

Hochschule Anhalt



University of Applied Sciences

Fachbereich Angewandte
Biowissenschaften
und Prozesstechnik

„Ausarbeitung eines EDV-basierten Modells zur Auslegung einer Trockneranlage“

Bachelorarbeit

von: Mirko Ertel
geboren am 12. August 1969
Studiengang: Verfahrens- und Umwelttechnik
Studienrichtung: Verfahrenstechnik

Gutachter: Prof. Dr. Henry Bergmann
Solomon Jembere

Köthen, 05. Oktober 2014

Inhaltsverzeichnis

| Kapitel | Seite | |
|----------------|---|----|
| 0.1 | Begriffskonventionen | 05 |
| 0.2 | Abkürzungsverzeichnis | 07 |
| 0.3 | Formelzeichen | 08 |
| 0.4 | Allgemeingültige Parameter und Konstanten | 12 |
| 1 | Einleitung | 14 |
| 2 | Zielstellung | 15 |
| 2.1 | Präzisierung der Zielstellung | 16 |
| 2.2 | Design und Systemgrenzen | 16 |
| 2.3 | MS Excel | 17 |
| 3 | Berechnungsroutinen | 18 |
| 3.1 | Das Anlagenkonzept | 18 |
| 3.2 | Massenbilanz | 19 |
| 3.2.1 | Massenbilanz bezüglich der Produktströme | 19 |
| 3.2.2 | Massenbilanz bezüglich der Substanzströme | 20 |
| 3.3 | Energiebilanz | 21 |
| 3.4 | Wärmeübertrager W 001 | 23 |
| 3.4.1 | Die Leistung des Wärmeübertragers | 25 |
| 3.4.2 | Schätzung der Druckdifferenz des W 001 | 26 |
| 3.4.3 | Staupunktermittlung | 28 |
| 3.5 | Kolonne K 001 | 29 |
| 3.5.1 | Stutzen | 29 |
| 3.5.2 | Der Verteiler | 34 |
| 3.5.2.1 | Druckverlust der Modellblende (Zylinderspalt) | 36 |
| 3.5.2.2 | Druckverlust der 90°-Umlenkung | 38 |
| 3.5.2.3 | Ermittlung der Spalthöhe für den auszulegenden Fall | 40 |
| 3.5.3 | Der Kopf der Kolonne K 001 | 42 |
| 3.5.3.1 | Strömungsgeschwindigkeit der Brüden im oberen Teil der K 001 | 42 |
| 3.5.3.2 | Anströmgeschwindigkeit des Tröpfchenabscheiders | 43 |
| 3.5.3.3 | Die Höhe des oberen Kolonnenteils | 45 |
| 3.5.4 | Sumpf der Kolonne K 001 | 45 |
| 3.5.4.1 | Die Pufferzeit (hold up time) | 46 |
| 3.5.4.2 | Reduzierung des Querschnittes zwischen oberem und unterem Kolonnenteil | 48 |
| 3.6 | Kreislauffahrweise | 48 |

| | | |
|---------|---|----|
| 3.6.1 | Qualitative Ermittlung der Notwendigkeit einer permanenten Kreislauffahrweise | 49 |
| 3.7 | Anlagenkennlinien | 50 |
| 3.7.1 | Anlagenkennlinie für die P 001 | 56 |
| 3.7.2 | Anlagenkennlinie für die P 002 | 56 |
| 3.8 | Pumpen | 57 |
| 3.8.1 | Die Förderhöhe | 57 |
| 3.8.2 | Die Motorleistung | 58 |
| 3.8.3 | Reserveleistung der Pumpenmotoren | 58 |
| 3.8.4 | Der Energieeintrag der Pumpen | 59 |
| 3.8.5 | Der NPSH | 60 |
| 3.8.6 | Die maximale Förderleistung und der maximale Förderdruck | 61 |
| 3.8.7 | Die Pumpe P 001 | 61 |
| 3.8.8 | Die Pumpe P 002 | 61 |
| 3.8.8.1 | Der NPSH der P 002 | 62 |
| 3.9 | Das Rohrleitungssystem | 63 |
| 3.9.1 | Dimensionierung der Rohrleitungen | 63 |
| 3.9.2 | Druckverlust durch Armaturen | 64 |
| 3.9.2.1 | Regelarmaturen | 66 |
| 3.9.3 | Druckverlust durch Messgeräte | 66 |
| 3.10 | Wärmeverluste | 67 |
| 4 | Systembeschreibung | 68 |
| 4.1 | konstruktive Anlagenbeschreibung | 68 |
| 4.1.1 | Zubringereinheit | 68 |
| 4.1.2 | Vorwärmung | 69 |
| 4.1.3 | Trocknung | 70 |
| 4.1.4 | Produktabgabe | 71 |
| 4.1.5 | Kreislaufleitung | 71 |
| 4.2 | funktionale Anlagenbeschreibung | 72 |
| 5 | Beschreibung der Software | 74 |
| 5.1 | Eingabemaske | 75 |
| 5.2 | Fehlermaske | 76 |
| 5.3 | Konstanten und Vorgabeparameter | 78 |
| 5.4 | Kalkulation | 79 |
| 5.5 | Simulation | 81 |
| 5.6 | Spezifikationen | 81 |
| 6 | Parameterstudien | 83 |

| | | |
|-------|-------------------------------|-----|
| 6.1 | Eingabedaten zu den Versuchen | 84 |
| 6.1.1 | Beispiel a | 84 |
| 6.1.2 | Beispiel b | 90 |
| 6.2 | Simulationen | 97 |
| 6.3 | Spezifikationen | 98 |
| 7 | Fazit & Erkenntnisse | 99 |
| 8 | Zusammenfassung | 100 |
| 9 | Quellen und Literaturverweise | 103 |
| | Eidesstattliche Erklärung | 104 |

Anlagen

| | | |
|-----------|---|---------|
| Anlage A: | Blockschaltbild der Anlage | A2 |
| Anlage B: | R&I-Fließbild der Anlage | A3 |
| Anlage C: | Listen der Leitungen, Apparate, Messstellen und Armaturen | A4 ff. |
| Anlage D: | Zeichnung der K 001 mit Stutzentabelle | A8 |
| Anlage E: | Zeichnung des Hutverteilers | A9 |
| Anlage F: | Simulation für Beispiel a und b | A10 ff. |
| Anlage G: | Spezifikationen für Beispiel a und b | A12 ff. |

Dateianlagen

- Gesamte Arbeit mit Anlagen als pdf-Dateien
- Projektarbeit mit Anlagen als pdf-Dateien
- Kalkulationen für Beispiel a und b als xls-Dateien

0.1 Begriffskonventionen

Trockneranlage

Der Begriff „Trockneranlage“ soll in der folgenden Arbeit synonym mit dem Begriff „Verdampferanlage“ verwendet werden. Hintergrund ist das bei beiden Verfahren gleiche physikalische Prinzip der thermischen Separation eines dispersen Systems zweier Flüssigkeiten, deren Komponenten deutlich unterschiedliche Siedepunkte besitzen.

Trocknung

Unter dem Begriff Trocknung soll im Folgenden die Entfernung einer leicht siedenden Komponente aus einem dispersen System zweier Flüssigkeiten und nicht aus einem Feststoff-Flüssigkeits-Gemisch verstanden werden. Begriff soll hier jedoch etwas spezifischer als Verdampfung einer leicht siedenden Komponente verstanden werden, die nur in einem geringen Anteil im Einsatzprodukt vorhanden ist.

Neben den anschaulichen, jedoch zumeist etwas umständlichen Bezeichnungen sollen die folgenden Begriffe synonym verwendet werden:

Feed

Das Einsatzprodukt ist ein molekulardisperses System zweier Komponenten.

Leichtsieder oder leicht siedende Komponente

Die leicht siedende Komponente ist einer der Substanzen des Einsatzproduktes. Sie hat den geringeren Siedepunkt und wird als reiner Stoff betrachtet.

Linear (engl. single pass)

Das Adjektiv linear, bezogen auf die Fahrweise der Anlage soll als Abgrenzung zur Fahrweise im Kreislauf dienen. Dies bedeutet, dass der Produktstrom nur einmal mit allen durchströmten Apparaten und Apparaturen in Kontakt kommt.

Schwersieder oder schwer siedende Komponente

Die schwer siedende Komponente ist eine der Substanzen des Einsatzproduktes. Ihr Siedepunkt sei so hoch, dass er noch weit oberhalb erreichbaren Maximaltemperatur der Trockneranlage liegt. Auch sie wird als reiner Stoff betrachtet.

Haupt- oder Endprodukt

Das Hauptprodukt der Trocknung ist ein Gemisch von Schwer- und Leichtsiedern mit – verglichen mit dem Einsatzprodukt – deutlich geringerem Anteil an Leichtsiedern.

Brüden oder Nebenprodukt

Das Nebenprodukt besteht zum größten Teil aus dem Leichtsieder und einem geringen Teil an mitgerissenen Schwertsieder.

0.2 Abkürzungsverzeichnis

Folgende Abkürzungen werden im Text und in den Indizes der Formelzeichen verwendet:

| | |
|--------|--|
| a | außen... (beispielsweise für d_a als den Außendurchmesser) |
| abs | absolut |
| aus | Ausgang, aus etw. heraus führendes |
| ein | Eingang, in etw. herein führendes |
| EP | Endprodukt, hier: das getrocknete Hauptprodukt der Anlage |
| Feed | aus dem engl. für Einsatzprodukt |
| i | innen... (beispielsweise für d_i als den Innendurchmesser) |
| LS | Leichtsieder |
| max | maximaler Wert, Maximum |
| min | minimaler Wert, Minimum |
| NPSH | Net Positive Suction Head (Siehe Kap. 0.3 Formelzeichen) |
| PWÜ | Plattenwärmeübertrager |
| rel | relativ |
| Rohrl. | Rohrleitung |
| SS | Schwersieder |
| verl. | Verlust... |
| vorl. | vorläufig |
| WÜ | Wärmeübertrager |

0.3 Formelzeichen

Häufig verwendete Indizes:

| | |
|---------------|--|
| <i>Feed</i> | Einsatzprodukt |
| <i>LS</i> | Leichtsieder, leicht siedende Komponente, Komponente des Zweistoffgemisches mit der geringeren Siedetemperatur |
| <i>SS</i> | Schwersieder, schwer siedende Komponente, Komponente des Zweistoffgemisches mit der höheren Siedetemperatur |
| <i>EP</i> | Endprodukt, Hauptprodukt |
| <i>Brüden</i> | Brüden, Nebenprodukt in Form von Dämpfen |

Sollten zwei der hier genannten Indizes in einem Formelzeichen durch ein Komma getrennt auftreten, ist der zweite Index als Genitiv zu verstehen.

Beispiel: $\omega_{LS,Feed}$ ist der Anteil der Leichtsieder des Einsatzproduktes

Lateinische Formelzeichen

| Formelzeichen | Einheit | Erklärung |
|-----------------------|-----------------|--|
| <i>A</i> | m^2 | Flächeninhalt, Querschnittsfläche |
| <i>Bl</i> | 1 | Blasius-Faktor mit dem Wert 0,3164 |
| <i>C</i> | 1 | Durchflusskoeffizient |
| c_p | $kJ/kg \cdot K$ | spezifische Wärmekapazität |
| c_γ | 1 | Umlenkbeiwert des Winkes γ |
| c_{Re} | 1 | Reynolds-Zahl-Beiwert |
| c_K | 1 | Rauigkeitsbeiwert |
| c_A | 1 | Geometriebeiwert |
| <i>d</i> | <i>m</i> | Durchmesser |
| d_a | <i>m</i> | Außendurchmesser |
| $d_{i[mm]}$ | <i>m</i> | Innendurchmesser (z.B. in Millimetern) |
| <i>f</i> und <i>F</i> | 1 | Faktor, Koeffizient, dimensionsloser Zahlen- oder Korrekturwert |
| <i>g</i> | m/s^2 | Schwerebeschleunigung des irdischen Gravitationsfeldes in Abhängigkeit vom Ort |
| <i>H</i> | <i>m</i> | Förderhöhe allgemein |
| H_{Anlage} | <i>m</i> | Anlagenförderhöhe |
| H_{Pumpe} | <i>m</i> | Förderhöhe einer Pumpe |
| $H_{verl.}$ | <i>m</i> | Verlusthöhe |
| <i>h</i> | <i>m</i> | Höhe allgemein |

| | | |
|-------------------------------------|------------------------|--|
| $h_{\text{überMN}}[m]$ | m | Höhe über Meeressniveau in Metern |
| K_V | m^3/h | Durchflusskoeffizient |
| K_{VS} | m^3/h | Durchflusskoeffizient für 100% Ventilöffnung |
| k_V | mm^2 | Durchflusskoeffizient |
| L | | Länge, horizontale Entfernung |
| l_{Rohr} | m | Rohrlänge |
| M | $kg/kmol$ | molare Masse |
| m | kg | Masse |
| \dot{m} | kg/h | Massenstrom |
| n | $kmol$ | Stoffmenge |
| \dot{n} | $kmol/h$ | Stoffmengenstrom |
| $NPSH$ | m | Net Positive Suction Head, ein der Haltedruckhöhe äquivalenter Pumpenvordruck, der sich von der Haltedruckhöhe vom Messort unterscheidet. Bei Horizontaler Lage der Pumpenachse gilt: $NPSH = \text{Haltedruckhöhe}$ |
| P | kW | Leistung |
| P_{Welle} | kW | Wellenleistung einer Pumpe |
| P_{Motor} | kW | Motornennleistung |
| p | $bar_{abs}; bar_{rel}$ | Druck, Index <i>abs</i> als Absolutdruck, Index <i>rel</i> als Druck relativ zum Luftdruck |
| p_{Luft} | bar_{abs} | Luftdruck als Absolutdruck |
| \dot{Q} | kW | Wärmestrom |
| $\dot{Q}_{\text{verd. Brüden}}$ | kW | der für die Verdampfung der Brüden benötigte Wärmestrom |
| $\dot{Q}_{\Delta T \text{ Brüden}}$ | kW | der Wärmestrom der Brüden, der durch deren Temperaturdifferenz und der des Produktes im Kolonnensumpf entsteht |
| $\dot{Q}_{\Delta T EP}$ | kW | der Wärmestrom des Produktes im Kolonnensumpf (<i>EP</i>), der durch die Temperaturdifferenz zwischen Vorwärm- und Kolonnensumpftemperatur entsteht |
| $\dot{Q}_{\text{vorwärm}}$ | kW | der zur Vorwärmung benötigte Wärmestrom |
| R | $^\circ \text{ (DEG)}$ | Krümmungsradius eines Bogens |
| R_m | | molare Gaskonstante |
| R_S | | spezifische Gaskonstante |
| r | $^\circ \text{ (DEG)}$ | Radius |
| T | K | Temperatur |
| $T_{\text{max, Vorwärm}}$ | K | der maximal zulässige Wert der Vorwärmtemperatur |

| | | |
|----------------|---------|---|
| $T_{Siede,LS}$ | K | Siedetemperatur der Leichtsieder |
| $T_{vorwärm}$ | K | Vorwärmtemperatur |
| V | m^3 | Volumen |
| \dot{V} | m^3/h | Volumenstrom |
| \bar{w} | m/s | mittlere Strömungsgeschwindigkeit von Fluiden |

Griechische Formelzeichen

| | | |
|------------------|------------------|---|
| α | 1 | Durchflusszahl |
| β | 1 | Durchmesserquotient |
| γ | $^{\circ}$ (DEG) | Winkel |
| Δh_v | kJ/kg | spezifische Verdampfungsenthalpie |
| ΔT | K | Temperaturdifferenz |
| ΔT_{ln} | K | mittlere logarithmische Temperaturdifferenz |
| φ_{lat} | $^{\circ}$ (DEG) | Breitengrad (engl. latitude) |
| η | $Pa \cdot s$ | dynamische Viskosität |
| η_{Pumpe} | % | Wirkungsgrad einer Pumpe |
| $\eta_{Antrieb}$ | % | Wirkungsgrad eines Antriebs (z.B. Elektromotor) |
| π | 1 | Kreiszahl, 3,14... |
| ρ | kg/m^3 | Dichte |
| ϑ | $^{\circ}C$ | Temperatur |
| ζ | 1 | Druckverlustbeiwert zeta |
| ω | $Ma\%$ | Massenanteil |

Anmerkungen

Jedes Formelzeichen wird ausschließlich für einen einzigen spezifischen Parameter verwendet. Jedoch ist auf die Groß- und Kleinschreibung zu achten.

Einzige Ausnahme ist das η , welches für die dynamische Viskosität oder den Wirkungsgrad stehen kann. Um Uneindeutigkeiten zu vermeiden, wird auf eine gut unterscheidbare Indizierung speziell dieses Zeichens geachtet.

Die Bezifferung der Gleichungen beginnt mit dem Kapitel, in dem sie erstmalig aufgestellt werden und endet mit der Nummer der Gleichung in diesem.

Beispiel: (3.3.11)...

...als elfte Gleichung im Kapitel 3.3.

Ergibt sich das Erfordernis, eine Gleichung nach mehreren Variablen gelöst aufzustellen, so wird die Bezifferung der erstmaligen Erwähnung angepasst, jedoch um einen Buchstaben erweitert.

Beispiel: (3.5.12b)...

...als Gleichung in einem beliebigen Kapitel ab 3.5.

0.4 Allgemeingültige Vorgabeparameter und Konstanten

A

Allgemeine Gaskonstante

$$- R = N_A \cdot k_B = 8,3144624 \frac{J}{mol \cdot K}$$

Avogadro-Konstante

$$- N_A = 6,02214129 \cdot 10^{23} \frac{1}{mol}$$

B

Blasiusfaktor

$$- Bl = 0,3146$$

Boltzmann-Konstante

$$- k_B = 1,380648810^{-23} \frac{J}{K}$$

E

Erdbeschleunigung g :

$$- g \approx 9,81 \frac{m}{s^2}$$

Ein genauer angepasster Wert wird mit der breitengrad- und höheabhängigen WELMEC-Formel ermittelt.

$$g_{\left[\frac{m}{s^2}\right]} = 9,780318 \cdot \left[1 + 5,3024 \cdot 10^{-3} \cdot \sin^2(\varphi_{lat}) - 5,8 \cdot 10^{-6} \cdot \sin^2(\varphi_{lat}) \right] - 3,085 \cdot 10^{-6} \cdot h_{\text{überMN}[m]}$$

oder

$$g_{\left[\frac{m}{s^2}\right]} = 9,780318 \cdot \left[1 + \frac{\sin^2(\varphi_{lat})}{188,594} - \frac{\sin^2(\varphi_{lat})}{172400} \right] - \frac{h_{\text{überMN}}}{324000} \quad (0.5.01)$$

mit

φ_{lat} : Breitengrad (engl. latitude)

$h_{\text{überMN}[m]}$: Höhe über Meeresniveau in Metern

L

Der Luftdruck in Bodennähe p_{Luft} :

$$- p_{Luft}(0m \text{ über Meeresniveau}) = 1.013,5 \text{ mbar}_a$$

Angepasst auf die jeweilige Höhe kann der Druck exakter mit der internationalen Höhenformel ermittelt werden:

$$p_{Luft}(h_{\text{überMN}})_{[hPa]} = 1013,25_{[hPa]} \cdot \left(1 - \frac{0,0065_{[K/m]} \cdot h_{\text{überMN}[m]}}{288,15_{[K]}} \right)^{5,255} \quad (0.5.02)$$

oder etwas vereinfacht

$$p_{Luft}(h_{\text{überMN}})_{[hPa]} = 1013,25_{[hPa]} \cdot \left(1 - \frac{h_{\text{überMN}[m]}}{44330,77_{[m]}} \right)^{5,255} \quad (0.5.03)$$

mit

$h_{\text{überMN}}$: Höhe über Meeresniveau in Metern

P

Kreiszahl Pi, π

$$- \pi = 3,14159$$

Folgende Daten müssen mit dem Hersteller/Zulieferer von Apparaten geklärt werden:

- Das Volumen des W 001
- Der genaue Differenzdruck des W 001 bei Nominaldurchsatz oder der ζ -Wert.

1 Einleitung

Die Auslegung verfahrenstechnischer Systeme ist eine im Anlagenbau alltägliche Aufgabe. Auf Grund der Unterschiedlichkeit der Anforderungen an zu planende Anlagen gibt es oft unzählige Lösungsvarianten. Welche Lösung letztendlich umgesetzt wird, wird zumeist vom planenden Verfahrenstechniker festgelegt. Die Kreativität des planenden Ingenieurs legt hier also in gewisser Weise die Anzahl möglicher Lösungen fest. Da es jedoch auch oft vorkommt, dass sich die Anforderungen an unterschiedliche Projekte ähneln, wäre es für den Planer unwirtschaftlich, mit der Erarbeitung eines Anlagenkonzeptes immer wieder von vorn zu beginnen. Dies trifft immer häufiger zu, je kleiner die betrachteten Anlagen(-teile) sind. Andererseits verringert sich die Auswahl alternativer Konzepte mit immer kleiner werdenden Teilanlagen. Daraus resultiert die Möglichkeit, eine einmalige Festlegung für ein Verfahren bzw. ein Anlagenkonzept zu treffen, welches für mehrere Aufgaben – im Idealfall universell – anwendbar ist. Ist dies möglich, so ist bei wiederholter Aufgabenstellung keine kreative Eigenleistung des Planers erforderlich. An diesem Punkt bietet sich für die Bearbeitung der Aufgabe ein EDV-System an, welches mit festen Routinen die baulichen Soll-Parameter der Anlage ermittelt.

Die vorliegende Arbeit soll nun beispielhaft eine solche EDV-Lösung zum Inhalt haben. Mit ihr soll die Erarbeitung eines flexibel anpassbaren Modells zur Auslegung eines verfahrenstechnischen Systems möglich sein. Dieses System soll in der Lage sein, eine destillative Separation molekulardisperser Systeme zweier Komponenten mit großer Siedepunktdifferenz auszuführen und nach dem Entspannungsverdampfer-Prinzip arbeiten.

Des Weiteren kann diese Softwarelösung auch als Element bzw. Teilprogramm eines wesentlich umfangreicheren Softwarepaketes verstanden werden. Dieses sollte es einem Anwender ermöglichen, mit geringstem Zeitaufwand eine große Anzahl unterschiedlicher Anlagen auslegen zu können. Es stellt also auch in dieser Hinsicht ein Hilfsmittel zur Steigerung der Arbeitsgeschwindigkeit dar.

2 Zielstellung

Ziel dieser Arbeit ist

- die Aufstellung eines flexiblen Modells zur Auslegung einer Verdampferanlage als Excel-Kalkulation und
- die beispielhafte Auslegung zweier Fälle mit unterschiedlichen Anforderungen.

Die o.g. Anlage soll in der Lage sein, ein molekulardisperses System zweier Flüssigkeiten durch Verdampfung der Komponente mit der geringeren Siedetemperatur zu trennen. Da es hier um eine einfache Destillation und nicht um eine Rektifikation gehen soll, ist die Bedingung eine große Siedepunktdifferenz beider Komponenten.

Zum einen soll ein detaillierter Überblick über die Dimensionierung der benötigten Komponenten erhalten werden. Hier sollen die Leistungsdaten und Prozessparameter der benötigten Rohrleitungen, Armaturen, Pumpen, Wärmetauscher und der Kolonne ermittelt werden.

Des Weiteren soll auch eine wichtige Frage des Anlagendesigns geklärt werden: Es geht um die Entscheidung, ob der Stoffstrom linear durch das System geleitet werden kann oder ob es nötig ist, einen Kreislauf vorzusehen. Die Schwierigkeit, die sich hier stellt, ist die Tatsache, dass sich aus unterschiedlichen Ausgangsbedingungen (Temperatur des Einsatzproduktes, Anteil an zu verdampfender Komponente, Druck des Heizdampfes etc.) die Erfordernis ergeben kann, dass das Produkt mehrmals durch den Wärmeübertrager und die Kolonne gefahren werden müsste, um es so weit von der leicht siedenden Komponente zu befreien, dass es den vorgegebenen Qualitätsparametern entspricht. Die Frage, unter welchen Bedingungen sich diese Notwendigkeit ergibt, soll durch eine Rechenroutine qualitativ ermittelbar gemacht und für den Einzelfall als eine einfache Ja/Nein-Aussage beantwortet werden.

Schließlich soll dies in einer Excelkalkulation mittels Eingabe der benötigten Parameter ermittelbar gemacht werden, um auf diese Weise ein Werkzeug zur Auslegung einer Verdampfer-/Trockneranlage zu erhalten. Durch Eingabe unterschiedlicher Vorgaben wie z.B. Durchsatz, Temperatur und Stoffzusammensetzung soll das Berechnungsmodell auf verschiedene Anwendungsfälle anpassbar gemacht werden.

Um die Ergebnisse leicht erfassbar zu machen, soll zudem noch eine Visualisierung des Prozesses in Form einer Prozesssimulation auf einer graphischen Darstellung der Anlage angefertigt werden. Dazu sollen die für den Normalbetrieb typischen Werte ermittelt und an entsprechenden Punkten im Fließbild dargestellt werden. Der Sinn dieses zusätzlichen Aufwandes liegt in der Vereinfachung der Fehlersuche und der erheblich leichteren Beurteilung der ermittelten Werte. Von Vorteil ist hierbei, dass ein Großteil der darzustellenden Daten, wie z.B. Fließgeschwindigkeiten und Drücke ohnehin ermittelt werden müssen.

2.1 Präzisierung der Zielstellung

Um die Anpassbarkeit an unterschiedliche Anforderungen nicht einzuschränken, soll auf die Ermittlung baulicher Parameter, wie sie etwa für Apparatebauer relevant sind, und die Festlegung von Pumpentypen verzichtet werden. Gleiches gilt für den Stahl- und Rohrleitungsbau sowie die Aufstellung der Apparate.

Anders als bei der Rektifikation soll während des Prozesses nur die leichter siedende Komponente eine Änderung des Aggregatzustandes erfahren. Wie eingangs erwähnt, erfordert dies eine genügend hohe Differenz der Siedepunkte beider Stoffe. Denkbare Beispiele für Systeme, wo dies annähernd der Fall ist, wären Glycerin/Wasser, Fettsäureester/Wasser, Schmierstoffe/Gasöle, Paraffin/Aceton etc.

Um wirtschaftlichen Aspekten Rechnung zu tragen, soll das Anlagendesign mit einem angemessenen Aufwand an Standardsystemkomponenten auskommen. Dies gilt für die verwendeten Apparate (Wärmeübertrager & Kolonne statt spezielle Verdampfertypen) als auch für die Mess- und Regeltechnik, welche bekanntermaßen besonders kostenintensiv ist.

Um die Komplexität der Berechnungen zu begrenzen, werden handliche, praxistaugliche Näherungsformeln sowie aus der Praxis gesammelte bzw. hergeleitete Erfahrungswerte verwendet. Ziel ist die Ermittlung brauchbarer Richtwerte, die in Verbindung mit Sicherheitsaufschlägen üblicher Größenordnung eine sichere Grundlage zur Auslegung der Anlage bieten sollen.

Zur Umgehung von VisualBasic-Scripts und Excel-Iterationen sollen eigene Optimierungsmethoden gefunden und angewandt werden. Näheres dazu im Abschnitt 2.3.

2.2 Design und Systemgrenzen

Es soll das gesamte Trocknersystem modelliert werden. Dies beginnt mit der Saugleitung zur Zubringerpumpe für das Einsatzprodukt und endet einerseits mit der Dimensionierung der Abgabeleitungen für das Haupt- und Nebenprodukt.

Der Vorlagebehälter für das Einsatzprodukt sowie ein evtl. vorhandenes Vakuumsystem bzw. eine Brüdenkondensation oder eine Wärmerückgewinnung soll nicht Gegenstand der Betrachtungen sein, da derartige Systeme zu stark von den bereits vorhandenen Gegebenheiten abhängig sind.

Für den Wärmeübertrager soll eine Eingrenzung gemacht werden: Da Anlagen dieser Art eher zu den kleineren zählen, sollen Plattenwärmeübertrager zur Anwendung kommen, die in diesem Bereich die vorteilhafteste Wahl sind. Näheres dazu ist im Abschnitt 3.4 zu finden.

2.3 MS Excel

Die Software Microsoft Excel ist ein sehr mächtiges Kalkulationswerkzeug und bietet neben einfachen Tabellenkalkulationsfunktionen noch weitere Möglichkeiten der Datenverarbeitung und -darstellung. Zu diesen gehören die Implementierung von Makros und Scripts in Visual Basic. Um derartige Funktionen nutzen zu können, muss die Sicherheitsstufe von Excel angepasst bzw. diese für die jeweils geöffnete Kalkulation zugelassen werden.

In der vorliegenden Arbeit soll nun bewusst auf den Einsatz von Makros und VB-Scripts verzichtet werden. Auch Iterationen sollen ohne die Excel-eigene Iterationsfunktion von Zirkelbeziehungen ausgeführt werden.

Alle Routinen können so in der höchstmöglich einstellbaren Sicherheitsstufe von Excel ohne Einschränkung ihrer Funktionalität genutzt werden.

Am Ende soll eine Darstellung der Ergebnisse im Stile einer PLS-Graphik mit erweiterten Parametern erarbeitet werden, um die berechneten Werte anschaulich und leicht verständlich zu vermitteln. Dies soll eine Einschätzung bzw. Beurteilung der ermittelten Parameter erleichtern.

Die Excel-Kalkulation soll als Hilfsmittel für Ingenieure verstanden werden, die

- Machbarkeitsstudien durchführen,
- auf unkomplizierte Weise schnell zu Ergebnissen in der Planung von Trockneranlagen gelangen wollen,
- mit wenig Arbeitsaufwand verschiedene Varianten durch Variation von Parametern miteinander vergleichen wollen,
- Vergleichsergebnisse zu ihrer eigenen Planungsarbeit suchen oder
- diese Ergebnisse mit Parametern laufender Anlagen zwecks Suche nach Optimierungsansätzen vergleichen wollen.

Letztendlich soll auch darauf geachtet werden, einen gewissen didaktischen Anspruch zu erfüllen. Dies bedeutet, dass es möglich sein soll, jedes Kapitel und jede Gleichung für sich, ohne langwieriges Nachlesen in voran gegangenen Kapiteln, zu verstehen. Speziell bei den Gleichungen wird deshalb auf eine leicht verständliche Symbolik geachtet, die sich konsequent an den aktuell üblichen Standards orientiert. Aus diesem Grund wird die originale Symbolik zitierter Gleichungen gelegentlich angepasst, was im konkreten Fall jedoch explizit vermerkt wird.

3 Berechnungsroutinen

Die verfahrenstechnische Auslegung der Rohrleitungen, Armaturen, Apparaten und Geräten (im Folgenden mit dem Überbegriff Systemkomponenten bezeichnet) erfolgt, nachdem sie für eine bestimmte Funktion ausgewählt und ihre Position im Verfahrensfließbild festgelegt wurde. Sie dient zur Anfertigung von Spezifikationen für den Apparatebauer bzw. ist Grundlage für die Bestellung der benötigten Systemkomponenten. Vereinfacht ausgedrückt ist die Auslegung der Prozess der Zusammenstellung von Anforderungen und Leistungsmerkmalen ebendieser Komponenten. Teilweise handelt es sich dabei um simple Vorgabewerte, zum größten Teil jedoch um festgelegte Parameter, die aus Berechnungen resultieren. All diese Spezifikationsdaten werden vom Planer in das so genannte Lastenheft eingetragen und dienen dem Auftragnehmer als Grundlage für den Bau der Anlage bzw. oben genannter Systemkomponenten.

Eine Liste der für die Auslegung notwendigen Vorgabeparameter ist im Anhang D aufgeführt.

3.1 Das Anlagenkonzept

In der Vorarbeit (siehe Projektarbeit, Kapitel 4) ist ein Konzept erarbeitet worden. Dies soll als Grundlage der Verdampfer- bzw. Trockneranlage dienen. Eine identische Darstellung ist im Anhang A zu finden.

Die Anlage soll in vier Sektionen unterteilt werden:

- Zubringereinheit,
- Vorwärmung,
- Trocknung und
- Abgabereinheit.

Eine Zubringereinheit, bestehend aus einer Pumpe mit druckseitigem Mengenregler, fördert das Einsatzprodukt durch einen Wärmeübertrager zwecks Vorheizung. Anschließend wird es in einer Kolonne versprüht. Der Leichtsiederanteil wird als Nebenprodukt in Form von Brüden abgeleitet. Das Hauptprodukt stellt den um den Leichtsiederanteil verringerten Schwertsiederanteil dar. Dabei darf der Anteil an Leichtsiedern im Hauptprodukt den festgelegten maximalen Anteil nicht überschreiten. Das Hauptprodukt wird mit einer Pumpe aus dem Kolonnensumpf gefördert und aus der Anlage abgegeben. Für den Fall, dass nicht genügend Leichtsieder verdampft werden können, wenn das Rohmaterial linear durch die Anlage gefahren wird, ist eine Kreislauffahrweise vorgesehen, bei der nur ein Teil des Sumpfproduktes der Kolonne abgegeben wird. Der Rest wird wieder vor den Wärmeübertrager gefahren und mit frischem Einsatzprodukt vermischt. Die Kreislaufleitung existiert jedoch in jedem Falle, da sie zum Anfahren der Anlage benötigt wird (Trocknung im Kreislauf, bis die erforderlichen Qualitätsparameter erreicht sind).

R&I-Fließbild der Anlage: (siehe Anhang B)

Eine detaillierte Beschreibung der gesamten Anlage hinsichtlich ihres Aufbaues und ihrer Funktion ist im Kapitel 4 Systembeschreibung zu finden.

Die vorliegende Arbeit ist insoweit theoretisch, als dass keine tatsächlichen Messwerte von Experimenten oder Maßangaben von Vor-Ort-Messungen bereit stehen. Deshalb werden in den Rechenbeispielen Werte verwendet, die sich am R&I-Fließbild orientieren: Alle dort waagerecht gezeichneten Leitungswege werden als auf einer Höhe befindlich angesehen. In den beiden Rechenbeispielen steht die P 001 also höher als die P 002. Durch Modifikation der Höhenangaben in der Eingabemaske der Software sollen diese jedoch anpassbar sein.

3.2 Massenbilanz

Die Massenbilanz kann bezüglich der Produkt- und der Substanzströme aufgestellt werden. Um zu zeigen, dass unabhängig dieser unterschiedlichen Betrachtungsweisen das gleiche Ergebnis resultiert, seien im Folgenden beide Varianten dargestellt.

3.2.1 Massenbilanz bezüglich der Produktströme

$$\dot{m}_{Feed} - \dot{m}_{Brüden} - \dot{m}_{EP} = 0 \quad (3.2.01)$$

Bezüglich der Stoffströme:

$$\dot{m}_{Feed} - \dot{m}_{LS} - \dot{m}_{SS} = 0 \quad (3.2.02)$$

Leichtsiedergleichung:

$$\dot{m}_{Feed} \cdot \omega_{LS,Feed} - \dot{m}_{Brüden} \cdot \omega_{LS,Brüden} - \dot{m}_{EP} \cdot \omega_{LS,EP} = 0 \quad (3.2.03)$$

Schwersiedergleichung:

$$\dot{m}_{Feed} \cdot \omega_{SS,Feed} - \dot{m}_{Brüden} \cdot \omega_{SS,Brüden} - \dot{m}_{EP} \cdot \omega_{SS,EP} = 0 \quad (3.2.04)$$

Das Verhältnis der Schwersieder zu den Leichtsiedern:

$$\omega_{SS,Feed} + \omega_{LS,Feed} = 1 \quad (3.2.05)$$

$$\omega_{SS,EP} + \omega_{LS,EP} = 1 \quad (3.2.06)$$

$$\omega_{SS,Brüden} + \omega_{LS,Brüden} = 1 \quad (3.2.07)$$

gegeben: \dot{m}_{EP} , $\omega_{LS,Feed}$, $\omega_{LS,EP}$, $\omega_{LS,Brüden}$

gesucht: \dot{m}_{Feed} , $\dot{m}_{Brüden}$

Um $\dot{m}_{Brüden}$ zu substituieren, wird (3.03) zunächst nach dieser Variablen umgestellt:

$$\dot{m}_{Brüden} = \frac{\dot{m}_{Feed} \cdot \omega_{LS,Feed} - \dot{m}_{EP} \cdot \omega_{LS,EP}}{\omega_{LS,Brüden}} \quad (3.2.03a)$$

Aus (3.01) folgt durch Substitution der Variablen $\dot{m}_{Brüden}$ mittels (3.03a):

$$\dot{m}_{Feed} = \frac{\dot{m}_{EP} \cdot (\omega_{LS,EP} - \omega_{LS,Brüden})}{\omega_{LS,Feed} - \omega_{LS,Brüden}} \quad (3.2.08)$$

$\dot{m}_{Brüden}$ lässt sich ebenfalls aus (3.01) und (3.03) durch Substitution von \dot{m}_{Feed} herleiten.

$$\dot{m}_{Brüden} = \frac{\dot{m}_{EP} \cdot (\omega_{LS,EP} - \omega_{LS,Feed})}{\omega_{LS,Feed} - \omega_{LS,Brüden}} \quad (3.2.09)$$

Für den Fall, dass \dot{m}_{Feed} gegeben ist, gelten folgende Gleichungen, die sich nach dem gleichen Muster wie (3.08) und (3.09) herleiten lassen.

$$\dot{m}_{EP} = \frac{\dot{m}_{Feed} \cdot (\omega_{LS,Brüden} - \omega_{LS,Feed})}{\omega_{LS,Brüden} - \omega_{LS,EP}} \quad (3.2.10)$$

$$\dot{m}_{Brüden} = \frac{\dot{m}_{Feed} \cdot (\omega_{LS,EP} - \omega_{LS,Feed})}{\omega_{LS,Brüden} - \omega_{LS,EP}} \quad (3.2.11)$$

3.2.2 Massenbilanz bezüglich der Substanzströme

Alternativ, jedoch geringfügig aufwändiger, ist die Herleitung aus den Gleichungen (3.2.02) bis (3.2.07) ebenfalls möglich.

Mit der Beziehung aus (3.2.02) und (3.2.03)

$$\dot{m}_{LS} = \dot{m}_{Feed} \cdot \omega_{LS,Feed} = \dot{m}_{Brüden} \cdot \omega_{LS,Brüden} + \dot{m}_{EP} \cdot \omega_{LS,EP} \quad (3.2.12)$$

erhält man wiederum die Gleichung (3.2.03a).

Ausgehend von den Schwersiedern erhält man unter Verwendung von (3.02), (3.03a), (3.04), (3.2.05), (3.2.06) und (3.2.07)

$$\dot{m}_{SS} = \frac{\dot{m}_{Feed} \cdot \omega_{LS,Feed} - \dot{m}_{EP} \cdot \omega_{LS,EP}}{\omega_{LS,Brüden}} \cdot (1 - \omega_{LS,Brüden}) + \dot{m}_{EP} \cdot (1 - \omega_{LS,EP}) \quad (3.2.13)$$

Die Auflösung von (3.2.13) nach \dot{m}_{Feed} führt zu (3.2.08). Analog zu dieser Herleitung ergibt sich für $\dot{m}_{Brüden}$ die Gleichung (3.2.09) und auch (3.2.10) und (3.2.11) lassen sich über diesen Weg bestimmen.

Es soll auf die Ermittlung nur eines Bilanzstromes, z.B. mit (3.2.08), mit anschließender Differenzbildung unter Verwendung von (3.2.01) verzichtet werden. Vorteilhafter ist es, die Ergebnisse aus (3.2.08) und (3.2.09) bzw. (3.2.10) und (3.2.11) in (3.2.01) einzusetzen und die erhaltene Einsatz- bzw. Endproduktmenge mit der der Vorgabe zu vergleichen. Auf diese Weise lässt sich eine einfache Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse durchführen.

Beispielhafte Umsetzung in Excel

Tabelle 3.1: Beispiel für die Umsetzung der Massenbilanz in Excel.

| Ermittlung der Massenströme (Bilanz) | | |
|--------------------------------------|-----------|-------------------|
| Massenstrom | 3.000,0 | kg/h Feed |
| $\omega_{LS,Feed}$ | 3 | Ma% |
| $\omega_{LS,EP}$ | 0,05 | Ma% |
| $\omega_{LS,Brüden}$ | 99,7 | Ma% |
| Massenstrom | 2.911,2 | kg/h EP |
| Massenstrom _{Feed} | 3.000,0 | kg/h |
| Massenstrom _{EP} | 2.911,2 | kg/h |
| Massenstrom _{Brüden} | 88,8 | kg/h |
| Volumenstrom _{Feed} | 3,13 | m ³ /h |
| Volumenstrom _{EP} | 3,03 | m ³ /h |
| Volumenstrom _{Brüden} | 302,45 | m ³ /h |
| Plausibilitätsprüfung... | bestanden | |

| Substanzströme | | |
|--------------------------|-----------|-------------------|
| $m_{LS,Feed}$ | 90,00 | kg/h |
| $m_{LS,EP}$ | 1,46 | kg/h |
| $m_{LS,Brüden}$ | 88,54 | kg/h |
| $n_{LS,Feed}$ | 2,65 | kmol/h |
| $n_{LS,EP}$ | 0,04 | kmol/h |
| $n_{LS,Brüden}$ | 2,60 | kmol/h |
| $\rho_{Brüden}$ | 0,294 | kg/m ³ |
| Plausibilitätsprüfung... | bestanden | |

3.3 Energiebilanz

Eine vorläufige Energiebilanz dient zur Abschätzung der benötigten Energiemenge.

Die erforderlichen Stoffdaten sind:

- die spezifische Wärmekapazität c_p :
 - o von Einsatz-, End- und Nebenprodukt $c_{p,Feed}$, $c_{p,EP}$, $c_{p,Brüden}$
 - o alternativ von Leicht- und Schwersieder $c_{p,LS}$, $c_{p,SS}$
- die Verdampfungsenthalpie der leicht siedenden Komponente $\Delta h_{V,LS}$
- die Temperatur des Einsatzproduktes T_{Feed}
- der Siedepunkt der leicht siedenden Komponente $T_{Siede,LS}$
- die Mindest-Abgabetemperatur des Endproduktes $T_{min,EP}$
- die Prozesstemperaturen aus den Vorversuchen:
 - o die benötigte Vorwärmtemperatur $T_{Vorwärm}$

- die maximale Vorwärmtemperatur $T_{\max, \text{Vorwärm}}$
- den Brüdentemperatur $T_{\text{Brüden}}$

Die Energiemenge, die für die Trocknung aufgewandt werden muss, setzt sich wie folgt zusammen:

- die Verdampfungsenthalpie der Brüden,
- die Energie der Temperaturdifferenz zwischen Brüden und Sumpf
- die Energie der Temperaturdifferenz zwischen Sumpf und Einsatzprodukt

Die drei Gleichungen, mit denen man diese Energiemengen darstellen kann, sind:

$$\dot{Q}_{\text{verd. Brüden}} = \dot{m}_{\text{Brüden}} \cdot \Delta h_{V, \text{Brüden}} \quad (3.3.01)$$

$$\dot{Q}_{\Delta T, \text{Brüden}} = \dot{m}_{\text{Brüden}} \cdot c_{p, \text{Brüden}} \cdot (T_{\text{Brüden}} - T_{EP}) \quad (3.3.02)$$

$$\dot{Q}_{\Delta T, EP} = \dot{m}_{EP} \cdot c_{p, EP} \cdot (T_{\text{Vorwärm}} - T_{EP}) \quad (3.3.03)$$

Die zum Einstellen der Vorwärmtemperatur benötigte Energiemenge berechnet sich nach

$$\dot{Q}_{\text{vorwärm}} = \dot{m}_{\text{Feed}} \cdot c_{p, \text{Feed}} \cdot (T_{\text{Vorwärm}} - T_{\text{Feed}}) \quad (3.3.04)$$

Die Energiemenge (3.3.04) ist gleich der Summe der drei Gleichungen (3.3.01), (3.3.02) und (3.3.03). Damit kann die Energiebilanzgleichung formuliert werden:

$$\dot{Q}_{\text{vorwärm}} - \dot{Q}_{\text{verd. Brüden}} - \dot{Q}_{\Delta T, \text{Brüden}} - \dot{Q}_{\Delta T, EP} = 0 \quad (3.3.05a)$$

bzw.

$$\dot{m}_{\text{Feed}} \cdot c_{p, \text{Feed}} \cdot (T_{\text{Vorwärm}} - T_{\text{Feed}}) - \dot{m}_{\text{Brüden}} \cdot [\Delta h_{V, \text{Brüden}} - c_{p, \text{Brüden}} \cdot (T_{\text{Brüden}} - T_{EP})] - \dot{m}_{EP} \cdot c_{p, EP} \cdot (T_{\text{Vorwärm}} - T_{EP}) = 0 \quad (3.3.05b)$$

Beispielhafte Umsetzung in Excel

Tabelle 3.2: Beispiel für die Umsetzung der Energiebilanz in Excel.

| Energiebilanz | | |
|--|---------------|------------------|
| $T_{\text{vorlauf, Feed}}$ | 65 | °C |
| $T_{\text{vorwärm, Vorversuch}}$ | 128,0 | °C |
| $\Delta T_{\text{WÜ, ohne Kreislauf}}$ | 63,0 | K |
| $T_{\text{Brüden}}$ | 75 | °C |
| T_{EP} | 115,0 | °C |
| $c_{\text{p FEED}}$ | 2,59 | kJ/(kg*K) |
| $c_{\text{p EP}}$ | 2,60 | kJ/(kg*K) |
| Wärmestrom _{V Brüden} | 27,14 | kW |
| Wärmestrom _{ΔT Brüden} | 0,54 | kW |
| Wärmestrom _{ΔT EP} | 105,12 | kW |
| 1. Wert Wärmestrom _{Vorwärmung} | 132,80 | kW |
| 2. Wert Wärmestrom _{Vorwärmung} | 135,87 | kW |
| Wärmestrom_{Vorwärmung} | 135,87 | kW |
| $T_{\text{vorwärm, theoretisch}}$ | 128,0 | °C |
| relativer Fehler | 2,31 | % |
| | | |
| Dampfdruckstufe | 4 | bar _a |
| Dampftemperatur | 144,7 | °C |
| | | |

3.4 Wärmeübertrager W 001

Der W 001 soll ein Plattenwärmeübertrager (PWÜ) sein. Da gewöhnliche Trockneranlagen zumeist im Durchsatzbereich von weniger als 50 t/h arbeiten, ist dieser Wärmeübertragertyp die geeignetste Wahl.

Wenn kein ungewöhnlicher Plattenwerkstoff verwendet wird, ist der Anschaffungspreis von Plattenwärmeübertragern vergleichsweise niedrig. Durch die kompakte Bauform ist der Platzbedarf dieses WÜ-Types sehr gering, was ihn für nachträgliche Anlagenmodifikationen sehr interessant macht.

Hier ein Beispiel aus der Praxis (Firmeninterne Angaben der Fa. Thermowave):

- Hersteller: Thermowave
- Typenbezeichnung: TL 150 HBCL (ein kleinerer Typ)
- Anschlüsse: DN 40 / PN 10
- Medien: Dampf/Fettsäureester
- Übertragungsleistung: ca. 120 kW
- geplanter Volumenstrom: ca. 4 m³/h
- geplante Arbeitstemperatur: ca. 135 °C

- Plattenwerkstoff: 1.4571
- Dichtungswerkstoff: EPDM
- Anzahl der Platten: 132
- Anschaffungspreis: ca. €2.300,-

Die benötigte Stellfläche für diesen Typ liegt bei etwa anderthalb Quadratmetern.

Zudem ist dieser Typ nachträglich über weite Leistungsbereiche erweiter- bzw. anpassbar und kann vom Instandhaltungspersonal vor Ort gewartet werden. So nimmt z.B. der Austausch des Plattenpaketes eines mittelgroßen Platten-WÜ weniger als drei Stunden in Anspruch.

Im Folgenden soll der benötigte PWÜ nicht baulich ausgelegt werden. Es sollen seine Leistungsdaten ermittelt werden um in Absprache mit dem Hersteller/Zulieferer die geeignetste Auswahl für den Einsatz in der Vorwärmung zu treffen. Dazu müssen sinnvolle und für den Hersteller erreichbare Vorgaben festgelegt werden. Es wäre zum Beispiel nicht zielführend, eine Austrittstemperatur für das zu erwärmende Medium festzulegen, die oberhalb der Kondensationstemperatur des Heizdampfes liegt.

Die rechnerisch zu klärenden Daten sind die erforderliche Leistung des PWÜ und sein etwaiger Differenzdruck. Die Auswahl des Platten- und Dichtungsmaterials muss weiterhin Aufgabe des Planenden sein. Da das Plattenmaterial durch Prägung aus einem Rohling hergestellt wird, ist nahezu jedes form- und stanzbare Material verwendbar. Daher gibt es eine Vielzahl an verwendbaren – sogar nichtmetallische – Materialien. Es gibt aber auch kassettenverschweißte Plattenpaare (immer zwei Platten zusammen) oder auch ganze Pakete, die zu einem massiven Block verschweißt sind. Die Auswahl eines geeigneten Dichtungsmaterials richtet sich nicht nur nach dem Produkttyp sondern auch nach der thermischen und der Druckbelastung des PWÜ.

Im Folgenden sei eine kleine Auswahl von Platten- und Dichtungswerkstoffen zusammengestellt.

Plattenmaterialien:

- Aluminium
- Polyvinylchlorid (PVC)
- Polypropylen (PP)
- C-Stahl
- Legierte und hochlegierte Stähle (1.4571, 1.4539, Hastelloy C4 etc.)
- Kupfer
- Nickel
- Titan
- Graphit

Dichtungsmaterialien:

- Gummi (Kautschuk)
- Viton (Fluorkautschuk oder Fluorkarbonkautschuk, FKM/FPM)
- Polyterafluorethylen („Teflon“, PTFE)
- Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (EPDM)
- verschiedene Siliconpolymere
- Polyurethan (PU)
- Perbunan (Nitril-Butadien-Kautschuk, NBR)

3.4.1 Die Leistung des Wärmeübertragers

Um die Leistung des Wärmeübertragers zu ermitteln, muss der Wärmestrom für die Vorwärmung, $\dot{Q}_{\text{vorwärm}}$, berechnet werden. Dazu kann Gleichung (3.3.05a) auf simple Weise umgeformt werden:

$$\dot{Q}_{\text{vorwärm}} = \dot{Q}_{\text{verd.Brüden}} + \dot{Q}_{\Delta T, \text{Brüden}} + \dot{Q}_{\Delta T, EP} \quad (3.3.05c)$$

Formuliert man die drei Summanden aus, erhält man

$$\dot{Q}_{\text{vorwärm}} = \dot{m}_{\text{Brüden}} \cdot [\Delta h_{V, \text{Brüden}} + c_{p, \text{Brüden}} \cdot (T_{\text{Brüden}} - T_{EP})] + \dot{m}_{EP} \cdot c_{p, EP} \cdot (T_{EP} - T_{\text{Vorwärm}}) \quad (3.4.01)$$

Auch hier ist es ratsam, eine Plausibilitätsrechnung anzustellen. Zum einen, um Fehler zu erkennen und zum anderen um die Genauigkeit der Ergebnisse des Vorversuchs zu überprüfen. Dies ist auf zwei Wegen mit ein und derselben Gleichung (3.4.08) möglich:

$$\dot{Q}_{\text{vorwärm}} = \dot{m}_{\text{Feed}} \cdot c_{p, \text{Feed}} \cdot (T_{\text{Vorwärm}} - T_{\text{Feed}}) \quad (3.4.02)$$

- Variante 1:

Man berechnet $\dot{Q}_{\text{vorwärm}}$ mit Gleichung (3.4.01) und (3.4.02) und vergleicht die Differenz beider Ergebnisse. Hieraus kann man direkt auf einen Fehler schließen, der bei der Auslegung des Wärmeübertragers in Form eines Aufschlages berücksichtigt werden muss.

- Variante 2:

Wenn man Gleichung (3.4.02) nach $T_{\text{Vorwärm}}$ umstellt, lässt sich durch Vergleich mit den gegebenen Daten direkt der Fehler in der Bestimmung der Sumpftemperatur ermitteln. Auch hier müsste die ermittelte Differenz bei der Festlegung des Leistungsaufschlages für den Wärmeübertrager berücksichtigt werden.

Da sich das Konzept der Trockneranlage die Möglichkeit einer Kreislauffahrweise offen hält, muss der Energieeintrag der Kreislaufpumpe in die Betrachtungen einbezogen werden. Näheres dazu unter 3.8 Der Energieeintrag der Pumpen.

$$\dot{Q}_{WÜ} = \dot{Q}_{\text{vorwärm}} - \dot{Q}_{P001} - \dot{Q}_{P002} + \dot{Q}_{\text{verl.}} \quad (3.4.03)$$

mit

- $\dot{Q}_{W\ddot{U}}$: erforderliche Übertragungsleistung des WÜ
 $\dot{Q}_{vorw\ddot{a}rm}$: der für die Vorwärmung benötigte Wärmestrom
 $\dot{Q}_{P\ 002}$: Energieeintrag durch die P 001
 $\dot{Q}_{P\ 002}$: Energieeintrag durch die P 002 (nur in Anfahr- und Kreislauffahrweise)
 $\dot{Q}_{verl.}$: Wärmeverluste

Da die Verluste für die unterschiedlichen praktischen Anwendungsfälle nur schwer abzuschätzen sind, wird folgende Vereinfachung getroffen: Da ein Wärmeverlust von mehr als 20 % unrealistisch erscheint, wird die erforderliche Leistung des WÜ durch einen Sicherheitsaufschlag von 20 % erweitert.

Fall 1 – lineare Fahrweise:

$$\dot{Q}_{W\ddot{U}} = (\dot{Q}_{vorw\ddot{a}rm} - \dot{Q}_{P\ 001}) \cdot 1,2 \quad (3.4.03a)$$

Fall 2 – Kreislauffahrweise:

$$\dot{Q}_{W\ddot{U}} = (\dot{Q}_{vorw\ddot{a}rm} - \dot{Q}_{P\ 001} - \dot{Q}_{P\ 002}) \cdot 1,2 \quad (3.4.03b)$$

Beispielhafte Umsetzung in Excel

Die Umsetzung erfolgt in der Spezifikation des Wärmeübertragers. Der Wert wird direkt in der Zelle für die erforderliche Übertragungsleistung errechnet. Dies ist der Grund für die sehr reduzierte Darstellung des Wertes in nur einer Zelle.

Tabelle 3.3: Beispiel für die Darstellung des ermittelten Wärmestroms in Excel.

| | | |
|--------------|-------|----|
| Wärmestrom Q | 162,4 | kW |
|--------------|-------|----|

3.4.2 Schätzung der Druckdifferenz des W 001

Eine Vorgabe für die Druckdifferenz $\Delta p_{W\ddot{U}}$ ist mit größeren Unsicherheiten behaftet, da sie direkt mit den Konstruktionsmerkmalen des Wärmeübertragers zusammenhängt. Um trotzdem zu einem groben Schätzwert zu gelangen, kann folgenden Zusammenhang herstellen:

Mit steigender Temperaturdifferenz des zu erwärmenden Produktes muss dessen Verweilzeit im WÜ vergrößert werden. Da man bemüht ist, Reynolds-Zahl und damit die Strömungsgeschwindigkeit im Wärmeübertrager möglichst hoch zu halten, kann man diese als etwa konstant ansehen. Damit lässt sich die folgende qualitative Beziehung formulieren:

$$\Delta p_{W\ddot{U}} \approx T_{W\ddot{U}-R\ddot{u}cklauf} - T_{W\ddot{U}-Vorlauf} \quad (3.4.04)$$

Ein Wärmeübertrager, der dem Produktstrom eine große Temperaturdifferenz zufügt, hat somit einen höheren Differenzdruck als einer, der das Produkt nicht so stark erwärmen oder abkühlen muss.

Um einen Schätzwert für den Differenzdruck des W 001 zu ermitteln, soll die folgende, vom Autor empirisch ermittelte, lineare Korrelation verwendet werden:

$$\Delta p_{W\ddot{U}} \approx 0,0356 \cdot (T_{W\ddot{U}-R\ddot{u}cklauf} - T_{W\ddot{U}-Vorlauf}) - 0,0696 \quad (3.4.05)$$

Die der Gleichung zu Grunde gelegten Messwerte sind in Tabelle 3.4 zu finden.

Tabelle 3.4: Die Messwerte, die als Grundlage für die Bestimmung eines Schätzwertes für den Differenzdruck eines PWÜ dienen. (Anm.: Die TAG-ID ist die firmeninterne Bezeichnung des WÜ.)

| ΔT [K] | Δp [bar] | WÜ (TAG-ID) |
|----------------|------------------|-------------|
| 5,3 | 0,1 | W 1.03 |
| 9,7 | 0,3 | W 1.02 |
| 18,8 | 0,6 | W 6.01 |
| 24,6 | 0,8 | W 8.02 |

Die Messwerte sind von Plattenwärmeübertragern der Firma Thermowave im laufenden Betrieb bei der Firma *Verbio Diesel Schwedt GmbH & Co. KG*, unter realen Bedingungen ermittelt worden. Der Korrelationskoeffizient für diese Wertepaare liegt auf einem überraschend hohen Niveau von $r = 0,9983$. Es sei jedoch noch einmal ausdrücklich darauf hingewiesen, dass es sich hier trotz des hohen Korrelationskoeffizienten nur um eine Überschlagsrechnung handelt. Es wäre durchaus möglich, einen Wärmeübertrager mit einer Temperaturdifferenz von 25 K und einem Druckverlust von 0,2 bar zu bauen. Der Grund für den hohen Korrelationskoeffizienten liegt höchstwahrscheinlich darin, dass Thermowave die Wärmeübertrager mit einer Software auslegt, die im Ergebnis nur geringe Variationen im Ergebnis erzeugt. Hinzu kommt, dass sich die Viskosität erwärmter Flüssigkeiten nicht so stark voneinander unterscheidet wie bei 20 °C. Eine Übertragung des scheinbar gefundenen Zusammenhangs auf Wärmeübertrager anderer Hersteller ist deshalb spekulativ.

Ein genauerer Wert für den Differenzdruck lässt sich in Rücksprache mit dem Hersteller ermitteln. Bei Plattenwärmeübertragern besteht zudem der Vorteil, dass sich der Differenzdruck und der k-Wert des WÜ über die Struktur und die Prägungstiefe der Platten sowie über die Größe des PWÜ-Typs variieren lässt und somit eine Anpassbarkeit über weite Bereiche an festgelegte Vorgaben besteht.

Beispielhafte Umsetzung in Excel

Tabelle 3.5: Beispiel für die Schätzung des Druckverlustes in Excel.

| W 001 - Schätzung des Druckverlustes | | | |
|--|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|
| Fahrweise | T _{Eingang, W 001} [°C] | T _{Ausgang, W 001} [°C] | Δp _{W001} [mbar] |
| linear | 65 | 128,0 | 2.173,8 |
| Kreislauf | 100,9 | 128,0 | 894,4 |
| p _{linear} p _{Kreislauf} oder p _{Vorgabe} | | | 500,0 |

3.4.3 Staupunktermittlung

Umsetzung der graphischen Ermittlung mit Hilfe von linearen Gleichungen.

a) Geradengleichung zur Bestimmung der kritischen WÜ-Leistung

x : WÜ-Last

$f(x)$: Dampftemperatur

Die Punkte (x;y):

$P(0; T_{Vorwärm})$, $Q(1; T_{Dampf})$

gemäß der allgemeinen Geradengleichung $f(x) = m \cdot x + n$ ergibt sich die Steigung m aus:

$$m = \frac{T_{Dampf} - T_{Vorwärm}}{1 - 0} = T_{Dampf} - T_{Vorwärm}$$

und der y-Achsenabschnitt n aus:

$$T_{p(KB)} = (T_{Dampf} - T_{Vorwärm}) \cdot \Lambda_{WÜ} + T_{Vorwärm}$$

mit

$f(x) = T_{p(KB)}$, $x = \Lambda_{WÜ}$ und $n = T_{Vorwärm}$ ergibt sich ein $\Lambda_{WÜ}$ von:

$$\Lambda_{WÜ} = \frac{T_{p(KB)} - T_{Vorwärm}}{T_{Dampf} - T_{Vorwärm}}$$

mit

T_{Dampf} : Temperatur des Heißdampfes, mit dem der WÜ versorgt wird

$T_{Vorwärm}$: Temperatur, auf die das Produkt erwärmt wird

$T_{p(KB)}$: Dampftemperatur, die dem Druck des Kondensatbehälters entspricht

$\Lambda_{WÜ}$: WÜ-Last, ab der ein Kondensat-Stau möglich ist (mit 100 multipliziert ergäbe sich die Last in %)

b) Geradengleichung zur Bestimmung der kritischen Produkttemperatur

Analog zum oben aufgeführten Weg ergeben die Punkte P und Q :

$P(0; T_{Vorwärm})$, $Q(1; T_{Feed})$

die Gleichung:

$$T_{\text{Krit.}} = (T_{\text{Feed}} - T_{\text{Vorwärm}}) \cdot \Lambda_{\text{WÜ}} + T_{\text{Vorwärm}}$$

Die Bedingung für das Auftreten des Kondensatstaus ist:

$$T_{\text{Vorwärm}} < T_{p(\text{KB})}$$

Beispielhafte Umsetzung in Excel

Tabelle 3.6: Beispiel für die Staupunktermittlung in Excel.

| Staupunktbestimmung des W 001 | | |
|---------------------------------------|-----------|---------|
| Dampftemperatur | 144,7 | °C |
| T _{vorwärm} | 128,0 | °C |
| T _{Feed} | 65,0 | °C |
| Druck im Kondensatbehälter | 1,1 | bara |
| T _{Dampf, Kondensatbehälter} | 102,4 | °C |
| Kondensatstau möglich? | FALSCH | boolean |
| Kondensatstau ab: | kein Stau | möglich |
| kritische Produkttemperatur | keine | °C |

3.5 Kolonne K 001

Die Kolonne wird in einen oberen und einen unteren Teil unterschieden. An der Schnittstelle beider Teile befindet sich der Einlauf mit dem Verteiler. Falls die Bedingungen dafür gegeben sind, unterscheiden sich die Durchmesser des oberen und unteren Teils. In diesem Fall werden beide Teile durch eine Durchmesserverengung in Form eines Kreiskegelabschnittes miteinander verbunden.

Skizze als Gesamtansicht und Stutzentabelle der K 001: siehe Anhang F

3.5.1 Stutzen

Schauglas S1

Wird der Kegelabschnitt tatsächlich verwendet, so soll in diesem ein Schauglas untergebracht werden um einen Blick gleichzeitig auf den Hutverteiler und die in der Kolonne stehende Flüssigkeitsoberfläche zu gewähren (Siehe Abb. 3.5.1). Sollte dies nicht möglich sein, so muss sich die Schauglasunterkante in Höhe des höchsten Punktes des Verteilerhutes befinden.

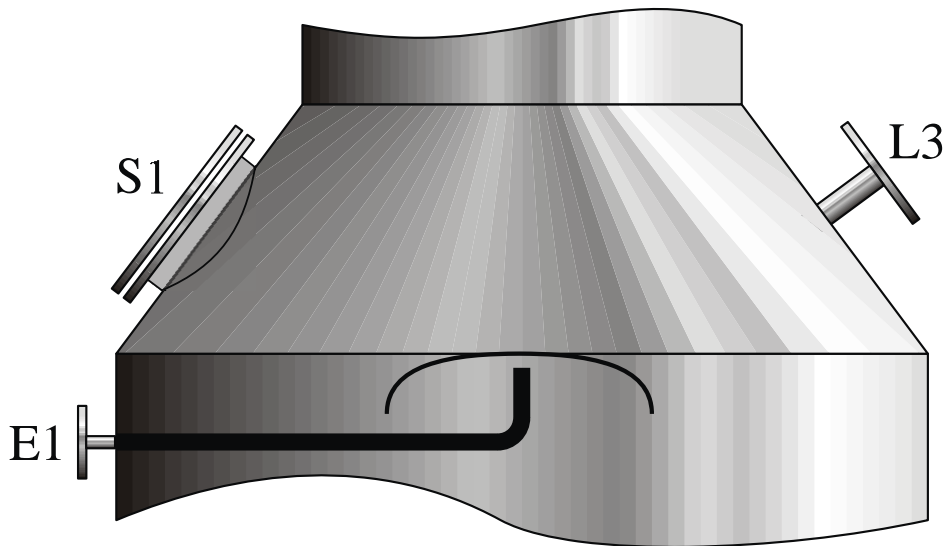


Abbildung 3.5.1: Das Schauglas S1 im konischen Abschnitt der K 001

Die Mannlöcher M1 und M2

Es sind zwei Mannlöcher für die Kolonne vorgesehen. Das Mannloch M1 befindet sich im unteren Teil der Kolonne und dient zur Inspektion des Kolonneninneren und zu Installations- und Wartungsarbeiten des unteren Abschnittes und des Verteilers.

Das Mannloch M2 dient der Installation und Wartung des Tröpfchenabscheiders sowie ebenfalls der Inspektion. Es kann – je nach Innendurchmesser und Baukosten – auf zwei Arten ausgeführt werden:

- **Variante 1**

Ist der Innendurchmesser des oberen Kolonnenabschnittes maximal 600 mm, so empfiehlt sich die Ausführung als abnehmbarer Kolonnenkopf (Siehe Abb. 3.5.2). Dieser ist als Klöpperboden mit Flanschverbindung nach oben zur Brüdenleitung auszuführen. Falls die Kolonne geöffnet werden muss, müssen hier beide Flanschverbindungen (oben zur Brüdenleitung und unten zur Kolonne) geöffnet werden. Danach kann der Kolonnenkopf abgehoben werden. Dies hat den Vorteil, dass der Tröpfchenabscheider bequem in einem Stück eingesetzt und herausgenommen werden kann.

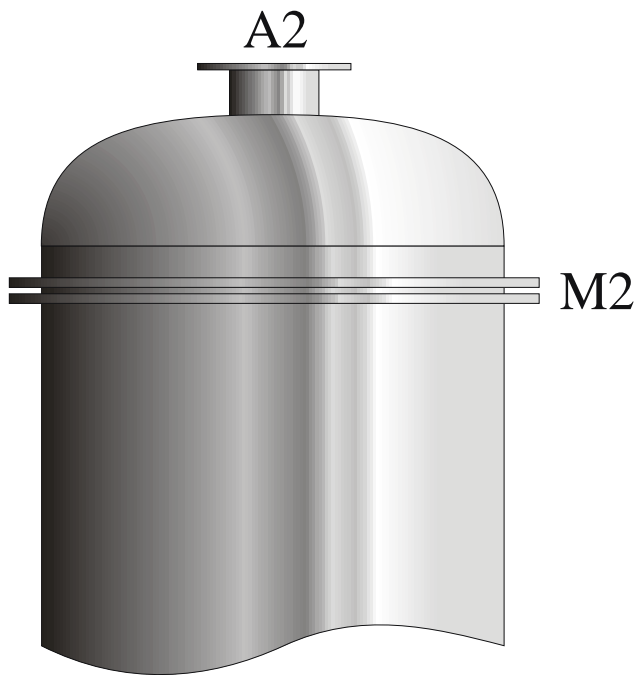


Abbildung 3.5.2: Das Mannloch M2 als abnehmbarer Kolonnenkopf

- Variante 2

Bei größeren Innendurchmessern wird der Kopf sehr schwer und auch größere Tröpfchenabscheider werden gewöhnlich nicht mehr in einem Stück geliefert. In diesem Fall ist die Verwendung eines seitlichen großen Mannloches vorteilhafter, da sich der Deckel – gewöhnlich an einer Angel befestigt – ebenfalls recht bequem öffnen und schließen lässt (siehe Abb. 3.5.3). Außerdem lassen sich die Segmente von Tröpfchenabscheidern problemlos so anpassen, dass sie durch Mannlöcher ab 600 mm Durchmesser hindurchpassen.

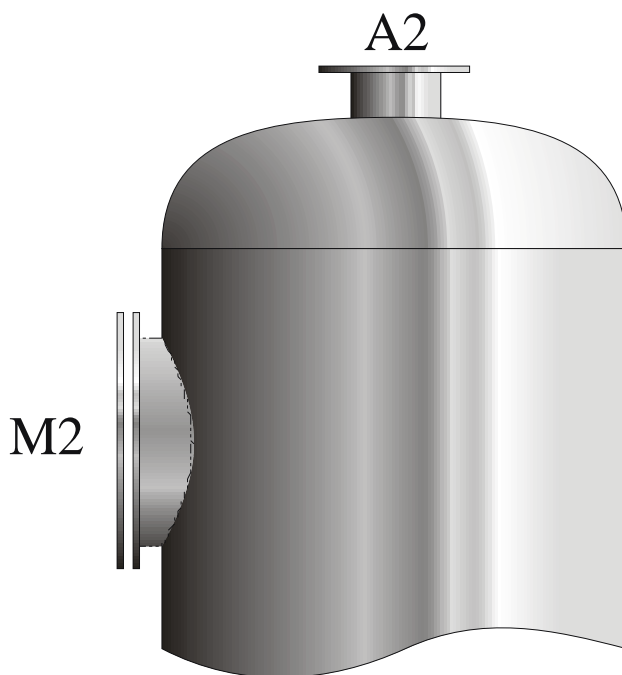


Abbildung 3.5.3: Das Mannloch M2 als gewöhnliches Behältermannloch

Sehr kleine K 001

Sollte die K 001 so klein ausgeführt werden, dass selbst im unteren Abschnitt nicht genug Bewegungsfreiheit für eine Person vorhanden sein sollte, so muss M1 als doppeltes Handloch ausgeführt werden. Diese sollten nicht in gleicher Höhe sowie um 30° bis 60° um die Kolonne verteilt werden um die Möglichkeit einer beidhändigen Arbeit am Verteilerhut zu ermöglichen. Diese beiden Handlöcher sollten zudem so angeordnet sein, dass die am Innenleben der Kolonne arbeitende Person gleichzeitig durch das Schauglas blicken kann, während sich die Arme in den Handlöchern befinden.

Produkteingang E1

Der Eingang E1 (Abb. 3.5.1) führt in die Kolonne unter den Verteilerhut. Es ist die einzige Rohrleitung, die sich innerhalb der K 001 befindet. Sie durchstößt die Außenwand der Kolonne und führt bis zu deren Mitte. Durch einen 90°-Bogen zeigt ihre Mündung nach oben. Ihre Nennweite leitet sich von der Nennweite der Leitung 00-F-004 ab.

Die Ausgänge A1 und A2

A1 ist die Bezeichnung für den Ausgang des Hauptproduktes im Kolonnensumpf. (An dieser Stelle sei noch einmal darauf verwiesen, dass die Bezeichnung Haupt- und Nebenprodukt völlig willkürlich gewählt wurde und sich allein aus der Logik des Wortes „Trocknung“ ergibt.) A2 (Abb. 3.5.2 und 3.5.3) ist somit der Brüdenausgang am Kopf der Kolonne, der sich (wie oben erklärt) entweder im abnehmbaren Kopf oder direkt aufgeschweißt auf den oberen Klöpperboden der Kolonne befindet.

Die Stutzen für Standmessung und Überfüllsicherung L1 bis L3

L1 und L2 sind der untere und obere Arm der Standmessung, welche als Beirohrgefäß ausgeführt wird. Die Standardnennweite für solche Messgeräte ist DN 50. Gleiches gilt für L3 in das ein Liquiphant als Überfüllsicherung eingesetzt wird. (siehe Abb. 3.5.4)

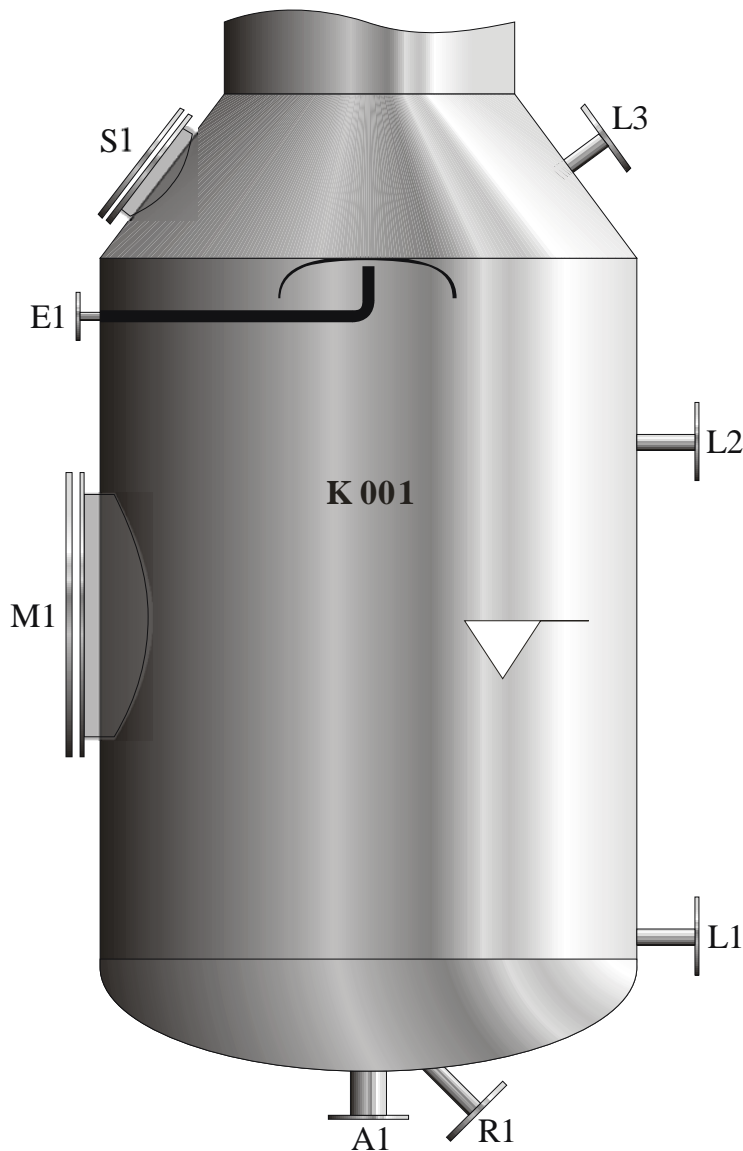


Abbildung 3.5.4: Der mittlere und untere Kolonnenabschnitt (Sumpf) mit den Stutzenbezeichnungen

Stutzen für die Druckmessungen P1 und P2

Um den Zustand des Tröpfchenabscheiders feststellen zu können, sind zwei Druckmessungen notwendig. Je eine muss sich in der Kolonne unter und über diesem befinden. Des Weiteren ist darauf zu achten, dass sich der Stutzen für die obere Druckmessung (P2) möglichst knapp oberhalb des Tröpfchenabscheiders befindet. Die Praxis kennt Fälle in denen es durch nahezu vollständige Verschlüsse von Demistern zu einer fast meterhohen Flüssigkeitssäule oberhalb des Abscheidergeflechtes kam. Befindet sich der Stutzen für die obere Druckmessung möglichst nahe über dem Demister, so würde sich dies durch einen sehr auffälligen Druckanstieg der oberen Messung bemerkbar machen. Zudem böte sich in dieser Situation die Möglichkeit durch die Schaffung einer Schlauchverbindung zwischen P1 und P2 die Flüssigkeit abzulassen um den Tröpfchenabscheider zeitnah für eine Wartung vorzubereiten.

Reservestutzen R1

Am Unterteil der Kolonne, möglichst nahe an A1 befindet sich ein weiterer DN 50-Stutzen mit der Bezeichnung R1 (Abb. 3.5.4). Dieser ist als Reserve vorgesehen. Durch seine Position bietet er die Möglichkeit, einer nachträglichen Installation für ein Messgerät. Dies kann beispielsweise eine Temperatur- oder Druckmessung sein. Aber auch ein Liquiphant als Leermelder ist hier installierbar, falls man sicherstellen möchte, dass die Leitung 00-H-001 immer mit Produkt gefüllt ist.

Hintergrund dieser Vorsichtsmaßnahme ist aber in erster Linie die Tatsache, dass es bei Trockneranlagen oft zu einer Viskositätserhöhung des getrockneten Produktes kommt. Dies kann sich z.B. negativ auf die Tauglichkeit der Standmessung auswirken, in denen das Produkt ohne Strömung steht und sich dadurch abkühlen kann. Die Installation einer Bodendruckmessung (korrigiert durch die Druckmessung in P1) kann das Problem lösen ohne aufwändige nachträgliche Modifikationen an der Kolonne vornehmen zu müssen.

3.5.2 Der Verteiler

Skizze des Verteilers: siehe Anhang E. Die Ziffern im folgenden Text beziehen sich auf die im Anhang E befindliche Skizze.

Der Verteilerhut (1) ist ein Klöpperboden mit nach unten gerichteten Enden, jedoch ohne zylindrischen Abschnitt (5). Seine Größe leitet sich wie folgt ab: Es wird die Nennweite für den Verteilerhut gewählt, die drei Nennweitenstufen größer ist als die der Produkt zuführenden Rohrleitung.

Der Hut wird von unten mit dieser Rohrleitung angestrahlt. Es handelt sich jedoch nicht um einen freien Strahl sondern um eine umlaufende Spaltöffnung (2) mit definierter Höhe. Diese hat die Geometrie eines gedachten Zylindermantels. Das an dieser Stelle mit ca. 6 bis 8 m/s austretende Produkt strömt an der Unterseite des Hutes (3) in Richtung Peripherie. Trägheits- und Adhäsionskräfte sorgen dafür, dass die Flüssigkeit in Kontakt mit der gewölbten Metalloberfläche bleibt und nicht sofort nach Austritt aus dem Ringspalt der Schwerkraft folgend nach unten abfließt.

An der Peripherie angekommen wird der Produktstrom auf Grund der Schwerkraft und des restlichen dynamischen Druckes, der noch durch die stärker werdende Wölbung des Verteilerhutes erhalten geblieben ist, schräg in Richtung Kolonnensumpf geleitet. Der Winkel ist wegen der hohen Strömungsgeschwindigkeit sehr flach und der noch immer sehr hohen Turbulenzen nicht sehr scharf definiert. Er liegt in etwa zwischen 10° und 30° . Fast der gesamte Teil des versprühten Mediums spritzt dabei an die Kolonnenwandung und fließt als dünner Flüssigkeitsfilm nach unten. Hierbei verringert sich die Geschwindigkeit noch einmal drastisch, was der leicht siedenden Komponente erlaubt, ein Gleichgewicht zwischen Dampf- und Flüssigphase herzustellen. Während des gesamten Vorganges verdampft die leicht

siedende Komponente aus den versprühten Tröpfchen bzw. den Filmen und strömt in den oberen Kolonnenteil.

Die Auslegung des Verteilers basiert auf der Größenanpassung (upscaling/downgrading) eines bekannten Praxisfalles. Hersteller ist die Firma Cimbria Sket, Standort der dazu gehörigen Anlage ist die Firma Verbio Diesel Schwedt GmbH & Co. KG. Der Verteiler ist in einer Kolonne (K 6.02) zur Glycerindestillation installiert.

In der bekannten Ausführung hat der Verteiler folgende Auslegungsparameter:
Nennweite der Zulaufleitung: DN 150 nach DIN 11850, Reihe 2, also

$$d_{i,Rohr} = 152\text{mm}$$

(Es wurde das arithmetische Mittel aus Innen- und Außendurchmesser gewählt.)

Abstand der Rohrmündung zum Hut:

$$h_{Spalt} = 15\text{mm}$$

Volumenstrom:

$$\dot{V} = 200\text{m}^3/\text{h}$$

Dichte des Fluids:

$$\rho_{Fluid} = 1.400\text{kg}/\text{m}^3$$

(abweichend von der tatsächlichen Dichte von Glycerin mit 1250 kg/m³)

Dynamische Viskosität:

$$\eta_{Fluid} = 14 \cdot 10^{-3}\text{Pa} \cdot \text{s}$$

(dynamische Viskosität von Glycerin für eine Temperatur von 100 °C)

Die für einen Betrieb unter vergleichbaren Bedingungen nötigen Werte sind die Ausströmgeschwindigkeit \bar{w} und der am Austrittsspalt (Zylinderspalt) verursachte Differenzdruck Δp .

Die Ausströmgeschwindigkeit lässt sich als Quotient von Volumenstrom und Austrittsfläche, welche die Mantelfläche eines Zylinders darstellt, berechnen:

$$\bar{w} = \frac{\dot{V}}{A_{Zylinderspalt}} = \frac{\dot{V}}{\pi \cdot d_{i,Rohr} \cdot h_{Spalt}} \quad (3.5.01a)$$

Dabei sind:

\bar{w} : mittlere Strömungsgeschwindigkeit,

\dot{V} : Volumenstrom,

$A_{Zylinderspalt}$: Mantelfläche eines Zylinders, hier: der gedachte Zylinder des Spaltes

$d_{i,Rohr}$: Innendurchmesser des zuleitenden Rohres,

h_{Spalt} : Abstand zwischen der Rohrmündung und der Unterseite des Verteilerhutes

Mit den gegebenen Werten erhält man eine Ausströmgeschwindigkeit von $\bar{w} = 7,86 \frac{m}{s}$.

Der erzeugte Druckverlust soll als Summe des Druckverlustes einer Blende und einer scharfkantigen 90°-Umlenkung modelliert werden.

$$\Delta p_{Zylinderspalt} = \Delta p_{Blende} + \Delta p_{90^\circ\text{-Umlenkung}} \quad (3.5.02)$$

mit

Δp_{Blende} : Der durch die Querschnittsverengung am Zylinderspalt verursachte Druckverlust, hier mit dem Druckverlustmodell einer Blende dargestellt

$\Delta p_{90^\circ\text{-Umlenkung}}$: Druckverlust durch die Richtungsänderung des Fluids, hier 90°. Im Folgenden wird das Modell einer scharfkantigen Umlenkung gewählt.

3.5.2.1 Druckverlust der Modellblende (Zylinderspalt)

Der durch die Einengung des Querschnitts verursachte Druckverlust für inkompressible Medien, hier als Δp_{Blende} modelliert, ergibt sich aus (3.5.03a):

$$\Delta p_{Blende} = \left(\frac{\dot{V} \cdot 4}{\alpha \cdot \varepsilon \cdot d_i^2 \cdot \pi} \right)^2 \cdot \frac{\rho_{Fluid}}{2} = \frac{\dot{V} \cdot \rho_{Fluid}}{2 \cdot A_{Blende}^2 \cdot \alpha^2} \quad (3.5.03a)$$

(schweizer-fn.de, 05.04.2014)

mit

ε : Expansionszahl (Bei inkompressiblen Medien gilt: $\varepsilon = 1$)

d_i : Innendurchmesser der kreisförmigen Blende

\dot{V} : Volumenstrom des Produktes

ρ_{Fluid} : Dichte des Fluids

A_{Blende} : Durchströmte Fläche der als Blende aufgefassten Modellgeometrie.

α : Durchflusszahl

Mit (3.5.04) erhält man die Durchflusszahl α :

$$\alpha = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} \quad (3.5.04)$$

(schweizer-fn.de, 05.04.2014)

mit

C : Durchflusskoeffizient

β : Durchmesserquotient

Der Durchmesserquotient, welcher sich aus (3.5.05) ergibt, ist das Verhältnis der Flächen von Zylinderspalt und zuführender Rohrleitung:

$$\beta = \frac{d_{\text{Zylinderspalt}}}{d_{\text{Rohr}}} = \frac{A_{\text{Zylinderspalt}}}{A_{\text{Rohr}}} \quad (3.5.05)$$

(schweizer-fn.de, 05.04.2014)

mit

$d_{\text{Zylinderspalt}}$: Durchmesser de Blende

d_{Rohr} : Durchmesser des Rohres

$A_{\text{Zylinderspalt}}$: Querschnittsfläche des Zylinderspaltes ($A_{\text{Zylinderspalt}} = A_{\text{Blende}}$, da der Zylinderspalt im Berechnungsmodell wie eine Blende behandelt wird.)

A_{Rohr} : Querschnittsfläche des zuleitenden Rohres

Der Durchflusskoeffizient C ergibt sich aus der Reader-Harris/Gallagher-Gleichung, (3.5.06) welche ab 2003 in der EN ISO 5167-2 enthalten ist und seit dem die Gleichung von Stolz (3.5.07) ersetzt. Letztere Gleichung sei der Vollständigkeit und der Vergleichbarkeit halber eingefügt.

Die Reader-Harris/Gallagher-Gleichung:

$$C = 0,5961 + 0,0261 \cdot \beta^2 - 0,216 \cdot \beta^8 + 0,000521 \cdot \beta^{2,5} \cdot \left(\frac{10^6 \cdot \beta}{\text{Re}} \right)^{0,7} + \left[0,0188 + 0,0063 \cdot \left(\frac{19.000 \cdot \beta}{\text{Re}} \right)^{0,8} \right] \cdot \beta^{3,5} \cdot \left(\frac{10^6}{\text{Re}} \right)^{0,3} \quad (3.5.06)$$

(EN ISO 5167-2:2003)

mit

β : Durchmesserquotient

Re: Reynolds-Zahl im Zylinderspalt

Die Gleichung von Stolz:

$$C_{\text{Stolz}} = 0,5959 + 0,0312 \cdot \beta^{2,1} - 0,184 \cdot \beta^8 + 0,0029 \cdot \beta^{2,5} \cdot \left(\frac{10^6}{\text{Re}} \right)^{0,75} + 0,09 \cdot \frac{L_1}{d_i} \cdot \frac{\beta^4}{1 - \beta^4} - 0,0337 \cdot \frac{L_2}{d_i} \cdot \beta^3 \quad (3.5.07)$$

(Stolz, 1978)

mit

C_{Stolz} : Durchflusskoeffizient nach Stolz

β : Durchmesserquotient

L_1 : Entfernung des Abgangs der Druckmessung zur Blende im Vorlauf dieser

L_2 : Entfernung des Abgangs der Druckmessung zur Blende im Rücklauf dieser

d_i : Innendurchmesser des Rohres

Die Reynolds-Zahl als Maß für die Strömungsturbulenz im Spalt:

$$\text{Re} = \frac{\bar{w} \cdot \rho_{\text{Fluid}} \cdot d_{i,\text{Zylinderspalt}}}{\eta} \quad (3.5.08)$$

mit

\bar{w} : mittlere Strömungsgeschwindigkeit

ρ_{Fluid} : Dichte des Fluids

η : dynamische Viskosität des Fluids

$d_{i,\text{Zylinderspalt}}$: Innendurchmesser der gedachten Blende. Dieser Durchmesser wird aus der Fläche des Zylinderspaltes ermittelt.

Der Innendurchmesser des Zylinderspaltes ist lediglich eine modellhafte Hilfskonstruktion. Die Fläche des Zylinderspaltes $A_{\text{Zylinderspalt}}$ wird zur Anpassung an (3.5.08) wie der Querschnitt eines gedachten Rohres mit kreisrundem Querschnitt behandelt. $d_{i,\text{Zylinderspalt}}$ ist daher der Innendurchmesser dieses gedachten Rohres.

$$d_{i,\text{Zylinderspalt}} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{\text{Zylinderspalt}}}{\pi}} \quad (3.5.09)$$

mit

$A_{\text{Zylinderspalt}}$: Querschnittsfläche des Zylinderspaltes

Zwischenergebnis:

$$\Delta p_{\text{Blende}} = 1.130,9 \text{ mbar}$$

3.5.2.2 Druckverlust der 90°-Umlenkung

Der Druckverlust einer scharfkantigen Strömungsumlenkung kann mit (3.5.10) berechnet werden:

$$\Delta p_{90^\circ\text{-Umlenkung}} = \frac{\zeta \cdot \rho_{\text{Fluid}} \cdot \bar{w}^2}{2} \quad (3.5.10)$$

mit

ζ : Druckverlustbeiwert zeta

ρ_{Fluid} : Dichte des Fluids

\bar{w} : die mittlere Strömungsgeschwindigkeit des fließenden Mediums

$$\zeta = \frac{c_\gamma \cdot c_{\text{Re}} \cdot c_K \cdot c_A}{\sqrt{\frac{R}{d_a}}} \quad (3.5.11)$$

mit

c_γ : Umlenkbeiwert des Winkes γ ; $c_{\beta=90^\circ} = 0,21$

c_{Re} : der Reynolds-Zahl-Beiwert

Es gibt 3 Möglichkeiten:

1. $\text{Re} < 3.000$: Diese Möglichkeit ist auf das vorliegende Berechnungsmodell nicht anwendbar und nur von geringer Praxisrelevanz.

2. $3.000 < \text{Re} < 100.000$: $c_{\text{Re}} = 20,2 \cdot \text{Re}^{-0,25}$

3. $\text{Re} > 100.000$: $c_{\text{Re}} = 1$

c_K : Rauigkeitsbeiwert bei $\text{Re} > 40.000$; $c_K = 1$

c_A : Geometriebeiwert. Bei kreisrunden Rohren ist $c_A = 1$

R : Krümmungsradius eines Bogens. Da der Bogen hier äußerst scharfkantig ist, sei der minimal mögliche Wert, die Hälfte des Rohrdurchmessers, gleich der Krümmungsradius:

$$R = \frac{d_i}{2}$$

d_a : Außendurchmesser des Rohres

Zwischenergebnis für die scharfkantige Umlenkung:

$$\Delta p_{\text{Umlenkung}} = 153,3 \text{ mbar}$$

Die resultieren Parameter sind also:

- nach (3.5.01) eine Ausströmgeschwindigkeit von $\bar{w} = 7,86 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ und
- nach (3.5.02) ein Differenzdruck von $\Delta p_{\text{Zylinderspalt}} = 1.284,2 \text{ mbar}$.

In der Auslegung des Hutverteilers soll versucht werden, diesen Werten möglichst nahe zu kommen. Da aus der Praxis bekannt ist, dass dieser Verteilertyp auch unter modifizierten Einsatzbedingungen (z.B. geringerer Differenzdruck) noch sehr zuverlässig funktioniert, also eine hohe Robustheit* besitzt, ist eine exakte Einhaltung der ermittelten Vorgaben nicht nötig. Aus diesem Grund soll eine Toleranz von 10 % unter- und oberhalb der mittleren Austrittsgeschwindigkeit und 20 % unter- und oberhalb des ermittelten Druckverlustes als akzeptabel betrachtet werden, falls eine genauere Anpassung an die gestellten Vorgaben nicht möglich ist.

Zu bedenken ist, dass bei besonders hohen Temperaturdifferenzen bei der Vorwärmung ein höherer $\Delta p_{\text{Zylinderspalt}}$ angestrebt werden muss, da es sonst zu einer Teilverdampfung der Leichtsieder im Wärmeübertrager kommt. Derartige Einzelfälle müssen jedoch speziell – z.B.

durch Installation einer Druckhaltearmatur direkt vor dem Eingang in die K 001 oder durch Drosselung von Armaturen – behandelt werden. Das besonders robuste*) Verhalten des Verteilers lässt jedoch solche Variationen zu.

*) Als Robustheit ist die Fähigkeit eines Systems definiert, Veränderungen ohne Anpassung seiner anfänglich stabilen Struktur standzuhalten. (Wieland, 2012) Das bedeutet, dass derartige Systeme unter modifizierten Vorgaben statistisch nicht differenzierbare Ergebnisse hinsichtlich Qualität und Quantität ihres Outputs liefern

3.5.2.3 Ermittlung der Spalthöhe für den auszulegenden Fall

Da die Nennweite der zuführenden Rohrleitung für das vorgewärmte Produkt bereits durch den Volumenstrom und eine maximal zulässige mittlere Strömungsgeschwindigkeit festgelegt werden kann, ist die Spaltfläche bis auf einen Freiheitsgrad bereits definiert. Dieser Freiheitsgrad ist die Höhe des Ringspaltes oder einfacher ausgedrückt, der Abstand der Rohrmündung von der Unterseite des Verteilerhutes.

Er lässt sich durch Umstellung von (3.5.01a) ermitteln:

$$h_{Spalt} = \frac{\dot{V}}{\pi \cdot d_{i,Rohr} \cdot \bar{w}} \quad (3.5.01b)$$

Beispielhafte Umsetzung in Excel

Tabelle 3.7: Beispiel für die Berechnung des Hutverteilers in Excel.

| Der Hutverteiler | | | Druckverlust des Hutverteilers | | |
|--|---------------|-----------|--------------------------------|----------------|-------------|
| Spalthöhe des Hutverteilers | | | Rohrlänge | | |
| V ohne Kreislauf | 3,13 | m³/h | 0,442789703 | m | |
| V mit Kreislauf | 3,13 | m³/h | d _{i,Rohr} | 17,3 | mm |
| | | | W _{Rohr} | 3,69 | m/s |
| d _{i,Rohr} | 17,3 | mm | ζ | 0,14 | 1 |
| W _{Spalt} | 7,76 | m/s | m | 3.000,0 | kg/h |
| | | | ρ | 960,0 | kg/m³ |
| h_{Spalt} | 2,1 | mm | η | 0,017 | Pa*s |
| d _{Spalt} | 11,9 | mm | Volumenstrom | 3,13 | m³/h |
| | | | A _{Rohr} | 235,1 | mm² |
| Größe des Verteilerhutes | | | A _{Spalt} | 111,9 | mm² |
| NW Zulauf | DN 15 | | Re | 5.308 | 1 |
| Verteilerhut | DN 50 | | Q _d oder β | 0,476 | 1 |
| | | | K | 0,614 | 1 |
| Hilfstabelle zur Bestimmung der Größe des Verteilerhutes. | | | α | 0,630 | 1 |
| NW Zulauf | NW Hut | | k | 0,085 | mm |
| DN 10 | DN 32 | | c _A | 1 | Kreis-Ø |
| DN 15 | DN 50 | | k/d _{i,Glattrohr} | 0,004913295 | 1 |
| DN 20 | DN 65 | | c _β | 0,21 | für 90° |
| DN 25 | DN 80 | | c _{Re} | 2,366512108 | 1 |
| DN 32 | DN 100 | | c _k | 1 | 1 |
| DN 40 | DN 125 | | R | 8,65 | mm |
| DN 50 | DN 150 | | ζ | 0,703 | 1 |
| DN 65 | DN 200 | | | | |
| DN 80 | DN 250 | | Δp _{Rohrleitung} | 67,6 | mbar |
| DN 100 | DN 300 | | Δp _{Rohrbogen} | 9,2 | mbar |
| DN 125 | DN 450 | | Δp _{Modellblende} | 728,5 | mbar |
| DN 150 | DN 500 | | Δp _{Umlenkung} | 203,1 | mbar |
| DN 200 | DN 600 | | Δp_{Verteiler} | 1.008,4 | mbar |
| DN 250 | DN 800 | | | | |
| DN 300 | DN 900 | | α | 0,8 | 1 |
| DN 350 | DN 1100 | | Δp _{Modellblende} | 451,6 | mbar |
| DN 400 | DN 1200 | | | | |
| | | | ζ | 1,07 | 1 |
| | | | Δp _{Umlenkung} | 309,3 | mbar |

3.5.3 Der Kopf der Kolonne K 001

3.5.3.1 Strömungsgeschwindigkeit der Brüden im oberen Teil der Kolonne

Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit lässt sich sehr leicht aus dem Zylindervolumen herleiten:

$$V = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot h \quad (3.5.12)$$

V : Volumen
 d : Durchmesser
 h : Höhe

Teilt man die Gleichung (3.5.12) durch die Zeit t , so erhält man statt des Volumens V den Volumenstrom \dot{V} und statt der Höhe h die Fließgeschwindigkeit w , hier als mittlere Strömungsgeschwindigkeit \bar{w} dargestellt:

$$\dot{V} = \frac{\pi}{4} \cdot d_i^2 \cdot \bar{w} \quad (3.5.13)$$

\dot{V} : Volumenstrom
 d_i : Innendurchmesser des Rohrstückes
 \bar{w} : mittlere Strömungsgeschwindigkeit

Nach \bar{w} umgestellt, auf praxisübliche Einheiten korrigiert (in den Indizes vermerkt) und alle Konstanten zusammengefasst erhält man die Gleichung:

$$\bar{w}_{m/s} = \frac{4 \cdot \dot{V}_{m^3/h}}{\pi \cdot 3600 \cdot \left(\frac{d_{mm}}{1000}\right)^2} = \frac{4 \cdot 1000^2}{\pi \cdot 3600} \cdot \frac{\dot{V}_{m^3/h}}{d_{mm}^2} \quad (3.5.14a)$$

Mit dem Faktor F werden die Konstanten zusammen gezogen und gleichzeitig die in der Praxis gebräuchlichen Einheiten so kompensiert,

$$F = \frac{4 \cdot 1000^2}{\pi \cdot 3600} = 353,678 \quad [F] = \frac{mm^2 \cdot h}{m^2 \cdot s} \quad (3.5.15)$$

dass die mittlere Strömungsgeschwindigkeit \bar{w} in $\frac{m}{s}$ erhalten wird. Es entsteht eine sehr handliche Gleichung:

$$\bar{w}_{m/s} = F \cdot \frac{\dot{V}_{m^3/h}}{d_{mm}^2} \quad (3.5.14b)$$

mit

$$F = 353,678$$

3.5.3.2 Anströmgeschwindigkeit des Tröpfchenabscheiders

Der Anspruch an die mittlere Strömungsgeschwindigkeit im oberen Teil der Kolonne wird durch die Anströmgeschwindigkeit des Tröpfchenabscheiders definiert. Dies ist eine Herstellervorgabe, die vor allem von dessen Bauart abhängt und muss mit dem betreffenden Lieferanten abgesprochen werden. Aus diesem Grund soll die Strömungsgeschwindigkeit im oberen Teil der Kolonne $\bar{w}_{Brüden,Kopf}$ ein Vorgabeparameter sein.

Der Volumenstrom $\dot{V}_{Brüden}$ lässt sich mittels der Thermischen Zustandsgleichung idealer Gase

$$p \cdot V = n \cdot R_m \cdot T \quad (3.5.16)$$

ermitteln. Hier muss nur die Stoffmenge n in einen Stoffmengenstrom \dot{n} und das Volumen V in einen Volumenstrom \dot{V} umgewandelt werden. Als Ergebnis erhält man:

$$\dot{V}_{Brüden} = \frac{\dot{n}_{Brüden} \cdot R_m \cdot T_{Brüden}}{p_{K001}} \quad (3.5.17)$$

Der Stoffmengenstrom ergibt sich aus

$$\dot{n}_{Brüden} = \frac{\dot{m}_{Brüden}}{M_{LP}} = \frac{\dot{m}_{Feed} \cdot \omega_{LP,Feed} - \dot{m}_{Sumpf} \cdot \omega_{LP,Sumpf}}{M_{LP}} \quad (3.5.18)$$

Die universelle Molare Gaskonstante R_m muss durch die spezifische Konstante für die leicht siedende Komponente ersetzt werden. Diese kann mit der Gleichung

$$R_s = \frac{R_m}{M} \quad (3.5.19)$$

berechnet werden.

Die Brüdentemperatur $T_{Brüden}$ ist ein Vorgabewert, der durch Laborversuche im Vorfeld ermittelt wurde. Zur Überprüfung der Plausibilität dieses Wertes kann man einen unteren und oberen Grenzwert bestimmen. Für $T_{Brüden}$ gilt dann:

$$T_{Siede,LS} \leq T_{Brüden} \leq T_{EP} \quad (3.5.20)$$

Die Brüdentemperatur hat also mindestens den Wert der Siedetemperatur der Leichtsieder bei Kolonnendruck, $T_{Siede,LS}$, und maximal den des Produktes im Kolonnensumpf, T_{EP} .

$T_{Siede,LS}$ lässt sich durch Umformen der Antoine-Gleichung (3.5.21) zu (3.5.22) berechnen:

$$\log p = A - \frac{B}{T + C} \quad (3.5.21)$$

(Mersmann, 2005)

$$T_{Siede,LS} = \frac{-AC + B + C \log p_{Dampf}}{A - \log p_{Dampf}} \quad (3.5.22)$$

mit

$T_{Siede,LS}$: Siedetemperatur der Leichtsieder bei p_{Dampf}

p_{Dampf} : Dampfdruck der Leichtsieder bei $T_{Siede,LS}$

A, B und C : Antoine-Parameter der leicht siedenden Komponente
(stoffspezifische Parameter)

Als Ergebnis erhält man für die Bestimmung des Brüdenstromes die Gleichung (3.5.23a/b):

$$\dot{V}_{Brüden} = \frac{\frac{\dot{m}_{Feed} \cdot \omega_{LS,Feed} - \dot{m}_{EP} \cdot \omega_{LS,EP}}{M_{LS}} \cdot \frac{R_m}{M_{LS}} \cdot \frac{-A \cdot C + B + C \cdot \log(p_{K001})}{A - \log(p_{K001})}}{p_{K001}} \quad (3.5.23a)$$

bzw.

$$\dot{V}_{Brüden} = \frac{M_{LS}^2 \cdot A - \log(p_{K001})}{p_{K001} \cdot (\dot{m}_{Feed} \cdot \omega_{LS,Feed} - \dot{m}_{EP} \cdot \omega_{LS,EP}) \cdot R_m \cdot [-A \cdot C + B + C \cdot \log(p_{K001})]} \quad (3.5.23b)$$

mit

$\dot{V}_{Brüden}$: Volumenstrom der Brüden

M_{LS} : Molare Masse der Leichtsieder

p_{K001} : Kolonnendruck (absolut)

R_m : Molare Gaskonstante

\dot{m}_{Feed} : Massenstrom Einsatzprodukt

$\omega_{LS,Feed}$: Anteil der Leichtsieder im Einsatzprodukt

\dot{m}_{EP} : Massenstrom des getrockneten Produktes

$\omega_{LS,EP}$: Anteil der Leichtsieder im getrockneten Produkt

Mit der Brüdenmenge und der Vorgabe der Anströmgeschwindigkeit des Demisters lässt sich nun der Durchmesser des oberen Kolonnenteils berechnen. Als Grundlage dient wieder (3.5.12). Die Einheiten (siehe Index) berücksichtigt und nach $d_{i,[mm]}$ aufgelöst erhält man:

$$d_{i,[mm]} = 18,806 \cdot \sqrt{\frac{\dot{V}_{[m^3/h]}}{\bar{w}_{[m/s]}}} \quad (3.5.14c)$$

$\dot{V}_{[m^3/h]}$: Volumenstrom in m^3/h

$d_{i,[mm]}$: Innendurchmesser des Rohrstückes in mm

$\bar{w}_{[m/s]}$: mittlere Strömungsgeschwindigkeit in m/s

18,806 : Ein Faktor, um Konstanten zusammenzufassen und Einheiten zu kompensieren:

$$\sqrt{\frac{4 \cdot \left(1.000 \frac{mm}{m}\right)^2}{\pi \cdot 3.600 \frac{s}{h}}} = 18,806 \frac{mm \cdot h}{m \cdot s}$$

3.5.3.3 Die Höhe des oberen Kolonnenteils

Die Höhe des oberen Kolonnenteils setzt sich aus drei Teilen zusammen:

- der Abschnitt unter dem Tröpfchenabscheider
- der Abschnitt des Tröpfchenabscheiders
- der Abschnitt über dem Tröpfchenabscheider

Der Abschnitt unter dem Tröpfchenabscheider hat zwei Aufgaben. Er dient als Beruhigungszone. Es soll damit eine gleichmäßige Geschwindigkeitsverteilung über den gesamten Querschnitt des Innendurchmessers und damit eine gleichmäßige Beanspruchung des Tröpfchenabscheiders erreicht werden. Außerdem soll aufspritzen größeren Tröpfchen ein Herabfallen ermöglicht werden. Die Höhe dieses Bereiches wird auf das Doppelte des Innendurchmessers festgelegt.

Der zweite Abschnitt hängt lediglich von der Höhe des Tröpfchenabscheiders ab.

Der dritte Abschnitt dient der optimalen Nutzung des Demisterquerschnitts: Würde beispielsweise das Brüdenrohr direkt auf dem Tröpfchenabscheider aufsitzen, so würde dieser in einer kegelstumpfähnlichen Geometrie mit nach oben zunehmender Strömungsgeschwindigkeit durchströmt werden. Um diesem Effekt entgegenzuwirken, muss der Innendurchmesser über dem Abscheider noch eine gewisse Strecke fortgeführt werden und kann erst danach verengt werden. Diese Höhe soll den Wert des Innendurchmessers haben.

So lässt sich die Höhe des oberen Kolonnenteils folgendermaßen formulieren:

$$\begin{aligned} h_{oben,K\ 001} &= d_{i,oben} \cdot 2 + h_{TA} + d_{i,oben} \cdot 1 \\ &= h_{TA} + 3 \cdot d_{i,oben} \end{aligned} \quad (3.5.24)$$

mit

$h_{oben,K\ 001}$: Höhe des oberen Kolonnenteils

$d_{i,oben}$: Innendurchmesser des oberen Kolonnenteils

h_{TA} : Höhe des Tröpfchenabscheiders

3.5.4 Sumpf der K 001

Das Volumen des Kolonnensumpfes entscheidet über die Regelbarkeit des Standes und das Anfahrverhalten. Da die Anlage zunächst mit dem Kreislauf angefahren werden sollte, kann man als untere Grenze für das Sumpfvolumen das Volumen der für die Kreislauffahrt zu befahrenen Rohrleitungen und Apparate definieren. Dabei ist zu beachten, dass die Feedleitungen und der W 001 nicht berücksichtigt werden, da sie durch den Auffüllprozess selbst schon angefüllt werden:

$$V_{\Sigma} \geq V_{P002} + V_{00-H-002} + V_{00-H-004} \quad (3.5.24)$$

mit

- V_{Σ} : Summe der Volumina aller im Kreislauf zu befüllender Rohrleitungen und Apparate
- V_{P002} : freies Volumen der P 001
- $V_{00-H-002}$: Volumen der Leitung 00-H-002
- $V_{00-H-004}$: Volumen der Kreislaufleitung 00-H-004

Auch die Leitung 00-H-001 kann bei dieser Überlegung ausgeklammert werden, da sie während der Befüllung der K 001 vor dem Anfahren ohnehin als erstes voll läuft. Da es jedoch unüblich ist, einen Apparat zum Anfahren voll aufzufüllen, um ihn dann bei Inbetriebnahme eines Kreislaufes komplett zu entleeren, ist es sinnvoll, diesen Minimalwert deutlich zu überschreiten. Ein Szenario, bei dem die Kolonne zunächst bis auf 80 % des maximalen Füllstandes aufgefüllt wird und nach Befüllung der Rohrleitungen ein Niveau von etwa 30 % erreicht, ist deutlich praxisnäher. So lässt sich festlegen, dass das minimale Sumpfvolumen eher in der doppelten Summe der von (3.5.24) einbezogenen Rohrleitungen angesiedelt sein sollte:

$$V_{\min, \text{Sumpf}} \approx 2 \cdot W_{\Sigma} \quad (3.5.25)$$

3.5.4.1 Die Pufferzeit (hold up time)

Die Pufferzeit gibt dem Anlagenpersonal die Möglichkeit, bei Ausfall von Apparaturen oder Regeltechnik zu reagieren, ohne, dass sofort die gesamte Anlage abgestellt werden muss. Es soll ein kritisches Szenario überlegt werden, wonach die Pufferzeit ausgelegt wird. Dies soll der gleichzeitige Ausfall von P 001 und das Öffnen der Standregelarmatur der K 001 im Normalbetrieb sein. Nun soll ein Zeitraum angesetzt werden, der es dem Anlagenpersonal ermöglichen sollte, die Anlage in einen sicheren Zustand zu versetzen. Dies könnte entweder das Beheben der Störung oder ein geregeltes Abfahren der Anlage sein. Üblich sind hier bei kleineren Anlagen etwa 2 bis 5 Minuten, bei größeren Anlagen etwas größere Zeiträume als 5 Minuten. Da Trockneranlagen eher zu den kleineren Anlagen zu zählen sind, soll eine Pufferzeit von 3 Minuten gewählt werden.

Es gilt also das Volumen zu finden, das sich innerhalb von 3 Minuten durch die voll geöffnete Standregelarmatur der K 001 fahren lässt. Dieser Wert ist das Volumen, das die K 001 im Normalbetrieb vorhalten muss und ergibt sich aus dem K_{VS} der Armatur. Für die Auslegung von Regelarmaturen findet man beim Hersteller Samson folgende Regel:

$$K_{VS} \approx 1,3 \cdot K_V \quad (3.5.26)$$

(Samson AG, 27.03.2014)

mit

- K_{VS} : Durchflusskoeffizient für die voll geöffnete Armatur, gelegentlich auch als $K_{V100\%}$ bezeichnet.

K_V : Durchflusskoeffizient für die halb geöffnete Armatur (im Betriebsbereich), auch als $K_{V50\%}$ bezeichnet.

Überträgt man die Randbedingungen dieser Koeffizienten, so erkennt man, dass sie sich gut auf den Volumen- oder Massenstrom übertragen lassen. Damit lässt sich der maximale Volumenstrom aus der K 001 abschätzen:

$$\dot{V}_{\max,EP} \approx 1,3 \cdot \dot{V}_{EP} \quad (3.5.27)$$

Ein genauere Wert würde sich beim Vergleich von Anlagen- und Pumpenkennlinie ergeben. Hier würde man auch erkennen, dass $\dot{V}_{\max,EP}$ etwas geringer ausfällt, da der ansteigende Strömungswiderstand der Rohrleitungen und der restlichen Armaturen bei erhöhtem Volumenstrom hinzukommt und der Pumpendruck (bei Kreiselpumpen) etwas abfällt. Als zielführendere wenngleich ungenauere Näherung soll jedoch (3.5.27) ausreichen, wie noch am Zahlenbeispiel weiter unten gezeigt wird. Demnach müsste V_{Puffer} etwa in folgender Größenordnung liegen:

$$V_{Puffer} \approx \dot{V}_{\max,EP} \cdot t_{Puffer} \quad (3.5.28a)$$

Zahlenbeispiel für einen Anwendungsfall:

Eine Trockneranlage erzeuge etwa 3 m^3 Hauptprodukt. Die Pufferzeit betrage 3 min.

$$\dot{V}_{EP} = 3 \text{ m}^3 / \text{h} ; t_{Puffer} = 3 \text{ min}$$

$$\begin{aligned} V_{Puffer} &\approx 1,3 \cdot \dot{V}_{EP} \cdot t_{Puffer} \\ &= 1,3 \cdot 3 \text{ m}^3 / \text{h} \cdot 0,05 \text{ h} \\ &= 0,195 \text{ m}^3 \end{aligned} \quad (3.5.28b)$$

Bei einer Kolonne mit einem Innendurchmesser von 1 m würde dieses Volumen etwa einem halben Meter Länge entsprechen:

$$\begin{aligned} h_{Puffer} &= \frac{4 \cdot V_{Puffer}}{\pi \cdot d_{i,K001}^2} \\ &= 1,27324 \cdot \frac{0,39 \text{ m}^3}{(1 \text{ m})^2} \\ &= 0,497 \text{ m} \end{aligned} \quad (3.5.29)$$

mit

V_{Puffer} : das Puffervolumen der Kolonne

h_{Puffer} : dem Puffervolumen entsprechende Höhe der Kolonne

$d_{i,K001}$: Innendurchmesser der Kolonne

Soll das Puffervolumen bei Normalbetrieb (normaler Füllstand sei 50 %) vorhanden sein, so ergibt sich hieraus die Höhendifferenz, die die Standmessung abdecken muss. Dieser Parameter ist der Soll-Messbereich des Transmitters für die Messstelle 00L001.

$$\Delta h_{00L001} = \frac{h_{\text{Puffer}} \cdot 100}{h_{\text{mess,normal}}} \quad (3.5.30)$$

mit

Δh_{00L001} : Messbereich der Standmessung

h_{Puffer} : dem Puffervolumen entsprechende Höhe der Kolonne

$h_{\text{mess,normal}}$: Füllstand der Kolonne bei Normalbetrieb in % der Standmessung

3.5.4.2 Reduzierung des Querschnittes zwischen oberem und unterem Kolonnenteil

Da der untere und obere Teil der Kolonne einen unterschiedlichen Durchmesser aufweisen, ist eine Anpassung durch eine Reduzierung notwendig. Diese hat die Form eines Kegelstumpfabschnittes und liegt direkt über dem Niveau des Verteilers. Vorteilhaft erweist sich der Einbau eines Schauglases an dieser Stelle, da die Neigung des Kegelstumpfabschnittes nach unten in die Kolonne zeigt. Somit ist im Schauglas der Verteiler und gleichzeitig die im Sumpf stehende Flüssigkeitsoberfläche erkennbar. Die genaue Ausführung bezüglich Länge und Winkel ist von mehreren Parametern wie z.B. der Masse des oberen Kolonnenteils oder der Differenz der Durchmesser von oberem und unterem Kolonnenteil abhängig. Dieser Wert ist jedoch nicht prozessrelevant und kann dem Behälterbauer überlassen werden.

Somit lässt sich die Gesamthöhe der K 001 aus der Summe der einzelnen Höhen abschätzen:

$$h_{K\ 001} = h_{\text{oben,K}\ 001} + h_{\text{Zwischenstück}} + h_{\text{Dampfraum}} + \Delta h_{00L001} \quad (3.5.31)$$

$h_{\text{oben,K}\ 001}$: Höhe des oberen Kolonnenteils, siehe (3.5.24)

$h_{\text{Zwischenstück}}$: Höhe der Reduzierung zwischen oberem und unterem Kolonnenabschnitt

$h_{\text{Dampfraum}}$: Dampfraumhöhe

Δh_{00L001} : Messbereich der Standmessung

Die Höhe des Abschnittes zwischen Unterkante des Verteilerhutes und unterer Schweißnaht der Reduzierung sei hier mit einem Pauschalwert 30 cm festgelegt. Die Höhe der beiden Klöpperböden am oberen und unteren Ende der Kolonne seien unberücksichtigt.

3.6 Kreislauffahrweise

Die Frage, ob die Notwendigkeit einer Kreislauffahrweise besteht oder ob der Produktstrom linear durch die Anlage gefahren werden kann, lässt sich qualitativ durch den Vergleich folgender Temperaturen beantworten:

1. der aus der Dampfdruckstufe p_{Dampf} resultierende Siedepunkt von Wasser,
2. die maximale Temperaturdifferenz, $\Delta T_{max,WÜ}$, im WÜ zwischen Dampf und Produkt sowie
3. (wenn vorhanden bzw. festgelegt) die maximale Vorwärmtemperatur zur Verhinderung von ungewollten thermisch begünstigten Stoffumwandlungen wie z.B. einer Pyrolyse.

Ausgehend von der Annahme, dass die Problematik von Punkt 3 in den Vorversuchen berücksichtigt wurde, ist jedoch nur p_{Dampf} und $\Delta T_{max,WÜ}$ von Relevanz.

Mit der Antoine-Gleichung und den Parametern für Wasser lässt sich die Kondensationstemperatur bestimmen. Subtrahiert man die von $\Delta T_{max,WÜ}$ abhängige logarithmische Temperaturdifferenz ΔT_{ln} davon, so ergibt sich ein Wert, der mindestens so groß wie $T_{vorwärm}$ sein muss.

3.6.1 Qualitative Ermittlung der Notwendigkeit einer permanenten Kreislauffahrweise

Um nun festzustellen, ob ein lineares Durchfahren des Produktstroms möglich ist, muss die in den Vorversuchen ermittelte $T_{vorwärm}$ mit dem der Dampfdruckstufe entsprechenden Siedepunkt des Wassers verglichen werden. Ist die Temperatur niedriger als $T_{vorwärm}$, so ist eine Kreislauffahrweise zwingend erforderlich.

Der Eindeutigkeit halber muss nun die Kreislaufmenge definiert werden: $\dot{m}_{Kreislauf}$ sei als der Massenstrom an Endprodukt definiert, der durch die Kreislaufleitung, 00-H-004, strömt. Es handelt sich also um die Menge des von der P 002 geförderten Produktes $\dot{m}_{P\ 002}$ abzüglich der Endprodukt-Abgabemenge \dot{m}_{EP} :

$$\dot{m}_{Kreislauf} = \dot{m}_{P\ 002} - \dot{m}_{EP} \quad (3.6.01a)$$

Daraus folgt, dass der den W 001 durchströmende Stoffstrom $\dot{m}_{W\ 001}$ die Summe aus $\dot{m}_{Kreislauf}$ und \dot{m}_{Feed} sein muss und vom Vorlauf des W 001 bis zum Eingang E1 der K 001 den gleichen Wert hat:

$$\dot{m}_{W\ 001} = \dot{m}_{Vorlauf,K\ 001} = \dot{m}_{Kreislauf} + \dot{m}_{Feed} = \dot{m}_{Kreislauf} + \dot{m}_{EP} + \dot{m}_{Brüden} \quad (3.6.02)$$

Um die Kreislaufmenge zu bestimmen, soll hier nun zunächst $\dot{m}_{W\ 001}$ ermittelt werden.

Da die Abkühlung des Produktes in der Kolonne allein aus der Verdampfung und Entspannung der sich verflüchtigenden Brüden resultiert, lässt sich $T_{vorwärm}$ des Vorversuches variabel gestalten. Wenn die Sumpftemperatur der Kolonne, T_{EP} , einen Wert erreicht, der eine ausreichende Trocknung gewährleistet, hat dies zur Folge, dass ein Freiheitsgrad für eine variable Kreislaufmenge entsteht: Dem zu erwärmenden Produkt muss lediglich die für die Verdampfung der Leichtsieder nötige Wärmemenge in Form einer Temperaturdifferenz, $\Delta T_{EP-vorwärm}$, oberhalb von T_{EP} übertragen werden.

$$\Delta T_{\text{vorwärm-EP}} = T_{\text{vorwärm}} - T_{\text{EP}} \quad (3.6.03a)$$

$\Delta T_{\text{EP-vorwärm}}$ ist u.a. von der Kreislaufmenge selbst abhängig, da diese den Anteil an Einsatzprodukt und damit die Mischtemperatur des Produktes von dem W 001 bestimmt. Hier bahnt sich eine Iteration an. Darum ist es notwendig, feste Bezugspunkte zu definieren. Der Iterationsprozess würde sonst zu keinen sinnvollen Ergebnissen führen.

Folgende Festlegungen werden getroffen:

$$c_{P,W 001} = \text{Max}(c_{P,Feed}; c_{P,EP}) \quad (\text{nur als Startbedingung}) \quad (3.6.04)$$

mit

$c_{P,W 001}$: spez. Wärmekapazität des Gemisches aus Endprodukt und Feed, das den W 001 durchströmt.

$$\Delta T_{\text{vorwärm-EP}} = T_{\text{vorwärm}} - T_{\text{EP}} \leq 20K \quad \text{jedoch mit einem Maximalwert von } 20K \quad (3.6.03b)$$

$\dot{Q}_{\text{vorwärm}}$ ergibt sich aus (3.2.06) bzw. (3.2.07)

$$\dot{m}_{W 001} = \frac{\dot{Q}_{\text{vorwärm}}}{c_{p,W 001} \cdot (\Delta T_{\text{vorwärm-EP}})} \quad (3.6.05)$$

Mit $\dot{m}_{W 001}$ lässt sich nun das Mischungsverhältnis von Feed- und Kreislaufmenge und damit ein exakterer $c_{P,Kreislauf}$ bestimmen:

$$c_{P,W 001} = \frac{\dot{m}_{W \text{ Feed}} \cdot c_{P,Feed} + (\dot{m}_{W 001} - \dot{m}_{W \text{ Feed}}) \cdot c_{P,EP}}{\dot{m}_{W 001}} \quad (3.6.06)$$

Im nächsten Schritt wird $c_{P,W 001}$ in (3.6.05) eingesetzt, um den zweiten Iterationswert für $\dot{m}_{W 001}$ zu erhalten. Der ganze Vorgang wird wiederholt, bis die Differenzen für $\dot{m}_{W 001}$ zwischen den Iterationsschritten nicht mehr nennenswert sind. Dies sollte etwa nach der 3. Wiederholung der Fall sein.

Um die Kreislaufmenge zu erhalten, muss nur noch die iterierte Menge für $\dot{m}_{W 001}$ in (3.6.01a) eingesetzt werden.

3.7 Anlagenkennlinien

Allgemeine Gleichung zur Ermittlung eines Punktes der Anlagenkennlinie:

$$H_{\text{Anlage}} = \frac{p_{\text{aus}} - p_{\text{ein}}}{\rho_{\text{Fluid}} \cdot g} + \frac{\bar{w}_a^2 - \bar{w}_e^2}{2 \cdot g} + (h_{\text{aus}} - h_{\text{ein}}) + H_{\text{Verl.}} \quad (3.7.01)$$

$p_{\text{aus}} - p_{\text{ein}}$: statische Druckdifferenz zwischen Ausgangs- und Eingangspunkt

\bar{w} : mittlere Strömungsgeschwindigkeit

g : Erdbeschleunigung

ρ_{Fluid} : Dichte des geförderten Mediums

$h_{\text{aus}} - h_{\text{ein}}$: geodätische Höhendifferenz zwischen Ausgangs- und Eingangspunkt

$H_{verl.}$: Druckhöhenverlust: Der aus Strömungswiderständen resultierende Druckverlust, dargestellt als Druckhöhe.

Da es sich bei allen Höhenangaben um Drücke handelt, können die Druckhöhenverluste auch in einen Druck in Millibar umgerechnet werden. Die spätere Umrechnung in eine Höhe erfolgt dann gemäß (3.7.02).

$$H_{verl.} = \frac{\Delta p_{verl.}}{\rho_{Fluid} \cdot g} \quad (3.7.02)$$

Der hydrostatische Teil von (3.7.01) besteht aus zwei Druck- und zwei Höhenangaben. Letztere stellt die Höhendifferenz dar, die das Fluid zu überwinden hat. So kann man z.B. die zu überwindenden Höhendifferenzen für jeden einzelnen Leitungsabschnitt vor Ort messen und zu einer Gesamtdifferenz aufaddieren. Der Vorteil hierbei ist, dass kein absoluter Nullpunkt festgelegt werden muss. Man kann relativ einfach die senkrechte Strecke direkt messen und als Differenz $\Delta h_{00-F-0##}$ in die Summengleichung eintragen.

Beispiel:

$$\Delta h_{gesamt} = (h_{aus,00-F-001} - h_{ein,00-F-001}) + \Delta h_{00-F-002} + \dots \text{ usw.} \quad (3.7.03)$$

Wie eingangs erwähnt, können für die vorliegende Arbeit keine Messwerte verwendet werden. Stattdessen werden Standardwerte verwendet, die sich am R&I-Fließbild (siehe Anlage B) orientieren: Alle dort waagrecht gezeichneten Leitungswege werden als auf einer Höhe befindlich angesehen. Die beiden senkrechten Wege ergeben sich für:

- 00-H-001 aus dem erforderlichen NPSH der P 002
- 00-H-002 aus dem erforderlichen NPSH der P 002 zuzüglich eines Aufschlages von 2 Metern

Die Differenz der beiden Drücke, $p_{aus} - p_{ein}$, stellt die statische Druckdifferenz zwischen ebendiesen beiden Punkten dar. Da sich das Konzept der Trocknung die Möglichkeit der Kreislauffahrweise nach Erfordernis offen hält, kann $p_{aus} - p_{ein}$ erst nach Definition der Fälle für die Pumpenschaltungen (welche Rohrleitungswege zur Druckseite welcher Pumpe gehören) festgelegt werden. So ist z. B. $p_{aus} - p_{ein}$ für die P 002 im Anfahrbetrieb gleich Null, da die Pumpe in dem Fall aus der K 001 und wieder in ebendiese zurück fördert. Die erwähnten Fälle werden weiter unten definiert (siehe Tabelle 3.7.01 und 3.7.02).

Damit die auszulegende Pumpe tatsächlich auch Medium fördern kann, muss der von ihr erzeugte Druck etwas höher sein. Üblich sind Aufschläge in der Größenordnung von einem Bar. Diese Aufschläge erscheinen erstmals in der Auslegung der zu planenden Pumpe.

Aus den möglichen Fahrweisen (mit und ohne permanenten Kreislauf bzw. Anfahr- und Normalbetrieb) ergeben sich für jede Pumpe vier Fälle:

1. kein permanenter Kreislauf
 - Normalbetrieb
 - Anfahrbetrieb
2. mit permanentem Kreislauf
 - Normalbetrieb
 - Anfahrbetrieb

Die zu durchfahrenden Apparate und Leitungsabschnitte sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 3.8: Liste der zu durchfahrenden Apparate und Leitungsabschnitte für die Pumpe P 001

| P 001 | | | |
|---|------------|---------------|------------|
| <i>Fahrweise ohne permanenten Kreislauf</i> | | | |
| Fall 1 | | Fall 2 | |
| Normalbetrieb | | Anfahrbetrieb | |
| Saugseite | Druckseite | Saugseite | Druckseite |
| 00-F-001 | 00-F-002 | 00-F-001 | 00-F-002 |
| | 00-F-003 | | |
| | W 001 | | |
| | 00-F-004 | | |
| | K 001 | | |
| <i>Fahrweise mit permanentem Kreislauf</i> | | | |
| Fall 3 | | Fall 4 | |
| Normalbetrieb | | Anfahrbetrieb | |
| Saugseite | Druckseite | Saugseite | Druckseite |
| 00-F-001 | 00-F-002 | 00-F-001 | 00-F-002 |

Für den Anfahrbetrieb und den Normalbetrieb mit permanentem Kreislauf soll der Endpunkt der zu durchfahrenden Strecke der Eingang in den Kreislauf sein. Dies ist das T-Stück, an dem sich die Leitungen 00-F-001, 00-F-002 und 00-H-004 treffen. Der statische Druck an diesem Punkt ist der Ausgangsdruck p_{aus} mit der Höhe h_{aus} für die P 001.

Tabelle 3.8: Liste der zu durchzufahrenden Apparate und Leitungsabschnitte für die Pumpe P 002

| P 002 | | | |
|---|------------|---------------|------------|
| Fahrweise <i>ohne</i> permanenten Kreislauf | | | |
| Fall 1 | | Fall 2 | |
| Normalbetrieb | | Anfahrbetrieb | |
| Saugseite | Druckseite | Saugseite | Druckseite |
| 00-H-001 | 00-H-002 | 00-H-001 | 00-H-002 |
| | 00-H-003 | | 00-H-004 |
| | | | 00-F-003 |
| | | | W 001 |
| | | | 00-F-004 |
| | | | K 001 |
| Fahrweise <i>mit</i> permanentem Kreislauf | | | |
| Fall 3 | | Fall 4 | |
| Normalbetrieb | | Anfahrbetrieb | |
| Saugseite | Druckseite | Saugseite | Druckseite |
| 00-F-001 | 00-F-002 | 00-H-001 | 00-H-002 |
| | 00-H-003 | 00-H-004 | 00-H-004 |
| | | 00-F-003 | 00-F-003 |
| | | W 001 | W 001 |
| | | 00-F-004 | 00-F-004 |
| | | K 001 | K 001 |

Wie man in Tabelle 3.1 und 3.2 leicht erkennen kann, treten bei beiden Pumpen Fälle auf, die auf identische Weise gelöst werden können, da die gleichen Rohrleitungsabschnitte durchfahren werden müssen. Dies sind bei der P 001 die Fälle 2, 3 und 4 sowie bei der P 002 die Fälle 2 und 4. Daraus ergeben sich für die P 001 zwei und für die P 002 drei verschieden zusammengesetzte Gleichungen für die Anlagenkennlinie.

$$H_{Anlage, P 001} = \frac{p_{VB} - p_{K 001}}{\rho_{Feed} \cdot g} + \frac{\bar{w}_a^2 - \bar{w}_e^2}{2 \cdot g} + (h_{VB} - h_{Hut, K 001}) + H_{verl.} \quad (3.7.04)$$

mit

$p_{VB} - p_{K 001}$: statische Differenz der Innendrucke zwischen Vorlagebehälter und K 001

\bar{w} : mittlere Strömungsgeschwindigkeit

g : Erdbeschleunigung

ρ_{Fluid} : Dichte des geförderten Mediums

$h_{VB} - h_{Hut, K 001}$: geodätische Höhendifferenz zwischen minimalem Flüssigkeitsstand im Vorlagebehälter und Höhe des Hutverteilers in der K 001

$H_{Verl.}$: Druckhöhenverlust: Der aus Strömungswiderständen resultierende Druckverlust, dargestellt als Druckhöhe.

P 001, Fall 1

$$\Delta p_{P001,1} = \Delta p_{00-F-001} + \Delta p_{00-F-002} + \Delta p_{00-F-003} + \Delta p_{W001} + \Delta p_{00-F-004} + \Delta p_{K001} \quad (3.7.05)$$

$$\Delta p_{00-F-001} = \Delta p_{Rohrl.} + \Delta p_{00MC001} \quad (3.7.06)$$

$$\Delta p_{00-F-002} = \Delta p_{Rohrl.} + \Delta p_{00MC002} + \Delta p_{00MC003} + \Delta p_{00MC005} + \Delta p_{00F001} + \Delta p_{00FC001} + \Delta p_{00CV001} \quad (3.7.07)$$

$$\Delta p_{00-F-003} = \Delta p_{Rohrl.} + \Delta p_{00MC006} \quad (3.7.08)$$

$$\Delta p_{00-F-004} = \Delta p_{Rohrl.} + \Delta p_{00MC008} \quad (3.7.09)$$

P 001, Fall 2, 3 und 4

$$\Delta p_{P001,234} = \Delta p_{00-F-001} + \Delta p_{00-F-002} \quad (3.7.10)$$

P 002, Fall 1

$$\Delta p_{P002,1} = \Delta p_{00-H-001} + \Delta p_{00-H-002} + \Delta p_{00-H-003} \quad (3.7.11)$$

$$\Delta p_{00-H-001} = \Delta p_{Rohrl.} + \Delta p_{00MC009} \quad (3.7.12)$$

$$\Delta p_{00-H-002} = \Delta p_{Rohrl.} + \Delta p_{00MC010} \quad (3.7.13)$$

$$\Delta p_{00-H-003} = \Delta p_{Rohrl.} + \Delta p_{00MC011} + \Delta p_{00F002} + \Delta p_{00LV001} + \Delta p_{00MC013} \quad (3.7.14)$$

P 002, Fall 2 und 4

$$\Delta p_{P002,24} = \Delta p_{00-H-001} + \Delta p_{00-H-002} + \Delta p_{00-H-004} + \Delta p_{00-F-003} + \Delta p_{W001} + \Delta p_{00-F-004} + \Delta p_{K001} \quad (3.7.15)$$

$$\Delta p_{00-H-004} = \Delta p_{Rohrl.} + \Delta p_{00MC014} + \Delta p_{00CV002} \quad (3.7.16)$$

P 002, Fall 3

$$\Delta p_{P002,3} = \Delta p_{00-H-001} + \Delta p_{00-H-002} + \Delta p_{00-H-003} \quad (3.7.17)$$

mit der Bedingung

$$\Delta p_{00-H-003} = \Delta p_{00-H-004} + \Delta p_{00-F-003} + \Delta p_{W001} + \Delta p_{00-F-004} \quad (3.7.18)$$

mit

$\Delta p_{00-F-0##}$: Druckverlust des Rohrleitungsabschnittes 00-F-0## inklusive aller Armaturen

$\Delta p_{Rohrl.}$: nur durch das Rohr erzeugter Druckverlust (exklusive Armaturen und nur für den jeweiligen in der Gleichung angegebenen Rohrleitungsabschnitt)

$\Delta p_{00MC0##}$: der von der Armatur 00MC0## erzeugte Druckverlust

Die Anpassung der Druckverluste beider Leitungsstränge muss entweder über den K_V der Regelarmatur 00LV001 auf der einen Seite oder durch Setzen einer Lochscheibe in der Leitung 00-H-004 auf der anderen Seite geschehen.

p_{aus} und p_{ein}

$P_{aus,P001}$

$$\text{Fall 1: } P_{aus,P001} = P_{K001} \quad (3.7.19)$$

$$\text{Fall 2, 3 \& 4: } P_{aus,P001} = P_{K001} - \Delta p_{00-H-001} + \Delta p_{P002} - \Delta p_{00-H-004} \quad (3.7.20)$$

$P_{ein,P001}$

Im Vorlagebehälter soll Normaldruck herrschen.

$$P_{ein,P001} = P_{Luft} \quad (3.7.21)$$

$P_{aus,P002}$

$$\text{Fall 1: } P_{aus,P002} = P_{Luft} \quad (3.7.22)$$

Der Innendruck des Behälters für das Endprodukt soll ebenfalls unter Normaldruck stehen.

$$\text{Fall 2 \& 4: } P_{aus,P002} = P_{K001} \quad (3.7.23)$$

Fall 3: Es gilt (3.7.22) und (3.7.23).

Wie bereits erwähnt, fördert die P 002 im Fall 3 in die Kolonne und gleichzeitig in den Behälter für Endprodukt. Für beide Wege muss die Förderhöhe bestimmt werden und der Weg mit dem niedrigeren Wert muss durch Erhöhung der Druckdifferenz Weg mit dem höheren angepasst werden. Die genaue Verfahrensweise wird weiter unten beschrieben.

Sind die zur Anwendung kommenden Fälle (Normal- und Anfahrbetrieb) identifiziert worden, kann die Haltedruckhöhe mit (3.7.01) bestimmt werden. Auf Grund der unterschiedlichen Bedingungen zwischen den genannten Betriebsarten, wird es Unterschiede geben. Um diese auszugleichen, soll folgende Methode angewandt werden:

1. Ermittlung der Differenz der Betriebspunkte zwischen Anfahr- und Normalbetrieb:

$$\Delta H_{Anlage} = H_{Anlage,anfahr} - H_{Anlage,normal} \quad (3.7.24)$$

2. Ermittlung des Öffnungsdurchmessers einer Lochscheibe für $|\Delta H_{Anlage}|$ im

Betriebspunkt. Aus (3.5.03a) folgt:

$$A_{Blende} = \sqrt{\frac{\dot{V} \cdot \rho_{Fluid}}{2 \cdot \Delta p_{Blende} \cdot \alpha^2}} \quad (3.5.03b)$$

bzw.

$$d_{Blende} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{\dot{V} \cdot \rho_{Fluid}}{2 \cdot \Delta p_{Blende} \cdot \alpha^2}}} \quad (3.5.03c)$$

mit

d_{Blende} : Innendurchmesser der Blendenöffnung

\dot{V} : Volumenstrom

ρ_{Fluid} : Dichte des Fluids

Δp_{Blende} : Der von der Blende zu erzeugende Differenzdruck

α : Durchflusszahl, siehe (3.5.04), (3.5.05) und (3.5.06)

Anmerkung: Da α indirekt von d_{Blende} abhängig ist, ist zur Ermittlung der Blendenöffnung eine Iteration nötig.

3. Ist $\Delta H_{Anlage} < 0$, muss die Lochscheibe in die Kreislaufleitung eingebaut werden;
ist $\Delta H_{Anlage} > 0$, muss die Lochscheibe in die Abgabelitung eingebaut werden.

Damit wird die fehlende Druckhöhe der einen Leitung dem Wert der jeweils anderen Leitung in Form eines zusätzlichen Druckhöhenverlustes angeglichen.

Auf diese Weise wird auch mit der P 002 verfahren, wenn im Fall 3 die Kreislauf- und die Zirkulationsleitung gleichzeitig in Betrieb sind.

3.7.2 Die Anlagenkennlinie für die P 001

Für Kennlinie der P 001 gibt es zwei Varianten. In der linearen Fahrweise rechnet sie sich, angefangen von der K 001 rückwärts über den Leitungsabschnitt 00-F-004, den W 001 sowie die 00-F-003 und 002. In der Kreislauffahrweise sei der Startpunkt der Berechnung der Knotenpunkt von 00-F-002 und 003 sowie 00-H-004.

Die mit einzubeziehenden Strömungswiderstände sind neben denen der Rohrleitungen der des Verteilers, des W 001 und der Armaturen einschließlich der Regelgruppe 00FV001.

3.7.2 Die Anlagenkennlinie für die P 002

Um die von der P 002 zu erbringenden Druckdifferenz zu ermitteln, ist eine Aufstellung der Anlagenkennlinie in vier Varianten nötig:

Fall 1 ohne Kreislauffahrweise:

- a) für den Normalbetrieb (gesamte Förderleistung in die Abgabelitung)
- b) für den Anfahrbetrieb (gesamte Förderleistung in den Kreislauf)

Für beide Situationen gilt:

$$\dot{m}_{P002} = \dot{m}_{EP}$$

Die Förderhöhe kann jedoch erheblich differieren, da sie von den unterschiedlichen Druckverlusten im Weg des Kreislaufs oder im Weg aus der Anlage abhängig ist.

Fall 2 mit Kreislauffahrweise:

- a) für den Normalbetrieb (Förderleistung teilt sich in Kreislauf- und Abgabemenge)
- b) für den Anfahrbetrieb (gesamte Förderleistung in den Kreislauf)

3.8 Pumpen

3.8.1 Die Förderhöhe

Die Förderhöhe einer Pumpe ergibt sich aus folgender Beziehung:

$$H_{Pumpe} = H_{Anlage} + \frac{1bar}{\rho_{Fluid} \cdot g} \quad (3.8.01)$$

Der Leistungsbedarf von Pumpen ergibt sich aus der Gleichung:

$$P_{Welle} = \frac{\dot{V} \cdot \Delta p_V}{\eta_{Pumpe}} = \frac{\dot{V} \cdot \rho_{Fluid} \cdot g \cdot H_{Pumpe}}{\eta_{Pumpe}} \quad (3.8.02a)$$

(Wagner, 2009)

mit

- P_{Welle} : Wellenleistung der Pumpe (Leistung, die der Pumpenwelle in Form von mechanischer Energie zugeführt werden muss)
- Δp_V : von der Pumpe erzeugte Druckdifferenz
- H_{Pumpe} : Förderhöhe der Pumpe
- ρ_{Fluid} : Dichte des Fluids
- \dot{m} : zu fördernder Massenstrom
- η_{Pumpe} : Wirkungsgrad der Pumpe in %

Eine in der Praxis übliche Form der Gleichung (3.8.02a), wie sie z.B. in der Literatur von Pumpenherstellern (z.B. bei KSB) zu finden ist, lässt sich die Wellenleistung P_{Welle} einer Kreiselpumpe ermitteln:

$$P_{Welle} = \frac{\rho_{Fluid} \cdot \dot{m} \cdot H_{Pumpe}}{367 \cdot \eta_{Pumpe}} \quad (3.8.02b)$$

mit

- 367 : Quotient aus $3600 \frac{s}{h}$ und g , der Erdbeschleunigung, wodurch als Einheit von P_{Welle} Watt resultiert

3.8.2 Die Motorleistung

Die Motorleistung ist die elektrische Leistung, die ein Motor im Betrieb aufnimmt. Zu seiner Bestimmung muss sein Wirkungsgrad bekannt oder zumindest abschätzbar sein. Die Norm IEC 60034-30 (Norm zu den Wirkungsgradklassen für Niederspannungsmotoren der International Electrotechnical Commission) hält eine Gleichung bereit, um den Wirkungsgrad verschiedener, in Energieeffizienzklassen eingeteilter Motoren, zu berechnen:

$$\eta_{Motor} = A \cdot \left(\log \frac{P_{Motor}}{1kW} \right)^3 + B \cdot \left(\log \frac{P_{Motor}}{1kW} \right)^2 + C \cdot \left(\log \frac{P_{Motor}}{1kW} \right) + D \quad (3.8.03)$$

mit

η_{Motor} : Wirkungsgrad des Motors

P_{Motor} : Motornennleistung in kW

A, B, C, D : Koeffizienten (siehe Tabelle 3.3)

Tabelle 3.9: Koeffizienten für die Energieeffizienzklassen aus der Norm IEC 60034-30 für 4-polige Motoren

| Koeffizient | Effizienzkategorie (für 4-polige Motoren) | | |
|-------------|---|---------|---------|
| | IE1 | IE2 | IE3 |
| A | 0,5234 | 0,0278 | 0,0773 |
| B | -5,0499 | -1,9247 | -1,8951 |
| C | 17,418 | 10,4395 | 9,2984 |
| D | 74,3171 | 80,9761 | 83,7025 |

Damit lässt sich die Motorleistung P_{Motor} der Pumpe berechnen:

$$P_{Motor} = \frac{P_{Welle} \cdot F_{Aufschlag}}{\eta_{Motor}} \quad (3.8.04)$$

3.8.3 Reserveleistung der Pumpenmotoren

Die Reserveleistung ist ein Aufschlag auf die Motorleistung. Motoren mit hoher Leistungsaufnahme (und demzufolge mit hoher Leistungsabgabe) überhitzen bei wiederholten Pumpenstarts weniger, da sie die Pumpe in kürzerer Zeit auf Nenndrehzahl beschleunigen können. Der Zeitraum, in dem durch geringe Drehzahlen ein hoher Anfahrstrom durch die Motorwicklungen fließt, ist kürzer und die resultierende thermische Belastung geringer.

Ist die Wahrscheinlichkeit von häufigen Startvorgängen in kurzen Abständen groß, so empfiehlt sich eine größere Reserve. In der Praxis findet man die Unterteilung zwischen normalen, ca. 25%igen, und großzügigeren, ca. 50%igen, Reserven. Diese werden als Faktor in die Berechnung der Motorleistung einbezogen:

$$1,25 \leq F_{Aufschlag} \leq 1,5 \quad (3.8.05)$$

Üblich ist ein Aufschlag von 30 %. Es wird also mit einem Faktor von 1,3 gearbeitet. Dieser soll auch bei beiden Pumpen verwendet werden.

$$P_{Motor, P 002} = \frac{P_{Welle} \cdot 1,3}{\eta_{Motor}} \quad (3.8.06)$$

3.8.4 Der Energieeintrag der Pumpen

Energieeinträge in den Stoffstrom entstehen durch die Umformung mechanischer Energie in Wärmeenergie. Der Effekt wird makroskopisch als Reibung bezeichnet und kann als anteilige Dissipation der zunächst gerichteten Bewegung großer Teilchenmengen angesehen werden: Der Anteil, der Teilchen, die mit Strömungswiderständen mittelbar oder unmittelbar in Kontakt treten, verändern ihre Bewegungsrichtung. Verändert sich die Bewegungsrichtung eines Teilchens relativ zu denen seiner unmittelbaren Nachbarteilchen unregelmäßig, so kann man von einer Temperaturerhöhung sprechen (Brownsche Molekularbewegung). Bei Kreiselpumpen geschieht dies an der Innenseite des Pumpengehäuses und am Laufrad, an dessen Oberfläche und Kanten es zu Verwirbelungen kommt sowie zwischen den Flächen des Laufrades und dem Gehäuse im Pumpenspalt (Spaltverlust). Dieser Effekt und die Größe des Spaltmaßes sind die wichtigsten Faktoren, die den Wirkungsgrad einer solchen Pumpe beeinflussen.

Der Energieeintrag der Pumpen führt zu einer Erwärmung des Produktes, welche bei gewöhnlichen Förderpumpen mit Leistungen von wenigen Kilowatt einen kaum messbaren Effekt hat. Bei Pumpen, die einen sehr hohen Druck erzeugen oder bei größeren Kreislaufpumpen werden jedoch Wärmemengen in das Fördermedium eingetragen, die in Bilanzen berücksichtigt werden müssen.

Dabei geht die Wellenleistung P_{Welle} der Pumpe als Energieeintrag gemäß (3.8.07) in den Stoffstrom ein und bewirkt eine Erwärmung des geförderten Mediums (3.8.08).

$$P_{Welle} = \dot{Q}_{Eintrag} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (3.8.07)$$

mit

$\dot{Q}_{Eintrag}$: Wärmestrom, Heizleistung

\dot{m} : Massenstrom

c_p : spez. Wärmekapazität des sich erwärmenden/abkühlenden Stoffes

ΔT : Temperaturdifferenz des Stoffstromes durch Einwirkung des Wärmestroms

$$\Delta T = \frac{\dot{Q}}{\dot{m} \cdot c_p} \quad (3.8.08)$$

Anmerkung: An dieser Form der Gleichung ist sehr anschaulich die Problematik des Wirkungsgrades erkennbar: Betrachtet man die Förderhöhe der Pumpe als konstant, so ist der Quotient aus \dot{Q} und \dot{m} ein Maß für den (reziproken) Wirkungsgrad.

3.8.5 Der NPSH

Eine Kreiselpumpe kann eine Flüssigkeit nur dann fördern, wenn auf der Saugseite ein bestimmter Mindestdruck anliegt. Dieser Druck muss größer als der Dampfdruck der Flüssigkeit sein, da es sonst am Einlauf zum Kreisrad zu Teilverdampfungen kommt. Diese Dampfblasen implodieren durch die Förderung des Mediums nach kurzer Strecke, da sich der Druck entlang des Strömungsweges der Flüssigkeit am Laufrad erhöht. Gewöhnlich sind dies nur wenige Millimeter. Die Implosion der Dampfblasen erfolgt in unmittelbarer Nähe der Laufradoberfläche. Dadurch kann es langfristig zum Materialverschleiß kommen, was in eine teilweise Zerstörung des Laufrades mündet. Um Instandhaltungskosten einzusparen und die Zuverlässigkeit und Standzeit von Pumpen zu erhöhen, sollte deshalb darauf geachtet werden, dass der Druck an der Saugseite der in Betrieb befindlichen Pumpe mindestens so hoch ist, wie der Mindest-NPSH dieser. Andererseits muss bei der Auslegung der Anlage darauf geachtet werden, dass ein für die Pumpenhersteller erreichbarer NPSH bereitgestellt wird.

Der NPSH lässt sich folgendermaßen formulieren:

$$NPSH_{Pumpe} = \frac{P_{abs, Saugstutzen} - P_{abs, Dampf}}{\rho_{Flüssigkeit} \cdot g} \quad (3.8.09)$$

(Menny, 2006)

mit

$P_{abs, Saugstutzen}$: Absolutdruck am Saugstutzen der Pumpe,

$P_{abs, Dampf}$: Dampfdruck (absolut) der zu fördernden Flüssigkeit,

$\rho_{Flüssigkeit}$: Dichte der zu fördernden Flüssigkeit,

g : Erdbeschleunigung

und

$$NPSH_{Anlage} = \frac{P_{abs, statisch} - P_{abs, Dampf}}{\rho_{Flüssigkeit} \cdot g} + \frac{\bar{w}_{Flüssigkeit}^2}{2 \cdot g} \quad (3.8.10)$$

(Menny, 2006)

mit

$P_{abs, statisch}$: statischer Druck (absolut) am Saugstutzen der Pumpe,

$\bar{w}_{Flüssigkeit}$: mittlere Strömungsgeschwindigkeit der zu fördernden Flüssigkeit

und der Einheit Meter:

$$[NPSH] = \frac{Pa}{\frac{kg}{m^3} \cdot \frac{m}{s^2}} = \frac{\frac{kg \cdot m}{s^2 \cdot m^2}}{\frac{kg}{m^3} \cdot \frac{m}{s^2}} = \frac{kg \cdot s^2 \cdot m^4}{kg \cdot s^2 \cdot m^3} = m \quad (3.8.11)$$

3.8.6 Die maximale Förderleistung und der maximale Förderdruck

Die maximale Förderleistung einer Kreiselpumpe ist durch einen Abfall des Förderdruckes gekennzeichnet. In den üblichen Bereichen der Maximalkapazitäten lässt sich folgende Beziehung formulieren:

$$p_{\dot{V}_{\max}} = p_{\dot{V}_{\text{nom}}} \cdot \left(\frac{\dot{m}_{\dot{V}_{\max}}}{\dot{m}_{\dot{V}_{\text{nom}}}} \right)^{\frac{7}{4}} \quad (3.8.12)$$

mit

$p_{\dot{V}_{\max}}$: Druck bei maximalem Volumenstrom

$p_{\dot{V}_{\text{nom}}}$: Druck bei Nominal-Volumenstrom

$\dot{m}_{\dot{V}_{\max}}$: Maximalmassenstrom

$\dot{m}_{\dot{V}_{\text{nom}}}$: Nominalmassenstrom

3.8.7 Die Pumpe P 001

Die Fördermenge der Zubringerpumpe für den Betriebspunkt ergibt sich aus der Menge an Einsatzprodukt:

$$\dot{m}_{P002} = \dot{m}_{\text{Feed}} \quad (3.8.13)$$

Die Förderhöhe ergibt sich analog (3.8.01). Um einen gleichmäßigeren Durchfluss zu gewähren, soll der Druckaufschlag jedoch $p = 2\text{bar}$ betragen. Siehe Gleichung (3.8.14).

$$H_{P001} = H_{\text{Anlage}, P001} + \frac{p}{\rho \cdot g} \quad (3.8.14)$$

Für die P 002 soll folgende Festlegung getroffen werden:

$$F_{\text{Aufschlag}, P002} = 1,3 \quad (3.8.15)$$

Daraus folgt:

$$P_{\text{Motor}, P002} = \frac{P_{\text{Welle}} \cdot 1,3}{\eta_{\text{Motor}}} \quad (3.8.16)$$

3.8.8 Die Pumpe P 002

Bedingung für die Auslegung der Abgabepumpe ist die Erkenntnis aus 3.3.2 über die Notwendigkeit und Quantität der Kreislaufmenge. Ist keine Kreislauffahrweise erforderlich, ergibt sich die Fördermenge für die P 002 aus (3.2.10):

$$\dot{m}_{P002} = \dot{m}_{EP} \quad (3.8.17)$$

mit

\dot{m}_{P002} : Fördermenge der P 002 im Betriebspunkt

Für den Fall 3, dass der Kreislauf ständig in Betrieb sein muss, ergibt sich die Menge aus der Summe von Kreislauf- und Abgabemenge:

$$\dot{m}_{P002} = \dot{m}_{\text{Kreislauf}} + \dot{m}_{EP} \quad (3.6.01b)$$

Auch hier ist \dot{m}_{P002} die Fördermenge der P 002 im Betriebspunkt.

Die $\dot{m}_{P002,\min}$ minimale Fördermenge der P 002 ist der kleinere von zwei Werten:

$$\dot{m}_{P002,\min} = \text{Min}(\dot{m}_{\text{Kreislauf}}; \dot{m}_{EP}) \quad (3.8.18)$$

mit

$\dot{m}_{P002,\min}$ minimale Fördermenge der P 002

Diese Bedingung resultiert aus der Möglichkeit, dass die Kreislaufmenge einen größeren oder kleineren Wert haben kann als die Abgabemenge. Will man beispielsweise mit einer Pumpe P 002, die das Vielfache der Abgabemenge im Kreis fährt, die Kolonne K 001 zum Abfahren entleeren, so ist ein hoher Verschleiß der Pumpe zu erwarten. Ähnlich verhält es sich, wenn die P 002 für eine etwa gleiche Kreislauf- und Abgabemenge ausgelegt ist und die Anlage angefahren werden soll. Die tatsächliche Fördermenge wäre nur etwa halb so hoch wie die im Normalbetrieb.

Die Förderhöhe ergibt sich aus folgender Beziehung:

$$H_{P002} = H_{\text{Anlage},P002} + \frac{p}{\rho_{\text{Fluid}} \cdot g} \quad (3.8.19)$$

mit

$$p = 1\text{bar}$$

Der Leistungsbedarf P_{Welle} der P 002 ergibt sich aus der Gleichung (3.8.02a)

3.8.8.1 Der NPSH der P 002

Von größerer Bedeutung ist auch der vertikale Teil der Saugseite der P 002. Ihre Länge bzw. die Höhe der Flüssigkeitssäule darin, bestimmt, zusammen mit dem Dampfdruck und dem Volumenstrom des darin fließenden Produktes, die Vorgabe für die Haltedruckhöhe bzw. der NPSH bei horizontaler Pumpenachse (siehe Menny, 2006) der P 002. Um einem Materialverschleiß durch Kavitation vorzubeugen, ist also zunächst mit dem Pumpenzulieferer zu klären, ob die anzuschaffende P 002 die benötigte Haltedruckhöhe auch tatsächlich einhalten kann oder ob diese durch Verlängerung der Rohrleitung (Änderung der Aufstellungshöhe der K 001) nachkorrigiert werden muss.

Die Rohrleitungslänge ist so anzupassen, dass gilt:

$$NPSH_{\text{Anlage}} \geq NPSH_{\text{Pumpe}} \quad (3.8.20)$$

mit

$NPSH_{\text{Anlage}}$: tatsächlich vorhandene Haltedruckhöhe am Saugstutzen der P 002,

$NPSH_{Pumpe}$: mindest erforderliche Haltedruckhöhe der anzuschaffenden Pumpe.

Es sollte jedoch immer ein Sicherheitsaufschlag zwischen den beiden Werten angestrebt werden. Dieser soll hier auf einen Meter festgelegt werden:

$$NPSH_{Anlage} - NPSH_{Pumpe} = 1m \quad (3.8.21)$$

Aus diesen Überlegungen ergibt sich die vertikale Länge (Höhe) $h_{00-H-001}$ der Verbindung zwischen dem Sumpf der K 001 und der Saugseite der P 002 und damit, gemessen am Stutzen A2, die Mindestaufstellungshöhe der K 001:

$$h_{00-H-001} = NPSH_{Anlage} + 1m$$

3.9 Das Rohrleitungssystem

3.9.1 Dimensionierung der Rohrleitungen

Der hydrodynamische Teil von (3.7.01) ist von der Strömungsgeschwindigkeit des sie durchfließenden Mediums abhängig. Deshalb müssen zunächst alle Rohrleitungen ausgelegt werden. Gleiches gilt für die Apparate und Armaturen, da die Summe ihrer Strömungswiderstände ebenfalls in die Gleichung eingeht.

Die Vorgehensweise zur Ermittlung der Nennweiten erfordert Kenntnis über das vor Ort gebräuchliche Nennweitesystem. Für Anlagendrücke bis 40 bar ist entweder das System nach EN ISO 1127, Reihe 1 oder das nach DIN 11850, Reihe 2, üblich. Diese werden oft abgekürzt als „ISO“ oder „metrisch“ bezeichnet. Der Unterschied liegt in den unterschiedlichen Innen- und Außendurchmessern der Nennweiten.

Bei kleineren Firmen weit verbreitet ist auch die Reduzierung der verwendeten Nennweiten. So werden die Nennweiten DN 20, 32, 40 und 65 oft durch den Gebrauch der jeweils nächst höheren weggelassen. Der Hintergrund für diese Verfahrensweise ist betriebswirtschaftlicher Natur: So nimmt man bei diesen kleineren Nennweiten einen höheren Anschaffungspreis in Kauf, der jedoch durch die dadurch wegfallende Notwendigkeit der Bevorratung von Reservearmaturen mehr als ausgeglichen werden soll. In Folge dessen können Lagerräume kleiner dimensioniert und durch die Bevorratung ruhendes Kapital reduziert werden. Außerdem lässt sich mit dem Lieferanten bei der Anschaffung der Armaturen zumeist ein geringerer Stückpreis aushandeln, wenn eine größere Anzahl gleicher Artikel eingekauft wird.

Die Auswahl der Nennweite soll mit folgender Routine erfolgen:

Die Vorgaben sind

- die maximal zulässige mittlere Strömungsgeschwindigkeit \bar{w}_{\max} und
- der Volumenstrom \dot{V}

für jede einzelne Rohrleitung.

Vorgehensweise:

1. Ermittlung eines vorläufigen Rohrinnehdurchmessers $d_{i,vorl.}$ für \bar{w}_{max} und \dot{V}

$$d_{i,vorl.} = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot \bar{w}_{max}}} \quad (3.9.01)$$

2. Es folgt ein Größenvergleich von $d_{i,vorl.}$ den Innendurchmessern der zur Verfügung stehenden Nennweiten.
3. Entsprechend des gewählten Nennweitensystems und der Nennweitenauswahl (alle Nennweiten oder eine reduzierte Kollektion) erfolgt als Letztes die Auswahl der nächst höheren Nennweite zu $d_{i,vorl.}$.

Mit dem Innendurchmesser d_i der gewählten Nennweite lässt sich nun die eigentliche mittlere Strömungsgeschwindigkeit \bar{w} im Rohrleitungsabschnitt berechnen:

$$\bar{w} = \frac{\pi \cdot \dot{V}}{4 \cdot d_i^2} \quad (3.9.02)$$

Ist die Strömungsgeschwindigkeit bekannt, so lässt sich auch der Druckverlust berechnen, der in der durchströmten Leitung auftritt.

$$\Delta p_{Rohr} = \frac{Bl \cdot 811023,308 \cdot l_{Rohr} \cdot \dot{m}^2}{\sqrt[4]{\frac{\dot{m}}{d_i \cdot \eta} \cdot \rho_{Fluid} \cdot d_i^5}} \quad (3.9.03)$$

mit

| | |
|------------------|----------------------------------|
| Bl : | Blasius-Faktor (0,3164) |
| \dot{m} : | Massenstrom |
| l_{Rohr} : | Rohrlänge |
| d_i : | Innendurchmesser des Rohres |
| η : | dynamische Viskosität des Fluids |
| ρ_{Fluid} : | Dichte des Fluids |

Ein weiterer zusätzlicher Faktor sind die Druckverluste, die durch die Rohrbögen verursacht werden. Die Schätzung der Anzahl evtl. benötigter Rohrbögen ist zwar mit größeren Unsicherheiten behaftet, jedoch gibt es bei Rohrleitungsbauunternehmen Erfahrungswerte, die in Abhängigkeit von Umgebung und Rohrlänge einen Anhaltspunkte geben können, der im Ergebnis bessere Vorhersagen erlaubt als wenn man dieses Problem unberücksichtigt lassen würde. Dies sind empirische Daten, die aus Materialverbrauchsstatistiken ermittelt wurden.

3.9.2 Druckverlust durch Armaturen

Für jede Armatur wird ein K_{VS} -Wert vom Hersteller angegeben. Er ist der Durchflusskoeffizient für die voll geöffnete Armatur und für die Auslegung von Regelarmaturen wichtigste Parameter.

Definiert ist er als Durchflussmenge von Wasser (bzw. eines Mediums mit einer Dichte von $\rho = 1000 \frac{kg}{m^3}$ und einer dynamischen Viskosität von $\eta = 1000 Pa \cdot s$) bei einem Differenzdruck von 1 bar.

$$\dot{V} = K_V \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \cdot 1000 \quad (3.9.04)$$

(Böswirth, 2007)

Nach K_V umgestellt und bar als Einheit des Druckes festgelegt, erhält man:

$$K_{VS} = \frac{\dot{V}}{1 \frac{m^3}{h}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{Wasser} \cdot 1 \text{ bar}}{\Delta p_{aus-ein} \cdot 10^3 \frac{kg}{m^3}}} \text{ mit } [K_{VS}] = \frac{m^3}{h} \quad (3.9.05)$$

(Hirschberg, 1999)

mit

\dot{V} : Der Volumenstrom durch die Armatur

ρ_{Wasser} : Die Dichte von Wasser

$\Delta p_{aus-ein}$: Der Differenzdruck zwischen Ein- und Ausgang

Mitunter trifft man in der Praxis auf einen Parameter, der dem K_V zunächst sehr ähnlich ist. Allerdings wird dieser Parameter mit einem kleinen k geschrieben und hat die Einheit mm^2 :

k_V mit $[k_V] = mm^2$

Der Zusammenhang zwischen beiden Parametern lässt sich über einen einfachen Proportionalitätsfaktor herzustellen:

$$K_V = \frac{k_V}{28} \quad (3.9.06)$$

Durch Auswahl des jeweils zur Anwendung kommenden Armaturentyps und die vorangegangene Ermittlung der Nennweite kann der Druckhöhenverlust für jede Armatur recht genau ermittelt werden. Der Druckverlust ergibt sich aus (3.84):

$$\Delta p_{Armatur} = \frac{\dot{V}^2 \cdot \rho_{Fluid}}{K_{VS}^2} \quad (3.9.07)$$

mit

$\Delta p_{Armatur}$: der durch die Armatur erzeugte Druckverlust

\dot{V} : Volumenstrom

ρ_{Fluid} : Dichte des Fluids

K_{VS} : der vom Hersteller angegebene Durchflusskoeffizient für die voll geöffnete
 Armatur

3.9.2.1 Regelarmaturen

Die Hersteller von Regelarmaturen legen diesen Wert jedoch für die voll geöffnete Armatur fest. Dies ist der so genannte K_{VS} -Wert. Um eine Menge im gewünschten K_V -Bereich regeln zu können, sollte das Regelventil idealer Weise zu etwa 50 % geöffnet sein, wobei Abweichungen zu geringeren Öffnungsgraden tolerabel sind als zu höheren. Daraus ergibt sich für die anzuschaffende Regelarmatur die K_{VS} -Vorgabe:

$$K_{VS} \approx 1,3 \cdot K_V \quad (3.9.08)$$

Fa. Samson (04/2014)

Hersteller von Regelarmaturen machen oft große Sicherheitsaufschläge. So wird der von Kunden verlangte K_V -Wert zunächst verdoppelt und dann bis zum nächsten vorrätigen K_{VS} aufgerundet. Der resultierende K_{VS} ist dann oft mehr als doppelt so groß, wie der anfängliche benötigte K_V . Das bedeutet, dass der Öffnungsgrad der Regelarmaturen später eher bei 35 % VÖ liegt als bei 50. Vorteilhaft ist dabei, dass die Reserve für den maximalen Durchfluss größer ist. Nachteil ist die etwas ungenauere Regelbarkeit, da aus Änderungen in niedrigeren Bereichen des Öffnungsgrades größere Schwankungen im Durchfluss resultieren als in höheren Bereichen.

3.9.3 Druckverlust durch Messgeräte

Durchflussmessgeräte verursachen je nach Messprinzip und -genauigkeit einen unterschiedlich starken Druckverlust. Es ist jedoch wenig sinnvoll, eine repräsentative Liste aller am Markt erhältlichen Messgeräte und deren Druckverlustbeiwerte anzufertigen, da diese bereits nach wenigen Jahren keinen Wert mehr hätte. Deshalb soll exemplarisch der klassische Fall einer Messblende gewählt werden. Deren Druckverlust ist gut berechenbar (ISO 5167-1 & 2:2003) und umgekehrt kann Ihre Dimensionierung sehr gut an einen vorgegebenen Differenzdruck angepasst werden. Aus diesem Grund soll hier lediglich ein fester Wert vorgegeben werden, der bei der Nominalleistung der Anlage erreicht werden soll:

$$\Delta p_{00F001} = \Delta p_{00F002} = 200\text{mbar} \quad (3.9.09)$$

Der Druckverlust, der durch in die Rohrleitung ragende Temperaturfühler verursacht wird, soll wegen des geringen Beitrags am Gesamtdruckverlust unberücksichtigt bleiben.

Der Übersichtlichkeit halber sollen nun die Summen der Druckhöhendifferenzen für jeden Rohrleitungsabschnitt mit eigener Bezeichnung einzeln berechnet werden. Diese sind so

angelegt, dass sie für die einzelnen Betrachtungen nicht mehr in kleinere Abschnitte zerlegt werden müssen.

3.10 Wärmeverluste

Wärmeverluste sind nahezu unvermeidbar. Ihr Ausmaß ist jedoch sehr gut kontrollierbar. Abhängig von der Temperaturdifferenz zwischen der Apparate- oder Rohrleitungsoberfläche und der Umgebung sowie der Größe der betreffenden Oberfläche variiert der Wärmeverlust innerhalb einer Anlage stark. So ist es zum Beispiel wirtschaftlich, sehr heiße oder sehr große Oberflächen mit einer Wärmedämmung zu versehen, wie es bei Öfen oder Tanks praktiziert wird.

Der Wärmeverlust ist näherungsweise berechenbar.

$$\dot{Q}_{\text{Verlust}} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{\text{Produkt}} - \bar{T}_{\text{Umgebung}}) \cdot \left(e^{\frac{k \cdot A}{\dot{m} \cdot c_p}} - 1 \right) \quad (3.10.01)$$

(Wagner, 2009)

| | |
|--|--|
| \dot{Q}_{Verlust} : | Verlustwärmestrom |
| \dot{m} : | Massenstrom des Produktes in der Rohrleitung |
| c_p : | spezifische Wärmekapazität des Produktes |
| $(T_{\text{Produkt}} - \bar{T}_{\text{Umgebung}})$: | Differenz zwischen Produkt- und mittlerer Umgebungstemperatur |
| $k = 10$: | Wärmeübergangszahl für den spezifischen Fall (innen strömende Flüssigkeit, außen Luft mit freier Konvektion) |
| A : | Oberfläche der Rohrleitung |

Die mittlere Umgebungstemperatur ist zwar geeignet, um einen Wärmeverlust zu ermitteln, für die qualitative Beantwortung der Frage, ob eine Wärmedämmung sinnvoll ist, muss jedoch auch berücksichtigt werden, welche Temperaturextrema am Standort der Anlage zu erwarten sind. So kann es durchaus sein, dass eine eingehauste Anlage mit einer Innentemperatur von 30 °C die Notwendigkeit einer vollständigen Wärmedämmung nicht sinnvoll erscheinen lässt. Besteht jedoch die Wahrscheinlichkeit, dass unter bestimmten Bedingungen (z.B. Abstellungen, Havarien etc.) die Umgebungstemperatur auf winterliche Außentemperaturen fällt, so ist nicht nur eine Wärmedämmung sondern auch eine Begleitbeheizung obligatorisch, falls das Produkt zum Ausstocken neigt.

Für die Dicke der Wärmedämmung gibt es gestaffelte Werte. Beginnend bei 20 mm kann praktisch jede Dicke in 20-mm-Schritten bestellt werden. Für Rohrleitungen im Temperaturbereich von z.B. 70 bis 130 °C ist eine Dämmschichtdicke von 40 mm üblich. Diese soll als einheitlich für alle Rohrleitungen, Dampfleitungen eingeschlossen, gelten.

4 Systembeschreibung

Im Folgenden soll das gesamte Trocknersystem detailliert beschrieben werden. Wie in Anhang A zu erkennen ist, soll die Anlage in vier Segmente unterteilt werden, denen jeweils eine Funktion zugeordnet werden kann. Da alle Segmente im späteren Betrieb stofflich, energetisch und informationstechnisch miteinander interagieren, ist es vorteilhafter, die Anlage zunächst unter dem konstruktiven und dann ein weiteres Mal unter den funktionalen Gesichtspunkt zu betrachten. Zunächst soll mit einer konstruktiven Beschreibung begonnen werden. Detailansichten der Segmente werden im jeweiligen Abschnitt dargestellt.

Im Anhang B ist eine Gesamtübersicht der Anlage in Form eines R&I-Fließbildes zu finden.

4.1 Konstruktive Anlagenbeschreibung

4.1.1 Zubringereinheit

Die Zubringereinheit (Abb. 4.1) umfasst die Leitungswege 00-F-001 und 00-F-002. Sie dient zur Versorgung der Anlage mit einer kontinuierlichen, geregelten Menge an Einsatzprodukt. Aus diesem Grund muss neben einer Pumpe auch eine Mess- und Regeleinheit implementiert sein.

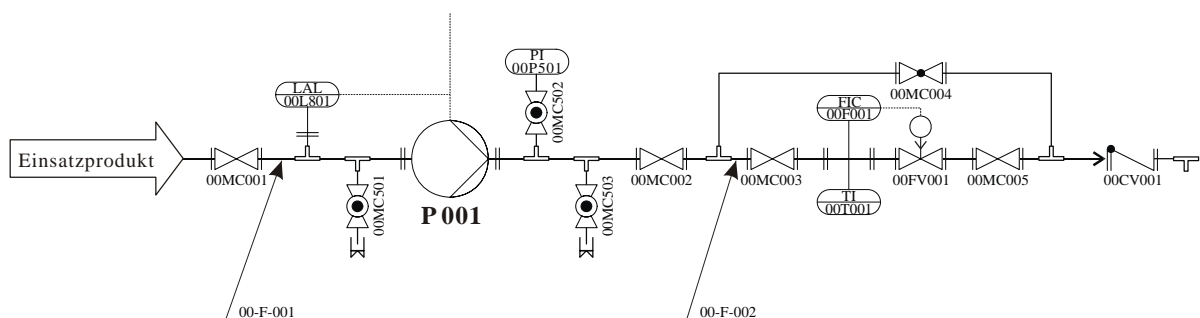


Abbildung 4.1: Detaildarstellung der Zubringereinheit

Die Pumpe P 001 benötigt neben den saug- und druckseitigen Absperrarmaturen (00MC001 und 00 MC002) einen Trockenlaufschutz (00L801) und ein druckseitiges Vor-Ort-Manometer (00P501). Die Festlegung, welcher Art die saug- und druckseitigen Absperrarmaturen sein sollen, ist für den Einzelfall festzulegen. Die Armatur an der Restentleerung der Saugseite ist gewöhnlicher Weise ein DN25-Kugelhahn (00MC501) und die Entlüftung auf der Druckseite ein DN15-Kugelhahn. Als Erstabspernung des Manometers ist ein DN15-Kugelhahn oder ein DN15-Nadelventil geeignet.

Die auf die P 001 folgende Regelgruppe umfasst ein Regelventil mit in Strömungsrichtung vorgeschalteter Durchflussmessung. Beide Geräte sind mittels zweier Armaturen absperbar und von einem Bypass mit Handarmatur (Ventil) umfahrbar.

Des Weiteren empfiehlt es sich (sofern nicht schon im Einsatzbehälter vorhanden), eine Temperaturmessung zu installieren, welche jedoch in vielen marktüblichen Messgeräten (vor

allem Volumendurchflussmessgeräten) bereits vorhanden ist. Damit wird eine energetische Bilanzierung des gesamten Systems und die Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizientes des W 001 ermöglicht. Letzterer ist einer der wichtigsten Parameter für die Festlegung der CIP-Intervalle (CIP = cleaning in place) von Apparaten und Anlagen.

Eine denkbare Modifikation der Zubringereinheit ergäbe sich bei Verwendung einer Drehzahl geregelten Verdrängerpumpe. Ein Regelventil wäre in diesem Fall überflüssig. Das Stellsignal aufnehmende Glied der Regelungskette wäre dann ein Frequenzumrichter, der den Pumpenmotor mit Antriebsenergie versorgt.

4.1.2 Vorwärmung

Die Vorwärmung (Abb. 4.2) besteht aus den Produkt führenden Leitungswegen 00-F-003 und 00-F-004 sowie aus der Dampfleitung 00-S-001 und dem Kondensatableitungsweg 00-C-001. Einziger Apparat ist der W 001.

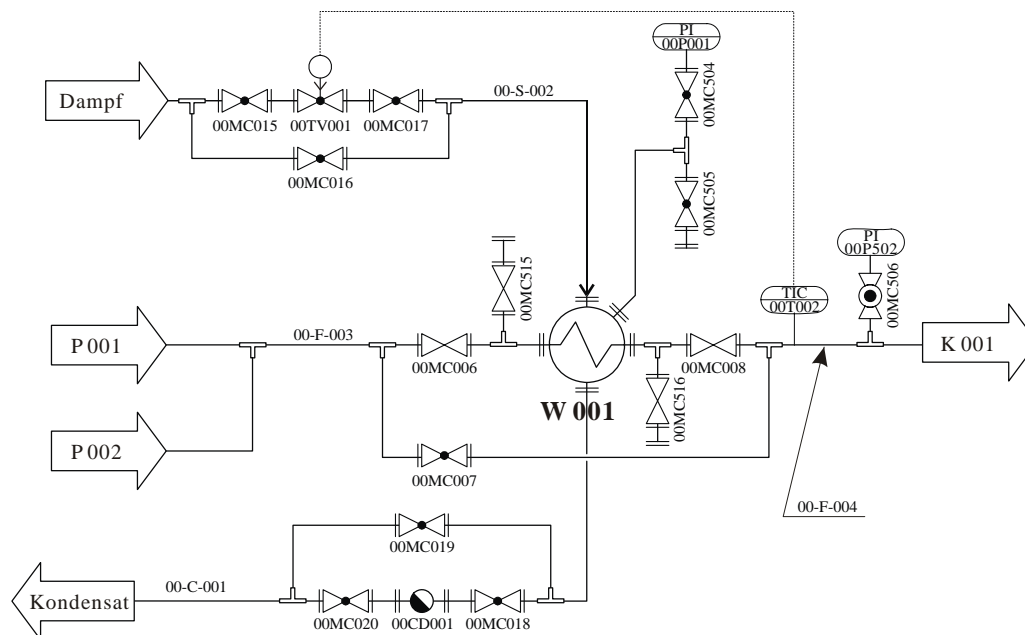


Abbildung 4.2: Detaildarstellung der Vorwärmung

Der Wärmeübertragertyp sei als PWÜ festgelegt. Außer Produktein- und -ausgang sowie Dampfeingang und Kondensatauslass soll der Wärmeübertrager einen weiteren Stutzen im Dampfraum zur Entlüftung und Installation einer Druckmessung besitzen. Der W 001 benötigt einen Bypass und ist mit den Armaturen 00MC006 und 00MC008 produktseitig komplett absperrbar. Über die Anschlüsse mit den Armaturen 00MC015 und 00MC016 kann der Wärmeübertrager entleert und per CIP gereinigt werden.

Um einen zu schnellen Verschleiß bzw. Schäden beim Betrieb des W 001 zu verhindern, ist es notwendig, den Druck bis direkt vor der K 001 auf einem Niveau zu halten, der ein Verdampfen der leicht siedenden Komponente direkt im Wärmeübertrager verhindert. Hierzu dient die Einstellung des Spaltmaßes am Verteilerhut.

Die Regelung der Zufuhr für den Energieträger (Dampf) des W 001 befindet sich in der Dampfleitung 00-S-001. Es wird darauf aufmerksam gemacht, dass hier bewusst auf die Variante der Temperaturregelung durch Steuerung des Kondensatablaufes verzichtet wird um die thermische Belastung des Produktes und damit das Entstehen von Belegen auf der Produktseite zu minimieren.

Die Abgabe des Kondensates erfolgt über die Leitung 00-C-001 in der sich der Kondensatableiter 00CD001 befindet. Für den Anfahrbetrieb hat dieser einen Bypass (Armatur 00MC019).

4.1.3 Trocknung

Im Innern der Trocknerkolonne K 001 (Abb. 4.3) wird der eingegebene Produktstrom zunächst nach oben gegen die Unterseite eines Verteilerschirmes gefahren und entspannt. Dadurch trennt sich das Flüssigkeits-Dampf-Gemisch: Die flüssige Phase bildet einen Film auf der nach unten gekrümmten Fläche des Verteilers und sammelt sich nach einer gewissen Fallstrecke im Kolonnensumpf. Die während des gesamten Zeitraums entstehenden Brüden strömen Richtung Kolonnenkopf in der sich ein Tröpfchenabscheider befindet um mitgerissene Flüssigkeitspartikeln aus dem Brüdenstrom abzuscheiden.

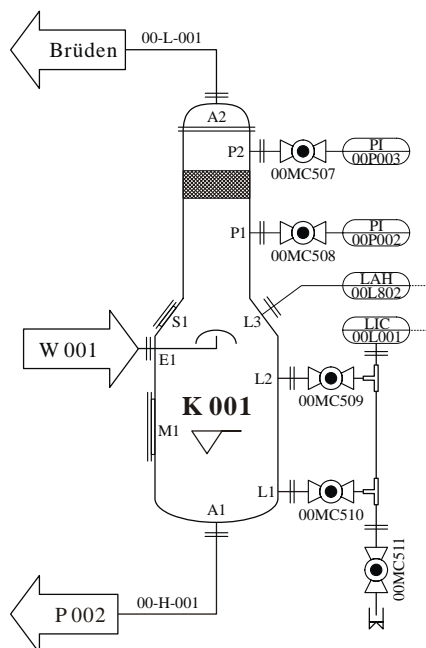


Abbildung 4.3: Detaildarstellung der Trocknung

Die Ableitung der Brüden erfolgt durch die Leitung 00-L-001. Die schwer siedende Komponente sammelt sich im unteren Teil der Kolonne und verlässt diese durch die Leitung 00-H-001 in Richtung P 002.

4.1.4 Produktabgabe

Die Produktabgabe (Abb. 4.4) ist der letzte Abschnitt der Anlage. Ihre Hauptbestandteile sind die Regelgruppe mit dem Standregler der K 001 (00LV001) und die Pumpe P 002. Mit letzterer wird das getrocknete Produkt aus der Anlage (Leitungsweg 00-H-003) und/oder in die Kreislaufleitung (00-H-004) gefahren. Die Festlegung, ob die Trocknung ohne oder mit permanentem Kreislauf betrieben wird, entscheidet, ob die Leistungsdaten dieser Pumpe eher in der Größenordnung der P 001 liegen oder bedeutend größer sind. In letzterem Fall muss die P 002 womöglich ein Vielfaches der Menge der P 001 fördern.

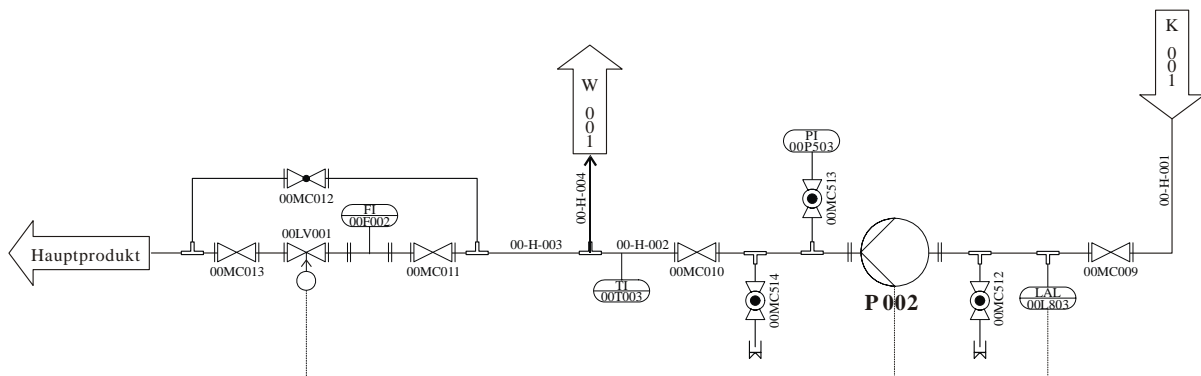


Abbildung 4.4: Detaildarstellung der Abgabereinheit

Wie bereits bei der P 001 verfügt auch die P 002 über je eine saug- und druckseitige Absperrarmatur, eine saugseitige Entleerung (00MC512), eine druckseitige Entlüftung (00MC514) und einen Trockenlaufschutz (00LAL803) sowie eine Vor-Ort-Druckanzeige (00P503) inklusive Erstabsperrung (00MC513).

Hinter dem Abgang zur Kreislaufleitung, die mit der Armatur 00MC014 eindrosselbar bzw. absperrbar sein muss, befindet sich die Regelgruppe für den Kolonnenstand mit dem Mengengerät für das getrocknete Produkt.

Mit der Leitung 00-H-003 wird das getrocknete Endprodukt der Anlage abgegeben.

4.1.5 Kreislaufleitung

Dieser Leitungsweg (00-H-004, Abb. 4.5) dient der Rückführung des gesamten Kolonnensumpfes im Anfahrbetrieb. Diese Fahrweise wird so lange beibehalten, bis die gewünschte Trocknungsqualität erreicht ist. Bei Anlagen, die mit einem permanenten Kreislauf betrieben werden sollen, wird nach der Anfahrprozedur immer noch ein Teil des Produktstroms vor den W 001 gefahren. Die Kreislaufmengen können ein Vielfaches des Anlagendurchsatzes betragen.

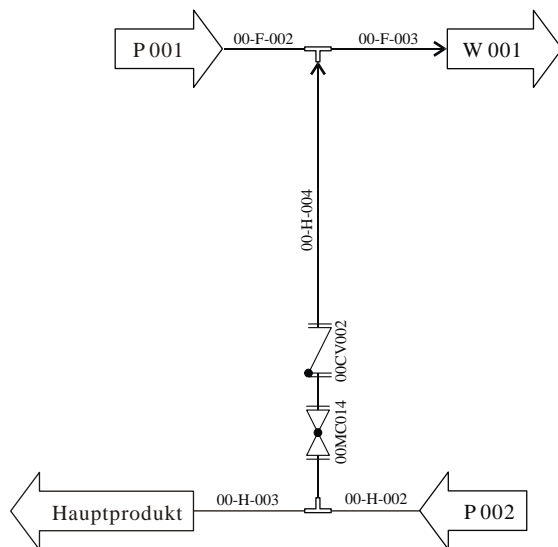


Abbildung 4.5: Detaildarstellung der Kreislaufleitung

Problem Anlagenkurzschluss

Kurzschluss bedeutet, dass Einsatzprodukt von der P 001 durch die Leitung 00-F-002, rückwärts durch die Kreislaufleitung 00-H-004 direkt zum Ausgang der Anlage (Leitung 00-H-003) strömt. Hierbei kann der W 001 und die K 001 umfahren werden, wenn es die Druckverhältnisse erlauben. Eine Trocknung wäre in diesem Fall ausgeschlossen.

Um dies zu verhindern, muss sich in der Kreislaufleitung eine Rückschlagklappe oder ein Rückschlagventil befinden.

4.2 Funktionale Beschreibung der Anlage

Siehe R&I-Fließbild in Anhang B.

Das Einsatzprodukt wird von der P 001 aus einem Vorlagebehälter o. Ä. gefördert. Zur Mengenregelung dient eine Regeleinheit, bestehend aus Durchflussmesser und Regelarmatur. Das von der P 001 geförderte Produkt wird durch den Wärmeübertrager W 001 gefahren. Dieser wird mit Dampf beheizt und erwärmt das Einsatzprodukt auf die Vorwärmtemperatur $T_{\text{vorwärm}}$. Um die Temperatur einzustellen und konstant zu halten, wird die Temperatur des erwärmten Einsatzproduktes gemessen und als Regelgröße einem Temperaturregler zugeführt. Dieser erzeugt das Steuersignal für eine Regelarmatur in der Dampfzuleitung zum W 001.

Das erwärmte Produkt wird in die Kolonne K 001 geleitet und mit einem Hutverteiler fein verteilt. In der Kolonne verdampft der gewünschte Anteil an leicht siedender Komponente und wird durch den oberen Teil der Kolonne in das Brüdenrohr geleitet, das aus der Anlage herausführt.

Das getrocknete Produkt sammelt sich im Sumpf der Kolonne und wird mit der P 002 aus der Anlage gefördert. Die an der Kolonne befindliche Standmessung erzeugt die Regelgröße für den Standregler, dessen Regelarmatur sich in der Abgabelitung befindet.

lineare Fahrweise

Die lineare (single pass) Fahrweise sieht lediglich einen Kreislauf für den Anfahrbetrieb vor. Das bedeutet, dass die Kreislaufleitung für die gleiche Durchflussmenge ausgelegt werden muss, wie die Abgabelitung.

Kreislauffahrweise

In der Kreislauffahrweise fördert die P 002 eine größere Menge als pro Zeiteinheit aus der Anlage abgegeben wird. Sie ist in diesem Fall für eine größere Förderleistung ausgelegt. Die Nennweite der Kreislaufleitung ist dem anzupassen. Zusätzlich muss die P 001 für einen entsprechend höheren Gegendruck ausgelegt werden.

5 Beschreibung der Software

Will man einen Rechenweg oft wiederholen, so bietet sich eine Softwareroutine an. Dadurch werden Fehlerquellen ausgeschlossen und Zeit gespart. Für solche Aufgaben sind Tabellenkalkulationen wie MS Excel besonders geeignet, da sie eine graphische Benutzeroberfläche (GUI) bieten und Kenntnisse über die Syntax von Programmiersprachen nicht zwingend erforderlich sind. Die Möglichkeit, sehr einfach Daten und Gleichungen in einer Kalkulation unterzubringen, ist ein großer Vorteil gegenüber speziellen Programmen mit fest definiertem Funktionsumfang.

Um eine Verdampferanlage mit Excel auszulegen, müssen die Daten wie der gewünschte Durchsatz oder der zur Verfügung stehende Heizedampfdruck eingegeben werden. Des Weiteren müssen einige Konstanten und Vorgaben wie die Nennweiten von Rohrleitungen und deren Maße oder simple Konstanten wie die Schwerebeschleunigung bereits vorhanden sein, denn die spätere Eingabeprozedur sollte sich auf die allernötigsten Werte beschränken.

Auf Grundlage dieser beiden Datenquellen soll in einem nachfolgenden Schritt die Kalkulation vorgenommen werden. Diese soll auf den in Kap. 3 und in der Projektarbeit zusammengestellten Gleichungen basieren. Die Ergebnisse dieser Kalkulation sollen einerseits zur graphischen Darstellung des Prozesses in einer Simulation verwendet werden. Andererseits stellen sie gleichzeitig die Spezifikationsdaten dar und sollen an die entsprechenden Datenblätter für die Pumpen oder die Kolonne geschickt werden. In Abbildung 5.1 ist die Struktur der Software skizziert.

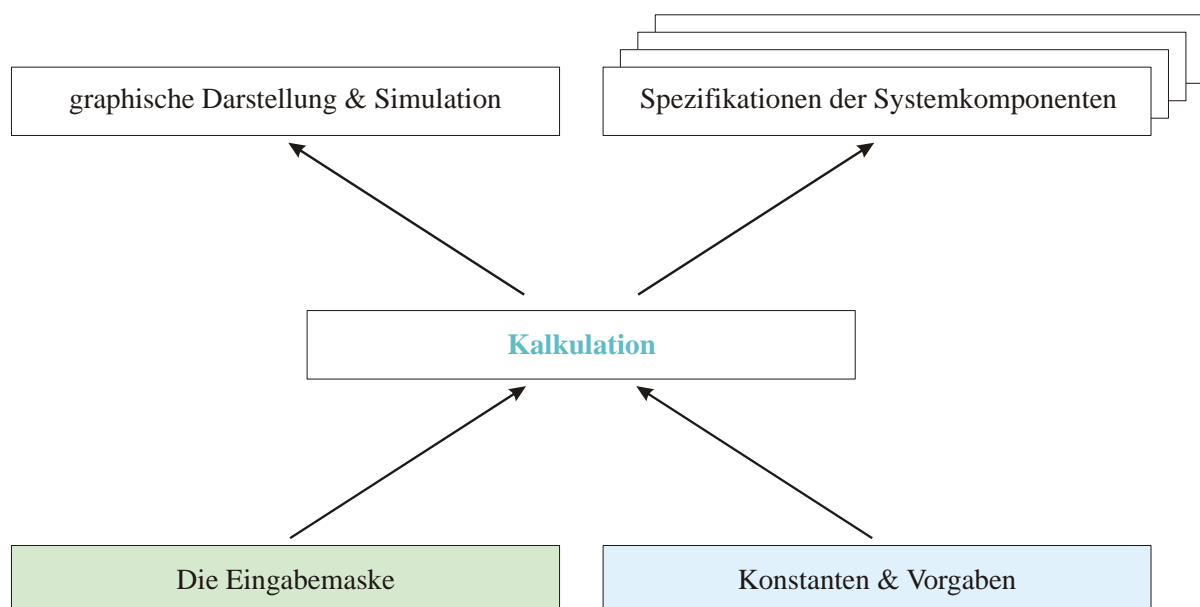


Abbildung 5.1: Die Struktur der Excel-Kalkulation

Die Daten, die sich am Ende der Kalkulation in den Spezifikationen finden, sind für den planenden Ingenieur die Grundlage für das Einholen von Angeboten zwecks Bestellung der Systemkomponenten und für Verhandlungen mit Dienstleistern wie Anlagenbauern etc.

Im Folgenden sollen die einzelnen Datenblätter der Excel-Kalkulation vorgestellt werden. Eine Funktionsbeschreibung jeder einzelnen Zelle der Exceldatei würde jedoch den Rahmen dieser Arbeit bei weitem sprengen. Aus diesem Grunde soll eine gewichtete Beschreibung des Hauptinhaltes erfolgen. Da viele Zellen mit einem Kommentar versehen wurden, ist eine Einsicht in detaillierte Informationen direkt in der geöffneten Datei möglich.

5.1 Eingabemaske

Die Eingabe unterteilt sich in mehrere Abschnitte. Angefangen mit den Daten des Vorversuches werden zunächst die Stoffdaten der einzelnen Komponenten der Produkte abgefragt. Danach werden die Eigenschaften von Einsatz- und Endprodukt sowie ein Wert zu den Brüden eingegeben. Nur die hellgrün hinterlegten Felder sind zur Eingabe der Daten funktional. Bei Daten, die oft in unterschiedlichen Einheiten angegeben werden und deren Einheiten sich bisweilen nicht einfach ineinander umrechnen lassen, befindet sich ein hellgelb hinterlegtes Auswahlfeld rechts daneben. Dadurch ist es möglich, die Einheit für die Dichte und die Viskosität (egal ob dynamische oder kinematische) vorzuwählen und dann den jeweiligen Wert ohne vorherige Umrechnung einzugeben.

| Stoffdaten | | |
|--|----------|--------------------------|
| leicht siedende Komponente | | |
| Substanzbezeichnung | Methanol | |
| Dichte ρ | 0,79 | g/cm ³ |
| Bestimmungstemperatur der Dichte | 20 | °C |
| Viskosität | 0,58 | mPa*s |
| Bestimmungstemperatur der Viskosität | 20 | mPa*s |
| Schmelztemperatur | -78 | kg/(m*h) lb/(ft*s) |
| Siedetemperatur | 64,7 | pdl*s/ft ² |
| Druck bei Siedetemperatur | 1013 | lb/(in*s) |
| Dampfdruck | 217 | cm ² /s St |
| Bestimmungstemperatur des Dampfdruckes | 30 | mm ² /s |
| Zersetzungstemperatur | 190 | °C |

Abbildung 5.2: Das Pull-Down-Menue zur Anpassung der Einheit

Nach den Stoffdaten werden Daten zur betrieblichen Umgebung abgefragt. Dies beginnt mit den Parametern des zur Verfügung stehenden Dampfes, einigen geographischen und klimatischen Informationen und Daten zum verwendeten Rohrleitungsstandard sowie Werten zu Behältern in der Anlage, an die die Trocknung angeschlossen werden soll.

Weiter geht es mit Vorgaben für die zu planenden Apparate und deren Materialauswahl. Beim W 001 kann zum Beispiel der Schätzwert für den Differenzdruck gelöscht werden. In diesem Fall wird unter der Zelle der berechnete Schätzwert angezeigt, mit dem dann gerechnet wird. Dieser muss dann natürlich nicht in die Maske eingegeben werden.

Dann werden geodätische Messwerte und einige Schätzungen von Rohrleitungslängen benötigt. Eine Zeichnung zur leichteren Orientierung findet sich rechts neben den Eingabefeldern.

An Ende werden Voreinstellungen für die Armaturen abgefragt. Diese sind per Pull-Down-Menue auswählbar.

Falls ein Fehler auftritt oder eine Armatur für den benötigten Einsatzort nicht in der richtigen Nennweite beschaffbar ist, wird dies rechts neben dem Eingabefeld angezeigt.

| | | | |
|--|------|------------------|--------|
| Brüden (Nebenprodukt) | | | |
| Mitriss an Schwersiedenden $\omega_{SS,Brüden}$ | 0,3 | Ma% | |
| Dampf und Kondensat | | | |
| Druckstufe | 4 | bar _a | FALSCH |
| Temperatur | 140 | °C | |
| Druck im Kondensatbehälter | 1,1 | bar _a | |
| Achtung! Die eingegebene Temperatur ist kleiner als der Kp von 4 bar! | | | |
| geographische Umgebungsbedingungen | | | |
| geographische Breite | 52,5 | ° | |
| h _{über MN} | 50 | m | |
| Durchschnittstemperatur | 20 | °C | |
| Minimaltemperatur | 5 | °C | |

Abbildung 5.3: Beispiel einer Fehlermeldung

Im dargestellten Beispiel wird die eingegebene Temperatur mit der aus der Antoine-Gleichung ermittelten Kondensationstemperatur verglichen um eine Fehlermeldung auszugeben. Im hellgelb hinterlegten Feld „Temperatur“ lässt sich auch auf eine Überhitzungstemperatur umstellen. Der rechts neben der fraglichen Zelle ausgegebene Wert ist ein boolescher (logischer) Wert für 0, also nicht der umgangssprachliche Begriff „falsch“.

An mehreren Stellen der Eingabemaske gibt es die Möglichkeit, eine Wahl zwischen einem selbst eingegebenen Parameter oder einem durch die Kalkulation ermittelten Wert zu treffen. Dies ist z.B. beim Nenndruck so, bei dem man per Pull-Down-Menue zwischen PN 6 bis PN 25 oder „berechnen lassen“ wählen kann. Eine Wahlmöglichkeit wurde auch für die Eingabe der Feed- oder EP-Menge bereitgestellt. Hier kann in eines der beiden Felder ein Wert eingegeben werden – je nachdem, ob die Betrachtung vom zu verarbeitenden oder vom zu erzeugenden Produkt ausgehen soll. Die jeweils andere Menge wird dann in der Kalkulation über eine Mengenbilanz ermittelt.

5.2 Fehlermaske

Um die Berechnung hinsichtlich von Fehleingaben anzusichern, wurde die Prüfliste (Datenblatt „Fehler“) implementiert. Aufgabe ist es, Eingabefehler zu identifizieren, auf

fehlende Werte hinzuweisen und so für eine gewisse Sicherheit der korrekten Funktion der Kalkulationsroutinen zu sorgen. So wird z.B. geprüft, ob in bestimmten Eingabezellen Werte vorhanden sind, ob überflüssige Angaben gemacht wurden oder ob die Werte plausibel sind. Es versteht sich von selbst, dass dies nicht bei allen Daten machbar ist und so dient die Prüfliste lediglich dazu, die Wahrscheinlichkeit von Fehlern zu verringern.

| Prüfliste | | | |
|--|---|--|-------------------|
| | | Achtung! 1 möglicher Konflikt vorhanden. | |
| Input | | | Anzahl der Fehler |
| Anlagenleistung | OK | | 0 |
| Produktmengen | OK | | 0 |
| Kondensatbehälter | OK | | 0 |
| Vorversuchsdaten | OK | | 0 |
| Stoffdaten LS | OK | | 0 |
| Stoffdaten SS | OK | | 0 |
| Stoffdaten Feed | OK | | 0 |
| Stoffdaten EP | OK | | 0 |
| Stoffdaten Brüden | OK | | 0 |
| Dampf | Bitte die Daten zur Dampfvorsorgung prüfen. | | 1 |
| Geographie | OK | | 0 |
| betriebl. Bedingungen | OK | | 0 |
| Wärmeübertrager | OK | | 0 |
| Pumpen | OK | | 0 |
| Materialauswahl | OK | | 0 |
| geodätische Angaben | OK | | 0 |
| Armaturen | OK | | 0 |
| Allgemeines (nur im Tabellenblatt Kalkulation) | OK | | 0 |

Abbildung 5.4: Die Fehlermaske mit einer beispielhaften Fehlermeldung

Falls ein durch diese Routinen nicht identifizierbarer Fehler im Datenblatt „Kalkulation“ auftritt, wird er durch den letzten Punkt mit der Bezeichnung „Allgemeines (nur im Datenblatt Kalkulation)“ erkannt. Eine Suchroutine ermittelt dann die Anzahl der Fehler und versucht den Ort und den Fehlertyp zu ermitteln um einen Hinweis zur Auffindung des Problems zu geben.

| Prüfliste | | | |
|--|---|--|-------------------|
| Achtung! 1 möglicher Konflikt vorhanden. | | | |
| Input | | | Anzahl der Fehler |
| Anlagenleistung | OK | | 0 |
| Produktmengen | OK | | 0 |
| Kondensatbehälter | OK | | 0 |
| Vorversuchsdaten | OK | | 0 |
| Stoffdaten LS | OK | | 0 |
| Stoffdaten SS | OK | | 0 |
| Stoffdaten Feed | OK | | 0 |
| Stoffdaten EP | OK | | 0 |
| Stoffdaten Brüden | OK | | 0 |
| Dampf | OK | | 0 |
| Geographie | OK | | 0 |
| betriebl. Bedingungen | OK | | 0 |
| Wärmeübertrager | OK | | 0 |
| Pumpen | OK | | 0 |
| Materialauswahl | OK | | 0 |
| geodätische Angaben | OK | | 0 |
| Armaturen | OK | | 0 |
| Allgemeines (nur im Tabellenblatt Kalkulation) Fehlertyp / Hinweis: | Achtung: 1 nicht näher identifizierbarer Fehler in der Kalkulation. Vermutlich Zelle H39, jedoch zumindest in Zeile 39. Eine Formel hat ungeeignete Eingabewerte bekommen. | | 1 |

Abbildung 5.5: Fehlermaske: Ein nicht eindeutig identifizierbarer Fehler wurde gefunden

5.3 Konstanten und Vorgabeparameter

Das Datenblatt „Parameter“ ist eine Sammlung von Daten- und Hilfstabellen. In ihnen werden Konstanten vorgehalten (Abb. 5.6).

| Naturkonstanten | | |
|-----------------|-----------|-----------|
| R | 8,3144621 | J/(mol*K) |
| N _A | 6,02E+23 | 1/mol |
| k _B | 1,38E-23 | J/K |

Abbildung 5.6: Einige Naturkonstanten, die zur Berechnung herangezogen werden

Des Weiteren werden Tabellenwerte sowie einige Richtwerte gesammelt (Abb. 5.7), welche die Datenbasis für Auswahlroutinen darstellen.

| Koeffizienten für Energieeffizienzklassen (für 4-polige Motoren) von Motoren nach IEC 60034-30 | | | | |
|--|--------|---------|---------|---------|
| Klasse | A | B | C | D |
| IE1 | 0,5234 | -5,0499 | 17,418 | 74,3171 |
| IE2 | 0,0278 | -1,9247 | 10,4395 | 80,9761 |
| IE3 | 0,0773 | -1,8951 | 9,2984 | 83,7025 |

Abbildung 5.7: Beispiel für einige Tabellenwerte. Hier die Koeffizienten der Energieklassen nach IEC 60034-30

Außerdem werden hier Werte unifiziert, d.h. auf normgerechte Einheiten umgerechnet (Abb. 5.8). Diese werden für die Kalkulation teilweise vorbereitend ausgewählt und dann bereitgestellt.

| Viskositäten | | |
|---------------|--------|--------------------|
| ρ_{LS} | 790,00 | kg/m ³ |
| η_{LS} | 0,001 | Pa*s |
| ν_{LS} | 0,01 | cm ² /s |
| ρ_{SS} | 890,00 | kg/m ³ |
| η_{SS} | 0,015 | Pa*s |
| ν_{SS} | 0,17 | cm ² /s |
| ρ_{Feed} | 960,00 | kg/m ³ |
| η_{Feed} | 0,016 | Pa*s |
| ν_{Feed} | 0,17 | cm ² /s |
| ρ_{EP} | 991,00 | kg/m ³ |
| η_{EP} | 0,017 | Pa*s |
| ν_{EP} | 0,17 | cm ² /s |

Abbildung 5.8: Beispiel für die Umwandlung von Eingabedaten beliebiger Einheiten aus der Eingabemaske.

Alle Zellen, die direkt eingegebene Parameter enthalten, sind hellblau hinterlegt. Man kann sie also ohne weiteres ändern, falls aktuellere oder genauere Daten verfügbar sind. Bei den meisten Tabellenwerten ist deren Quelle im Zellenkommentar vermerkt. So lässt sich leicht deren Herkunft identifizieren. Die Tabellenwerte mit roter Schriftfarbe werden in der Kalkulation nicht verwendet. Sie sollen jedoch als Alternative vorhanden bleiben.

5.4 Kalkulation

Das umfangreichste Datenblatt ist die Kalkulation. Diese beginnt mit der Massen- und Energiebilanz. Unterhalb der Letzteren befinden sich in zwei kleinen Tabellen die Ermittlung der Durchführbarkeit der Trocknung und der Notwendigkeit einer Kreislauffahrweise.

| | | | |
|----|--|-------------|----------------|
| 58 | | | |
| 59 | Dampftemperatur zur Trocknung geeignet? | | |
| 60 | | Text | boolean |
| 61 | Dampftemperatur hoch genug? | ja | WAHR |
| 62 | | | |
| 63 | Kreislauffahrweise erforderlich? | | |
| 64 | | Text | boolean |
| 65 | Kreislauf nötig? | nein | FALSCH |
| 66 | | | |
| 67 | Ermittlung der Kreislaufmenge | | |
| 68 | | | |
| 69 | | | |

Abbildung 5.6: Die Ermittlung von Eignung der Dampftemperatur und Notwendigkeit einer Kreislauffahrweise

Weiter unten wird die Kreislaufmenge ermittelt. Hierzu ist eine Iteration nötig, die jedoch bereits nach 3 Schritten ein Ergebnis liefert, das sich durch einen weiteren Berechnungsschritt nicht mehr merklich ändert. Mit dieser Menge und der Entscheidung, ob eine Kreislauffahrweise nötig ist, lässt sich die Fördermenge der P 002 ermitteln, die ein zentrales Element in der Auslegung der Trockneranlage darstellt. Mit der Berechnung der benötigten Dampfmenge darunter sind damit alle Mengenströme der Anlage vollständig erfasst.

Hieraus ergibt sich die Möglichkeit, die Nennweiten aller Rohrleitungen und der dazugehörigen Armaturen zu ermitteln. Dies wird mittels der großen Hilfstabelle im oberen Mittelteil des Tabellenblattes gemacht: Aus einem Grenzwert für die maximale Strömungsgeschwindigkeit des betreffenden Rohrleitungsabschnittes wird ein mindest-Innendurchmesser ermittelt, der mit einer Liste von DN-Innendurchmessern verglichen wird. Der besseren Übersicht wegen wurden die booleschen Figuren für diesen Vergleich in die Spalten der Tabelle eingefügt. Eine Suchfunktion sucht nun von oben kommend den ersten wahren Wert und greift auf den rechts stehenden String mit der Nennweiteninformation zu. Dadurch ist die Nennweite für den Rohrleitungsabschnitt definiert. In einer nachfolgenden Suchroutine wird in der gleichen Tabelle exakt nach diesem String gesucht und der dazu passende Innendurchmesser gesucht. Mit diesem Wert lässt sich die Strömungsgeschwindigkeit und letztendlich der Druckverlust der Rohrleitung bestimmen.

Diese Methode der Bestimmung der Nennweite ist zwar etwas komplizierter als die Ermittlung des wirtschaftlichen Durchmessers nach PA(3.5.5.02). Sie bietet jedoch den Vorteil, eine Strömungsgeschwindigkeit für jeden Rohrleitungsabschnitt (im Tabellenblatt „Parameter“) vorzuwählen. So lassen sich Ausnahmen und Reserven gezielt erzeugen: Ist z.B. die Abgabelitung sehr lang, so kann eine Herabsetzung des Grenzwertes für die Abgabelitung den Energiebedarf der P 002 verringern, wenn daraus resultierend eine Erweiterung des Rohrleitungsquerschnittes in Kauf genommen werden kann.

Die ermittelten Nennweiten dienen dann der Berechnung des Druckverlustes, der Festlegung des größten Teils der Armaturennennweiten und der Weiterverwendung in der Simulation und den Spezifikationen. Die Nennweite einiger Rohrleitungsabschnitte bestimmt überdies die Stutzen-DN der K 001.

Um die Übersichtlichkeit der Kalkulation nicht weiter zu erschweren, befinden sich einige Hilfstabellen nicht im Tabellenblatt „Parameter“ sondern direkt in der Kalkulation. Dazu gehört z.B. die Dampftabelle. Um die benötigten Wert aus dieser zu gewinnen, ist eine größere Anzahl an Zugriffen auf diese Tabelle nötig. Ein ständiger Wechsel zwischen den Datenblättern würde den Versuch der Korrektur beim Auftreten von Fehlern zu sehr verkomplizieren.

Da die P 002 im Kreislaufbetrieb gleichzeitig in zwei Leitungswege fördern muss, besteht das Problem, dass in diesem Fall zwei unterschiedliche Anlagenkennlinien vorhanden sind. Gelöst wurde dies durch den Einsatz einer Blende, die im Leitungsweg mit dem jeweils geringeren Druckverlust einen zusätzlichen Strömungswiderstand schafft. Die Berechnung des Blendendurchmessers hätte eine Ermittlung mit einer programmierten Schleife erfordert. Da dies umgangen werden sollte, musste eine recht große Tabelle mit fast 1000 Zeilen verwendet werden, um alle für den jeweiligen Berechnungsfall verwendbaren Daten bereitzustellen.

5.5 Simulation

Die Simulation besteht aus einer transparent abgelegten Vektorgraphik, unter der der Zelleninhalt des Datenblattes sichtbar ist. Die dort eingesetzten Berechnungsergebnisse sind so angeordnet, dass sie eine sinngemäße Zuordnung zu den entsprechend in der Grafik dargestellten Anlagenabschnitten erleichtert. Etwa in der Mitte der Darstellung wird mit blauer Schriftfarbe die ermittelte Fahrweise dargestellt. Diese ist entweder eine permanente Kreislauffahrweise oder eine Kreislauffahrweise nur im Anfahrbetrieb der Anlage.

Außer den Prozessparametern werden auch Daten wie die ermittelte vertikale Länge der P 002-Saugseite oder die Maximalhöhe der K 001 um einen Eindruck über die Größenverhältnisse der Anlage zu erhalten. Im permanenten Kreislaufbetrieb wird zudem noch angezeigt, wie groß die Bohrung der Lochscheibe für einen Druckausgleich in Richtung Kreislauf und Abgabebehälter sein muss und in welche der beiden in Frage kommenden Leitungen sie eingebaut werden muss.

An der Kondensatleitung 00-K-002 wird die Energiemenge angegeben, die im Dampf der Nachverdampfung (nach der Entspannung im Kondensatableiter) enthalten ist.

5.6 Spezifikationen

Die eigentlichen Ergebnisse der Kalkulation sind in den Spezifikationen der Systemkomponenten zusammengestellt. Ausgedruckt sind dies zehn A4-Blätter mit Daten, die als Basisinformation bzw. Verhandlungsgrundlage mit den Zulieferern und Dienstleistern dienen.

Die Daten zu den Armaturen beziehen sich auf deren Quantität zu jeder Nennweite. Des Weiteren sind noch der Nenndruck und der Werkstoff von größerer Wichtigkeit. Es sei darauf hingewiesen, dass aus Gründen der Einfachheit auf unterschiedliche Materialien und damit

auf eine Aufteilung der Armaturen auf mehrere Datenblätter verzichtet wurde. Die Lagerhaltung von zusätzlichen C-Stahl-Armaturen für Dampfleitungen hat kaum Vorteile, wenn der Großteil der produktberührenden Armaturen aus legierten Stählen besteht. Einige spezielle Hinweise zu bestimmten Armaturtypen werden ebenfalls gegeben.

Die Spezifikationen der K 001 bestehen aus 4 Blättern. Davon beziehen sich zwei auf die Kolonne. Die beiden anderen betreffen den Verteiler und den Tropfenabscheider.

Die Zeichnung der K 001 ist nicht mit Zahlen bemaßt, da es in Excel nicht möglich ist, Text bzw. Zahlen um 90° gedreht darzustellen. Stattdessen werden die Werte im dazugehörigen Datenblatt dargestellt. Wegen der gleichen Symbolik von Zeichnung und Datenblatt ist die Zuordnung der Werte jedoch unproblematisch.

Die Datenblätter der beiden Pumpen finden sich im gleich lautenden Tabellenblatt. Dieses Datenblatt ist eine modifizierte Version einer Vorlage aus der Praxis die bereits mehrfach zur Anfertigung von Anfragen verwendet wurde.

Für die Rohrleitungen wurden zwei Datenblätter erarbeitet. Eines enthält die vom Rohrleitungsbau zu bestellenden Gesamtrohrlängen für jede Nennweite. Das Andere stellt eine Arbeitsgrundlage für den Vorrichter der Rohrleitungsbauer dar. Mit den darauf vorhandenen Informationen kann der Anfangs- und Endpunkt der Rohrleitungsabschnitte in der Anlage definiert werden um den räumlichen Verlauf der Leitungen für die Isometrien festzulegen und diese eindeutig benennen zu können.

Das Letzte Datenblatt beinhaltet die Daten des Plattenwärmeübertrages. Es wurde selbst erstellt, jedoch bereits in der Praxis für Anfragen bei der Firma Thermowave getestet. Auf Grund der guten Übersicht und optischen der Ähnlichkeit mit gebräuchlichen Datenblättern von Wärmeübertragern wurde diese vom Anbieter bereits als praxistauglich und besonders komfortabel bewertet. Gleiches gilt für das Datenblatt der Kreiselpumpe.

6 Parameterstudien

Um die Leistungsfähigkeit des Modells zu demonstrieren, werden im Folgenden zwei unterschiedliche Datensätze verwendet. Der erste Datensatz und die daraus erhaltenen Ergebnisse stellen dabei die Basis für einen Vergleich dar. Im Zweiten soll ein Teil der Eingaben so verändert werden, dass möglichst gut erkennbare Unterschiede zum Ausgangsmodell sichtbar werden.

Um dennoch eine Vergleichbarkeit zu erzielen, soll darauf geachtet werden, dass für beide Versuche das gleiche Stoffgemisch in den gleichen Anteilen mit gleichen Werten der Vorversuche verwendet werden. Die Modifikationen sollen sich deshalb auf den Anlagendurchsatz und den zur Verfügung stehenden Energieträger (Heizdampf) beschränken. Ziel soll es weiterhin sein, möglichst kostengünstige Armaturen zu verwenden. Dies sind Kugelhähne bis DN 50 und Klappen für größere Nennweiten. Die Verwendung dieser Armaturtypen ist nicht überall sinnvoll, weshalb auch Ventile und Schieber zum Einsatz kommen werden.

Die Unterschiede in den beiden Modellen sind in Tabelle 6.1 gegenüber gestellt.

Tabelle 6.1: Unterschiede in den Eingabedaten

| modifizierter Parameter | Beispiel a | Beispiel b |
|---|-----------------------|--|
| Kolonnendruck | 250 mbar _a | 160 mbar _a |
| Massenstrom(Feed) | 3.000 kg/h | 20.000 kg/g |
| Druck(Heizdampf) | 4 bar _a | 3 bar _a |
| mittl. Außentemperatur | 20 °C | 9 °C |
| minimale Außentemperatur | 5 °C | -20 °C |
| Nennweitensystem | EN ISO 1127 - Reihe 1 | DIN 11850 - Reihe 2 |
| Nennweitenauswahl | komplett | ohne DN 20, 32, 40, 65 |
| Nenndruckvorwahl | PN 25 | berechnen lassen |
| Druckdifferenz des WÜ W 001 | 0,5 bar (als Vorgabe) | 0,7 (von Überschlagsgleichung ermittelt) |
| Energieeffizienzklasse Pumpenmotor (P 002) | IE2 | IE1 |
| zusätzliche Druckverluste von Leitungen und Messgeräten: | | |
| Leitung 00-F-001 (Feed zur Pumpe P 001) | 100 mbar | 50 mbar |
| Leitung 00-H-004 (Kreislaufleitung) | 0 mbar | 50 mbar |
| Flowmeter 00F001 (Feed) | 200 mbar | 100 mbar |
| Flowmeter 00H001 (Endprodukt) | 250 mbar | 200 mbar |

In den Kapiteln 6.1.1 und 6.1.2 werden zwei vollständige Datensätze für die Auslegung der Anlage dargestellt.

6.1 Eingabedaten zu den Versuchen

6.1.1 Beispiel a

Hier soll eine kleine Anlage mit einer Durchsatzleistung von 3.000 kg pro Stunde (Feed) ausgelegt werden. Der Heizdampfdruck sei 4 bar_a.

Im Folgenden werden die Werte der Eingabemaske in Vollständigkeit dargestellt. Siehe dazu die Tabellen 6.1.1 bis 6.1.7.

Tabelle 6.1.1: Eingabemaske für Beispiel a, Teil 1

| Daten aus dem Vorversuch | | | Logik für die Fehlersuche |
|--------------------------|-----|-------------------|---------------------------|
| T _{vorwärm} | 128 | °C | |
| T _{Brüden} | 75 | °C | |
| T _{EP} | 115 | °C | |
| p _{Kolonne} | 250 | mbar _a | |
| | | | |

In Tabelle 6.1.1 sind die Experimental- und Stoffdaten für das Beispiel a zu finden. Die Werte gelten auch für das Beispiel B um eine Vergleichbarkeit der Auslegungsfälle zu erleichtern. Es ist ein Gemisch aus einer Fettsäure (Oleinsäure) und Methanol gewählt worden.

Tabelle 6.1.2: Eingabemaske für Beispiel a, Teil 2

| Stoffdaten | | |
|---|------------------------------|--------------------|
| leicht siedende Komponente | | |
| Substanzbezeichnung | Methanol | |
| Dichte ρ | 0,79 | g/cm ³ |
| Bestimmungstemperatur der Dichte | 20 | °C |
| Viskosität | 0,58 | mPa*s |
| Bestimmungstemperatur der Viskosität | 20 | °C |
| Schmelztemperatur | -78 | °C |
| Siedetemperatur | 64,7 | °C |
| Druck bei Siedetemperatur | 1013 | mbar _a |
| Dampfdruck | 217 | mbar _a |
| Bestimmungstemperatur des Dampfdruckes | 30 | °C |
| Zersetzungstemperatur | 190 | °C |
| spez. Wärmekapazität $c_{p,LS}$ | 2,2 | kJ/(kg*K) |
| Verdampfungsenthalpie $\Delta h_{V,LS}$ | 1100 | kJ/kg |
| molare Masse M_{LS} | 34 | kg/kmol |
| Antoine-Parameter A_{LS} | 19,22 | 1 |
| Antoine-Parameter B_{LS} | 3845,7 | 1 |
| Antoine-Parameter C_{LS} | 247,38 | 1 |
| Antoine-Einheiten (Druck/Temp.) | mbar | °C |
| Antoine-Logarithmus | natürlicher Logarithmus (ln) | |
| untere Grenze der Gleichung | -28,9 | °C |
| obere Grenze der Gleichung | 112,3 | °C |
| schwer siedende Komponente | | |
| Substanzbezeichnung | Ölsäure, C18-1 | |
| Dichte ρ | 0,89 | g/cm ³ |
| Bestimmungstemperatur der Dichte | 20 | °C |
| Viskosität | 16,9 | mm ² /s |
| Bestimmungstemperatur der Viskosität | 40 | °C |
| Schmelztemperatur | 17 | °C |
| Siedetemperatur | 360 | °C |
| Druck bei Siedetemperatur | 1013 | mbar _a |
| Dampfdruck | 1,5 | mbar _a |
| Bestimmungstemperatur des Dampfdruckes | 176 | °C |
| Zersetzungstemperatur | | °C |
| spez. Wärmekapazität $c_{p,SS}$ | 2,6 | kJ/(kg*K) |
| molare Masse M_{SS} | 280 | kg/kmol |

Tabelle 6.1.3: Eingabemaske für Beispiel a, Teil 3

| | | |
|--|-----------------------|--------------------|
| Einsatzprodukt (Feed) | | |
| Massenstrom | 3.000,0 | kg/h |
| Dichte ρ | 960 | kg/m ³ |
| Viskosität | 16,9 | mm ² /s |
| Bestimmungstemperatur der Viskosität | 40 | °C |
| Anteil leicht siedende Komponente | 3 | Ma% |
| T_{Feed} | 65 | °C |
| Dampfdruck bei 65 °C | | mbar _a |
| spez. Wärmekapazität $c_{p, Feed}$ | | kJ/(kg*K) |
| Ausstockungsgefahr unterhalb von | 10 | °C |
| Feststoffanteil etwa | 0 | Vol% |
| zu erwartende Thermolabilität ab | 360 | °C |
| getrocknetes Produkt (End- bzw. Hauptprodukt) | | |
| Massenstrom | | kg/h |
| Dichte ρ | 991 | kg/m ³ |
| Viskosität | 16,9 | mm ² /s |
| Anteil leicht siedende Komponente | 0,05 | Ma% |
| spez. Wärmekapazität $c_{p, EP}$ | | kJ/(kg*K) |
| Ausstockungsgefahr unterhalb von | 15 | °C |
| minimale Abgabetemperatur | 100 | °C |
| Brüden (Nebenprodukt) | | |
| Mitriss an Schwersiedenden $\omega_{SS, Brüden}$ | 0,3 | Ma% |
| Dampf und Kondensat | | |
| Druckstufe | 4 | bar _a |
| Delta-T über Satttdampf | 1 | K |
| Druck im Kondensatbehälter | 1 | bar _a |
| geographische Umgebungsbedingungen | | |
| geographische Breite | 52,5 | ° |
| $h_{über MN}$ | 50 | m |
| Durchschnittstemperatur | 20 | °C |
| Minimaltemperatur | 5 | °C |
| betriebliche Umgebungsbedingungen | | |
| vor Ort übliches Nennweitensystem | EN ISO 1127 - Reihe 1 | |
| Nennweitenauswahl | komplett | |
| Nenndruck wählen oder berechnen lassen? | PN 25 | |

Tabelle 6.1.3 enthält die Zusammensetzung und die physikalischen Parameter des Einsatzproduktes sowie die Parameter des Energieträgers und wichtige Umgebungsbedingungen.

Tabelle 6.1.4: Eingabemaske für Beispiel a, Teil 4

| | | |
|---|------|------------------|
| W 001 | | |
| $\Delta T_{\text{Produkt}}$ im W 001 | 30 | K |
| Δp | 0,5 | bar |
| P 001 | | |
| Effizienzklasse _{Motor} | IE2 | |
| Druck im Vorlagebehälter der P 001 | 1,05 | bar _a |
| P 002 | | |
| Effizienzklasse _{Motor} | IE2 | |
| Druck im Abgabebehälter | 1 | bar _a |
| max. Füllstand über Eingang im Behälter | 10 | m |

| | |
|---|--------------------------|
| Materialauswahl bezüglich Korrosivität | |
| Rohrleitungen und Armaturen | 1.4571 (V4A) |
| Wärmeübertrager | 1.4571 (V4A) |
| Pumpengehäuse | 1.4571 (V4A) |
| Pumpenlaufräder/-Kolben | 1.4571 (V4A) |
| Kolonne & Verteiler | 1.4571 (V4A) |
| Tropfenabscheider / Demister | 1.4404 (V4A) |
| Dämmstoff für Rohrleitungen und Apparate | Steinwolle (lange Faser) |

| geodätische Angaben | | |
|--|------|---------|
| Bestimmung der geodätischen Höhe der einzelnen Punkte (siehe Zeichnung) | | |
| Punkt | Höhe | Einheit |
| 1 | 7 | m |
| 2 | 10 | m |
| 3 | 10 | m |
| 4 | 10 | m |
| 5 | 10 | m |
| 6 | 10 | m |
| Die Höhe der Punkte 7 und 8 wird berechnet. | | |
| 9 | 0 | m |
| 10 | 0 | m |
| 11 | 0 | m |
| 12 | -2 | m |
| 13 | 10 | m |
| 14 | 4 | m |
| 15 | 4 | m |

Tabelle 6.1.5: Eingabemaske für Beispiel a, Teil 5

| Schätzung der benötigten Rohrlänge zwischen den in der Zeichnung befindlichen Punkten. (in den Zeilen mit der Bemerkung "nur horizontaler Teil" wird der vertikale Abschnitt berechnet) | | |
|---|-------|---------|
| Strecke | Länge | Einheit |
| von 1 zu 2 | 1,5 | m |
| von 3 zu 4 | 12 | m |
| von 4 zu 5 | 3 | m |
| von 6 zu 7 (nur horizontaler Teil) | 2 | m |
| von 8 zu 9 (nur horizontaler Teil) | 5 | m |
| von 10 zu 11 | 3 | m |
| von 11 zu 12 | 60 | m |
| von 11 zu 4 | 2 | m |
| von 13 zu 14 | 1 | m |
| von 14 zu 15 | 25 | m |
| von 16 zu 17 | 6 | m |
| von 18 zu 19 | 5 | m |
| von 19 zu 20 | 2 | m |
| | | |
| Bypass-Gesamtrohrlänge von: | | |
| Regelgruppe oder Armatur | Länge | Einheit |
| 00FV001 | 1,5 | m |
| 00FV002 | 2 | m |
| 00TV001 | 2,5 | m |
| 00CD001 | 1 | m |

In Tabelle 6.1.4 und 6.1.5 werden Vorgaben zu den Pumpen, Apparaten und Armaturen gemacht. Wichtige geodätische Daten wie die Höhe bestimmter Anlagenpunkte sowie einige Schätzwerte zu Rohrlängen gehören dazu.

Tabelle 6.1.6: Eingabemaske für Beispiel a, Teil 6

| Festlegung der Armaturtypen | | |
|--------------------------------|------------------|-----------|
| Armatur-ID (siehe Bild rechts) | Armaturtyp | Nennweite |
| 00MC001 | Kugelhahn | no input |
| 00MC002 | Absperrventil | no input |
| 00MC003 | Schrägsitzventil | no input |
| 00MC004 | Schrägsitzventil | no input |
| 00MC005 | Schrägsitzventil | no input |
| 00MC006 | Schrägsitzventil | no input |
| 00MC007 | Schrägsitzventil | no input |
| 00MC008 | Schrägsitzventil | no input |
| 00MC009 | Absperrklappe | no input |
| 00MC010 | Schrägsitzventil | no input |
| 00MC011 | Schrägsitzventil | no input |
| 00MC012 | Schrägsitzventil | no input |
| 00MC013 | Schrägsitzventil | no input |
| 00MC014 | Schrägsitzventil | no input |
| 00MC015 | Absperrventil | no input |
| 00MC016 | Schrägsitzventil | no input |
| 00MC017 | Absperrventil | no input |
| 00MC018 | Schrägsitzventil | no input |
| 00MC019 | Schrägsitzventil | no input |
| 00MC020 | Absperrventil | no input |
| 00MC021 | Absperrklappe | no input |
| 00MC501 | Kugelhahn | DN 25 |
| 00MC502 | Kugelhahn | DN 15 |
| 00MC503 | Kugelhahn | DN 15 |
| 00MC504 | Kugelhahn | DN 15 |
| 00MC505 | Kugelhahn | DN 15 |
| 00MC506 | Kugelhahn | DN 15 |
| 00MC507 | Kugelhahn | DN 15 |
| 00MC508 | Kugelhahn | DN 15 |
| 00MC509 | Kugelhahn | DN 50 |
| 00MC510 | Kugelhahn | DN 50 |
| 00MC511 | Kugelhahn | DN 50 |
| 00MC512 | Kugelhahn | DN 25 |
| 00MC513 | Kugelhahn | DN 15 |
| 00MC514 | Kugelhahn | DN 15 |
| 00MC515 | Absperrklappe | DN 50 |
| 00MC516 | Absperrklappe | DN 50 |

Tabelle 6.1.6 dient zur Festlegung von Armaturtypen. Für Armaturen in Standardpositionen (CIP-Stutzen, Restentleerungen oder Entlüftungen/Entleerungen an Pumpen etc.) kann die Nennweite vorgegeben werden, da diese nicht durch Mengenbilanzen erfasst und somit nicht dimensionierbar sind.

Tabelle 6.1.7: Eingabemaske für Beispiel a, Teil 7

| Schätzwerte für die Anzahl an 90°-Bögen pro Leitungsabschnitt | | |
|---|--------|---------|
| Leitungsabschnitt | Anzahl | Einheit |
| 00-F-001 | 7 | Stck. |
| 00-F-002 | | Stck. |
| 00-F-003 | 0 | Stck. |
| 00-F-004 | 4 | Stck. |
| 00-H-001 | 2 | Stck. |
| 00-H-002 | | Stck. |
| 00-H-003 | 12 | Stck. |
| 00-H-004 | 2 | Stck. |
| 00-L-001 | 1 | Stck. |
| 00-S-001 | 5 | Stck. |
| 00-S-002 | 2 | Stck. |
| 00-C-001 | 1 | Stck. |
| 00-C-002 | 5 | Stck. |

| aufschlägige Druckverluste | | |
|----------------------------|------------|---------|
| Leitungsabschnitt | Δp | Einheit |
| 00-F-001 | 100 | mbar |
| 00-F-002 | 50 | mbar |
| 00-F-003 | | mbar |
| 00-F-004 | | mbar |
| 00-H-001 | | mbar |
| 00-H-002 | | mbar |
| 00-H-003 | | mbar |
| 00-H-004 | | mbar |
| 00-L-001 | | mbar |
| 00-S-001 | | mbar |
| 00-S-002 | | mbar |
| 00-C-001 | | mbar |
| 00-C-002 | | mbar |
| 00F001 (Feedmengenmessung) | 200 | mbar |
| 00F002 (EP-Mengenmessung) | 250 | mbar |

Tabelle 6.1.7 bietet die Möglichkeit, zusätzliche Schätzwerte einzugeben.
 Ende der Eingabemaske für Beispiel a.

6.1.2 Beispiel b

Die Anforderung an die Durchsatzleistung liegt bei 20 t/h und der zur Verfügung stehende Heizdampfdruck sei 3 bar. Um die Variabilität des Modells zu demonstrieren, sollen noch weitere Werte modifiziert werden. Diese sind der besseren Anschaulichkeit halber rot hervorgehoben. Siehe Tabellen 6.1.8 bis 6.1.13.

Tabelle 6.1.8: Eingabemaske für Beispiel b, Teil 1

| Daten aus dem Vorversuch | | |
|---|----------------------------|--------------------|
| $T_{\text{vorwärm}}$ | 128 | °C |
| $T_{\text{Brüden}}$ | 75 | °C |
| T_{EP} | 115 | °C |
| P_{Kolonne} | 160 | mbar _a |
| Stoffdaten | | |
| leicht siedende Komponente | | |
| Substanzbezeichnung | Methanol | |
| Dichte ρ | 0,79 | g/cm ³ |
| Bestimmungstemperatur der Dichte | 20 | °C |
| Viskosität | 0,58 | mPa*s |
| Bestimmungstemperatur der Viskosität | 20 | °C |
| Schmelztemperatur | -78 | °C |
| Siedetemperatur | 64,7 | °C |
| Druck bei Siedetemperatur | 1013 | mbar _a |
| Dampfdruck | 217 | mbar _a |
| Bestimmungstemperatur des Dampfdruckes | 30 | °C |
| Zersetzungstemperatur | 190 | °C |
| spez. Wärmekapazität $c_{p,LS}$ | 2,2 | kJ/(kg*K) |
| Verdampfungsenthalpie $\Delta h_{V,LS}$ | 1100 | kJ/kg |
| molare Masse M_{LS} | 34 | kg/kmol |
| Antoine-Parameter A_{LS} | 19,22 | 1 |
| Antoine-Parameter B_{LS} | 3845,7 | 1 |
| Antoine-Parameter C_{LS} | 247,38 | 1 |
| Antoine-Einheiten (Druck/Temp.) | mbar | °C |
| Antoine-Logarithmus | natürlicher Logarithm.(ln) | |
| untere Grenze der Gleichung | -28,9 | °C |
| obere Grenze der Gleichung | 112,3 | °C |
| schwer siedende Komponente | | |
| Substanzbezeichnung | Ölsäure, C18-1 | |
| Dichte ρ | 0,89 | g/cm ³ |
| Bestimmungstemperatur der Dichte | 20 | °C |
| Viskosität | 16,9 | mm ² /s |
| Bestimmungstemperatur der Viskosität | 40 | °C |
| Schmelztemperatur | 17 | °C |
| Siedetemperatur | 360 | °C |
| Druck bei Siedetemperatur | 1013 | mbar _a |
| Dampfdruck | 1,5 | mbar _a |
| Bestimmungstemperatur des Dampfdruckes | 176 | °C |
| Zersetzungstemperatur | | °C |
| spez. Wärmekapazität $c_{p,SS}$ | 2,6 | kJ/(kg*K) |
| molare Masse M_{SS} | 280 | kg/kmol |

Tabelle 6.1.9: Eingabemaske für Beispiel b, Teil 2

| | | |
|--|------------------------|--------------------|
| Einsatzprodukt (Feed) | | |
| Massenstrom | 20.000,0 | kg/h |
| Dichte ρ | 960 | kg/m ³ |
| Viskosität | 16,9 | mm ² /s |
| Bestimmungstemperatur der Viskosität | 40 | °C |
| Anteil leicht siedende Komponente | 3 | Ma% |
| T_{Feed} | 65 | °C |
| Dampfdruck bei 65 °C | | mbar _a |
| spez. Wärmekapazität $c_{p \text{ Feed}}$ | | kJ/(kg*K) |
| Ausstockungsgefahr unterhalb von | 10 | °C |
| Feststoffanteil etwa | 0 | Vol% |
| zu erwartende Thermolabilität ab | 360 | °C |
| getrocknetes Produkt (End- bzw. Hauptprodukt) | | |
| Massenstrom | | kg/h |
| Dichte ρ | 991 | kg/m ³ |
| Viskosität | 16,9 | mm ² /s |
| Anteil leicht siedende Komponente | 0,05 | Ma% |
| spez. Wärmekapazität $c_{p \text{ EP}}$ | | kJ/(kg*K) |
| Ausstockungsgefahr unterhalb von | 15 | °C |
| minimale Abgabetemperatur | 100 | °C |
| Brüden (Nebenprodukt) | | |
| Mitriss an Schwersiedenden $\omega_{\text{SS,Brüden}}$ | 0,3 | Ma% |
| Dampf und Kondensat | | |
| Druckstufe | 3 | bar _a |
| Delta-T über Satttdampf | 1 | K |
| Druck im Kondensatbehälter | 1 | bar _a |
| geographische Umgebungsbedingungen | | |
| geographische Breite | 52,5 | ° |
| $h_{\text{über MN}}$ | 50 | m |
| Durchschnittstemperatur | 9 | °C |
| Minimaltemperatur | -20 | °C |
| betriebliche Umgebungsbedingungen | | |
| vor Ort übliches Nennweitensystem | DIN 11850 - Reihe 2 | |
| Nennweitenauswahl | ohne DN 20, 32, 40, 65 | |
| Nenndruck wählen oder berechnen lassen? | berechnen lassen | |

Tabelle 6.1.10: Eingabemaske für Beispiel b, Teil 3

| | | |
|---|------|------------------|
| W 001 | | |
| $\Delta T_{\text{Produkt}}$ im W 001 | 30 | K |
| Δp | | bar |
| Schätzwert: 0,7 bar | | |
| P 001 | | |
| Effizienzklasse _{Motor} | IE2 | |
| Druck im Vorlagebehälter der P 001 | 1,05 | bar _a |
| P 002 | | |
| Effizienzklasse _{Motor} | IE1 | |
| Druck im Abgabebehälter | 1 | bar _a |
| max. Füllstand über Eingang im Behälter | 10 | m |

| | |
|---|--------------------------|
| Materialauswahl bezüglich Korrosivität | |
| Rohrleitungen und Armaturen | 1.4571 (V4A) |
| Wärmeübertrager | 1.4571 (V4A) |
| Pumpengehäuse | 1.4571 (V4A) |
| Pumpenlaufräder/-Kolben | 1.4571 (V4A) |
| Kolonnen & Verteiler | 1.4571 (V4A) |
| Tropfenabscheider / Demister | 1.4404 (V4A) |
| Dämmstoff für Rohrleitungen und Apparate | Steinwolle (lange Faser) |

| | | |
|--|-------------|----------------|
| geodätische Angaben | | |
| Bestimmung der geodätischen Höhe der einzelnen Punkte (siehe Zeichnung) | | |
| Punkt | Höhe | Einheit |
| 1 | 7 | m |
| 2 | 10 | m |
| 3 | 10 | m |
| 4 | 10 | m |
| 5 | 10 | m |
| 6 | 10 | m |
| Die Höhe der Punkte 7 und 8 wird berechnet. | | |
| 9 | 0 | m |
| 10 | 0 | m |
| 11 | 0 | m |
| 12 | -2 | m |
| 13 | 10 | m |
| 14 | 4 | m |
| 15 | 4 | m |

Tabelle 6.1.11: Eingabemaske für Beispiel b, Teil 4

| Schätzung der benötigten Rohrlänge zwischen den in der Zeichnung befindlichen Punkten. (in den Zeilen mit der Bemerkung "nur horizontaler Teil" wird der vertikale Abschnitt berechnet) | | |
|---|-------|---------|
| Strecke | Länge | Einheit |
| von 1 zu 2 | 1,5 | m |
| von 3 zu 4 | 12 | m |
| von 4 zu 5 | 3 | m |
| von 6 zu 7 (nur horizontaler Teil) | 2 | m |
| von 8 zu 9 (nur horizontaler Teil) | 5 | m |
| von 10 zu 11 | 3 | m |
| von 11 zu 12 | 60 | m |
| von 11 zu 4 | 2 | m |
| von 13 zu 14 | 1 | m |
| von 14 zu 15 | 25 | m |
| von 16 zu 17 | 6 | m |
| von 18 zu 19 | 5 | m |
| von 19 zu 20 | 2 | m |
| Bypass-Gesamtrohrlänge von: | | |
| Regelgruppe oder Armatur | Länge | Einheit |
| 00FV001 | 1,5 | m |
| 00FV002 | 2 | m |
| 00TV001 | 2,5 | m |
| 00CD001 | 1 | m |

Tabelle 6.1.12: Eingabemaske für Beispiel b, Teil 5

| Festlegung der Armaturtypen | | |
|--------------------------------|------------------|-----------|
| Armatur-ID (siehe Bild rechts) | Armaturtyp | Nennweite |
| 00MC001 | Kugelhahn | no input |
| 00MC002 | Absperrventil | no input |
| 00MC003 | Schrägsitzventil | no input |
| 00MC004 | Schrägsitzventil | no input |
| 00MC005 | Schrägsitzventil | no input |
| 00MC006 | Schrägsitzventil | no input |
| 00MC007 | Schrägsitzventil | no input |
| 00MC008 | Schrägsitzventil | no input |
| 00MC009 | Absperrklappe | no input |
| 00MC010 | Schrägsitzventil | no input |
| 00MC011 | Schrägsitzventil | no input |
| 00MC012 | Schrägsitzventil | no input |
| 00MC013 | Schrägsitzventil | no input |
| 00MC014 | Schrägsitzventil | no input |
| 00MC015 | Absperrventil | no input |
| 00MC016 | Schrägsitzventil | no input |
| 00MC017 | Absperrventil | no input |
| 00MC018 | Schrägsitzventil | no input |
| 00MC019 | Schrägsitzventil | no input |
| 00MC020 | Absperrventil | no input |
| 00MC021 | Absperrklappe | no input |
| 00MC501 | Kugelhahn | DN 25 |
| 00MC502 | Kugelhahn | DN 15 |
| 00MC503 | Kugelhahn | DN 15 |
| 00MC504 | Kugelhahn | DN 15 |
| 00MC505 | Kugelhahn | DN 15 |
| 00MC506 | Kugelhahn | DN 15 |
| 00MC507 | Kugelhahn | DN 15 |
| 00MC508 | Kugelhahn | DN 15 |
| 00MC509 | Kugelhahn | DN 50 |
| 00MC510 | Kugelhahn | DN 50 |
| 00MC511 | Kugelhahn | DN 50 |
| 00MC512 | Kugelhahn | DN 25 |
| 00MC513 | Kugelhahn | DN 15 |
| 00MC514 | Kugelhahn | DN 15 |
| 00MC515 | Absperrklappe | DN 50 |
| 00MC516 | Absperrklappe | DN 50 |

Tabelle 6.1.13: Eingabemaske für Beispiel b, Teil 6

| Schätzwerte für die Anzahl an 90°-Bögen pro Leitungsabschnitt | | |
|---|--------|---------|
| Leitungsabschnitt | Anzahl | Einheit |
| 00-F-001 | 7 | Stck. |
| 00-F-002 | | Stck. |
| 00-F-003 | 0 | Stck. |
| 00-F-004 | 4 | Stck. |
| 00-H-001 | 2 | Stck. |
| 00-H-002 | | Stck. |
| 00-H-003 | 12 | Stck. |
| 00-H-004 | 2 | Stck. |
| 00-L-001 | 1 | Stck. |
| 00-S-001 | 5 | Stck. |
| 00-S-002 | 2 | Stck. |
| 00-C-001 | 1 | Stck. |
| 00-C-002 | 5 | Stck. |

| aufschlägige Druckverluste | | |
|----------------------------|------------|---------|
| Leitungsabschnitt | Δp | Einheit |
| 00-F-001 | 50 | mbar |
| 00-F-002 | 50 | mbar |
| 00-F-003 | | mbar |
| 00-F-004 | | mbar |
| 00-H-001 | | mbar |
| 00-H-002 | | mbar |
| 00-H-003 | | mbar |
| 00-H-004 | 50 | mbar |
| 00-L-001 | | mbar |
| 00-S-001 | | mbar |
| 00-S-002 | | mbar |
| 00-C-001 | | mbar |
| 00-C-002 | | mbar |
| 00F001 (Feedmengenmessung) | 100 | mbar |
| 00F002 (EP-Mengenmessung) | 200 | mbar |

6.2 Simulationen

Darstellung der Simulationsgraphiken: Siehe Anlage F

Die Simulationsgraphiken geben einen Überblick über die Unterschiede in den Kalkulationsergebnissen. Auffällig sind diese bei den Leistungsdaten der Pumpen und des Wärmeübertragers. (Siehe Tabelle 6.2.1)

Tabelle 6.2.1: Gegenüberstellung einer Auswahl ermittelter Parameter

| Parameter | Beispiel a | Beispiel b |
|---|------------|------------|
| Leistungen [kW] | | |
| P _{Welle} P 001 | 0,5 | 2,2 |
| P _{Motor} P 001 | 0,8 | 3,6 |
| P _{Welle} P 002 | 0,6 | 12,1 |
| P _{Motor} P 002 | 0,9 | 17,2 |
| P W001 | 135,7 | 895,0 |
| Massenströme [kg/h] | | |
| m P 001 | 3.000,0 | 20.000,0 |
| m P 002 | 2.900,0 | 85,9 |
| m Kreislaufleitung | 0,0 | 66.500,0 |
| Drücke [bar_a] | | |
| p _{Druckseite} P 001 | 5,1 | 3,8 |
| p _{Druckseite} P 002 | 5,8 | 4,6 |
| Strömungsgeschwindigkeiten [m/s] | | |
| w vor P 001 | 0,8 | 0,7 |
| w nach P 001 | 2,2 | 2,9 |
| w vor K 001 | 3,7 | 3,1 |
| w Kolonnenkopf | 5,2 | 5,9 |
| w Brüdenleitung | 9,3 | 9,4 |
| w vor P 002 | 0,4 | 0,4 |
| w nach P 002 | 2,2 | 2,0 |
| w Kreislaufleitung | 0,0 | 2,4 |
| w Dampfleitung | 19,7 | 20,1 |
| w Kondensatleitung | 1,7 | 1,9 |

Ebenso auffällig ist die geringe Abweichung bei den Drücken und Strömungsgeschwindigkeiten. Vor allem bei Letzteren ist sehr gut erkennbar, dass die Routinen zur Ermittlung der Rohrleitungsnennweiten und des Innendurchmessers der Kolonne sehr zuverlässig arbeiten.

Die Drücke werden ebenfalls so eingestellt, dass keine Situationen auftreten, die inkonsistent erscheinen. Im Beispiel b ermittelt die Routine für den Vergleich der Drücke die Notwendigkeit eines zusätzlichen Strömungswiderstandes. Dieser wird als Lochblende mit einem Innendurchmesser von 50.1 mm ermittelt, woraus eine zusätzliche Druckdifferenz von 1,23 bar entsteht. Ein Einbau dieser Blende ist tatsächlich notwendig, da sonst nicht genügend Produkt aus der Anlage herausgeföhren werden könnte.

In der Bildmitte (siehe Graphiken im Anhang F) ist zu erkennen, dass es sich bei Beispiel b um eine Fahrweise mit permanentem Kreislauf handelt. Ebenfalls gut zu erkennen ist die etwaige Größe der Kolonne. Die Energiemenge des entstehenden Nachdampfes, die in Beispiel a noch kaum nennenswert war, steigt im Beispiel b auf 43,5 kW, einem Wert, der Überlegungen zu dessen Nutzung bereits sinnvoll erscheinen lässt. Die Leistungsaufnahme des Motors der P 002 hat mit 17,33 kW, liegt also bei etwa dem zwanzigfachen Wert der P 002 von Beispiel a.

6.3 Spezifikationen

Spezifikationen: Siehe Anlage G

Wie bereits in 6.2 zu erkennen ist, unterscheiden sich die Dimensionierungen der Anlagen recht deutlich. Die Ergebnisse spiegeln sich in den Spezifikationen wider.

7 Fazit und Erkenntnisse

Die Umsetzung einer Softwarelösung zur Auslegung von verfahrenstechnischen Anlagen ist zweifellos eine Alternative zur herkömmlichen Auslegung. Sie unterliegt jedoch der Einschränkung, dass über den Rahmen programmierter Varianten keine Variationen geben kann. Die eingangs erwähnte Kreativität des Anlagenplaners kann auf die Software nur soweit übertragen werden, wie dieser mögliche Einsatzgebiete und Varianten vorhersehen und implementieren konnte.

Überragend hingegen ist der Zuwachs an Arbeitsgeschwindigkeit durch die Verwendung von Algorithmen.

Für die Beurteilung der Ergebnisse sind jedoch immer noch Fachkenntnisse vonnöten, da die Software, egal auf welchem Niveau, nur in begrenztem Maße über die Fähigkeit verfügen kann, die selbst generierten Werte zu interpretieren. Hierzu ein Beispiel: Bei bestimmten Durchsätzen in der Kreislauffahrweise wird eine Blende zum Druckausgleich für den Leitungsabschnitt 00-H-003 oder 00-H-004 empfohlen. So z.B. auch, wenn die Druckdifferenz nur 1 mbar betragen würde. Es wäre natürlich unsinnig, eine solche Blende tatsächlich in die Leitung einzubauen. Außerdem wäre es selbstverständlich auch möglich, einen Grenzwert einzurichten, ab welcher Druckdifferenz zwischen den oben genannten Rohrleitungsabschnitten diese Information tatsächlich angezeigt werden soll. Jedoch ist die Definition eines solchen Grenzwertes in Form von programmierten Bedingungen nicht trivial, denn aus der Limitierung kann unter anderen Bedingungen eine Einschränkung der Anwendbarkeit des gesamten Modells resultieren.

Besonders hilfreich ist die graphische Darstellung der Ergebnisse in der Simulation. Die den Systemkomponenten zugeordneten Werte veranschaulichen die Prozessbedingungen sehr gut und führen schnell zu einem Überblick über die zu planende Anlage.

Grenzen

Das erarbeitete Modell ist strikt an das R&I-Schema der Anlage gebunden und nur bedingt auf andere Verdampferanlagen anwendbar. Die Übertragbarkeit auf andere Verdampferanlagen beschränkt sich bestenfalls auf eine Abschätzung des Energiebedarfes.

Die Berechnungen mittels MS Excel wurden mit Zunahme der Komplexität der gesamten Kalkulation immer schwieriger. Dies lag daran, dass es zu immer häufigeren Zirkelbezügen kam, wofür Alternativen gefunden werden mussten. Eine Kalkulation mit Gleichungen, die Werte mit hohen Genauigkeiten ermitteln, ist mit der praktizierten Methode nur schwer vorstellbar. Als Beispiel sei hier die Tabelle zur Ermittlung des Bohrungsdurchmessers für die oben angesprochene Blende genannt, welche fast 1.000 Zeilen enthält.

8 Zusammenfassung

Gegenstand dieser Arbeit war die Erarbeitung eines allgemeinen EDV-basierten Modells zur Auslegung einer Trockner- bzw. Verdampferanlage. Dieses Modell sollte in Form einer Excel-Kalkulation unter ausschließlicher Verwendung der einfachen Rechenfunktionen, d.h. ohne Verwendung von VisualBasic, Makros oder der Excel-Iterationsfunktion, aufgestellt werden.

In der voran gegangenen Projektarbeit (Ertel, 2014) wurden Voruntersuchungen zu einem möglichst universell einsetzbaren Anlagenkonzept angestellt und dieses bereits entworfen. Siehe dazu die Abbildung in Anhang A.

Die Anlage besteht aus Vier Abschnitten: Einer Zubringereinheit für die Beschickung mit Einsatzprodukt, Einer Vorwärmung mit einem Wärmeübertrager, der eigentlichen Trockner- bzw. Verdampferkolonne und der Abgabereinheit, die das getrocknete bzw. eingedampfte Produkt aus der Anlage befördert.

Aus diesem Konzept entstand das R&I-Schema der Anlage. Die Anlage sollte aus möglichst einfachen und universell verwendbaren Komponenten bestehen, da hierfür eine große Auswahl an Herstellern existiert. Die Anschaffungs- und Instandhaltungskosten sind dadurch geringer als bei hochspezialisierten Apparaten. Im Ergebnis dieser Überlegungen besteht die Anlage lediglich aus zwei Apparaten: Einer Destillationskolonne und einem Wärmeübertrager. Des Weiteren sind noch zwei Pumpen und drei Regelarmaturen enthalten.

Eine vereinfachte Darstellung der Anlage findet sich in Abbildung 7.1.

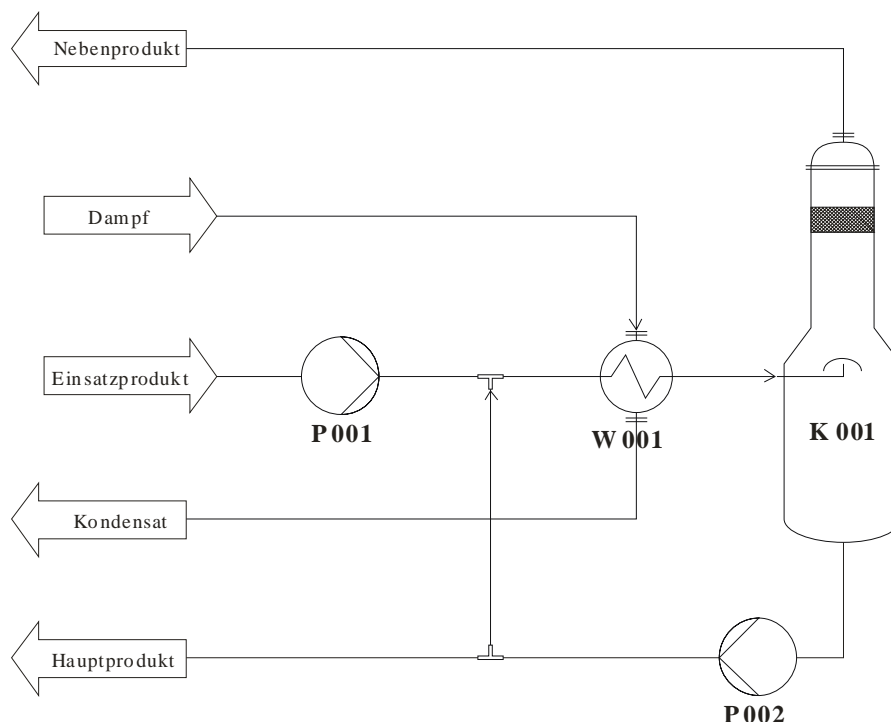


Abbildung 8.1: Vereinfachte Darstellung der Anlage.

Um die Anlage durch Vorwahl von thermodynamischen Parametern, Leistungsdaten und Umgebungsbedingungen auslegen zu können, wurden verschiedene Vorgabewerte und Näherungsgleichungen recherchiert. Hiermit sollten Kennzahlen wie z.B. Leistungsdaten der Pumpen oder die Dimensionen der Rohrleitungen und der Kolonne berechnet werden.

Die Ermittlung dieser Daten sollte der automatischen Aufstellung von Spezifikationen dienen, die eines der beiden eigentlichen Ergebnisse der Kalkulation darstellen. Damit soll es dem Anwender der Software ermöglicht werden, Herstellern bzw. Zulieferern konkrete Vorgaben zu den zu bestellenden Apparaten und Geräten zu machen. Als zweites Ergebnis sollte eine Prozesssimulation der im Normalbetrieb befindlichen Anlage angefertigt werden.

Um das Modell zu testen wurden zwei Datensätze aufgestellt und die ermittelten Ergebnisse gegenüber gestellt.

Ein zusätzlicher Punkt war die Frage, unter welchen Bedingungen eine permanente Kreislauffahrweise erforderlich ist. Dies war zu Beginn der Untersuchungen noch unklar. Im Prozess der Aufstellung des Modells konnte die Frage jedoch ohne die Zuhilfenahme groß angelegter Parameterstudien beantwortet werden.

Erkenntnisse

Auch wenn nicht alle denkbaren Variationsmöglichkeiten getestet wurden, lässt sich die Kalkulation zumindest als Hilfe bei der Auslegung einer Trockneranlage verwenden.

Die Visualisierung der Parameter am Prozessbild (Simulation) stellt eine unerwartet große Hilfe zur Beurteilung der Auslegungsdaten dar.

Ebenfalls unerwartet ist die geringe Komplexität der Antwort auf die Frage nach der qualitativen Differenzierung in lineare und Kreislauffahrweise. Das Ergebnis lässt sich allein aus dem Vergleich von Temperaturen ermitteln. Bei gleichen Startbedingungen bezüglich der verwendeten Substanzen lässt sich als einziger bestimmender Faktor die zur Verfügung stehende Dampfdruckstufe ausmachen. Dies gilt jedoch nur, wenn keine Thermolabilitäten des Produktes eine Rolle spielen. Außerdem darf die Temperaturdifferenz des Produktes zwischen Vor- und Rücklauf im Wärmeübertrager W 001 kein begrenzender Faktor sein.

Die Kalkulation in Excel ohne Zuhilfenahme von Scripts hat Vor- und Nachteile: Größter Vorteil ist die leichtere Einsicht in die Gleichungen und ihre Verknüpfungen untereinander, was die Fehlersuche erleichtert. Nachteil ist die Notwendigkeit zur Verwendung vieler Hilfstabellen mit den dazugehörigen Suchfunktionen. Dadurch wird die Übersicht wiederum merklich erschwert. Die Nichtverwendung der Iterationsfunktion erzeugt gewisse Grenzen in der Genauigkeit mancher Berechnungen. Da die üblichen Aufschläge bei der Auslegung jedoch jeweils um mindestens eine Größenordnung höher liegen, stellte dies kein prinzipielles Hindernis dar.

Ogleich versucht wurde, einfache Näherungsgleichungen zu verwenden, erreichte die Kalkulation eine höhere Komplexität als angenommen. Dies erforderte einen gewissen Aufwand zur Implementierung von Fehlersuchroutinen, was ebenfalls schnell zu noch höherer Komplexität führte. Aus diesem Grunde wurde auf erweiterte Fehlersuchroutinen verzichtet und eine Allgemeine Suchroutine für die Kalkulation implementiert.

Der anfänglich angenommene Umfang an Eingabeparametern (Durchsatzmengen und einige thermodynamische Werte) überstieg jedoch schnell den vermuteten Rahmen. Eine Recherche der Stoffdaten ist damit nicht alleinige Grundlage für den Eingabe-Datensatz. So spielen z.B. auch Standort- und Klimadaten oder auch die betriebliche Umgebung eine Rolle. Hierzu gehört einer der wichtigsten Parameter: Der zur Verfügung stehende Dampfdruck.

Schwachpunkt der Arbeit ist die fehlende Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Da es nicht möglich war, eine derartige in Betrieb befindliche Anlage zu finden, kann nicht festgestellt werden, ob die berechneten Spezifikations- und Simulationsdaten die Realität widerspiegeln.

9 Quellen und Literaturverweise

Literaturquellen

Böswirth, Leopold, Technische Strömungslehre, 7. Auflage, Wiesbaden, 2007, Vieweg

Ertel, Mirko, Projektarbeit: Voruntersuchungen zu einer EDV-basierten Auslegung einer Trockneranlage (Projektarbeit), Hochschule Anhalt (FH), Köthen, 2014

Klapp, Eberhard, Apparate- und Anlagentechnik, 1. Auflage, Berlin, 1980, Springer-Verlag

Menny, Klaus, Strömungsmaschinen, 5. Auflage, Wiesbaden, 2006, Teubner/GWV

Mersmann, Alfons; Kind, Matthias; Stichlmair, Johann, Thermische Verfahrenstechnik, 2. Auflage, Berlin Heidelberg, 2006, Springer-Verlag

Stolz, Jean, A Universal Equation for the Calculation of Discharge Coefficients of Orifice Plates; 1978

Wagner, Walter, Planung im Anlagenbau, 3. Auflage, Würzburg, 2009, Vogel

Wieland, Andreas., Wallenburg, Carl Marcus, Dealing with supply chain risks: Linking risk management practices and strategies to performance, International Journal of Physical Distribution & Logistics Management Vol. 42, Issue 10, 2012, (Paper)

Internetquellen

<http://www.spiraxsarco.com/de/pdfs/grundlagen/kapitel-06.pdf>, 24.02.2014

Samson AG, Mess- und Regeltechnik; http://www.samson.de/pdf_de/t00040de.pdf, 27.03.2014

<http://www.schweizer-fn.de>, 05.04.2014

Normen

DIN 2635 (Dimensionierung von PN40-Flanschen)
DIN 11850 (Dimensionierung von Rohrleitungen)
EN ISO 1127 (Dimensionierung von Rohrleitungen)
IEC 60034-30 (Wirkungsgradklassen für Niederspannungsmotoren)
ISO 5167:2003 (Druckverlust von Blenden)

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich an Eides statt und durch meine Unterschrift, dass die vorliegende Arbeit von mir selbstständig, ohne fremde Hilfe angefertigt worden ist. Inhalte und Passagen, die aus fremden Quellen stammen und direkt oder indirekt übernommen worden sind, wurden als solche kenntlich gemacht.

Ferner versichere ich, dass ich keine andere, außer der im Literaturverzeichnis angegebenen Literatur verwendet habe. Diese Versicherung bezieht sich sowohl auf Textinhalte sowie alle enthaltenden Abbildungen, Skizzen und Tabellen.

Die Arbeit wurde bisher keiner Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

.....
Mirko Ertel, geb. am 12.August 1969
Köthen, 05.Oktober 2014