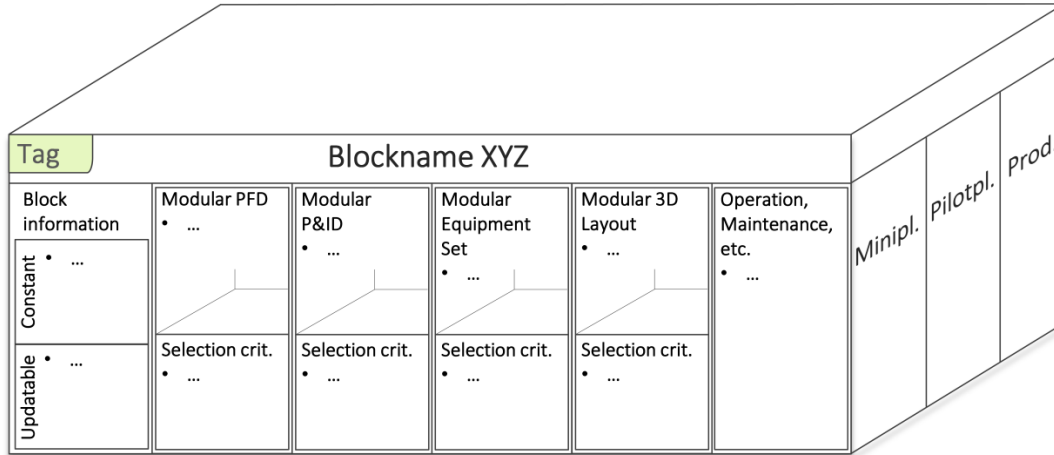


Abbildung 4: Schematische Darstellung eines *Block-Repräsentations-Rahmens* [4].

Der *Block-Repräsentations-Rahmen* enthält ein Feld mit Blockinformationen. In diesem Feld sind alle Informationen gespeichert, die benötigt werden, um die getroffenen Entscheidungen für den Block nachvollziehen zu können. Es gibt einerseits Blockinformationen, die über alle Planungsaufgaben konstant sind, wie z.B. Betriebsgrenzen durch die Zersetzungstemperatur einer Komponente. Andererseits gibt es Blockinformationen, die in den einzelnen Planungsaufgaben aktualisiert werden. Vor allem Informationen aus Prozesssimulationen wie Stromtabellen und Betriebsbedingungen sind enthalten.

Außerdem enthält der *Block-Repräsentations-Rahmen* Slots, die als Platzhalter für die Module dienen, die während jeder Planungsaufgabe ausgewählt werden. Um den Entscheidungsprozess nachvollziehbar zu halten, werden zusätzlich die betrachteten Auswahlkriterien mit ihren Werten in den zugehörigen Slots abgelegt.

Nach der Inbetriebnahme der modularen Produktionsanlage können die Informationen, die während des Betriebs gesammelt werden, auch im *Block-Repräsentations-Rahmen* abgelegt werden, wie z.B. Erfahrungswerte oder der Wartungsbedarf. Dadurch können die während der modulbasierten Anlagenplanung getroffenen Entscheidungen unter den gegebenen Randbedingungen evaluiert werden. Hierdurch steht das gesammelte Ingenieurwissen für zukünftige Projekte zur Verfügung. Die Struktur des *Block-Repräsentations-Rahmens* ist für alle Realisierungsebenen gleich (vgl. Abbildung 3).

Es wurde somit ein konzeptioneller Ansatz für einen *Block-Repräsentations-Rahmen* entwickelt, der Informationen über den Lebenszyklus einer modularen

Anlage speichern kann. In Zusammenarbeit mit dem ENPRO Teilprojekt „Datenintegration“ wurde erarbeitet, dass die in diesem Teilprojekt entwickelte Systematik für die lebenszyklusübergreifende Modellierung von Objekten in diesem Zusammenhang anwendbar ist. Die IT-technische Umsetzung muss in Zukunft noch erfolgen.

2.1.2 Moduldatenbanken

Da die Planungsaufgaben während der modulbasierten Anlagenplanung fertiggestellt werden, indem geeignete Module aus Moduldatenbanken ausgewählt werden, wird die Qualität der modulbasierten Anlagenplanung entscheidend durch die Qualität der Moduldatenbanken beeinflusst. Dieser intuitive Grundgedanke konnte durch die detaillierte Analyse abgeschlossener Projektabläufe der Evonik bestätigt werden. Das Konzept der modulbasierten Anlagenplanung wurde dabei an neun Fallstudien absatzweise betriebener Verfahren evaluiert. Dazu wurde der Upstream-Prozessabschnitt modulbasiert geplant und der Projektablauf mit dem tatsächlich konventionell durchgeführten verglichen. Bei entsprechender Informationsgüte in den Moduldatenbanken als grundlegende Voraussetzung konnten Planungsaktivitäten in frühe Phasen vorgezogen werden. Darüber hinaus wurde gezeigt, dass eine Verschiebung des Planungsaufwands von den Fachgewerken hin zum Projektmanagement zu erwarten ist. Der Grund hierfür ist die Wiederverwendung von erbrachter Ingenieursleistung in den abgelegten Planungsdokumenten. Letztendlich konnte an diesen Fallstudien ein Potential exemplarisch aufgezeigt werden die Projektdurchlaufzeit um etwa 8 % und die Gesamtkosten um bis zu 4 % zu reduzieren.

Eine geringe Anzahl an Modulen erhöht den Vorteil der Wiederverwendung von Ingenieursleistungen, da somit dasselbe Modul häufiger verwendet wird. Außerdem ist die Auswahl eines geeigneten Moduls dann weniger aufwändig. Aus diesen Gründen sollten die Moduldatenbanken möglichst wenige Module enthalten, die möglichst viele industrierelevante Anwendungen abdecken können, und entsprechend aufgebaut werden. Die Moduldatenbanken für jede Planungsphase stehen wie in Abbildung 5 schematisch dargestellt im Zusammenhang.

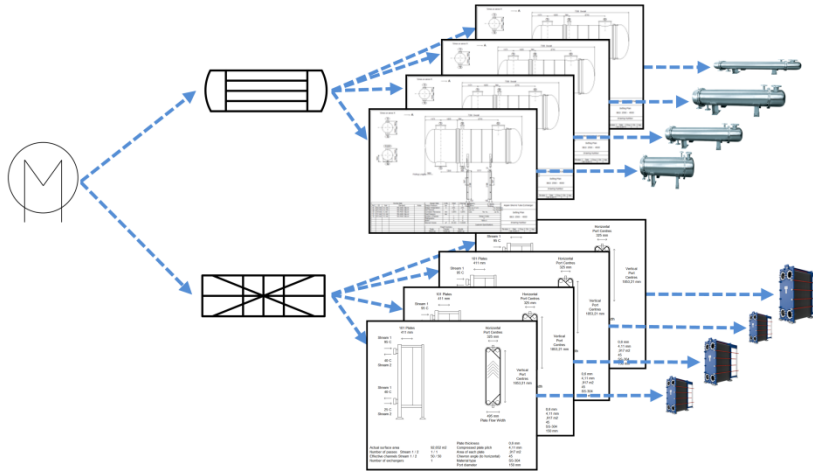


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Zusammenhänge der Moduldatenbanken für die unterschiedlichen Planungsphasen.

So gibt es beispielweise für jedes *R&I-Grundmodul*, das den Apparat- oder Maschinentyp beschreibt, mehrere *Equipment-Grundmodule*, die jeweils die detaillierte Bauform des Apparates bzw. der Maschine beschreiben.

R&I-Moduldatenbank

Auf Basis der Arbeiten von Uzuner [6] wurden in Zusammenarbeit der Projektpartner TUDO-APT, Evonik und planting *R&I-Grundmodule* für Wärmeübertrager, Pumpen, Verdichter, Tanks und Kolonnen definiert. Zusätzlich wurden für Pumpen und Wärmeübertrager mögliche *R&I-Zusatzmodule* erarbeitet um unter anderem verschiedene Regelungs- und Sicherheitskonzepte abzubilden. In Abschnitt 2.3.1 wird ein *Modulares R&I-Fließschema* für einen Block ‚Pumpen‘ erstellt. In diesem Zusammenhang werden mögliche *R&I-Zusatzmodule* und deren Einsatzbereich gezeigt.

Am Beispiel von dezentralen Kältemittel-Verdampferstationen wurde in Zusammenarbeit von planting und TUDO-APT die modulbasierte Anlagenplanung angewendet, um ein *Modulares R&I-Fließschema* zu erstellen. Anhand des Praxisbeispiels wurde die zuvor erstellte *R&I-Moduldatenbank* evaluiert und es wurde eine Methodik entwickelt, die *R&I-Moduldatenbank* basierend auf Normen und anhand vorhandener Lösungen zu erweitern. Zudem stellte sich während dieser Arbeit heraus, dass es sinnvoll ist Moduldatenbanken auf unterschiedlichen *Aggregationsebenen* zu erstellen (vgl. Abbildung 2). So kann man einerseits durch Zusammenstellung von Modulen auf der *Aggregationsebene A&M* die große Varianz von (bio-)chemischen Prozessen abdecken. Andererseits können bereits existierende Skid-Lösungen, wie zum Beispiel Kompressor-Skids, als Anlagenteilmodule aufgenommen werden. In Tabelle 1 sind mögliche *R&I-Zusatzmodule* dargestellt. Laut DIN EN 378 werden je nach Masse an Ammoniak, das hier als Kältemittel dient, unterschiedliche *R&I-*

Zusatzmodule benötigt [7]. Einsatzbereiche wie diese können zusammen mit den R&I-Modulen in der *R&I-Moduldatenbank* abgelegt werden.

Tabelle 1: Benötigte *R&I-Zusatzmodule* für Ammoniak-Kälteanlagen basierend auf DIN EN 378 [7].

Masse an Kältemittel	Anforderung	R&I-Zusatzmodul
>25 kg	Jede Druckstufe muss eine Druckanzeige besitzen	
>25 kg	Füllstandsmessung in allen Behältern	
>50 kg	Absperrventil für Equipment	
>50 kg	Wechselventil für Ablass in Atmosphäre	
>100 kg	Überströmventile müssen abgetrennt sein	
>300 kg	Entlastungsventil muss überprüfbar sein	
>500 kg	Nachweis und Anzeige von Kältemittelleckage in sekundärem Kühlkreislauf	
>3000 kg	Ferngesteuertes Absperrventil in Flüssigkeitsleitung	

Equipment-Moduldatenbank

Vergleichbar zur *R&I-Moduldatenbank* sind in der *Equipment-Moduldatenbank* Informationen über die Hauptapparate und –maschinen sowie über unterschiedliches Zusatzequipment enthalten, wie zum Beispiel die geometrischen Dimensionen. Es wird zunächst das *Equipment-Grundmodul* betrachtet, da dieses den Einsatzbereich des modularen Sets an Equipment maßgeblich definiert.

Ziel muss es sein, eine *Equipment-Moduldatenbank* mit möglichst wenigen *Equipment-Grundmodulen* aufzubauen, mit der möglichst viele industrierelevante Anwendungen abgedeckt werden können. Es wurde eine Methodik zur Erstellung einer solchen *Equipment-Moduldatenbank* entwickelt und in einer wissenschaftlichen Veröffentlichung festgehalten [8]. Der Grundgedanke dahinter ist, ähnliche Anwendungen zu gruppieren und für jede dieser Gruppen ein repräsentatives Equipment zu bestimmen. Wie in Abbildung 6 dargestellt, startet die entwickelte Methodik ausgehend von Verfahrensdatenblättern („PDSs“), die industrielle Anwendungsfälle beschreiben. In einem hierarchischen Clustering werden die Anwendungsfälle gruppiert. Zuvor müssen in einem Vorbereitungsschritt geeignete charakteristische Merkmale („Features“) ausgewählt werden, nach denen gruppiert wird. Als geeignete Merkmale für das Clustering von flüssig/flüssig Wärmeübertrager-Anwendungen ergaben sich die Volumenströme auf Rohr- und Mantelseite sowie die abgeschätzte benötigte Wärmeübertrager-Fläche. Für jede dieser Anwendungsgruppen wird ein repräsentativer Wärmeübertrager bestimmt. Eine konventionelle Auslegung dieser Wärmeübertrager für eine bestimmte Anwendung ist nicht möglich, da eine Gruppe von Anwendungen abgedeckt werden soll. Daher wird zunächst eine große Menge an Wärmeübertrager-Kandidaten in einem Sampling Schritt erstellt. Die Kandidaten werden quasi-zufällig, aber gleichverteilt im mehrdimensionalen Design-Raum, basierend auf einer Sobol’-Sequenz generiert [9]. Aus dieser Menge an Wärmeübertragern wird dann für jedes Cluster derjenige Wärmeübertrager als Repräsentant ausgewählt, der die meisten Anwendungen innerhalb des jeweiligen Clusters abdecken kann. Für eine beliebige Anzahl an Clustern kann dann bestimmt werden, wie viele der industriellen Anwendungen durch die entsprechenden repräsentativen Wärmeübertrager abgedeckt werden können. Abhängig von den Anforderungen des Anwenders können nun die entsprechenden repräsentativen Wärmeübertrager als Wärmeübertrager-Module in die *Equipment-Moduldatenbank* übernommen werden.

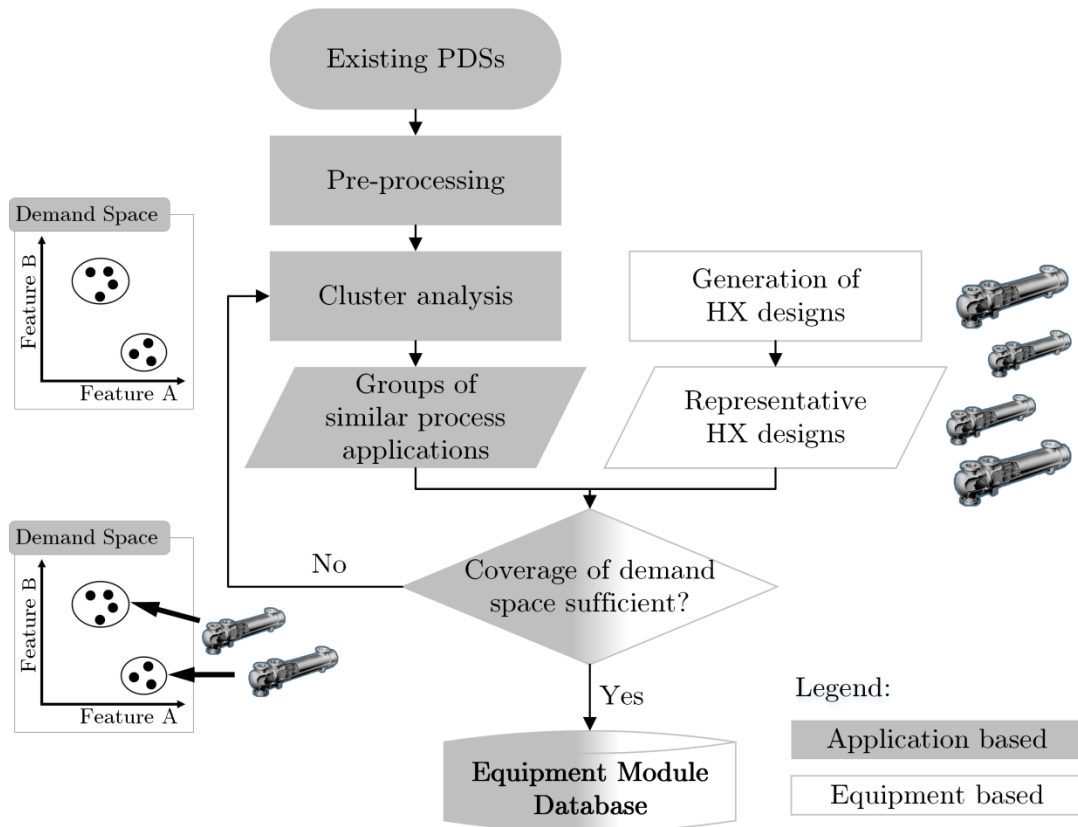


Abbildung 6: Methodik zur Erstellung einer *Equipment-Moduldatenbank* basierend auf industriellen Anwendungen [8].

Die entwickelte Methodik zur Erstellung einer *Equipment-Moduldatenbank* wurde zunächst für 275 flüssig/flüssig Wärmeübertrager-Anwendungen des Projektpartners Evonik angewendet. Die Anwendungen unterscheiden sich erheblich in ihren Prozess- als auch Stoffdaten, so liegen die Wärmeströme beispielsweise zwischen 0,8 kW bis 15 MW. Es wurden 5000 Rohrbündelwärmeübertrager als Wärmeübertrager-Kandidaten gesammelt. Die betrachteten Betriebsgrenzen für Rohrbündelwärmeübertrager sind in Tabelle 2 dargestellt. Der übertragene Wärmestrom \dot{Q} muss innerhalb eines bestimmten Bereiches liegen. Außerdem müssen rohr- und mantelseitige Erosion sowie Rohrschwingungen vermieden werden. Für die unteren Geschwindigkeitsgrenzen v_{min} auf Rohr- und Mantelseite (,TS' bzw. ,SS') wurden eher konservative Werte aber auch gelockerte Grenzen betrachtet.

Tabelle 2: Betrachtete Betriebsgrenzen für Rohrbündelwärmeübertrager [8].

	Betriebsgrenze	Einheit	Konservative untere Geschwindigkeitsgrenzen	Gelockerte untere Geschwindigkeitsgrenzen
Thermo-dynamisch	$(\dot{Q}_{calc}/\dot{Q}_{req})_{max}$	[%]	130	130
	$(\dot{Q}_{calc}/\dot{Q}_{req})_{min}$	[%]	95	95
Fluid-dynamisch	$v_{SS,min}$	[m/s]	0.3 [10]	0.1
	$v_{TS,min}$	[m/s]	1.0 [11]	0.1
	Rohrschwingungen	[-]	Von TEMA empfohlene Grenzen [12]	
	Mantelseitige Erosion	[-]	Von TEMA empfohlene Grenzen [12]	
	Rohrseitige Erosion	[-]	Von TEMA empfohlene Grenzen [12]	

Je nach betrachteten Betriebsgrenzen können unterschiedlich viele der industriellen Anwendungen für eine bestimmte Anzahl an Clustern und damit repräsentativen Wärmeübertragern abgedeckt werden. Dies ist in Abbildung 7 dargestellt.

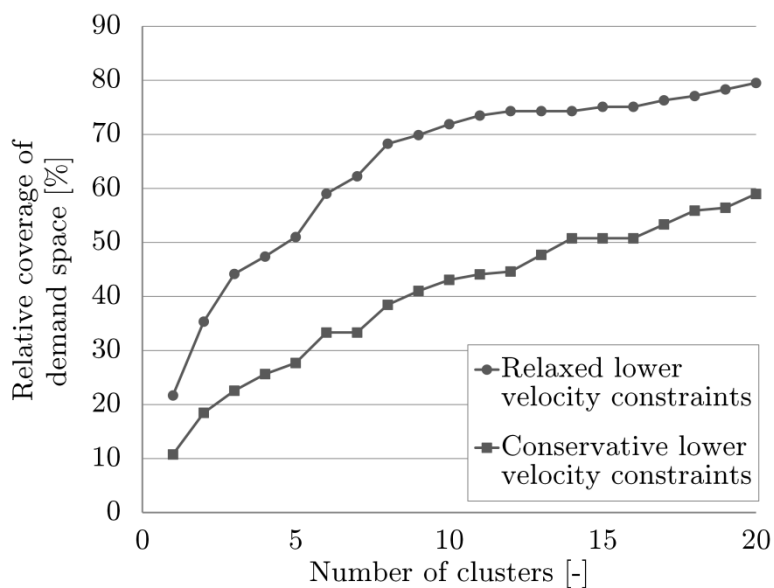


Abbildung 7: Abdeckung industrieller Wärmeübertrager-Anwendungen über die Anzahl der Cluster für konservative und gelockerte untere Geschwindigkeitsgrenzen [8]. Die betrachteten Betriebsgrenzen für die Wärmeübertrager sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Es ist zu erkennen, dass für die konservativen unteren Geschwindigkeitsgrenzen 59 % der Anwendungen mit 17 Wärmeübertragern abgedeckt werden können, obwohl die Anwendungen sehr unterschiedlich sind. Betrachtet man die

gelockerten Grenzen können mit 18 Wärmeübertragern 80 % der Anwendungen abgedeckt werden. Wie bereits erwähnt, kann abhängig von der vom Anwender geforderten Abdeckung die benötigte Anzahl an Wärmeübertrager-Modulen festgelegt werden und diese in die *Equipment-Moduldatenbank* übernommen werden.

Bei der Übertragung der entwickelten Methodik zur Erstellung einer *Equipment-Moduldatenbank* auf andere Prozessaufgaben ändern sich die industriellen Anwendungsfälle und Betriebsgrenzen des Equipments und damit auch die charakteristischen Merkmale, auf Basis derer die Anwendungsfälle gruppiert werden. Daher wurde eine strukturierte Methode zur Auswahl der charakteristischen Merkmale für den Clustering-Schritt ausgearbeitet. Hierzu wurde ein hybrides Verfahren entwickelt, bei dem ein strukturiertes Auswahlvorgehen mit Ingenieurwissen kombiniert wird [13]. Charakteristische Merkmale können so mit relativ wenig Rechenaufwand bestimmt werden. Potentielle charakteristische Merkmale werden hierbei jeweils den Betriebsgrenzen des Apparates zugeordnet und je Betriebsgrenze ein charakteristisches Merkmal ausgewählt. Die Methodik zur Erstellung einer *Equipment-Moduldatenbank* wurde um diese strukturierte Merkmalsauswahl ergänzt und für Kondensator-Anwendungen angewendet. Die charakteristischen Merkmale für Kondensator-Anwendungen sind der rohrseitige Massenstrom, die Kondensationsenthalpie und der rohrseitige Wärmekapazitätsstrom. Auf der Mantelseite kondensiert der Prozessstrom, es gibt hier keine untere Geschwindigkeitsgrenze. Daher kommt der thermodynamischen Betriebsgrenze eine höhere relative Bedeutung zu als der mantelseitigen fluiddynamischen Betriebsgrenze.

Die erweiterte Methodik zur Erstellung der *Equipment Moduldatenbank* wurde anschließend auf 165 Kondensator-Anwendungen des Projektpartners Evonik angewendet. Wie in Abbildung 8 dargestellt, können ca. 80% der betrachteten Kondensator-Anwendungen mit nur 10 Kondensator-Modulen abgedeckt werden. Es ist zu beachten, dass hierbei nur die konservativen unteren Geschwindigkeitsgrenzen betrachtet wurden (vgl. Tabelle 2).

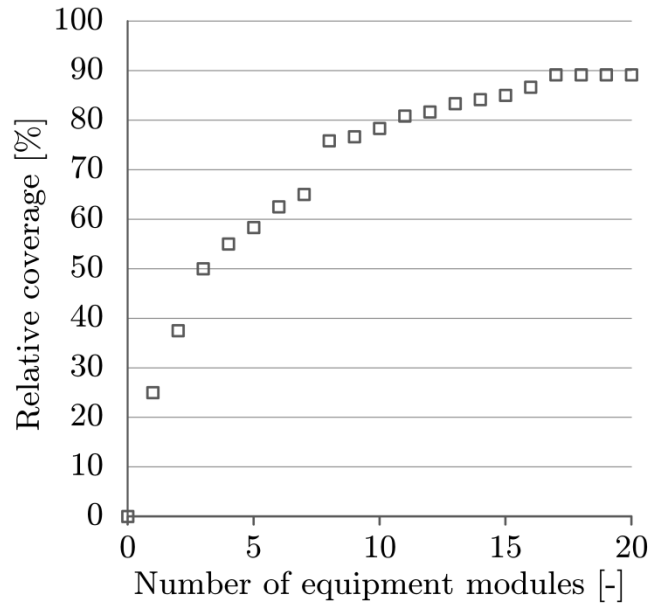


Abbildung 8: Abdeckung industrieller Kondensator-Anwendungen über die Anzahl der Kondensator-Module für konservative untere Geschwindigkeitsgrenzen [13].

Es konnte zudem gezeigt werden, dass die charakteristischen Merkmale der Anwendungen auch für die Vorauswahl eines geeigneten Equipment-Moduls verwendet werden können. Bei der modulbasierten Anlagenplanung wird dasselbe Equipment-Modul für mehrere ähnliche Anwendungen verwendet und somit werden die Ingenieursleistungen wiederverwendet. Die Ähnlichkeit der Anwendungen kann über die Ähnlichkeit der charakteristischen Merkmale ermittelt werden und somit für eine Anwendung ein vielversprechendes Equipment-Modul bestimmt werden.

Die Methode zur Auswahl der charakteristischen Merkmale sowie deren Anwendung wurde zur Veröffentlichung als wissenschaftlicher Artikel eingereicht und befindet sich derzeit im Review-Prozess [13].

Um eine *Equipment-Moduldatenbank* unabhängig von Anwendungsclustern aufzubauen, wurde zum Vergleich zusätzlich ein ‚Maximum Coverage‘-Problem aufgestellt, das aus anderen Fachgebieten bekannt ist [14]. ‚Maximum Coverage‘-Probleme traten zuerst bei der Standortplanung von z.B. Supermärkten auf [15]. Ziel hierbei ist es, die Supermarktfilialen so anzuordnen, dass möglichst viele Kunden abgedeckt werden. Übertragen auf die Erstellung einer *Equipment-Moduldatenbank* bedeutet dies, dass möglichst viele industrielle Anwendungen von einer bestimmten Anzahl an Equipment abgedeckt werden sollen. Das entsprechende ‚Maximum Coverage‘-Problem wurde aufgestellt und mithilfe eines ‚Random Greedy‘-Algorithmus [16] gelöst. Grundlage bilden auch hier die existierenden industriellen Anwendungen als auch die gesampelten Equipment-Ausführungen. Angewendet auf die auch zuvor betrachteten 275 flüssig/flüssig Wärmeübertrager-Anwendungen des Projektpartners Evonik und

dieselben 5000 gesampelten Rohrbündelwärmeübertrager, ergibt sich die in Abbildung 9 dargestellte relative Abdeckung der Anwendungen.

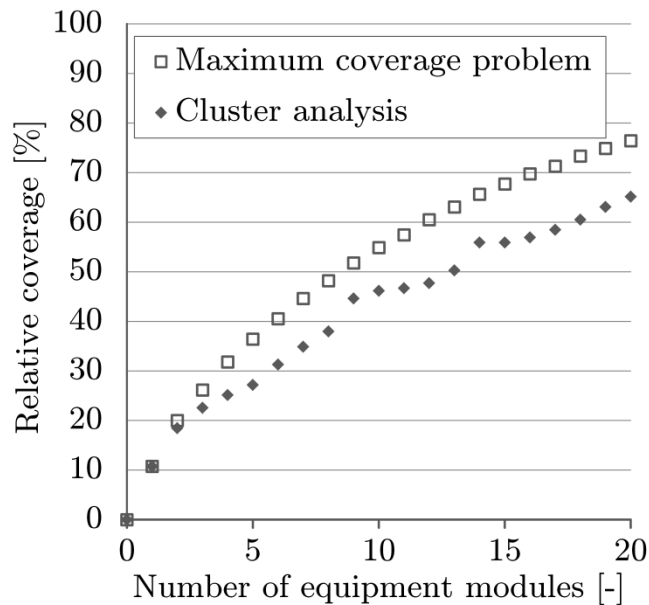


Abbildung 9: Vergleich der Abdeckung industrieller flüssig/flüssig Wärmeübertrager-Anwendungen über die Anzahl der Wärmeübertrager-Module erreicht durch die zwei untersuchten Möglichkeiten zur Erstellung einer *Equipment-Moduldatenbank*.

Es ist zu erkennen, dass für dieselbe Anzahl an Wärmeübertrager-Modulen mehr Anwendungen abgedeckt werden können, wenn die *Equipment-Moduldatenbank* basierend auf dem ‚Maximum Coverage‘-Problem erstellt wird. Es werden daher weniger Equipment-Module in der *Equipment-Moduldatenbank* für dieselbe Abdeckung benötigt. Für eine Abdeckung von ca. 60% werden beispielsweise nur noch 12 anstatt 18 Wärmeübertrager-Module benötigt. Wird die *Equipment-Moduldatenbank* durch Lösen des ‚Maximum Coverage‘-Problems erstellt, werden die Betriebsgrenzen des Equipments und damit die abdeckbaren Anwendungen ohne Beschränkung durch Anwendungscluster betrachtet. Dadurch können die entsprechenden Betriebsfenster des Equipments optimal zueinander angeordnet werden. Wird die *Equipment-Moduldatenbank* basierend auf der Cluster-Analyse erstellt, werden die Anwendungen unter der Annahme gruppiert, dass Anwendungen, die ähnliche charakteristische Merkmale haben, in dem Betriebsfenster eines Equipments liegen. Das Betriebsfenster eines Equipments kann jedoch nicht perfekt durch die charakteristischen Merkmale der Anwendungen beschrieben werden. Aus diesem Grund führt die Auswahl von Equipment-Modulen ohne Berücksichtigung von Cluster-Grenzen zu besseren Ergebnissen.

Das Vorgehen zur Erstellung einer *Equipment-Moduldatenbank* durch die Formulierung und Lösung eines ‚Maximum Coverage‘-Problems soll im 1. Quartal 2018 in einer wissenschaftlichen Veröffentlichung festgehalten werden.

In den zuvor beschriebenen Möglichkeiten zur Erstellung einer *Equipment-Moduldatenbank* wurden keine Verschaltungen der Equipment-Module berücksichtigt. Um den Einfluss der Verschaltung von Wärmeübertragern auf die Abdeckung der betrachteten industriellen Anwendungen zu untersuchen, wurden Parallel- und Reihenverschaltungen sowie Verschaltungen, bei denen jeweils eine Seite parallel und die andere in Reihe verschaltet werden, untersucht. Es wurden Verschaltungen von bis zu 3 Wärmeübertragern betrachtet. Berücksichtigt man die Verschaltung von Wärmeübertragern schon während des Aufbaus der *Equipment-Moduldatenbank*, lässt sich die Anzahl der abgedeckten Anwendungen im Vergleich zu Wärmeübertrager-Modulen ohne Verschaltung stark steigern. Wie in Abbildung 10 dargestellt ist, werden dann beispielsweise nur noch 4 anstatt 20 Wärmeübertrager-Module für dieselbe Anzahl an abgedeckten Anwendungen benötigt. Bedenkt man, dass die *Equipment-Moduldatenbank* möglichst wenig Equipment-Module enthalten sollte, sollte man also bei der Erstellung einer *Equipment-Moduldatenbank* über Verschaltungen von Equipment-Modulen nachdenken.

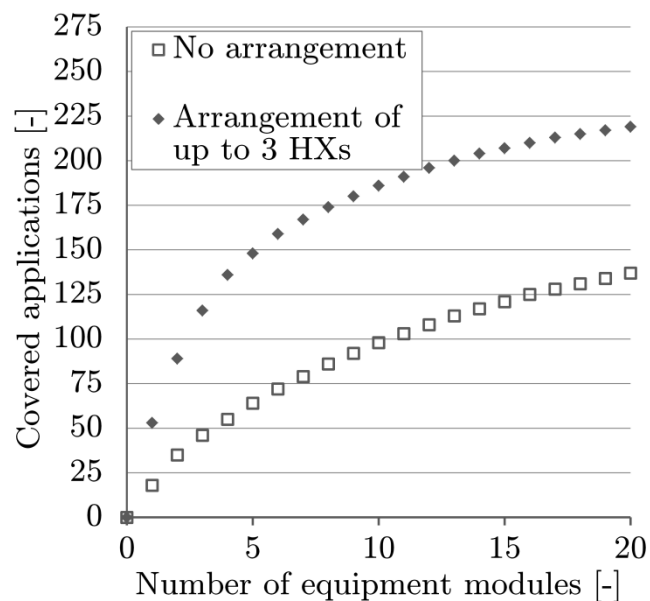


Abbildung 10: Vergleich der Abdeckung industrieller flüssig/flüssig Wärmeübertrager-Anwendungen über die Anzahl der Wärmeübertrager-Module mit und ohne Berücksichtigung von Verschaltung.

Zusätzlich zu den zuvor betrachteten fluid- und thermodynamischen Betriebsgrenzen muss beim detaillierten Design von Equipment-Modulen auch die Druckfestigkeit garantiert werden. Für welche Druckklassen Equipment-Module angeboten werden, muss noch weiter untersucht werden. Einerseits soll die Anzahl unterschiedlicher Ausführungen der Equipment-Module gering sein, andererseits bedeutet dies aber auch, dass das Equipment gegebenenfalls für zu große Drücke ausgelegt ist.

3D Layout-Moduldatenbank

Da die geometrische Abmessung des Equipments schon durch das Equipment-Modul feststeht, besteht eine 1:1-Beziehung zwischen Equipment-Modul und 3D Layout-Modul (vgl. Abbildung 5). Zusätzlich müssen in der *3D Layout-Moduldatenbank* Raumbedarfsanforderungen hinterlegt sein, wie sie beispielsweise von Kern [17–21] und Botermans und Smith [22] beschrieben werden, um die Zugänglichkeit zu gewährleisten. Diese werden während der Konfiguration eines *Modularen 3D Layouts* benötigt (vgl. Abschnitt 2.3.2).

2.2 AP2 „Standardisierung“

DBIC, IPAT, Lewa, Netzsch, qonqave

Aufgrund der bisher nötigen frühzeitigen Einplanung der Pumpen in die Anlagen werden grundsätzlich immer, wenn nicht explizit eine andere Pumpe nötig ist, Kreiselpumpen eingeplant, da diese flexibel sind und auch bei falschen Betriebsbedingungen robust reagieren. Da während des Gesamtplanungsprozesses viele Verschiebungen der Förderparameter der Pumpen auftreten können, führt das dazu, dass heute in der Praxis sehr viele Kreiselpumpen bei Förderströmen unter 100 m³/h, in Wirkungsgradbereichen zwischen 5 und 20% arbeiten. Durch eine einfache Austauschbarkeit verschiedener Pumpentypen untereinander, könnten die Pumpen wesentlich später und damit präziser eingeplant werden. Damit könnten für die gleichen Anwendungen Verdrängerpumpen mit 80% Wirkungsgrad zum Einsatz kommen (Schraubepumpen, oszillierende Pumpe, optimierte Kreiskolbenpumpen), und zugleich wäre auch noch eine leichtere Regelbarkeit gegeben. Damit wären immense Kosteneinsparungen, z.B. für 100 m³/h, gegen 10 bar von 43200 €/a, möglich und äquivalent dazu eine merkliche Klimagasreduktion.

Innerhalb dieses Arbeitspakets wurde anhand von Pumpen unterschiedlichster Typen demonstriert, wie diese in Richtung untereinander frei austauschbarer Pumpenmodule weiterentwickelt werden können. Im Rahmen dessen wurden drei Themenschwerpunkte untersucht, die für das Erreichen dieses Ziels notwendig sind. Nachfolgend sind die zugehörigen Ergebnisse in den jeweiligen Unterkapiteln zur Standardisierung von Anschlüssen und Betriebsbereichen, zur Dämpfung von Flüssigkeits-pulsationen und Körperschall sowie zu einem einheitlichen Monitoring über Drehmomentmessungen an der Welle zusammenfassend dargestellt.

2.2.1 Standardisierung von Anschlussgeometrie und Betriebsbereich

Der erste grundlegend notwendige Schritt in Richtung Standardisierung stellte die Realisierung eines einheitlichen Anschlusssystems für alle Pumpentypen dar. Bisher wiesen verschiedene Pumpentypen auch unterschiedlichen Anschlussgeometrien auf, was sowohl Dimensionierung wie auch Position der Anschlüsse betraf. Um in Zukunft die Austauschbarkeit und Umrüstbarkeit verschiedener Pumpentypen untereinander zu ermöglichen, wurde in Absprache mit den am Projekt beteiligten Pumpenherstellern eine solche einheitliche Anschlussgestaltung festgelegt.

Nachdem verschiedene Optionen für ein einheitliches Anschlussmaß auf ihre Praxistauglichkeit geprüft wurden, fiel die Entscheidung abschließend darauf sich an der bereits bestehenden Norm für Chemienormkreiselpumpen nach DIN EN ISO 2858 (Kreiselpumpen mit axialem Eintritt) zu orientieren, sieht Abbildung 11

und Abbildung 12. Die Projektpartner einigten sich darauf aus der genannten Norm vor allem die Dimensionierung und Position der Anschlüsse sowie die zu erzielende Fördermenge zu übernehmen. Die ebenfalls in der Norm vorgesehenen Angaben zu Baugröße und Flächenbedarf der Pumpen können jedoch nicht übernommen werden, da für unterschiedliche Pumpentypen mit vollkommen unterschiedlichen Wirkprinzipien grundlegend verschiedene Bauformen notwendig sind.

Nachdem die entsprechenden Rahmenbedingungen festgelegt wurden, wurde bei den am Projekt beteiligten Partnern mit den jeweiligen Arbeiten begonnen. Jeder Pumpenhersteller hatte hierfür eigene Herausforderungen, die zur Erfüllung der Standardisierung für seine Pumpen überwunden werden mussten. iPAT trat hierbei beratend für die beteiligten Pumpenhersteller auf, sowohl was die reine Anpassung der Pumpen betraf, aber auch was die gleichzeitige Möglichkeit zur Effizienzsteigerung betraf. Nachfolgend sind die Ergebnisse der jeweiligen Hersteller zusammenfassend dargestellt.

DIN EN ISO 2858:2011-12
EN ISO 2858:2010 (D)

Tabelle — Nennleistung und Maße

Größenbezeichnung ²⁾			Nennleistung				Maße in mm																		
Eintritt mm	Austritt mm	Laufрад (Nenn-) mm	n 1 450 min ⁻¹		n 2 900 min ⁻¹		Pumpenmaße				Fußmaße					Durchgangs- löcher für Schrauben		Wellenende							
			Q m ³ /h	H m	Q m ³ /h	H m	a	f	h ₁	h ₂	b	m ₁	m ₂	n ₁	n ₂	n ₃	w	S ₁	S ₂	d	l	x ¹⁾			
50	32	125	6,3	5	12,5	20	80	385	112	140	50	100	70	190	140	110	285	M 12	M 12	24	50	100			
50	32	160		8		32			132	160				240	190					32	80				
50	32	200		12,5		50			160	180				265	212					370	32		80		
50	32	250		20		80			100	500				180	225					65	125		95	320	250
65	50 (40) ^{*)}	125	12,5	5	25	20	80	385	112	140	50	100	70	210	160	110	285	M 12	M 12	24	50	100			
65	50 (40) ^{*)}	160		8		32			132	160				240	190					32	80				
65	40	200		12,5		50			160	180				265	212					370	32		80		
65	40	250		20		80			100	500				180	225					65	125		95	320	250
65	40	315	32	125	125	200	250	345	280																
80	85 (50) ^{*)}	125	25	5	50	20	100	385	132	160	50	100	70	240	190	110	285	M 12	M 12	24	50	100			
80	65 (50) ^{*)}	160		8		32			180	200				265	212					370	32		80		
80	50	200		12,5		50			160	180				265	212					370	32		80		
80	50	250		20		80			125	500				180	225					65	125		95	320	250
80	50	315	32	125	125	225	280	345	280																
100	80 (65) ^{*)}	125	50	5	100	20	100	385	160	180	65	125	95	280	212	110	285	M 12	M 12	24	50	100			
100	80 (65) ^{*)}	160		8		32			200	250				320	250					370	32		80		
100	65	200		12,5		50			500	180				225	360					280	370		32	80	
100	65	250		20		80			125	200				250	400					315					
100	65	315	32	125	125	530	225	280	400	315															
125	80	160	80	8	160	32	125	500	180	225	65	125	95	320	250	110	370	M 12	M 12	32	80	140			
125	80	200		12,5		50			180	250				345	280					370	32		80		
125	80	250		20		80			125	225				280	400					315					
125	80	315		32		125			125	530				250	315					400	315				
125	80	400	50	160	125	280	355	400	315	135	355														

Abbildung 11: Geometrische Abmessungen Kreiselpumpenanschluss nach Norm, gewählte Geometrie blau hinterlegt

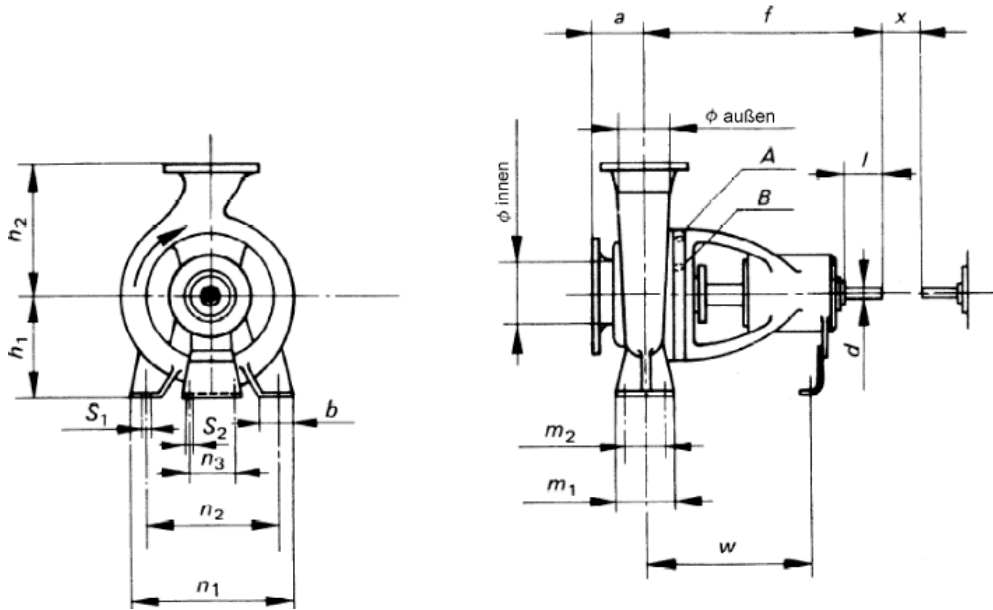


Abbildung 12: Bemaßung Kreiselpumpenanschluss nach Norm

Gleichzeitig wurde am iPAT eine entsprechende Versuchsanlage (Abbildung 13) aufgebaut, auf der die anzupassenden Pumpen anschließend vermessen werden sollten. Die Auslegung der Anlage erfolgt hierfür nach den festgelegten Rahmenbedingungen, wurde jedoch auch flexibel genug gestaltet damit auch bestehende oder teilweise angepasste Pumpen vermessen werden konnten.

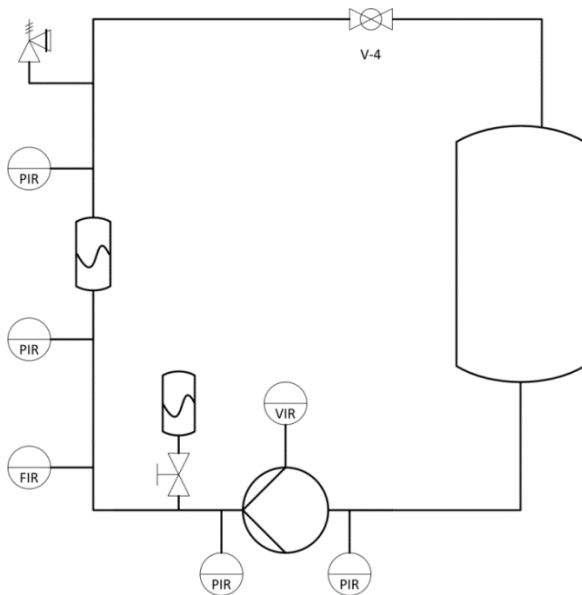


Abbildung 13: Versuchsanlage zur Vermessung der standardisierten Pumpen

Beim Projektpartner LEWA gefertigte oszillierende Verdrängerpumpen (z.B. Kolbenmembranpumpen) zeichnen sich normalerweise vor allem durch gute Dosierbarkeit über einen weiten Stellbereich und den Aufbau hoher Drücke aus. Um mit einer Pumpe aus dieser Wirkweise die angestrebten Ziele dieses Projekts erreichen zu können, wurde beschlossen eine neue Triplex-Membrankolbenpumpe zu entwickeln (siehe Abbildung 14). Insbesondere der Wunsch nach einer höheren Leistungsdichte (Fördermenge) im Vergleich zu den für diesen Pumpentyp üblichen Größen stellte hierbei eine Herausforderung dar. Zum Erreichen dieses Ziels wurde die angestrebte Drehzahl der Pumpe erhöht, was wiederum zu weiterem Optimierungsbedarf führte um dem erhöhten Verschleiß durch die höhere Drehzahl entgegen wirken zu können. Insbesondere für die Ventile wurden hierfür Verschleißversuche durchgeführt um durch die Wahl verbesserter Werkstoffe tribologische Probleme zu vermeiden. Für die Bereitstellung der standardisierten Anschlussgeometrie hat man sich für eine Neuordnung der Verrohrung innerhalb der Pumpe entschieden. Durch den konzeptbedingten Einsatz von drei Kolben ist eine Verrohrung innerhalb der Pumpe ohnehin kaum vermeidbar, zusätzlich erlaubt dies jedoch auch eine schnellere Adaption einer neuen Pumpe und es eröffnet die Möglichkeit einen Pulsationsdämpfer direkt in die Pumpe zu integrieren (siehe Kapitel 2.2.2). Zukünftig könnte jedoch auch mit zusätzlichem Entwicklungsaufwand noch eine völlig anders gestaltete Pumpe entstehen, die mit weniger internen Rohrleitungen auskommt. Im Rahmen dieses Projekt wurde jedoch die in Abbildung 14 gezeigte Triplex-Membrankolbenpumpe an die standardisierten Rahmenbedingungen angepasst, gefertigt, bei LEWA getestet und auf dem Prüfstand des iPAT deren Funktionalität verifiziert.

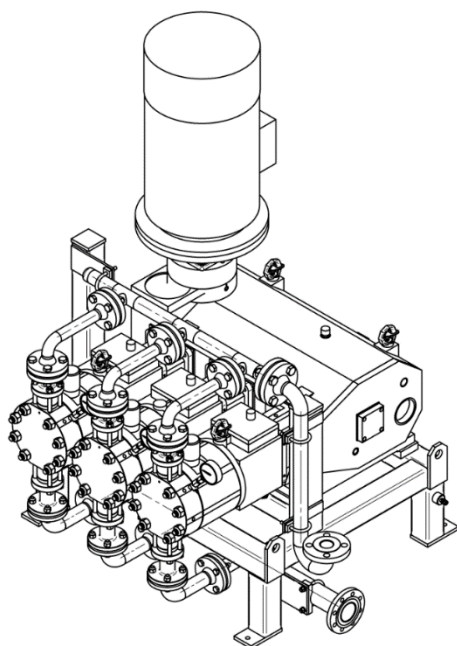


Abbildung 14: Triplex-Membrankolbenpumpe mit standardisierten Anschlüssen und Betriebsbereich (links: schematisch, rechts: Foto)

Beim Projektpartner DBIC wurde eine Pitotrohrpumpe modifiziert um den Anforderungen der gewählten Standardisierung zu entsprechen (siehe Abbildung 15). Prinzipiell weisen Pitotrohrpumpen bereits eine ähnliche, geometrische Gestaltung auf wie Kreiselpumpen, sodass eine Anpassung der Anschlussgeometrie an die gewählte Standardisierung relativ einfach möglich war.

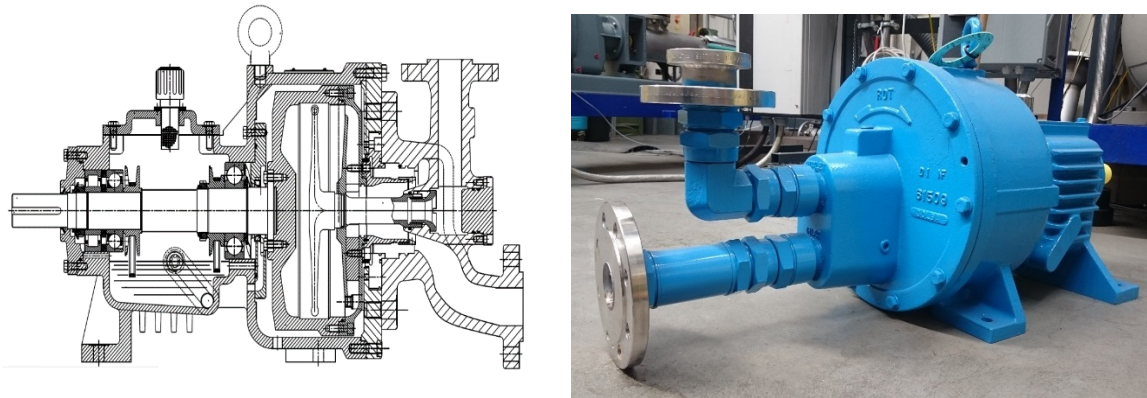


Abbildung 15: Pitotrohrpumpe mit standardisierten Anschlüssen (links: ideales Schema, rechts: Foto der Realisierung)

In Abbildung 15 zu sehen ist die Umsetzung der Anschlussmodifikation einer Pitotrohrpumpe sowie eine schematische Zeichnung, wie diese langfristig sogar noch kompakter umgesetzt werden kann. Zur Optimierung ihrer Effizienz wurden am iPAT Strömungssimulationen durchgeführt, um das Verhalten der Flüssigkeit innerhalb der Pumpe zu untersuchen.

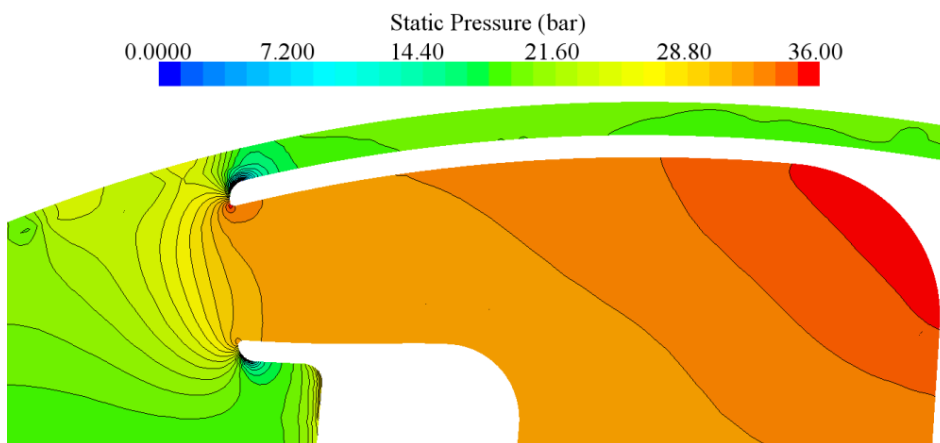


Abbildung 16: Simulation der Einströmung in ein Pitot-Rohr

Abbildung 16 zeigt exemplarisch Ergebnisse dieser Simulationen. Hier zu sehen ist die Druckverteilung an der Eintrittsöffnung des Pitot-Rohrs. In Kombination mit durchgeführten Messungen an einer modifizierten Pitotrohrpumpe mit optischen Zugängen mittels Glasbauteilen konnten Vorschläge erarbeitet werden um die Druckverluste innerhalb des Pitot-Rohrs zu verringern und somit die Pumpen-

Effizienz zu steigern. Außerdem wurde von dem Partner DBIC die Anwendbarkeit der Pumpe für heiße Fördermedien, insbesondere der Erhalt der Dichtungen verifiziert. Abschließend wurden zum Erreichen des gewünschten Förderstroms noch unterschiedliche Bauweisen mit einfachen oder doppelten Pitot-Rohren mit unterschiedlichen Einlassdurchmessern getestet. Als Ergebnis der genannten Arbeiten steht nun eine modifizierte Pitotrohrpumpe zur Verfügung, die alle Anforderungen der festgelegten Standardisierung erfüllen kann. Darüber hinaus wurde ein neues Wirkprinzip erfunden, das den Standardanschluss grundsätzlich beinhaltet und zugleich die Parallelschaltung von Pumpen erlaubt sowie kostengünstiger ist.

Beim Projektpartner Netzsch wurden verschiedene ihrer Pumpentypen auf die Möglichkeit zur Standardisierung der Anschlüsse und Betriebsparameter untersucht. Für das erste untersuchte Konzept der Drehkolbenpumpe konnte jedoch auch nach reichlicher Überlegung keine vielversprechende Anpassung an die gewählten Standardmaße erdacht werden. Alle betrachteten Varianten zur Modifikation dieser Pumpe auf die standardisierte Anschlussgeometrie standen im Widerspruch zu einem oder mehreren der Kernalleinstellungsmerkmale dieses Pumpentyps. Deshalb wurde vorerst von einer Standardisierung dieses Pumpentyps abgesehen, wobei in Kombination mit einem speziell gestalteten Dämpfer (bei hohen Pumpendrehzahlen nötig) die Standardisierung leicht möglich ist. Die Realisierung dieser Lösung ist aber erst für 2018 geplant.

Zusätzlich wurde bei den Projektpartner Netzsch die Möglichkeit zur Standardisierung einer Exzentrerschneckenpumpe untersucht. Die Entwicklung zur Anpassung der Exzentrerschneckenpumpe erfolgte hierfür in zwei Schritten. Grund hierfür sind zwei Aufgabenstellungen, die gesondert gelöst werden müssen. Zum einen lässt sich auf Grund des Funktionsprinzips die Anschlussgeometrie bei der Exzentrerschneckenpumpe nicht ohne signifikante, konstruktive Änderungen auf die gewünschte Anschlussgeometrie für Kreiselpumpen bringen. Zum anderen sieht der gewählte Standard einen höheren Massenstrom vor. Im ersten Schritt wurde mit einer gewöhnlich gebauten Exzentrerschneckenpumpe, ohne Anpassung der Anschlussgeometrie, untersucht wie der gewünschte Massenfluss zu erreichen ist. Hierfür muss die Pumpe mit einer höheren Drehzahl als gewöhnlich betrieben werden, was automatisch zu erhöhtem Verschleiß der Rotor-Stator-Paarung führt. Um dem entgegenzuwirken wurden im ersten Entwicklungsschritt weitere Rotor-Stator-Paarungen entwickelt und auf ihre Betriebsverhaltens- und Abnutzungseigenschaften hin untersucht. Mit den untersuchten, weiteren Rotor-Stator-Paarungen konnte die untersuchte Exzentrerschneckenpumpe quasi alle Anforderung der gewählten Standardisierung erfüllen. Lediglich die einheitliche Anschlussgeometrie muss mittels Rohr-Adapter erreicht werden.

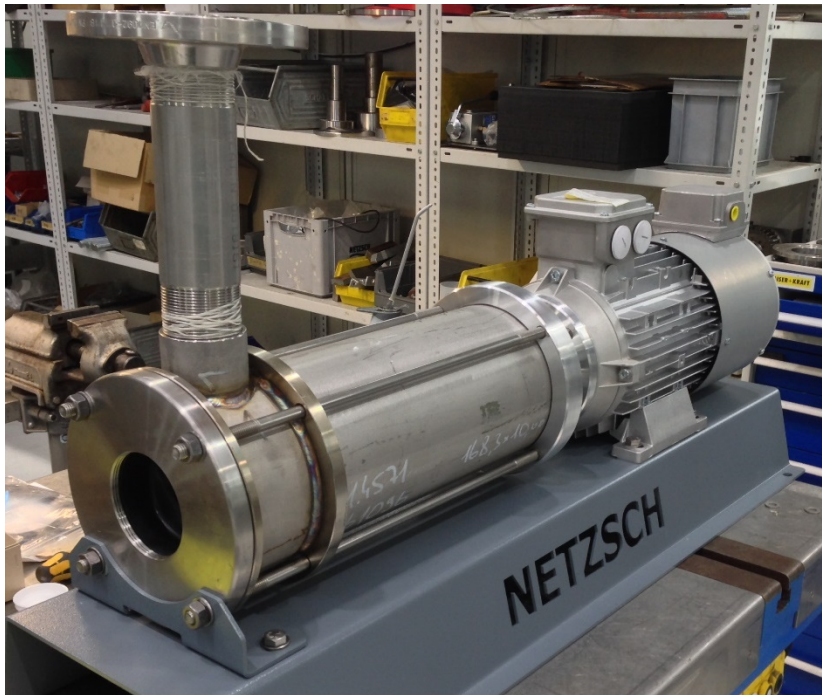


Abbildung 17: Prototyp einer neu entwickelte Wobbel-Pumpe mit standardisierter Anschlussgeometrie

Im zweiten Entwicklungsschritt wurde dann eine komplett neue Wobbelpumpe (siehe Abbildung 17) entwickelt, die sowohl den zuvor untersuchten Massenstrom erreichen kann, dazu aber aufgrund ihrer völlig geänderten Geometrie auch die standardisierte Anschlussgeometrie vorweisen kann. Zudem konnte bei ihrer Entwicklung der Platzbedarf im Vergleich zu der zuvor untersuchten Exzentrerschneckenpumpe stark reduziert werden. Somit steht von Netzsch nun sowohl eine modifizierte Exzentrerschneckenpumpe zur Verfügung, die mit wenigen Adapter-Rohren die Anforderungen an die Standardisierung erfüllt, wie auch eine neue Wobbelpumpe, die den Anforderungen vollständig genügt.

Beim Projektpartner Qonqave wurde ein völlig neues Pumpenwirkprinzip von Grund auf neu konstruiert und Prototypen sowohl für den Laborbetrieb wie auch den Prozessbetrieb entwickelt. Im Laufe der Entwicklungsarbeiten zur technischen Umsetzung der Conveying Wave Technology genannten Variante von Peristaltikpumpen wurde eine Reihe von unterschiedlichen Umsetzungsvarianten untersucht.

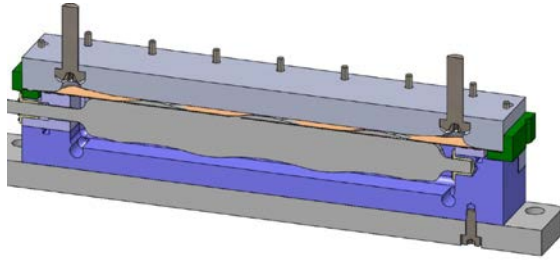


Abbildung 18: CWT-Prototyp, Laborvariante

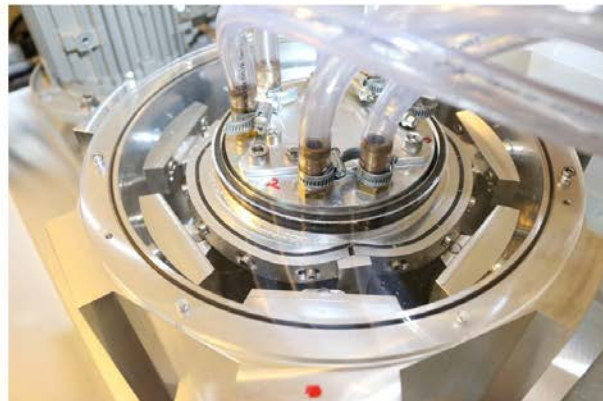
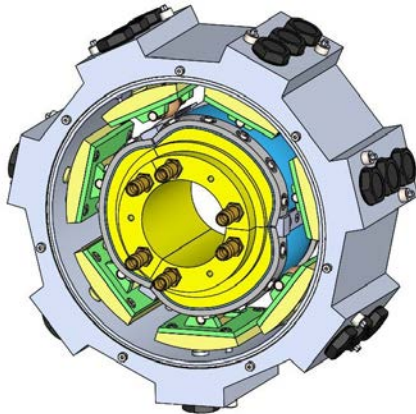


Abbildung 19: CWT-Prototyp, Prozessvariante

Abbildung 18 zeigt die für den Laborbetrieb bei niedrigen Massenströmen anzuwendende Variante der CWT Pumpe, welche in Linearbauweise ausgeführt wurde. In Abbildung 19 ist ein erster Prototyp einer radialen Variante für den Prozessbetrieb dargestellt. Beide Variante konnten anschließend in einer Reihe von Vermessungen und Belastungstests ihre generelle Funktionsfähigkeit und Beständigkeit unter Beweis stellen. Auch wenn der Prototyp für den Prozessbetrieb aktuell noch nicht die gewünschte Anschlussgeometrie und den vollen zu erzielenden Massenstrom aufweist, so konnte doch bereits gezeigt werden, dass dieses Pumpenprinzip leicht skaliert werden kann. In der zukünftigen Produktentwicklung kann somit eine Skalierung auf die angestrebten standardisierten Betriebsparameter vorgenommen werden. Auch eine Anpassung an die geforderte Anschlussgeometrie sollte bei der gewählten Bauform in diesem Zuge möglich sein.

2.2.2 Selbstregelnder Pulsationsdämpfer

Thema des zweiten Entwicklungsschwerpunkts für die Standardisierung und Austauschbarkeit von verschiedenen Pumpentypen stellte die Vermeidung von Pulsationen im System dar. Aufgrund der unterschiedlichen Wirkprinzipien der verschiedenen in diesem Projekt anzupassenden Pumpen weisen diese auch vollkommen unterschiedliche Pulsationscharakteristiken auf, sowohl was Frequenz wie auch Amplitude der erzeugten Schwingungen betrifft. Für

unterschiedliche Kombinationen dieser Parameter werden bisher verschiedene Dämpfungskonzepte im System eingesetzt, wie Windkessel, Blasenspeicher oder Resonatoren. Ziel dieses Projektteils war es ein Konzept zu entwickeln, wie mit einem möglichst einheitlichen Dämpfer möglichst viele von den Pumpen erzeugte Pulsationen gedämpft werden können.

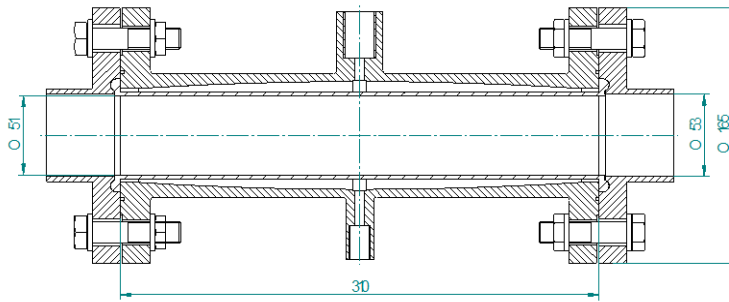


Abbildung 20: Inline Pulsationsdämpfer

Als erster Schritt zur Entwicklung des beschriebenen Dämpfers wurde ein Prototyp nach dem Prinzip eines Inline-Pulsationsdämpfers wie in Abbildung 20 dargestellt gebaut. Dimensionierung und Bauform des Dämpfers wurden so ausgelegt, dass dieser an der einheitlichen Anschlussgeometrie aus Kapitel 2.2.1 verbaut werden kann. Da zu Beginn der Arbeiten jedoch noch keine entsprechend modifizierte Pumpe mit einheitlichem Anschlussmaß zur Verfügung stand, wurden erste Funktionsnachweise und Messung mit einer vorhandenen Kreiselpumpe durchgeführt.

Wie bei einem klassischen Blasenspeicher wird auch bei diesem Inline-Pulsationsdämpfer die Dämpfungswirkung erzielt, indem die Pulsationen von dem Arbeitsfluid über die Membran auf ein mit Druck vorbeladenes Gasvolumen übertragen werden. Besonders zu beachten bei dem Bau eines Inline-Dämpfers ist, dass der Gasdruck niemals den Flüssigkeitsdruck übersteigen darf, da sich sonst die Membran in Richtung Rohrmittle ausdehnen und es zu einem Kompletverschluss des eigentlich durchströmten Dämpfers führen kann. Durch das plötzliche Verschließen würde ein Joukowsky-Druckstoß entstehen. Entgegen der eigentlichen Intension würden also zusätzlich Druckpulsationen ins System eingebracht werden. Der andere Grenzfall des Betriebsverhaltens ist extrem niedriger Gasdruck, welcher zum Anlegen der Membran an die äußere Gehäusewand führt. In ersten Versuchen wurde festgestellt, dass genau dieses Anlegen der Membran an die Gehäuse-Außenwand problematisch werden kann. Durch das Anlegen wird die Angriffsfläche des Gasdrucks von der Oberfläche der gesamten Membran auf die Querschnittsfläche der einzelnen, radialen Bohrung zur Gas-Befüllung reduziert. Folglich ist in einem solchen Fall keine reaktionsschnelle, kontrollierte Nachregelung des Gasdrucks mehr möglich.



Abbildung 21: Varianten zur Vermeidung des Anlegens der Membran an die Gehäusewand (links: Sintermetalleinsatz, rechts: Noppenstruktur auf Membran)

In Abbildung 21 sind zwei untersuchte Methoden zur Vermeidung des genannten Problems dargestellt. Links in der Abbildung wurde das Einsetzen einer gasdurchlässigen Sintermetall-Hülse in die Gaskammer zwischen Außenwand und Membran untersucht. Dadurch bleibt beim Anliegen der Membran (nun an die Sintermetall-Hülse) trotzdem eine große Angriffsfläche für den Druck, sodass hierdurch das Ansprechverhalten deutlich verbessert werden konnte. Jedoch führte diese Variante auch dazu, dass stets ein Minimalvolumen von Gas (Innenraum des Sintermetalls) verbleibt, das nicht weiter komprimiert werden kann. Als Folge dessen bietet diese Variante nur einen sehr schmalen Betriebsbereich für die Gasdruck-Beladung, wie in Abbildung 22 dargestellt. Deshalb wurde die zweite Variante entwickelt, bei der die Membran mit einer Noppenstruktur (Abbildung 21 rechts, hier Noppen aus Silikon) versehen wurde. Hierdurch wird ein komplettes, flächiges Anliegen der Membran an die Gehäusewand vermieden. Stattdessen verbleiben stets kleine Spaltkanäle, über die sich der Druck über die gesamte Membran ausbreiten kann. Hierdurch wird ein vergleichbar gutes Ansprechverhalten bei einsetzender Druckbeladung erzielt wie für den Sintermetall-Einsatz, ohne jedoch einen Totraum (Innenraum des Sintermetalls) zu erzeugen. Im rechten Diagramm von Abbildung 22 erkennt man, dass hierdurch ein deutlich breiteren Betriebsbereich (Gasdruckbeladung des Dämpfers) ermöglicht wird. Folglich wird für die nachfolgenden Untersuchungen stets die Variante des Inline-Pulsationsdämpfers mit genoppter Membran verwendet, welche gute Pulsationsdämpfungseigenschaften für Gasdrücke zwischen 80% und 100% des Fluidrucks liefert.

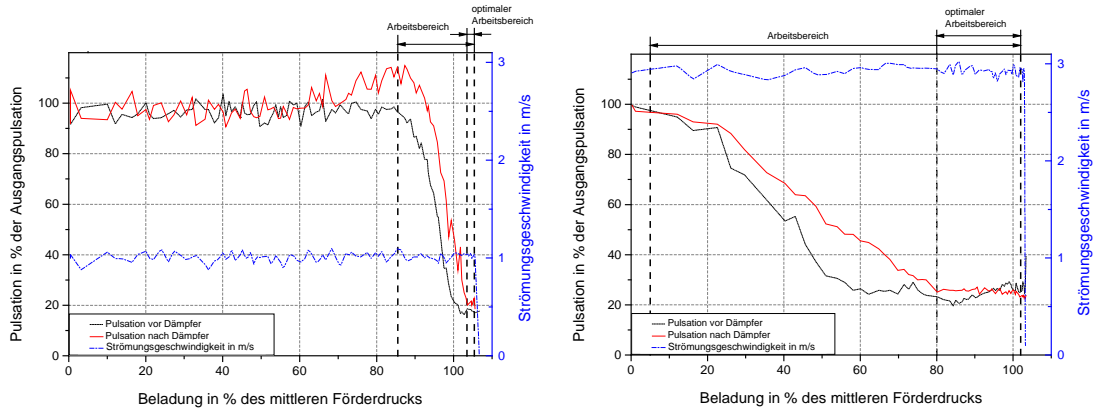


Abbildung 22: Verbleibende Restpulsationen abhängig von der Dämpferbeladung (links: Sintermetaleinsatz, rechts: Noppenstruktur auf Membran)

Als weiterer, vorbereitender Schritt für eine detaillierte Vermessung der Dämpfungseigenschaften, wurde eine transparente Variante des Dämpfergehäuses entworfen (siehe Abbildung 23). Diese erlaubte eine optische Auswertung des Membranverhaltens mittels Aufnahmen einer Hochgeschwindigkeitskamera. Zudem konnte hiermit nochmals die Funktionalität der Noppenstruktur auf der Membran bestätigt werden.



Abbildung 23: Optische Vermessung eines transparenten Pulsationsdämpfers mittels Hochgeschwindigkeitsaufnahmen

Wie bereits vorher im Bericht erwähnt fanden die ersten Untersuchungen zur Funktionsfähigkeit des Pulsationsdämpfers mit einer vorhandenen Kreiselpumpe statt, da zu diesem Zeitpunkt noch keine der im Rahmen des Projekts modifizierten Pumpen verfügbar war. Verglichen wurden vor allem die Ergebnisse zwischen dem voll funktionsfähigen Dämpfer und dem Dämpfer ohne Gas und ohne eingesetzter Membran. Bei manchen Messungen wurden auch noch Vergleichsergebnisse nur mit eingesetzter Membran, jedoch ohne Gasbeladung erstellt, da bereits die erhöhte Kompressibilität des Membranmaterials eine leichte Dämpfungswirkung erzielt. Zusätzlich zu den in Abbildung 23 dargestellten optischen Auswertungen wurden auch Druckverläufe und Körperschallmessungen an unterschiedlichen Stellen im System erfasst.

Diese Messungen wurden für eine ganze Reihe unterschiedlicher Betriebszustände (Drehzahl, Durchfluss, Druck) durchgeführt.

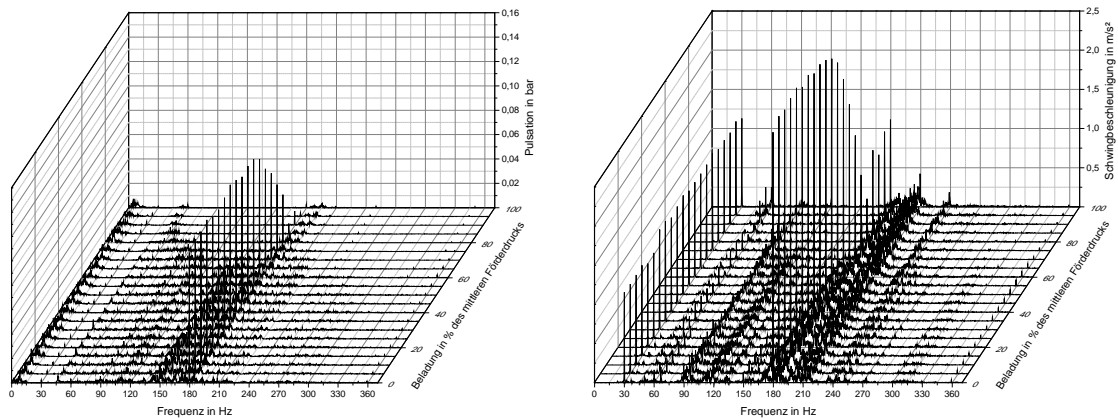


Abbildung 24: Maximale Pulsationsamplitude (y) über zugehöriger Frequenz (x) für verschiedene Dämpferbeladungen (z) (links: Druck, rechts: Körperschall)

Die Ergebnisse in Abbildung 24 zeigen die Amplitudenstärke der einzelnen Frequenzanteile eines Messpunktes für verschiedene Beladungszustände des Pulsationsdämpfers. Man erkennt nochmals klar, dass die Dämpfungswirkung erst ab einer Beladung von etwa 80% des Fluiddrucks ihre Wirkung erzielt. Für die im linken Teil dargestellten Druckpulsationen erkennt man, dass diese ab der notwendigen Minimalbeladung quasi vollständig weggedämpft werden. Für den auf der rechten Seite dargestellten Körperschall werden, auch wieder ab der kritischen Minimal-Beladung, die meisten, jedoch nicht alle Pulsationsamplituden gedämpft. Ursache hierfür ist, dass ein Teil der Pulsationen ausschließlich über die Bauteile (Rohrleitungen) übertragen wird und in keiner Wechselwirkung mit der Fluidsäule steht. Da der Pulsationsdämpfer jedoch auf die Flüssigkeitssäule innerhalb der Rohrleitung wirkt, können solche Pulsationen nicht gedämpft werden.

In Abbildung 25 sind für einen Messpunkt nochmal Druck- und Körperschallmessungen sowohl im Zeit- wie auch im Frequenzbereich aufgetragen. Insbesondere für den Druckverlauf über die Zeit (Teilabbildung a) fällt deutlich die verringerte Peak-to-Peak-Differenz auf zwischen der Referenzmessung ohne Dämpfer (schwarz) und der Messung mit Pulsationsdämpfer (blau). Für den Zeitverlauf des Körperschalls (Teil c) kann ebenfalls eine Reduktion der Peak-to-Peak-Schwankung erkannt werden. Aus den beiden Teilabbildungen (b) und (d), welche die jeweils entsprechenden Fourier-Transformationen der Signale darstellen, erkennt man, dass die Dämpfungseigenschaften über ein breites Frequenzspektrum sowohl für Druck wie auch für den Körperschall erzielt werden können.

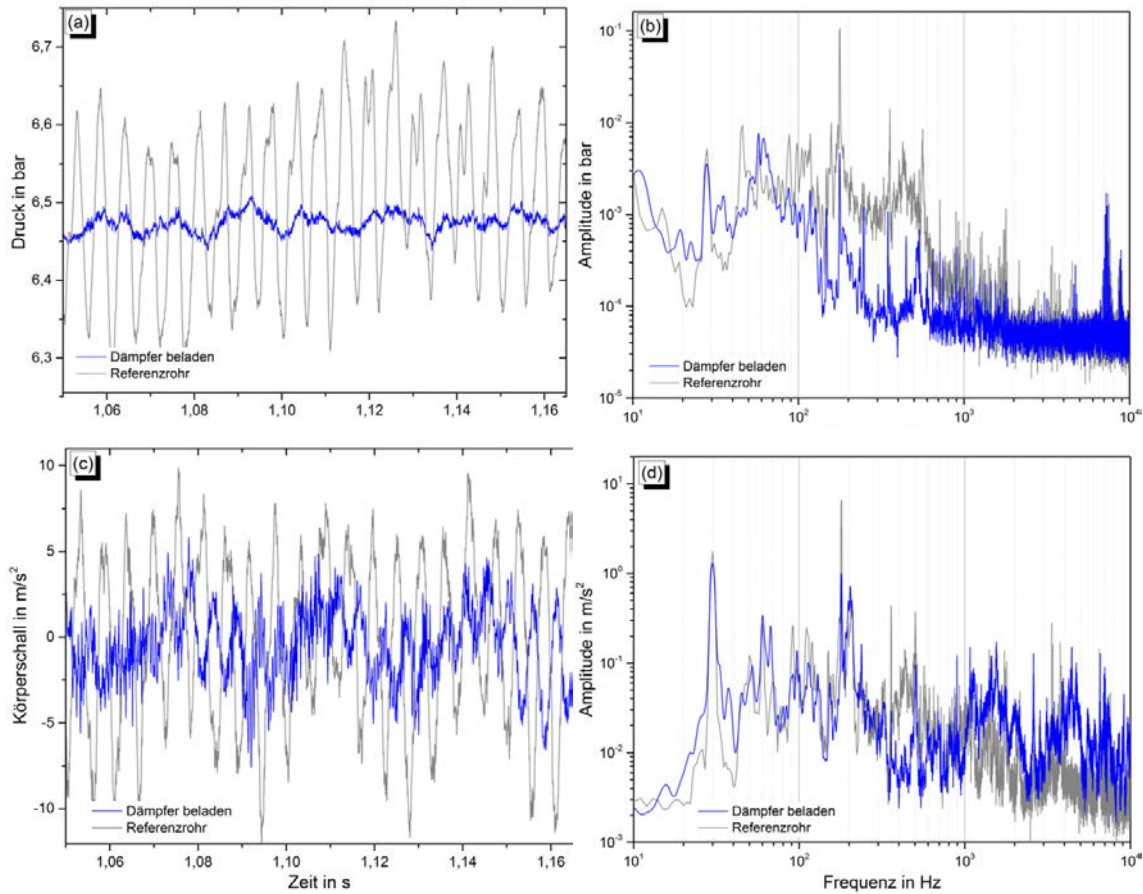


Abbildung 25: Druck- (oben) und Körperschallmessungen (unten) im Zeitbereich (links) und im Frequenzbereich (rechts) (schwarz: Referenz, blau: mit Dämpfer)

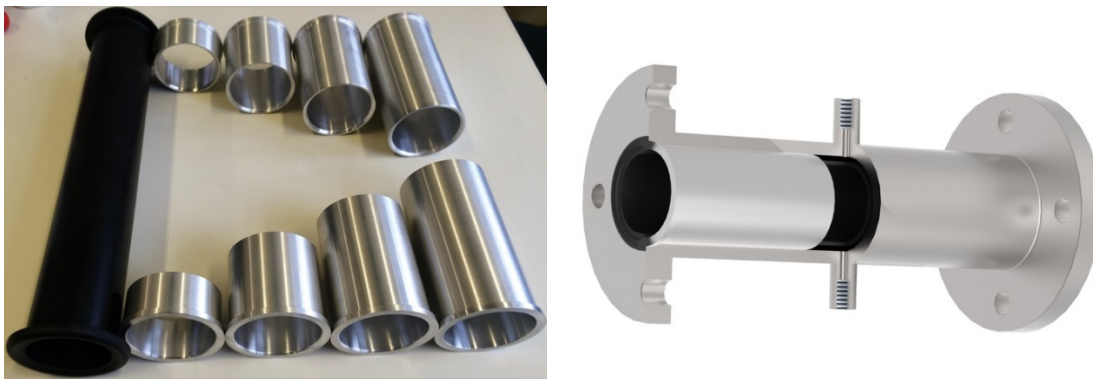


Abbildung 26: Hülsen zur Untersuchung des Volumeneinflusses

Als ein weiterer, für die Auslegung des Dämpfers wichtiger Parameter wurde der Einfluss des Gasvolumens auf die Dämpfungswirkung untersucht. Hierfür wurden wie in Abbildung 26 dargestellt, Hohlzylinderhülsen unterschiedlicher Länge gefertigt, die zwischen Dämpfergehäuse und Membran montiert werden können. Hierdurch lässt sich gezielt das zur Verfügung stehende Gasvolumen reduzieren bei minimalst möglicher Änderung anderer Parameter.

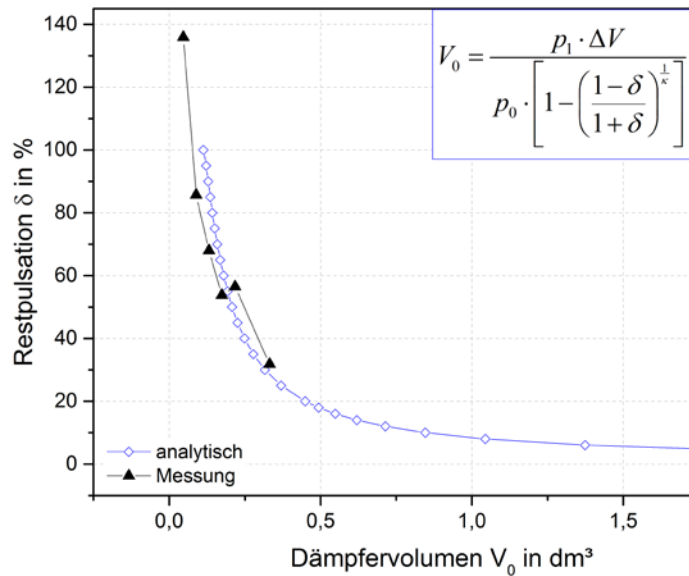


Abbildung 27: Vergleich von Messung und theoretischen Werten zum Volumeneinfluss auf das Dämpfungsverhalten

Die Ergebnisse von Messungen mit unterschiedlichen Gasvolumina sind in Abbildung 27 dargestellt, zusammen mit einer Kurve, die mittels theoretischer Herleitungen berechnet wurde. Für die durchgeführten Messpunkte erkennt man eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den theoretischen Werten und den real gemessenen Ergebnissen. Mit diesem Wissen kann nun der Pulsationsdämpfer für jede Pumpe individuell verbessert ausgelegt werden, entsprechend der jeweiligen Betriebsparameter.

Nachdem die Funktionsfähigkeit des Pulsationsdämpfers unter statischer Druckbelastung gezeigt wurde, wurde dieser mit einem Proportional-Druckregelventil ausgerüstet und dieses an die Anlagensteuerung angeschlossen. Durch die Wahl einer geeigneten Steuerung des Ventils wurde der Pulsationsdämpfer in einen sich selbst regelnden Betriebszustand gebracht. Dies ist für dessen Pulsationsdämpfungseigenschaften unerlässlich, sobald sich der Systemdruck während des Betriebs ändert (z.B. während des Anfahrens/Ausschaltens), da wie weiter vorne gezeigt die Dämpfungseigenschaften nur in einem gewissen Betriebsbereich des Beladungszustandes zum Tragen kommen.

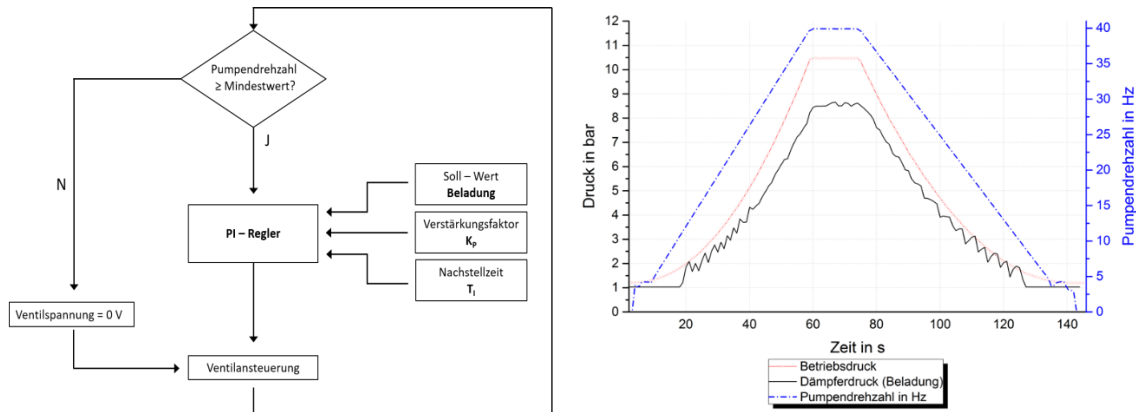


Abbildung 28: PID Regelkreis und resultierende Druckbelastung

Abbildung 28 zeigt den resultierende Regelkreis, der sich in experimentellen Untersuchungen als der best-geeignete erwiesen hat. Rechts in der Abbildung ist der resultierende Verlauf von Drehzahl der Pumpe, Druck im System und selbstgeregeltem Gasdruck im Pulsationsdämpfer für einen Anfahr- und Abschaltzyklus dargestellt. Man erkennt, dass abgesehen von den leichten Schwankungen im niedrigen Druckbereich, das Regelkonzept sehr gut den Gasdruck bei den gewünschten 80% des Systemdrucks halten kann und somit der Pulsationsdämpfer über die gesamte Laufzeit innerhalb seines Betriebsbereichs gehalten werden kann.

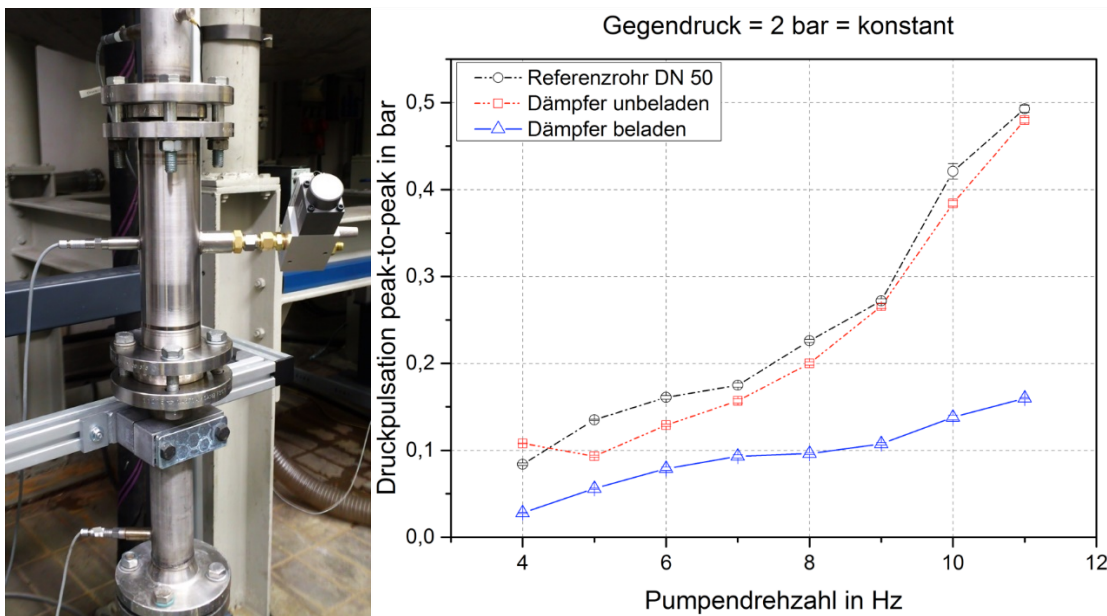


Abbildung 29: Verbauter Pulsationsdämpfer (links) und resultierende Druckpulsationen einer Exzentrerschneckenpumpe (rechts)

Der Pulsationsdämpfer wurde anschließend mit der vom Partner Netzsch für höheren Massenfluss modifizierten Exzentrerschneckenpumpe getestet. Als rotierende Verdrängerpumpe weist diese erhebliche Druckpulsationen auf,

sodass der Einsatz eines Pulsationsdämpfers notwendig ist. Der Pulsationsdämpfer wurde hierfür unmittelbar hinter dem druckseitigen Anschluss der Pumpe verbaut, sodass dieser so nah wie möglich am Entstehungsort bereits die Druckpulsationen dämpfen und eine weitere Ausbreitung in das restliche System reduzieren kann. Abbildung 29 zeigt sowohl den verbauten Pulsationsdämpfer wie auch die resultierenden Druckpulsationen bei verschiedenen Pumpendrehzahlen für unterschiedliche Dämpferzustände. Man kann klar erkennen, dass der beladene Pulsationsdämpfer die maximalen Druckschwankungen im System deutlich senkt im Vergleich zum Referenzrohr.

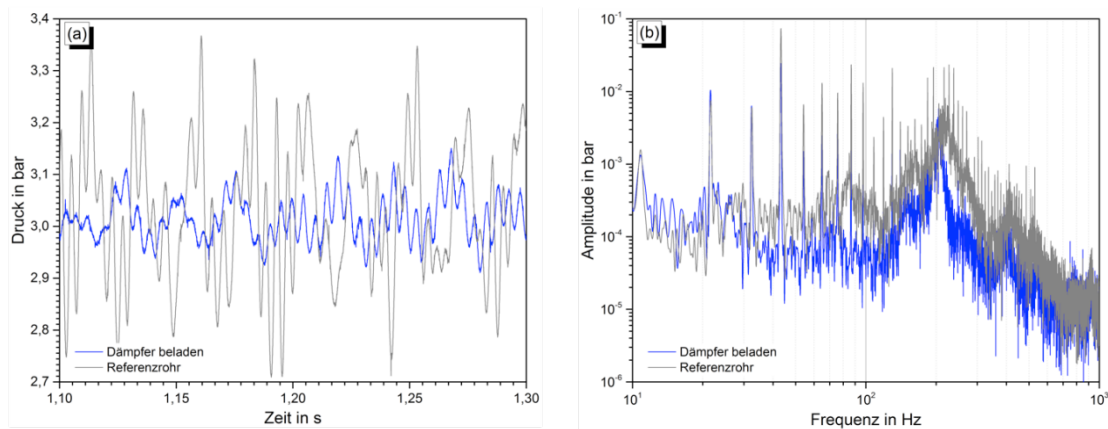


Abbildung 30: Druckpulsationen einer Exzentrerschneckenpumpe in Zeit- (links) und Frequenzbereich (rechts) (schwarz: Referenz, blau: mit Dämpfer)

Die detaillierten Druckverläufe eines Messpunktes in Abbildung 30 verdeutlichen dies nochmals. Im Zeitverlauf (links) erkennt man klar die dämpfende Wirkung auf die maximalen Peak-to-Peak-Schwankungen, im Frequenzbereich (rechts) erkennt man außerdem, dass die Dämpfung nahezu über das komplette Frequenzspektrum wirksam ist.

Basierend auf den vorherigen Untersuchungen und deren vielversprechenden Ergebnissen wurde für die modifizierte Triplex-Membrankolbenpumpe des Partners Lewa ein Konzept erdacht wie ein derartiger Inline-Pulsationsdämpfer sogar noch weiter in die Pumpe integriert und somit noch näher an den Entstehungsort der Pulsationen gebracht werden kann. Wie in Kapitel 2.2.1 bereits kurz erwähnt bietet sich die Triplex-Pumpe hierfür sehr gut an, da ihre drei Kolben in der vorliegenden Bauweise sowieso mittels interner Verrohrungen miteinander verbunden sind. Zudem weist auch dieser Verdrängerpumpentyp starke Pulsationen auf, was den Einsatz eines Dämpfers erzwingt.

Für die Triplex-Pumpe wurden anstatt eines großen drei kleine Pulsationsdämpfer jeweils direkt hinter dem druckseitigen Ventil der einzelnen Kolben verbaut (siehe Abbildung 31). Im Zuge dieser Anpassung des Dämpfers an die Baugrößen der einzelnen Kolben wurden auch gleich weitere, notwendige

Verbesserungen umgesetzt. Aufgrund des höheren Maximaldrucks, der für diese Einbausituation und diese Pumpe im Vergleich zu vorherigen Untersuchungen zu erwarten ist, mussten die Pulsationsdämpfer dementsprechend stabiler konstruiert werden. Dies beinhaltet sowohl stabilere Wände, eine verbesserte Einspannung der Membran wie auch zusätzliche Schutzeinsätze gegen Abscherungsverschleiß der Membran (siehe Abbildung 32).

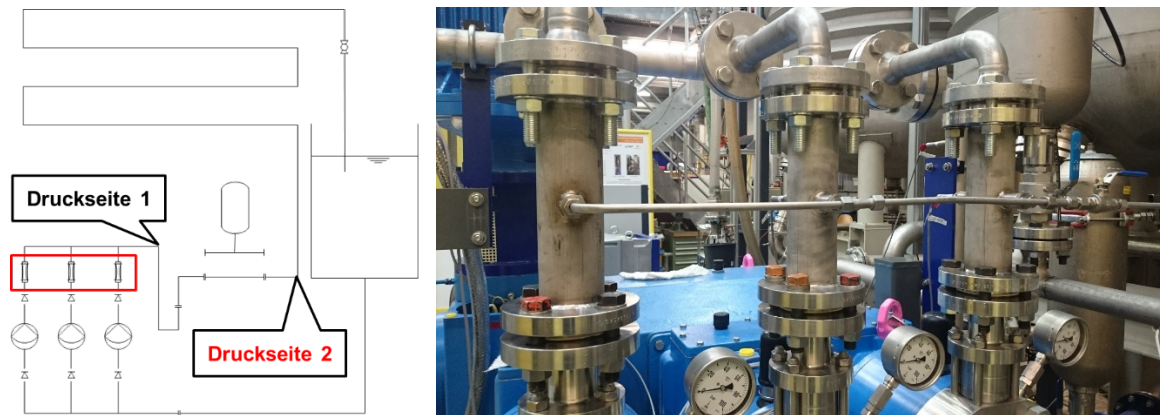


Abbildung 31: Pulsationsdämpfer integriert in Triplex-Membrankolbenpumpe

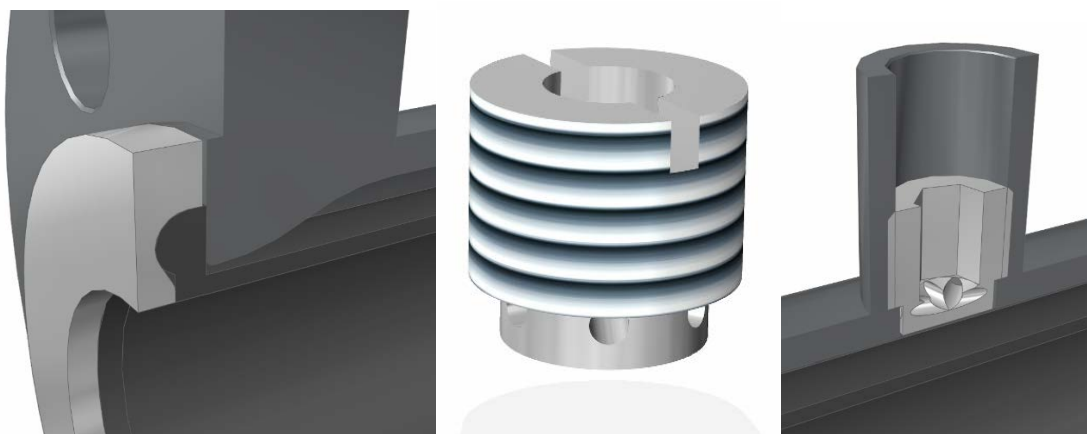


Abbildung 32: Konstruktive Anpassung des Dämpfers für höhere Betriebsdrücke (links: Membraneinspannung, mittig: Membrenschutz, rechts: verbauter Schutz)

Bevor mit der eigentlichen Konstruktion der neuen Pulsationsdämpfer für die Triplex-Pumpe begonnen wurde, wurden Simulationen durchgeführt, welche untersuchen sollten, welche minimalen Gasvolumina für die Pulsationsdämpfer in diesem Fall notwendig sind und wie sich deren Dämpfungseigenschaften in Kombination der drei verbauten Einzeldämpfer auswirkt. Diese Ergebnisse wurden mit Simulationen zu einem System ohne Dämpfer und zu einem System mit einem einzelnen großen Blasenspeicher nach der Pumpe verglichen. Die Ergebnisse in Abbildung 33 zeigen, dass sowohl der Blasenspeicher wie auch die drei Inline-Pulsationsdämpfer in der Lage sind Druckpulsationen im System zu dämpfen. Zu beachten ist hierbei, dass der Blasenspeicher die Pulsationen

direkt nach der Pumpe (schwarze Kurven) kaum dämpfen kann, da dieser erst nachfolgend montiert ist. Die drei Inline-Dämpfer hingegen dämpfen auch diese Pulsationen, da sie bereits unmittelbar nach den einzelnen Kolben der Pumpe verbaut sind und somit bereits in der nachfolgenden Sammelleitung innerhalb der Pumpe Pulsationen stark reduziert werden.

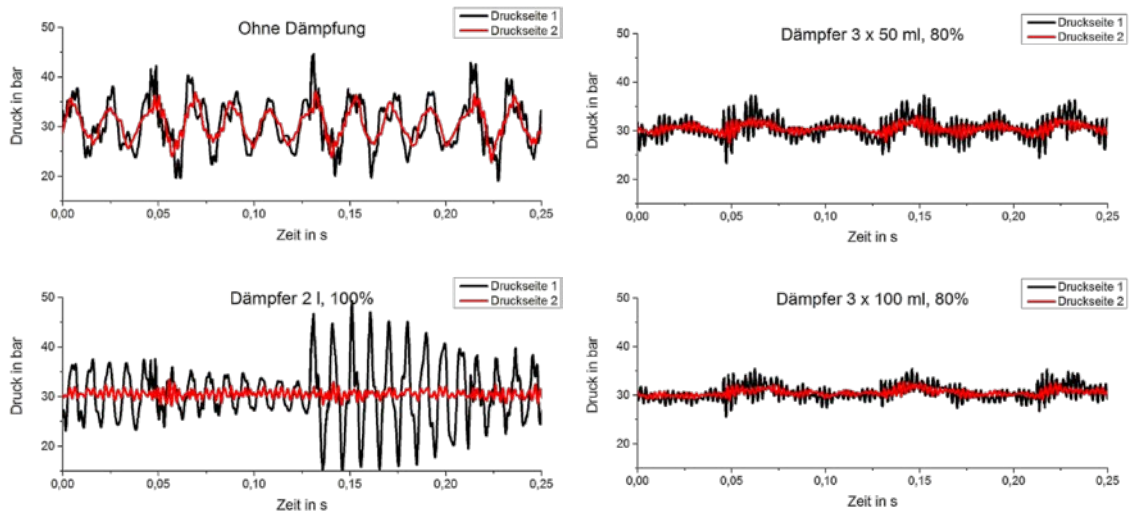


Abbildung 33: Simulation der Druckpulsationen einer Triplex-Pumpe (ungedämpft, Blasenspeicher a 2l, 3x Inline a 50ml, 3x Inline a 100ml)

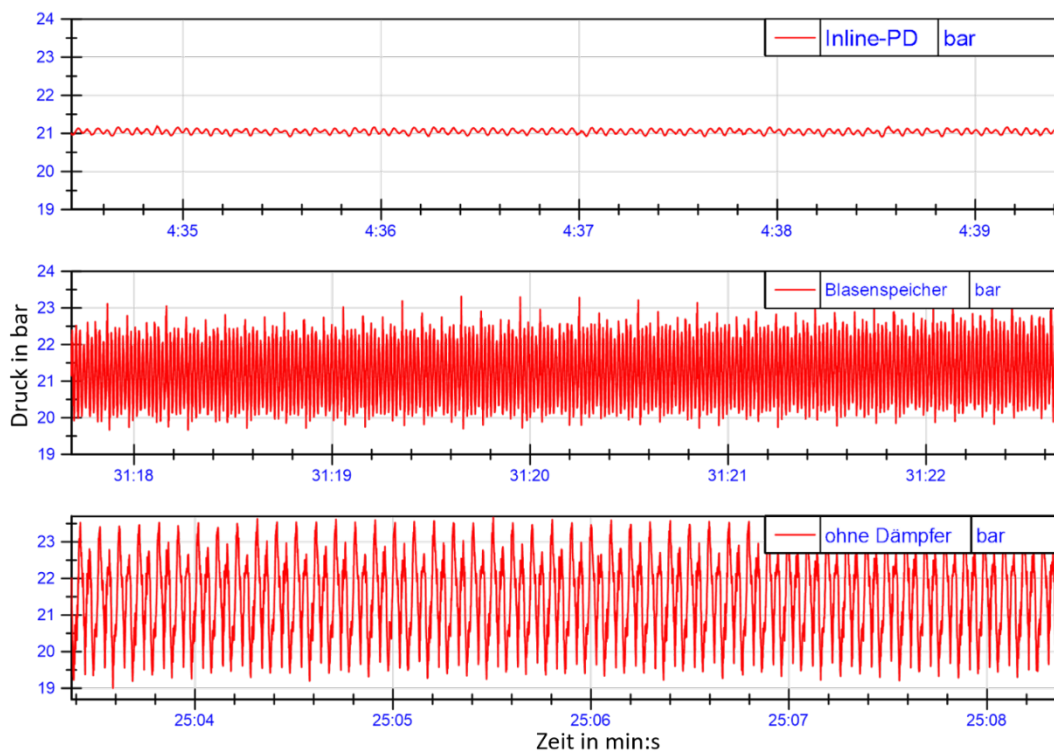


Abbildung 34: Druckverlauf einer Triplex-Membrankolbenpumpe für unterschiedliche Dämpfer bei 200 U/min und 21bar Systemdruck

Anschließend wurden mit der in Abbildung 31 (rechts) gezeigten, mit drei selbstadaptiven Inline-Pulsationsdämpfern ausgerüsteten, Triplex-Pumpe Versuchsreihen durchgeführt um die in der Simulation vorhergesagten guten Dämpfungseigenschaften experimentell zu bestätigen. Abbildung 34 zeigt exemplarisch für einen der vermessenen Betriebspunkte den Druckverlauf für Messungen ohne Dämpfer, mit einem klassischen Blasenspeicher und mit den drei Inline-Pulsationsdämpfern. In Abbildung 35 sind die gleichen Druckverläufe nochmals im Frequenzraum dargestellt.

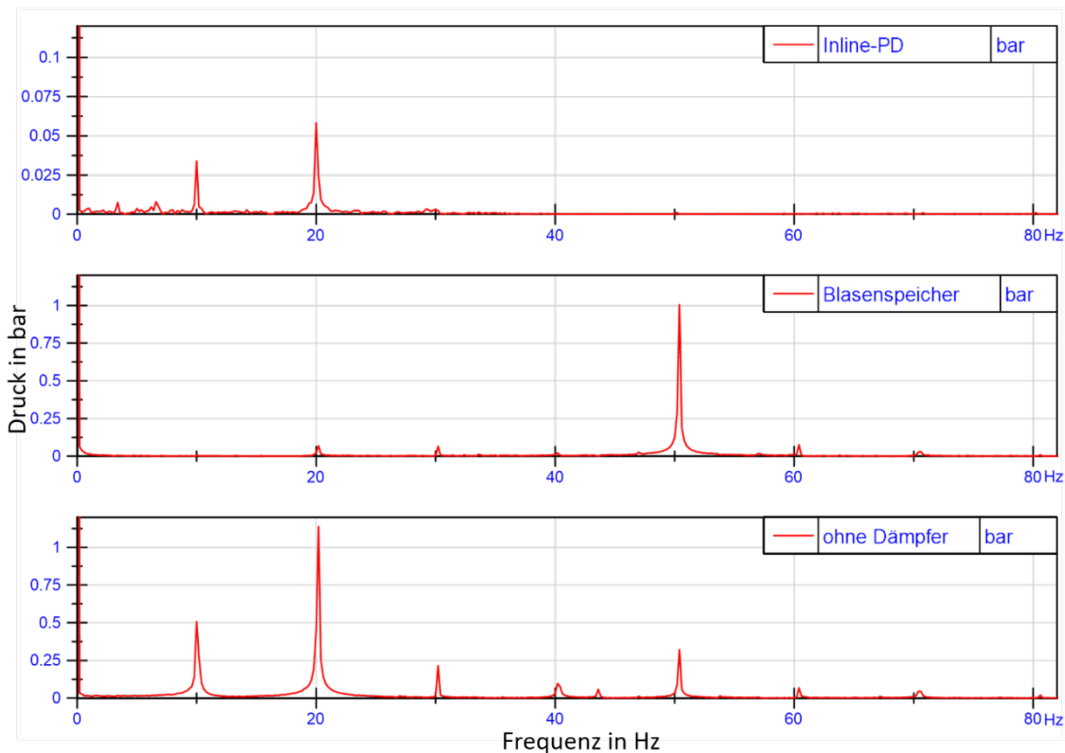


Abbildung 35: Druck im Frequenzbereich einer Triplex-Membrankolbenpumpe für unterschiedliche Dämpfer bei 200 U/min und 21bar Systemdruck

Für den Blasenspeicher erkennt man im Frequenzbereich, dass dieser vor allem im niedrigen Frequenzbereich Pulsationen dämpfen kann, nicht jedoch hochfrequente Schwankungen. In dem dargestellten Messpunkt tritt bei ca. 50Hz sogar eine Verstärkung der ursprünglichen Pulsationen auf, vermutlich durch Eigenfrequenzen der Blasenspeichermembran. Für den Fall der drei Inline-Pulsationsdämpfer erkennt man klar, dass die vorhandenen Druckschwankungen über den gesamten Frequenzbereich stark reduzieren werden können (man beachte die unterschiedlichen Achsen-Skalierungen im Frequenzbereich). Zusätzlich zu diesem besseren Verhalten über den gesamten Frequenzbereich kann man durch das Verbauen direkt in der Pumpe, nahe am Entstehungsort der Pulsationen, für die drei Inline-Pulsationsdämpfer auch mit einem deutlich geringeren Gasvolumen für vergleichbare Dämpfungseffekte auskommen.

Damit verfügt man nun über eine Dämpfungsmethode die die bei großen Triplex-Pumpen verwendeten sehr teuren Resonatoren unnötig machen. Damit verbunden ist ein großer wirtschaftlicher Gewinn.

2.2.3 Einheitliches Monitoring über das Drehmoment

Thema des dritten Entwicklungsschwerpunkts für die Standardisierung und Austauschbarkeit von verschiedenen Pumpentypen stellte die Entwicklung eines einheitlichen Monitoring-Systems für den aktuellen Pumpenzustand dar. Ohne ein solch einheitliches System müsste beim Tausch einer Pumpe stets eine Reihe von Messtechnik und Auswertelektronik getauscht werden, was dem Prinzip der Standardisierung widersprechen würde.

Um ein solch einheitliches Monitoring-System für alle Pumpentypen zu ermöglichen, erfordert es eine Messgröße zu verwenden, die bei allen Pumpentypen messbar ist und aussagekräftige Ergebnisse liefert. Eine solche Messgröße stellt die für dieses Projekt gewählte Messung des Drehmoments an der Pumpenwelle dar. Um die Messungen des Drehmoments möglichst platzsparend, integrativ und kostengünstig zu ermöglichen, soll die Messung mittels Dehnungsmessstreifen (DMS) direkt auf der Welle erfolgen und nicht über eine handelsübliche Drehmomentmesswelle. Um den Betrieb der Dehnungsmessstreifen auf der rotierenden Welle zu ermöglichen wurde ein induktives Strom- und Datenübertragungsmodul entwickelt, welches in Abbildung 36 im linken roten Rahmen zu sehen ist.

Die Messungen des Drehmoments an der Welle zusammen mit Messungen der Axialkraft auf die Welle, der Beschleunigung in drei Raumrichtungen sowie der Wellentemperatur sollten beim im Antrag genannten Projektpartner Benken zu einem kompletten, einheitlichen Monitoring-System entwickelt werden. Leider konnte durch dessen Ausscheiden aus dem Projekt ein solches, fertiges Monitoring-System nicht umgesetzt werden. Jedoch wurden die Untersuchungen zur grundlegenden Machbarkeit eines solchen Systems auch nach dessen Ausscheiden weiter fortgesetzt, sodass die Umsetzung in ein fertiges System zu einem späteren Zeitpunkt nachgeholt werden kann.

Als nächster Schritt wurde untersucht ob ein auf die Welle aufgebracht Dehnungsmessstreifen vergleichbar gute Messergebnisse des Drehmoments erbringen kann wie eine klassische Drehmomentmesswelle. In Abbildung 36 ist der hierfür verwendete Versuchsstand gezeigt, bestehend aus einem Motor, einer klassischen Referenzmesswelle, dem Dehnungsmessstreifen mit zugehöriger induktiver Datenübertragungstechnik, sowie einer Bremse zum kontrollierten Anlegen eines Drehmoments. Exemplarisch für die durchgeführten Messungen ist in Abbildung 37 der Drehmomentverlauf der beiden Messsystem (grün: Referenzmesswelle, rot: DMS) für das Abbremsen des Motors bis zu Stillstand gezeigt. Es ist zu erkennen, dass beide Messmethoden vergleichbare

Ergebnisse liefern und somit die Anwendung eines Dehnungsmessstreifens zur platzsparenden, kostengünstigen Drehmomentmessung grundlegend geeignet ist.

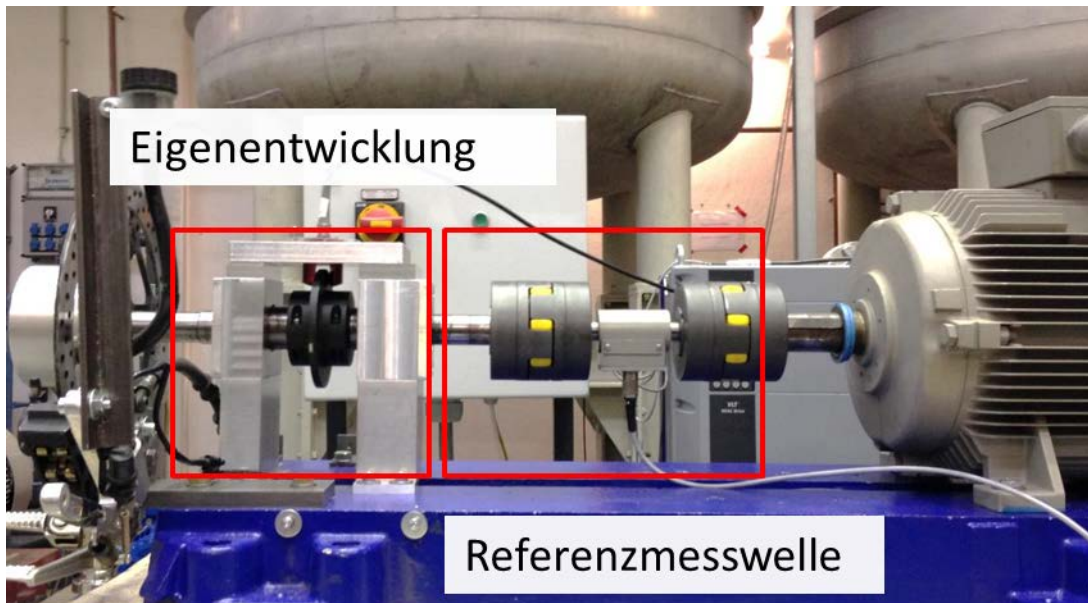


Abbildung 36: Versuchsstand zur Prüfung der Messgenauigkeit eines Dehnungsmessstreifens (DMS) zur Drehmomentmessung

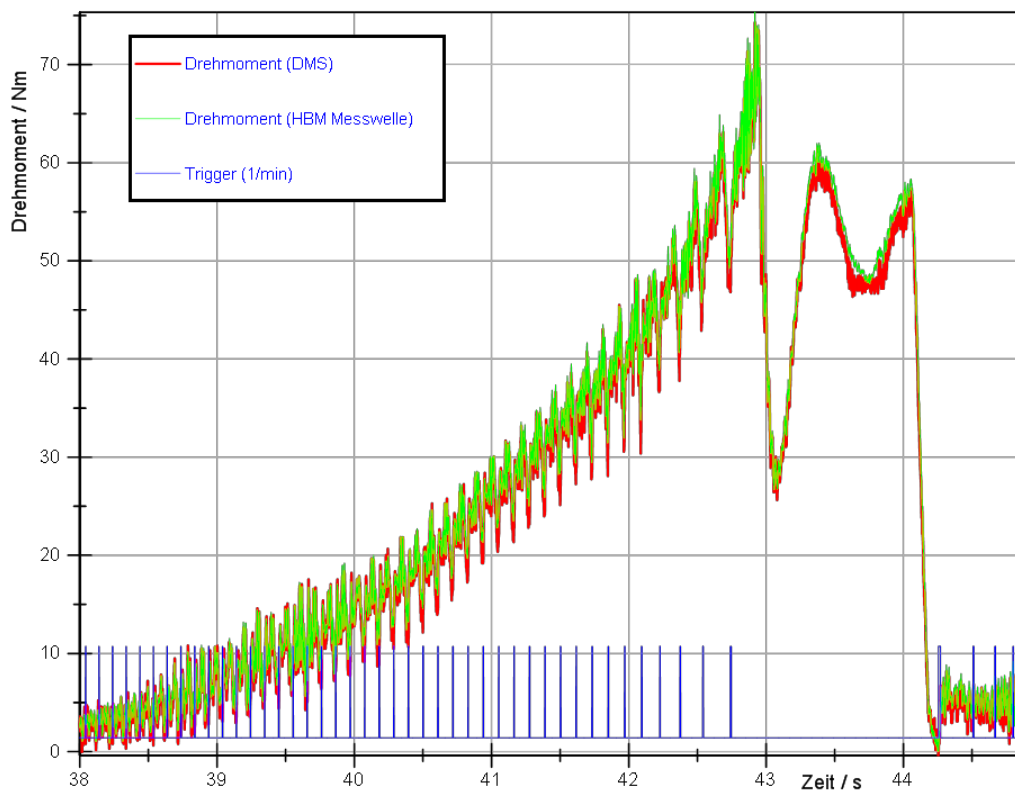


Abbildung 37: Vergleichsergebnisse von Messung des Drehmoments mittels Dehnungsmessstreifen und klassischer Messwelle

Nachdem gezeigt werden konnte, dass Dehnungsmessstreifen auf der Pumpenwelle grundlegend funktionieren, wurde in weiteren Messungen untersucht wie aussagekräftige Aussagen über das System anhand des Drehmoments getroffen werden können. Hierfür wurde zuerst eine vorhandene Triplex-Membrankolbenpumpe mit verstellbarem Kolbenhub um eine entsprechende Messstelle für das Drehmoment erweitert (siehe Abbildung 38).

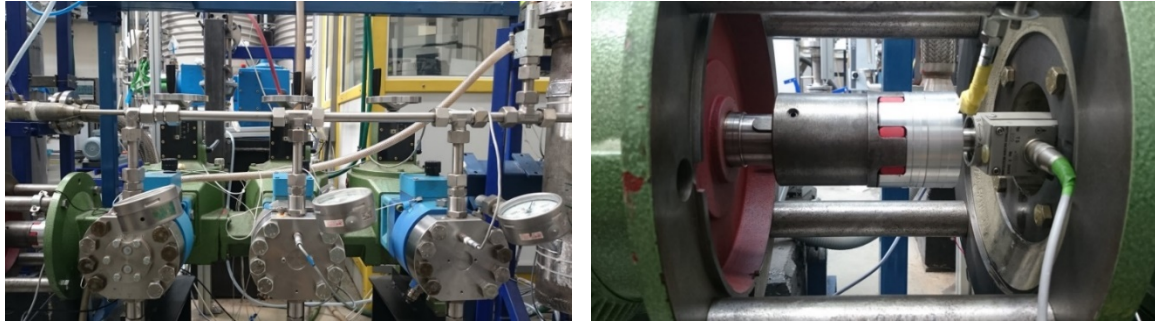


Abbildung 38: Pumpenköpfe und Drehmomentmesswelle einer Triplex-Pumpe

Durch die Verwendung verstellbarer Pumpenköpfe konnte mit der eingesetzten Pumpe nicht nur geprüft werden ob prinzipiell relevante Systeminformationen aus dem Drehmoment gewonnen werden können, sondern es konnten auch gleich Untersuchungen möglicher Fehlerfälle (beispielsweise Teilhub eines der Kolben) mit geprüft werden und ob sich relevante Unterschiede zum „Normalbetrieb“ im Drehmoment finden lassen.

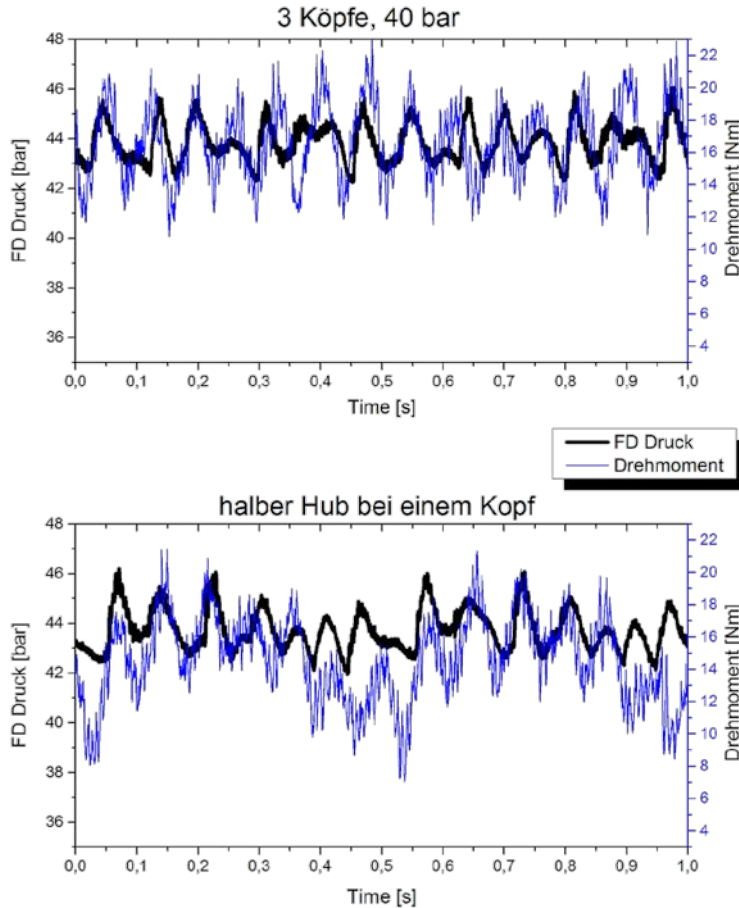


Abbildung 39: Drehmoment und Druckmessungen einer Triplex-Pumpe

Grundlegend konnte in den verschiedenen Messungen gezeigt werden, dass es einen qualitativen Zusammenhang zwischen dem gemessenen Drehmoment an der Pumpenwelle und dem Systemdruck gibt. Monitoring-Informationen, die aus dem Druckverlauf herausgelesen werden können, sollten somit leicht abgewandelt auch aus dem Drehmoment zu erhalten sein. Besonders hervorzuheben ist die Untersuchung, deren Messergebnisse in Abbildung 39 dargestellt sind. Hierbei wurde eine normal operierende Triplex-Membrankolbenpumpe (mit entsprechend drei Kolben mit jeweils gleichem Hub) mit einem simulierten Störfall-Betrieb der Pumpe, bei dem einer der Kolben nur den halben Hub produziert, verglichen. Im oberen Teil der Abbildung erkennt man, dass Druck- und Drehmoment-Signale qualitativ vergleichbare Ergebnisse liefern. Im unteren „Störfall“ hingegen fällt auf, dass diese Veränderung im Drucksignal (schwarz Kurve) kaum zu erkennen ist, während im Drehmomentsignal (blau Kurve) ganz klar ein Abfall während eines der Kolbenhübe auffällt. Somit bietet in diesem Fall die Messung des Drehmoments im Vergleich zu Druckmessungen nicht nur vergleichbar gute Möglichkeiten zum Zustands-Monitoring, sondern das Drehmoment scheint hier sogar deutlich besser dafür geeignet zu sein.

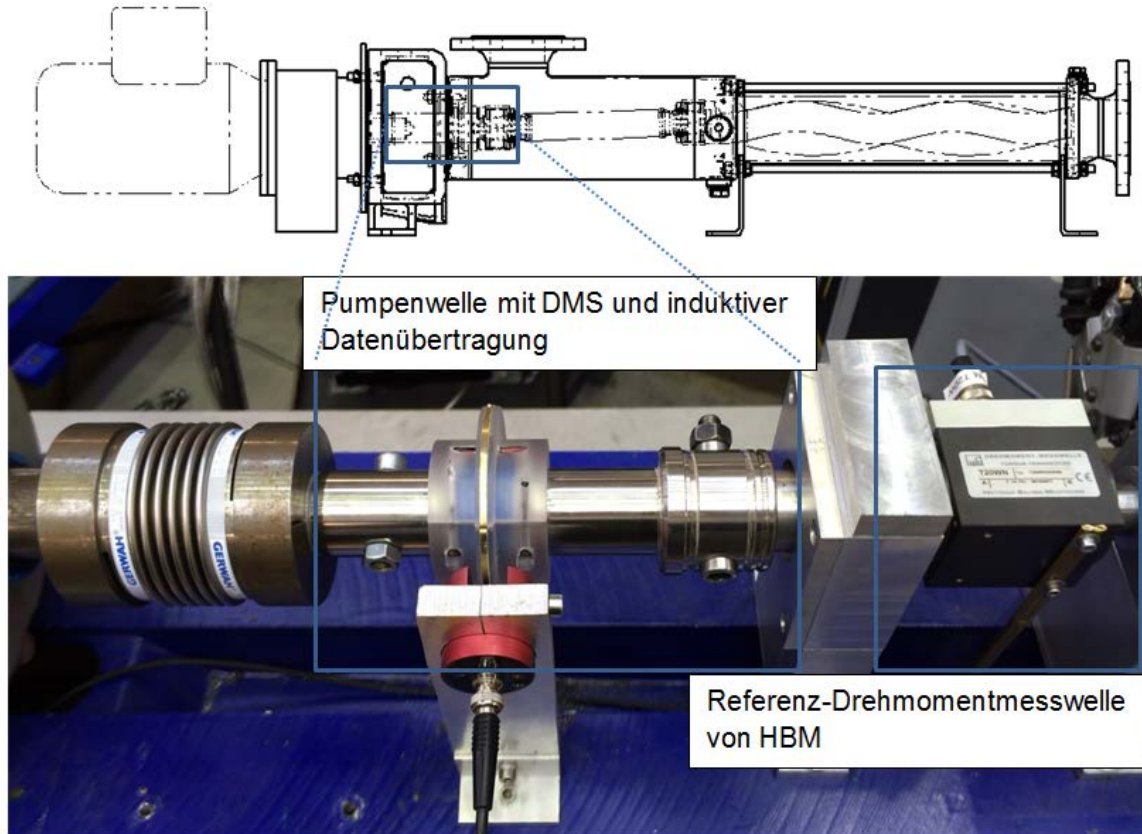


Abbildung 40: Einbau der DMS Messstelle in einer Exzentrerschneckenpumpe

Außerdem wurden Messungen des Drehmoments an einer Exzentrerschneckenpumpe des Partners Netzsch durchgeführt. Hierfür wurde die entwickelte Messstelle auf die Welle der Pumpe verbaut wie in Abbildung 40 dargestellt. Zu erkennen ist hierbei, dass bei dieser Pumpe die neue Messstelle ohne zusätzlichen Platzbedarf in bereits vorhandene Leerräume verbaut werden konnte. Zusätzlich zu grundlegenden Untersuchungen ob auch für diesen Pumpentyp die Messung des Drehmoments vergleichbare Aussagen liefern kann wie eine klassische Druckmessung, wurden für diese Pumpe Voruntersuchungen in Richtung eines Monitoring-Systems durchgeführt. Hierfür wurden für die Exzentrerschneckenpumpe Abnutzungserscheinungen der Rotor-Stator-Paarung simuliert und untersucht, indem unterschiedliche Paarungen mit unterschiedlich enger Passung miteinander verglichen wurden. Diese unterschiedlich engen Paarungen anhand des gemessenen Drehmomentverlaufs unterscheiden zu können war ein Ziel der Untersuchungen.

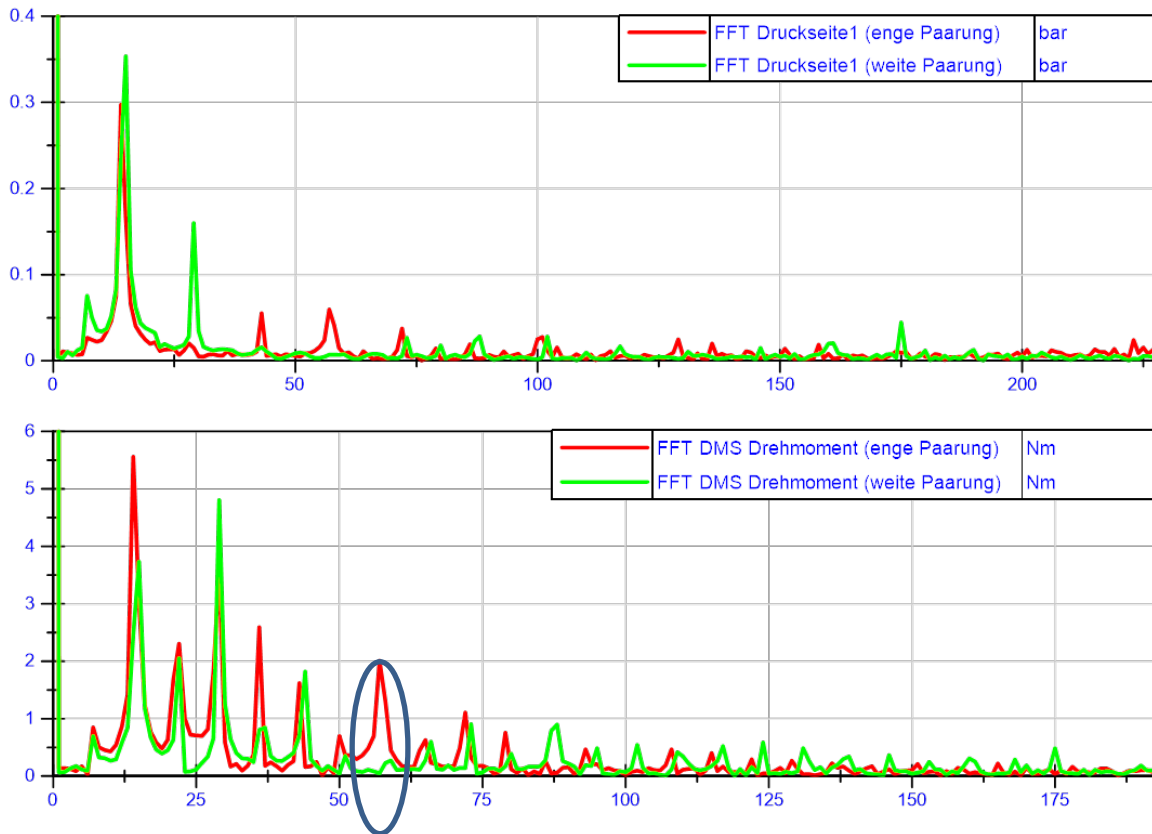


Abbildung 41: Druck- und Drehmoment-Messungen im Frequenzbereich für zwei unterschiedlich enge Paarungen einer Exzentrerschneckenpumpe

Die beispielhaften Messergebnisse in Abbildung 41 stellen die gewonnenen Erkenntnisse gut dar. Vergleicht man die gemessenen Daten des Druck- und des Drehmomentverlaufs im Frequenzbereich, so erkennt man, dass alle relevanten Frequenzen, die im Druck vorkommen, auch im Drehmoment wieder zu finden sind. Zusätzlich finden sich im Drehmoment auch noch weitere Frequenzanteile, die potentiell mehr Informationen über den aktuellen Systemzustand beinhalten können. Vergleicht man die Kurven für eine enge Paarung (Normalzustand, rote Kurve) mit der Kurve einer weiten Paarung (simulierte Abnutzung, grüne Kurve), so erkennt man klar, dass es für bestimmte Frequenzanteile deutliche Unterschiede in deren Amplitude gibt (beispielhaft im blauen Kreis zu erkennen). Solche Unterschiede in der Ausprägung der Amplituden einzelner Frequenzanteile könnten somit in einem zukünftigen Monitoring-System als Indikatoren für die Abnutzung der Rotor-Stator-Paarung genutzt werden.

2.3 AP3 „Modulbasiertes Engineeringtool“

Evonik, Inosim, plantIng, Siemens, TUDO-APT

Die Erstellung von Rohrleitungs- und Instrumentierungsdiagrammen (R&I) ist enorm zeitaufwändig und verursacht hohe Kosten bei der Planung chemischer Anlagen, da diese in jedem Projekt maßgeschneidert werden müssen. Um dieser Herausforderung zu begegnen, ist die modulbasierte Planung ein vielversprechender Ansatz. Dadurch kann die Dauer der Detailplanungsphase verringert und die Zeit von der Produktidee bis zur Inbetriebnahme der Anlage deutlich verkürzt werden.

Bei dem Ansatz des modulbasierten Engineerings wählt der Planer mit Hilfe des Auswahltools standardisierte R&I-Module aus einer Datenbank anstatt einer maßgenauen Zusammenstellung. Dadurch wird er von Routinearbeiten befreit. Basierend auf der Auswahl müssen anschließend die ausgewählten Module konfiguriert werden, um anwenderfreundlich die grafische Darstellung auf dem *modularen R&I-Fließschema* zu erzeugen.

Auswahl- und Konfigurations-Tool

Es wird ein Tool benötigt, das sowohl die Modulauswahl als auch die Modulkonfiguration unterstützt, damit das entsprechende *Modulare R&I-Fließschema* grafisch dargestellt werden kann.

Folgende Anforderungen und Lösungen sind zu berücksichtigen:

- Die Auswahl einer technisch angemessenen und effizienten Lösung in allen Betriebszuständen der Anlage wird dadurch sichergestellt, dass Prozessanforderungen mit den Betriebsbereichen der Module in den Moduldatenbanken verglichen werden.
- Das Problem der Auswahl ist komplex, da häufig mehrere Auswahlkriterien berücksichtigt werden müssen.
- Ein Kompromiss muss gefunden werden, weil es nicht die eine, perfekte Lösung gibt, die alle Kriterien erfüllt.
- Es wurden Methoden entwickelt, um die Entscheidungsfindung in konkreten Fällen zu erleichtern, z.B. MCDA (Multi Criteria Decision Analysis) [23,24]. MCDA bietet eine Technik, um Kompromisslösungen zu finden.
- Die Grundidee der Konfiguration des *Modularen R&I-Fließschemas* ist es, den iterativen Ansatz von Uzuner durch ein automatisiertes Erstellen des *Modularen R&I-Fließschemas* zu ersetzen. Die grafische Anordnung der ausgewählten R&I-Module zueinander wird berücksichtigt. Den Anforderungen an Platzbedarf, flexible Anordnung, flexible Änderung von *R&I-Grundmodulen* oder *R&I-Zusatzmodulen* und der grafischen Darstellung unabhängig von der verwendeten CAE-Software wird Rechnung getragen.
- Es wurde ein struktureller und sequenzieller Ansatz für diese Anordnung entwickelt, der angelehnt an Allens Intervallalgebra [25] die Anordnung der R&I-Module beschreibt.

- Die Zusammenhänge zwischen R&I-Modulen werden in einer Heuristik-Datenbank abgelegt.

Um das technische Knowhow eines Unternehmens zu sichern und ‚Best Practice‘ Standards festzulegen, eignen sich Datenbanken. Die Auswahl und Konfiguration des am besten zur Anforderung passenden R&I-Moduls für einen bestimmten Prozessschritt soll deshalb über eine Moduldatenbank ausgeführt werden.

Um das Auswahl- und Konfigurationstool aufzubauen, müssen die relevanten Prozessdaten strukturiert und softwareunabhängig aufbereitet werden und verfügbar sein. Die Anforderungen für eine entsprechende R&I-Moduldatenbank für das Beispiel der Pumpenmodule wurden in SQL strukturiert implementiert [26]. Die Einsatzbereiche unterschiedlicher R&I-Module unterscheiden sich.

Definition der Datenbankstruktur und Implementierung der Module

R&I-Module wurden in der Moduldatenbank exemplarisch implementiert und charakteristische Parameter wurden mit den jeweiligen Betriebsbereichen festgelegt. Für die Module sind auch jeweils die grafischen R&I-Symbole hinterlegt. Des Weiteren wurden die *R&I-Zusatzmodule* implementiert, die optional dem *R&I-Grundmodul* angefügt werden können. Für diese wurden ebenfalls Einsatzbereiche festgelegt.

Allerdings erheben diese R&I-Module keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Um dies zu veranschaulichen, zeigen die Tabelle 3 und Tabelle 4 Ausschnitte der R&I-Module für die *R&I-Grundmodule* und *R&I-Zusatzmodule*.

Tabelle 3: *R&I-Grundmodule* in der exemplarisch betrachteten *R&I-Moduldatenbank* inklusive der graphischen Symbole basierend auf DIN EN ISO 10628-2:2013 [27].

R&I-Grundmodul Typen	Temperatur		Druck	Dynamische Viskosität		..	Graphisches Symbol
	T_{min} [°C]	T_{max} [°C]	P_{max} [bar]	η_{min} [Pas]	η_{max} [Pas]		
Kreisel- pumpe	-40 ^[28]	450*	25 ^[29]	0.001 ^[28]	0.50 ^[28]	...	
Zahnrad- pumpe	-84 ^[30]	370 ^[30]	170 ^[30]	0.001 ^[28]	20 ^[28]	...	
Exzenter schnecken- pumpe	-20 ^[31]	200 ^[31]	240 ^[31]	0.001 ^[28]	3000 ^[31]	...	
Hubkolben- pumpe	-51 ^[30]	204 ^[30]	31 ^[32]	0.01 ^[28]	161 ^[32]	...	
Tauch- kolben- pumpe	-20*	200 ^[30]	3500 ^[30,33]	0.001 ^[28]	10 ^[28]	...	
Membran - pumpe	-50 ^[34]	171 ^[34]	7 ^[33,35]	0.001 ^[28]	0.5 ^[28]	...	

*: Annahme

Tabelle 4: Auszug aus den exemplarisch betrachteten *R&I-Zusatzmodulen* in der *R&I-Moduldatenbank* inklusive ihres graphischen Symbols nach DIN EN ISO 10628-2:2013 [27].

R&I-Zusatzmodule	Einsatzbereich	Graphisches Symbol
Absperrventil für Equipment	Saugseitiger- und Druckseitiger Absperrarmaturen sind erforderlich	
Schmutzfänger mit örtlicher Druckmessung	Jede Saugseitiger muss Schmutzfänger mit örtlicher Druckmessungssystem besitzen, wenn eine Filtration erforderlich ist	
Entleerungsstutzen	Entleerungsstutzen für Wartung- und Montage wird benötigt	
Druckmessung	Jede Druckseitiger muss ein Druckmessungssystem besitzen	
Rückschlagventil	Jede hydrodynamische Kreiselpumpe muss ein Rückschlagventil besitzen, um den Rücklauf zu verhindern	
...

Bewertungs- und Auswahlkriterien

Die Auswahl der Module in den betreffenden Planungsphasen wird häufig unter Berücksichtigung mehrerer Kriterien durchgeführt. Im ersten Schritt werden unpassende Alternativen im Hinblick auf Prozessanforderungen und Betriebsbedingungen aus der Ergebnismenge ausgeschlossen. Die verbleibenden Alternativen können hinterher anhand von Bewertungskriterien, die vom Benutzer festgelegt werden, bewertet werden. So können vor allem Module mit höherer Energieeffizienz hervorgehoben werden.

Die Energiekosten machen für Anlagenequipment einen signifikanten Teil der Lebenszykluskosten aus. Dadurch ist es möglich, energieeffiziente und gleichzeitig kostenoptimierte Module auszuwählen. Dies wird in Unterkapitel 2.4 dargestellt. Andere Kriterien wie Anlagensicherheit oder Eignung wurden ebenfalls zur multi-kriteriellen Auswahl hinzugefügt.

Für die Auswahl des Pumpentyps und damit die Auswahl des zugehörigen *R&I-Grundmoduls* gibt es zwei Arten von Kriterien: Ausschlusskriterien, die sich auf die Prozessaufgabe und Betriebsbedingungen beziehen, sowie Bewertungskriterien, bei denen Verfügbarkeit, Energieeffizienz oder Lebenszykluskosten betrachtet werden. Multikriterielle Entscheidungsanalyse-

Methoden wurden entwickelt, um dieses Problem zu lösen. Diese Entwicklung ist fortwährend und die Anzahl akademischer Veröffentlichungen zum Thema „Multi-Criteria Decision Analysis“ (MCDA) steigt. Im ENPRO Teilprojekt „Modularisierung“ wurden gängige multikriterielle Entscheidungsanalyse-Methoden betrachtet, wie beispielhaft in Tabelle 5 gezeigt.

Tabelle 5: Multikriterielle Entscheidungsanalyse-Methoden.

Requirements	AHP ^[36,37]	ANP ^[38]	MAUT ^[39]	Decision-Tree ^[40]
Able to handle correlated data	X ^[41] Solve the problem of independence on criteria or alternatives	✓ ^[41] Solve the problem of dependence among criteria or alternatives	X ^[41] The use of additive functions is only permitted if the preferential independence is respected	X
Adjustable priorities	✓ ^[24] Pairwise comparisons on a ratio scale	✓ ^[24] Pairwise comparisons on a ratio scale and interdependencies	✓ ^[24,41] Decision maker's preferences can be represented by a utility function	X
Ranking of alternatives	✓ ^[24] Complete ranking with scores	✓ ^[24] Complete ranking with scores	✓ ^[24] Complete ranking with scores	X
Input effort, easy to use and expand	X ^[42,42] -Moderate effort -High number of pairwise comparisons for large scale problems	X ^[24] Very high effort	X ^[24,42] -Very high effort -Algorithm is relatively straight forward to use	X

Wie in Tabelle 5 dargestellt, erfüllt die ANP-Methode die Anforderungen bezüglich der notwendigen Kriterien und Gewichtungen. Daher wurde der Analytic Network Process (ANP) zur mehrkriteriellen Auswahl untersucht und verwendet. Multikriterielle Methoden wie ANP können in Constraint-basierten Konfigurationstools als Software umgesetzt werden. Die Erkenntnisse aus dieser Arbeit können theoretisch auf solche Tools angewendet werden, zum Beispiel auf den Generic Constraint-based Konfigurator (GECKO) [43]. In Kooperation mit der TU München wurde ein Prototyp eines mehrkriteriellen Auswahltools entwickelt und implementiert.

Die vorangehend beschriebene Methode ist einfach und transparent in der Anwendung. Anhand eines Fallbeispiels soll dies nun gezeigt werden: Für einen Produktstrom eines kontinuierlich betriebenen Oxidationsreaktors sollte ein geeigneter Pumpentyp gefunden werden, um die Flüssigkeit zum nächsten

Reaktionsschritt zu transportieren. Die Reaktion findet bei 160 °C und 5 *bar* statt. Der Produktstrom beträgt 100 m³/h und eine Förderhöhe von 17 m muss überwunden werden. Die Viskosität des zu transportierenden Mediums ist ungefähr die von Wasser bei 20 °C. Das Fördermedium enthält Feststoffe. Die Oxidation wird mit korrosivem Wasserstoffperoxid durchgeführt, das nicht vollständig reagiert.

Die in den Prozessdatenblättern angegebenen relevanten Prozessdaten und Stoffeigenschaften sind nachfolgend in Tabelle 6 aufgeführt.

Tabelle 6: Exemplarisch berücksichtigte Prozessdaten und Stoffeigenschaften.

Prozess/ Eigenschaftsdaten	Symbol	Einheit	Value
Temperatur	T	[°C]	160
Druck	<i>p</i>	[<i>bar</i>]	5
Fördermenge	Q	[m ³ /h]	100
Förderhöhe	H	[m]	17
Dynamische Viskosität	η	[Pas]	0.001
Aufgabe			Fördern
Fördergut			Korrosiv

Alle in Tabelle 7 berücksichtigten Alternativen erfüllen die Ausschlusskriterien, ausgenommen Hubkolbenpumpe und Membranpumpe. Diese werden daher im ersten Auswahlschritt aussortiert/ausgeschlossen.

Tabelle 7: Beispielhaft betrachtete Ausschlusskriterien für Pumpen *R&I-Grundmodule*.

Kriterium	Value	Kreiselpumpe	Zahnradpumpe	Exzenter schneckenpumpe	Hubkolbenpumpe	Tauchkolbenpumpe	Membranpumpe
Temperatur [°C]	160	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Druck [<i>bar</i>]	5	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Fördermenge [m ³ /h]	100	OK	OK	OK	X	OK	X
Förderhöhe [m]	17						
Dynamische Viskosität [Pas]	0.001	OK	OK	OK	OK	OK	OK

Die vier verbleibenden Alternativen werden verglichen und bewertet, wie beispielhaft in Tabelle 8 gezeigt. Die Bewertung basiert auf der Analytic Network

Process (ANP)-Methode zur mehr-kriteriellen Auswahl. Die endgültige Gesamtpunktzahl, die für das Ranking verwendet wird, wird durch Aufsummieren der Produkte aus normalisiertem Wert und normalisierter Gewichtung aller individueller Kriterien (Verfügbarkeit, Energieeffizienz und Lebenszykluskosten) bestimmt.

Tabelle 8: Beispielhaft betrachtete Bewertungskriterien für Pumpen *R&I-Grundmodule*.

Kriterium	Bewertungs- skala	Kreisel- pumpe	Zahnrad- pumpe	Exzenter- schnecken- pumpe	Tauchkolben- pumpe
Aufgabe	[1 – 9]	9*	5*	5*	5*
Fördermedium	[1 – 9]	9[30,33]	9[44]	9*	9*
Energieeffizienz	[%]	76.99**	82.77**	85.15**	93.22**
Lebenszyklus- kosten	[1 – 9]	9***	5***	3***	3***
	Gewichtung (Benutzer definiert)	Kreisel- pumpe	Zahnrad- pumpe	Exzenter- schnecken- pumpe	Tauchkolben- pumpe
Aufgabe (Normalisiert)	0.25	0.375	0.208	0.208	0.208
Fördermedium (Normalisiert)	0.75	0.25	0.25	0.25	0.25
Verfügbarkeit Punktzahl		0.280	0.240	0.240	0.240
	Gewichtung (Benutzer definiert)	Kreisel- pumpe	Zahnrad- pumpe	Exzenter- schnecken- pumpe	Tauchkolben- pumpe
Verfügbarkeit (Normalisiert)	0.637	0.280	0.240	0.240	0.240
Energieeffizienz (Normalisiert)	0.258	0.228**	0.245**	0.252**	0.276**
Lebenszyklus- kosten (Normalisiert)	0.105	0.45***	0.25***	0.15***	0.15***
Gesamt- Punktzahl		0.284	0.242	0.234	0.240

*: [28], **: Korrelation aus Daten von: [30,45], ***: Annahme aus Daten von: [30]

Das *R&I-Grundmodul* Kreiselpumpe liefert das beste Ergebnis und wird daher ausgewählt.

Konfiguration

Um die ausgewählten R&I-Module angemessen und eindeutig auf dem R&I-Fließschema anzuordnen, müssen zuerst die Beziehungen zwischen den *R&I-Grund-* und *Zusatzmodulen* strukturiert und klar definiert sein. Dadurch wird eine flexible und allgemeine Regelstruktur für die Anordnung einzelner R&I-Module relativ zueinander benötigt. Folglich werden Regeln für die Anordnung in einer Heuristik-Datenbank gespeichert.

Beispielsweise lauten Regeln für die Anordnung von Modulen wie in Eq. 1 beschrieben: Element A ist stets vor Element B angeordnet.

$$A > B \qquad \text{Eq. 1}$$

Tabelle 9: Exemplarische Darstellung der Heuristik-Datenbank für pumpen R&I-Module basierend auf [46].

A	>	B
Inflow	>	Aufgabe (Fördern)
Inflow	>	Ablasen
Inflow	>	Filtration
Ablasen	>	Filtration
Ablasen	>	Aufgabe (Fördern)
Filtration	>	Aufgabe (Fördern)
Aufgabe (Fördern)	>	Druckmessung
Aufgabe (Fördern)	>	Rückschlagventil
Aufgabe (Fördern)	>	Outflow
Druckmessung	>	Outflow
Rückschlagventil	>	Outflow
Druckmessung	>	Rückschlagventil
...

Um das Konfigurationstool aufzubauen, wurden die Zusammenhänge zwischen den R&I-Modulen in einer Heuristik-Datenbank gespeichert. Die Daten wurden strukturiert und in einer SQL-Datenbank abgelegt. Darauf basierend wurde eine Schnittstelle zu COMOS[®] entwickelt. Dadurch kann gezeigt werden, wie sich die Konfiguration der R&I-Module grafisch auf dem R&I-Fließschema auswirkt.

Eine dynamische Anordnung auf der Grundlage der festgelegten Regeln der R&I-Module, die im vorherigen Schritt ausgewählt wurden, ist ein Ziel dieser Arbeit. Um dies zu erreichen, wird die topologische Sortierung genutzt. Dieser Ansatz bietet Lösungen für eine Vielzahl von Problemen bei der Analyse von Netzwerken. Der erstmals von Kahn beschriebene Breadth-First-Search-Algorithmus ist dabei eine gängige Methode zur topologischen Sortierung [47]. Diese Grundidee hat sich als ein geeigneter Ansatz für die Lösung von einzeln/schrittweise durchgeführten Aufgaben erwiesen, bei denen die Reihenfolge so gewählt ist, dass alle vorgegebenen Abhängigkeiten erfüllt sind. Aus diesem Grund wurde Kahns Algorithmus ausgewählt, um eine topologische Sortierung von gerichteten azyklischen Graphen, auch als "dag" bezeichnet, durchzuführen. Eine topologische Sortierung von einem dag $G = (N, E)$ ist eine

lineare Ordnung aller ihrer Regeln, so dass, wenn G zum Beispiel eine Regel Aufgabe (Fördern) $>$ Rückschlagventil enthält, Rückschlagventil nach Aufgabe (Fördern) angeordnet wird.

Dieser Ansatz unterstützt die automatische Konfiguration von R&I-Modulen für die Generierung von *Modularen R&I-Fließschemas* mit moderater Rechenleistung $\Theta(N + E)$ [48]. Darüber hinaus schließt es ungültige Anordnungen basierend auf den zuvor festgelegten Regeln von der endgültigen Ergebnisliste aus.

2.3.1 Erstellung eines *Modularen R&I-Fließschemas*

Grafische Darstellung in einem *Modularen R&I-Fließschemas*

Das Ergebnis der Sortierung reicht noch nicht aus, um daraus dynamisch ein R&I-Fließschema zu erzeugen. Grafische Beziehungen der R&I-Module zueinander müssen berücksichtigt werden um den Anforderungen des Planers, zum Beispiel bezüglich der platzsparenden Anordnung, gerecht zu werden.

Ein strukturierter Ansatz für die grafische Darstellung konfigurierter Module wurde von Allens Intervallalgebra inspiriert [25,49]. Allen's Grundbeziehungen beruhen auf der Vorstellung von Beziehungen zwischen Paaren von Intervallen; ein Intervall x wird als ein Tupel (x^-, x^+) der reellen Zahl dargestellt, das den linken bzw. rechten Endpunkt des Intervalls bezeichnet.

Auf der einen Seite beschreibt die Beziehung x before y die Reihenfolge der Anordnung zwischen x - und y -Intervallen, zum Beispiel *R&I-Grundmodulen* und *R&I-Zusatzmodulen*. Während die Beziehung x meets y beschreibt, dass Intervall x direkt Intervall y trifft. In ähnlicher Weise sind zusätzliche Grundbeziehungen zum Beschreiben von Beziehungen zwischen x - und y -Intervallen mit beispielhaften Auszügen in der nachstehenden Tabelle 10 aufgelistet.

Tabelle 10: Allen's Grundbeziehungen.

Grundbeziehungen		Beispiel
x before y	$<$	xxx
y after x	$>$	yyy
x meets y	m	$xxxx$
y met_by x	m^-	$yyyy$
x overlaps y	o	$xxxx$
y overlapped_by x	o^-	$yyyy$
x during y	d	xxx
y includes x	d^-	$yyyyyyy$
x starts y	s	xxx
y started_by x	s^-	$yyyyyyy$
x finishes y	l	xxx
y finished_by x	l^-	$yyyyyyy$
x equals y	$=$	$xxxx$ $yyyy$

Definition von generischen Funktionen für die grafische Darstellung

Um einen dynamischen grafischen Darstellungsansatz zu realisieren, müssen flexible grafische Beziehungen zwischen R&I-Modulen definiert werden. Basierend auf den zuvor dargestellten Grundbeziehungen wurden einige generische Funktionen entwickelt, um grafische Beziehungen zwischen *R&I-Grundmodulen* und *R&I-Zusatzmodulen* sequentiell zu beschreiben. Beispielhaft sind die entwickelten generischen Funktionen in Tabelle 11 aufgelistet.

Tabelle 11: Definition von generischen Funktionen für die grafische Beziehung zwischen *R&I-Grundmodulen* und *R&I-Zusatzmodulen*.

Generische Funktion		Beispiel
<i>Sequence of arrangement</i>		
<i>upstream</i>	$< x$	<i>xyyy</i>
<i>downstream</i>	$> x$	<i>yyyyx</i>
<hr/>		
<i>Placement in pipe</i>	$> m(x)$	<i>yyxyy</i>
<hr/>		
<i>Flanged to pipe</i>		
<i>left</i>	$> f(x, l)$	<i>x yyy</i>
<i>right</i>	$> f(x, r)$	<i>yyy x</i>
<hr/>		
<i>Recycle</i>	$> d(x, y)$	<i>xxx yyyyyyy</i>
<hr/>		
<i>Connection</i>	$e(m(x))$	<i>xxxx yyyy</i>

Dementsprechend ermöglichen die entwickelten, generischen Funktionen die flexible Darstellung von *Modularen R&I-Fließschemas*. Zum Beispiel realisiert die Funktion $> m(x)$ die räumliche Anordnung des Symbols *x* in Bezug auf ein nachfolgendes Symbol. Die Funktion $> f(x)$ beschreibt, dass das Symbol *x* durch einen Flansch mit der Rohrleitung verbunden wird. Die Funktion $> d(x, y)$ bewirkt, dass das Symbol *x* in das Symbol *y* zurückgeführt wird. Auf ähnliche Weise realisiert die Funktion $e(m(x))$ dass Symbol *x* in Verbindung mit einem vorangehenden Symbol auf dem R&I-Fließschema steht.

Letztendlich findet die Kombination von Funktionen in einer sequentiellen Reihenfolge statt, basierend auf Anordnungsregeln, unter anderem können zusätzliche grafische Beziehungen benötigt werden.

Realisierung der technischen Darstellung basierend auf generischen Funktionen

Um für den oben genannten Zweck eine generische Funktionalität zu entwickeln, erscheint es sinnvoll, die funktionalen Anforderungen in Form von Skriptfunktionen zu definieren. Schließlich erzeugt ein entwickeltes Skript aus den sortierten *R&I-Grundmodulen* und *R&I-Zusatzmodulen* (diese werden in Form eines Strings an die Funktion übergeben) ein *modulares R&I-Fließschema*. Folgerichtig wurde dies auf der Basis von entwickelten generischen Funktionen prototypisch in COMOS realisiert. Basierend auf diesen ersten Informationen wird der aktuelle Ansatz im Detail wie folgt beschrieben:

- Zunächst ist die Erstellung eines R&I-Fließschemas erforderlich, um die Visualisierung des generierten Strings zu ermöglichen. Die grafische Umsetzung auf dem R&I-Fließschema beginnt an vordefinierten Koordinaten und die Ausrichtung erfolgt in einer sequentiellen Reihenfolge. Schließlich löst das Repräsentationsskript automatisch den generierten String mit der entsprechenden Anordnung von R&I-Modulen auf und bildet die ausgewählten R&I-Module mit ihren jeweiligen Stammobjekten im verwendeten Planungstool ab. Auf dieser Basis visualisiert das entwickelte Skript den erzeugten String in der technischen Zeichnung.
- Falls erforderlich, können *R&I-Zusatzmodule*, zum Beispiel der Motor einer Pumpe, ausgewählt werden: Die generische Verbindungsfunktion soll die technische Darstellung ermöglichen. In diesem Fall berücksichtigt der generierte String die kombinierten Funktionen in Eq. 2 und auf diese Weise werden die Zeichnungen grafisch dargestellt, wie in Abbildung 11 zu sehen ist.

$$> m(CP)e(m(Mo, M001)) \tag{Eq. 2}$$

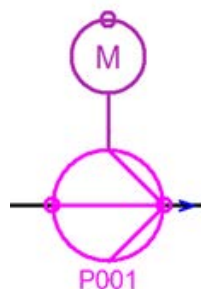


Abbildung 42: Schematische Darstellung eines an die Pumpe angeschlossenen Motors. (CP = Kreiselpumpe, Mo = Motor)

- Um das *R&I-Grundmodul* der Pumpe von Partikeln des Fördermediums zu schützen, ist ein Filter zwingend erforderlich. In einigen Fällen wird ein Druckdifferenzmessungssystem benötigt, um festzustellen, ob der Filter ordnungsgemäß funktioniert. Diese Anforderung geht aus dem Auswahlschritt hervor. Für diese spezielle Anforderung wird das Zeichnungsblatt aktualisiert, um die entsprechenden Symbole einzuarbeiten. In diesem Fall berücksichtigt der generierte String die entwickelte Funktion in Eq. 3, deren grafische Darstellung in Abbildung 12 zu sehen ist.

$$> d((> m(St)), (< m(V) < m(PI, PDI) < m(V)), l) \tag{Eq. 3}$$

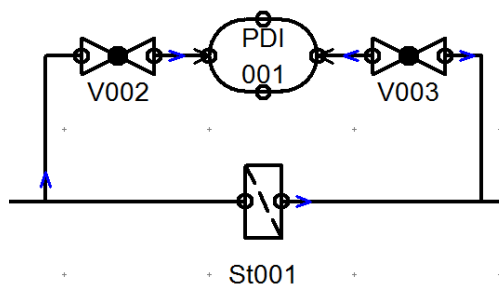


Abbildung 43: Schematische Darstellung eines Filtrationssystems. (St = Schmutzfänger, V = Ventil, PI = Druckmessung, PDI = Druckdifferenzmessung)

- Darüber hinaus besteht Bedarf an zusätzlichen R&I-Modulen, die die Instrumentierung und Steuerung umfassen, z.B. Druckanzeige- und Entlüftungssysteme. Diese können hinzugefügt werden, um prozessspezifische Anforderungen zu erfüllen. In diesem Fall berücksichtigt der generierte String die entwickelte Funktion in Eq. 4. Das Ergebnis wird grafisch in Abbildung 13 dargestellt.

$$> f(> m(V) > (PI, PI), l) \tag{Eq. 4}$$

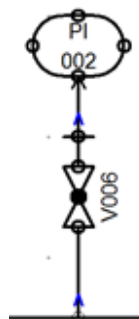


Abbildung 44: Schematische Darstellung des angeflanschten Druckmessungssystems. (V = Ventil, PI = Druckmessung)

Letztendlich ermöglicht dieser Ansatz die Erzeugung eines *Modularen R&I-Fließschemas* basierend auf den erzeugten Strings, welches versionierbar ist. Der Zweck einer Revision besteht darin, verschiedene Verarbeitungsschritte in einem Dokument zu sichern. Dadurch wird sichergestellt, dass alle generierten Strings jederzeit dokumentiert und nachvollziehbar sind. Dies trägt zur Qualitätssicherung und damit zu einer komfortablen Erstellung von *modularen R&I-Fließschemas* bei.

Zusammenstellung von generischen Funktionen zur Erstellung von *Modularen R&I-Fließschemas*

Das Resultat des Auswahltools für das obige Beispiel ist wie folgt: Das geeignete Arbeitsprinzip, um die Prozessanforderungen für das Fördern eines Stoffes zu erfüllen, ist eine hydrodynamische Zentrifugalpumpe, die Bezug ein Rückschlagventil benötigt, um den Rücklauf zu verhindern, sowie ein Druckmessungssystem. Da zudem damit zu rechnen ist, dass Partikel mit dem Fördermedium mitgeführt werden, ist eine Filtration erforderlich, die mit einem Druckmessungssystem unterstützt wird. Darüber hinaus ist das Ablassen der Saugleitung für den Start der Pumpe erforderlich. Die zu erzeugende Anordnung wird basierend auf der vorherigen dargestellten Heuristik-Datenbank für Pumpen-R&I-Module und aufgrund der Sortierung nach Kahn automatisch generiert und gemäß dem entwickelten Skript basierend auf Allens Intervallalgebra Methode grafisch dargestellt. Der generierte String aus kombinierten Funktionen wird in Eq. 5 dargestellt; die grafische Darstellung in Abbildung 14:

$$\begin{aligned}
 > m(AR, Inflow) > m(V) > d((> m(St)), (< m(V) < m(PI, PDI) < m(V)), l) \\
 > m(V) > f(> m(V), r) > m(CP)e(m(Mo, M001)) > f(\\
 > m(V) > (PI, PI), l) > m(ChV) > m(V) > m(AR, Outflow)
 \end{aligned}
 \tag{Eq. 5}$$

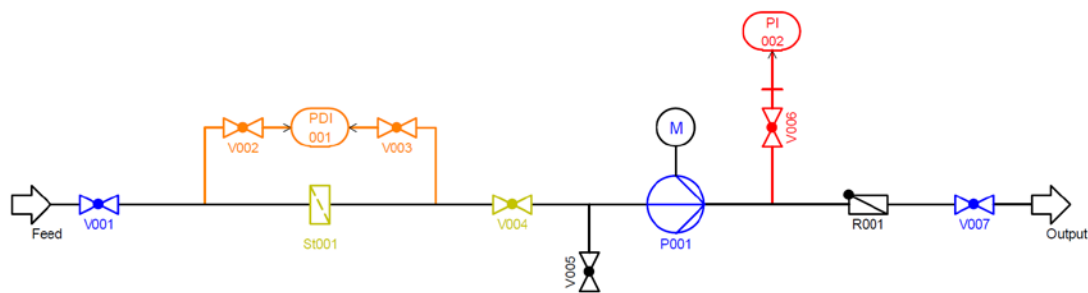


Abbildung 45: Exemplarisches *Modulares R&I-Fließschema* für das Beispiel der geeigneten Pumpe basierend auf dem generierten Skript. (AR = Arrow, V = Ventil, St = Schmutzfänger, PI = Druckmessung, PDI = Druckdifferenzmessung, CP = kreiselpumpe, Mo = Motor, ChV = Rückschlagventil)

Basierend auf den vorherigen Schritten stellt dieser Lösungsansatz eine dynamische Erstellung von *Modularen R&I-Fließschemas* sicher: weniger Platzbedarf, flexible Anordnung, flexible Änderung von *R&I-Grundmodulen* oder

R&I-Zusatzmodulen und die grafische Darstellung unabhängig von der verwendeten CAE-Software.

2.3.2 Konfiguration eines *Modularen 3D Layouts*

Das *Modulare 3D Layout* beschreibt die räumliche Anordnung der 3D Layout-Module und alle benötigten Verbindungen zwischen ihnen. Die Auswahl der 3D Layout Module ist trivial, da eine 1:1-Beziehung zwischen Equipment Modul und 3D Layout Modul besteht. In Abbildung 46 ist ein exemplarisches *Modulares 3D Layout* dargestellt, das manuell mithilfe der Software AutoCAD Plant 3D 2017 erstellt wurde, da entsprechende Moduldatenbanken und automatischen Tools bisher noch nicht vorhanden sind. In Absprache mit den Industriepartnern wurde hierbei versucht, die Komplexität der Verrohrung möglichst niedrig zu halten, ohne jedoch die Zugänglichkeit zu sehr einzuschränken.

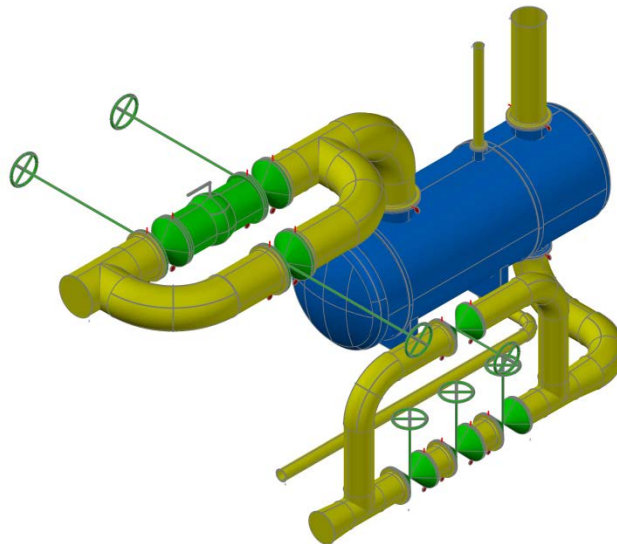


Abbildung 46: Exemplarisches *Modulares 3D Layout* für den Block einer Kondensation (Blau: *3D Layout-Grundmodul*; Grün: *3D Layout-Zusatzmodule*) [4].

In Zukunft wird das *Modulare 3D Layout* während der computergestützten modulbasierten Anlagenplanung automatisch erstellt werden. Der Ansatz ist jedoch prinzipiell ähnlich zur automatischen Konfiguration von *Modularen R&I Fließschemata* (vgl. Abschnitt 2.3.1).

Während der Konfiguration der 3D Layout-Module müssen folgende Randbedingungen berücksichtigt werden:

- Konfigurationsregeln für die einzelnen 3D Layout-Module
- Regeln für die Anordnung der Module, die für unterschiedliche Blöcke ausgewählt wurden, relativ zueinander
- Notwendige Verrohrung
- Räumliche Randbedingungen am Anlagenstandort

Konfigurationsregeln für die einzelnen 3D Layout-Module müssen im *Auswahl- und Konfigurationstool* implementiert sein. Ein Ansatz hierfür wurde von Hady und Wozny beschrieben [50]. Für die automatische relative Anordnung von Modulen, die für unterschiedliche Blöcke ausgewählt wurden, muss das *Auswahl- und Konfigurationstool* Konfigurationsalgorithmen enthalten wie sie beispielsweise von Madden et al. [51], Cagan et al. [52], Burdorf et al. [53] als auch Xu und Papageorgiou [54] entwickelt wurden. Dafür werden unter anderem Heuristiken für die Aufstellungsplanung und Unternehmensstandards im *Auswahl- und Konfigurationstool* benötigt. Aufgrund der Vielzahl an Randbedingungen sind außerdem Priorisierung und Gewichtung erforderlich. In diesem Zusammenhang wird auch klar, dass nicht alle 3D Layout-Module, die für einen Block ausgewählt wurden, nebeneinander platziert werden können. So kann beispielsweise ein Entlüftungsventil nicht immer neben dem Hauptapparat installiert werden, da es an der höchsten Position in der zugehörigen Rohrleitung platziert sein muss.

Insgesamt lässt sich in diesem Zusammenhang festhalten, dass die Konfiguration eines *Modularen 3D Layouts* komplex ist. Bisherige Ansätze gelten immer noch. Da eine modulare Anlage nicht immer aus vorgeplanten, zusammensteckbaren Containern bestehen muss, ist die Erstellung einer 3D-Aufstellungsplanung nicht so einfach wie anfangs vermutet. Da jedoch das Gewicht der Equipment-Module bekannt ist, kann eine Iterationsschleife während der Erstellung eines *Modularen 3D Layouts* eingespart und damit die Planungszeit verkürzt werden.

2.4 AP4 „Energieeffizienz-Bewertungstool“

Evonik, Inosim, plantIng, Siemens, TUDO-APT, IPAT

Für das Ziel einer energieeffizienten modularen Anlage muss die Energieeffizienz bereits während der Auswahl der Module und insbesondere in frühen Planungsphasen berücksichtigt werden. Hierfür wurde ein Vorgehen entwickelt. Darüber hinaus wurden der erarbeitete Planungsansatz und damit erstellte *modulare Sets von Equipment* hinsichtlich der Energieoptimierung und der Prozessbeschleunigung evaluiert. Dabei wurden sowohl ein kontinuierlicher als auch ein absatzweise betriebener Prozess betrachtet.

2.4.1 Bewertung einzelner Module

Um die Anforderungen einer verkürzten Planungszeit bei gleichzeitiger Optimierung hinsichtlich des Energiebedarfs für eine chemische Produktionsanlage zu erfüllen, ist es notwendig Planungsinformationen früher nutzbar zu machen. In der modulbasierten Anlagenplanung liegen alle entsprechenden Informationen bereits in den Moduldatenbanken vor, sodass erbrachte Ingenieursarbeit archiviert und durch Auswahl der Module abrufbar ist. Das Energieeffizienz-Bewertungstool wird im ersten Schritt für die Auswahl einzelner Module verwendet. Das Ziel ist es dabei durch die anschließende Konfiguration der ausgewählten Module die modularen Planungsdokumente einer energieeffizienten Produktionsanlage zu erstellen. Die höchste Genauigkeit der Bestimmung des Energiebedarfs eines Equipments wird dabei mit dem modularen Equipment-Set erreicht, da detaillierte Informationen über Geometrien von Apparaten und Maschinen vorliegen. Dementsprechend können Equipment-Module in rigorose Simulationen eingebunden werden. Allerdings müssen bei diesem Detaillierungsgrad auch Interaktionen von Equipment-Modulen über Stoff- und Energieströme berücksichtigt werden. Daraus folgt, dass das optimale *modulare Set von Equipment* durch eine rigorose Simulation der gesamten Produktionsanlage bestimmt werden muss. Wie aus Abbildung 5 ersichtlich ist, liegt bei dieser Planungsaufgabe allerdings die höchste Varianz an alternativen Modulen vor, woraus ein hoher Rechenaufwand im Rahmen der Optimierung resultiert. Die Anzahl an zu betrachtenden Equipment-Modulen kann deutlich reduziert werden, indem der Apparate-Typ durch die Auswahl des R&I Grundmoduls bestimmt wird. Bisherige Methoden zum Vergleich von Apparate-Typen sind jedoch relativ ungenau und können darüber hinaus nicht die Unsicherheit der Prozessdaten in frühen Phasen der Planung berücksichtigen.

Um eine genauere Bewertung des Equipment-Typs zu ermöglichen wurde eine Methode entwickelt, die auf Ansätzen aus der Wärmeübertrager-Optimierung [55] basiert. Im ersten Schritt wird zunächst abgeschätzt, wie das Equipment eines bestimmten Typs geometrisch gestaltet sein muss, damit die Prozessaufgabe erfüllt werden kann. Mit einfachen Gleichungen werden Betriebsgrenzen in einem

Plot der geometrischen Design-Parameter an den Achsen, dem sogenannten Parameter-Plot [55], dargestellt. Der Parameter-Plot für geometrisch ähnliche Kreiselpumpen ist exemplarisch in Abbildung 47 dargestellt. Der Laufraddurchmesser und die Drehzahl sind voneinander abhängig, um die Förderaufgabe definiert durch Förderstrom und -höhe zu erfüllen. Punkte innerhalb des Raumes, abgesteckt durch die gezeigten Betriebsgrenzen, beschreiben potentiell betreibbare Equipment-Designs für die jeweils ein Wirkungsgrad berechnet werden kann. In dem gezeigten Beispiel liegt der Wirkungsgrad einer Kreiselpumpe für die vorliegende Förderaufgabe zwischen 63 und 69 %. Unabhängig davon welche Kreiselpumpe im Detail-Engineering ausgewählt wird, kann bereits in frühen Planungsphasen der Wirkungsgrad sehr genau bestimmt werden.

Oft kann durch Bewertung aller betreibbaren Equipment-Designs bereits ein einzelner Equipment-Typ ausgewählt werden, wenn beispielsweise der maximale Wirkungsgrad einer Kreiselpumpe kleiner als der minimale Wert eine Kolbenpumpe ist. Auf diese Weise können zeitintensive Auslegungen im Detail-Engineering auf den Pumpentyp mit dem höchsten Wirkungsgrad konzentriert werden und darüber hinaus die Zahl an alternativen *Equipment-Modulen* deutlich reduziert werden.

Der bisher beschriebene Ansatz benötigt keine existierende *Equipment-Moduldatenbank*, da fiktive Equipment-Designs, wie in diesem Beispiel der Laufraddurchmesser, betrachtet wurden. Liegt allerdings eine *Equipment-Moduldatenbank* vor, so können die dort enthaltenen Informationen auch bereits in der frühen Anlagenplanung berücksichtigt werden, indem die *Equipment-Module* in dem Parameter-Plot dargestellt werden. Im Rahmen des Beispiels wurden Chemienormpumpen [56] in die *Equipment-Moduldatenbank* aufgenommen und als orangene Punkte in Abbildung 47 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass mit diesen zusätzlichen Informationen nun der Wirkungsgrad genau zu 69 % bestimmt werden kann.

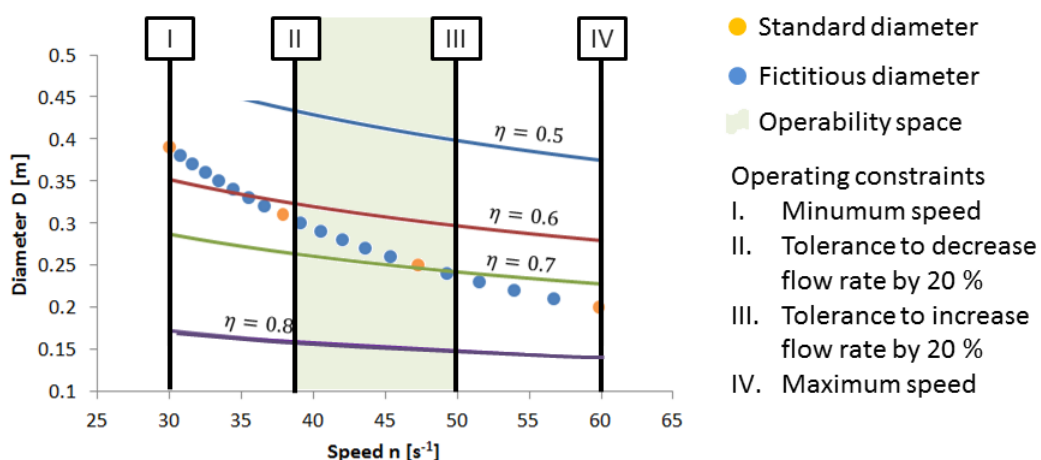


Abbildung 47: Parameter-Plot für geometrisch ähnliche Kreiselpumpen an einem definierten Betriebspunkt ($Q = 115 \text{ m}^3/\text{h}$; $H = 115 \text{ m}$; Fördermedium Wasser).

Ein weiterer Vorteil des beschriebenen Ansatzes ist die Möglichkeit Unsicherheiten oder Schwankungen in den Prozessdaten auch in den frühen Phasen der Anlagenplanung für die Auswahl des *R&I Moduls* und somit für den Equipment-Typ zu berücksichtigen. Durch bekannte Geometrien jedes Punkts im Parameter-Plot können beispielsweise zum Teil erhebliche Einbußen im Wirkungsgrad einer Kreiselpumpe bei Veränderungen des Förderstroms berücksichtigt werden. Dementsprechend ermöglicht es dieser Ansatz mit relativ einfachen Berechnungen den Equipment-Typ mit dem geringsten tatsächlichen Energiebedarf auszuwählen. Eine Veröffentlichung zu dieser Methode um Designinformationen schon in frühen Phasen der Anlagenplanung zu berücksichtigen ist zum 1. Quartal 2018 geplant.

Um den Energiebedarf nicht vollständig losgelöst von anderen wirtschaftlichen Aspekten zu betrachten, wurden die Lebenszykluskosten als Bewertungskriterium für die Auswahl der Module verwendet. Die Lebenszykluskosten entsprechen dabei der Summe der anfallenden Kosten von der Anschaffung bis hin zur Entsorgung unter der Berücksichtigung von Zeit und Zinsen. Energiekosten besitzen einen maßgeblichen Anteil an den Lebenszykluskosten eines einzelnen Equipments. Dadurch ist es möglich anhand dieser Kennzahl ein energieeffizientes und gleichzeitig kostenoptimiertes Equipment auszuwählen [57]. Die farblich hervorgehobenen Hauptanteile der in Abbildung 48 gezeigten Lebenszykluskosten einer typischen Pumpe in der chemischen Industrie wurden berücksichtigt. Die sonstigen Kosten enthalten unter anderem Ausgaben für Entsorgung sowie Betriebsausfälle. Erstere unterscheiden sich nicht signifikant für unterschiedliche Pumpen-Typen, sind also nicht entscheidungsrelevant und zudem schwer zu bestimmen. Aus diesem Grund werden derartige sonstige Kosten nicht für den Auswahlprozess berücksichtigt. Kosten für Betriebsausfälle sind fallspezifisch und werden zunächst in einem ersten allgemeinen Ansatz außen vor gelassen.

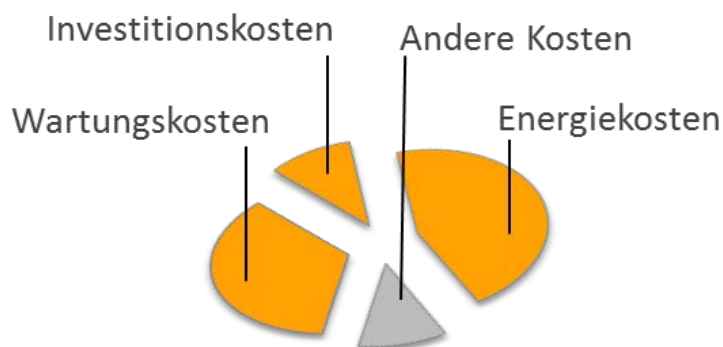


Abbildung 48: Lebenszykluskosten eines Pumpensystems mittlerer Größe in der chemischen Industrie (basierend auf [57]).

Für die Kostenmodelle wurden die in Tabelle 12 aufgeführten Abhängigkeiten berücksichtigt.

Tabelle 12: Berücksichtigte Einflussgrößen auf verwendete Kostenmodelle.

Einflussgröße	Investitionskosten	Wartungskosten	Energiekosten
Förderstrom	Ja	Nein	Ja
Schwankungen im Betrieb für Förderstrom	Nein	Nein	Ja
Förderhöhe	Ja	Nein	Ja
Material (abhängig von Fördermedium)	Ja	Nein	Nein
Jährliche Betriebsstunden	Nein	Ja	Ja
Lebenszyklus der Anlage	Nein	Ja	Ja
Relative Wartungskosten bezogen auf Investment	Nein	Ja	Nein
Viskosität	Nein	Nein	Ja

Zur einfacheren Nachvollziehbarkeit der Entscheidung sollten die nach Lebenszykluskosten empfohlenen Anwendungsbereiche der Pumpentypen dargestellt werden. Anhand des Förderstroms sowie der Förderhöhe, den jährlichen Betriebsstunden und dem Lebenszyklus der Anlage kann ein Einsatzbereich definiert werden, innerhalb dessen ein Pumpentyp anhand der LCC zu favorisieren ist. Exemplarisch wurde ein Vergleich von vier Pumpentypen in Abbildung 49 zunächst ohne Betrachtung von Unsicherheiten bestimmt.

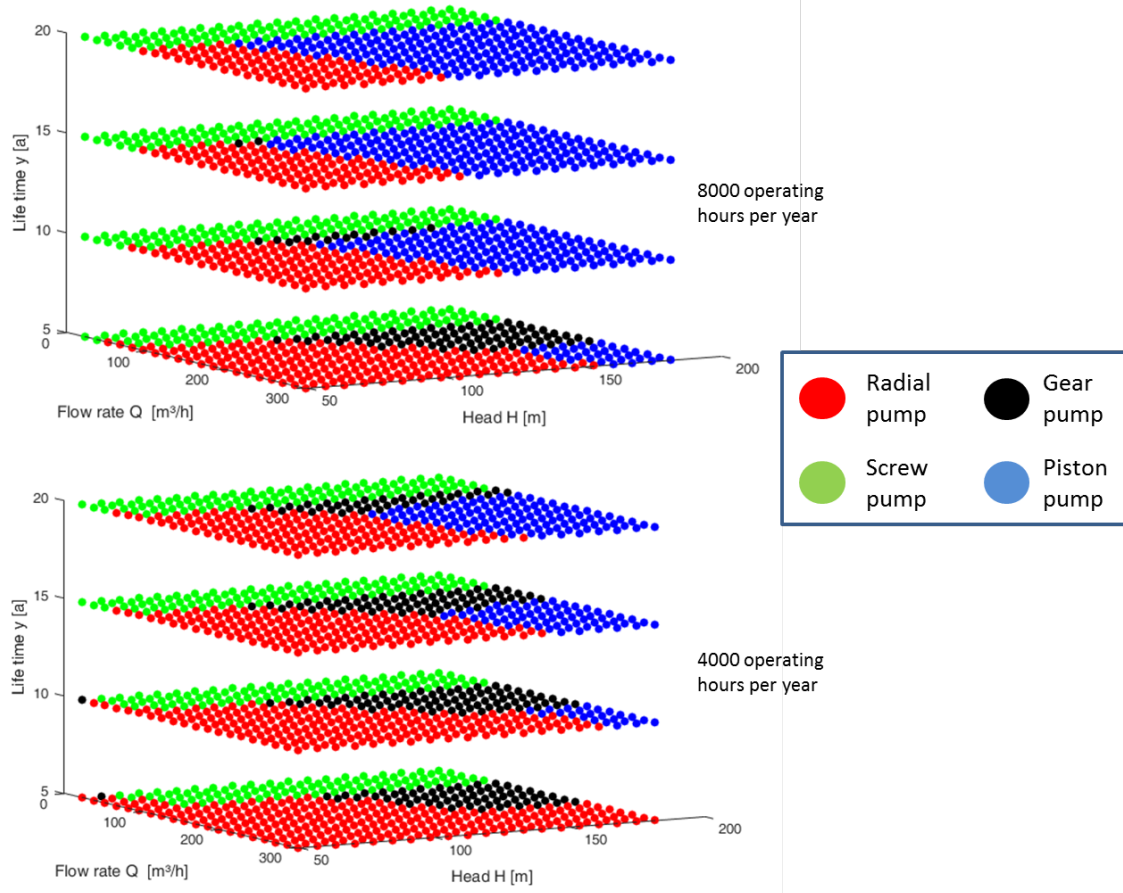


Abbildung 49: Nach Lebenszykluskosten zu favorisierende Anwendungsbereiche für vier betrachtete Pumpentypen.

Wie zu erwarten ist die Kreiselpumpe bei tendenziell niedrigen Förderhöhen und hohen Förderströmen zu favorisieren. Die bessere Energieeffizienz der Verdrängerpumpen führt dazu, dass ein geringerer Energieverbrauch über eine lange Verwendung die höheren Investitionskosten aufhebt. Dadurch sind tendenziell Verdrängerpumpen bei längerem Anlagenbetrieb, als auch bei höherer Betriebsstundenzahl pro Jahr einzusetzen. Zum einen wird aus der Abbildung deutlich, dass sich die Ergebnisse mit qualitativen Erfahrungswerten und Literaturangaben decken. Zum anderen ist es aber nun möglich diese bisher qualitativen Aussagen zu quantifizieren und Betriebsbereiche mit Energie-Einsparpotential zu identifizieren. Durch die standardisierten Anschlussgeometrien aus Abschnitt 2.2.1 und der Möglichkeit zur Pulsationsdämpfung in Abschnitt 2.2.2 kann auch in bestehende Anlagen eine Umrüstung zu energieeffizienten Verdrängerpumpen stattfinden.

Werden Unsicherheiten für die Bestimmung der Lebenszykluskosten berücksichtigt, können nicht mehr einzelne Kosten-Werte für die Pumpentypen verglichen werden. Da die Eingangsgrößen normalverteilt um einen Mittelwert schwanken, werden deshalb für jeden Pumpentyp

Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Lebenszykluskosten berechnet. Für die Auswahl sowie die grafische Darstellung der zu favorisierenden Einsatzbereiche von Pumpentypen müssen anschließend diese Wahrscheinlichkeitsverteilungen verglichen werden. Dabei können die in Abbildung 50 dargestellten Fälle unterschieden werden. Die kumulative Wahrscheinlichkeit auf der vertikalen Achse kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Der Wert an der horizontalen Achse bei einer kumulativen Wahrscheinlichkeit von 1 entspricht dem Maximalwert. Der Minimalwert liegt entsprechend am unteren linken Ende der Kurve vor. Eine Entscheidung für eine Alternative ist in den Fällen „outcome dominance“ und „probabilistic dominance“ möglich [58]. Allerdings besteht bei dem Fall „probabilistic dominance“ ein Restrisiko, das Alternative B einen geringeren Wert (z.B. Kosten) aufweist. Für den Fall, dass sich die Kurven schneiden („No dominance“), sind die Alternativen A und B in gleicher Weise geeignet [58].

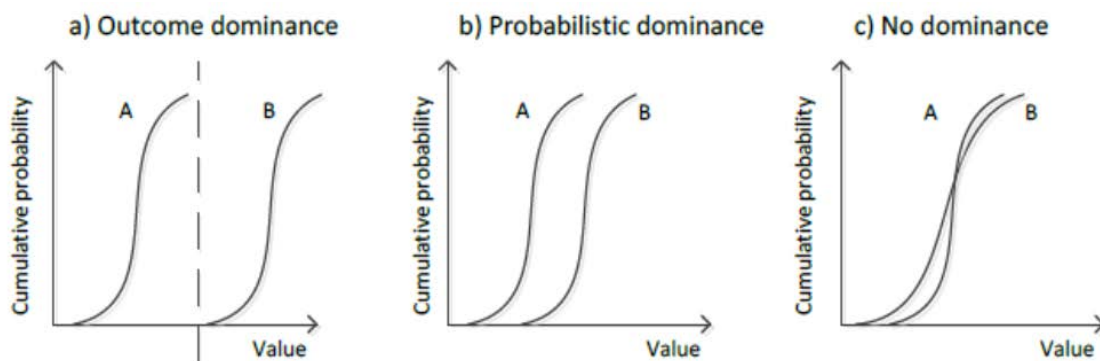


Abbildung 50: Mögliche Fälle bei der Entscheidung unter Unsicherheiten (basierend auf [58]).

Unter Berücksichtigung der Modellfehler und der Unsicherheiten in den Betriebsbedingungen in Tabelle 13 wurden die zu favorisierenden Betriebsbereiche der Pumpentypen exemplarisch bestimmt.

Tabelle 13: Exemplarisch betrachtete Zustandsunsicherheiten für Betriebsbedingungen und Strompreis.

State uncertainty	Unit	Min	Max
Head H	m	H_1	$1.1 \cdot H_1$
Life time y	a	5	15
Operation time t	h/a	7750	8250
Electricity price e	€/kWh	0.09	0.12

Dabei wurden die Fälle aus Abbildung 50 berücksichtigt und in Abbildung 51 dargestellt.

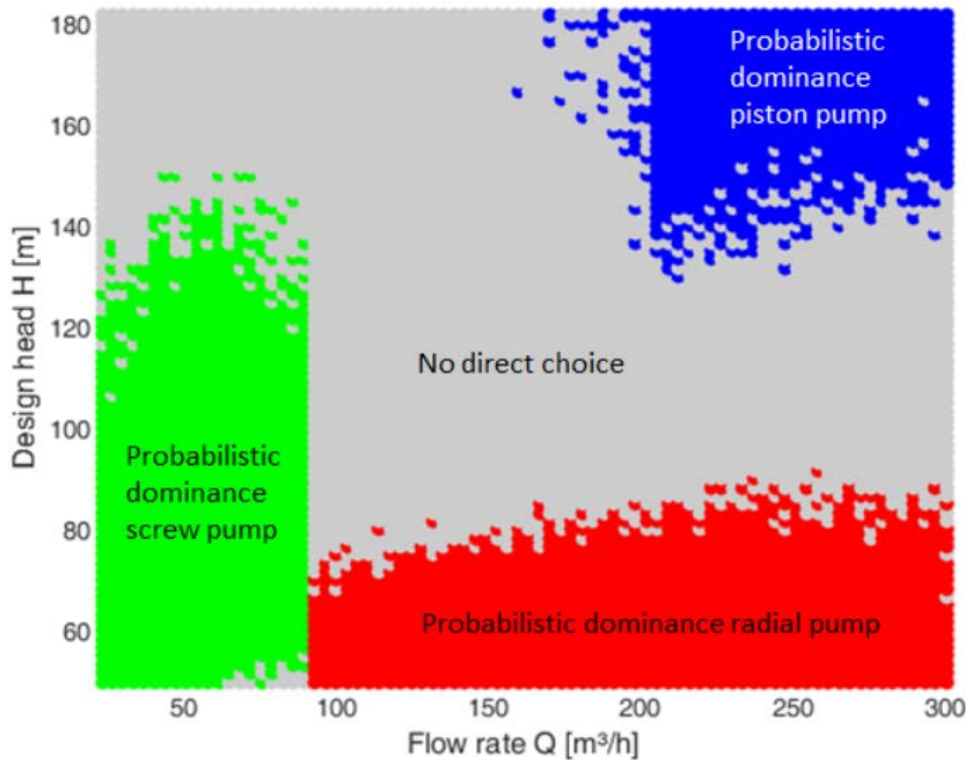


Abbildung 51: Nach Lebenszykluskosten zu favorisierende Anwendungsbereiche für vier betrachtete Pumpentypen unter Betrachtung von Unsicherheiten.

Die angenommenen Unsicherheitsbereiche in den Prozessdaten führen im grauen Bereich zur Überschneidung der kumulativen Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Lebenszyklus-Kosten, sodass dort mindestens zwei Pumpentypen gleichermaßen geeignet sind. Letztendlich ist also die Auswahl des Pumpentyps und somit des P&ID Moduls sehr sensitiv für Betriebsbedingungen und insbesondere Schwankungen in den Prozessdaten, sodass diese berücksichtigt werden sollten.

2.4.2 Bewertung kontinuierlich betriebener modularer Anlagen

Der erarbeitete Ansatz zur modulbasierten Anlagenplanung wird in diesem Abschnitt hinsichtlich der Ziele eines beschleunigten Planungsprozesses und gleichzeitiger Energieoptimierung anhand eines Fallbeispiels bewertet. Durch Energieintegration lässt sich die Energieeffizienz eines Prozesses erheblich steigern. Daher wurde untersucht, welchen Einfluss der Einsatz von Equipment-Modulen auf die Energieintegration hat. Hierzu wurde zunächst eine Methodik entwickelt, mit der man optimale Wärmeübertrager-Module aus einer vorhandenen *Equipment-Moduldatenbank* auswählen kann. Diese Methodik ist in Abbildung 52 dargestellt.

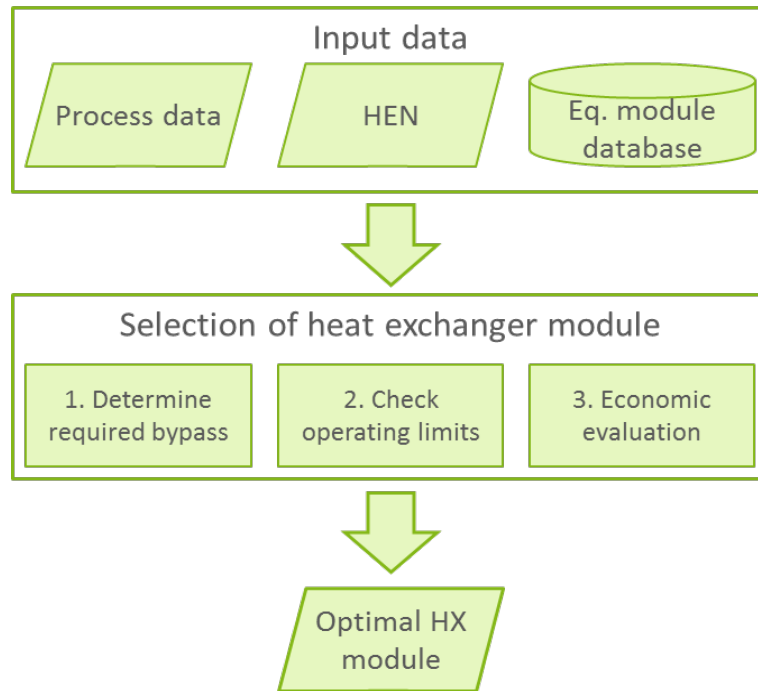


Abbildung 52: Schematische Darstellung der Methodik zur Auswahl eines geeigneten Wärmeübertrager-Moduls.

Die Methodik startet ausgehend von einem gegebenen Wärmeübertragernetzwerk (HEN) mit bekannten Prozessdaten und einer *Equipment-Moduldatenbank*. Jede Wärmeübertrager-Position im Wärmeübertragernetzwerk wird nacheinander betrachtet. Obwohl die Wärmeübertrager-Module nicht wie üblicherweise am Auslegungspunkt betrieben werden, kann über eine Regelungsstrategie der erforderliche Wärmestrom eingestellt werden. Hierfür wird im Wärmeübertragernetzwerk ein Bypassstrom um den Wärmeübertrager geschaltet. Daher wird im ersten Schritt für jedes Wärmeübertrager-Modul der benötigte Bypassstrom bestimmt. Im zweiten Schritt werden die Betriebsgrenzen überprüft. Die thermo- und hydrodynamischen Betriebsgrenzen ergeben sich analog zu AP1. Zusätzlich ergeben sich jedoch Betriebsgrenzen durch maximale Bypassströme auf Rohr- und Mantelseite, um eine Temperaturkreuzung zu vermeiden. Alle betreibbaren Wärmeübertrager-Module werden anschließend ökonomisch bewertet und die günstigste Alternative wird ausgewählt. Eine deutliche Beschleunigung des Planungsprozesses ist zu erwarten, da lediglich aus der limitierten Anzahl von Equipment-Modulen in der *Equipment-Moduldatenbank* [8] ausgewählt werden muss.

Für die Bewertung des Energiebedarfs soll die entwickelte Methode einem Ansatz von Mizutani et al. [59] gegenübergestellt werden, bei dem gleichzeitig Equipment und Wärmeübertrager-Netzwerk unter sehr hohem Rechenaufwand optimiert wurden. Dazu wurde das Wärmeübertragernetzwerk in Abbildung 53 verwendet. Es konnte erfolgreich gezeigt werden, dass Wärmeübertragernetzwerke mit den in AP1 entwickelten Wärmeübertrager-

Modulen aufgebaut werden können, wobei das komplette Energieintegrationspotential ausgeschöpft werden kann.

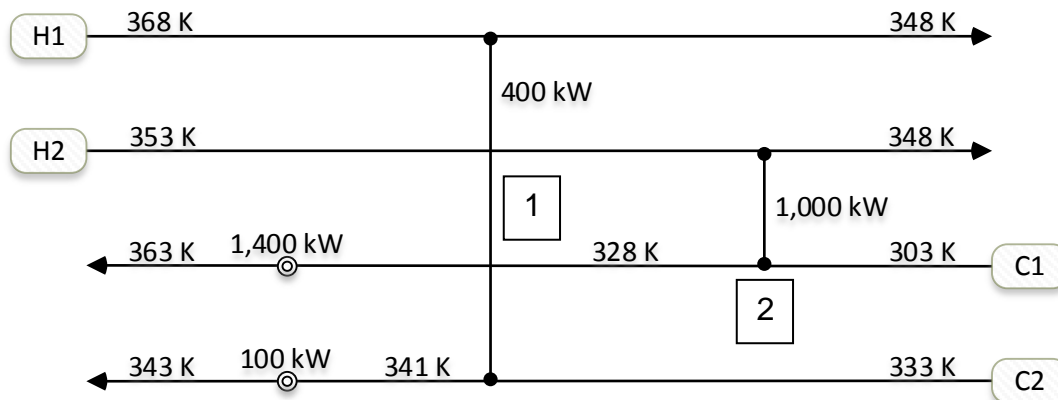


Abbildung 53: Betrachtetes Wärmeübertragernetzwerk nach Mizutani et al. [59].

Wie in Abbildung 54 dargestellt ergeben sich sehr hohe jährliche Betriebskosten, wenn der komplette Heiz- und Kühlbedarf mit externen Betriebsströmen gedeckt werden würde.

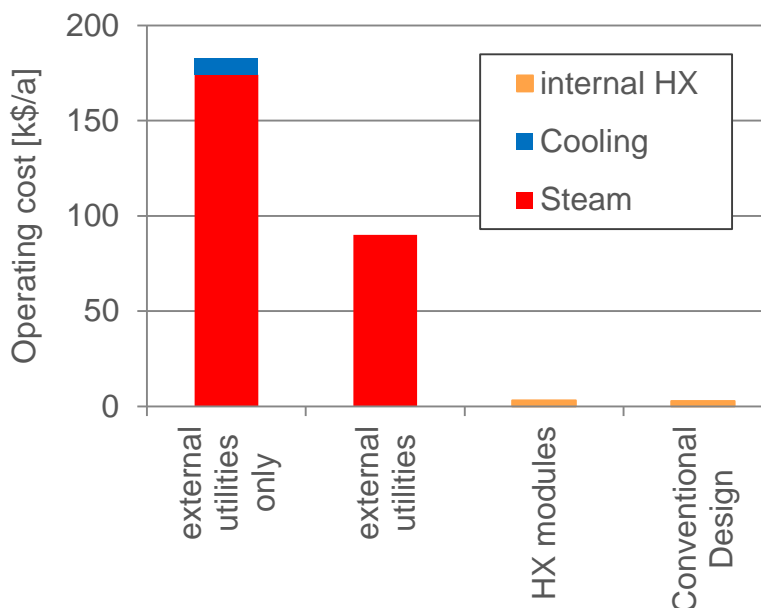


Abbildung 54: Jährliche Betriebskosten für das betrachtete Wärmeübertragernetzwerk.

In diesem Beispiel können durch das Wärmeübertragernetzwerk die kompletten Kosten des Kühlwassers sowie fast die Hälfte der Kosten für Heizdampf eingespart werden. Dieses Energieeinsparpotential kann auch ausgeschöpft werden, wenn Wärmeübertrager-Module im Wärmeübertragernetzwerk eingesetzt werden. Da in diesem Beispiel die eingesetzten Wärmeübertrager-Module jedoch nicht optimal auf den Betriebspunkt ausgelegt sind, ergeben sich um 12% leicht erhöhte Kosten durch den zusätzlichen Druckverlust im Vergleich zum konventionellen Design (vgl. Abbildung 54). Verglichen mit den Kosten und

damit auch dem Energiebedarf durch externe Betriebsmittel ist der zusätzliche Energiebedarf jedoch verschwindend gering.

Entsprechend den Ausführungen in Abschnitt 2.4.1 wurden für das modulare Wärmeübertragernetzwerk die Lebenszykluskosten bestimmt, um ebenfalls die Gesamtwirtschaftlichkeit über den Lebenszyklus zu betrachten. Die Gegenüberstellung zum bestehenden konventionellem Ansatz ist in Abbildung 55 dargestellt. Die jährlichen Kosten wurden diskontiert auf den Anschaffungszeitpunkt bei einem Lebenszyklus der Anlage von 20 Jahren.

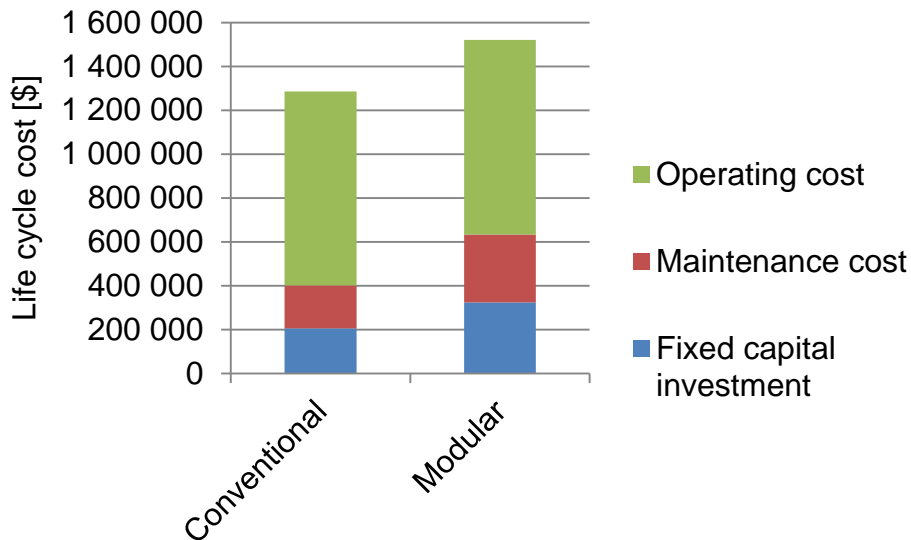


Abbildung 55: Lebenszykluskosten für das betrachtete Wärmeübertragernetzwerk.

Dem beschleunigten Planungsprozess bei gleichem erreichtem Energieeinsparpotential stehen in diesem Beispiel erhöhte Investitions- und Wartungskosten gegenüber. Die zusätzlichen Investitionskosten bei der Verwendung von Equipment-Modulen sind auf die fehlende Optimierung jedes einzelnen Equipments zurückzuführen. In diesem Fall sind also der beschleunigte Planungsprozess erhöhten Investitionskosten gegenüberzustellen. Bei dieser Betrachtung wurden jedoch noch keine eventuellen Reduktionen in den Herstellungskosten von Modulbaureihen berücksichtigt. Die Wartungskosten wurden hier zunächst anhand einer Heuristik bestimmt, nach der die jährlichen Wartungskosten 10 % der Investitionskosten betragen [60]. Dementsprechend ist die Differenz der Wartungskosten zwischen modulbasierter und konventioneller Planung auf die Unterschiede der Investitionskosten bei dieser einfachen Abschätzung zurückzuführen. Grundsätzlich können auch bei den Wartungskosten die gleichen Effekte einer Baureihenfertigung erwartet werden, sodass reduzierte Ersatzteilkosten zu geringeren Kosten führen. Abschließend zeigt dieses Beispiel jedoch, dass Energieoptimierung und gleichzeitig verkürzte Planungszeit durch modulbasierte Anlagenplanung möglich sind.

2.4.3 Bewertung absatzweise betriebener modularer Anlagen

Zusätzlich zu kontinuierlichen Prozessen wurde die Verwendung von Equipment-Modulen in absatzweise betriebenen Prozessen innerhalb des Teilprojektes „Modularisierung“ untersucht. Beispielhaft wurde ein Herstellprozess von unterschiedlichen kosmetischen Cremes betrachtet, der in Abbildung 56 schematisch dargestellt ist. Der Herstellprozess wurde in der Simulationssoftware INOSIM abgebildet, welche sich vor allem für absatzweise betriebene Prozesse eignet. Hierbei werden Wasser und Öl jeweils getrennt in einem Mischer erhitzt, homogenisiert und anschließend abgefüllt. Um Produktverfärbungen zu vermeiden, werden die Edukte nicht direkt mit Dampf geheizt, sondern über Wasser als Wärmeträger-Medium, welches eine maximale Temperatur von 90 °C hat. Das Wärmeträger-Medium des Sekundärkreislaufs wird jeweils von kondensierendem Heizdampf erwärmt.

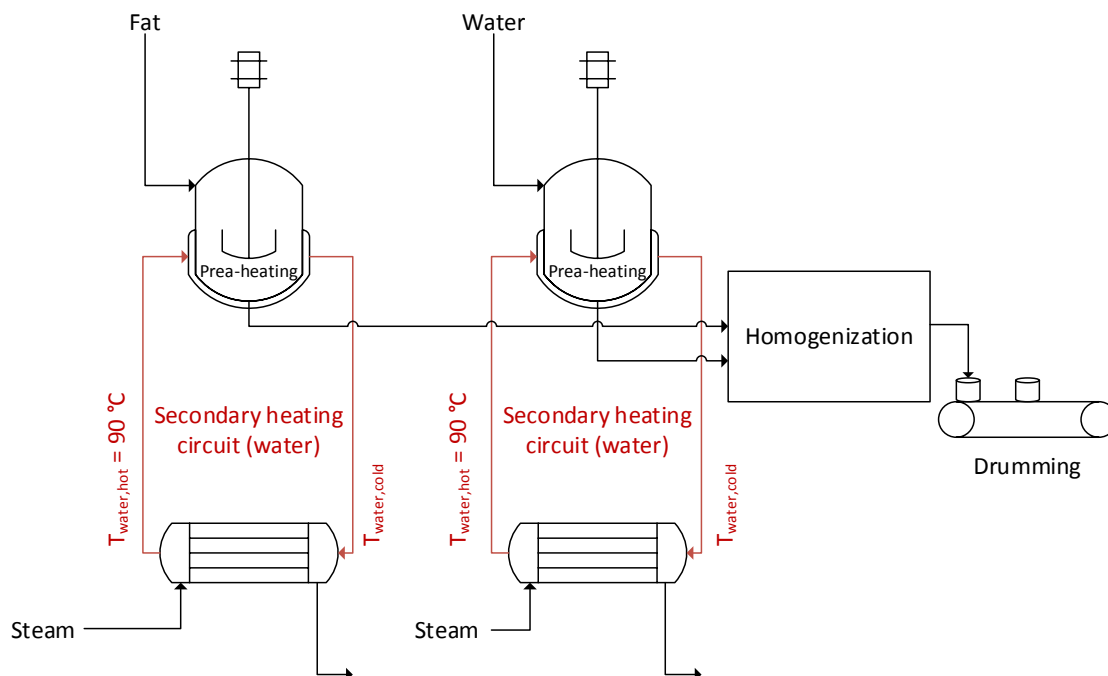


Abbildung 56: Schematische Darstellung des betrachteten Batch-Prozesses.

Die drei unterschiedlichen Produkte werden nacheinander in derselben Anlage hergestellt. Die Gewichtsanteile an Wasser und Öl sowie der Verpackungsinhalt unterscheiden sich hierbei je nach Produkt. Darüber hinaus wurden pro Produkt jeweils drei Produktionskampagnen mit unterschiedlicher Chargengröße untersucht, um ein möglichst realitätsnahes Szenario zu untersuchen.

Exemplarisch wurde der Einsatz der in Arbeitspaket 1 entwickelten Kondensator-Module für diesen Prozess untersucht (vgl. Abschnitt 2.1.2). Ein Kondensator-Modul kann eingesetzt werden, wenn es für jedes Produkt innerhalb seiner Betriebsgrenzen betrieben werden kann. Hierbei wurden wie in Arbeitspaket 1 fluid- und thermodynamische Betriebsgrenzen betrachtet. Über die Menge an kondensierendem Heizdampf wird die Temperatur des Wärmeträger-Mediums

auf 90 °C eingestellt. Der Massenstrom des Wärmeträger-Mediums im Sekundärkreislauf wird dabei konstant gehalten, um Fouling im Mantel der Mischer zu verhindern. Da sich der Inhalt und die Temperatur im Mischer je nach Produkt und über die Zeit ändern, ändert sich auch die Menge an benötigtem Heizdampf zeitabhängig. Die Betriebsgrenzen der Kondensator-Module müssen jedoch für jeden dieser Betriebszustände eingehalten werden, damit das entsprechende Kondensator-Modul eingesetzt werden kann. Hierbei kann es passieren, dass ein Kondensator-Modul über zu wenig Wärmeübertragungsfläche für bestimmte Betriebszustände verfügt. Der Massenstrom des Heizdampfes kann dann nicht weiter erhöht werden, da es ansonsten zu Rohrschwingungen kommt oder der Heizdampf nicht mehr vollständig kondensiert. In diesem Fall kann das Wärmeträger-Medium nicht auf die 90 °C erwärmt werden und der Aufheizvorgang der Edukte dauert länger. Mit dem Freiheitsgrad der Batch-Zeit steht somit ein zusätzlicher Freiheitsgrad zur Verfügung um Equipment-Module anwenden zu können.

Die Ergebnisse sind im Folgenden für zwei Fallstudien dargestellt, die sich hinsichtlich der Produktionskapazität der Anlage sowie der Druckstufe des zur Verfügung stehenden Dampfnetzes unterscheiden.

Tabelle 14: Betrachtete Produktionsanlagen und –kampagnen.

	Creme	Packungsgröße	Anzahl Verpackungen	Füllmasse pro Verpackung	Massenanteil Wasser	Massenanteil Fett
	[-]	[-]	[-]	[kg]	[-]	[-]
Produktionsanlage A	A	1	5000	2	0,4	0,6
	A	2	1200	10	0,4	0,6
	A	3	250	50	0,4	0,6
	B	1	5000	2	0,3	0,7
	B	2	1200	10	0,3	0,7
	B	3	250	50	0,3	0,7
	C	1	5000	2	0,2	0,8
	C	2	1200	10	0,2	0,8
	C	3	250	50	0,2	0,8
Produktionsanlage B	A	1	2000	2	0,5	0,5
	A	2	600	10	0,5	0,5
	A	3	150	50	0,5	0,5
	B	1	2000	2	0,4	0,6
	B	2	600	10	0,4	0,6
	B	3	150	50	0,4	0,6
	C	1	2000	2	0,3	0,7
	C	2	500	10	0,3	0,7
	C	3	150	50	0,3	0,7

Im ersten Fall der Produktionsanlage A steht Wasserdampf bei 5 bar zur Verfügung. In diesem Szenario kann ein Kondensator-Modul aus der erstellten Equipment-Moduldatenbank den gesamten geforderten Betriebsbereich abdecken, wie in Abbildung 57 erkennbar ist. Durch Regelung des Dampf-massenstroms kann für alle auftretenden Eingangstemperaturen $T_{\text{water,cold}}$ des Wärmeträgermediums die Ausgangstemperatur $T_{\text{water,hot}}$ auf 90 °C eingestellt werden. Die maximale Fluidgeschwindigkeit des Dampfes wird dabei nicht erreicht und der Heizdampf wird vollständig kondensiert, sodass alle Betriebsgrenzen erfüllt sind.

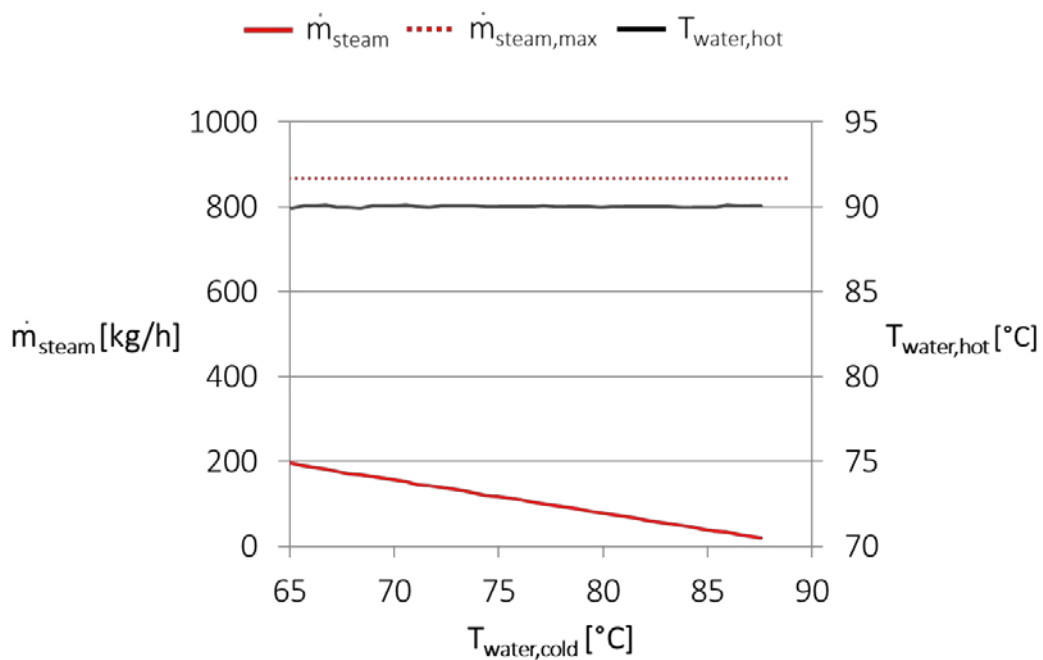


Abbildung 57: Instationärer Betrieb des ausgewählten Kondensator-Moduls für Produktionsanlage A und maximal zulässiger Dampfmassenstrom $\dot{m}_{\text{steam,max}}$ zur Vermeidung von Rohrschwingung.

Für die Produktionsanlage B, dessen Ergebnis in Abbildung 58 dargestellt ist, steht ein Dampfnetzwerk bei 2 bar zur Verfügung. Das beste Kondensator-Modul, das in der erstellten Equipment-Moduldatenbank zur Verfügung steht, kann nicht den gesamten Betriebsbereich abdecken. Der maximal zulässige Dampfmassenstrom $\dot{m}_{\text{steam,max}}$ ist in diesem Fall limitiert durch die Randbedingung einer vollständigen Kondensation.

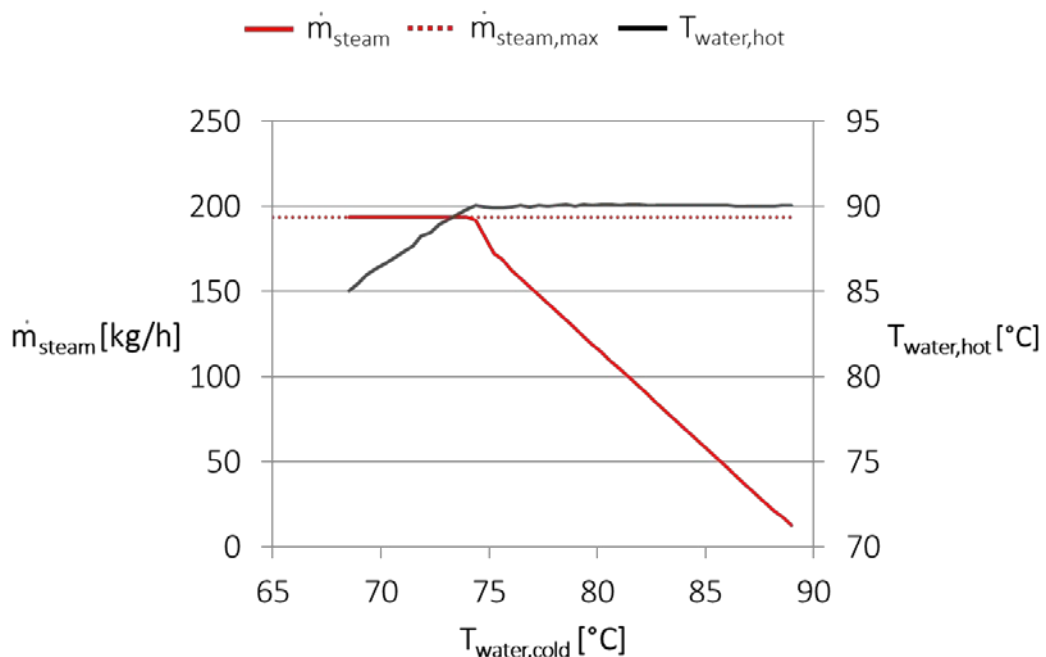


Abbildung 58: Instationärer Betrieb des ausgewählten Kondensator-Moduls für Produktionsanlage B und maximal zulässiger Dampfmassenstrom $\dot{m}_{\text{steam,max}}$ zur vollständigen Kondensation des Heizdampfes.

Es ist zu erkennen, dass bei niedrigen Eingangstemperaturen des Wärmeträger-Mediums bis zu 74 °C der Heizdampf im Kondensator nicht mehr vollständig auskondensieren würde. Um diese Randbedingung einzuhalten, kann der Dampfmassenstrom nicht weiter erhöht werden. Dementsprechend kann das Kondensator-Modul bei einigen Produktionschargen zu Beginn der Produktion das Wärmeübertragermedium nicht auf die geforderten 90 °C aufheizen. Es konnte gezeigt werden, dass durch Anpassung der Batch-Zeit und der Produktionsplanung das Kondensator-Modul dennoch eingesetzt werden kann.

3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Ziel des ENPRO Teilprojektes „Modularisierung“ war die Entwicklung eines Planungsansatzes, mit dem ein Spagat zwischen energetischer Optimierung und zeitlichem Aufwand in der Anlagenplanung gelingt. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden Arbeiten auf vier Gebieten (vgl. Abbildung 1) durchgeführt. Im Folgenden sind die Ergebnisse entsprechend der Arbeitspakete zusammengefasst.

Moduldefinition

Basierend auf einer einheitlichen und konsistenten Moduldefinition wurde ein genereller Ansatz für die modulbasierte Anlagenplanung entwickelt. Der Ansatz ist in allen Phasen der Anlagenplanung anwendbar. Eine Basis für die modulbasierte Anlagenplanung bilden Moduldatenbanken, weshalb innerhalb des Teilprojektes „Modularisierung“ eine Methodik zum Aufbau von Moduldatenbanken erarbeitet wurde.

Standardisierung

Die Standardisierung von Komponenten zur Verwendung als Module wurde anhand von unterschiedlichen Pumpen demonstriert. Hierfür wurde ein einheitliches Anschlussmaß sowie zu erfüllende Betriebsparameter festgelegt und unterschiedliche Pumpentypen in Zusammenarbeit mit deren Herstellern entsprechend modifiziert. Um diese in realen Systemen austauschbar gestalten zu können wurde außerdem ein Inline-Pulsationsdämpfer entwickelt und für verschiedene Pumpen angepasst (und teilweise integriert), sodass alle Pumpen vergleichbar niedrige Druckpulsationen verursachen. Durch den Austausch von Kreiselpumpen in bestehenden Systemen zu den modifizierten Verdrängerpumpen können Energieeinsparungen von 75 bis zu 90 % erwartet werden. Zudem wurde demonstriert wie ein einheitliches Monitoring-System auf Basis von Drehmomentmessungen an der Pumpenwelle umgesetzt werden kann.

Modulbasiertes Engineeringtool

Ein Auswahl- und Konfigurations-Tool ist eine essentielle Komponente des modulbasierten Engineeringtools. Durch den Abgleich von Anforderungen aus der Prozessaufgabe und den entsprechenden Moduldatenbanken kann die geeignetste und effizienteste Lösung für alle Planungsaufgaben ausgewählt werden. Für die häufig mehrkriterielle Auswahl eines Moduls wurde in Kooperation mit der TU München ein Prototyp eines mehrkriteriellen Auswahltools basierend auf dem Generic Constraint-based Konfigurator (GECKO) entwickelt und implementiert. In diesem Zusammenhang wurden unterschiedliche multikriterielle Entscheidungsanalyse-Methoden miteinander

verglichen. Die ausgewählten Module müssen anschließend konfiguriert werden, um die benötigten Planungsunterlagen, wie zum Beispiel das *Modulares R&I-Fließschema*, zu erstellen. Hierzu wurde innerhalb des ENPRO Teilprojektes ein Vorgehen basierend auf Allens Intervallalgebra und der topologischen Sortierung entwickelt. Dadurch ist eine dynamische Erstellung von *Modularen R&I-Fließschemata* möglich. Ein Prototyp wurde in der Planungssoftware COMOS der Siemens AG entwickelt, von dem Ansätze in die kommerzielle Version integriert werden können.

Energieeffizienzbewertungstool

Die Auswahl von Modulen soll unter Berücksichtigung der Energieeffizienz als Bewertungskriterium erfolgen. Deshalb wurden die Module im Teilprojekt "Modularisierung" über die Lebenszykluskosten hinsichtlich ihrer Energieeffizienz bewertet. Durch Berücksichtigung von Unsicherheiten ist eine Bewertung schon in frühen Phasen der Anlagenplanung möglich. Die neuen Methoden erlauben die Einsatzbereiche von Pumpentypen bei minimalen Lebenszykluskosten zu quantifizieren. Außerdem wurde gezeigt, dass Energieeinsparpotentiale über Energieintegration auch bei der Verwendung von Equipment-Modulen ausgeschöpft werden können. Darüber hinaus wurde die Verwendung von Equipment-Modulen in kontinuierlichen als auch in absatzweise betriebenen Prozessen untersucht. Für Beispielprozesse konnte gezeigt werden, dass keinerlei technologische Hürden bestehen.

Das Potential der modulbasierten Anlagenplanung wurde durch detaillierte Analyse abgeschlossener Projekte der Projektpartner Evonik und plantIng bestätigt. Dabei wurden Möglichkeiten aufgezeigt mit den entwickelten Werkzeugen und Moduldatenbanken sowie einer entsprechenden Adaption des Projektmanagements die Verkürzung der Projektdurchlaufzeit zu erreichen. Auf Basis der erhaltenen Projektergebnisse erscheint eine Reduktion um 8 % möglich.

4 Umsetzung und Nutzen in Industrie und Lehre

Die Ergebnisse aus dem Teilprojekt „Modularisierung“ werden sowohl in die industrielle Praxis, Hochschullehre sowie in weiteren Forschungsprojekten einfließen.

Der Pulsationsdämpfer wurde umfangreich getestet und für spezielle Anwendungen angepasst. Unter der Bezeichnung „Selbstadaptiver Pulsationsdämpfer“ (PCT/EP2017/071180) wurde das Konzept patentrechtlich geschützt. Der Inline-Pulsationsdämpfer wird voraussichtlich in 2018 in mindestens eine Pumpe eingebaut. Die standardisierten Anschlussmaße wurden von Netzsch, LEWA und auch von Leistriz (nicht im Projekt) umgesetzt. Leistriz bietet schon solche Pumpen an, Netzsch hat einen Prototyp gebaut und wird diesen in Serie nehmen und voraussichtlich in 2018 eine Variante für die Kreiskolbenpumpen entwickeln. Das Monitoring über die Antriebswelle muss erst noch auf die einzelnen Pumpen zugeschnitten werden, wird aber über den derzeit ersten Versuch eine Pumpe intelligent zu machen etabliert werden. Beide Themen, sowie das Thema gleicher Flanschanschluss zur Steigerung der Energieeffizienz in Anlagen und der besseren Planbarkeit, sind bereits in die Lehre eingeflossen.

Um die entwickelten Konzepte zur modulbasierten Anlagenplanung in den industriellen Planungsprozess zu integrieren und die aufgezeigten Vorteile nutzen zu können, bedarf es der Implementierung in konventionelle Planungssoftware. In diesem Zusammenhang plant Siemens zeitnah das Tool zur automatischen Konfiguration *Modularer R&I-Flieβschemata* in ihre CAD Software COMOS integrieren. Durch Verfügbarkeit dieser Werkzeuge in bestehender Planungssoftware kann ein wichtiger Schritt zum Transfer der modulbasierten Anlagenplanung in die industrielle Praxis erreicht werden. Letztendlich ist es das Ziel die modulbasierte Anlagenplanung in reale Planungsprozesse zu integrieren, um das Potential auch über die Revision abgeschlossener Projekte hinaus zu bewerten.

Um die Änderungen im Planungsprozess insbesondere im Hinblick auf Energieeffizienz und Prozessbeschleunigung in die nächste Generation von Ingenieuren zu tragen, wurde an der TU Dortmund der Lehrinhalt zur Grundlagenvorlesung „Anlagen- und Prozesstechnik“ sowie zu den vertiefenden Veranstaltungen „Computer Aided Plant Design“ und „Modulbasierte Anlagenplanung“ ergänzt. Darüber hinaus haben zur Erreichung der Ziele des Teilprojektes ENPRO Modularisierung 19 Bachelor- und Masterarbeiten beigetragen. Auch in diesem Rahmen haben sich Studierende intensiv mit dem Thema auseinander gesetzt.

5 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Alle Positionen sind detailliert in den entsprechenden zahlenmäßigen Nachweisen der einzelnen Projektpartner dargestellt. Die wichtigsten Positionen sind hierbei Personalmittel sowie Reisemittel für Projekttreffen (vgl. Abschnitt 8) oder Fachkonferenzen (vgl. Abschnitt 7.2 und 7.3). Außerdem wurden Verbrauchsmittel vor allem für den Pumpenprüfstand und Pumpen-Prototypen benötigt.

6 Fortschritte auf dem Gebiet bei anderen Stellen

Im Dezember 2016 verkündete das U.S. Department of Energy die Gründung des Rapid Advancement in Process Intensification Deployment (RAPID) Institutes als Teil des 10th Manufacturing USA Institutes (www.aiche.org/rapid). Ziel von RAPID ist die Entwicklung von neuen Technologien um die Energieproduktivität und Energieeffizienz in 5 Jahren um 20% zu steigern. Hierzu sollen modulare chemische Prozessintensivierungs-Konzepte wirksam eingesetzt werden. Diese amerikanische Initiative zeigt, dass Deutschland eine Vorreiterrolle auf dem Gebiet der energieeffizienten chemischen Produktion einnimmt und andere Nationen den Entwicklungen folgen.

7 Veröffentlichungen

7.1 Wissenschaftliche Veröffentlichungen

- L. Hohmann, K. Kössl, N. Kockmann, G. Schembecker, C. Bramsiepe, Modules in process industry – A life cycle definition, Chem. Eng. Process.: Process Intensif. 111 (2017) 115–126.
- A.F. Kögler, D. Haselmann, N.S.A. Alt, E. Schlücker, Experimental Characterization of a Flow-through Pulsation Damper Regarding Pressure Pulsations and Vibrations, Chem. Eng. Technol. 40 (2017) 162–169.
- M. Eilermann, C. Post, D. Schwarz, S. Leufke, G. Schembecker, C. Bramsiepe, Generation of an equipment module database for heat exchangers by cluster analysis of industrial applications, Chem. Eng. Sci. 167 (2017) 278–287.
- M. Eilermann, C. Post, H. Radatz, G. Schembecker, C. Bramsiepe, A general approach to module-based plant design: (submitted for publication).
- M. Eilermann, A. Tebbe, D. Schwarz, S. Leufke, C. Bramsiepe, G. Schembecker, Approach for the characterization of industrial process tasks as basis for the generation and application of an equipment module database: (submitted for publication).

7.2 Vorträge auf Konferenzen

- M. Eilermann, C. Post, D. Schwarz, S. Leufke, G. Schembecker, C. Bramsiepe
Methode zur Erstellung einer detaillierten Moduldatenbank
Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgemeinschaft "Prozess-, Apparate- und Anlagentechnik" (PAAT), Bruchsal, DE (2015)
- L. Hohmann, K. Kössl, M. Ostermann, T. Westhuis, S. Petrusch, C. Bramsiepe, G. Schembecker, N. Kockmann
Process development on lab-scale for a continuous crystallization process with a modular miniplant
Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgemeinschaft "Prozess-, Apparate- und Anlagentechnik" (PAAT), Bruchsal, DE (2015)

- K. Kössl, L. Hohmann, P. Sander, M. Schrimpf, N. Kockmann, G. Schembecker, C. Bramsiepe
Mehrkriterielle Methode für die Entwicklung modularer R&I Fließbilder
 Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgemeinschaft "Prozess-, Apparate- und Anlagentechnik" (PAAT), Bruchsal, DE (2015)
- M. Eilermann, T. Gottschalk, G. Schembecker, C. Bramsiepe
Einsatz von modularem Equipment in Wärmeübertragernetzwerken
 ProcessNet-Jahrestagung, Aachen, DE (2016)
- D. Steger, N. Alt, E. Schlücker
Modulare Pumpensysteme
 Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgemeinschaft "Prozess-, Apparate- und Anlagentechnik" (PAAT), Karlsruhe, DE (2016)
- C. Post, V. Ho, S. Leufke, D. Schwarz, G. Schembecker, C. Bramsiepe
Lebenszykluskosten zur Bewertung von modularem Equipment
 Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgemeinschaft "Prozess-, Apparate- und Anlagentechnik" (PAAT), Karlsruhe, DE (2016)
- M. Eilermann, A. Tebbe, C. Schach, G. Schembecker, C. Bramsiepe
Charakterisierung industrieller Anwendungen als Grundlage einer Equipment Datenbank für die modulbasierte Anlagenplanung
 Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgemeinschaft "Prozess-, Apparate- und Anlagentechnik" (PAAT), Karlsruhe, DE (2016)
- M. Eilermann, C. Post, A. Tebbe, S. Leufke, D. Schwarz, G. Schembecker, C. Bramsiepe
Generation of an Equipment Module Database based on cluster analysis of industrial applications
 10th World Congress of Chemical Engineering (WCCE), Barcelona, E (2017)
- N. Kockmann, L. Hohmann, M. Eilermann, C. Post, H. Radatz, G. Schembecker, C. Bramsiepe
Module-based plant design and equipment for small scale production in process industries
 10th World Congress of Chemical Engineering (WCCE), Barcelona, E (2017)
- M. Eilermann, C. Post, H. Radatz, C. Bramsiepe, G. Schembecker
Modulbasierte Anlagenplanung – 8 Jahre nach Tutzing
 Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgemeinschaft "Prozess-, Apparate- und Anlagentechnik" (PAAT), Würzburg, DE (2017)
- M. Eilermann, N. Buitkamp, P. Sander, G. Schembecker
Aufbau einer Equipment-Moduldatenbank unter Berücksichtigung von Equipment-Modul Verschaltungen
 Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgemeinschaft "Prozess-, Apparate- und Anlagentechnik" (PAAT), Würzburg, DE (2017)

- R. Essam, G. Schembecker, M. Rottmann, M. Elo, F. Schuhmacher
Dynamic Arrangement of Piping and Instrumentation Diagrams (P&IDs) based on Generic Rules
Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgemeinschaft "Prozess-, Apparate- und Anlagentechnik" (PAAT), Würzburg, DE (2017)
- C. Post, T. Frede, G. Schembecker
Einfach und schnell vom Verfahrensfließbild zur Vorauswahl eines Equipment-Moduls
Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgemeinschaft "Prozess-, Apparate- und Anlagentechnik" (PAAT), Würzburg, DE (2017)
- E. Schlücker
Flexible Pumpenmodule
Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgemeinschaft "Prozess-, Apparate- und Anlagentechnik" (PAAT), Würzburg, DE (2017)
- D. Haspel, E. Schlücker
Flexible Pumpenmodule für die wirtschaftlichere Anlagenplanung
Pumpen-Forum 2017 (Vogel Business Media), Würzburg, DE (2017)

7.3 Posterbeiträge auf Konferenzen

- M. Eilermann, C. Post, T. Gottschalk, D. Schwarz, S. Leufke, G. Schembecker, C. Bramsiepe
A Methodology to Generate Modular Equipment for an Equipment Database in Module-Based Plant Design
AIChE Annual Meeting, San Francisco, USA (2016)

7.4 Sonstige

In der Sonderausgabe „Energieeffizienz im Prozess“ der Fachzeitschrift cav, die im November 2015 erschien, hat die plantIng GmbH einen Artikel mit dem Titel „Modulares Equipment für mehr Effizienz“ veröffentlicht.

8 Übersicht über die Treffen der Projektpartner

- 02.10.2014 Kickoff-Meeting des ENPRO Projektverbunds beim Projektträger in Jülich
- 10.11.2014 Kickoff-Meeting des Teilprojekts „Modularisierung“ AP2 „Standardisierung“ an der Universität Erlangen
- 17.12.2014 Kickoff-Meeting des Teilprojekts „Modularisierung“ an der TU Dortmund
- 29.01.2015 Meeting zwischen Netzsch und FAU Erlangen in Waldkraiburg
- 13.02.2015 Meeting zwischen qonqave und FAU Erlangen in Stuttgart
- 17.02.2015 Meeting zwischen DBIC und FAU Erlangen in Königstein/Taunus
- 25.02.2015 Erstes Meeting zwischen PlantIng und der TU Dortmund in Köln
- 04.03.2015 Erstes Meeting zwischen Siemens, Evonik und der TU Dortmund in Marl
- 18.03.2015 Telefonkonferenz zwischen Netzsch und FAU Erlangen
- 22.04.2015 Meeting zwischen PlantIng und der TU Dortmund in Gelsenkirchen
- 05.05.2015 Meeting zwischen Siemens und der TU Dortmund in Bonn
- 22.06.2015 Projekttreffen ‚Modularisierung‘ in Frankfurt am Main
- 23.06.2015 Gesamttreffen der ENPRO-Initiative in Frankfurt am Main
- 21.07.2015 Meeting zwischen plantIng GmbH und TU Dortmund in Dortmund
- 22.07.2015 Informationsaustausch im Zuge einer Masterarbeit zwischen Evonik Industries AG und TU Dortmund in Marl
- 06.08.2015 WebEx zwischen Evonik Industries AG und TU Dortmund
- 26.08.2015 Meeting zwischen Evonik Industries AG, Siemens AG und TU Dortmund in Dortmund
- 03.09.2015 WebEx zu Schnittstellen ENPRO Modularisierung/Datenintegration
- 04.09.2015 WebEx zwischen Evonik Industries AG und TU Dortmund
- 22.09.2015 Meeting zwischen FAU Erlangen und TU Dortmund in Erlangen
- 25.09.2015 WebEx zwischen Evonik Industries AG und TU Dortmund

- 28.09.2015 Meeting zwischen RWTH Aachen, AixCAPE e.V. und TU Dortmund in Aachen, um Schnittstellen zu ENPRO-Datenintegration auszuarbeiten
- 30.09.2015 Meeting zwischen Evonik Industries AG, Siemens AG und TU Dortmund in Dortmund
- 02.11.2015 Projekttreffen ‚Modularisierung‘ in Frankfurt am Main
- 07.12.2015 Meeting zwischen Evonik Industries AG, Siemens AG und TU Dortmund in Dortmund
- 08.12.2015 Meeting zwischen qonqave GmbH und Uni Erlangen in Erlangen
- 15.12.2015 Meeting zwischen plantIng GmbH und TU Dortmund in Dortmund
- 12.01.2016 Meeting zur Besprechung von ENPRO Anschlussprojekt (ENPRO 2.0) in Frankfurt
- 20.01.2016 Meeting zwischen plantIng GmbH und TUDO-APT in Köln
- 28.01.2016 Meeting zwischen Evonik, Siemens AG, plantIng GmbH und TUDO-APT in Dortmund
- 09.03.2016 Meeting zwischen ENPRO Modularisierung und ENPRO Datenintegration in Dortmund, um Schnittstellen und weitere Zusammenarbeit zu klären
- 04.04.2016 WebEx zwischen ENPRO Modularisierung und ENPRO Datenintegration, um aktuellen Zwischenstand von ENPRO DI zu klären
- 14.04.2016 Projekttreffen ‚Modularisierung‘ in Erlangen
- 28.04.2016 Besichtigung einer Produktionsanlage in Chemiepark Marl
- 03.05.2016 Meeting zwischen plantIng GmbH und TUDO-APT in Köln, um Bachelorarbeit in Kooperation zu besprechen
- 09.05.2016 Meeting zwischen FAU Erlangen und LEWA in Leonberg
- 12.05.2016 Meeting zwischen FAU Erlangen und DBIC in Erlangen
- 02.06.2016 WebEx zwischen Evonik, Siemens AG, plantIng GmbH und TUDO-APT zur Vorstellung der einheitlichen Moduldefinition
- 03.06.2016 Meeting zwischen plantIng GmbH und TUDO-APT in Dortmund zur Übergabe von Beispielprozessen für die Bachelorarbeit in Kooperation
- 13.06.2016 WebEx zwischen Evonik und TUDO-APT
- 15.06.2016 WebEx zwischen ENPRO Modularisierung und ENPRO Datenintegration zur Übergabe eines Anwendungsbeispiels

- 29.06.2016 Meeting zwischen plantIng GmbH und TUDO-APT in Köln zur Klärung von Fragen im Zuge der gemeinsamen Bachelorarbeit
- 07.07.2016 Jahrestreffen ENPRO
- 02.08.2016 WebEx zwischen plantIng GmbH und TUDO-APT zur Diskussion der Ergebnisse der gemeinsamen Bachelorarbeit
- 25.08.2016 WebEx zwischen Evonik und TUDO-APT
- 02.09.2016 Meeting Evonik, Siemens AG, plantIng GmbH und TUDO-APT in Dortmund
- 27.09.2016 Meeting plantIng GmbH und TUDO-APT in Köln
- 06.10.2016 Meeting Netzsch und iPAT in Waldkraiburg
- 25.10.2016 Meeting ENPRO Modularisierung und ENPRO Datenintegration für Kooperationsarbeiten
- 04.11.2016 Meeting Evonik und TUDO-APT
- 15.11.2016 Meeting Kernteam ENPRO
- 16.11.2016 WebEx zwischen Siemens und ENPRO Datenintegration zur Klärung von Fragen im Zuge der Zusammenarbeit
- 24.11.2016 WebEx zwischen Siemens und ENPRO Datenintegration zur Klärung von aktuellem Zwischenstand
- 15.12.2016 WebEx zwischen Siemens und ENPRO Datenintegration zur Übergabe eines Anwendungsbeispiels
- 22.12.2016 Meeting ENPRO Modularisierung
- 06.01.2017 Meeting zwischen plantIng GmbH und Siemens AG in Köln, um Masterarbeit in Kooperation zu besprechen
- 16.01.2017 WebEx zwischen Siemens und ENPRO Datenintegration zur Übergabe eines Anwendungsbeispiels
- 17.01.2017 WebEx zwischen Siemens und ENPRO Datenintegration zur weiteren Besprechung des Anwendungsbeispiels
- 19.01.2017 Meeting zwischen Evonik und Siemens AG in Marl zur Diskussion der zwischenzeitlichen Ergebnisse der gemeinsamen Masterarbeit
- 23.01.2017 WebEx zwischen Siemens und ENPRO Datenintegration zur Diskussion der ersten Ergebnisse
- 24.01.2017 Meeting Siemens und ENPRO Datenintegration zur Möglichkeit der Zusammenarbeit in ENPRO 2.0
- 25.01.2017 Meeting Inosim und TUDO-APT in Dortmund
- 30.01.2017 WebEx zwischen Siemens und ENPRO Datenintegration zur Diskussion der Ergebnisse und zum weiteren Vorgehen

- 02.02.2017 WebEx zwischen Evonik und TUDO-APT zur Zusammenarbeit mit ENPRO Datenintegration
- 07.02.2017 Meeting zwischen plantIng GmbH und Siemens AG in Köln zur Klärung von Fragen im Zuge der gemeinsamen Masterarbeit
- 10.02.2017 WebEx zwischen Evonik und TUDO-APT
- 15.02.2017 WebEx zwischen Siemens und ENPRO Datenintegration zur Diskussion der Ergebnisse
- 21.02.2017 WebEx plantIng und TUDO-APT für Diskussion der Veröffentlichung zum modulbasierten Planungsansatz
- 27.03.2017 Meeting zwischen Evonik und Siemens AG in Marl zur Diskussion der Ergebnisse der gemeinsamen Masterarbeit
- 28.03.2017 Meeting zwischen plantIng GmbH und Siemens AG in Köln zur Diskussion der Ergebnisse der gemeinsamen Masterarbeit
- 31.03.2017 Meeting ENPRO Modularisierung und ENPRO Datenintegration in Leverkusen für Kooperationsarbeiten
- 04.05.2017 Meeting Evonik und TUDO-APT in Marl für Diskussion der Veröffentlichung zum modulbasierten Planungsansatz
- 19.05.2017 WebEx zwischen ENPRO Modularisierung und ENPRO Datenintegration für Kooperationsarbeiten
- 29.05.2017 WebEx zwischen Siemens und ENPRO Datenintegration zur Diskussion der Ergebnisse
- 12.07.2017 Meeting ENPRO Modularisierung und ENPRO Datenintegration in Marl
- 26.07.2017 WebEx zwischen Inosim und TUDO-APT
- 26.07.2017 Meeting zwische Netzsch und FAU Erlangen in Erlangen
- 24.08.2017 WebEx zwischen Siemens und ENPRO Datenintegration für Kooperationsarbeiten
- 27.09.2017 Jahrestreffen ENPRO in Frankfurt
- 29.09.2017 WebEx zwischen Siemens AG und ENPRO Datenintegration
- 13.10.2017 WebEx zwischen Siemens AG und ENPRO Datenintegration
- 10.11.2017 WebEx zwischen Siemens AG und ENPRO Datenintegration
- 24.11.2017 WebEx zwischen Siemens AG und ENPRO Datenintegration
- 08.12.2017 Meeting zwischen plantIng GmbH und Siemens AG in Köln, um Masterarbeit in Kooperation zu besprechen
- 08.11.2017 Meeting zwischen Netzsch und FAU Erlangen in Erlangen

- 15.12.2017 Meeting Inosim und TUDO-APT in Dortmund

- 19.12.2017 Meeting zwischen plantIng GmbH und Siemens AG in Köln zur Diskussion der Ergebnisse der gemeinsamen Masterarbeit
- 20.12.2017 Abschlusstreffen des ENPRO Teilprojektes „Modularisierung“ in Marl

9 Literatur

- [1] A. Azapagic, A. Millington, A. Collett, A Methodology for Integrating Sustainability Considerations into Process Design, Chem. Eng. Res. Des. 84 439–452.
- [2] Prozesstechnik Online, Pumpen und Kompressoren: Im Zeichen der Energie-Intelligenz, available at <https://prozesstechnik.industrie.de/chemie/im-zeichen-der-energie-intelligenz/> (accessed on December 8, 2017).
- [3] L. Hohmann, K. Kössl, N. Kockmann, G. Schembecker, C. Bramsiepe, Modules in process industry – A life cycle definition, Chem. Eng. Process.: Process Intensif. 111 (2017) 115–126.
- [4] M. Eilermann, C. Post, H. Radatz, G. Schembecker, C. Bramsiepe, A general approach to module-based plant design: (submitted for publication).
- [5] ISO 10628-1:2014, Diagrams for the chemical and petrochemical industry - Part 1: Specification of diagrams.
- [6] H. Uzuner, Ein wissensbasiertes System zur Unterstützung von Retl-Fließbild Designprozessen auf der Grundlage eines modulbasierten Ansatzes, 1st ed., Dr. Hut, München, 2013.
- [7] DIN EN 378-1, Kälteanlagen und Wärmepumpen – Sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen.
- [8] M. Eilermann, C. Post, D. Schwarz, S. Leufke, G. Schembecker, C. Bramsiepe, Generation of an equipment module database for heat exchangers by cluster analysis of industrial applications, Chem. Eng. Sci. 167 (2017) 278–287.
- [9] I.M. Sobol', A Primer for the Monte Carlo Method, CRC Press, Boca Raton, 1994.
- [10] G.P. Towler, R.K. Sinnott, Chemical Engineering Design: Principles, Practice, and Economics of Plant and Process Design, 2nd ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, 2013.
- [11] VDI e. V., VDI Heat Atlas, 2nd ed., Springer, Berlin, 2010.
- [12] Tubular Exchanger Manufacturers Association (TEMA), Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association, 9th ed., Tubular Exchanger Manufacturers Association, New York, 2007.
- [13] M. Eilermann, A. Tebbe, D. Schwarz, S. Leufke, C. Bramsiepe, G. Schembecker, Approach for the characterization of industrial process tasks as basis for the generation and application of an equipment module database: (submitted for publication).
- [14] A.T. Murray, Maximal Coverage Location Problem, Int. Reg. Sci. Rev. 39 (2016) 5–27.
- [15] R. Church, C.R. Velle, The maximal covering location problem, Pap. Reg. Sci. 32 (1974) 101–118.

- [16] T. Grossman, A. Wool, Computational experience with approximation algorithms for the set covering problem, *Eur J Oper Res* 101 (1997) 81–92.
- [17] R. Kern, Arrangements of process and storage vessels, *Chem. Eng.* 84 (1977) 93–99.
- [18] R. Kern, How to find the optimum layout for heat exchangers, *Chem. Eng.* 84 (1977) 169–177.
- [19] R. Kern, How to get the best process-plant layouts for pumps and compressors, *Chem. Eng.* 84 (1977) 131–140.
- [20] R. Kern, Layout arrangements for distillation columns, *Chem. Eng.* 84 (1977) 153–160.
- [21] R. Kern, Specifications are the key to successful plant design, *Chem. Eng.* 84 (1977) 123–129.
- [22] P. Smith, R. Botermans, *Advanced Piping Design*, Gulf Publishing Company, Burlington, 2013.
- [23] S. Greco, M. Ehrgott, J. RuiFigueira, *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, Springer, New York, 2016.
- [24] A. Ishizaka, P. Nemery, *Multi-criteria decision analysis: Methods and software*, Wiley, Chichester West Sussex United Kingdom, 2013.
- [25] J.F. Allen, Maintaining knowledge about temporal intervals.
- [26] E.F. Codd, A Relational Model of Data for Large Shared Data Banks, *M.D. Computing* 15 (1998) 162–166.
- [27] ISO 10628-2:2012, *Diagrams for the chemical and petrochemical industry - Part 2: Graphical symbols*.
- [28] G. Leuschner, *Kleines Pumpenhandbuch für Chemie und Technik*, Verlag Chemie GmbH, Weinheim, 1967.
- [29] KSB Aktiengesellschaft, *Chemienormpumpe MegaCPK Betriebs-/Montageanleitung* (accessed on 13.December.2017).
- [30] *Pump life cycle costs: A guide to LCC analysis for pumping systems executive summary*, Office of Industrial Technologies, Energy Efficiency and Renewable Energy, U.S. Dept. of Energy, [Washington, DC], 2001, available at <http://purl.access.gpo.gov/GPO/LPS14321>.
- [31] Netzsch Pumpen & Systeme GmbH, *NETZSCH-Kennlinien Exzenterschneckenpumpe und Drehkolbenpumpen* (accessed on 13.December.2017).
- [32] Verder Deutschland GmbH & Co. Kg., *Prospekt Verderlobe Drehkolbenpumpen* (accessed on 13.December.2017).
- [33] B. Nesbitt, *Handbook of pumps and pumping*, 1st ed., Elsevier in association with Roles & Associates Ltd, Oxford, Burlington, MA, 2006.
- [34] S. Kamarianakis, *Ein multikriterielles fuzzy- und risikobasiertes Entscheidungsmodell für die Planung unterirdischer Infrastruktur*, 2013.
- [35] Tuma Pumpensysteme GmbH, *Tumapumpen*, available at <http://www.tumapumpen.at/> (accessed on 18.December.2017).
- [36] R.W. Saaty, The analytic hierarchy process—what it is and how it is used, *Mathematical Modelling* 9 (1987) 161–176.

- [37] I. Karayalcin, The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation Thomas L. SAATY McGraw-Hill, New York, 1980, xiii + 287 pages, £15.65, European Journal of Operational Research 9 (1982) 97–98.
- [38] L.G. Vargas, T.L. Saaty, Decision making with the analytic network process: Economic, political, social and technological applications with benefits, opportunities, costs and risk, Springer, New York, NY, 2006.
- [39] R.L. Keeney, H. Raiffa, Decisions with multiple objectives: Preferences and value tradeoffs, Wiley, New York [u.a.], 1976.
- [40] J.R. QUINLAN, Simplifying decision trees, International Journal of Human - Computer Studies 51 (1999) 497–510.
- [41] J.W. Lee, S.H. Kim, Using analytic network process and goal programming for interdependent information system project selection, Computers & Operations Research 27 (2000) 367–382.
- [42] R.E. Hodgett, Comparison of multi-criteria decision-making methods for equipment selection, Int J Adv Manuf Technol 85 (2016) 1145–1157.
- [43] P.S. Florian Grigoleit, Configuration as Diagnosis: Generating Configurations with Conflict-Directed A*: An Application to Training Plan Generation, in: Knowledge-Based Configuration, Elsevier, 2014, i.
- [44] R.L. NAYLOR, 2005.
- [45] KSB Aktiengesellschaft, Characteristic Curves Booklet 60Hz MegaCPK (accessed on 18.December.2017).
- [46] H. Uzuner, G. Schembecker, Wissensbasierte Erstellung von R&I-Fließbildern, Chemie Ingenieur Technik 84 (2012) 747–761.
- [47] A. B. Kahn, Topological sorting of large networks, Commun. ACM 5 (1962).
- [48] R. Liu, A Low Complexity Topological Sorting Algorithm for Directed Acyclic Graph, IJMLC 4 (2014) 194–197.
- [49] T. Drakengren, P. Jonsson, A complete classification of tractability in Allen's algebra relative to subsets of basic relations, Artificial Intelligence 106 (1998) 205–219.
- [50] Ł. Hady, G. Wozny, Computer-aided web-based application to modular plant design, Comput. Aided Chem. Eng. 28 (2010) 685–690.
- [51] J. Madden, C. Pulford, N. Shadbolt, Plant Layout - Untouched by Human Hand?, The Chemical Engineer 474 (1990) 32–36.
- [52] J. Cagan, K. Shimada, S. Yin, A survey of computational approaches to three-dimensional layout problems, Computer-Aided Design 34 (2002) 597–611.
- [53] A. Burdorf, B. Kampczyk, M. Lederhose, H. Schmidt-Traub, CAPD - Computer-aided plant design, Comput. Chem. Eng. 28 (2004) 73–81.
- [54] G. Xu, L.G. Papageorgiou, Process plant layout using an improvement-type algorithm, Chem. Eng. Res. Des. 87 (2009) 780–788.
- [55] T.K. Poddar, G.T. Polley, Heat Exchanger Design Through Parameter Plotting, Chem. Eng. Res. Des. 74 (1996) 849–852.

- [56] DIN EN ISO 2858:2011-12, Kreiselpumpen mit axialem Eintritt (PN 16) - Bezeichnung, Nennleistung und Abmessungen.
- [57] L. Frenning, Pumpen Lebens-Zyklus-Kosten: Ein Leitfaden zur LCC-Analyse von Pumpensystemen, 1st ed., VDMA-Verl.***92122, Frankfurt [Main], 2003.
- [58] C.A. Holloway, Decision making under uncertainty: Models and choices, Hwa-Tai Book, Taipei, 1979, [1984].
- [59] F.T. Mizutani, F.L.P. Pessoa, E.M. Queiroz, S. Hauan, I.E. Grossmann, Mathematical Programming Model for Heat-Exchanger Network Synthesis Including Detailed Heat-Exchanger Designs. 2. Network Synthesis, Ind. Eng. Chem. Res. 42 (2003) 4019–4027.
- [60] R.K. Sinnott, Chemical engineering design, 4th ed., Elsevier/Butterworth-Heinemann, Amsterdam, 2005.

10 Schutzrechtsanmeldungen

Selbstadaptiver Pulsationsdämpfer, PCT/EP2017/07180

Dortmund, 21.02.2018

Prof. Dr.-Ing. G. Schembecker