

Dr.-Ing. Thomas Weimer
Makatec GmbH

Membranbasierte Resorptionsanlagen zum Heizen und Kühlen

Abschlussbericht über ein Forschungs- und Entwicklungsvorhaben
gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, DBU-Projekt Nr. 25624
(Fortsetzung des DBU-Projekts Nr. 20967)

Dipl.-Ing. Cyrus Ghiasi, Prof. Dr.-Ing. Felix Ziegler
Fachgebiet Maschinen- und Energieanlagentechnik
Technische Universität Berlin

Dipl.-Ing. Kai Wendker
SOLVIS GmbH & Co KG

Dipl.-Ing. Helmut Mattes
Mattes Engineering GmbH

Juni 2010

Projektkennblatt

der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



| | | | | | |
|---|--|---|-----------------|------------------------|---------------------|
| Az | 25624 | Referat | 21 | Fördersumme | 316.500,00 € |
| Antragstitel | | Membranbasierte Resorptionsanlagen zum Heizen und Kühlen | | | |
| Stichworte | | Absorptionskälte, Resorption, Membrankontaktor, Polymerapparate | | | |
| Laufzeit | Projektbeginn | Projektende | Projektphase(n) | | |
| 2 Jahre 6 Monate | 26.09.2007 | 25.3.2010 | 1 | | |
| Zwischenberichte | 15.04.2008 / 20.10.2008 / 08.04.2009 / 19.10.2009 | | | | |
| Bewilligungsempfänger | Makatec GmbH | | | Tel | 07457 948870 |
| | Siemensstraße 3 | | | Fax | 07457 948871 |
| | 71149 Bondorf | | | Projektleitung | |
| | | | | Dr.-Ing. Thomas Weimer | |
| Bearbeiter | | | | Dr.-Ing. Thomas Weimer | |
| | Kooperationspartner | | | | |
| TU Berlin, Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin SOLVIS GmbH & Co. KG, Grottrian-Steinweg-Str. 12, 38112 Braunschweig Mattes Engineering GmbH, Miraustraße 54, 13509 Berlin | | | | | |

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Mit dem Einsatz von polymerbasierten Membrankontaktoren in Absorptionskälteanlagen können sowohl das Bauvolumen als auch die Investitionskosten dieser Anlagen gesenkt werden. Die Funktionstauglichkeit von porösen Membranen im Einsatz als Absorber in Absorptionskälteanlagen wurde in dem von der DBU geförderten Projekt Nr. 20967 nachgewiesen. Basierend auf diesen Ergebnissen werden in diesem Projekt neue polymerbasierte Wärmeübertrager und Membrankontaktoren mit integriertem Wärmeübertrager für den Einsatz in Absorptionskälteanlagen entwickelt. Zudem wird eine neue Anlagenverschaltung von Absorptionskälteanlagen, die sogenannte Resorptionsverschaltung untersucht, da diese aufgrund der moderaten Drücke Vorteile für den Einsatz der entwickelten Polymerapparate aufweist. Eine ökologische und ökonomische Bewertung des Verfahrens wird durchgeführt

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Im Rahmen des Projekts wurden hierbei von den Projektpartnern Makatec GmbH, Technische Universität Berlin, Solvis GmbH & Co KG und mattes engineering GmbH folgende wesentliche Entwicklungs- und Evaluierungsarbeiten durchgeführt:

- Fertigung und Test neuartiger polymerbasierter und druckstabiler Wärmeübertrager
- Entwicklung, Fertigung und Test neuartiger polymerbasierter Membranapparate mit integriertem Wärmeübertrager basierend auf dem Grunddesign der Wärmeübertrager
- Auslegung, Aufbau und Test eines neuartigen Resorptionskreislaufs zum Heizen und Kühlen
- Aufbau von Testständen zur Untersuchung der Wärmeübertrager und der Membrankontaktoren
- Test der neuartigen Membranapparate in einer konventionellen Absorptionskälteanlage
- Design und Wirtschaftlichkeit membranbasierter Resorptionsanlagen im Einsatz als Hausenergiezentrale zur solar unterstützten Wärme- und Kälteversorgung eines Einfamilienhauses.

Wesentliche Projektergebnisse

Mit diesem Projekt konnte das ökologische und technische Potenzial für membranbasierte Resorptionsanlagen aufgezeigt und der technische „proof of concept“ konnte erbracht werden.

Zum Ende des Projekts existieren Prototypen von Membrankontaktoren mit integriertem Wärmeübertrager und ein Funktionsmuster für die Resorptionskälteanlage. Die untersuchten Spiralwärmeübertrager werden aktiv vermarktet, und eine erste Resorptionskälteanlage wurde ausgeliefert.

Für zukünftige Untersuchungen der Membrankontaktoren stehen Testeinrichtungen an der TU Berlin und bei der Makatec GmbH zur Verfügung. Die Membrankontaktoren mit integriertem Wärmeübertrager werden nach Projektabschluss von Makatec weiter optimiert und als Membranabsorber in Resorptionsanlagen kleiner Leistung (bis 20 kW Kälteleistung) integriert.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Projektkennblatt..... | 2 |
| Abbildungsverzeichnis..... | 6 |
| Tabellenverzeichnis..... | 7 |
| Verzeichnis von Begriffen und Definitionen..... | 8 |
| Zusammenfassung..... | 10 |
| 1. Einleitung..... | 11 |
| 2. Stand der Technik..... | 12 |
| 2.1 Kompressionskälte..... | 12 |
| 2.2 Absorptionskälte..... | 12 |
| 2.3 Membrankontaktoren..... | 13 |
| 3. Resorptionskälteanlage..... | 14 |
| 3.1 Vergleich von Absorptions- und Resorptionskälteanlage..... | 15 |
| 4. Membrankontaktor mit integriertem Wärmeübertrager..... | 17 |
| 4.1 Einsatz in Resorptionsanlagen..... | 18 |
| 5. Aufbau der Teststände..... | 21 |
| 5.1 Wärmeübertrager Prüfstand..... | 21 |
| 5.2 Prüfstand Druckverlust und Wärmetransport Membrankontaktor..... | 21 |
| 5.3 AKM Teststand..... | 23 |
| 6. Polymerwärmeübertrager..... | 29 |
| 6.1 Fertigung..... | 29 |
| 6.2 Materialwahl..... | 30 |
| 6.3 Messdaten..... | 30 |
| 6.4 Einsatzgrenzen..... | 30 |
| 7. Herstellung Membrankontaktoren..... | 31 |
| 7.1 Rohwickel..... | 31 |
| 7.2 Wickelabdichtung mit Kanalanschlüssen..... | 32 |
| 7.3 Druckhülle mit Gasraum..... | 33 |
| 8. Vermessung Membrankontaktoren mit Wasser/Luft..... | 34 |
| 8.1 Druckverluste Luftströmung im MaMeKo..... | 36 |
| 8.2 Druckverluste Wasserströmung im MaMeKo..... | 37 |

| | |
|--|-----|
| 8.3 Druckverluste im MaMeKo bei Luft eindüsung in Wasser | 38 |
| 8.4 Wärmeübertragung MaMeKo | 39 |
| 8.5 Desorptionsversuche MaMeKo | 40 |
| 9. Membrankontaktoren im AKM Teststand | 41 |
| 9.1 Messung und Auswertung | 43 |
| 10. Modellierung Membrankontaktoren | 48 |
| 10.1 Simulationsergebnisse | 48 |
| 11. Auslegung der Resorptionskälteanlage | 50 |
| 11.1 Berechnung der internen Massenströme | 51 |
| 11.2 COP Berechnung | 53 |
| 11.3 Einfluss der Lösemittelwärmeübertrager auf den COP | 54 |
| 11.4 Beispielhafte Auslegung einer Resorptionskälteanlage | 55 |
| 12. Aufbau Resorptionsanlage | 58 |
| 12.1 Eindüsung des NH ₃ -Gasstroms in den Absorber | 59 |
| 12.2 Phasentrennung nach dem Desorber | 61 |
| 12.3 Messtechnik und Steuerung | 62 |
| 13. Leistungsdaten Resorptionsanlage | 64 |
| 14. Zukünftiger Einsatz von Membrankontaktoren in Resorptionsanlagen | 65 |
| 15. Membranresorptionsanlagen im Gebäude | 66 |
| 15.1 Systemanforderungen | 66 |
| 15.2 Auslegung der einzelnen Komponenten im System | 67 |
| 15.3 Simulation | 69 |
| 15.4 Wirtschaftlichkeit | 73 |
| Fazit | 75 |
| Literaturverzeichnis | 77 |
| Anhang Messung Wärmeübertrager | 79 |
| Anhang Liste Membrankontaktoren | 80 |
| Anhang Messungen Membrankontaktoren mit Luft und Wasser | 83 |
| Anhang Messung Membrankontaktoren in der AKM | 99 |
| Anhang Modell Membranabsorption | 100 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 2.1: Schema Kompressionskälte und Absorptionskälte | 12 |
| Abbildung 3.1: Schema Resorptionskälteanlage | 15 |
| Abbildung 4.1.: Schema MaMeKo | 18 |
| Abbildung 4.2: Schichtfolge im Wickel | 18 |
| Abbildung 5.1: Fließbild des Teststandes | 22 |
| Abbildung 5.2: Teststand Wärmeübertragung | 23 |
| Abbildung 5.3: Schemata der AKM, der Membranabsorberprüfstand wurde | 25 |
| Abbildung 5.4: Schemata der AKM Versorgungskreisläufe | 26 |
| Abbildung 5.5: R & I Diagramm des Membranabsorberprüfstandes | 27 |
| Abbildung 5.6: Membranabsorberprüfstand TU-Berlin (links), | 28 |
| Abbildung 6.1: Prinzip Makatec Spiralwärmeübertrager | 29 |
| Abbildung 6.2: Wickelvorgang | 29 |
| Abbildung 7.1: Rohwickelstirnseite mit Membranröhrchen | 32 |
| Abbildung 7.2: Stirnverguss mit einem offenen Kanal | 33 |
| Abbildung 7.3: Wickel mit den geharzten Stirnseiten und den bereits angebrachten Seitenkanälen | 33 |
| Abbildung 7.4: Fertig produzierter Membrankontaktor | 34 |
| Abbildung 8.1: Deklaration der Anschlüsse an dem MaMeKo | 35 |
| Abbildung 8.2: Beispielhafte Druckverluste MaMeKo Luftströmung | 36 |
| Abbildung 8.3: Beispielhafte Druckverluste MaMeKo Wasserströmung | 37 |
| Abbildung 8.4: Beispielhafte Druckverluste MaMeKo Lufteindüsung in Wasserströmung | 38 |
| Abbildung 8.5: Beispielhafte Wärmeübertragung MaMeKo mit Wasserströmungen | 39 |
| Abbildung 9.1: Vorgekühlte adiabatische Membranabsorber (Typ BEKO) | 41 |
| Abbildung 9.2: Simultangekühlte Membranabsorber (Typ Makatec) | 41 |
| Abbildung 9.3: Wärmeleistung der AKM | 43 |
| Abbildung 9.4: Temperaturverläufe der Simultangekühlte Membranabsorber | 45 |
| Abbildung 9.5: Druckverläufe am Ein- und Austritt der simultangekühlten Membranabsorber | 46 |
| Abbildung 9.6: Konzentrationsverläufe am Ein- und Austritt der simultangekühlten Membranabsorber | 46 |
| Abbildung 9.7: COP der AKM in Kombination mit simultangekühltem Membranabsorber | 47 |
| Abbildung 10.1: Vergleich des Konzentrationsdifferenzverlaufs bezogen auf die Länge des MK | 48 |
| Abbildung 10.2: Vergleich der Verlauf der Absorptionswärme in Bezug auf die Länge der MK | 49 |
| Abbildung 10.3: Druckdifferenzverläufe in Phasengrenze bezogen auf die Länge Absorber | 49 |
| Abbildung 10.4: Druckverläufe bezogen auf die Länge der simultangekühlten Membranabsorber | 50 |
| Abbildung 11.1: Benennung der fließenden Ströme in der Anlage | 51 |
| Abbildung 11.3: Bilanzraum für umlaufende Masseströme | 52 |
| Abbildung 11.2: Bilanzraum Gasströme | 52 |
| Abbildung 11.4: COP in Abhängigkeit des minimalen Systemdruckes | 53 |
| Abbildung 11.5: maximaler Systemdruck und Konzentration | 54 |
| Abbildung 11.6: COP und Nutzwärme in Abhängigkeit des pinch point | 55 |
| Abbildung 12.1: Prototyp Resorptionsanlage | 59 |
| Abbildung 12.2: Membranröhrchen während des Gussvorganges | 61 |
| Abbildung 12.3: Prinzip Hydrozyklon | 61 |
| Abbildung 12.4: Skizze Phasentrennung | 62 |
| Abbildung 12.5: Steuereinheit der Resorptionsanlage | 63 |
| Abbildung 13.1: Messdaten Prototyp Resorptionsanlage | 64 |
| Abbildung 15.1: Hydraulikkonzept | 70 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| <i>Tabelle 3.1: Vergleichsrechnung Absorption – Resorption</i> | 16 |
| <i>Tabelle 6.1: Materialien für den Makatec Wärmeübertrager</i> | 30 |
| <i>Tabelle 7.1: Charakteristische Daten Membrankontaktor</i> | 34 |
| <i>Tabelle 8.1: Randbedingungen für die Absorber in einer 5 kW Resorption</i> | 35 |
| <i>Tabelle 9.1: Untersuchte Szenarien Simultangekühlte Membranabsorber (Typ Makatec)</i> | 42 |
| <i>Tabelle 9.2: Untersuchte Szenarien ungekühlte Membranabsorber (Typ Beko)</i> | 42 |
| <i>Tabelle 11.1: Wärme- und Masseströme bei verschiedenen Kälteleistungen</i> | 56 |
| <i>Tabelle 11.2: Wärme- und Masseströme bei verschiedenem pinch point</i> | 56 |
| <i>Tabelle 11.3: Übersicht externe Wasserströme</i> | 57 |
| <i>Tabelle 11.4: Zustandspunkte in der Anlage, theoretisch</i> | 57 |
| <i>Tabelle 12.1: Membrandatenblatt</i> | 60 |
| <i>Tabelle 12.2: Stoffdaten Gaseindüsung</i> | 60 |
| <i>Tabelle 12.3 : Vergleich Membraneindüsung Modell und Messung</i> | 60 |
| <i>Tabelle 14.1: Geplante Daten der nächsten Kleinserie Membrankontaktor</i> | 65 |
| <i>Tabelle 15.1: Optimierung der Anlagen. Jährlich (Büro Madrid)</i> | 71 |
| <i>Tabelle 15.2: Optimierung der Anlagen. Sommer (Büro Madrid)</i> | 72 |
| <i>Tabelle 15.3: Übersicht Primärenergieeinsparung</i> | 73 |
| <i>Tabelle 15.4: Investitionskostenermittlung der verglichenen Systeme</i> | 73 |
| <i>Tabelle 15.5: Kapitalwert und Amortisation der Investition. Büro Madrid.</i> | 74 |
| <i>Tabelle 15.6: Übersicht Amortisationszeiten</i> | 74 |

Verzeichnis von Begriffen und Definitionen

| | |
|---------------|--|
| A | Fläche |
| d | Durchmesser |
| f | Anzahl der Freiheitsgrade Gaststrom |
| g | molare freie Enthalpie (Gibbs-Energie) |
| h | Pumpenförderhöhe |
| h_R | reduzierte Enthalpie |
| k | Rohrreibungsbeiwert/Oberflächenrauigkeit |
| L | Länge Massestrom |
| N | Anzahl der Komponenten im System |
| P | Anzahl der Phasen |
| p | Druck |
| Δp | Druckverlust Wärmestrom |
| R | universelle Gaskonstante |
| R | Rohrradius |
| r | Radius |
| Re | Reynolds-Zahl |
| T | Temperatur |
| u(r) | Geschwindigkeitsprofil im Rohr |
| V | Volumen Volumenstrom |
| x | Ammoniakkonzentration in der Lösung |
| y | Ammoniakkonzentration in der Gasströmung |
| α | Umlenkwinkel |
| δ | Porenlänge |
| ε | Flächenfaktor |
| λ | Rohrreibungszahl |
| η | dynamische Viskosität |
| ρ | Dichte |
| τ | Tortuosität |
| ν | kinematische Viskosität |
| ζ | Widerstandszahl |

Indizes

| | |
|------------------|------------------------------|
| amb | Umgebung |
| gas | Gasphase |
| GG | Gleichgewicht |
| heiß | heißer Halbkreislauf |
| H ₂ O | Wasser |
| heiz | Heizung (am heißen Desorber) |
| kalt | kalter Halbkreislauf |
| liq | Flüssigphase |
| max | Maximalwert |

| | |
|-----------------|---|
| min | Minimalwert |
| MIX | Mixstrom |
| NH ₃ | Ammoniak |
| P | Pore |
| R | reduziert |
| rein | Reinstoff |
| WT | Wärmeübertrager |
| 0 | Bezugspunkt (für Stoffdatensystem nach Ziegler) |
| ∞ | Bulkphase |

Abkürzungen

| | |
|------------------|------------------------------|
| ABS | Absorber |
| AKM | Absorptionskältemaschine |
| COP | Coefficient of Performance |
| DES | Desorber |
| ENT | Entgasung |
| HKL | Halbkreislauf |
| H ₂ O | Wasser |
| KM | Kältemittel |
| KW | Kühlwasser |
| KWK | Kraft-Wärme-Kopplung |
| LWT | Lösungsmittelwärmeübertrager |
| MaMeKo | Makatec Membrankontaktor |
| NH ₃ | Ammoniak |
| RKM | Resorptionskältemaschine |

Kunststoffe

| | |
|------|---------------------|
| PPSU | Polyphenylsulfid |
| PE | Polyethylen |
| PP | Polypropylen |
| PU | Polyurethan |
| PEEK | Polyetheretherketon |

Zusammenfassung

Mit dem Einsatz von polymerbasierten Membrankontaktoren in Absorptionskälteanlagen können sowohl das Bauvolumen als auch die Investitionskosten dieser Anlagen gesenkt werden. Die Funktionstauglichkeit von porösen Membranen im Einsatz als Absorber in Absorptionskälteanlagen wurde in dem von der DBU geförderten Projekt Nr. 20967 nachgewiesen. Basierend auf diesen Ergebnissen wurden in diesem Projekt neue polymerbasierte Wärmeübertrager und Membrankontaktoren mit integriertem Wärmeübertrager für den Einsatz in Absorptionskälteanlagen entwickelt. Für Messungen wurden verschiedene Teststände zur Untersuchung der Betriebscharakteristiken von Kunststoffwärmeübertragern und Membranabsorbern aufgebaut.

Die Technik der Membranabsorption mit Membrankontaktoren mit integriertem Wärmeübertrager ist bei Projektschluss im Prototypstadium funktionstauglich, allerdings besteht noch Verbesserungspotenzial, um die Module in Sorptionsanlagen optimal als Ergänzungs- bzw. Konkurrenzalternativen zu konventionellen Absorbieren einsetzen zu können. Die maximale Betriebsbeständigkeit der Membrankontaktoren in der AKM an der TU-Berlin betrug 27 echte Betriebsstunden. Für einen zukünftigen Einsatz der Membrankontaktoren als Desorber müssen zukünftig völlig andere Membranen getestet werden.

Es wurde eine neue Resorptionskälteanlage entwickelt und ein Prototyp aufgebaut, da diese Vorteile für den Einsatz von Polymerapparaten aufweist. Der Prototyp kann bei 25°C Kühlwassertemperatur schon bei der geringen Heiztemperatur von 60°C die Kühlsole auf Temperaturen von 12°C kühlen, was für eine Raumluftkühlung ausreichend ist. Der COP dieser ersten Anlage lag ohne jegliche Isolierungen bei ca. 0,35. Für den kommerziellen Einsatz muss zukünftig noch die Regelung und die Dichtigkeit verbessert werden.

Die zu Beginn des Projekts weiterentwickelten Polymerwärmeübertrager werden seit 2008 von einer eigenen Firma, der Makatec Apparate GmbH, auch für Einsatzzwecke außerhalb der Absorptionskälteanlagen vermarktet. Ein Funktionsmuster der Resorptionsanlage ist bereits während der Projektlaufzeit an das Institut für Energie- und Umwelttechnik, Duisburg, ausgeliefert worden, und wird dort zukünftig in Kombination mit einer HT-PEM Brennstoffzelle betrieben.

Bei der Untersuchung des Einsatzes von membranbasierten Resorptionsanlagen ergaben sich deutliche Einsparungen bis zu 65 % an Strom und fossilen Energieträgern im Vergleich zu modernen konventionellen Technologien. Es hat sich gezeigt, dass die eigentliche Anlage nur ca. 1/3 der benötigten Investitionen ausmacht. Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ergab jedoch Amortisationszeiten von über 30 Jahren. Für den wirtschaftlichen Einsatz im Gebäude müssen vor allem die Kosten der zusätzlich benötigten Komponenten deutlich gesenkt werden.

Erste Projektergebnisse wurden 2009 im Rahmen der „IIR Ammonia Refrigeration technology“ Konferenz präsentiert, [13].

Die Autoren bedanken sich bei der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) für die Förderung dieses ambitionierten Forschungsvorhabens.

1. Einleitung

Mit diesem Projekt sollte insbesondere ein neuartiger Membrankontaktor mit integriertem Wärmeübertrager für Absorptions- und Desorptionsprozesse, als auch eine modifizierte Absorptionskälteanlage mit sogenannter Resorptionsverschaltung für den Einsatz dieser neuen Membrankontaktoren entwickelt werden. Das hier durchgeführte Forschungsprojekt „Membranbasierte Resorptionsanlagen zum Heizen und Kühlen ist die Fortsetzung des DBU-Projekts Nr. 20967, in dem die prinzipielle Tauglichkeit von porösen Hohlfasermembranen für den Einsatz in Absorbern von Absorptionskälteanlagen nachgewiesen wurde, [1].

Im Rahmen des Projekts wurden hierbei von den Projektpartnern Makatec GmbH, Technische Universität Berlin, Solvis GmbH & Co KG und mattes engineering GmbH folgende wesentliche Entwicklungs- und Evaluierungsarbeiten durchgeführt:

- Entwicklung, Fertigung und Test neuartiger polymerbasierter und druckstabiler Wärmeübertrager
- Entwicklung, Fertigung und Test neuartiger polymerbasierter Membranapparate mit integriertem Wärmeübertrager
- Auslegung, Aufbau und Test eines neuartigen Resorptionskreislaufs zum Heizen und Kühlen
- Aufbau von Testständen zur Untersuchung der Wärmeübertrager und der Membrankontaktoren
- Test der neuartigen Membranapparate in einer konventionellen Absorptionskälteanlage
- Design und Wirtschaftlichkeit membranbasierter Resorptionsanlagen im Einsatz als Hausenergiezentrale zur solar unterstützten Wärme- und Kälteversorgung eines Einfamilienhauses.

Basierend auf laufenden experimentellen Untersuchungen wurden zunächst Polymerwärmeübertrager untersucht und diese als Basis für die Entwicklung der Membrankontaktoren mit integrierter Wärmeübertragung (MaMeKo = Makatec Membrankontaktor) verwendet. Es galt insbesondere die Langzeitstabilität der Kunststoffapparate hinsichtlich Dichtigkeit soweit zu verbessern, dass deren Einsatz auch in Anlagen mit aggressiven Chemikalien, wie beispielsweise NH_3 , gefahrlos möglich wird. Die dauerhafte Abdichtung von chemisch inerten Polymerwerkstoffen mit Verklebungen ist hierbei ein äußerst anspruchsvoller Fertigungsprozess.

Um unterschiedliche Membranabsorber individuell untersuchen zu können, wurde an der TU Berlin ein geeigneter Teststand aufgebaut. Hiermit wurde die Funktionstauglichkeit und die Betriebscharakteristik der Membranabsorber in Zusammenschaltung mit einer Absorptionskälteanlage auf NH_3 Basis überprüft und gemessen. Der Membranabsorberprüfstand wurde so aufgebaut, dass die Möglichkeit zum Prüfen von vorgekühlten adiabatischen Membranabsorbern (modifizierte Membrankontaktoren zur Drucklufttrocknung der Firma BEKO) und simultangekühltem Membranabsorber (Typ Makatec) besteht.

Parallel wurde eine neuartige Resorptionsanlage ausgelegt, mit Edelstahlplattenwärmeübertragern aufgebaut und getestet.

2. Stand der Technik

Zur Kälteerzeugung nutzt man heute in konventionellen, metallbasierten Anlagen die Eigenschaft, dass die Siedetemperaturen von Reinstoffen bei Druckerniedrigung sinken und bei Druckerhöhung steigen. Im Folgenden werden die beiden aktuell verbreiteten technischen Umsetzungen der Kälteerzeugung erläutert.

2.1 Kompressionskälte

Bei der Kälteerzeugung nach dem Kompressionsprinzip (s. Abbildung 2.1, links) wird gasförmiges Kältemittel (KM) in einem Verdichter auf einen hohen Druck gebracht und dann im Kondensator unter Wärmeabfuhr an die Umgebung verflüssigt. Über eine Drossel wird das verflüssigte KM auf einen geringen Druck entspannt und zur Kälteerzeugung im Verdampfer unter Wärmezufuhr bei einer Temperatur unter der Umgebungstemperatur verdampft.

2.2 Absorptionskälte

Bei einer konventionellen Absorptionskälteanlage bleiben die Apparate Verdampfer und Kondensator unverändert erhalten. Jedoch wird der in Kompressionskälteanlagen verwendete Verdichter durch einen sogenannten thermischen Verdichter ersetzt. Dieser thermische Verdichter besteht aus einem Absorber, einem Desorber und einem Lösemittelwärmeübertrager, s. Abbildung 2.1, rechts. Das gasförmige Kältemittel strömt bei geringem Druck vom Verdampfer in den Absorber. Dort wird es von einem flüssigen Lösungsmittel und unter Wärmeabgabe an die Umgebung absorbiert. Dann transportiert eine Lösungsmittelpumpe die mit Kältemittel angereicherte, reiche Lösung zum Desorber, in dem das Kältemittel bei hohem Druck und unter Wärmezufuhr (im Idealfall Abwärme, Sonnenenergie etc.) aus der Lösung ausgetrieben wird. Die nun arme Lösung wird über die Drossel zum Absorber zurückgeleitet. Zur Verbesserung des COP wird ein Lösemittelwärmeübertrager eingebaut.

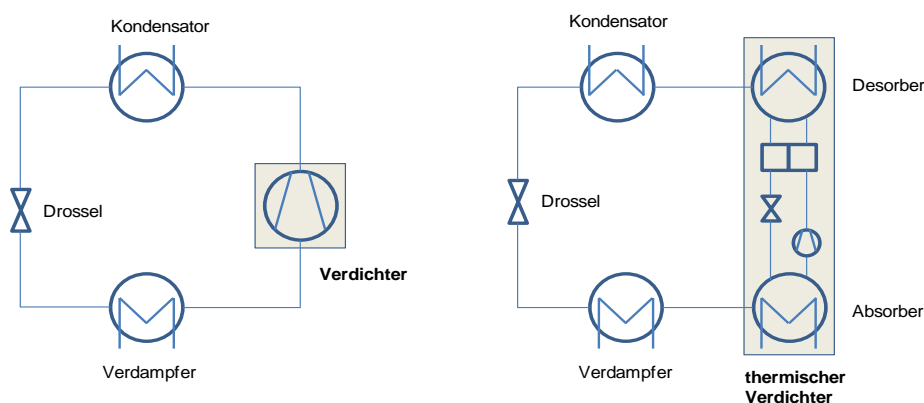


Abbildung 2.1: Schema Kompressionskälte und Absorptionskälte

Um die Effektivität von Kälteanlagen vergleichbar zu machen, wurde die Leistungszahl, auch Coefficient of Performance (COP) genannt, eingeführt. Der COP ist analog zum Wirkungsgrad als das Verhältnis zwischen nutzbarer „Kälteleistung“ und dem benötigten Aufwand (elektrische Leistung für Kompressionskälte bzw. Wärmeleistung bei der Absorption) definiert.

2.3 Membrankontaktoren

Die Einführung der Membrankontaktoren (MK) in unterschiedlicher technischer Trennapplikation erwies sich in den letzten Jahren in speziellen Bereichen als eine Ergänzung und Alternative zu den konventionellen Trenntechniken bzw. thermischen Trenntechniken. Spezielle Techniken in der Wasseraufbereitung (Umkehrosmose, Ultrafiltration) und in der Abwasserbehandlung (Abtrennung stark verdünnter Metallionen, Ultrafiltration) gehören schon seit Jahren zum Stand der Technik. Es gibt aber auch wichtige Applikationen in der Medizintechnik wie künstliche Niere (Hämodialyse) und künstliche Lunge (Blutoxygenation), die sich als Stand der Technik etabliert haben.

Besonders in den letzten Jahren wurden neue Bestrebungen zum Einsatz der Membrankontaktoren in Sorptionskälteanlagen bzw. -wärmepumpen unternommen. Allerdings beschränken sich die meisten Veröffentlichungen auf den theoretischen Kern. Experimentelle Veröffentlichungen zur Einsatz der MK in den Sorptionswärmepumpen sind kaum verfügbar. Hier wird nur auf eine Auswahl hingewiesen:

Die ersten grundsätzlichen experimentellen Untersuchungen zum Einsatz von Membrankontaktoren in Absorbern von Absorptionskälteanlagen wurden von Frank Schaal im Rahmen des von der DBU geförderten Projekts 20967 durchgeführt, [2].

Von Hamza (2010) gibt es eine Veröffentlichung, die sich mit der Planung von kompakten hydrophoben Membranabsorbern in einer LiBr - AKM beschäftigt, [3]. Vom gleichen Verfasser (2009) gibt es eine einführende Veröffentlichung über die Charakteristik der Membranen im Anschluss an eine LiBr - Absorptionskälteanlage, [4]. Eine wichtige Veröffentlichung gibt es von Woods (2009) über die Modellierung der membranbasierten Absorptionswärmepumpen, [5]. Die Arbeit berücksichtigt neben dem vorgeschlagenen Modell auch die Absorptionslösungswärme.

Gani (2009) beschreibt ein Generelles Modell für die membranbasierten Trennungsprozesse, [6]. Die Applikation der Membran-Destillation in LiBr - AKM wurde durch Wang (2009) veröffentlicht, [7]. Weiterhin gibt es einige interessante Veröffentlichungen zum Einsatz der Membranen in der Mikrotrenntechnik und den Mini- bzw. Mikroabsorptionswärmepumpen von Kenig (2010), [8] und Kim-Y. (2008), [9].

3. Resorptionskälteanlage

Eine Resorptionskälteanlage ist die Erweiterung einer Absorptionskälteanlage von einem Lösungsmittelkreislauf auf zwei miteinander kommunizierende Lösungsmittelkreisläufe. Dies bedeutet, dass der Kondensator durch einen Absorber und der Verdampfer durch einen Desorber ersetzt werden. Dadurch gibt es in der Anlage kein flüssiges Reinmedium mehr, sondern zwei Lösungskreisläufe, jeweils mit einem Absorber und Desorber zur Gasaufnahme bzw. -abgabe.

Für die Auslegung steht somit im Vergleich zu Verdampfern und Kondensatoren ein zusätzlicher Freiheitsgrad zur Verfügung. Man kann bei vorgegebener Temperatur über die Änderung der Konzentration den Gleichgewichtsdruck in den Absorbern und Desorbern verändern. Besonders vorteilhaft ist der Einsatz von Wasser als Lösemittel und Ammoniak als Kältemittel in der Resorptionsverschaltung. Eine arme Lösung (geringerer NH_3 -Gehalt) hat einen geringeren Gleichgewichtsdruck als eine reiche (höherer NH_3 -Gehalt).

Die Verschaltung einer Resorptionsanlage ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Von den Desorbern zu den Absorbern des anderen Lösungskreislaufs wird jeweils Gas übertragen. Hierzu müssen in den Desorbern jeweils geringfügig höhere Drücke als in den Absorbern des anderen Kreislaufs vorliegen.

Um Kälte bereit zu stellen, findet eine „kalte“ Desorption unter Wärmeaufnahme auf einem geringeren Temperaturniveau als der Umgebungstemperatur statt. Das Gas wird von der Lösung im Absorber des anderen, heißen Kreislaufs unter Wärmeabgabe an die Umgebung aufgenommen. Damit in diesem Absorber bei einer höheren Temperatur als im kalten Desorber das Gas von der Lösung aufgenommen werden kann, muss hier in der Lösung eine deutlich geringere Konzentration an Kältemittel vorliegen.

Für das Austreiben des NH_3 aus der Lösung im heißen Desorber muss bei der gegebenen geringen NH_3 -Konzentration in diesem Kreislauf nun Wärme bei hoher Temperatur zugeführt werden, um einen ausreichenden Druck zu erzeugen, damit Gas in den Absorber des kalten Kreislaufs mit einer höheren Konzentration in der Lösung strömt und dort unter Wärmeabgabe an die Umgebung aufgenommen wird.

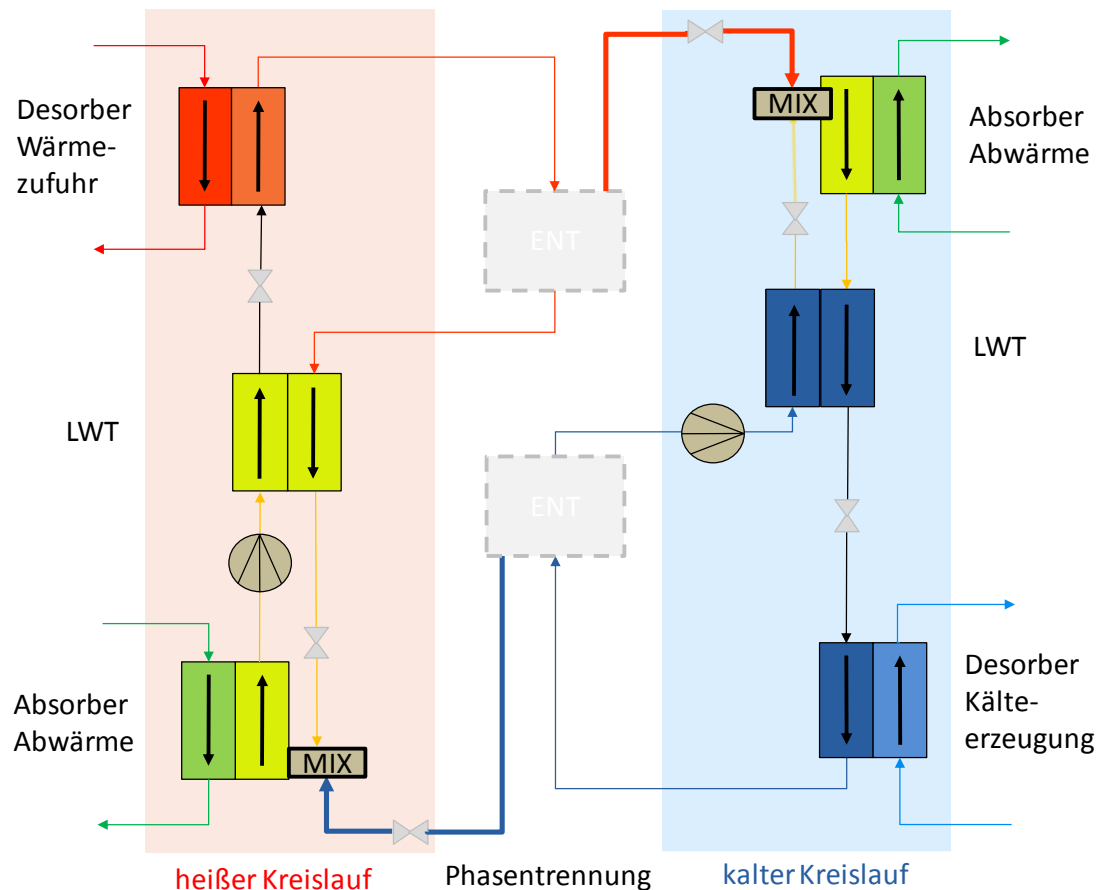


Abbildung 3.1: Schema Resorptionskälteanlage

Die Lösung des heißen Kreislaufs fließt über ein Entspannungsventil vom heißen Desorber zurück in den Absorber auf niederem Druckniveau, während die Lösung des kalten Kreislaufs ebenfalls über ein Entspannungsventil vom Absorber auf hohem Druckniveau in den kalten Desorber zurückfließt.

Zusätzlich sind in den beiden Lösungskreisläufen Wärmeübertrager vorgesehen, um energetische Verluste aufgrund der Flüssigkeitsströmung zwischen den Absorbern und Desorbern auf unterschiedlichen Temperaturen zu minimieren.

Um zu verhindern, dass Lösung von den Ammoniakströmen vom Desorber zum Absorber mitgerissen wird, sind hinter jedem Desorber Behälter zur Phasentrennung vorgesehen. Diese Behälter können zudem die durch die Gasbildung aus Desorber und Absorber verdrängte Flüssigkeit aufnehmen.

Da die beiden Ammoniakgasströme einen geringen aber unterschiedlichen Wasserdampfanteil aufweisen, wird ein Mixstrom (MIX) zum Austausch zwischen den beiden Lösungskreisläufen geschaltet. Dieser sorgt dafür, dass die Zusammensetzung der Lösungen in den Apparaten konstant bleibt.

3.1 Vergleich von Absorptions- und Resorptionskälteanlage

Die Resorptionstechnik zeichnet sich gegenüber der Absorptionstechnik durch die ständige Verwendung eines Zweistoffgemisches in der Anlage aus. Dadurch gibt es

keine Abhängigkeit mehr von Reinstoffgrößen ($p = f(T)$ bzw. $T = f(p)$). Nach der Gibbs'schen Phasenregel ergibt sich der Freiheitsgrad 2: Druck und Temperatur bzw. Konzentration.

Gibbs'sche Phasenregel:

Mit: N - Anzahl der Komponenten im System (H_2O , NH_3), P - Anzahl der Phasen (verschiedene Aggregatzustände einer oder mehrerer Komponenten), f - Anzahl der Freiheitsgrade

Tabelle 3.1 zeigt eine beispielhafte Vergleichsrechnung zwischen konventioneller Absorption und Resorptionsverschaltung, welche mit dem hauseigenen Simulationsprogramm von Makatec durchgeführt wurde.

Tabelle 3.1: Vergleichsrechnung Absorption – Resorption

| | konv. Absorption NH₃/H₂O | Resorption NH₃/H₂O |
|-----------------------------|---|---|
| $T_{\min, (Nutz)}$ °C | 3 (6-12) | 2 - 9 (5 –12) |
| $T_{\text{abs, (KWin)}}$ °C | 35 – 42 (32) | 35 –42/48 (32) |
| $T_{\text{max, (Heiz)}}$ °C | 91-82 (95- 86) | 86 –72 (90–76) |
| P_{\min} bar | 5,1 | 1 |
| P_{\max} bar | 16,4 | 3,5 |
| COP | 0,62 | 0,6 |

Der COP eines reversiblen Resorptionskreislaufes ist auf Grund der Steigung der Dampfdruckkurven etwas höher als der eines Absorptionskreislaufes. Aufgrund der Verluste im Lösungskreislauf ist in der Realität eine Verschlechterung des COP zu erwarten. Es gibt also für reale Anlagen keine eindeutige Reihung von Resorption und Absorption sowohl in Bezug auf Antriebstemperatur als auch bezüglich Effizienz.

Die Resorptionskältemaschine (RKM) kann bei richtiger Auslegung im Vergleich zu konventionellen Absorptionskältemaschinen (AKM) somit folgende wesentlichen Vorteile aufweisen:

- Nur sehr geringe Mengen an reinem Ammoniak (Gas) in der Anlage
- Keine Rektifikation zur Aufbereitung des Dampfes aus dem heißen Desorber notwendig (mobiler Einsatz möglich, bis zu 60% Kostenersparnis)
- Geringere Temperaturen zur Beheizung im Vergleich zur konventionellen AKM
- Geringerer Druck in der Anlage
- Der Druck ist in gewissen Grenzen über die Zusammensetzung der Lösungen einstellbar, während bei konventionellen AKM der Druck durch das Phasengleichgewicht des reinen NH_3 bei Verdampfer und Kondensator festgelegt ist.

- Es können höhere Rücklauftemperaturen im Nutzkältekreislauf gefahren werden, da der kalte Desorber seine Temperatur während der Ausgasung ebenfalls erhöht, während die Verdampfung von reinem NH_3 bei konstanter Temperatur abläuft.

Dem stehen die folgenden Nachteile gegenüber, die eine Verbreitung der Resorptionstechnologie bislang behindert haben:

- Hohe Apparatekosten für Absorber und Desorber beim Einsatz konventioneller Apparate
- Ein zusätzlicher Flüssigkeitskreislauf mit Pumpe und Wärmeübertrager ist notwendig.
- Wirkungsgrad der Resorption ist etwas geringer.
- Ein zusätzlicher Flüssigkeitsstrom zwischen kaltem und heißem Kreislauf ist notwendig, um die Komponentenmassenbilanz zwischen beiden Kreisläufen zu schließen, da die Gasströme unterschiedliche Zusammensetzungen haben. Dies ist allerdings nur der Fall, wenn auf einen Dephlegmator verzichtet wird.

Die hohen Apparatekosten können durch die Verwendung von Plattenapparaten oder den in diesem Projekt entwickelten neuartigen Membrankontaktoren für die Absorber und Desorber deutlich reduziert werden. Für die Lösemittelwärmeübertrager können neben Plattenwärmeübertragern aus Edelstahl zukünftig die polymerbasierten Spiralwärmeübertrager der Makatec Apparate GmbH eingesetzt werden.

4. Membrankontaktor mit integriertem Wärmeübertrager

Der neue Membrankontaktor MaMeKo zeichnet sich dadurch aus, dass eine Flüssigkeit bei gleichzeitiger Kühlung bzw. Abführung der Wärme mit einem Gas gleichmäßig in Kontakt gebracht werden kann. Somit ist er ausgezeichnet für den Einsatz in einer Absorption oder Desorption geeignet, wobei sich die Entwicklung bei der Firma Makatec während dieses Projekts zunächst auf den Absorber konzentriert hat.

Durch die kontinuierliche Wärmeabfuhr über einen externen Kühlwasserkreislauf besitzt der MaMeKo während der Absorption eine nahezu konstante Temperatur, während bei ungekühlten Membrankontaktoren die Temperatur stark ansteigt.

Auf Grund seines spiralförmigen Aufbaus und des Einsatzes polymerer Porenmembranen konnte eine robuste und kompakte Bauweise realisiert werden. Durch Synergien mit der Herstellung der polymeren Spiralwärmeübertrager konnte erheblich bei Aufbau und Herstellung des MaMeKo - Wickel profitiert werden, indem der Verarbeitungsschritt des Aufwickelns für den MaMeKo nur gering angepasst werden musste.

Der nicht maßstabgetreue Schnitt durch einen MaMeKo und das Funktionsprinzip sind in Abbildung 4.1 und Abbildung 4.2 zu sehen, wobei ein wesentlicher Unterschied zu den ebenfalls in diesem Projekt untersuchten Spiralwärmeübertragern in dem zusätzlichen Einsatz der Membranen liegt.

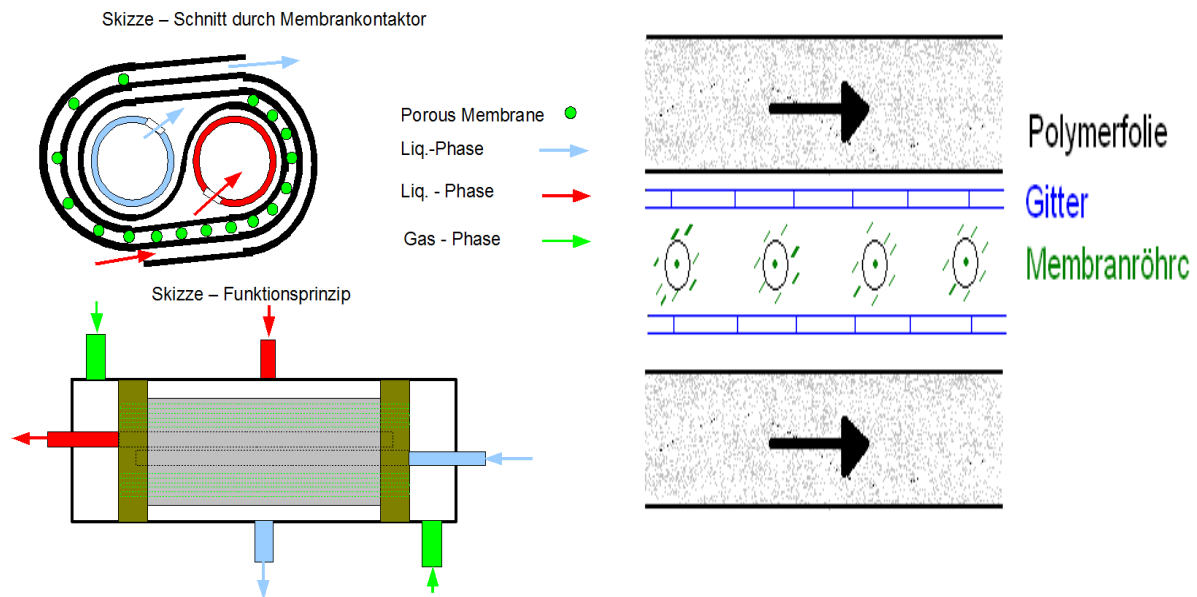


Abbildung 4.1.: Schema MaMeKo

Abbildung 4.2: Schichtfolge im Wickel

Wie aus der Abbildung 4.1 ersichtlich ist, wird der MaMeKo im Gegenstrom betrieben, um so eine bessere Wärmeübertragung zu erreichen. An den Stirnseiten links und rechts befinden sich die Anschlüsse für die Gaszuführung (grün). Es kann also von beiden Stirnseiten des Wickels Gas in denjenigen Kanal gelangen, in dem sich die Membranen befinden. Wie in Abbildung 4.2 erkennbar ist, sind die Strömungskanäle durch eine Polymerfolie getrennt. Zur Gewährleistung der Kanalgeometrie, zur Turbulenzerzeugung und zur Stützung der Folie sind in den Kanälen Strömungsgitter eingelegt.

Ein Unterschied zu den reinen Wärmeübertragern liegt in der Auswahl der Strömungsgitter. Während bei den Spiralwärmeübertragern vorzugsweise eine einheitliche Größe der Gitter auf beiden Kanalseiten Verwendung findet, um durch beide Kanäle dieselben Volumenströme zu gewährleisten, wird beim MaMeKo ein dickeres Gitter auf der Kühlwasserseite bevorzugt, um so einen möglichst großen Kühlwasserstrom zu realisieren. Auf der Membranseite werden zwei dünne Gitter verwendet, ein Gitter wird mit den Membranen bestückt, ein weiteres auf die Membranen gelegt. Diese Schichtenfolge ist ebenfalls in Abbildung 4.2 zu sehen. Die durch die Gitter erzeugte turbulente Strömung in dem Kanal wird durch die quer angeströmten Membranen nochmals verstärkt.

4.1 Einsatz in Resorptionsanlagen

Der MaMeKo wurde von der Firma Makatec GmbH im Rahmen dieses Projekts speziell für den Einsatz als Absorber (Desorber) in Resorptionsanlagen zum Heizen und Kühlen entwickelt, insbesondere für den Einsatz in einer 5 kW-Resorptionskälteanlage mit NH_3 als Kältemittel und Wasser als Lösemittel.

Die Ammoniakbeständigkeit der Polypropylen-Membranen und der Epoxidharz-Klebungen wurden durch Versuche von Frank Schaal bestätigt, [2]. Die Membranauswahl nach ihrem Durchmesser und vor allem nach ihrer Porengröße hat entscheidenden Einfluss auf den Absorptionsvorgang, da die Porengröße der Membranen einen direkten Einfluss auf den kritischen Durchbruchdruck hat. Dieser muss so gewählt werden, dass keine Flüssigkeitsdurchbrüche stattfinden, da diese den Absorptionsvorgang aufgrund der reduzierten Kontaktfläche verschlechtert bzw. ganz stoppt, [2]. Für einen optimal ablaufenden Absorptionsprozess ist der gasseitige Druck daher größer bzw. gleich dem Druck auf der Flüssigkeitsseite.

Im Gegensatz zu Flüssigkeitsdurchbrüchen sind Gasdurchbrüche eher unkritisch, hierbei müssen lediglich die durchgehenden Gasblasen von der Lösung aufgenommen werden. Dies kann durch eine spezielle Anordnung der Membranen erreicht werden. Die Abstände zwischen den Membranen werden am Lösungseingang dicht beieinander gewählt und entlang des Strömungswegs immer größer. Im äußeren Bereich des Wickels befinden sich gar keine Membranen mehr. Dadurch ist gewährleistet, dass die in der Lösung befindlichen Gasblasen von der Lösung aufgenommen werden können, da kein weiteres Gas der Lösung zugeführt wird.

Die Folie muss neben einer guten chemischen Beständigkeit, da sie dauerhaft mit Ammoniak in Berührung kommt, auch eine möglichst gute Wärmeleitfähigkeit besitzen. Hierbei konnte auf die Erfahrungen der Makatec Apparate GmbH zurückgegriffen werden, so dass die Auswahl des Materials der Folie auf Polyphenylsulfon (PPSU) mit einer Foliendicke von 100 µm fiel. Die Strömungsgitter und Gitterrohre für den zentralen Zulaufkanal sind in Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP) zu günstigen Preisen erhältlich.

Aufgrund der ebenfalls guten chemischen Beständigkeit von Polyvinylchlorid (PVC) gegenüber Ammoniak wurde ein transparentes PVC-Rohr als äußere Schale des MaMeKo gewählt. Dies gewährleistet eine optische Kontrolle des Apparats während der Versuche. Ein weiterer Vorteil von PVC ist, dass aufgrund der guten Verschweiß- und Verklebbarkeit des Materials Stirnplatten, Druckhülle und PVC Fittinge absolut dicht miteinander verbunden werden können.

Im Vergleich zu beispielsweise einem nickelgelöteten Edelstahlplatten-wärmeübertrager (GEA WTT NP24U) im Einsatz als Absorber, kann durch den Einsatz der MaMeKo ca. 50% der Baugröße der Absorber eingespart werden, was in Bezug auf die Größe der gesamten Resorptionsanlage eine Einsparung von ca. 15% bedeutet.

Des Weiteren bedeutet die Eingliederung der MaMeKo in das System anstelle der herkömmlichen Plattenapparate eine erhebliche Reduzierung der Investitionskosten. Allein durch diese Vorteile wird die Resorptionsanlage deutlich interessanter für den privaten häuslichen Einsatz. Weiterhin ist eine freie Wahl der Apparategeometrie und -lage möglich, so dass auch weitere Einsatzmöglichkeiten im mobilen Bereich in Betracht gezogen werden können. Die wesentlichen Vorteile des MaMeKo im Einsatz in Absorptions- bzw. Resorptionskälteanlagen können folgendermaßen zusammengefasst werden:

- Geringe Anschaffungskosten
- Robust und geringe Baugröße
- Große Phasengrenzflächen in Bezug auf Volumeninhalt, der sich durch hohe spezifische Stoffaustauschflächen positiv auf die Stoffübertragung, Selektivität, Absorption und Wärmeübertragung auswirken kann. Hierdurch besteht die Möglichkeit einer kompakten Bauweise. Die Packungsdichte der Hohlfasermembranen beträgt in etwa $30.000 \text{ m}^2/\text{m}^3$, allerdings bezieht sich diese Packungsdichte auf die Hohlfasermembranen selbst, und nicht auf die Membrankontakoren, die zusätzlich Wärmeübertragertechnik integrieren. Deshalb wird die sehr hohe Packungsdichte durch die Integration der Wärmeübertragertechnik wieder etwas relativiert.
- Der Massenstrom einer Phase ist unabhängig von dem Massenstrom der anderen Phase. Dies erlaubt einen hohen Grad an Einstellmöglichkeit der Betriebskonditionen in den beiden Phasen. Die Massenströme beider Fluide können gezielt und unabhängig voneinander geführt werden.
- Manipulation der Phasengrenzflächen durch Eigenschaften der Membranen: Es besteht die Möglichkeit, einige Membranparameter, die einen Einfluss auf Fluss, Selektivität oder Absorption ausüben, zu manipulieren (wie Porengröße, Benetzungswinkel, Hohlfaserdurchmesser, ...). Bei den konventionellen Techniken ist die Möglichkeit der direkten Einflussnahme auf die Phasengrenzflächen bzw. auf die Phasengrenzzustände oft nur beschränkt auf die thermodynamischen Eigenschaften der kontaktierenden Fluide und/oder auf die Art der Zerstäuben von Lösung in den Gas.
- Behandlung problembehafteter Fluidsysteme möglich (geringe Dichtedifferenzen, Schaumbildung, ...)
- Der Membrankontaktor kann in eine beliebige Richtung installiert werden (horizontal, vertikal, oder geneigt).
- Modulare Bauweise ermöglicht ein lineares Scale-Up. Allerdings sollte die mögliche Steigung der Druckverlustproblematik hierbei in Betracht genommen werden.
- Es besteht die Möglichkeit der Manipulation der notwendigen Gasvorlaufdrucke im Membranabsorber.

Es existieren aber auch Nachteile der Membrankontaktoren im Zusammenwirken mit Resorptionskälteanlagen:

- Die Membranen verkörpern einen zusätzlichen Transportwiderstand.
- Die Druckdifferenz zwischen der Lösung und dem Ammoniak hat einen großen Einfluss auf den Stofftransport, sollte z.B. die Lösung in den

Hohlfaserlumen eindringen bzw. durchschlagen so wird der Stofftransportvorgang und dadurch auch der Absorptionsvorgang gestoppt.

- Bei Verwendung von flexiblen Materialien (z.B. Folien) in den Membrankontakoren muss die Druckdifferenz an der Lösungs- und Kühlwasserseite (Ein- und Austritt) klein gehalten werden. Dies ist notwendig, um die Verengung bzw. auch den Verschluss der Kanäle durch das gegenüberliegende Fluid zu verhindern. Eine automatische Regelung der Kühlwassereintritts- und -austrittsdrücke während des Betriebes kann aufwendig sein (z.B. bei offenen Rückkühlwerken).
- Es besteht eine obere und untere Grenze für die Feedmassenströme Gas und der Lösung. Bei höheren Strömungen als die obere Grenze wird der zulässige Druckverlust überschritten, der zu einer Zerstörung der Hohlfasermembranen bzw. der Trennfolie führen kann. Bei kleineren Strömungen als die untere Grenze werden die Absorptionsergebnisse verschlechtert.
- Die Hydrophoben Membranen sind resistent gegenüber von Eindringen von Wasser in den Poren und Nasswerden der Membranen. Trotzdem kann es vorkommen, dass die Membranen nass werden und der Absorptionsprozess blockiert wird (bei Lösungen, z.B. während des Anlagenstillstandes.)

Die Untersuchungen in diesem Projekt sollen zeigen, dass die Vorteile die Nachteile bei Weitem überwiegen.

5. Aufbau der Teststände

Im Rahmen des Projekts wurden mehrere Teststände aufgebaut, mit deren Hilfe die Polymerwärmeübertrager und die Membrankontakoren untersucht wurden. Die Wärmeübertrager wurden an der TU Berlin hinsichtlich Wärmeübertragung und Druckverlust getestet. Die Membrankontakoren wurden bei Makatec hinsichtlich Wärmeübertragung, Druckverlust und Gaseindüsung untersucht, während diese an der TU Berlin im Einsatz in einer Absorptionskälteanlage untersucht wurden.

5.1 Wärmeübertrager Prüfstand

Um einen Prüfstand für den Test der Wärmeübertrager aufzubauen, wurde ein Wärmepumpenprüfstand an der TU-Berlin umgebaut. Eine ausführliche Beschreibung des Aufbaus des Prüfstandes, und die Messung und Auswertung der Kunststoffwärmeübertrager befindet sich im Anhang unter: „Bericht über Testmessungen an Wärmeübertragern der Firma Makatec“.

5.2 Prüfstand Druckverlust und Wärmetransport Membrankontaktor

Zur Bestimmung der Druckverluste der Membrankontakoren (MaMeKo) wurde ein Teststand bei Makatec aufgebaut, dessen Fließbild in Abbildung 5.1 dargestellt ist.

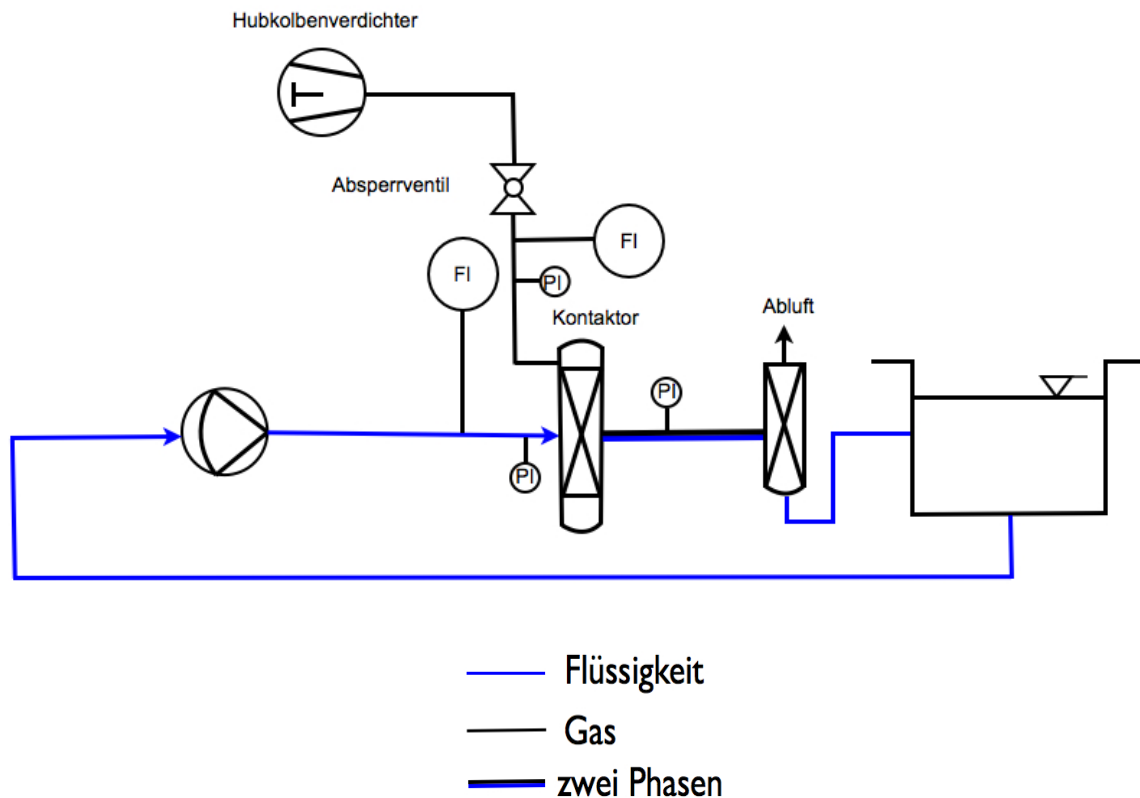


Abbildung 5.1: Fließbild des Teststandes

Mit diesem Teststand können Druckverluste der Gasströmung, der Flüssigkeitsströmung und der Gaseindüsung gemessen werden. Von dem Hubkolbenverdichter (Typ Automan HP4, Hersteller: Atlas Copco, Stockholm, Schweden) gelangt Luft nach dem Öffnen des Absperrventils in den angeschlossenen Kanal des MaMeKo. Wasser wird aus dem Behälter mittels einer Membranpumpe (Typ 2088-473-544, Hersteller: Shurflo, Cypress, USA) durch die Kanäle gepumpt. Der Volumenstrom wird auf 0 bis 5 l/min eingestellt. Der Wasserstrom passiert den angeschlossenen Kanal und fließt wieder in das Auffang-Wasserbecken zurück, von dem aus es von der Membranpumpe wieder ansaugt wird

Für die Messung des durchströmenden Gases wird ein Durchflussmesser (Typ Schwebekörper Durchflussmesser, Hersteller: Yokogawa, Ratingen) eingesetzt. Es wird der Druckverlust bei einem Volumenstrom von 0 bis 2,5 l/s untersucht. Zur Messung des Volumenstroms des Wassers dient ein Flügelrad-Durchflussmessgerät (Typ DF-24, Hersteller: Kobold, Hofheim am Taunus) mit einem Messbereich von 1-24 l/min.

Um Druckdifferenzen der Ein- bzw. Ausgänge messen zu können, wird ein Differenzdruckmessumformer (Typ M51 Smart, Hersteller: Emerson, Rosemount) über Schnellkupplungen (Typ HFC12, Hersteller: CPC, Minnesota) an dem MaMeKo angebracht. Für die Trennung des Luft/Wasser-Gemischs nach der Lufteindüsung in die Wasserströmung musste an dem Teststand noch ein Abscheider angebracht werden. Dieser wird nach dem MaMeKo platziert.

Für die Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten eines Membrankontakts wurde der in Abbildung 5.2 dargestellte Teststand der Makatec GmbH für Spiralwärmeübertrager verwendet. Dieser ist mit Wärmemengenzählern und Differenzdrucksensoren ausgestattet, kann jedoch nur mit Wasser betrieben werden. Dafür können mit diesem Teststand auch höhere Flüssigkeitstemperaturen bis 80°C eingestellt werden.



Abbildung 5.2: Teststand Wärmeübertragung

5.3 AKM Teststand

Die Übernahme der in Abbildung 5.3 dargestellten Ammoniak-Wasser-Absorptionskälteanlage (AKM) durch die TU-Berlin Ende Januar 2008 brachte mehrere organisatorische Aufgaben mit sich. An dieser Stelle wird der Verlauf stichpunktartig von der Übernahme bis zur Inbetriebnahme wie folgt erläutert:

- Transport AKM nach Berlin
- Aufstellung der AKM an der TU-Berlin, Institut für Energietechnik, KT-Halle
- Aufbau eines Auffangbeckens
- Aufbau einer Umhüllung mittels eines Baugerüsts und eine transparente PVC-Folie mit Flausch-Klettverschluss. Die Umhüllung erwies sich für Laborarbeiten, wegen der notwendigen Transparenz und der Möglichkeit der spontanen Öffnung durch Personal, als sicherheitstechnisch vorteilhaft.
- Aufbau Ventilation, Anschluss an Notstrom
- Aufbau der Elektrik: Die Pumpen der Versorgungskreisläufe wurden an je einem Frequenzumrichter angeschlossen.
- Aufbau der Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik:
Messaufnehmer für Temperatur: Die Temperaturen werden mit Pt100-Widerstandsthermometer (Genauigkeitsklasse A) erfasst. Die von der

Wandlereinheit gelieferten Messergebnisse werden in Form von Temperaturwerten (in °C) zum Messrechner gesendet. Der Teststand hat insgesamt 44 Temperaturlaufnehmer, die über Vierleiterschaltung am Wandler angeschlossen worden sind. Der Teststand wurde wegen Bau des Membranabsorberteststandes noch um weitere Sensoren erweitert. Die angeschlossenen Messsensoren wurden getestet und mit einem Referenzthermometer kalibriert.

Messaufnehmer für Druck, Durchfluss und Dichte: Die Druckaufnehmer, die Differenzdruckaufnehmer, die Durchflussaufnehmer und die Dichteaufnehmer geben ein Stromsignal (4 - 20 mA) aus. Der Messaufnehmer wurde mit einem Messwiderstand (125 Ohm) in Reihe geschaltet. Die gemessenen Signale wurden mit den vom Hersteller angegebenen Umrechnungsgleichungen in gewöhnliche Messeinheiten umgerechnet. Am Teststand sind insgesamt 70 Messstellen vorhanden.

Für die Aufnahme von Messsignalen wurden Wandlereinheiten vom Typ ICP-CON (i-87K8) im Schaltschrank nachgerüstet. Die Übertragung von gemessenen Daten zu einem Messrechner erfolgt durch ein Datenkabel. Die Datenübertragung erfolgt über eine RS485-Schnittstelle, mit Hilfe von einem RS485-USB-Konverter, der mit dem Messrechner verbunden ist. Die Kommunikation zwischen dem Messrechner und der Wandlereinheit wurde mit Hilfe von einer geeigneten Software (DCON Utility) geschafft. Die aufgenommenen Messwerte wurden mit einer im LabView-Programm erstellten Messoberfläche programmiert. Die aufgenommenen und behandelten Messergebnisse werden beim Messprogramm als Funktionen der Zeit und als Graphen geplottet. Anschließend werden die behandelten Messergebnisse und mit deren Hilfe ausgerechneten Leistungen in eine Textdatei gespeichert.

- Aufbau und Umbau neuer Versorgungskreisläufe für AKM unter Einbindung eines feuchten Rückkühlwerkes. Die Aufstellung des Rückkühlwerkes außerhalb der KT-Halle erwies sich als organisatorisch aufwändig (Genehmigung, Aufstellung), so wurde es in der Halle neben der AKM aufgestellt. Die Ausblasluft des Rückkühlwerkes führt zuerst in die PVC-Umhüllung, danach wird sie durch die Ventilation nach außen abgeblasen (Abbildung 5.4).
- Verlegung von Druckluftleitungen für die Versorgung der pneumatischen Regelventile
- Nachrüstung mit sicherheitstechnischen Maßnahmen: Abblasleitung, zusätzlicher Notausschalter, Ammoniak Sensorik mit Alarmsystem, Drucksensorik zum automatischen Ausschalten der AKM. Hierzu wurde gesondert ein Sicherheitskonzept entwickelt.
- Leckageprobleme der AKM: Durch den Transport war die AKM nicht mehr ausreichend dicht. Hierzu reichte auch ein Nachschrauben nicht allein aus. Die Anlage wurde auseinander gebaut und die Dichtungen wurden erneut bzw. nachverbessert. Der Zeitaufwand, um die Anlage ausreichend dicht zu bekommen, war relativ groß (ca. 2,5 Monate).
- Drucktest der AKM

- TÜV-Abnahme
- Befüllung und Inbetriebnahme der AKM
- Inbetriebnahme der AKM: Erwies sich als äußerst problematisch und zeitaufwändig (ca. 3,5 Monate), es wurden mehrere Szenarien zur Problembeseitigung durchgeführt. Die Problembeseitigung erfolgte mit minimalem materiellem Aufwand.
- Tests zum stationären Betrieb der AKM

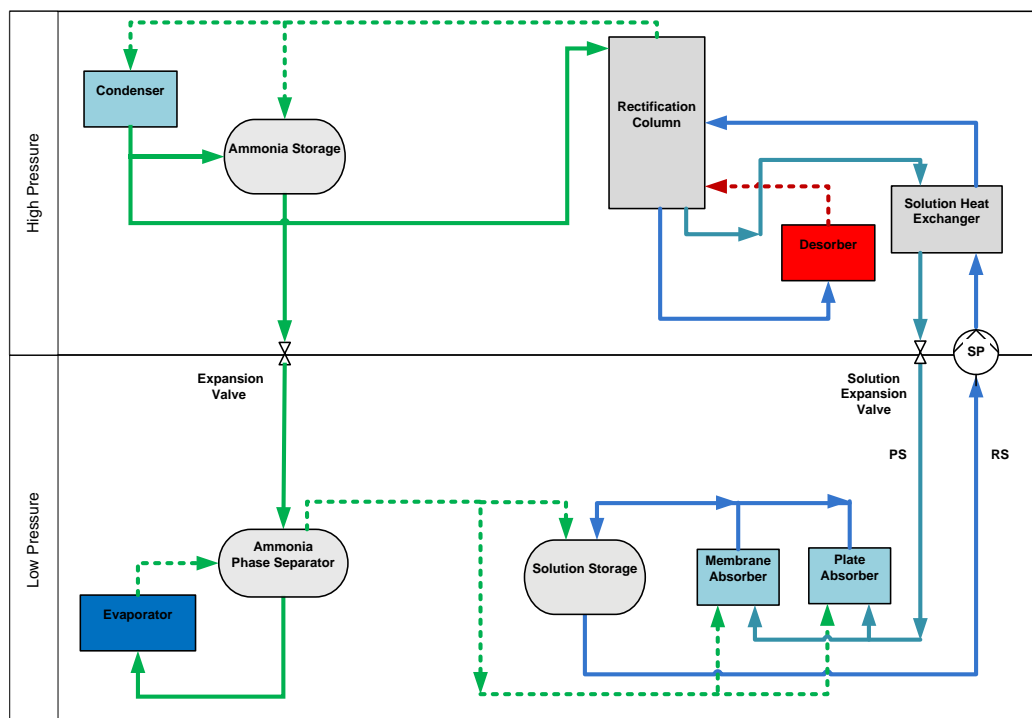


Abbildung 5.3: Schemata der AKM, der Membranabsorberprüfstand wurde parallel zum Plattenabsorber aufgebaut.

- Verbesserung der Regelungstechnik: Korrektur des Lösungsflusses im Absorber, Korrektur der Einstellung der Kolonnenhöhe, Regelung der externen Pumpen, Regelung der Heizung.
- Eisspeicher: Die Abnahme der Kälteleistung durch den Kühlwasserkreislauf erwies sich als problematisch, da ein stationärer Betrieb der AKM zwar erreicht wurde, aber die Einstellung von beliebigen Kühlwasser- und Soletemperaturen nicht einfach voneinander auszukoppeln war. Beim Test der AKM konnten z.B. keine niedrigen Soletemperaturen (stationär) erreicht werden, um den Einfluss von niedrigen Verdampfungstemperaturen an den Betriebslauf der AKM mit MK zu testen. Außerdem bestand die Notwendigkeit, die Membranabsorber mit unterschiedlichen Kühlwassertemperaturen zu testen. Hierzu wurde durch

Studentische Projekte ein Eisspeicher aufgebaut und erfolgreich an der AKM angekoppelt.

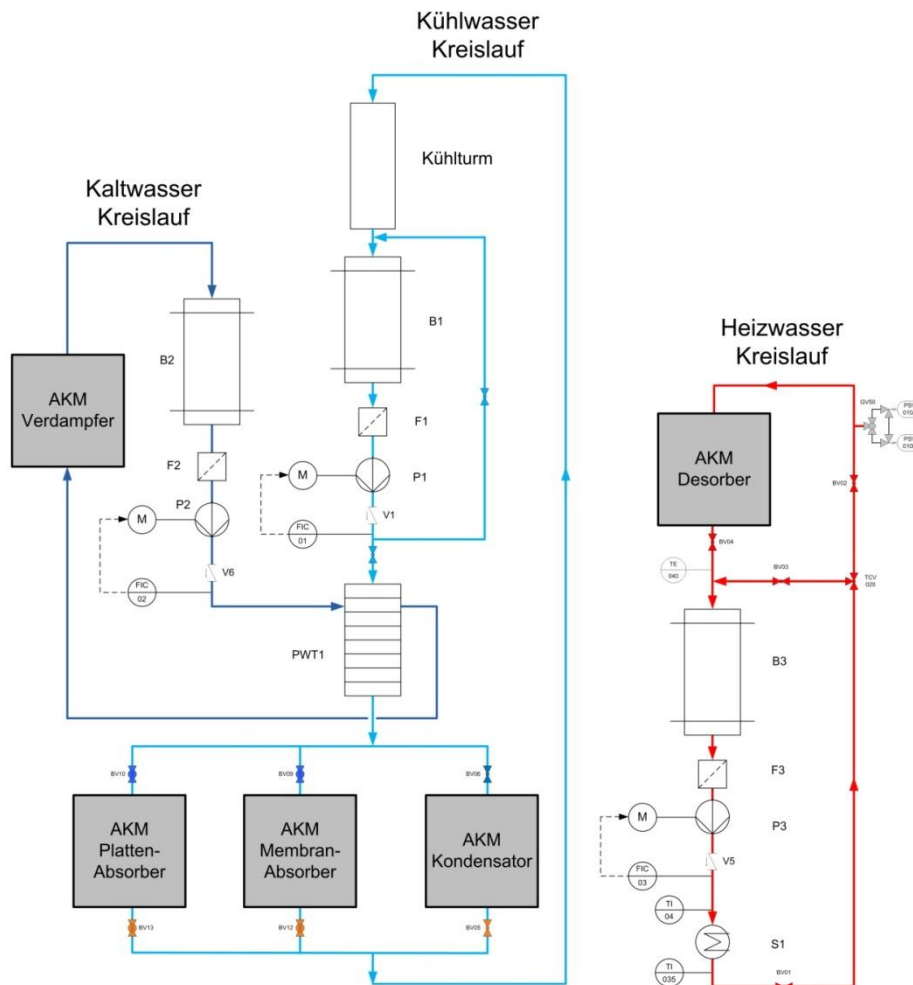


Abbildung 5.4: Schemata der AKM Versorgungskreisläufe

Planung und Bau des Membranabsorberprüfstandes

Um unterschiedliche Membranabsorber individuell untersuchen zu können, war es notwendig einen geeigneten zusätzlichen Teststand aufzubauen. Hiermit sollten die Funktionstauglichkeit und die Betriebscharakteristik der Membranabsorber in Zusammenschaltung mit der AKM überprüft und gemessen werden. Hierzu wurde ein getrennter Membranabsorberprüfstand geplant und aufgebaut, der, parallel zum Plattenabsorber, an der AKM zugeschaltet wird und agieren kann. Der Membranabsorberprüfstand wurde so aufgebaut, dass die Möglichkeit zum Prüfen des vorgekühlten adiabatischen Membranabsorbers (BEKO Typ) und des simultangekühlten Membranabsorbers (Typ Makatec) besteht. Auch sollte die Möglichkeit der Prüfung von nur einem MK oder mehreren MK gleichzeitig gegeben sein.

Alle Rohrleitungen (Kühlwasser, Lösung, Ammoniak) wurden in paralleler Schaltung zu jedem Membranabsorber ausgeführt und mit flexiblen Metallschläuchen und

einem Spezialverschluss an den Membranabsorber angeschlossen. Durch die flexiblen Schläuche besteht die Möglichkeit der Umschaltung auf Gleich- bzw. Gegenstrom. Vor und nach jedem Membranabsorber wurden, wie folgt, die entsprechenden Messtechniken eingebaut (Abbildung 5.5):

- **NH₃ Gas**
Vorlauf: P, T, Massenstrom (Schwebekörper)
Rücklauf: P, T, Massenstrom (Schwebekörper)
- **Lösung**
Vorlauf: P, T, Massenstrom und Xi Konzentration (Coriolis AKM)
Rücklauf: P, T, Massenstrom und Konzentration wird erst nach dem Lösungssammler durch ein Coriolismessgerät in AKM gemessen, wobei der Effekt des Lösungssammlers in Betracht gezogen werden muss.
- **Kühlwasser**
Vorlauf: P, T, Massenstrom (Schwebekörper)
Rücklauf: P, T, Massenstrom identisch mit Vorlauf

Die Messtechnik wurde an Messaufnehmer (im Schaltschrank) angeschlossen und zu einem PC geführt. Die Steuerung und Regelung wurde in LabView einprogrammiert.

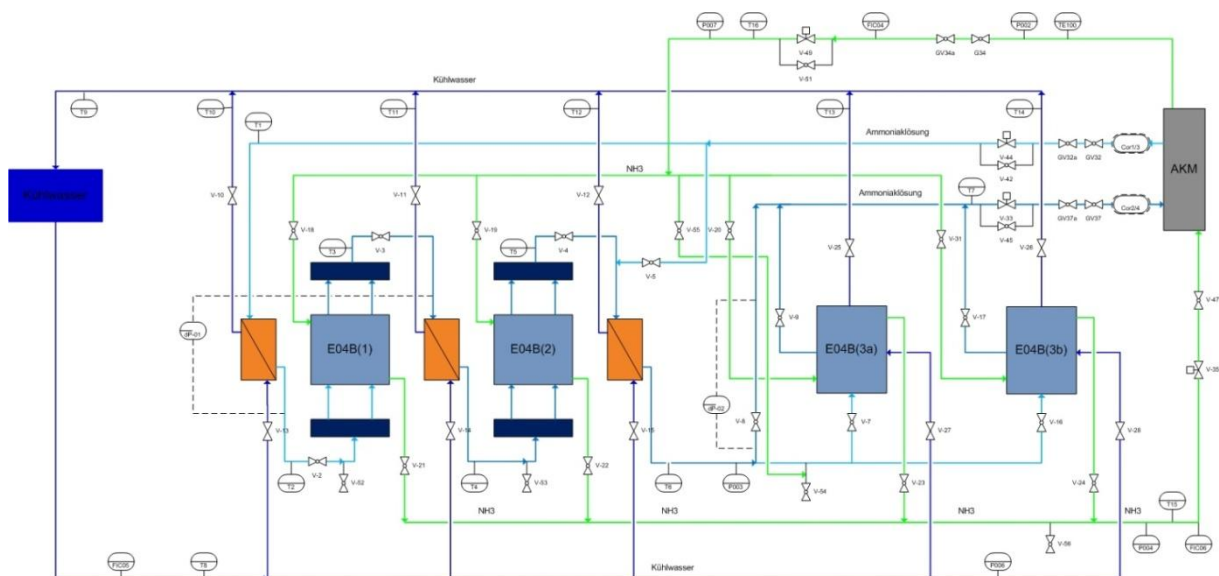


Abbildung 5.5: R & I Diagramm des Membranabsorberprüfstandes

Es besteht die Möglichkeit zwei simultangekühlte Membranabsorber E04B(3a, 3b) und zwei vorgekühlte adiabatische Membranabsorber E04B(1,2) separat oder in Kombination zueinander zu testen (grün: Ammoniak, hellblau: Lösung, dunkelblau: Kühlwasser)

Weiterhin wurde der Kühlkreislauf der Membranabsorber von dem restlichen Kühlkreislauf der AKM getrennt ausgeführt. Dies wurde hauptsächlich aus sicherheitstechnischen Gründen unternommen, da die Gefahr des Durchdringens von Ammoniak durch interne Leckagen auf die Kühlwasserseite bestand. Hierdurch entstand aber auch die Möglichkeit, die Temperatur des Membranabsorbers unabhängig von der Temperatur im Kondensator einzustellen, was sich als sehr vorteilhaft erwies.

Es wurde im Kühlwasserkreislauf der Membranabsorber noch eine Schaltung mit einem externen Wärmeübertrager zur Einstellung von Druck, Massenstrom und Temperatur des eintretenden Kühlwassers eingebaut. Durch diese Schaltung besteht auch die Möglichkeit, die Drücke der Kühlwasserein- und -austritte an die Lösungsdrücke anzupassen. Dies erwies sich als besonders wichtig, da die Fluide in der MK durch die flexible Folie sich gegenseitig den Kanal verengen oder diesen sogar absperren können.

Da es sich bei den Labortests um die Prüfung von nicht erprobten Prototypen handelte, wurde wegen der vorhandenen Gefahren beim Umgang mit Ammoniak (Toxizität, Brennbarkeit, Explosionsgefahr), besonderer Wert auf den Anbau von sicherheitstechnischen Maßnahmen gelegt.

Hierzu wurde angenommen, dass die Membranabsorber jederzeit während des Betriebs plötzlichen Problemen ausgesetzt sein könnten (externe sowie interne Lecks von unterschiedlicher Größenordnung, plötzliches Platzen der Module, Bruch der Kontaktschläuche bzw. Kontaktstellen zur MK). Um die Personen nicht zu gefährden, wurde ein Sicherheitsmechanismus entwickelt und installiert, wodurch der gesamte Laborbetrieb sicher gestaltet wurde.

Bei Problemfällen sollte der gesamte Membranabsorberprüfstand von außen durch Notausschalter selbstständig von der AKM abgesperrt werden. Hierzu wurde in den Vor- und Rücklauf der Ammoniakgasleitung zum Membranabsorberprüfstand (MAP) ein pneumatisches Kugelventil und weitere Magnetventile angebaut. Auch an der Lösungsleitung wurden am Vor- und Rücklauf Magnetventile eingebaut.

Um die Gefahren durch Spritzen von Ammoniak oder Lösung sowie Platzen der Module für das Personal während des Betriebs auf ein Minimum zu senken, wurden die simultangekühlten Membranabsorber noch mit einem Gehäuse aus Plexiglas abgekapselt (Abbildung 5.6).



**Abbildung 5.6: Membranabsorberprüfstand TU-Berlin (links),
Abkapselung der simultangekühlten Membranabsorber mit Plexiglas (rechts)**

6. Polymerwärmeübertrager

Der prinzipielle Aufbau des Spiralwärmeübertragers auf Polymerbasis ist in Abbildung 6.1 dargestellt.

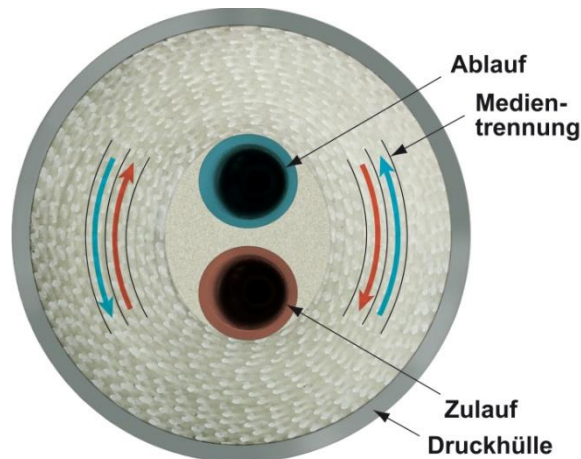


Abbildung 6.1: Prinzip Makatec Spiralwärmeübertrager

Das Grunddesign der Strömungskanäle entspricht einer archimedischen Spirale. Die beiden Kanäle werden durch eine Polymerfolie getrennt. Um eine gleichbleibende Querschnittsfläche sicherzustellen, dabei die Folie bei Druckbeanspruchung abzustützen und um schon bei geringen Fließgeschwindigkeiten die notwendigen Turbulenzen zu erzeugen, werden biaxiale Strömungsgitter in die Kanäle eingelegt. Das Grunddesign des Wärmeübertragers und dessen Fertigung bilden auch die Basis für die neuartigen Membrankontaktoren der Makatec GmbH.

6.1 Fertigung

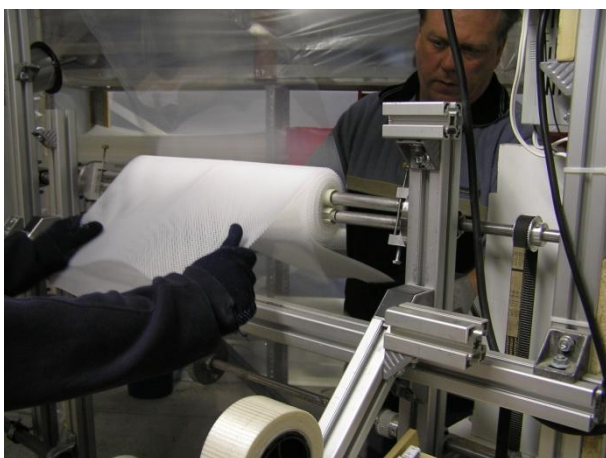


Abbildung 6.2: Wickelvorgang

Der erste Fertigungsschritt ist das Wickeln von Folie und Strömungsgitter um zwei zentrale Zu- bzw. Ablaufrohre. Der Wickelvorgang ist in Abbildung 6.2. dargestellt. Dieser Rohwickel muss nun im nächsten Arbeitsschritt an den Stirnseiten abgedichtet werden. Hierzu werden die Stirnseiten mit einem Gießharz verschlossen. Um eine gute Verbindung zwischen Harz und Folie speziell bei chemisch inerten Polymeren mit geringer Oberflächenenergie zu gewährleisten, ist eine Vorbehandlung des Wickels durch einen Plasmivorgang

unabdingbar. Als letzter Fertigungsschritt wird eine Druckhülle um den ganzen Wickel gegossen. Diese wird so ausgeführt, dass nach dem Gießvorgang

Gewindeanschlüsse sowohl für die Zentralrohre als auch für die seitlichen Zu- und Ablaufkanäle direkt durch das Gießharz gebildet werden.

6.2 Materialwahl

Polymerwärmeübertrager sind speziell im Einsatz mit aggressiven anorganischen Flüssigkeiten eine interessante Alternative zu metallbasierten Wärmeübertragern.

Daher wurde bei der Auswahl der Materialien darauf geachtet, für verschiedene Einsatzzwecke einen guten Kompromiss zwischen chemischer Beständigkeit, Verfügbarkeit und Verklebbarkeit zu finden. Hierzu wurden umfangreiche Klebetests mit verschiedenen Folien, Gießharzen und Vorbehandlungen durchgeführt. Den aktuellen Stand der eingesetzten Materialien zeigt Tabelle 6.1.

Tabelle 6.1: Materialien für den Makatec Wärmeübertrager

| Einsatzgebiet | Meerwasser/Kühlwasser | Säuren | Laugen |
|----------------------|------------------------------|---------------|---------------|
| Material Folie | PE-HD | PPSU | PEEK |
| Material Gießharz | PU | Epoxidharz | Epoxidharz |
| Material Gitter | PE | PE | PE |
| Material Kanalrohr | Gitterrohr PE | Gitterrohr PE | Gitterrohr PE |

6.3 Messdaten

Die Wärmeübertragungseigenschaften und Druckverluste des Wärmeübertragers wurden von der Technischen Universität Berlin im Rahmen des Projekts vermessen, s. Anhang Messung Wärmeübertrager.

6.4 Einsatzgrenzen

Zur Vermarktung des Wärmeübertragers außerhalb der Absorptionskältetechnik wurde im Jahr 2008 die Makatec Apparate GmbH als Tochtergesellschaft der Makatec gegründet. Der Wärmeübertrager mit PEHD Folien ist für Drücke bis 6 bar und Temperaturen bis 65°C freigegeben. Hauptanwendungen sind die Nutzung von Meerwasser zur Rückkühlung von Klimaanlage und als Wärmequelle für Wärmepumpen.

Bei der Temperaturfreigabe zeigt sich auch ein Problem für den Einsatz in Resorptionsanlagen. Da sowohl für das Gitter wie auch für die Gitterrohre im Zentralkanal alternative Materialien kaum und nur zu sehr hohen Preisen verfügbar sind, ist der Einsatz als Lösemittelwärmeübertrager im heißen Kreislauf der Resorptionsanlage nicht zu empfehlen. Der neuentwickelte Wärmeübertrager soll daher zunächst nur im kalten Kreislauf der Resorptionsanlage eingesetzt werden, bis kostengünstige und temperaturbeständige Alternativen (bis über 100°C) in der Materialauswahl für Gitter, Gitterrohre und auch Gießharze verfügbar sind.

7. Herstellung Membrankontaktoren

Die Herstellung der Kontaktoren (MaMeKo) gemäß Abbildung 4.1. kann in drei Arbeitsphasen unterteilt werden:

- Herstellung des Rohwickels
- Wickelabdichtung mit Kanalanschlüssen
- Anbringung einer Druckhülle mit Gasraum

Der Fertigungsprozess der Einzelstücke basiert auf den Erfahrungen bei der Herstellung der Wärmeübertrager und wird nachfolgend aufgrund des neuartigen Designs mit integrierten Hohlfasermembranen detaillierter als für den Wärmeübertrager beschrieben.

7.1 Rohwickel

Die Herstellung des Rohwickels beginnt mit dem Zuschneiden der Folien, beziehungsweise der Gitter auf die gewünschte Länge. Es werden drei Gitter benötigt, welche alle aus PP bestehen, zwei für die Seite auf der sich die Membranen befinden und ein Gitter für die Kühlwasserseite. Die Gitter auf der Kühlwasserseite haben eine Dicke von 2 mm, die zwei auf der Membranseite haben eine Dicke von je 1 mm. Die Membranen werden auf eines der beiden dünnen Gitter geklebt und dann gemeinsam mit den anderen Gittern und Folie in die Wickelmaschine eingelegt. Der Wickelvorgang selbst ist im Abschnitt Herstellung Wärmeübertrager beschrieben.

Die porösen, nicht selektiv-permeablen Membranen der Firma Membrana GmbH, Wuppertal, haben eine Porengröße von 0,2 µm und einen Innen/Außendurchmesser von 1,2 bzw. 1,8 mm. Der gesamte Wickel wird anschließend, um eine gewisse Stabilität während der weiteren Fertigungsschritte zu erreichen, mit einer Schnur zusammengehalten. Ein Rohwickel mit den an den Stirnseiten herausstehenden Membranen und den zwei Zentralkanälen in der Mitte ist in Abbildung 7.1 zu sehen.



Abbildung 7.1: Rohwickelstirnseite mit Membranröhrchen

7.2 Wickelabdichtung mit Kanalanschlüssen

Ist der Rohwickel fertiggestellt, werden im nächsten Arbeitsschritt die seitlichen Kanäle angebracht. Diese werden aus Epoxidharz gegossen, und jeweils genau über den Enden der Folie mit etwas herausragendem Strömungsgitter mit einem aufgeklebt. Hierbei ist zu beachten, dass der Kanal ohne Undichtigkeiten an den Wickel angebracht wird, um bei dem späteren Verharzen des gesamten Wickels in der Druckhülle ein Einlaufen des Harzes in den Wickel sicher zu vermeiden. Der Vorteil der selbstgefertigten Epoxidharzkanäle besteht darin, dass eine sehr gute Verbindung mit dem späteren Verguss entsteht.

Im nächsten Arbeitsschritt wird der Wickel an den Stirnseiten plasmiiert, damit das Harz eine bessere Verbindung sowohl mit der Folie als auch mit den Membranröhrchen eingeht. Durch mehrere Versuche wurde der Vorteil des Plasmierens bestätigt. Bevor man die Stirnseiten verharzen kann, muss man die Membranröhrchen an den Enden verschließen, entweder manuell zusammendrücken oder verkleben. Anschließend kann die Stirnseite der Wickel mit Epoxidharz vergossen werden. Die Aushärtung benötigt ca. 4-6 Stunden, danach kann an der anderen Stirnseite der Vorgang wiederholt werden.

Es ist zu beachten, dass auf jeder Stirnseite ein Zentralkanal mit Harz verschlossen wird, und ein Kanal, z.B. durch ein Silikonformteil, frei bleibt, wobei natürlich der freie Kanal auf der einen Stirnseite dem verschlossenen Kanal auf der anderen Stirnseite entsprechen muss. Ein freier und ein eingegossener Kanal sind in Abbildung 7.2 zu sehen. In Abbildung 7.3 ist ein Wickel mit angeklebten Seitenkanälen nach dem Verguss der Stirnseiten zu sehen.



Hier befindet sich der zweite mit Harz vollgelaufene Kanal



Abbildung 7.2: Stirnverguss mit einem offenen Kanal

Abbildung 7.3: Wickel mit den geharzten Stirnseiten und den bereits angebrachten Seitenkanälen

Nachdem beide Stirnseiten inklusive der Membranen eingegossen sind, werden diese mit einer Bandsäge so abgesägt, dass die Membranen wieder offen sind und somit Gas einströmen kann, aber die Folie nicht beschädigt wird.

7.3 Druckhülle mit Gasraum

Im letzten Arbeitsschritt der Kontaktorenherstellung wird ein transparentes PVC-Rohr in der gewünschten Länge des Kontaktors inklusive Gassammelkanal (s. Abbildung 4.1) als Hüllrohr verwendet. Dabei richtet sich die Länge des Rohres danach, welches Volumen der zusätzlich zu erzeugende Gasraum haben soll. Bei den hergestellten Funktionsmustern betrug diese ca. 33-35 cm. Der Wickel wird in das PVC Rohr eingegossen. Um den Gasraum des Kontaktors über den offenen Enden der Membranen freizuhalten, werden die Stirnseiten vor diesem Verguss mit einem Silikonkissen abgedichtet, welches sich nach dem Harzvorgang einfach aus dem Rohr herausnehmen lässt.

Das PVC-Rohr wird nun in einem Vorgang komplett verharzt. Die Silikonkissen können nach der Aushärtung entfernt und die gewünschten Anschlüsse seitlich und an den Stirnseiten angebracht werden. Dafür wird an den Seiten bis in den Seitenkanal gebohrt und ein Gewinde in das Harz geschnitten. Für die Anschlüsse an den Stirnseiten muss ein Rohrstück aus PVC verwendet werden, welches durch den Gasraum und die Stirnseiten nach außen führt.

Als Abschluss des Gasraumes an den Stirnseiten werden ca. 18*18 cm große PVC-Platten verwendet. Die beiden Rohrstücke für den Anschluss der Zentralkanäle werden in die Zentralkanäle eingeschraubt und abgedichtet, vom Wickel durch den Gasraum und durch Bohrungen in den Stirnplatten geführt. Die Gasanschlüsse werden an entsprechend vorgebohrten Stellen der Stirnplatten angeschweißt.

Nachdem alle Anschlüsse gesetzt sind, werden die Stirnplatten oben und unten an das Rohr angeschweißt. Die Flüssigkeitsdurchführungen durch den Gasraum werden ebenfalls mit den Stirnplatten dicht verschweißt.

Aufgrund der abschließenden Verschweißung wurde auf eine einheitliche Materialauswahl für Hüllrohr, Stirnplatten und Anschlussfittings besonderen Wert gelegt.

Insgesamt wurden während der Laufzeit des Projekts ca. 40 Membrankontaktoren auf diese Weise gefertigt (s. Anhang 2, Liste Membrankontaktoren), wobei die ersten 20 Kontaktoren hauptsächlich zur Verfeinerung der Fertigung dienten. Es hat sich gezeigt, dass für die zuverlässige Abdichtung des elastischen Polymerwickels mit integrierten Zu- und Abläufen sowohl bei jedem Materialwechsel als auch bei Änderungen der Membranzahl und -geometrie neue Herausforderungen bei der Verklebung gelöst werden müssen.

Um dichte Kontaktoren für die Tests zu erhalten, wurden daher ca. ab dem 25. Kontaktor die in Tabelle 7.1 dargestellten charakteristischen Eigenschaften der Kontaktoren bei der Fertigung eingehalten.

Tabelle 7.1: Charakteristische Daten Membrankontaktor

| | |
|---------------------------------|------------------------|
| Material der Membranen: | Polypropylen (PP) |
| Porengröße Membran: | 0,2 μm |
| Innen-/Außendurchmesser Membran | 1,2/1,8 mm |
| Anzahl der Membranen: | 90 - 125 Stück |
| Gitterbreite: | 0,2 m |
| Gitterlänge: | 1 - 1,5 m |
| Höhe Gitter Kühlwasserkanal: | 2 – 4 mm |
| Höhe Gitter Membrankanal: | 3 mm |
| Material der Folie: | Polyamid , PPSU |
| Dicke der Folie: | 75 - 125 μm |

Ein fertig produzierter Membrankontaktor mit transparenter PVC-Hülle ist in Abbildung 7.4 dargestellt



Abbildung 7.4: Fertig produzierter Membrankontaktor

8. Vermessung Membrankontaktoren mit Wasser/Luft

Für die Durchführung der MaMeKo-Tests mit Luft und/oder Wasser bei Makatec werden die Bezeichnung der Anschlüsse gemäß Abbildung 8.1 festgelegt.

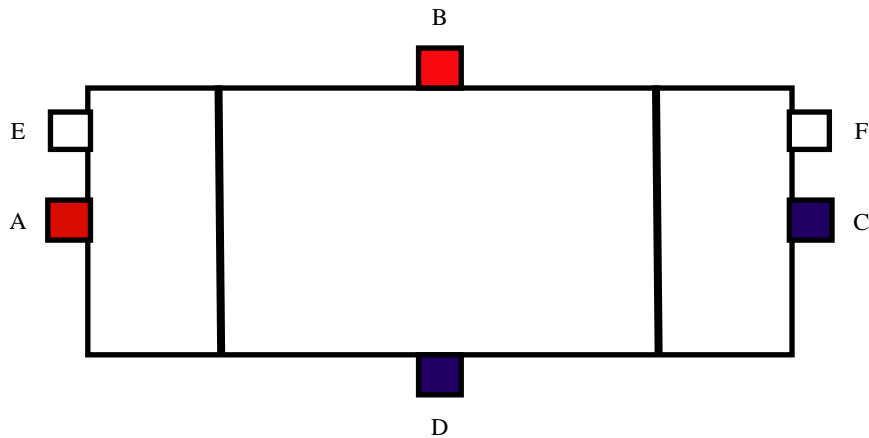


Abbildung 8.1: Deklaration der Anschlüsse an dem MaMeKo

Hierbei gilt folgende Zuordnung:

- A...Membranseite Flüssigkeitseingang
- B...Membranseite Flüssigkeitsausgang
- C...Kühlwasserseite Flüssigkeitseingang
- D...Kühlwasserseite Flüssigkeitsausgang
- E...Gaseingang
- F...Gaseingang

Der rotmarkierte Ein- bzw. Ausgang in Abbildung 8.1 bezeichnet den Kanal, in dem sich die Membranen befinden. Dabei wurde die Farbe Rot gewählt, um zu verdeutlichen, dass hier die Wärme bei der Absorption entsteht und auf den zweiten Kanal, den blau markierten Kühlwasserkanal, übertragen und abgeführt wird.

Die Verhältnisse bei einer Absorption/Desorption sind naturgemäß nicht mit diesen einfachen Tests vergleichbar. Insbesondere bei der Absorption wird das Gas in der Flüssigkeit gelöst, und muss im Gegensatz zur Luft nicht durch den gesamten Kanal strömen. Auch der Wärmeübergang wird durch den Phasenübergang verbessert. Dennoch können diese Tests als worst case Szenarien auch einen ersten Anhaltspunkt für die Leistungsfähigkeit der Kontaktoren bieten. Beim Einsatz des MaMeKo als Absorber in einer 5 kW Resorptionsanlage kann man von den in Tabelle 8.1 dargestellten Randbedingungen ausgehen:

Tabelle 8.1: Randbedingungen für die Absorber in einer 5 kW Resorption

| | |
|--------------------------------------|------------------|
| Druck: | 0,8 – 4 bar |
| Temperatur: | 20 – 50 °C |
| Volumenstrom Lösemittel: | 2 – 4 l/min |
| Volumenstrom Kühlwasser | 8 – 20 l/min |
| Mengenstrom gasförmiges Kältemittel: | 0,2 – 0,25 mol/s |

Der Mengenstrom des gasförmigen Kältemittels entspricht im Niederdruckteil bei ca. 1 bar und ca. 0°C einem Volumenstrom von 4 - 6 l/s!

Die Testergebnisse mit Luft und Wasser sind im Anhang Messungen Membrankontaktoren mit Luft und Wasser dargestellt. Hier werden die Testergebnisse beispielhaft diskutiert.

8.1 Druckverluste Luftströmung im MaMeKo

Die Tests mit Luft für einen MaMeKo werden in dem in Kapitel 5 beschriebenen Teststand durchgeführt (Abbildung 5.1). Es werden vier Druckverlustmessungen für die Luftströmung durchgeführt:

- Durch den Spiralkanal mit den Membranen (Eingang A nach Ausgang B),
- Zum Vergleich durch den Kühlwasserkanal (Eingang C nach Ausgang D),
- Vom Gaseintritt durch die Membranporen zum Ausgang des Spiralkanals (Eingang E und F nach Ausgang B)
- Gasströmung durch die Membranröhrchen ohne Gasdurchtritt durch die Poren (Eingang E nach Ausgang F)

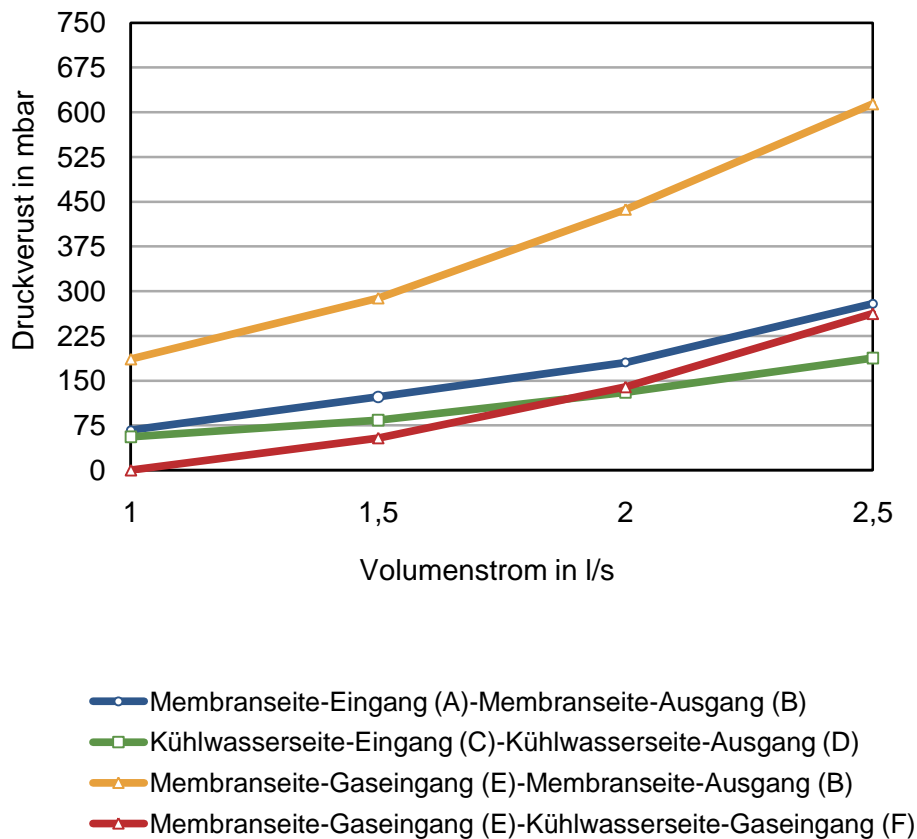


Abbildung 8.2: Beispielhafte Druckverluste MaMeKo Luftströmung

Bei diesen Versuchen war der Druck am Austritt der Luftströmung annähernd gleich dem Umgebungsdruck, der Druckverlust im MaMeKo wurde über die Differenzdruckmessung direkt an den jeweiligen Anschlüssen bestimmt.

Man erkennt in Abbildung 8.2, dass der höchste Druckverlust bis zu 600 mbar bei 2,5 l/s Luftströmung beim Gasdurchtritt durch die Membranporen auftritt (gelbe Kurve). Erstaunlicherweise sind die anderen Druckverluste alle in der gleichen Größenordnung, sowohl bei der Strömung durch die beiden unterschiedlich aufgebauten Spiralkanäle als auch die Gasströmung durch die Membranröhrchen.

Ohne Gasdurchtritt durch die Poren resultieren für diese Luftströme Druckverluste im Bereich von 100 - 300 mbar.

Nimmt man an, dass bei einem Absorptionsprozess das Gas nach dem Durchgang durch die Membranporen direkt von der Flüssigkeit absorbiert wird, kann vereinfachend auf einen Druckverlust für das Gas von ca. 300 mbar bei 2,5 l/s Gasströmung geschlossen werden. Dieser Wert ist noch recht hoch, insbesondere wenn man von einem tatsächlichen Gasstrom bei der Absorption von 4 – 6 l/s ausgeht, s. Tabelle 8.1.

Dieser Druckverlust muss zukünftig noch deutlich verringert werden, jedoch darf der Durchbruchdruck der Flüssigkeit hierbei nicht deutlich verringert werden, da dies bei der Absorption zu Problemen führt, s. Kapitel 9.

Somit ist eine Vergrößerung der Porenradien nur bedingt sinnvoll. Auf der anderen Seite führt eine deutliche Erhöhung der Anzahl an Membranröhrchen zu massiven Dichtigkeitsproblemen bei der Fertigung, wenn der Abstand zwischen den Röhrchen so dicht wird, dass eine vollständige Umhüllung jedes einzelnen Röhrchens mit dem Gießharz nicht mehr gewährleistet werden kann.

Somit erscheint zukünftig die Verlängerung der Membranröhrchen, und demzufolge die Verbreiterung der Strömungskanäle eine erfolgversprechende Maßnahme zur Verbesserung der Kontaktoren hinsichtlich des Einsatzes in Resorptionsanlagen.

8.2 Druckverluste Wasserströmung im MaMeKo

Es werden ebenfalls die Seiten A-B und C-D, die Kanalseite auf der sich die Membranen befinden und die Kühlwasserseite, untersucht. Es wird mit einem Wasserstrom zwischen 0-5 l/min getestet, s. beispielhaft Abbildung 8.3.

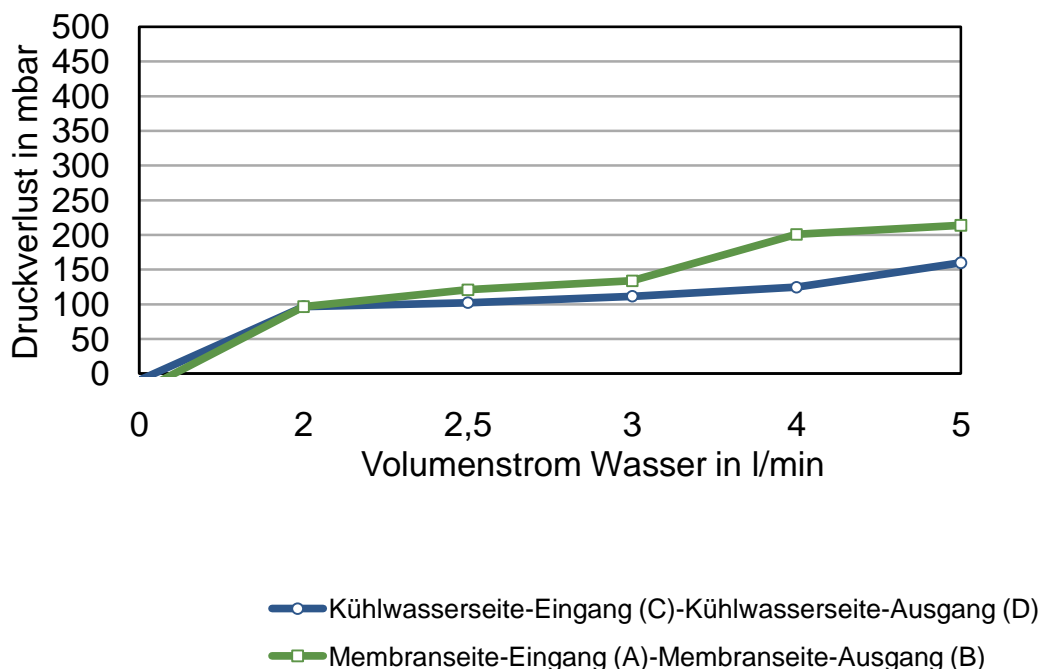


Abbildung 8.3: Beispielhafte Druckverluste MaMeKo Wasserströmung

Alle ermittelten Druckverluste liegen im Bereich von 0 bis 300 mbar, selbst bei Volumenströmen von 5 l/min werden die 300 mbar nicht überschritten. Bei dem in der Kälteanlage eingestellten Volumenstrom von ca. 2 l/min für das Lösemittel resultieren Druckverluste von 100 mbar.

Auffallend ist bei den Versuchen, dass der typische quadratische Verlauf der Abhängigkeit des Druckverlusts vom Volumenstrom in Abbildung 8.3 nicht dargestellt ist. Dies könnte damit zusammenhängen, dass die reale Strömungsgeschwindigkeit durch die biaxialen Gitter nicht linear mit dem in Abbildung 8.3 angegebenen Volumenstrom korreliert.

Eine weitere Optimierung der Druckverluste auf der Lösemittelseite ist sinnvoll. Da das Gas in allen Membranröhrchen den gleichen Druck aufweist, wird es aufgrund einer höheren Druckdifferenz immer bevorzugt in die Lösung am Ende der Spiralwicklung eingedüst werden. Dort steht jedoch nur noch ein geringer Strömungsweg für die Absorption mit simultaner Kühlung zur Verfügung.

Bei hohen Druckverlusten muss daher die Anzahl Membranröhrchen am Ende des Strömungswegs deutlich reduziert werden, um Gasdurchbrüche aus dem Absorber zu vermeiden. Mit einer zukünftigen Verbreiterung des Strömungskanal werden die Druckverluste der Flüssigkeitsströmung jedoch ebenfalls deutlich reduziert.

8.3 Druckverluste im MaMeKo bei Lufteindüsung in Wasser

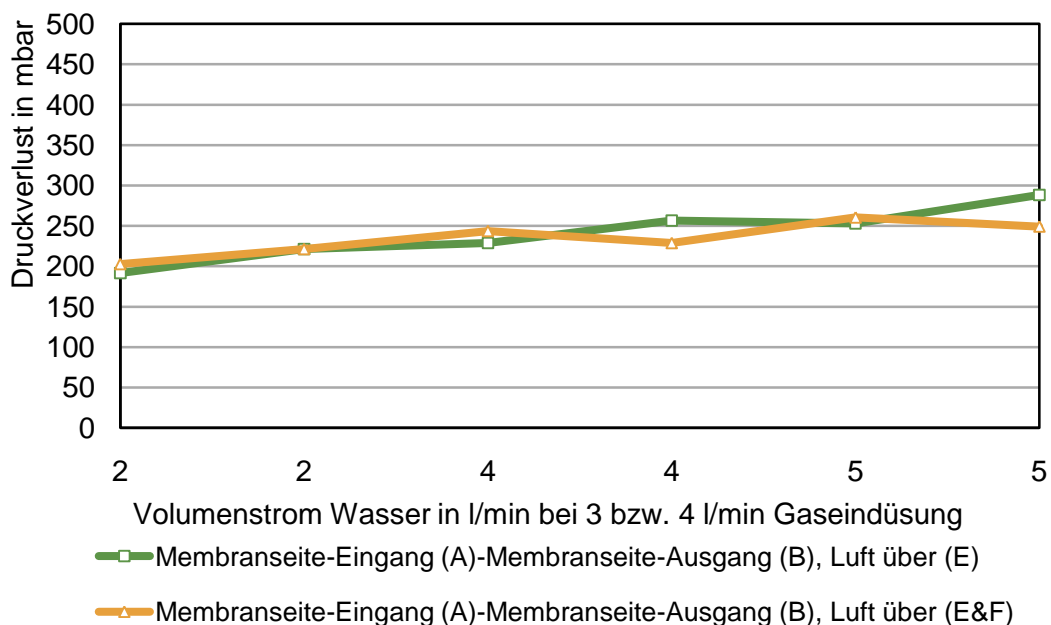


Abbildung 8.4: Beispielhafte Druckverluste MaMeKo Lufteindüsung in Wasserströmung

Bei diesem Test der Druckverlustuntersuchung wird die Gaszuführung in die Flüssigkeit simuliert. Hier wird nur der Kanal mit den Membranen untersucht (A-B). Untersucht wurde zunächst eine einfache Zuführung (E), im zweiten Schritt wird eine doppelte Zuführung (E und F) untersucht. Man kann in Abbildung 8.4 erkennen, dass die Zuführung über beide Gaseingänge (E,F) sehr geringe bzw. keine Auswirkungen auf den Druckverlust hat. Somit gelangt man zu dem Ergebnis, dass der Druckverlust

nicht von der Länge der Membranen abhängt, sondern von den Membranporen, was auch aufgrund der in Abbildung 8.2 dargestellten Messungen nur mit Luft geschlossen werden kann.

Des Weiteren kann geschlossen werden, dass nur mit einer gut funktionierenden Absorption moderate Druckverluste erreichbar sind. Die in Abbildung 9.4. vermessenen max. Luftvolumenströme von 4 l/min entsprechen lediglich ca. 1/60 der in einer 5 kW Resorptionsanlage auftretenden NH₃ Gasströme von ca. 4 l/s.

8.4 Wärmeübertragung MaMeKo

Die kA-Werte der Kontaktoren wurden aus Messungen in dem Teststand für Wärmeübertrager nach folgender Formel bestimmt.

$$kA = Q/dT$$

Hierbei ist dT die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz für einen reinen Gegenstromwärmeübertrager. Dies entspricht nicht den tatsächlichen Verhältnissen im Spiralwärmeübertrager, bei der ein Fluid im Kanal mit dem anderen Fluid bei zwei unterschiedlichen Temperaturen in Kontakt ist.

Die Kanäle der Kontaktoren wurden im Gegenstrom angeschlossen. Um die Erwärmung bei der Absorption zu simulieren, wird der Kanal, in dem sich die Membranen befinden, mit warmem Wasser (ca. 55°C) durchströmt. Der gegenläufige Kühlwasserkanal wird mit kaltem Wasser von ca. 23-26°C durchströmt. Es werden nun die jeweiligen Temperaturen der Ausgangströme und die Wärmeströme gemessen.

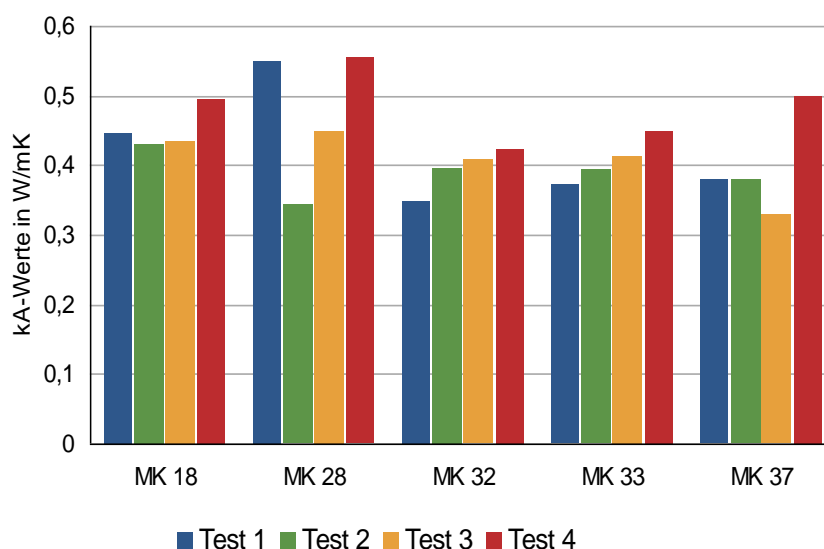


Abbildung 8.5: Beispielhafte Wärmeübertragung MaMeKo mit Wasserströmungen

Es werden Werte zwischen 0,34 - 0,55 W/K erreicht, je nachdem, welche Flüssigkeitsströme eingestellt sind, s. Abbildung 8.4.

Bei den Tests Nr. 1 und 2 wird das Wärmeübertragungsverhalten der MaMeKo untersucht, wenn beide Volumenströme ungefähr gleich sind, ca. 250 l/h. Bei dem Test Nr. 3 wird der Volumenstrom auf der Membranseite um ca. 50-100 l/h größer eingestellt als der kalte Volumenstrom. Beim Test Nr. 4 wird der Kühlwasservolumenstrom um ca. 50-100 l/h größer als der Volumenstrom auf der Membranseite eingestellt.

Beim Einsatz in der Resorptionsanlage wird ein Kühlwasserstrom im Bereich von über 500 l/h realisiert (Tabelle 9.1), da die mögliche Erwärmung des Kühlwassers thermodynamisch limitiert ist.

Die Auswertung der Ergebnisse der Leistungstests zeigt, dass bei einem höheren Kühlwasserstrom deutlich größere k_A - Werte über 0,5 W/K erreicht werden. Somit können mit diesen Prototypen Wärmen von 2-4 kW abgeführt werden, wenn von einer treibenden Temperaturdifferenz zwischen Lösung und Kühlwasser von 4-8 K ausgegangen wird.

8.5 Desorptionsversuche MaMeKo

Um das Verhalten der eingesetzten PP-Membranen bei der Abscheidung von Gasblasen aus der Flüssigkeit zu untersuchen, wurden 2 MaMeKos im Teststand in Reihe geschaltet. Im ersten MaMeKo wurde eine Lufterdüsung analog den Tests zur Druckverlustmessung bei Lufterdüsung in Wasser durchgeführt und das Zweiphasengemisch in den zweiten MaMeKo geleitet. An den Gasraum des zweiten MaMeKo wurde eine Membranpumpe zur Absaugung der Luft angeschlossen. An dem zweiten MaMeKo wurde der Druck beim Eintritt der Zweiphasenströmung sowie mit einem Rotameter die abgesaugte Luftmenge im Gasraum gemessen. Für die ersten Tests wurden Flüssigkeitsvolumenströme von 2-6 l/min und Luftvolumenströme (1 bar) von 5-10 l/min eingestellt.

Mit den eingesetzten Membranen konnte bei Differenzdrücken kleiner 200 mbar zwischen Gas- und Flüssigseite keine nennenswerte Luftabscheidung aus dem Wasser erzielt werden.

Auch eine Veränderung der geometrischen Lage brachte keine Verbesserung. Die Verweilzeit der Zweiphasenströmung in den Kontakoren reicht bei Flüssigkeitsströmungen über 2 l/min offenbar nicht aus, um eine Phasentrennung durch die Schwerkraft zu erreichen. Dann hätte der Luftstrom einfach im oberen Teil durch die trockenen Membranporen treten können. Noch höhere Druckverluste als 200 mbar während der Desorption sind aus thermodynamischen Gründen in Absorptions- und Resorptionskälteanlagen ein gravierender Nachteil.

Dennoch wurde der Differenzdruck mit der Membranpumpe während der Tests deutlich erhöht, jedoch ergab sich ein Durchbruch von Flüssigkeit durch die hydrophoben Membranen. Sobald die Membranporen mit Flüssigkeit benetzt sind, ist der Gastransport blockiert. Somit konnte auch hier keine nennenswerte Gasabscheidung erreicht werden.

Aufgrund dieser Ergebnisse wurde beschlossen, sich im Projekt zunächst auf die Entwicklung von dichten Membrankontaktoren für den Einsatz in Absorptionsprozessen zu konzentrieren.

9. Membrankontaktoren im AKM Teststand

Es wurden zwei verschiedenen Typen von Membrankontaktoren im AKM Teststand vermessen. Zuerst ein Membrankontaktor ohne integrierten Wärmeübertrager, wie er in der Drucklufttrocknung eingesetzt (Abbildung 9.1) wird und dann der simultangekühlte Membrankontaktor der Makatec GmbH (Abbildung 9.2). Die Membrankontaktoren ohne Kühlung wurden von der Firma Beko bereitgestellt.

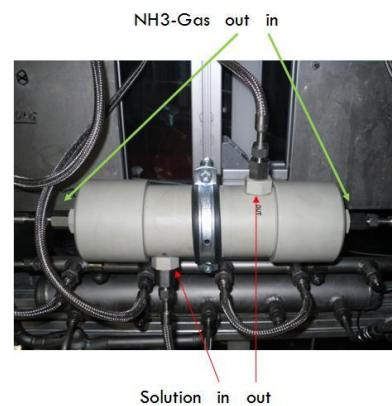


Abbildung 9.1: Vorgekühlte adiabatische Membranabsorber (Typ BEKO)

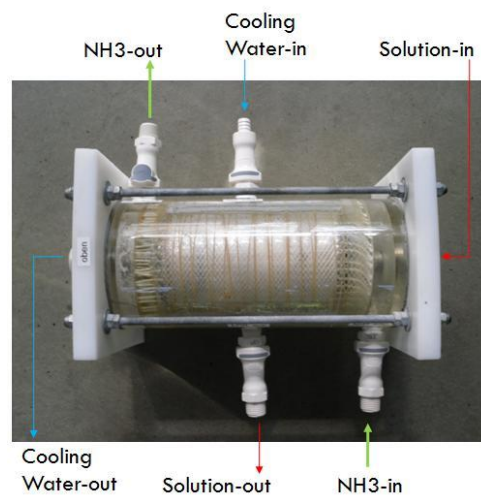


Abbildung 9.2: Simultangekühlte Membranabsorber (Typ Makatec)

Für die Durchführung der Labortests zur Prüfung und Messung der Membranabsorber wurden folgende Aktionen unternommen:

- Vorbereitung:
 - Drucktest, interne- und externe Dichtheitsprüfung der MK

- Anbau des MK an Membranabsorberprüfstand und AKM: Hierbei wurde der Membranabsorberprüfstand teilentleert, nach dem Anschluss des MK an den Teststand evakuiert, und anschließend mit der Lösung und Ammoniakgas befüllt.
- Start der AKM mit Plattenabsorber bis der stationäre Zustand erreicht wurde
- Test:
 - Die Membranabsorber wurden zuerst parallel mit dem Plattenabsorber angefahren, um u.a. auch einen anfänglich empfindlichen Druckanstieg an dem Membranabsorber zu vermeiden. Hierzu wurden die zuständigen Ventile sowie die Magnet- und pneumatischen Ammoniak- und Lösungsventile geöffnet. Kühlwasservor- und -rücklauf zu MK wurde mit dem Lösungsdruck ausgeglichen (Druckdifferenz kleiner als 0,5 bar), damit die Kühlwasserseite und Lösungsseite im MK sich nicht gegenseitig die Kanäle verengen (Flexible Folie im MK).
 - Betrieb AKM + MK: Jede Betriebsaktion und besondere Beobachtungen wurden protokolliert und sind in der Aufzeichnung der Betriebskurven mit implementiert. Die Betriebsszenarien wurden im Vorfeld genau eingeplant. Die wichtigsten Betriebsszenarien wurden in zwei unten geführten Tabellen 9.1 und 9.2 aufgelistet:

Tabelle 9.1: Untersuchte Szenarien Simultangekühlte Membranabsorber (Typ Makatec)

| Betriebsszenario | Gleichstrom* | Gegenstrom* | Teilvergasung** | Vollvergasung*** |
|------------------|--------------|-------------|-----------------|------------------|
| 1 | X | -- | X | X |
| 2 | -- | X | X | X |

*Gleichstrom, Gegenstrom: Zwischen Lösung und Kühlwasser, Ammoniak immer in Kreuzstrom.

**Teilvergasung: Einleitung ein Teil des Ammonikgases vom Phasenabscheider direkt in den Lösungszulauf der MK, mit Gaseintritt in den Hohlfaserlumen.

***Vollvergasung: Einleitung des gesamten Ammonikgases vom Phasenabscheider direkt in den Lösungszulauf der MK, ohne Gaseintritt in den Hohlfaserlumen.

Tabelle 9.2: Untersuchte Szenarien ungekühlte Membranabsorber (Typ Beko)

| Betriebsszenario | Gleich- und Kreuzstrom* | Gegen- und Kreuzstrom* | Gas in Lumen** | Gas in Umhüllung*** |
|------------------|-------------------------|------------------------|----------------|---------------------|
| 1 | X | -- | X | -- |
| 2 | -- | X | X | -- |
| 3 | X | -- | -- | X |

*Zu- und Rücklauf der Lösung in MK ist entweder ein Gleich- und Kreuzstrom, oder ein Gegen- und Kreuzstrom.

**Gas in Lumen: Ammoniakgas wurde in Hohlfaserlumen geführt (einseitig).

***Gas in Umhüllung: Ammoniakgas wurde um die Hohlfaserlumen geführt (einseitig).

9.1 Messung und Auswertung

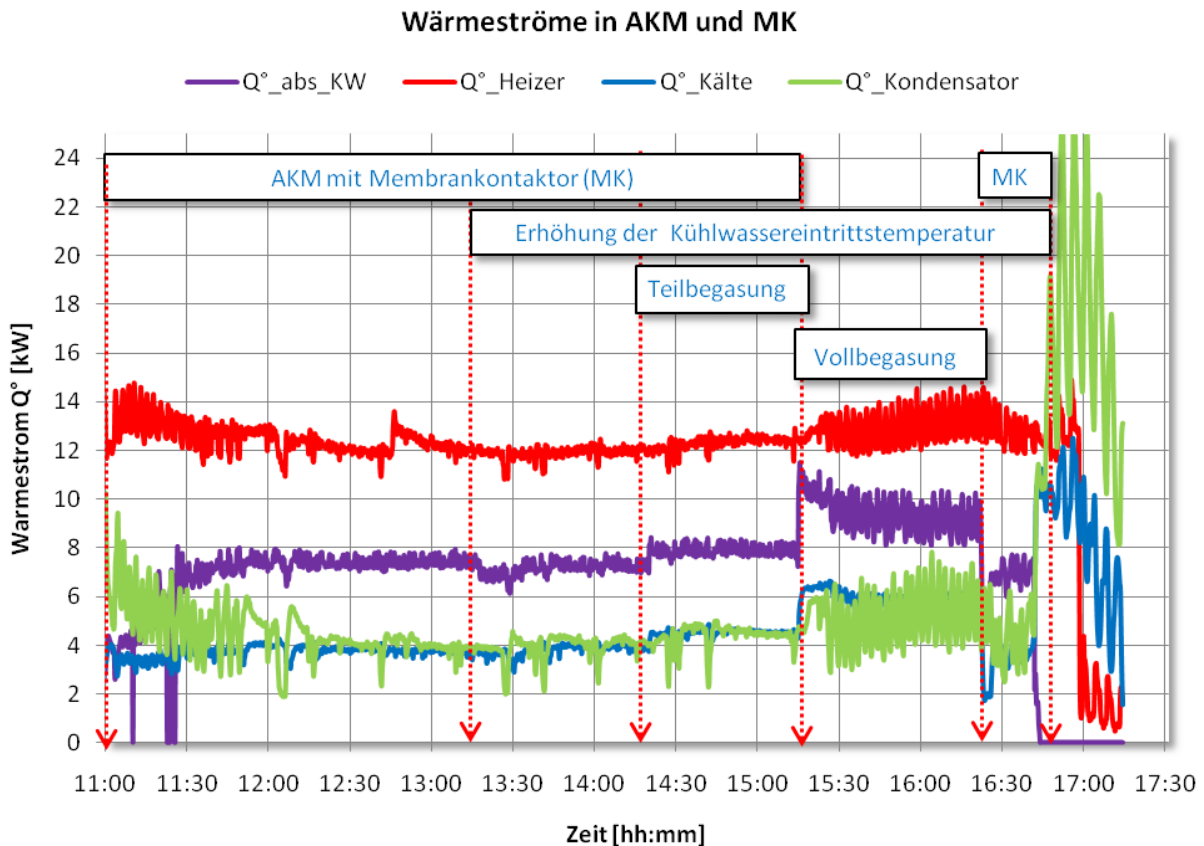


Abbildung 9.3: Wärmeleistung der AKM

in Kombination mit dem simultangekühlten Membranabsorber MK Typ Makatec Nu. 36, Tests mit einem Modul, Lösung und Kühlwasser in Gegenstrom

Beispielhaft werden hier die Messergebnisse einer Messkampagne mit einem simultangekühlten Membranabsorber dargestellt. Die Ergebnisse der Parallelmessungen mit diesem Typ und für den ungekühlten Kontaktor sind im Anhang „Messung Membrankontaktoren in der AKM“ dargestellt.

In Abbildung 9.3 sind die Verlaufskurven der Wärmeleistungen an AKM bei mehr als 4 Stunden Betrieb ausschließlich im Gegenstromstrombetrieb dargestellt. Es wurde hierbei nur eine kleine Anhebung der Kühlwasservorlaufstemperatur ab 13:15 Uhr von 15°C auf 18°C unternommen, die keine wesentliche Auswirkung auf den Betrieb mit dem MaMeKo verübte. Die AKM lief für eine Zeitspanne von über 3 Stunden stationär mit nur einem MaMeKo (Kälteleistung ca. 4 kW, Absorberleistung ca. 7,5 kW). Wie schon vorher erwähnt, war die größte Herausforderung bei der Regelung und Anpassung der Drücke auf der Kühlwasserseite am Ein- und Austritt des MaMeKo. Die Heizleistung wurde entsprechend der Absorber- und der Kälteleistung durch Temperaturregelung stufenlos auf ca. 12 kW eingestellt.

Es wurde eindeutig festgestellt, dass der MK in Zusammenlauf mit der AKM funktioniert. Auch die Leistung und Funktionsstabilität der MaMeKo erwies sich für die ersten Prototypen als gut.

Weiterhin wurden Tests mit einer Teilbegasung und einer Vollbegasung des MaMeKo durchgeführt. Bei der Teilbegasung wurde ein Teil des Ammoniakgases im Vorlauf des MaMeKo direkt in den Lösungsvorlauf geführt, wobei die Gas-Strömung

in den Lumen weiterhin offen blieb. Hierbei stiegen die Leistung des MK und die Anreicherung der Lösung ein wenig an. Bei der Vollbegasung wurde der Ammoniakgaszulauf in den Lumen des MaMeKo abgesperrt und das Gas ausschließlich direkt in den Lösungsvorlauf eingegeben. Hierbei wurde die Art der Eindüsung nicht weiter verfeinert. Die Messungen zeigen ein Ansteigen der Kälteleistung um ca. 4 kW auf ca. 6 kW, allerdings mit einem Ammoniakgasverbrauch, der um drei Größenordnungen größer ist, als bei dem Absorptionsvorgang, der ausschließlich durch die Membranporen geht. Auch die Wärmeleistung der MaMeKo auf der Kühlwasserseite wurde hier auf ca. 9,5 kW gemessen. Dies ist ein Hinweis darauf, dass die Membranen noch deutlich verbesserungsfähig sind. Letztlich ist in diesen Versuchen die Absorption in der freien Zweiphasenströmung noch effektiver als durch die Membranen. Die Messungen zeigen trotz des erfolgreichen Betriebs, dass die Abstimmung zwischen Kontaktoren, Wärmeübertragern und den anderen Anlagenkomponenten noch nicht ausreichend gut gelöst ist. Auch die Leistungsdichte der Membranen müsste sich noch erhöhen lassen. Hierbei ist aber noch zu überprüfen, ob diese Leistung auf die Absorption oder auf die reine Wärmeübertragung im Modul zurückzuführen ist.

Die Abbildungen 9.4 bis 9.6 zeigen den Temperatur-, Druck- und Konzentrationsverlauf während der Tests. Der Druckverlauf zeigt einen Druckunterschied zwischen Ammoniak- und Lösungseintritt bzw. Lösungsausstritt an dem MK von ca. 1 bis 2 bar. Hierbei wurde durch die Simulation festgestellt, dass die großen Druckverluste in den MaMeKo von den Membranen selbst verursacht werden und die Lösungskanäle und der Gasstrom in den Lumen einen relativ kleinen Anteil haben.

Allerdings sollte bei allen Maßnahmen zur Reduzierung des Druckverlusts sichergestellt werden, dass ein Durchschlag von der Lösungsseite zur Gasseite ausbleibt. Trotz der kleinen Porendurchmesser gibt es beim Stillstand der Anlage schon jetzt einen Flüssigkeitsdurchschlag, so dass sich die Gaskammern der MK mit der Lösung füllen. Es ist zukünftig auch zu untersuchen, warum die Membranen ihre hydrophoben Eigenschaften hier nicht beibehalten.

Die beiden Nebenkammern der Gasleitung im Membranabsorber erwiesen sich als problematisch bezüglich einer Entleerung der beim Stillstand eingetretenen Lösung. So bleibt auch während des gesamten Betriebes immer ein wenig Lösung in den Kammern übrig, wodurch durchaus die Konzentration des Ammoniakgases beim Eintritt in den Lumen beeinflusst werden könnte. Durch bessere Entleerungstechniken für die beiden Gaskammern könnte somit auch die Reinheit des Ammoniak vor der Absorption verbessert werden. Dies könnte zu einer weiteren Steigerung der Absorberleistung führen.

Temperaturverläufe am Eintritt und Austritt von MK Nr. 36

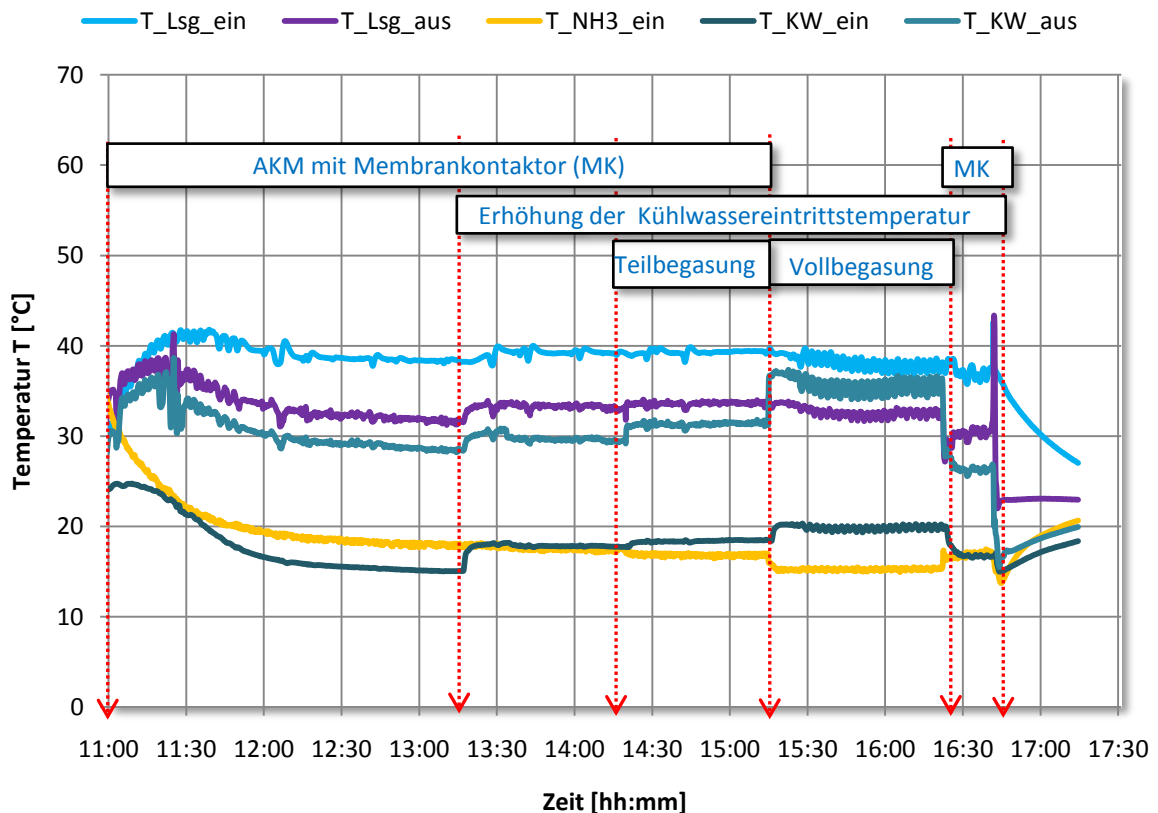


Abbildung 9.4: Temperaturverläufe der Simultangekühlte Membranabsorber

in Kombination mit AKM MK Typ Makatec Nu. 36, Test mit einem Modul, Lösung und Kühlwasser in Gegenstrom

Wie schon früher erwähnt, wurde eine Ammoniakgas-Rücklaufleitung von dem MK bis zum Lösungssammler eingebaut, damit sichergestellt werden kann, dass das Ammoniakgas bis zum Ende der Lumen strömt. Diese Leitung erwies sich aber auch als positiv für weitere Zwecke, z.B. zur schnellen Entleerung der Gaskammern am Beginn der Tests mit MK, und der Möglichkeit an den Teststand, erweiterte Untersuchungen durchzuführen.

Ein Öffnen dieser Rücklaufgasleitung beim Betrieb führte nicht zu einer Steigerung der Absorberleistung. Im Gegenteil, die Absorberleistung fiel um einen Faktor von ca. 5. Da das Ammoniakgas durch den Lumen und die Rücklaufleitung mit viel weniger Widerstand in den Lösungssammler gelang, konnte die transmembrane Druckdifferenz nicht mehr aufrecht erhalten bleiben. Es wurde auch beobachtet, dass der Lösungsstand in den beiden Gaskammern stieg.

Drückverläufe am Ein- und Austritt der MK Nr. 36

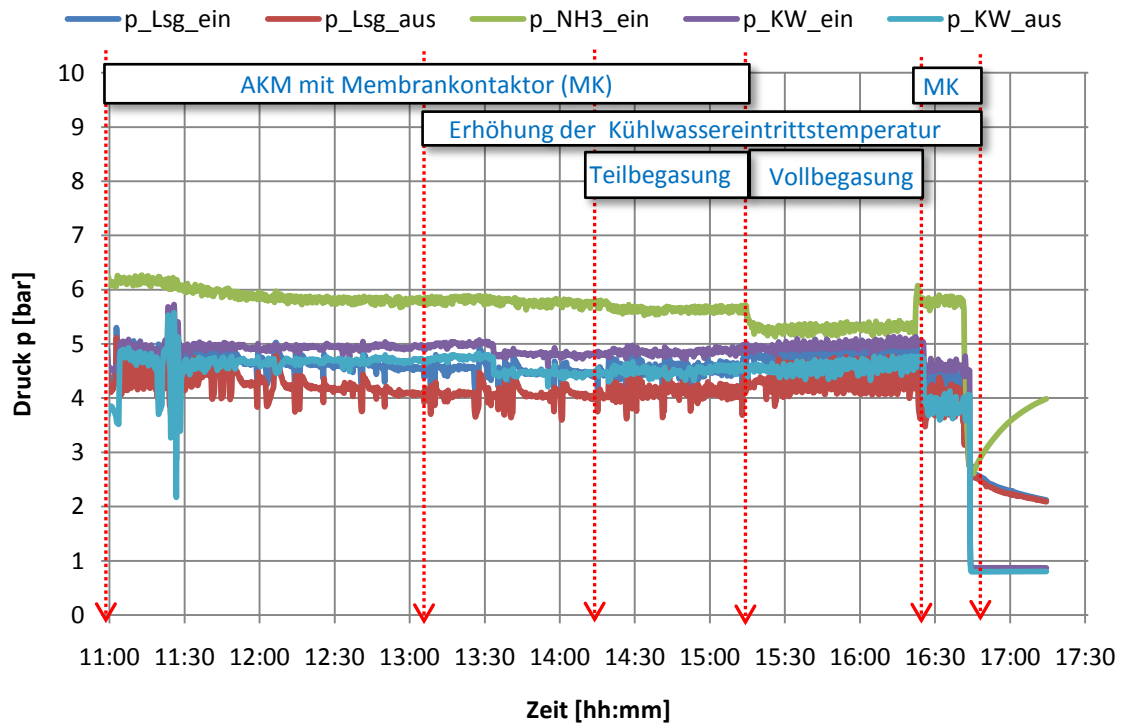


Abbildung 9.5: Druckverläufe am Ein- und Austritt der simultangekühlten Membranabsorber in Kombination mit AKM, MK Typ Makatec Nr. 36, Test mit einem Modul, Lösung und Kühlwasser im Gegenstrom

Konzentrationsverläufe am Ein- und Austritt der MK Nr. 36

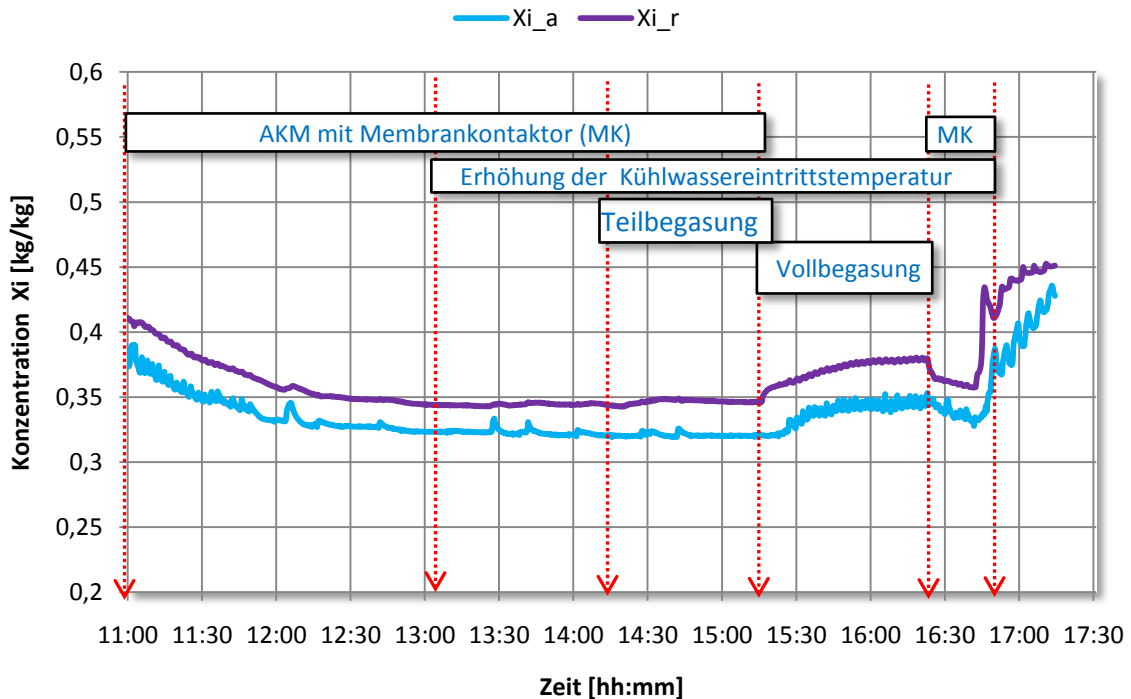


Abbildung 9.6: Konzentrationsverläufe am Ein- und Austritt der simultangekühlten Membranabsorber in Kombination mit AKM, MK Typ Makatec Nr. 36, Test mit einem Modul, Lösung und Kühlwasser in Gegenstrom

Ein Grund für dieses Phänomen könnte sein, dass die Gasrücklaufströmung ähnlich einer „sweep-Strömung“ bei einer „sweep gas membrane distillation SGMD“ fungieren könnte, und eine Desorption der Lösung durch das sweep gas fördert. Allerdings müsste dann eine Erklärung für die insgesamt positive Absorberleistung gefunden werden. Es ist nicht auszuschließen, dass hier gleichzeitig mehrere Effekte für- und gegeneinander wirken.

Eine Problematik ist auch, dass derzeit noch nicht klar definiert werden kann, wo und wann der Flüssigkeitsdurchschlag erfolgt. Es fehlen grundlegende Untersuchungen zu Durchschlagsdrücken für Ammoniak-Wasser an unterschiedlichen Membrantypen. Dies könnte zukünftig separat an einem vereinfachten Prüfstand untersucht werden.

Im Laufe der Messungen betrug die Konzentrationsanreicherung ca. 0,025 kg/kg, die kleiner als im Vollastlauf der AKM ist. Dieser liegt bei ca. 0,05 kg/kg. Die Kurve zeigt auch zu Beginn des Betriebes mit dem Membranabsorber eine Erniedrigung der mittleren Konzentration der Lösung.

Der COP Verlauf der Anlage wird in Abbildung 9.7 gezeigt. Der Betrieb mit MaMeKo ergab einen COP von ca. 0,3. Die höheren Werte des COPs bei der Teil- und Vollbegasung können nicht unbedingt auf eine bessere Absorption im MaMeKo bei der Begasung zurückgeführt werden, da die Möglichkeit besteht, dass ein Teil der Absorption erst nach der MK und hauptsächlich im Lösungssammler stattfindet.

Außerdem muss der weitaus kleinere Druckverlust bei direkter Eingabe des Ammoniakgases in die Lösung in Betracht gezogen werden. Auch dies kann als Ansatz der weiteren Untersuchungen zur Membranabsorber und Vergleich mit den konventionellen Absorptionsprozessen genutzt werden.

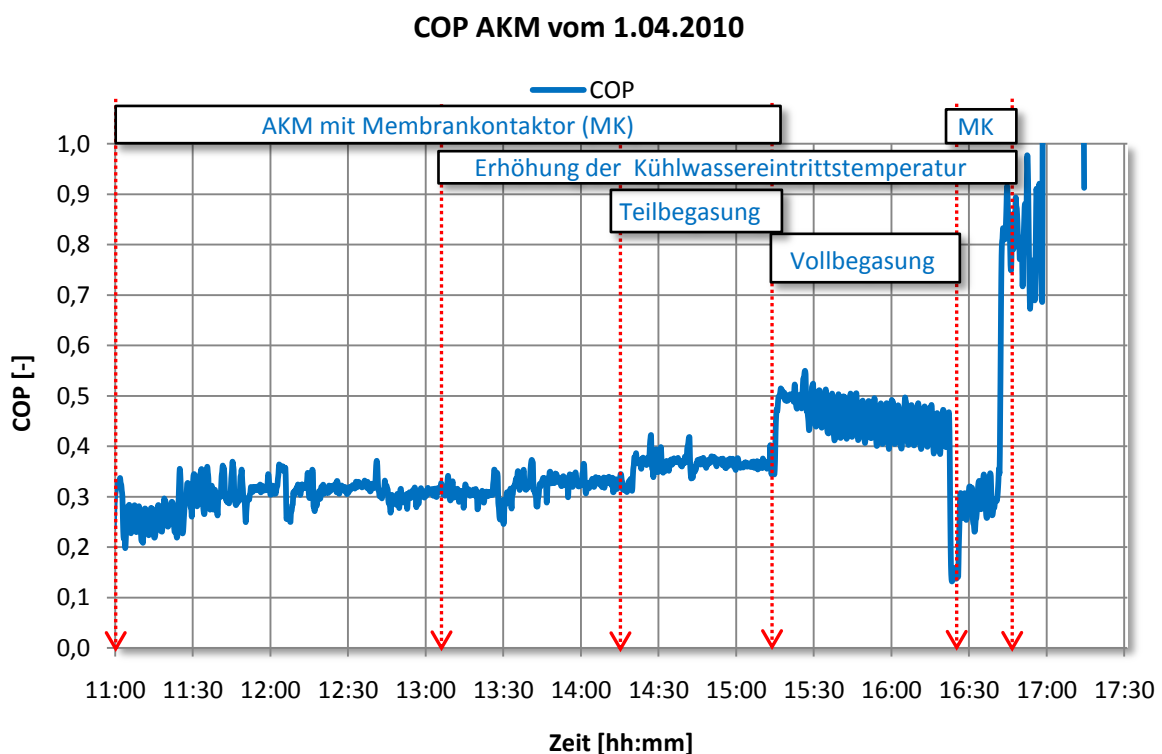


Abbildung 9.7: COP der AKM in Kombination mit simultangekühltem Membranabsorber
MK Typ Makatec Nu. 36, Test mit ein Modul, Lösung und Kühlwasser in Gegenstrom

10. Modellierung Membrankontaktoren

Für die adiabatischen bzw. vorgekühlten Membranabsorber (Typ BEKO) wurde von Marti Calatayud (2009) an der TU-Berlin ein Modell entwickelt, womit die Absorptionsleistung über die Länge des Membrankontaktors simuliert wurde, [10].

Weiterhin wurden an der TU-Berlin auch für simultangekühlte Membranabsorber (Typ Makatec) von Piper (2009) mehrere Modelle entwickelt, die die Berechnung von Absorberleistung und Druckverlust für den Gleich- und Gegenstrom (Lösung zu Kühlwasser) an jedem Punkt der Membranabsorber ermöglichen, [11]. Dieses Programm wurde später für Kreuzstrom erweitert. Die Hohlfasern sind bei allen Strömungszuständen im Kreuzstrom zur Lösung positioniert. Die Beschreibung des Modells findet sich im Anhang Modell Membranabsorption.

10.1 Simulationsergebnisse

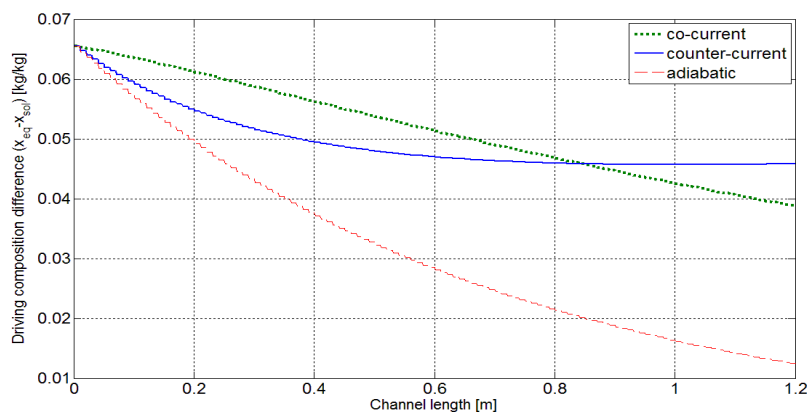


Abbildung 10.1: Vergleich des Konzentrationsdifferenzverlaufs bezogen auf die Länge des MK für Gleich- und Gegenstrom simultangekühlte Membranabsorber und adiabatische Absorption
x_{eq}: Phasengleichgewichtskonzentration

Abbildung 10.1 zeigt die Konzentrationsdifferenzenverläufe als Ursache der Absorptionsleistung. Bis zu einer Kanallänge von ca. 0,85m ist die Konzentrationsdifferenz im Gleichstrom höher als im Gegenstrom, und erst danach wird der Gegenstrom besser. Dies ist ein Resultat der besseren Kühlung am Anfang der Kanallänge, wo auch die Konzentrationsdifferenzen sehr hoch sind. Bei der adiabatischen Variante (nicht gekühlte Variante der simultangekühlten MK) fällt die Kurve stark ab, deshalb hat es auch die niedrigste Leistung.

Sollten also längere Kanäle geplant werden, ist Gegenstrom besser als Gleichstrom.

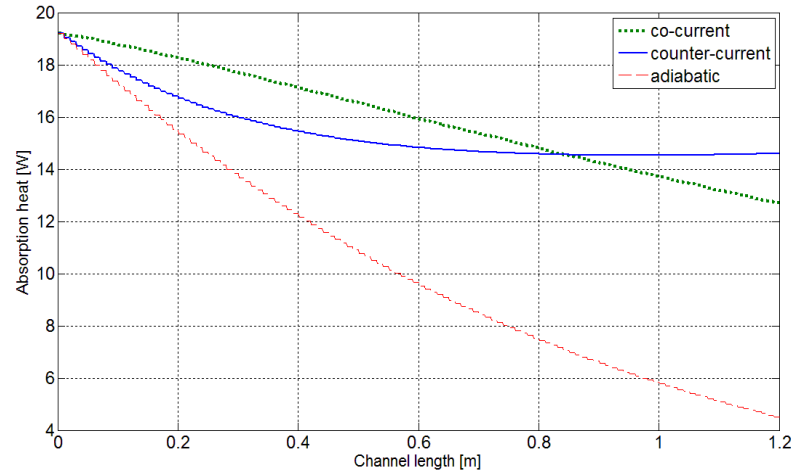


Abbildung 10.2: Vergleich der Verlauf der Absorptionswärme in Bezug auf die Länge der MK
 für Gleich- und Gegenstrom simultangekühlte Membranabsorber und adiabatische Absorption
 die Absorptionsleistung bezieht sich hier auf jedes der einzelnen Lumen

Der Verlauf der Absorptionswärme in Abbildung 10.2 zeigt einen ähnlichen Verlauf wie die Konzentrationsdifferenz. Gleichstrom hat die höchste Absorptionsleistung, der dann durch Gegenstrom und am Schluss durch adiabatische Absorption gefolgt wird.

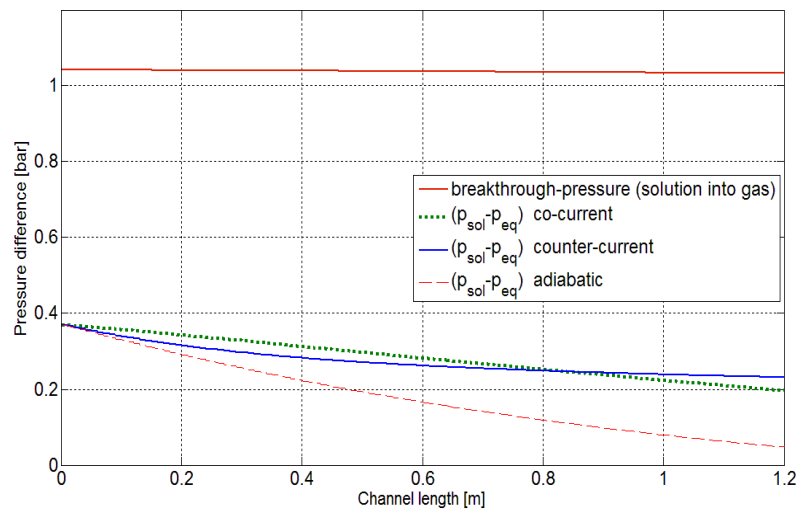


Abbildung 10.3: Druckdifferenzverläufe in Phasengrenze bezogen auf die Länge Absorber
 für Gleich- und Gegenstrom simultangekühlte Membranabsorber und adiabatische Absorption
 P_{eq} : Transmembraner Druck

Den Druckdifferenzverlauf an der Phasengrenze zeigt Abbildung 10.3, ebenso den Durchschlagdruckverlauf von der Lösung in der Gasseite. Allerdings wurden auch hier viele Annahmen für die Berechnung des Durchschlagsdrucks gemacht, wobei einigen Annahmen (wie z.B. Benetzungswinkel in den Poren oder der Verlauf der Porendurchmesser) noch nähere Untersuchung benötigen. Die simulierten Druckdifferenzen an der Phasengrenzfläche zeigen, dass an keinem Punkt der MK, die Phasendruckdifferenz den Durchschlagdruck übersteigt. Die Druckdifferenzverläufe in der Phasengrenze in der gesamten Kanallänge der MK verhalten sich unkritisch zum Durchschlag.

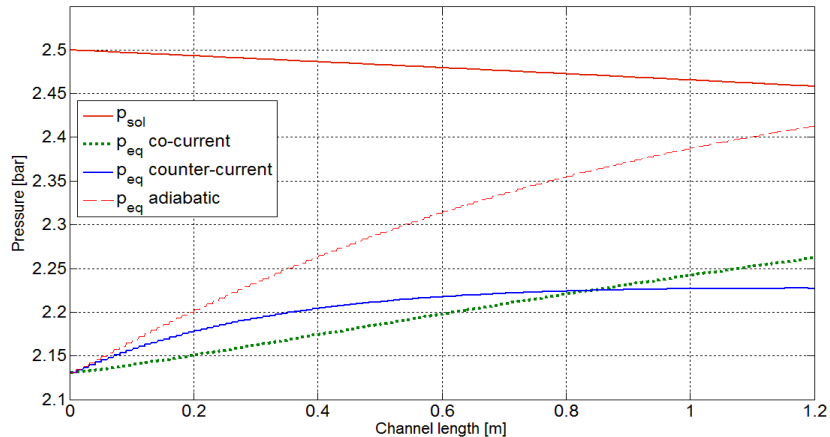


Abbildung 10.4: Druckverläufe bezogen auf die Länge der simultangekühlten Membranabsorber
für Gleich- und Gegenstrom simultangekühlte Membranabsorber und adiabatische Absorption
 p_{eq} : Transmembraner Druck, p_{ad} : Transmembraner Druckverlauf adiabatische Absorption

Abbildung 10.4 zeigt den Druckverlauf im Lösungskanal im Vergleich zum transmembranen Druckverlauf im Gleich- und Gegenstrom, aber auch für den adiabatischen (nicht gekühlten) Fall. Der transmembrane Druck im adiabatischen Fall nähert sich am schnellsten dem Lösungsdruck an, somit wird es auch da viel schneller zu einem Durchschlag kommen. Der transmembrane Druck im Gleichstrom ist im größten Teil der Kanallänge kleiner als im Gegenstrom und somit weiter entfernt von einem Durchschlag, der auf die bessere Kühlung am Anfang des Kanals bei Gleichstrom zurückzuführen ist.

11. Auslegung der Resorptionskälteanlage

In Abbildung 11.1 ist die Benennung der Stoffströme zwischen den einzelnen Apparaten für die Auslegungsrechnung der Resorptionskälteanlage dargestellt:

Die Berechnung der Wärmemengen, Masseströme, Temperaturen, Drücke und Konzentrationen erfolgt mit einem von Makatec speziell für die Anlage entwickelten Simulationsprogramm.

Vorgegeben werden dabei die für die jeweilige Anwendung gewünschten Temperaturen: Nutztemperatur T_{nutz} (Pos. Ex7), minimale Temperatur nach dem kalten Desorber T_{min} (Pos. 10) und Absorptionstemperatur T_{amb} (mit dem Kühlwasserstrom einstellbar, Pos. 7, 16). Weiterhin wird der minimale Druck p_{min} (Pos. 9 – 12, 15, 16, MIX) im kalten HKL und der pinch point ΔT_{WT} der LWTs festgelegt. Mit der Vorgabe, dass der Stoffstrom durch die beiden Pumpen gleich groß ist und der kalte Gasmassenstrom (Pos.11) 1 kg beträgt, ist das System nun analytisch berechenbar.

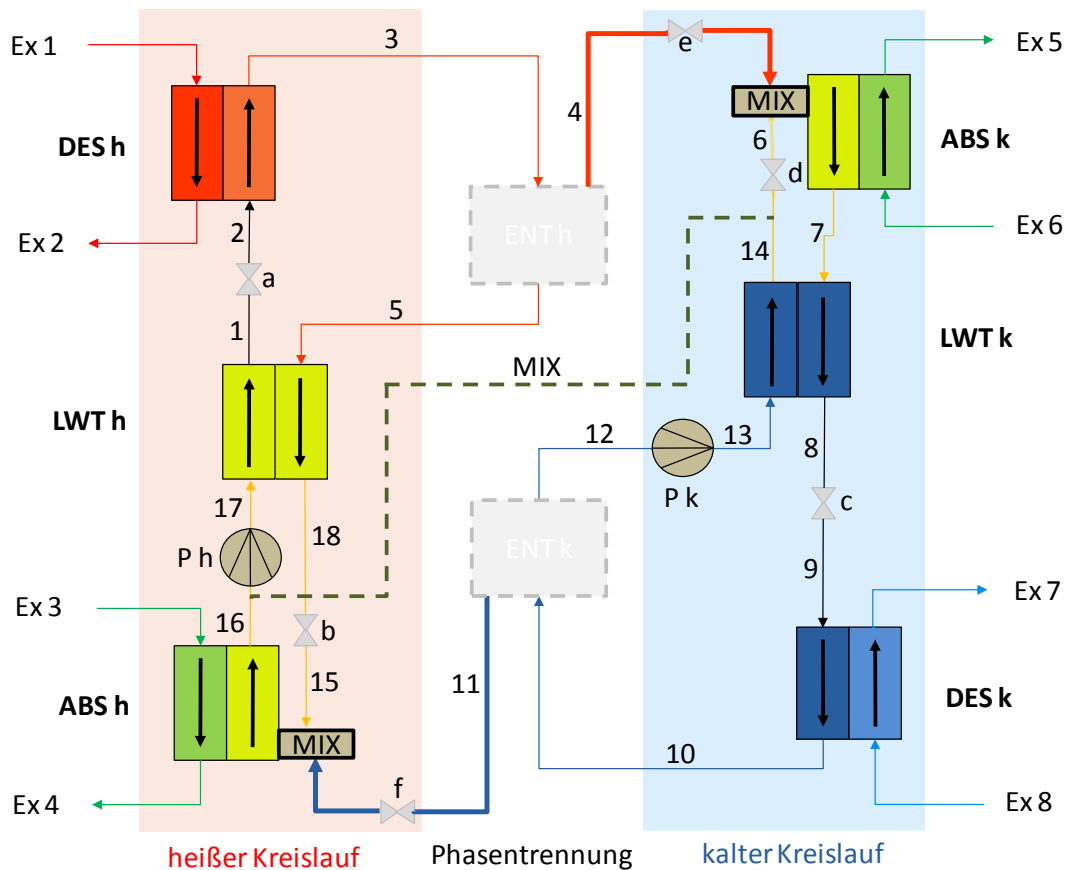


Abbildung 11.1: Benennung der fließenden Ströme in der Anlage

Durch die Gleichgewichtsbedingungen werden zuerst die Konzentrationen im kalten HKL berechnet - der ammoniakreichsten Lösung $x_{max} = f(p_{min}, T_{min})$ (Pos. 7, 8, 9, 10) und dx_{max} über $x_{min_kalt} = f(p_{min}, T_{nutz})$ Pos. 12, 13, 14, 6). Im kalten Absorber kann dann auch als Funktion von Konzentration und Temperatur der maximale Druck p_{max} (Pos. 1 – 8, 13, 14, 17, 18) ermittelt werden. Mit der Programmvorgabe von 1 kg kaltem Gas kann der umlaufende Lösungsassenstrom bestimmt werden.

Auch die Konzentration im heißen HKL $x_{max,heiss}$ (Pos.: 1,2, 16, 17) kann über p_{min} und T_{amb} bestimmt werden. Mit der 1 kg-kalter Gasmassenstrom-Vorgabe und der Annahme gleicher Massenströme der Lösungen in beiden Kreisläufen, ist dx_{min} und damit x_{min} (Pos. 5, 15, 18) bestimmbar. T ist auch die maximale Desorptionstemperatur, also die Heiztemperatur T_{heiz} (Pos. 3) mit $T_{heiz} = f(p_{max}, x_{min})$.

11.1 Berechnung der internen Massenströme

Das Berechnen der Massenströme erfolgt durch Lösung von Massenbilanzgleichungen um geschickt gewählte Bilanzräume. Dazu ist es zunächst notwendig, einen Massenstrom vorzugeben, auf den sich dann alle anderen beziehen. Dies ist in aller Regel der kalte Gasstrom, der durch die gewünschte Kälteleistung bekannt ist.

Zur Berechnung von Gasstrom und Mixstrom werden die beiden Halbkreisläufe als Bilanzraum gewählt, zwischen denen Gasströme mit der Ammoniakkonzentration „y“ ausgetauscht werden. Da die Ammoniakgasströme trotz Entgase-Behälter einen geringen Wasseranteil aufweisen und somit die Konzentration „y“ der beiden Ströme verschieden ist, wird zusätzlich ein flüssiger Mixstrom von heiß nach kalt geschaltet (siehe Abbildung 11.1). Dieser sorgt dafür, dass die Wasserkonzentration in den beiden Kreisläufen konstant bleibt.

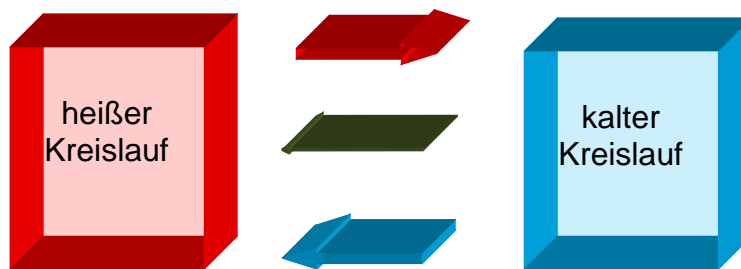


Abbildung 11.2: Bilanzraum Gasströme

Für die Massenbilanz gilt dann:

Und für die Komponentenbilanz:

Mit den bekannten Temperaturen in den Desorbern und den Konzentrationen y aus der Zustandsgleichung lässt sich jetzt \dot{m}_g und \dot{m}_l je kg kaltem Gas ermitteln.

Ähnlich wie bei Gas- und Mixstrom wird zur Berechnung der umlaufenden Lösungsmittelströme ein geeigneter Bilanzraum gewählt, in dem zunächst der umlaufende Massenstrom in einem Halbkreislauf und eine Konzentration unbekannt sind.

In Abbildung 11.3 wurde der Bilanzraum zum Beispiel um den kalten Desorber und LWT gelegt. Mit den Zustandsgleichungen, der Massen- und der Komponentenbilanz lässt sich dann der gewünschte Massenstrom berechnen.

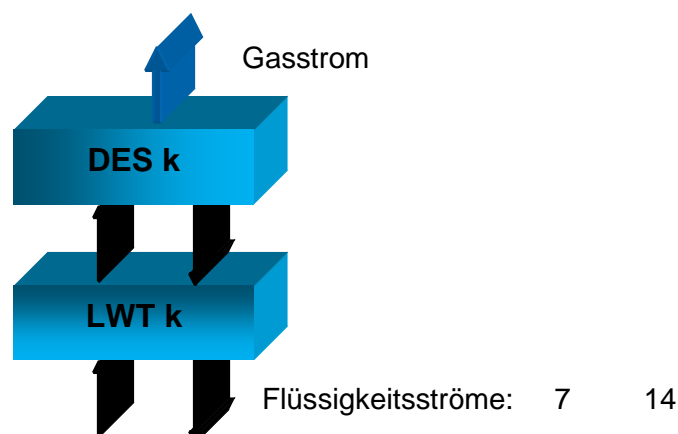


Abbildung 11.3: Bilanzraum für umlaufende Masseströme

11.2 COP Berechnung

Um den Einfluss des minimalen Systemdruckes auf den COP aufzuzeigen wurde folgendes Referenzszenario gewählt:

- Umgebungstemperatur 293 K, die Kühlwassereintrittstemperatur liegt 5 K höher
- Nutztemperatur 273 K, d.h. ein Raum mit 278 K kann gekühlt werden
- Die minimale Temperaturdifferenz der Lösemittelwärmeübertrager beträgt 2 K

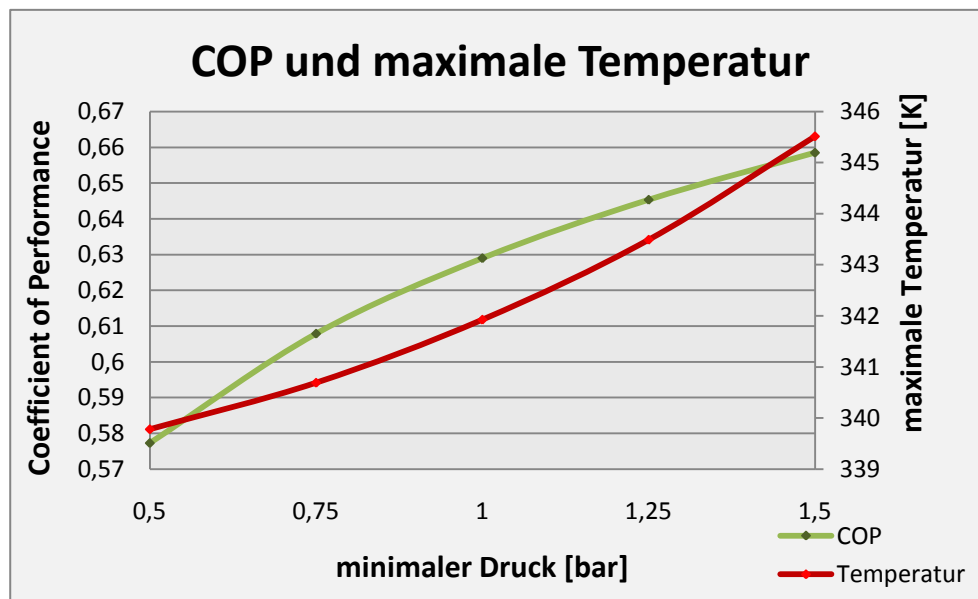


Abbildung 11.4: COP in Abhängigkeit des minimalen Systemdruckes

In

Abbildung 11.4 sind die Simulationsergebnisse für den COP und die maximale Systemtemperatur, d.h. die Austrittstemperatur der Lösung aus dem heißen Desorber dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass mit Zunahme des Drucks sowohl der COP als auch die benötigte Antriebstemperatur steigen, wobei der Anstieg des COPs mit steigendem Druck geringer wird, und der Anstieg der benötigten Antriebstemperatur zunimmt. Diese qualitative Aussage ist auch für andere Randbedingungen, d.h. Nutz- und Umgebungstemperaturen gültig.

In

Abbildung 11.5 ist zudem der korrespondierende maximale Systemdruck und die maximale Konzentration der Lösung als Funktion des minimalen Systemdruckes aufgeführt.

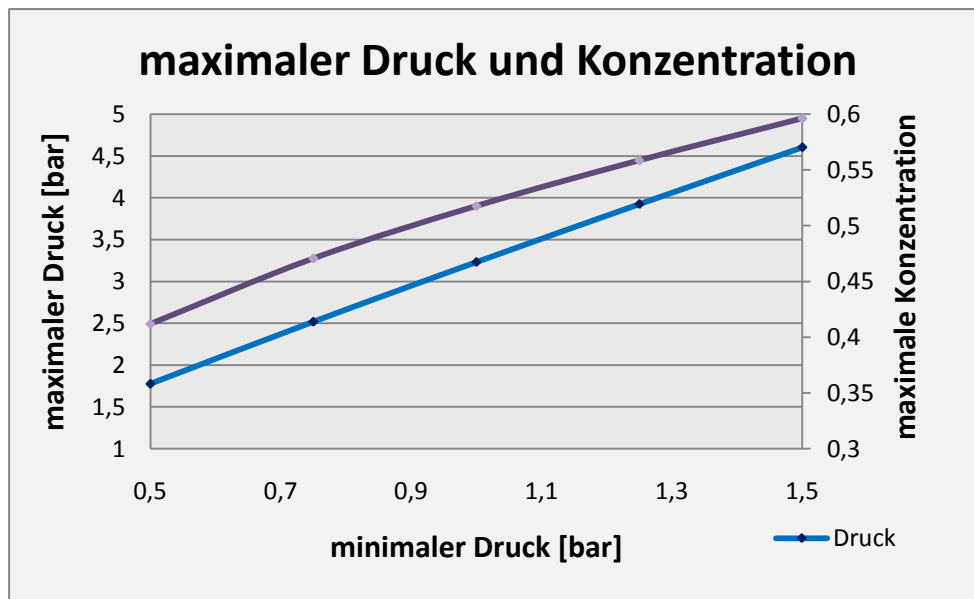


Abbildung 11.5: maximaler Systemdruck und Konzentration

Auch hier ist eine deutliche Zunahme beider Werte mit dem minimalen Systemdruck zu erkennen. Mit der fundamentalen Annahme, dass ein maximaler COP im Falle der Abwärmenutzung nicht die höchste Priorität genießt, kann geschlossen werden, dass eine Reduzierung des minimalen Systemdrucks

- die benötigte Antriebstemperatur reduziert,
- die Ammoniakmenge im System reduziert,
- den maximalen Systemdruck und damit die Wanddicke der Apparate reduziert
- die benötigte Pumpenleistung als Funktion der Förderhöhe reduziert (in Abbildung 3 ca. 13 m bei 0,5 bar und ca. 30 m bei 1,5 bar).

Aus diesen Gründen wird für die Auslegung ein Systemdruck von 0,7 bar im kalten Desorber fest vorgegeben.

11.3 Einfluss der Lösemittelwärmeübertrager auf den COP

Die Qualität des eingesetzten Lösemittelwärmeübertrager hat einen entscheidenden Einfluss auf die Leistungsfähigkeit sowohl von Resorptionsanlagen als auch von konventionellen Absorptionsanlagen. Dieser Zusammenhang ist für die oben genannten Randbedingungen und den Systemdruck von 0,7 bar in Abbildung 11.6 dargestellt.

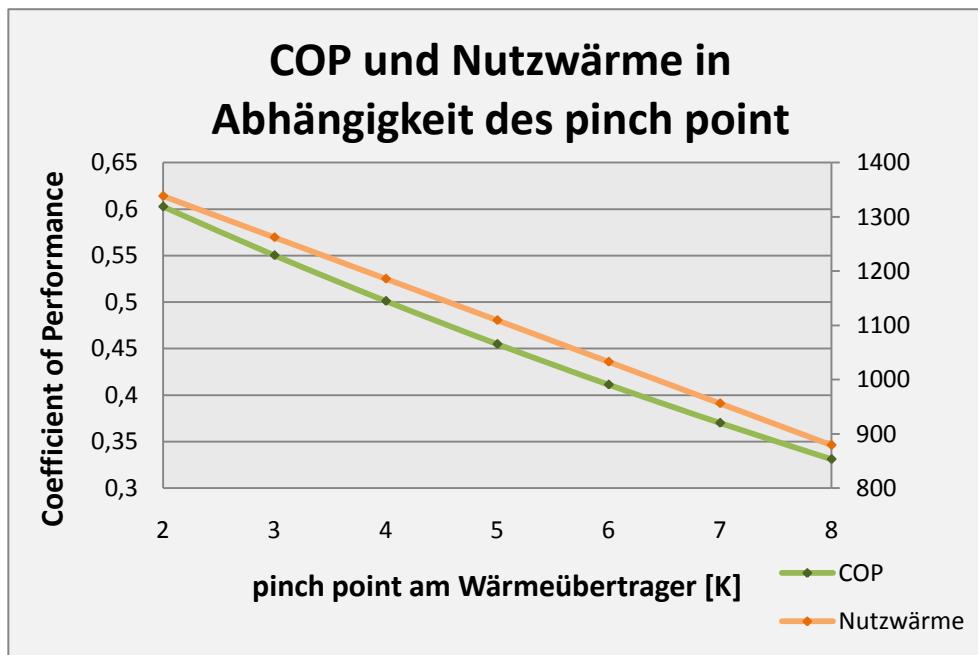


Abbildung 11.6: COP und Nutzwärme in Abhängigkeit des pinch point

Hierbei ist die Nutzwärme die erzeugte Wärme je kg erzeugtem kaltem Gas. Da sich die Massenströme im Wärmeübertrager unterscheiden (vom Desorber fließt ein um den ausgetriebenen Gasmassenstrom reduzierter Flüssigkeitsstrom zurück) gibt es eine veränderliche Temperaturdifferenz im Lösemittelwärmeübertrager, wobei die geringste Temperaturdifferenz (der sogenannte pinch point) auf dessen Absorberseite liegt.

Es kann festgestellt werden, dass ein falsch ausgelegter Lösemittelwärmeübertrager sowohl die Leistung (jedes zusätzliche Kelvin Temperaturdifferenz reduziert den COP um über 4 %) als auch das benötigte Bauvolumen einer Resorptionsanlage sehr stark beeinträchtigt. Hierbei ist zusätzlich zu beachten, dass Messwerte für Wasser nicht auf einen Lösemittelwärmeübertrager mit $\text{NH}_3 - \text{H}_2\text{O}$ Mischungen übertragbar sind. Vergleicht man

Abbildung 11.4 und

Abbildung 11.6, so kann festgestellt werden, dass ein gut funktionierender Lösemittelwärmeübertrager einen wesentlich größeren Einfluss auf den COP der Anlage ausübt, als der Systemdruck am kalten Desorber.

Aus Kostengründen (reduzierte Apparatkosten bei geringerem Flächenbedarf) wird bei der Auslegung der Lösemittelwärmeübertrager ein pinch point von 5 K zugrundegelegt.

11.4 Beispielhafte Auslegung einer Resorptionskälteanlage

Der Auslegungspunkt der Anlage wurde auf einen guten COP bei wirtschaftlich vertretbaren Apparatkosten optimiert. Der Berechnung mittels dem Makatec-eigenem Simulationsprogramm wurden die bereits oben genannten Randbedingungen zugrunde gelegt:

Bei der Vorgabe verschiedener Kälteleistungen ergeben sich folgende, in Tabelle 11.1 dargestellten Wärme- und Masseströme:

Tabelle 11.1: Wärme- und Masseströme bei verschiedenen Kälteleistungen

| Auslegungspunkt: Kälteleistung | | 15 | 30 | 50 | |
|---------------------------------------|---|--------|--------|-------|------|
| Wärmeströme | Heizwärme | 27,0 | 54,1 | 90,1 | kW |
| | Abwärme kalter Absorber | 20,3 | 40,7 | 67,8 | |
| | Abwärme heißer Absorber | 21,7 | 43,4 | 72,3 | |
| | Kalter Wärmeübertrager | 24,7 | 49,4 | 123,7 | |
| | Heißer Wärmeübertrager | 37,1 | 74,2 | 82,3 | |
| Masseströme | Kalter Gasmassenstrom | 0,011 | 0,023 | 0,043 | kg/s |
| | Heißer Gasmassenstrom | 0,0097 | 0,019 | 0,037 | |
| | Mixstrom | 0,0016 | 0,0033 | 0,006 | |
| | Massenstrom aus heißem Desorber = Massenstrom in heißen Absorber | 0,17 | 0,35 | 0,58 | |
| | Massenstrom aus kaltem Absorber = Massenstrom in kalten Desorber | 0,19 | 0,39 | 0,65 | |
| | Massenstrom aus heißem Absorber = Massenstrom in heißen Desorber | 0,18 | 0,37 | 0,61 | |
| | Massenstrom aus kaltem Desorber = Massenstrom in kalten Absorber | 0,18 | 0,37 | 0,61 | |

Wie in Tabelle 11.2 am Beispiel einer Kälteanlage mit 100 kW Wärmezufuhr zu sehen ist, verringern sich mit steigender Temperaturdifferenz am pinch point der Lösemittelwärmetauscher die Kälteleistung deutlich und die Massenströme in der Anlage unwesentlich. Der COP verschlechtert sich bei 5 K Temperaturdifferenz am pinch point auf 0,4209 gegenüber 0,5548 bei einer 2 K Temperaturdifferenz am pinch point.

Zur Kühlung der Apparate und als Wärmeträgermedium steht zumeist Wasser zur Verfügung. Für den hier betrachteten Bereich wird eine konstante Wärmekapazität von $c_p = 4,18 \text{ kJ/kgK}$ angenommen. Zum Beheizen des heißen Desorbers wird Thermo-Öl mit einem c_p von ca. 3 kJ/kgK genutzt.

Die treibende Temperaturdifferenz der Wärmeübertragung (der Schlupf) des kalten Desorbers ist so gering wie möglich zu halten, um Kapazitätseinbußen durch höhere KW-Temperaturen bzw. geringeren Heiztemperaturen entgegen zu wirken. Er wird daher auf 3 K festgelegt, wohingegen bei den anderen Apparaten ein Schlupf von 5 K zugelassen wird.

Tabelle 11.2: Wärme- und Masseströme bei verschiedenem pinch point

| Pinch point an den LWT's | | 2 | 5 | K |
|--------------------------|---------------|------|------|----|
| Wärmeströme | Kälteleistung | 55,5 | 42,1 | kW |

| | | | | |
|-------------|--|--------|--------|------|
| | Heizwärme | 100 | 100 | |
| | Abwärme kalter Absorber | 75,2 | 60,3 | |
| | Abwärme heißer Absorber | 80,2 | 81,8 | |
| | Kalter Wärmeübertrager | 91,3 | 74,9 | |
| | Heißer Wärmeübertrager | 137,3 | 117,5 | |
| Masseströme | Kalter Gasmassenstrom | 0,048 | 0,044 | kg/s |
| | Heißer Gasmassenstrom | 0,042 | 0,038 | |
| | Mixstrom | 0,0062 | 0,0057 | |
| | Massenstrom aus heißem Desorber = Massenstrom in heißen Absorber | 0,64 | 0,59 | |
| | Massenstrom aus kaltem Absorber = Massenstrom in kalten Desorber | 0,72 | 0,67 | |
| | Massenstrom aus heißem Absorber = Massenstrom in heißen Desorber | 0,68 | 0,62 | |
| | Massenstrom aus kaltem Desorber = Massenstrom in kalten Absorber | 0,68 | 0,62 | |

Für die Anlage mit 100 kW Wärmezufuhr (und der 5 K pinch point Variante) ergeben sich somit DIE IN Tabelle 11.3 dargestellten externe Massenströme:

Tabelle 11.3: Übersicht externe Wasserströme

| Strom | | [K] | [K] | — | Schlupf [K] |
|-------|-------|-----|-------|-----|-------------|
| DES h | 100,0 | 357 | 350 | 3,3 | 5 |
| DES k | 42,1 | 276 | 271 | 2,0 | 3 |
| ABS h | 81,8 | 298 | 307,2 | 2,1 | 5 |
| ABS k | 117,5 | 298 | 303,5 | 2,6 | 5 |

Um ein Vereisen des kalten Desorbers zu verhindern, wird ein Wasser-Glykol-Gemisch als Wärmeträgermedium verwendet. Dadurch verschlechtern sich der Wärmeübergang im Apparat sowie die Wärmekapazität des Gemisches. Es wird eine größere Wärmeübertragungsfläche notwendig um die Kühlleistung bei gleichen Massenströmen konstant zu halten.

In Tabelle 11.4 sind mit den Bezeichnungen aus Abbildung 11.1 alle theoretisch berechneten Zustandspunkte in der Anlage aufgeführt.

Tabelle 11.4: Zustandspunkte in der Anlage, theoretisch

| Nr. | Beschreibung | Massestr. [kg/s] | Druck [bar] | Temp. [K] | Konzentration x/y |
|-----|-----------------------|------------------|-------------|-----------|-------------------|
| 1 | reiche Lös. aus LWT h | 0,63 | 2,85 | 341,03 | 0,25 |

| | | | | | |
|-----|---|--------|------|--------|------|
| 2 | reiche Lös. in DES h | 0,63 | 2,85 | 341,03 | 0,25 |
| 3 | 2 Phasen aus DES h | 0,63 | 2,85 | 352,13 | --- |
| 4 | NH ₃ -Gas aus ENT h | 0,04 | 2,83 | 352,13 | 0,92 |
| 5 | arme Lös. aus ENT h | 0,59 | 2,83 | 352,1 | 0,20 |
| 6 | arme Lös. in ABS k | 0,62 | 2,83 | 298,63 | 0,42 |
| 7 | reiche Lös. aus ABS k | 0,66 | 2,83 | 303 | 0,46 |
| 8 | reiche Lös aus LWT k | 0,66 | 2,83 | 278 | 0,46 |
| 9 | Reiche Lös. in DES k | 0,66 | 0,7 | 268 | 0,46 |
| 10 | 2 Phasen aus DES k | 0,66 | 0,7 | 273 | --- |
| 11 | NH ₃ -Gas aus ENT k | 0,039 | 0,7 | 273 | 0,99 |
| 12 | arme Lös. aus ENT k | 0,62 | 0,69 | 273 | 0,43 |
| 13 | arme Lös. in LWT k | 0,62 | 2,85 | 273 | 0,43 |
| 14 | arme Lös. aus LWT k | 0,62 | 2,85 | 298,63 | 0,43 |
| 15 | arme Lös. in ABS h | 0,59 | 0,69 | 305,19 | 0,20 |
| 16 | reiche Lös. aus ABS h | 0,62 | 0,69 | 303 | 0,25 |
| 17 | reiche Lös. in LWT h | 0,62 | 2,85 | 303 | 0,25 |
| 18 | arme Lös. aus LWT h | 0,59 | 2,83 | 308 | 0,20 |
| MIX | H ₂ O-Ausgleich, kalt zu heiß | 0,0057 | 0,7 | 298,63 | 0,43 |

12. Aufbau Resorptionsanlage

Die aufgebaute, kompakte Resorptionsanlage ist in Abbildung 12.1. abgebildet. Beim Aufbau der ersten kompakten Resorptionsanlage überhaupt mussten neben der Anlagenauslegung folgende Probleme gelöst werden:

- Optimierung der Apparateanordnung bezüglich Leitungslänge
- Optimierung der Eindüsung des NH₃-Gases in die Absorber
- Phasentrennung nach den Desorbern
- Lösung für das Problem des Lösungsmittelrücklaufs in die Entgasungsbehälter
- Regulierung der Flüssigkeitsströme vom Hoch- zum Niederdruckapparat



Abbildung 12.1: Prototyp Resorptionsanlage

Im Folgenden wird auf die einzelnen Probleme und Lösungen eingegangen und eine Lösung vorgestellt.

12.1 Eindüsung des NH_3 -Gasstroms in den Absorber

Ein grundlegendes Problem bei der Gaseindüsung in die Absorber besteht im großen Volumenstromunterschied von Gas ($180 \text{ m}^3/\text{h}$) und Lösung ($2,2 \text{ m}^3/\text{h}$). Trotzdem muss für eine optimale Absorption eine möglichst gleichmäßige Zweiphasenströmung zum Eintritt in den Absorber erreicht werden.

Eine Möglichkeit dafür besteht darin, den großen Gasvolumenstrom aus dem Desorber durch Membran-Röhrchen zu führen und den geringen Lösungsvolumenstrom aus dem Wärmeübertrager um die Röhrchen zu leiten, da der Gasdurchbruchdruck durch die Membran wesentlich geringer ist, als der Flüssigkeitsdurchbruchdruck.

Für eine vollständige Absorption muss dabei ausreichend Fläche zum Gasdurchgang zur Verfügung stehen. Mit der folgenden Gleichung für die benötigte Membranlänge bei vorgegebenem Druckverlust, [2]

werden die in Tabelle 12.1 und 12.2 angegebenen technischen Daten zur Berechnung der benötigten Membranlänge benötigt.

Tabelle 12.1: Membrandatenblatt

| | | Membran 1 | Membran 2 | |
|----------------|------------|----------------------|---------------------|---|
| Röhrchenradius | R | 0,01 | $0,6 \cdot 10^{-3}$ | m |
| Porenradius | R_p | $0,03 \cdot 10^{-3}$ | $0,1 \cdot 10^{-6}$ | m |
| Porenlänge | L | $3 \cdot 10^{-3}$ | $0,3 \cdot 10^{-3}$ | m |
| Tortuosität | T | 2 | 2 | - |
| Flächenfaktor | ϵ | 0,3 | 0,3 | - |

Für das Ammoniakgas gilt:

Tabelle 12.2: Stoffdaten Gaseindüsung

| | | | |
|--------------------------------------|-------------------------|------------|--------------------|
| Massestrom | m | 0,00421 | kg/s |
| Spez. Gaskonstante für NH_3 | R_{NH_3} | 0,48822666 | kJ/kgK |
| Dynamische Viskosität | η | 0,00001064 | N/m ² s |
| Gasdruck in der Membran | $p_{\text{Gas,GG}}$ | 100000 | N/m ² |
| Gasdruck im Bulk | $p_{\text{Gas},\infty}$ | 105000 | N/m ² |
| Temperatur | T | 313 | K |

Dieses Modell ist in der Praxis allerdings bisher nur bedingt einsetzbar. Messungen mit Membran 2 haben ergeben, dass teilweise erhebliche Unterschiede zwischen Modell und Realität auftreten (Tabelle 12.3 :

Tabelle 12.3 : Vergleich Membraneindüsung Modell und Messung

| Volumenstrom [l/s] | Druckverlust [mbar] | Membranlänge nach Modell [m] | Membranlänge bei der Messung [m] |
|--------------------|---------------------|------------------------------|----------------------------------|
| 1 | 16 | 22 | 1 |
| 2 | 40 | 18 | 1 |
| 3 | 145 | 7 | 1 |

Der Fehler wird bisher in den vielen Modellannahmen sowie in der Ungenauigkeit der Messapparatur gesehen. Allerdings lässt die starke Schwankung der Abweichungen keinen Schluss auf einen systematischen Fehler zu. Zur Sicherheit wird also eine doppelt so hohe Membranzahl, wie im Modell berechnet, eingebaut. Dies verringert im besten Fall nur den Druckverlust über der Membran.

Lösung zur Eindüsung in der Anlage

Zur Gaseindüsung wurden Membranen aus chemisch resistentem Polyethylen (PE) mit einer Porengröße im Bereich von 30 μm mittels Epoxidharz in ein Doppelnippel-Fitting eingegossen.

Die Membranröhrchen sind hydrophob, d.h. der Gasdurchbruchdruck ist geringer als der Flüssigkeitsdurchbruchdruck. Das durch die Röhrchen geleitete NH_3 -Gas strömt deshalb durch die Poren in die Flüssigkeit.

Baut man die Membranröhrchen in Flüssigkeitsrichtung ein, d.h. die Poren stehen senkrecht zu Strömungsrichtung, entsteht eine gleichmäßige Zweiphasenströmung aus armer Lösung und NH_3 -Gasbläschen. Diese Zweiphasenströmung wird in den Wärmeübertrager geleitet, wo eine Kühlung erfolgt und somit die Absorption möglich ist.

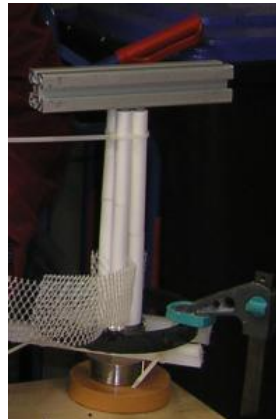


Abbildung 12.2: Membranröhrchen während des Gussvorganges

12.2 Phasentrennung nach dem Desorber

Neben der Eindüsung vom Gas in den Absorber ist auch das Trennen der Zweiphasenströmung nach dem Desorber ein grundlegendes Problem, das auf verschiedene Weise gelöst werden kann. Es wurden mehrere Wege ausprobiert, die im Folgenden vorgestellt werden.

Zyklonlösung

Im Zyklon findet klassisch eine Tröpfchenabscheidung durch Rotation statt. Ein Hydrozyklon ist ein Fliehkraftabscheider für Flüssiggemische und wird gewöhnlich zum trennen von Emulsionen oder zur Feststoffabscheidung aus Flüssigkeiten genutzt. Dies funktioniert prinzipiell wie in der folgenden Abbildung:

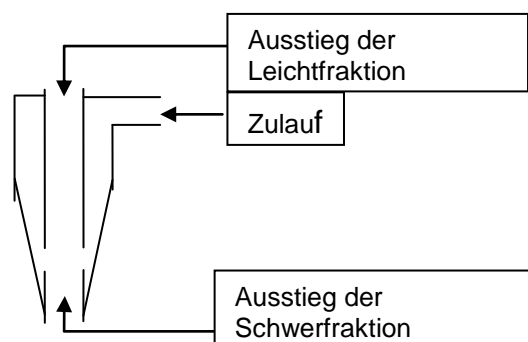


Abbildung 12.3: Prinzip Hydrozyklon

Dabei stellt das Gas die Leichtfraktion und die Lösung die Schwerfraktion dar. Aufgrund des hohen Flüssigkeitsanteils in der Zweiphasenströmung nach dem Desorber wird diese Methode zur Phasentrennung für diese Anwendung von Fachfirmen eigentlich nicht empfohlen. Allerdings konnte in dem Prototypen ein Standardzyklon überaus erfolgreich zur Phasentrennung nach dem heißen Desorber eingesetzt werden.

Abscheidebehälter

Mit Abscheidungsbehältern kann ebenfalls zur Phasentrennung nach den Desorbern gearbeitet werden, da sie eine sehr einfache und vergleichsweise kostengünstige Lösung bieten. Dabei wird in einen Behälter zur Prallabscheidung ein zylindrisches Gitter oder eine Membran eingebracht.

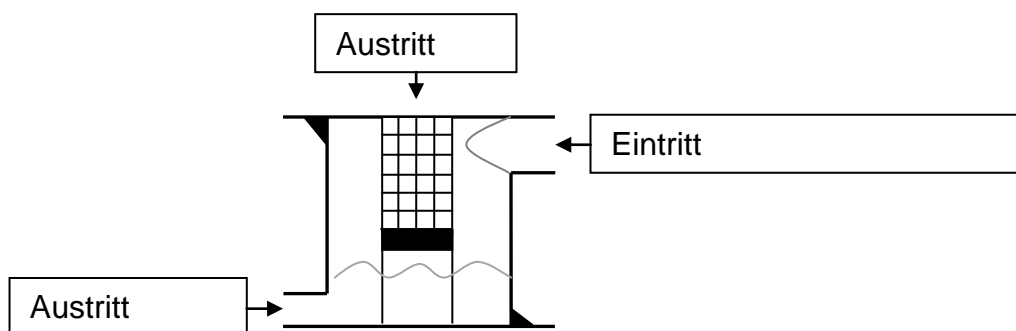


Abbildung 12.4: Skizze Phasentrennung

Die Zweiphasenströmung prallt an das Gitter. Das Gas kann durch die kleine Netzgröße nach oben entweichen und die Flüssigkeit sammelt sich im Behälter. Dieser, in Abbildung 12.4 dargestellte Behälter kann so dimensioniert werden, dass nur minimale Druckverluste auftreten. Er wird daher zur Phasentrennung bei geringen Absolutdrücken nach dem kalten Desorber eingesetzt.

Das Volumen der Abscheidungsbehälter wurde so groß gestaltet, dass sie im Notfall die gesamte Lösungsmenge aus den Apparaten aufnehmen können. Dies bietet Sicherheit für den Fall, dass ein oder mehrere Apparat gleichzeitig ausgetauscht werden müssen. Die Anlage muss dann nicht komplett entleert werden, sondern die enthaltene Ammoniaklösung kann in die Behälter abfließen und der jeweilige Apparat kann bereits entleert ausgebaut werden.

12.3 Messtechnik und Steuerung

Die aufgebaute Versuchsanlage wird mit einer SPS angesteuert, mit der alle Messdaten (Drücke, Temperaturen, Volumenströme) elektronisch ausgelesen sowie Pumpen und Ventile geregelt werden können.

Um die Zustandspunkte in der Anlage zu messen werden folgende Messarmaturen eingebaut:

- PT100 Temperaturfühler: an allen Ein- und Austritten der LWTs, Absorber und Desorber (Positionen nach Abbildung 11.1: Ex1-Ex8, 1, 5, 7, 8, 13, 14, 17, 18)
- Volumenstrommesser BAMO: jeweils nach der Pumpe (Positionen nach Abbildung 11.1: 13, 17)
Der BAMO funktioniert nach dem Prinzip der Impulsmessung. Damit ist auch bei eventuellen Ausgasungen noch eine fehlerfreie Volumenstrombestimmung möglich.
- Manometer: hinter den Pumpen und an den Entgasungsbehältern (Positionen nach Abbildung 11.1: 4, 11, 13, 17)

Neben den elektronisch auslesbaren Drucksensoren werden manuelle Barometer an den Entgasungsbehältern angebracht, um auch im Ruhezustand der Anlage direkt den Druckzustand zu erkennen. Dies dient zur Sicherheit aller Arbeiter am Standort. Abbildung 12.5 zeigt die SPS für die kleine 5kW-Anlage, die zukünftig für die kommerziell vertriebenen Anlagen verwendet werden soll.

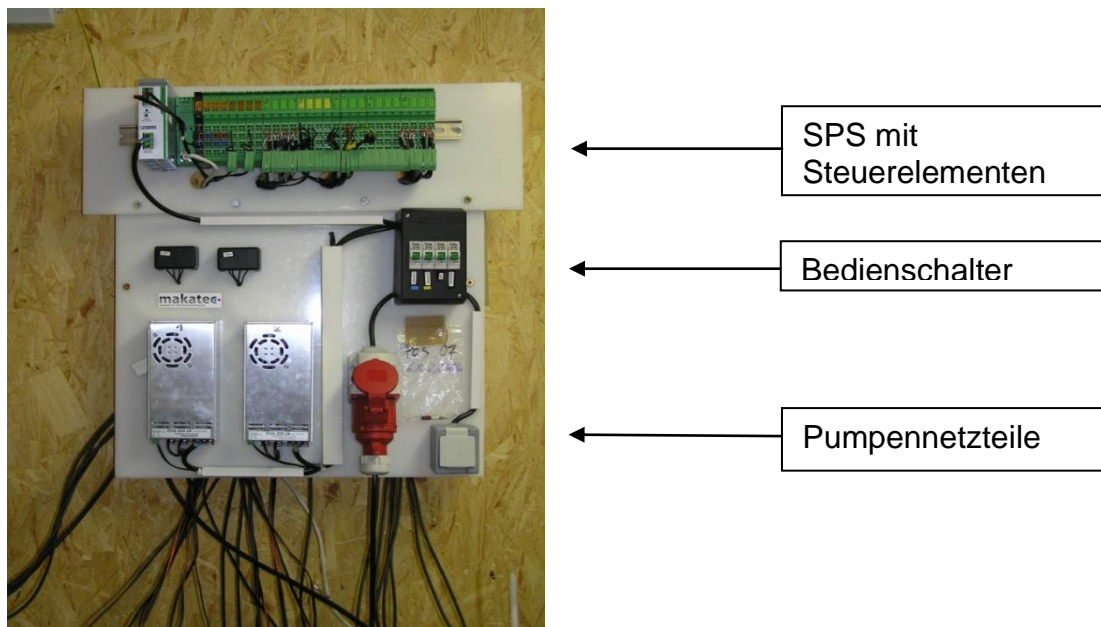


Abbildung 12.5: Steuereinheit der Resorptionsanlage

Regulierung der Flüssigkeitsströme vom Hoch- zum Niederdruckapparat

Durch die Ausgasung im Desorber fließt in den beiden HKLs ein um die Gasmenge verringerter Massenstrom an verarmter Lösung über den LWT zurück in den Absorber und als angereicherte Lösung von dort über den LWT in den Desorber. Für eine optimale Nutzung der LWTs werden hierbei gleiche Massenströme angestrebt. Dazu wird jeweils vor dem Niederdruckapparat (Positionen 9 und 15 nach Abbildung 11.1) ein Stellventil zur Volumenstromregulierung eingebaut.

Für eine genaue Regelung der Ventilstellung muss entweder genau der Volumenstrom durch die Pumpen vom Niederdruck- zum Hochdruckapparat eingestellt werden, oder die Differenz zwischen beiden Strömen durch die Pumpe

und das Ventil wird indirekt ermittelt. Das kann z.B. über eine Füllstandmessung in den Entgasungsbehältern versucht werden. Da sich die Gasmenge im Kreislauf aufgrund veränderter Temperaturen und Drücke jedoch jederzeit ändert, bietet diese Variante keine Sicherheit. Hier sind zukünftig weitere Optimierungen an der Anlage notwendig.

13. Leistungsdaten Resorptionsanlage

Zur Ermittlung der ersten Leistungsdaten des Prototyps wurde dieser mit einem elektrisch betriebenen Umlaufthermostat mit 3,5 kW Heizleistung auf der heißen Seite betrieben. Abbildung 13.1 zeigt beispielhafte Messdaten am kalten Desorber bei einer Kühlwassertemperatur von 25°C an den Absorbern. Die Heiztemperatur von 60°C ist ebenfalls in Abbildung 13.1 eingezeichnet. Als Kältelast wurden Kapillarmatten aus PP im Raum verlegt. Die Temperaturen der Kühlsole sind ebenfalls in Abbildung 13.1 angegeben.

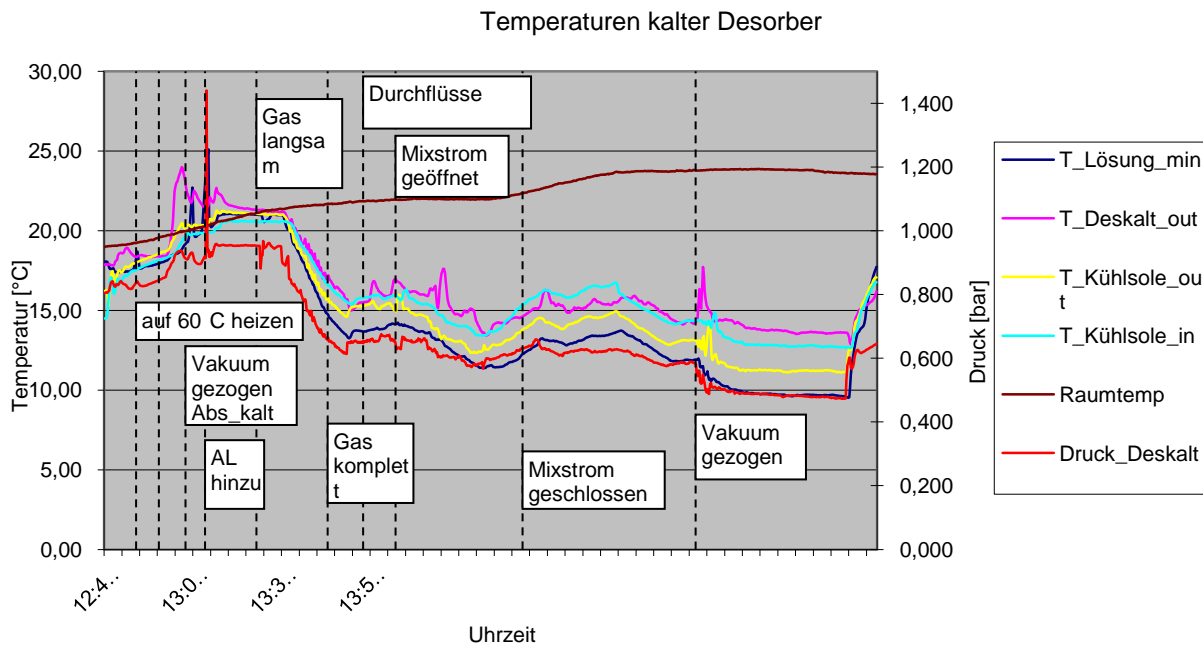


Abbildung 13.1: Messdaten Prototyp Resorptionsanlage

Man erkennt, dass mit der geringen Heiztemperatur von 60°C bereits eine Kühlung der Raumluft möglich ist. Die Kühlsole konnte bis auf 12°C gekühlt werden, was für eine Raumluftkühlung mit Kapillarmatten ausreichend ist.

Der COP dieser ersten Anlage lag für diesen Betriebsfall ohne jegliche Isolierungen bei ca. 0,35. In weiteren Versuchen konnte mit Heiztemperaturen von 85°C Temperaturen um die 0°C erreicht werden.

Ebenfalls ist in Abbildung 13.1 ein Problem für den stationären Betrieb dieses Prototyps zu sehen. Es musste während der ca. 2,5 Stunden dauernden Messkampagne zweimal Vakuum gezogen werden, um Inertgase zu entfernen. Dieses Problem liegt zum einen in der umfangreichen Messtechnik begründet, zum

anderen wurde alle Verbindungen geschraubt und mit Teflonband gedichtet, um schnell Modifikationen im Anlagenaufbau durchführen zu können. Für zukünftige kommerzielle Anwendungen muss eine absolut gasdichte Anlage gefertigt werden.

14. Zukünftiger Einsatz von Membrankontaktoren in Resorptionsanlagen

Nachdem sowohl die untersuchten MaMeKo Module im Absorbereinsatz als auch die Resorptionsanlage die Funktionstauglichkeit im Rahmen der Untersuchungen in diesem Projekt bewiesen haben, sollen im nächsten Schritt die Polymerapparate in die Resorptionsanlage integriert werden. Aufgrund der einstellbaren moderaten Drücke in der Resorptionsanlage (s. Kapitel 11) ist diese hervorragend für den Einsatz von Kunststoffapparaten geeignet.

Hierzu wurde bei der Makatec nach Abschluss des Projekts eine neue Resorptionsanlage aufgebaut, welche analog zu der AKM an der TU Berlin zwei parallele Anschlüsse für die Absorber hat, wovon an einem Anschluss ein Edelstahlplattenapparat mit Membraneindüsung angeschlossen wird, und am anderen Anschluss ein MaMeKo angeschlossen werden kann. Die Anschlüsse für den Mameko können abgesperrt werden, sodass ein schneller Ersatz der Membrankontaktoren möglich ist.

Parallel werden weitere Kontaktoren gefertigt, bei denen die Wärmeübertragerfläche vergrößert und die Anzahl der Membranen erhöht wird. Zudem wird die PPSU Folie, welche vermutlich für die nach einigen Betriebsstunden auftretenden Undichtigkeiten verantwortlich ist, in den nächsten Versuchen durch eine PEEK Folie ersetzt werden. Diese zeigt beim Einsatz im Spiralwärmeübertrager sowohl eine wesentlich bessere Stabilität als auch eine bessere Wärmeübertragung aufgrund der reduzierten Foliendicke. In Tabelle 14.1 sind die charakteristischen Daten für die geplanten neuen Membrankontaktoren aufgeführt.

Tabelle 14.1: Geplante Daten der nächsten Kleinserie Membrankontaktor

| | | Änderung % |
|---------------------------------|-------------------------|------------|
| Material der Membranen: | Polypropylen (PP) | |
| Porengröße Membran: | 0,2 µm | |
| Innen-/Außendurchmesser Membran | 1,2/1,8 mm | |
| Anzahl der Membranen: | 200 Stück | +100 |
| Gitterbreite: | 0,4 m | +100 |
| Gitterlänge: | 2 m | +66 |
| Höhe Gitter Kühlwasserkanal: | 4 mm | |
| Höhe Gitter Membrankanal: | 3 mm | |
| Material der Folie: | PEEK | |
| Dicke der Folie: | 75 · 10 ⁻⁶ m | -25 |

Der Einsatz der Kontaktoren wird zunächst im Absorber auf der Hochdruckseite bei ca. 2 bar Absolutdruck erfolgen, da dort Druckverluste von 100 mbar tolerierbar sind.

Sollte der MaMeKo hier Druckverluste vom Gaseintritt zum Lösungsaustritt deutlich unter 100 mbar aufweisen, wird das gleiche Modell auch im Niederdruckabsorber bei ca. 0,7 bar Absolutdruck eingesetzt werden. Andernfalls wird der MaMeKo nochmals modifiziert werden, um geringere Druckverluste zu erreichen.

Der Einsatz der MaMeKo als Absorber in den Resorptionsanlagen hat höchste Priorität, da diese die größten Reduzierungen von Apparatevolumen und -kosten erreichen können.

Es werden jedoch parallel auch Spiralwärmeübertrager aus Kunststoff für den Einsatz in der Resorptionsanlage vorbereitet. Hierzu wird ebenfalls eine PEEK Folie eingesetzt, und das PU Harz zum Verguss der Standardwärmeübertrager durch ein Epoxidharzsystem ersetzt.

Ein noch nicht gelöstes Problem ist der mögliche Einsatz der MaMeKo als Desorber in Resorptionsanlagen. Hier ist im nächsten Schritt ein gemeinsames Projekt mit Professor Raff von der Hochschule Furtwangen geplant, [12]. Er hat in seinem Labor einen Teststand für Blutoxygenatoren aufgebaut, mit dem sowohl die Absorption wie auch die Desorption von Sauerstoff in Wasser vermessen werden kann. Dieser soll erweitert werden, um dann MaMeKo mit verschiedenen Membrantypen hinsichtlich des Verhaltens bei der Ab- und Desorption aus verschiedenen wässrigen Systemen zu charakterisieren. Im ersten Projektentwurf ist daran gedacht, die Testsysteme

- Sauerstoff/Wasser
- Kohlendioxid/Kaliumcarbonatlösungen
- Wasser/Lithiumbromidlösungen

zu etablieren.

15. Membranresorptionsanlagen im Gebäude

Bei der Integration von Membranresorptionsanlagen zum Heizen- und Kühlen in Gebäuden in Kombination mit Solaranlagen sind folgende Herausforderungen zu bewältigen:

- Systemanforderungen
- Auslegung der einzelnen Komponenten im System (Kollektorfläche, Speichergröße, Kältenetz, Volumenströme)
- Wirtschaftlichkeit

Im Folgenden wird auf die Probleme eingegangen und die entwickelten Lösungen oder Lösungsansätze werden vorgestellt, [14].

15.1 Systemanforderungen

Generell ist die Auswahl, Auslegung und Ausführung eines passenden Systems mindestens genauso wichtig wie eine funktionsfähige Membranresorptionsanlage.

Um das System für möglichst viele Einsatzfälle interessant zu machen, sollten möglichst viele Variationsmöglichkeiten bestehen. Auf der anderen Seite erhöhen viele Einsatzmöglichkeiten die Komplexität und damit die Anforderungen an die Regelung und Hydraulik, was in hohen Kosten und Fehleranfälligkeit resultieren kann. Wünschenswerte Systemeigenschaften sind:

- Heizen
- Kühlen
- Warmwasserbereitung
- Freie Kühlung (Kühlen mit Hilfe der Rückkühleinrichtung z.B. in der Nacht)
- Wärmepumpenfunktion

Trotz der Vielfalt an Anforderungen soll das System einfach, günstig und nicht anfällig gegen Fehler sein. Dies ist nur möglich, wenn große Teile des Systems standardisiert, vorkonfektioniert und je nach Systemanforderung einfach zusammengesteckt werden. Darüber hinaus setzt dies eine umfangreiche Regelungsstrategie voraus, die alle Eventualfälle abdeckt und die Anlage in Abhängigkeit von den einzelnen Betriebszuständen auch hydraulisch miteinander verschaltet.

15.2 Auslegung der einzelnen Komponenten im System

Die Auslegung und Abstimmung der einzelnen Komponenten des Systems ist ein fundamentaler Baustein für die Funktion des Gesamtsystems. So entscheidet beispielsweise die Kollektorgröße über die möglichen Betriebsstunden der Membranresorptionsanlage, aber auch die Speichergröße nimmt direkten Einfluss auf diese Variable.

- Solaranlage

Je nach Kundenwunsch muss bei der Auslegung der Kollektoren darauf geachtet werden, welcher Anteil der Antriebsleistung von der Solaranlage abgedeckt werden soll. Hierbei sei erwähnt, dass die oft geforderte 100%ige solare Deckung nur unter Komforteinbußen möglich ist.

Generell sollte je nach Aufstellungsort eine sinnvolle minimale Globalstrahlung zur Auslegung angenommen werden, ab welcher die Antriebsleistung von der Solaranlage abgedeckt werden soll. Für Deutschland hat sich ca. $800\text{W}/\text{m}^2$ als sinnvoller Wert erwiesen. Daraus ergibt sich eine Daumenregel für die Kollektorfläche in Quadratmetern bezogen auf die Kälteleistung in Kilowatt mit einem Multiplikator von 3-4 (Beispiel: 31m^2 Kollektorfläche für 8kW Kälteleistung).

- Speicher

Der Pufferspeicher muss ausreichend dimensioniert werden, um die Differenzleistung zwischen Auslegungseinstrahlung der Kollektorfläche (ca. $800\text{W}/\text{m}^2$ in Deutschland) und der maximal möglichen Einstrahlung über den Tag aufnehmen zu können und Stillstände der Solaranlage zu vermeiden.

Zusätzlich müssen andere Verbraucher, sowie Erzeuger berücksichtigt werden, hier spielen sowohl die Warmwasserbereitung als auch die Heizung in den meisten Anwendungsfällen eine wichtige Rolle. Die Erstellung eines Richtwertes für die Speicherauslegung bezogen auf die Kälteleistung ist relativ schwer, da das Speichervolumen auch von diesen anderen Faktoren beeinflusst wird.

Je nach Fördermöglichkeit macht es unter Umständen Sinn, die Auslegungsrahmen für Speicher und Kollektoren zu variieren, um die Förderrichtlinien zu erfüllen und das Gesamtsystem attraktiver zu machen.

- Kälteverteilung

Das Kältenetz hat bei einer Membranresorptionsanlage im Gegensatz zu anderen thermisch getriebenen Kälteanlagen eine vergleichbar kleine Rolle. Dieser Vorteil liegt vor allem im Betrieb der Anlage mit Ammoniak begründet, welcher sehr niedrige Kältekreistemperaturen ermöglicht. Jedoch gilt auch hier: „Je höher das Kältekreistemperaturniveau desto besser der COP“. Daraus ergibt sich die logische Schlussfolgerung Kältekreissysteme mit hohen Auslegungstemperaturen zu bevorzugen. Dies kann durch großzügige Auslegung der Komponenten oder durch Flächensysteme erreicht werden.

- Rückkühlkreis

Generell stellt die Rückkühlung bei thermisch getriebenen Kälteanlagen eine große Herausforderung dar. Dies liegt daran, dass sowohl die Kälteleistung, als auch die Antriebsleistung abgeführt werden muss. Generell gibt es viele Möglichkeiten Wärme an die Umgebung abzugeben.

Die einfachste Variante ist ein einfacher Luft- Wasserwärmetauscher, an welchem die Umgebungsluft mit Hilfe eines Ventilators vorbeigeführt wird. Das Problem hierbei ist, dass minimal Temperaturen knapp über der Lufttemperatur erreicht werden können.

Mit Nasskühltürmen können Rückkühltemperaturen unter Umgebungslufttemperatur erreicht werden, jedoch haben diese einen erhöhten Wasserbedarf und bergen bei Verschmutzung ein großes Gesundheitsrisiko, so dass in einigen Ländern das Betreiben eines Nasskühlturms nur unter sehr strengen Vorschriften möglich ist.

Eine Mischung aus diesen beiden Möglichkeiten bietet ein Trockenrückkühler mit Sprühbefeuchtung. Hierbei werden luftseitig die Wärmeübertragerflächen nur kurzzeitig besprüht. Die Vorteile sind:

1. Geringer Wasserverbrauch
2. Rückkühltemperatur bis an Außentemperatur möglich
3. Geringer Wartungsaufwand

Je nach Aufstellungsort und Anwendungsfall muss nach der am besten geeigneten Rückkühlvariante gesucht werden, in Einzelfällen ist auch das Kühlen mit geografischen Gegebenheiten wie Flüssen, Seen oder Meeren möglich. Auch die Verwendung der Erdkühle macht gelegentlich Sinn, ist aber im Normalfall mit einem sehr hohen Aufwand verbunden.

Als Standardlösung für den Standort Deutschland, allerdings auch nur innerhalb gewisser Grenzen, kommt nur der Trockenrückkühler mit Sprühbefeuchtung in Frage. Das Rückkühlsystem kann durch einen zusätzlichen Pufferspeicher optimiert werden. Dadurch können Leistungsspitzen abgepuffert und/oder der Rückkühler kleiner dimensioniert werden. Optimal ist die Verwendung eines Latentwärmespeichers, der viel Energie bei konstanter Temperatur aufnehmen kann.

Generell sollte bei der Auswahl der Komponenten und der Bestimmung von Auslegungszuständen auf Volumenströme und Temperaturspreizungen geachtet werden. Es ist zu beachten, dass die Funktion eines Schichtenspeichers nur innerhalb der vom Hersteller empfohlenen Volumenstromgrenzen gegeben ist und auch große Leistungen mit Hilfe großer Temperaturspreizungen relativ einfach realisiert werden können.

15.3 Simulation

TRNSYS ist ein modular aufgebautes, dynamisches Gebäude- und Anlagen Simulationsprogramm [15,16], mit dem auch das Verhalten von Solarenergiesystemen und Systemen zur rationellen Energienutzung simuliert werden kann. In diesem Fall soll ein System dargestellt werden welches die unter „16.1 Systemanforderungen“ dargestellten Eigenschaften besitzt.

Gebäude:

Um ein möglichst großes Spektrum betrachten zu können wurden Gebäude an zwei Standorten mit unterschiedlicher Nutzung simuliert. Es wurde ein Wohn- und ein Bürogebäude jeweils für Madrid (Spanien) und Würzburg (Deutschland) simuliert. Damit die Konstruktionen möglichst realitätsnah simuliert werden konnten wurden die derzeit gültigen Energie- Einspar- Vorschriften des jeweiligen Landes als Grundlage zur Auslegung der Isolierung gewählt. Dies ist die CTE`06 für Spanien und die EnEV`09 für Deutschland.

Technik:

Da möglichst alle Verschaltungsvarianten simuliert werden sollten wurde eine aufwändige Hydraulik gewählt. Es handelt sich um ein Pufferspeichersystem mit zwei Speichern, welche wahlweise in Reihe oder separat geschaltet werden können. Dies ermöglicht eine Sommer- Winterumschaltung, wobei der zweite Speicher (Abbildung 16.1 links) als Rückkühlspeicher, Heizungspufferspeicher oder sogar im Wärmepumpenmodus als Rückkühlspeicher, welcher Heizleistung ans System abgibt, verwendet werden kann. Des Weiteren erfordert dieses System eine Umschaltung der Solaranlage zwischen den beiden Puffern. Die Warmwasserbereitung wird im Durchlaufprinzip realisiert, die Besonderheit hierbei ist, dass die Wärme hierfür gezielt aus beiden Speichern entnommen werden kann. Dies ermöglicht das Abkühlen des zweiten Speichers, wenn dieser als Rückkühlspeicher verwendet wird und reduziert somit die benötigte Leistung des Rückkühlsystems. Die Membranresorptionsanlage ist so in das System integriert, das sie die Kälte direkt ans Gebäude abgibt oder das Rückkühlsystem als Energiequelle auf niedrigem Temperaturniveau nutzt (Wärmepumpenmodus).

Als Heiz / Kühlsystem wurde eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung, Sprühbefeuchtung der Abluft und Heiz / Kühlregister realisiert. Freie Kühlung mit

Außenluft ist bei dieser Konstellation durch einfaches Betreiben des Ventilators möglich.

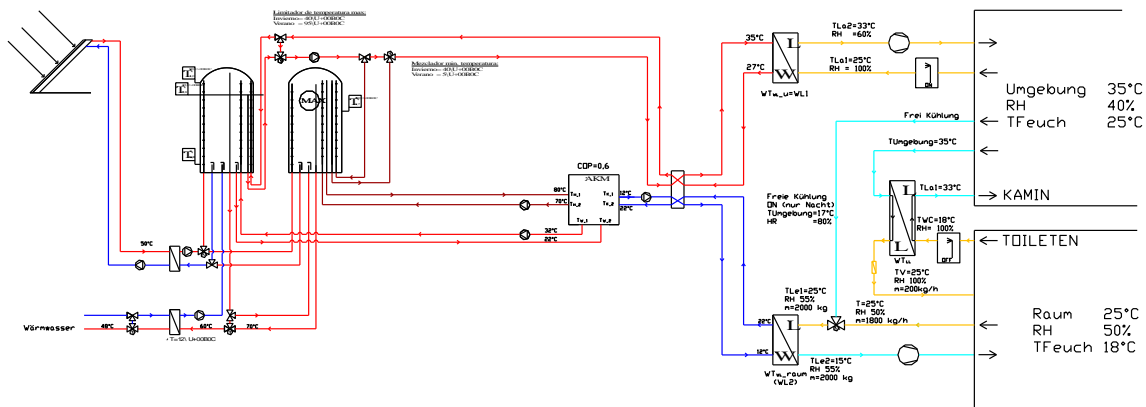


Abbildung 15.1: Hydraulikkonzept

Dieser Aufbau des Systems ermöglicht durch relativ kleine Änderungen die Simulation sehr unterschiedlicher Systemkonstellationen. So ist es beispielsweise möglich, durch Ersetzen des Heiz- / Kühlregisters ein System mit Fan Coils zu realisieren.

Aufgrund fehlender Datenlage wurde für die Simulation eine Anlage mit ähnlichem Betriebsverhalten ausgewählt (Adsorptionskälteanlage ASC08 von der SorTech AG).

Simulationsergebnis:

Im Folgenden wird beispielhaft für das Bürogebäude in Madrid die abschließende Auswertung dargestellt.

Die folgenden Tabellen zeigen eine Referenzanlage (ohne Freikühlungssystem, ohne Wärmerückgewinnungssystem, mit Gasbrennwertgerät und einer Kompressionskältemaschine im Vergleich zu dem unter Punkt „Technik“ dargestellten System. Es werden die Energieaufnahme des Büros, der Energieverbrauch und der Primärenergieverbrauch verglichen. Der Stromverbrauch von allen Elementen der Anlage (Pumpen, Ventilator, Kühlturm, Kessel, Regelung, Wärmetauscher, Freikühlungssystem, etc.) wurde berechnet.

Um den Betrieb der Anlage besser beurteilen zu können, wurde eine Analyse des ganzen Jahres und eine des Sommers durchgeführt. Beide sind sehr wichtig, da die Energieeinsparungen im gesamten Jahr nicht zwangsläufig auf eine gute Energieeinsparung im Sommer zurückzuführen ist. Die jährliche Energieeinsparung wird genutzt, um die Rentabilität der Anlage berechnen zu können und die Energieeinsparung im Sommer wird verwendet, um das Verhalten der Kälteanlage zu analysieren.

Tabelle 15.1: Optimierung der Anlagen. Jährlich (Büro Madrid)

| Jährlich | | Referenz Büro mit Gasbrennwertkessel und Kompressionskältemaschine | | Büro mit Wärmerückgewinnung und Adsorptionskälteanlage | | |
|-------------------------|-----------------------------|--|----------------|--|----------------|----------------|
| | N° Kollektoren | m2 | 0,00 | 30,96 | 36,12 | 41,28 |
| | Wärmespeichervolumen | m3 | 0,00 | "2x0,95" | "2x0,95" | "2x0,95" |
| Energie Aufnahme | E_Heizung | kWh | 3809,59 | 1949,52 | 1949,12 | 1949,27 |
| | E_Klima | kWh | 3313,95 | 1594,23 | 1598,67 | 1601,04 |
| | E_WWasser | kWh | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | TOTAL | kWh | 6445,90 | 3543,75 | 3547,79 | 3550,31 |
| Ende Energie Versorgung | Gas_Kessel | kWh | 3848,07 | 898,77 | 771,23 | 690,98 |
| | Elektrizität | kWh | 1388,88 | 906,28 | 934,07 | 941,70 |
| | TOTAL | kWh | 5236,95 | 1805,05 | 1705,30 | 1632,68 |
| | TOTAL(Primär) | kWh | 7986,60 | 3438,04 | 3295,74 | 3305,21 |
| Aufwandszahl | Energie Aufnahme | kWh/m2 | 35,81 | 19,69 | 19,71 | 19,72 |
| | Gas+Elektrizität Versorgung | kWh/m2 | 29,09 | 10,03 | 9,47 | 9,07 |
| | Primär Energie Versorgung | kWh/m2 | 44,37 | 19,10 | 18,31 | 18,36 |
| | ep(Primär) | - | 1,24 | 0,53 | 0,51 | 0,51 |
| Energie Sparen | Gas Energie | kWh | 0,00 | 2949,30 | 3076,84 | 3157,09 |
| | Elektrizität | kWh | 0,00 | 482,60 | 454,81 | 447,18 |
| | Total | kWh | 0,00 | 3431,91 | 3531,65 | 3604,27 |
| | Total Primär | kWh | 0,00 | 4548,56 | 4690,87 | 4681,39 |
| | Total Primär | % | 0,0% | 57,0% | 58,7% | 58,6% |

Die Ergebnisse der Tabelle 15.1 zeigen, dass man eine große Energieeinsparung durch die Anlage erreichen kann. Für die gewählte Installation (Zellen in grau), ist die jährliche Energieeinsparung 57% im Bezug zur Referenzanlage. Dies entspricht einer Brennstoffeinsparung von 4548,56 kWh.

Tabelle 15.2: Optimierung der Anlagen. Sommer (Büro Madrid)

| Sommer | | Referenz Büro mit Gasbrennwertkessel und Kompressionskältemaschine | | Büro mit Wärmerückgewinnung und Adsorptionskälteanlage | | |
|-----------------------|-----------------------------|--|----------------|--|----------------|----------------|
| | N° Kollektoren | m2 | 0,00 | 30,96 | 36,12 | 41,28 |
| | Wärmespeichervolumen | m3 | 0,00 | "2x0,95" | "2x0,95" | "2x0,95" |
| Energie Aufnahme | E_Heizung | kWh | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | E_Klima | kWh | 3313,95 | 1594,23 | 1598,67 | 1601,04 |
| | E_Wwasser | kWh | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | TOTAL | kWh | 3313,95 | 1594,23 | 1598,67 | 1601,04 |
| Endenergie Versorgung | Gas_Kessel | kWh | 0,00 | 334,28 | 266,55 | 220,27 |
| | Elektrizität | kWh | 1192,00 | 587,86 | 610,33 | 620,53 |
| | TOTAL | kWh | 1192,00 | 922,14 | 876,88 | 840,81 |
| | TOTAL(Primär) | kWh | 3221,61 | 1956,51 | 1916,09 | 1919,42 |
| Aufwandszahl | Energie Aufnahme | kWh/m2 | 14,99 | 8,86 | 8,88 | 8,89 |
| | Gas+Elektrizität Versorgung | kWh/m2 | 6,62 | 5,12 | 4,87 | 4,67 |
| | Primär Energie Versorgung | kWh/m2 | 17,90 | 10,87 | 10,64 | 10,66 |
| | ep(Primär) | - | 1,19 | 0,72 | 0,71 | 0,71 |
| Energie Sparen | Gas Energie | kWh | 0,00 | -334,28 | -266,55 | -220,27 |
| | Elektrizität | kWh | 0,00 | 604,14 | 581,67 | 571,46 |
| | Total | kWh | 0,00 | 269,86 | 315,12 | 351,19 |
| | Total Primär | kWh | 0,00 | 1265,10 | 1305,53 | 1302,20 |
| | Total Primär | % | 0,0% | 39,3% | 40,5% | 40,4% |

Die Daten aus Tabelle 15.2 erlauben folgende Schlussfolgerungen:

- Eine Reduktion des Stromverbrauchs um 604kWh (50%) in Bezug zum Referenzbüro(mit Kompressionskältemaschine).
- Eine Erhöhung des Gasverbrauchs um 334,28 kWh zur Referenzanlage.
- Reduzierung von 39,3% Primärenergieverbrauch durch die Adsorptionskälteanlage.

Die Ergebnisse zeigen, dass die hier entworfene Anlage effizienter ist als die Anlage mit einer Kompressionskältemaschine, jedoch ist die Effizienzsteigerung in den Sommermonaten geringer als über das gesamte Jahr betrachtet. Dennoch sind 39,3% Primärenergieeinsparung ein gutes Ergebnis.

Die freie Kühlung hat am Gesamtkühlbedarf im Sommer im Beispiel Büro Madrid einen Anteil von 41%, auch die Simulationsergebnisse der anderen Gebäudetypen belegen eine starke Reduzierung der aktiven Kühlung durch die freie Kühlung.

In der folgenden Tabelle 15.3 ist eine Übersicht über die großen Unterschiede der einzelnen Simulationsstandorte und Gebäudenutzungstypen zu sehen.

Tabelle 15.3: Übersicht Primärenergieeinsparung

| | Primärenergieeinsparung Im ganzen Jahr | Primärenergieeinsparung nur im Sommer |
|------------------|---|--|
| Büro Madrid | 57,0% | 39,3% |
| Wohnung Madrid | 65,0% | 54,7% |
| Büro Würzburg | 44,0% | 4,7% |
| Wohnung Würzburg | 37% ohne Kühlanlage nur mit Wärmerückgewinnung | Kein Kühlbedarf |

Ein Ergebnis dieser Simulation ist, dass die Wärmepumpenfunktion im günstigsten Fall (Wohnung Madrid) lediglich eine Energieeinsparung von 75,59 kWh im Heizbetrieb erreicht. Dies entspricht einem Anteil von 1,3% am Heizenergiebedarf. Den weitaus größten Anteil an der Energieeinsparung tragen die Solaranlage und die Wärmerückgewinnungsanlage bei.

Mit einem anderen Systemkonzept mit Flächenheizsystemen könnte in einer Folgesimulation versucht werden, den Anteil der Wärmepumpenfunktion zu erhöhen.

15.4 Wirtschaftlichkeit

Zur Ermittlung der Wirtschaftlichkeit wurden die Erstellungskosten für die beiden betrachteten Anlagen ermittelt. Hierfür wurde eine detaillierte Stückliste der benötigten Komponenten mit den dazugehörigen Preisen erstellt. Viele Preise konnten von Solvisprodukten übernommen werden. Komponenten denen kein eindeutiger Preis zugeordnet werden konnte wurden abgeschätzt oder aus dem Preisniveau mehrerer Hersteller gemittelt. Bei den Montagekosten handelt es sich komplett um Annahmen denen ein Zeitbedarf für die Montage und ein dementsprechender Verrechnungssatz zugrunde liegen.

Um eine bessere Vergleichbarkeit der beiden Varianten zu erzielen wurden die einzelnen Komponenten in Gruppen zusammengefasst. Die Tabelle 15.4 gibt eine gute Übersicht der Kostenverteilung

Tabelle 15.4: Investitionskostenermittlung der verglichenen Systeme

| | Preis Referenzanlage | Preis Membranresorptions- system |
|---|-------------------------|--|
| | [€] | [€] |
| Wärmeerzeuger inkl. Speicher und Zubehör | 2.000 | 11.395 |
| Solarkollektorfeld inkl. Zubehör | _____ | 12.987 |
| Kälteanlage inkl. Zubehör | 3.206 | 15.095 |
| Montagekosten | 1.384 | 5.000 |
| Gesamtpreis [€] | 6590 | 44478 |

Mit Hilfe der Kapitalwertmethode [17] wurde die Amortisationszeit der Membranresorptionsanlage in Verbindung mit Solaranlage und Wärmerückgewinnung im Gegensatz zu einer konventionellen Anlage. Die hierfür verwendeten Abschätzungen sind aus Tabelle 15.5 zu entnehmen.

Tabelle 15.5: Kapitalwert und Amortisation der Investition. Büro Madrid.

| Büro Madrid | | |
|--|----------------|------------------|
| | Einheit | Wert |
| Systemkosten Membranresorptionsanlage | € | 44.478 |
| Alternative Anlage Kosten | € | 6590 |
| Nutzungsdauer der Anlagen | Jahr | 15 |
| Zinzen | % | 4,25% |
| Inflation | % | 2,00% |
| Elekt. Kosten | €/kWh | 0,156 |
| Naturalgas Kosten | €/kWh | 0,06516 |
| Inflation Elektrizität | % | 8% |
| Inflation Gas | % | 8% |
| Diff. Wartung Kosten pro Jahr | € | -100 |
| Einsparung Elektrizität | kWh/Jahr | 482 |
| Einsparung Gas | kWh/Jahr | 2.949 |
| | | |
| Kapitalwert (15 Jahre) | € | -34.143 € |
| Amortisationszeit | Jahr | 54,50 |

Wie die Kapitalwertmethode unter der Annahme einer angenommenen Energiepreissteigerung von 8% zeigt, ist die Amortisationszeit mit 54,5 Jahren bei einer Nutzungsdauer der Anlage von 15 Jahren sehr groß. Dies bestätigen auch die Berechnungen an anderen Standorten oder unterschiedlicher Nutzerverhalten.

Tabelle 15.6: Übersicht Amortisationszeiten

| | Amortisationszeit [Jahre] | Nutzungsdauer [Jahre] |
|----------------|----------------------------------|------------------------------|
| Büro Madrid | 54,5 | 15 |
| Wohnung Madrid | 36,5 | 15 |
| Büro Würzburg | 53,5 | 15 |

Selbst bei einer Förderung oder Kostenreduzierung von angenommenen 50% und damit Halbierung der Amortisationszeit in der Tabelle wäre keine Amortisationszeit innerhalb der Nutzungsdauer der Anlage möglich, somit ist kein wirtschaftliches Betreiben möglich.

Fazit

Mit diesem Projekt konnte das ökologische und technische Potenzial für membranbasierte Resorptionsanlagen aufgezeigt und der technische „proof of concept“ konnte erbracht werden. Zum Ende des Projekts existieren Prototypen von Membrankontaktoren mit integriertem Wärmeübertrager und ein Funktionsmuster für die Resorptionskälteanlage. Die untersuchten Spiralwärmeübertrager werden aktiv vermarktet, und eine erste Resorptionskälteanlage wurde ausgeliefert. Die Resorptionsanlage funktioniert zum Projektende hervorragend und wird zurzeit mit den im Projekt entwickelten Membrankontaktoren bestückt.

Für zukünftige Untersuchungen der Membrankontaktoren stehen Testeinrichtungen an der TU Berlin und bei der Makatec GmbH zur Verfügung. Beim Einsatz der Membrankontaktoren mit integriertem Wärmeübertrager in einer ammoniakbasierten AKM wurden Absorptionsleistungen von bis zu 10 kW erreicht, die deutlich über den Erwartungen im Bereich von 5 kW aufgrund der Vorversuche mit Luft und Wasser lagen. Allerdings gibt es nach einigen Betriebsstunden mit stark wechselnden Versuchsbeanspruchungen noch Undichtigkeiten zwischen der Kühlwasserseite und der Lösungsseite.

Es hat sich gezeigt, dass für die zuverlässige Abdichtung des elastischen Polymerwickels mit integrierten Zu- und Abläufen bei jedem Materialwechsel neue Herausforderungen bei der Verklebung gelöst werden müssen. Hier muss die Herstellung der MaMeKo zukünftig weiter verbessert werden, um Optimierungsstrategien für das Betriebsverhalten der MaMeKo im Absorberbetrieb auch fertigungstechnisch zu bewältigen. Die MaMeKo werden nach Projektabschluss von Makatec weiter optimiert und als Membranabsorber in Resorptionsanlagen kleiner Leistung (bis 20 kW Kälteleistung) integriert.

In Desorptionsversuchen mit den eingesetzten Polypropylen Membranen konnte bei Differenzdrücken kleiner 200 mbar zwischen Gas- und Flüssigseite keine nennenswerte Luftabscheidung aus Wasser erzielt werden. Vor einem Einsatz der Membrankontaktoren mit integriertem Wärmeübertrager als Desorber sind grundsätzliche Untersuchungen zu verschiedenen Membranen notwendig. In einem neuen Forschungsprojekt der Makatec GmbH in Kooperation mit der Universität Paderborn werden für die Membrankontaktoren Auslegungswerkzeuge für Anwendungen auch außerhalb der Resorptionsanlagen zum Heizen und Kühlen untersucht (ZIM Projekt, Förderkennzeichen KF3600301OH9).

Die Resorptionsanlagen mit Edelstahlplattenapparaten werden eigenständig für gewerbliche Anwendungen von 30-100 kW Kälteleistung weiterentwickelt. Hier zeichnet sich eine hochinteressante Anwendung in der Druckluftaufbereitung mit mehreren tausend jährlichen Betriebsstunden ab. Hierbei wird die Abwärme des Druckluftkompressors zur Kälteerzeugung genutzt.

Im Rahmen eines vom BMBF geförderten Forschungsprojekts (KMU-innovativ: BIOCOOL Kälte- und Wärmeerzeugung aus biogenen, flüssigen Reststoffen, Förderkennzeichen 0330866A) wird in Kooperation mit der Universität Stuttgart und der Firma e-flox GmbH, Renningen, die Kombination Resorptionskälteanlage und Biomassebrenner untersucht.

Im Hinblick auf die Gebäudekühlung gibt es folgende wichtige Ergebnisse der Simulationen, die bei einem Einsatz der Membranresorptionstechnologie in Gebäuden Berücksichtigung finden müssen:

Die simulierten solaren Kombisysteme zum Heizen und Kühlen weisen je nach Standort und Gebäudeeinsatz zwischen 39 und 65% Primärenergieeinsparung gegenüber dem Referenzsystem aus Gasbrennwertkessel mit Kompressionskältemaschine auf. Aus ökologischen Gesichtspunkten ist der Einsatz der Membranresorptionstechnologie im Gebäude absolut sinnvoll.

Das in der Simulation betrachtete System ist jedoch unter heutigen Bedingungen bei Kosten im Bereich von 45.000 € nicht wirtschaftlich realisierbar. Zielkosten aus der Markteinschätzung Solvis für ein System zum Heizen und Kühlen für ein Einfamilienhaus in Deutschland liegen aus heutiger Sicht bei 25.000 bis 30.000 €. Die Komplexität des Systems muss stark reduziert werden, um das System wirtschaftlich, übersichtlich und realisierbar zu machen.

Um zukünftig wirtschaftliche Resorptionssysteme für das Heizen und Kühlen von Gebäuden realisieren zu können, ist es daher vor Allem notwendig, auf Seiten der Systemintegration deutliche Kostenreduzierungen zu erreichen. Betrachtet man die Kostenaufstellung in Tabelle 15.4 mit einer Kostenverteilung von ca. 1/3 für die Resorptionsanlage und 2/3 für das restliche System, so müssen entweder die Kosten aller Komponenten um ca. 1/3 oder die Kosten der Systemintegration um 50% reduziert werden.

Literaturverzeichnis

- [1] DBU Bericht Nr. 20967, Membranapparate für umweltfreundliche Absorptionskälteanlagen und –wärmepumpen,
- [2] Frank Schaal, Membranabsorber für die Absorptionskältetechnik, Berlin 2009
- [3] Ahmed Hamza H. Ali: Design of a compact absorber with a hydrophobic membrane contactor at the liquid-vapor interface for lithium bromide-water absorption chillers, Applied Energy, 2010.
- [4] Ahmed Hamza H. Ali: Characteristics of the membrane utilized in a compact absorber for lithium bromide-water absorption chillers, IJR, 2009.
- [5] Jason Woods, John Pellegrino, Eric Kozubal, Steve Slayzak, Jay Burch: Modeling of a membrane-based absorption heat pump, Journal of Membrane Science, 2009
- [6] V. Soni, J. Abildskov, G. Johnsson, R. Gani: A general model for membrane-based separation processes, Computers and Chemical Engineering, 2009
- [7] Zanshe Wang, Zhaolin Gu, Shiyu Feng, Yun Li: Application of vacuum membrane distillation to lithium bromide absorption refrigeration system, IJR, 2009.
- [8] Paris Chasanis, Jürgen Kern, Marcus Grünewald, Eugeny Y. Kenig: Mikrotrenntechnik: Entwicklungsstand und Perspektiven, Chemie Ingenieur Technik, 2010.
- [9] Yoon Jo Kim, Yogendra K. Joshi, Andrei G. Fedorov: An absorption based miniature heat pump system for electronics cooling, IJR, 2008.
- [10] Martí Calatayud Manuel César: Simulation and adaptation of a membrane absorber to an absorption chiller, Diplomarbeit an der TU-Berlin
- [11] [Piper 2009] Piper, Marc: Simulation and Adaptation of a Simultaneously Cooled Membrane Absorber to a 10 kW NH₃/H₂O Absorption Chiller, Diplomarbeit an der TU Berlin.
- [12] <http://www.hs-furtwangen.de/fachbereiche/muv>
- [13] Ghiasi C., Martí-Calatayud M. C., Weimer T., Ziegler F., ammonia-water absorption heat pumps with membrane absorber, IIR Ammonia Refrigeration technology, 2009.
- [14] Juan Carlos Cacho Alonso, Diplomarbeit U Braunschweig, Institut für Gebäude- und Solartechnik IGS, „Erstellung von Konzepten zur Einbindung einer

solar betriebenen Absorptionskälteanlage in ein Versorgungssystem für Wärme und Kälte eines Einfamilienhauses und Modellierung mit TRNSYS“,
[15] Transsolar. <http://www.transsolar.com/>.

[16] University of Wisconsin. 2006. Transient Systems Simulation Manuel. Wisconsin: s.n., 2006.

[17] Wikipedia. 2009. Wikipedia. [Online] 2009. <http://de.wikipedia.org/wiki/Kapitalwert>.

Anhang Messung Wärmeübertrager

s. gesonderte pdf Datei

Anhang Liste Membrankontaktoren

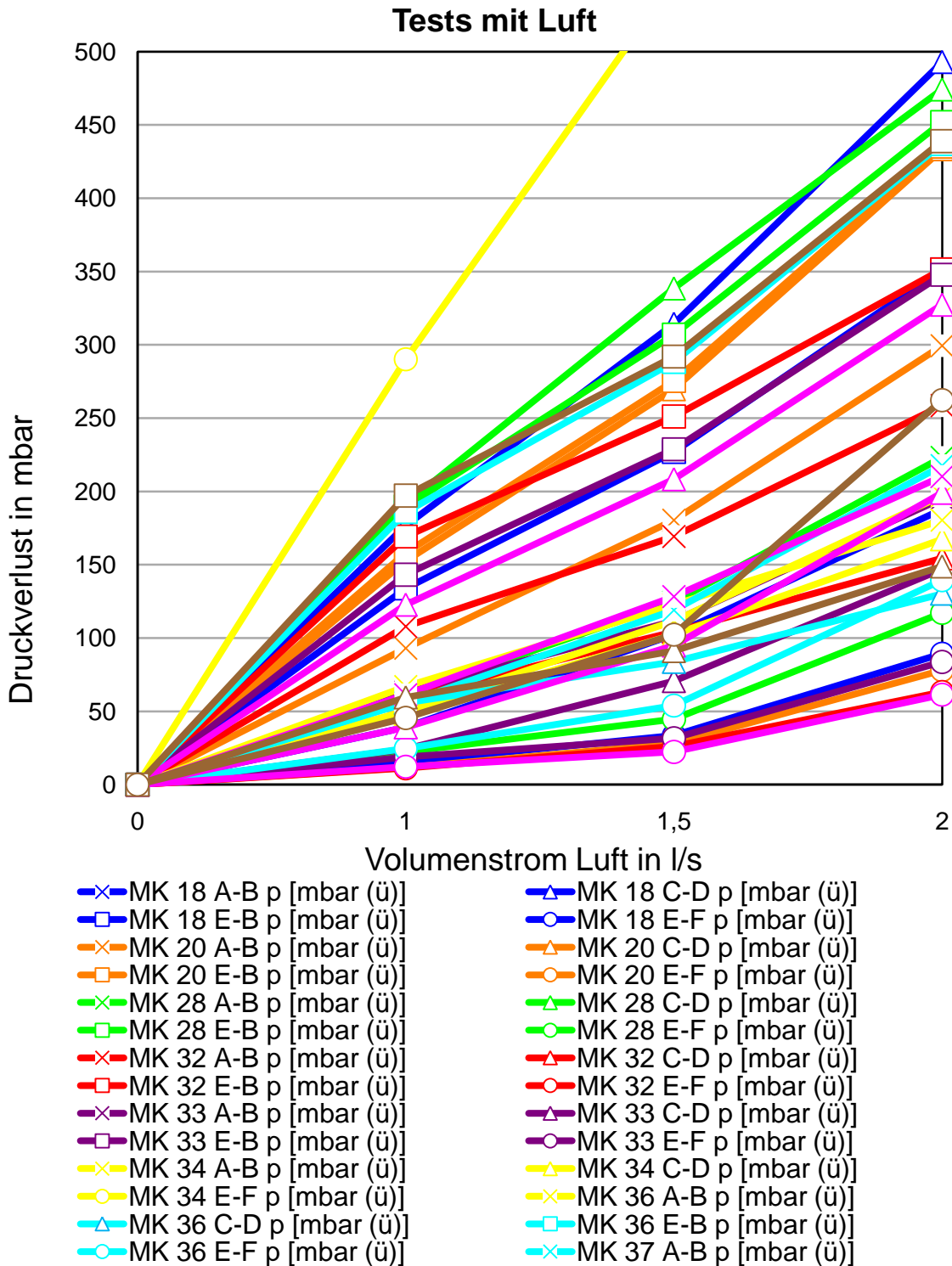
| Membran-kontaktor Nr. | Material der Folie (Dicke 100µm) | Material Gitter (Kühlwasser-seite) | Material Gitter (Membran-seite) | Material Membran | Anzahl Membrane | Material Rohre | Anzahl Wicklungen | Material Hülle | Bemerkung | Funktions-fähig |
|-----------------------|----------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|------------------|-----------------|----------------|-------------------|----------------|--|-------------------------------------|
| 1 | PA | PP | PP | PP | 125 | PA | 9 | - | Abbruch nach Stirnharzvorgang | nein |
| 2 | PA | PP | PP | PP | 170 | PA | 11 | - | Probleme bei der Verharzung. | nein |
| 3 | PA | PP | PP | PP | 120 | PA | 9 | PMMA | Membranen teilweise mit Harz vollgelaufen | gelungene Herstellung aber undicht. |
| 4 | PA | PP | PP | PP | 120 | PA | 10 | - | Mehrere Membranen abgebrochen | nein |
| 5 | PA | PP | PP | PP | 120 | PA | 9 | - | Membranmatte an einer Seite beschädigt. | nein |
| 6 | PA | PP | PP | PP | 120 | PA | 7 | - | Membranen dürfen nicht knicken, und sie müssen vor Verguss zgedrückt werden, damit kein Harz in die Membranen läuft. | nein |
| 7 | PA | PP | PP | PP | 120 | PA | 6 | PMMA | mit Spezialkleber verklebt. | gelungene Herstellung aber undicht. |
| 8 | PA | PP | PP | PP | 120 | PA | 7 | PMMA | Für bessere Haftung den kompletten Wickel plasmieren. | nein |
| 9 | PA | PP | PP | PP | 120 | PA | 8 | PMMA | Nach Stirnseitenverharzung interne Undichtigkeit | nein |
| 10 | PA | PP | PP | PP | 120 | PA | 8 | PMMA | Beim Einsetzen in die Hülle und beim Abdichten dieser kam es zu Problemen | nein |
| 11 | PA | PP | PP | PP | 120 | PA | 8 | PMMA | Gelungener Herstellungsablauf, Durchführung von Tests möglich, dabei ab 5 bar undicht | gelungene Herstellung aber undicht. |
| 12 | PA | PP | PP | PP | 125 | PA | 5,5 | PMMA | Heißkleber durch speziellen Dichtstoff ersetzt. | ja |
| 13 | PA | PP | PP | PP | 120 | PA | 6 | PMMA | 12 Membranen einseitig vollgelaufen. | gelungene Herstellung aber undicht. |
| 14 | PA | PP | PP | PP | 125 | PA | 7 | - | Membranen eingewoben. | nein |
| 15 | PA | PP | PP | PP | 180 | PA | 7 | PVC | Membranen eingewoben, ungerade im Wickel. Dichter Wickel. | ja |

| | | | | | | | | | | |
|----|--------------|----|----|----|-----|----|-----|------|--|------|
| 16 | PA | PP | PP | PP | 120 | PA | 8 | - | Keine zugelaufenen Membranen. | nein |
| 17 | PA | PP | PP | PP | 120 | PA | 8 | - | Ausrichtung der Kanäle nicht optimal. | nein |
| 18 | PA | PP | PP | PP | 120 | PA | 9,5 | PVC | Druckhülle, Stirnplatten und Fittings aus PVC. Alle Komponenten wurden nach dem Anbringen geschweißt. | ja |
| 19 | PA | PP | PP | PP | 120 | PA | 9 | - | | nein |
| 20 | PA | PP | PP | PP | 125 | PA | 8 | PVC | Rohre im Kanal dicker, 2,5 cm anstelle von 1,8 cm. Kanäle mit spezial Dichtstoff abgedichtet. Für Tests an die TU Berlin. | ja |
| 21 | PA | PP | PP | PP | 120 | PA | 8 | - | Ein neues Gitter ausprobiert. | nein |
| 22 | PA | PP | PP | PP | 119 | PA | 7 | - | Gitter wie in MK 21 ausprobiert. | nein |
| 23 | PA | PP | PP | PP | 120 | PA | 8 | - | Neues Gitter wie MK 21 und 22. | nein |
| 24 | PA | PP | PP | PP | 110 | PA | 8 | - | Membranen mit speziellem Kleber auf Gitter befestigt. | nein |
| 25 | PA | PP | PP | PP | 120 | PA | 8 | - | Folgende Herstellungen nur noch mit dicken Kanalrohren, 2,5 cm. | nein |
| 26 | PA | PP | PP | PP | 120 | PA | 7 | PMMA | Versuch einen großen Kontaktor mit einer Breite von 46 cm anstelle von 20 cm herzustellen. | ja |
| 27 | PA | PP | PP | PP | 147 | PA | 8 | - | Abdichtung der Kanäle mit Spezial-Dichtstoff. | nein |
| 28 | PA | PP | PP | PP | 116 | PA | 8 | PVC | Druckhülle, Stirnplatten und Fittings aus PVC. Alle Komponenten wurden nach dem Anbringen geschweißt. Somit keine äußere Undichtigkeiten mehr. | ja |
| 29 | PPSU (125µm) | PP | PP | PP | 123 | PP | 8 | PMMA | Test TU Berlin. | ja |
| 30 | PPSU (125µm) | PP | PP | PP | 120 | PP | 8 | PMMA | Test mit neuen Gittern. | nein |
| 31 | PPSU | PP | PP | PP | 150 | PP | 11 | - | Kanäle mit Spezial-Dichtstoff abgedichtet. | nein |

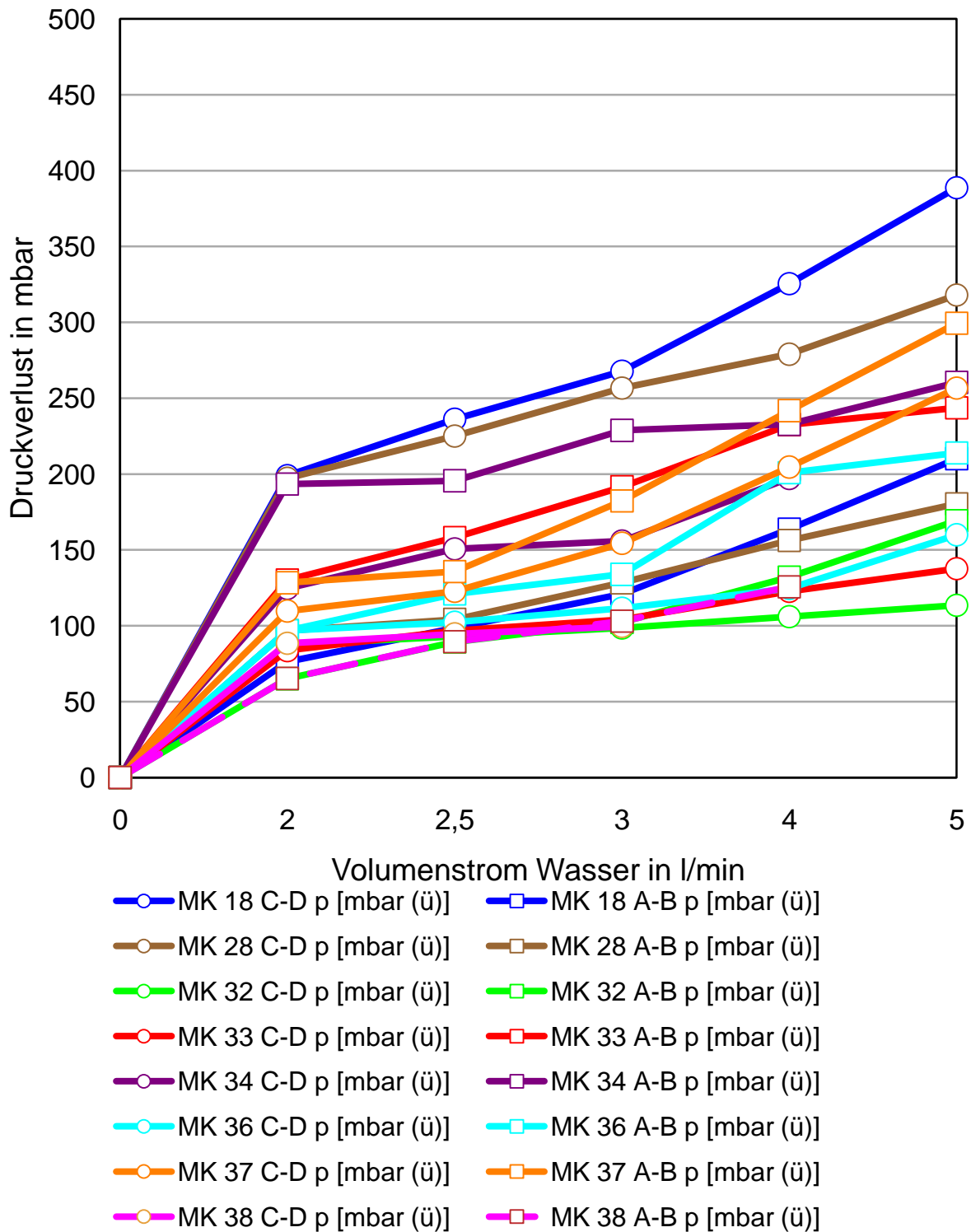
| | | | | | | | | | | |
|----|------|----|----|----|-----|----|-------|-----|---|------|
| 32 | PPSU | PP | PP | PP | 150 | PP | 10 | PVC | Kanäle mit Spezial-Dichtstoff abgedichtet. Druckhülle, Stirnplatten und Fittings aus PVC. Alle Komponenten wurden nach dem Anbringen geschweißt. Somit keine äußere Undichtigkeiten mehr. | ja |
| 33 | PPSU | PP | PP | PP | 125 | PP | 10 | PVC | | ja |
| 34 | PPSU | PP | PP | PP | 131 | PP | 10 | PVC | Für Tests an die TU Berlin. | ja |
| 35 | PPSU | PP | PP | PP | 160 | PP | 10/11 | PVC | Äußere Schale gesprungen, undicht. | nein |
| 36 | PPSU | PP | PP | PP | 93 | PP | 10 | PVC | Für Tests an die TU Berlin | ja |
| 37 | PPSU | PP | PP | PP | 120 | PP | 11/12 | PVC | Für Tests an die TU Berlin | ja |
| 38 | PPSU | PP | PP | PP | 122 | PP | 11 | PVC | Für Tests an die TU Berlin | ja |

Anhang Messungen Membrankontaktoren mit Luft und Wasser

Die Anschlussbezeichnung für die Messungen ist in Abbildung 8.1 des Berichts erläutert. Die beiden folgenden Abbildungen zeigen die vollständigen Testergebnisse der MaMeKo mit Luft und Wasser, anschliessend sind die Messergebnisse tabellarisch aufgeführt.



Tests mit Wasser



MaMeKo Nr. 18:

Test 1.-4. mit Gas (Luft) durchgeführt.

1. Test A-B:

| V Gas [l/s] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|-------------|--------|--------------|
| 1 | 52,1 | 39,06 |
| 1,5 | 55,5 | 102,30 |
| 2 | 60,1 | 187,86 |

2. Test E-B:

| V Gas [l/s] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|-------------|--------|--------------|
| 1 | 57,2 | 133,92 |
| 1,5 | 62,2 | 226,92 |
| 2 | 68,9 | 351,54 |

3. Test E-F:

| V Gas [l/s] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|-------------|--------|--------------|
| 1 | 51,3 | 0,00 |
| 1,5 | 53,1 | 33,48 |
| 2 | 56,1 | 89,28 |
| 2,5 | 60,7 | 174,84 |

4. Test C-D:

| V Gas [l/s] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|-------------|--------|--------------|
| 1 | 59,5 | 176,70 |
| 1,5 | 66,9 | 314,34 |
| 2 | 76,5 | 492,90 |

Test 5.-6. sind mit Wasser durchgeführt worden.

5. Test C-D:

| V Liq [l/min] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|---------------|--------|--------------|
| 0 | 48,8 | -22,32 |
| 2 | 60,7 | 199,02 |
| 2,5 | 62,7 | 236,22 |
| 3 | 64,4 | 267,84 |
| 4 | 67,5 | 325,50 |
| 5 | 70,9 | 388,74 |

6. Test A-B:

| V Liq [l/min] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|---------------|--------|--------------|
| 0 | 49,4 | -11,16 |
| 2 | 54,1 | 76,26 |
| 2,5 | 55,3 | 98,58 |
| 3 | 56,5 | 120,90 |
| 3,5 | 57,7 | 143,22 |
| 4 | 58,8 | 163,68 |
| 5 | 61,3 | 210,18 |

Test 7.-8. sind mit Wasser und Gas durchgeführt worden.

7.Test A-B und E (Gaszuführung):

| V Gas [l/min] | Dp [%] | p [mbar (ü)] | V Liq [l/min] |
|---------------|--------|--------------|---------------|
| 2,0 | 59,3 | 172,98 | 3 |
| 2,0 | 60,7 | 199,02 | 4 |
| 4,0 | 61,5 | 213,90 | 3 |
| 4,0 | 62,6 | 234,36 | 4 |
| 6,0 | 62,8 | 238,08 | 3 |
| 6,0 | 64,8 | 275,28 | 4 |

8.Test A-B und E&F (Gaszuführung):

| V Gas [l/min] | Dp [%] | p [mbar (ü)] | V Liq [l/min] |
|---------------|--------|--------------|---------------|
| 2,0 | 59,6 | 178,56 | 3 |
| 2,0 | 60,4 | 193,44 | 4 |
| 3,0 | 60,1 | 187,86 | 3 |
| 3,0 | 61,7 | 217,62 | 4 |
| 4,0 | 60,9 | 202,74 | 3 |
| 4,0 | 62,3 | 228,78 | 4 |
| 5,0 | 61,8 | 219,48 | 3 |
| 5,0 | 63,1 | 243,66 | 4 |
| 6,0 | 62,3 | 228,78 | 3 |
| 6,0 | 64,2 | 264,12 | 4 |

MaMeKo Nr. 20:

Test 1.-4. mit Gas (Luft) durchgeführt.

1.Test A-B:

| V Gas [l/s] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|-------------|--------|--------------|
| 1 | 55 | 93,00 |
| 1,5 | 59,7 | 180,42 |
| 2 | 66,1 | 299,46 |
| 2,5 | 73 | 427,80 |

2.Test E-B:

| V Gas [l/s] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|-------------|--------|--------------|
| 1,0 | 58,5 | 158,10 |
| 1,5 | 64,8 | 275,28 |
| 2,0 | 73,4 | 435,24 |
| 2,5 | 83,6 | 624,96 |

3.Test E-F:

| V Gas [l/s] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|-------------|--------|--------------|
| 1 | 51,6 | 0,00 |
| 1,5 | 53,1 | 27,90 |

| | | |
|-----|------|--------|
| 2 | 55,8 | 78,12 |
| 2,5 | 59,7 | 150,66 |

4. Test C-D:

| V Gas [l/s] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|-------------|--------|--------------|
| 1 | 58,2 | 152,52 |
| 1,5 | 64,5 | 269,70 |
| 2 | 73,3 | 433,38 |
| 2,5 | 81,5 | 585,90 |

Test 5.-6. sind mit Wasser durchgeführt worden.

5. Test C-D:

| V Liq [l/min] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|---------------|--------|--------------|
| 0,0 | 48,5 | -27,90 |
| 2,3 | 61,5 | 213,90 |
| 2,9 | 63,2 | 245,52 |
| 3,0 | 64,5 | 269,70 |
| 3,4 | 65,0 | 279,00 |
| 5,3 | 71,6 | 401,76 |

6. Test A-B:

| V Liq [l/min] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|---------------|--------|--------------|
| 0 | 49,6 | -7,44 |
| 2 | 58,1 | 150,66 |
| 2,5 | 59,5 | 176,70 |
| 3 | 61,4 | 212,04 |
| 3,2 | 62,2 | 226,92 |
| 4,6 | 64,4 | 267,84 |
| 5,5 | 66,1 | 299,46 |

Test 7.-8. sind mit Wasser und Gas durchgeführt worden.

7. Test A-B und E (Gaszuführung):

| V Gas [l/min] | Dp [%] | p [mbar (ü)] | V Liq [l/min] |
|---------------|--------|--------------|---------------|
| 2,0 | 67,5 | 325,50 | 4,3 |
| 4,0 | 70 | 372,00 | 4 |
| 6,0 | 71,4 | 398,04 | 3,8 |

8. Test A-B und E&F (Gaszuführung):

| V Gas [l/min] | Dp [%] | p [mbar (ü)] | V Liq [l/min] |
|---------------|--------|--------------|---------------|
| 2,0 | 69,1 | 355,26 | 4,1 |
| 3,0 | 69,7 | 366,42 | 4 |
| 3,0 | 70,5 | 381,30 | 4,3 |
| 4,0 | 70 | 372,00 | 4,1 |
| 4,0 | 74,3 | 451,98 | 4,8 |
| 5,0 | 71,6 | 401,76 | 4 |
| 5,0 | 75,7 | 478,02 | 4,8 |
| 6,0 | 73,5 | 437,10 | 3,7 |

MaMeKo Nr.28:

Test 1.-4. mit Gas (Luft) durchgeführt.

1. Test A-B:

| V Gas [l/s] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|-------------|--------|--------------|
| 1 | 53,3 | 61,38 |
| 1,5 | 56,7 | 124,62 |
| 2 | 62 | 223,20 |
| 2,5 | 67,5 | 325,50 |

2. Test E-B:

| V Gas [l/s] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|-------------|--------|--------------|
| 1 | 60,2 | 189,72 |
| 1,5 | 66,5 | 306,9 |
| 2 | 74,3 | 451,98 |

3. Test E-F:

| V Gas [l/s] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|-------------|--------|--------------|
| 1 | 52,4 | 0,00 |
| 1,5 | 54,8 | 44,64 |
| 2 | 58,7 | 117,18 |
| 2,5 | 64,3 | 221,34 |

4. Test C-D:

| V Gas [l/s] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|-------------|--------|--------------|
| 1 | 60,3 | 191,58 |
| 1,5 | 68,2 | 338,52 |
| 2 | 75,5 | 474,30 |

Test 5.-6. sind mit Wasser durchgeführt worden.

5. Test C-D:

| V Liq [l/min] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|---------------|--------|--------------|
| 0 | 49,6 | -7,44 |
| 2 | 60,6 | 197,16 |
| 2,5 | 62,1 | 225,06 |
| 3 | 63,8 | 256,68 |
| 3,5 | 65 | 279,00 |
| 4 | 67,1 | 318,06 |
| 5 | 71,4 | 398,04 |

6. Test A-B:

| V Liq [l/min] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|---------------|--------|--------------|
| 0 | 47,4 | -48,36 |
| 2 | 55,2 | 96,72 |
| 2,5 | 55,6 | 104,16 |
| 3 | 56,9 | 128,34 |
| 3,5 | 58,4 | 156,24 |
| 4 | 59,7 | 180,42 |

| | | |
|---|------|--------|
| 5 | 62,8 | 238,08 |
|---|------|--------|

Test 7.-8. sind mit Wasser und Gas durchgeführt worden.

7.Test A-B und E (Gaszuführung):

| V Gas [l/min] | Dp [%] | p [mbar (ü)] | V Liq [l/min] |
|---------------|--------|--------------|---------------|
| 2,0 | 64,7 | 273,42 | 3 |
| 2,0 | 66,1 | 299,46 | 4 |
| 4,0 | 69,7 | 366,42 | 3 |
| 4,0 | 71 | 390,60 | 4 |
| 5,0 | 72,4 | 416,64 | 3 |
| 5,0 | 73,3 | 433,38 | 4 |

8.Test A-B und E&F (Gaszuführung):

| V Gas [l/min] | Dp [%] | p [mbar (ü)] | V Liq [l/min] |
|---------------|--------|--------------|---------------|
| 2,0 | 65,9 | 295,74 | 3 |
| 2,0 | 66,9 | 314,34 | 4 |
| 3,0 | 67,6 | 327,36 | 3 |
| 3,0 | 68,7 | 347,82 | 4 |
| 4,0 | 69,9 | 370,14 | 3 |
| 4,0 | 71,3 | 396,18 | 4 |
| 5,0 | 72,2 | 412,92 | 3 |
| 5,0 | 73,4 | 435,24 | 4 |

MaMeKo Nr.32:

Test 1.-4. mit Gas (Luft) durchgeführt.

1.Test A-B:

| V Gas [l/s] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|-------------|--------|--------------|
| 1 | 55,8 | 107,88 |
| 1,5 | 59,1 | 169,26 |
| 2 | 63,9 | 258,54 |
| 2,5 | 67,8 | 331,08 |

2.Test E-B:

| V Gas [l/s] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|-------------|--------|--------------|
| 1,0 | 59,1 | 169,26 |
| 1,5 | 63,5 | 251,10 |
| 2,0 | 68,9 | 351,54 |
| 2,5 | 75,5 | 474,30 |

3.Test E-F:

| V Gas [l/s] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|-------------|--------|--------------|
| 1 | 51,9 | 0,00 |
| 1,5 | 53,3 | 26,04 |
| 2 | 55,3 | 63,24 |
| 2,5 | 58,2 | 117,18 |

| | | |
|---|------|--------|
| 3 | 61,8 | 184,14 |
|---|------|--------|

4. Test C-D:

| V Gas [l/s] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|-------------|--------|--------------|
| 1 | 53,2 | 59,52 |
| 1,5 | 55,6 | 104,16 |
| 2 | 58,3 | 154,38 |
| 2,5 | 61,8 | 219,48 |

Test 5.-6. sind mit Wasser durchgeführt worden.

5. Test C-D:

| V Liq [l/min] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|---------------|--------|--------------|
| 0,0 | 51,1 | 20,46 |
| 2,0 | 54,7 | 87,42 |
| 2,5 | 55,0 | 93,00 |
| 3,0 | 55,3 | 98,58 |
| 3,5 | 55,7 | 106,02 |
| 4,0 | 56,1 | 113,46 |
| 5,0 | 57,2 | 133,92 |

6. Test A-B:

| V Liq [l/min] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|---------------|--------|--------------|
| 0 | 50,9 | 16,74 |
| 2 | 53,5 | 65,10 |
| 2,5 | 54,8 | 89,28 |
| 3 | 55,5 | 102,30 |
| 3,5 | 56 | 111,60 |
| 4 | 57,1 | 132,06 |
| 5 | 59,1 | 169,26 |

Test 7.-8. sind mit Wasser und Gas durchgeführt worden.

7. Test A-B und E (Gaszuführung):

| V Gas [l/min] | Dp [%] | p [mbar (ü)] | V Liq [l/min] |
|---------------|--------|--------------|---------------|
| 2,0 | 60,1 | 187,86 | 3 |
| 2,0 | 60,7 | 199,02 | 4 |
| 3,0 | 62,2 | 226,92 | 3 |
| 3,0 | 63 | 241,80 | 4 |
| 4,0 | 63,2 | 245,52 | 3 |
| 4,0 | 64,6 | 271,56 | 4 |
| 5,0 | 65,2 | 282,72 | 3 |
| 5,0 | 65,9 | 295,74 | 4 |
| 6,0 | 66,1 | 299,46 | 3 |
| 6,0 | 67,8 | 331,08 | 4 |

8. Test A-B und E&F (Gaszuführung):

| V Gas [l/min] | Dp [%] | p [mbar (ü)] | V Liq [l/min] |
|---------------|--------|--------------|---------------|
| 2,0 | 60,3 | 191,58 | 3 |
| 2,0 | 61,1 | 206,46 | 4 |

| | | | |
|-----|------|--------|---|
| 3,0 | 62,2 | 226,92 | 3 |
| 3,0 | 63,2 | 245,52 | 4 |
| 4,0 | 64,1 | 262,26 | 3 |
| 4,0 | 64,6 | 271,56 | 4 |
| 5,0 | 65,4 | 286,44 | 3 |
| 5,0 | 66,1 | 299,46 | 4 |
| 6,0 | 66,9 | 314,34 | 3 |
| 6,0 | 67,9 | 332,94 | 4 |

MaMeKo Nr.33:

Test 1.-4. mit Gas (Luft) durchgeführt.

1.Test A-B:

| V Gas [l/s] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|-------------|--------|--------------|
| 1 | 53,4 | 63,24 |
| 1,5 | 56 | 111,60 |
| 2 | 60,5 | 195,30 |
| 2,5 | 66,3 | 303,18 |

2.Test E-B:

| V Gas [l/s] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|-------------|--------|--------------|
| 1 | 57,7 | 143,22 |
| 1,5 | 62,3 | 228,78 |
| 2 | 68,7 | 347,82 |
| 2,5 | - | - |

3.Test E-F:

| V Gas [l/s] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|-------------|--------|--------------|
| 1 | 51,8 | 0,00 |
| 1,5 | 53,5 | 31,62 |
| 2 | 56,3 | 83,70 |
| 2,5 | 60,2 | 156,24 |

4.Test C-D:

| V Gas [l/s] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|-------------|--------|--------------|
| 1 | 51,3 | 24,18 |
| 1,5 | 53,8 | 70,68 |
| 2 | 57,9 | 146,94 |
| 2,5 | 62,3 | 228,78 |

Test 5.-6. sind mit Wasser durchgeführt worden.

5.Test C-D:

| V Liq [l/min] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|---------------|--------|--------------|
| 0,0 | 47,9 | -39,06 |
| 2,0 | 54,5 | 83,70 |

| | | |
|-----|------|--------|
| 2,5 | 55,2 | 96,72 |
| 3,0 | 55,6 | 104,16 |
| 4,0 | 56,6 | 122,76 |
| 5,0 | 57,4 | 137,64 |

6.Test A-B:

| V Liq [l/min] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|---------------|--------|--------------|
| 0 | 48 | -37,20 |
| 2 | 57 | 130,20 |
| 2,5 | 58,5 | 158,10 |
| 3 | 60,3 | 191,58 |
| 3,5 | 61,6 | 215,76 |
| 4 | 62,5 | 232,50 |
| 5 | 63,1 | 243,66 |

Test 7.-8. sind mit Wasser und Gas durchgeführt worden.

7.Test A-B und E (Gaszuführung):

| V Gas [l/min] | Dp [%] | p [mbar (ü)] | V Liq [l/min] |
|---------------|--------|--------------|---------------|
| 2,0 | 62,3 | 228,78 | 3 |
| 2,0 | 63,1 | 243,66 | 4 |
| 4,0 | 64,9 | 277,14 | 3 |
| 4,0 | 66 | 297,60 | 4 |

8.Test A-B und E&F (Gaszuführung):

| V Gas [l/min] | Dp [%] | p [mbar (ü)] | V Liq [l/min] |
|---------------|--------|--------------|---------------|
| 2,0 | 62,3 | 228,78 | 3 |
| 2,0 | 62,8 | 238,08 | 4 |
| 3,0 | 63,5 | 251,10 | 3 |
| 3,0 | 64,5 | 269,70 | 4 |
| 4,0 | 65,2 | 282,72 | 3 |
| 4,0 | 66,6 | 308,76 | 4 |
| 5,0 | 66,2 | 301,32 | 3 |
| 5,0 | 67,6 | 327,36 | 4 |
| 6,0 | 67,4 | 323,64 | 3 |
| 6,0 | 68,5 | 344,10 | 4 |

MaMeKo Nr.34:

Test 1.-4. mit Gas (Luft) durchgeführt.

1.Test A-B:

| V Gas [l/s] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|-------------|--------|--------------|
| 1 | 52,7 | 50,22 |
| 1,5 | 56 | 111,60 |
| 2 | 60,6 | 197,16 |
| 2,5 | 66,3 | 303,18 |

2.Test E-B:

| V Gas [l/s] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|-------------|--------|--------------|
| 1,0 | 78,0 | 520,80 |
| 1,5 | 86,6 | 680,76 |
| 2,0 | 98,5 | 902,10 |

3.Test E-F:

| V Gas [l/s] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|-------------|--------|--------------|
| 1 | 65,6 | 290,16 |
| 1,5 | 79,5 | 548,70 |
| 2 | 96,8 | 870,48 |

4.Test C-D:

| V Gas [l/s] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|-------------|--------|--------------|
| 1 | 52,6 | 48,36 |
| 1,5 | 55,5 | 102,30 |
| 2 | 59 | 167,40 |
| 2,5 | 63 | 241,80 |

Test 5.-6. sind mit Wasser durchgeführt worden.

5.Test C-D:

| V Liq [l/min] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|---------------|--------|--------------|
| 0,0 | 48,7 | -24,18 |
| 2,7 | 56,7 | 124,62 |
| 3,0 | 58,1 | 150,66 |
| 3,4 | 58,0 | 148,80 |
| 5,3 | 60,6 | 197,16 |

6.Test A-B:

| V Liq [l/min] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|---------------|--------|--------------|
| 2,6 | 58,8 | 163,68 |
| 3,2 | 60,4 | 193,44 |
| 3,7 | 60,3 | 191,58 |
| 4,1 | 62,3 | 228,78 |
| 4,6 | 60 | 186,00 |
| 5 | 62,3 | 228,78 |
| 5,5 | 64 | 260,40 |

Test 7.-8. sind mit Wasser und Gas durchgeführt worden.

7.Test A-B und E (Gaszuführung):

| V Gas [l/min] | Dp [%] | p [mbar (ü)] | V Liq [l/min] |
|---------------|--------|--------------|---------------|
| 8,0 | 73 | 427,80 | 4 |
| 8,0 | 73,9 | 444,54 | 4 |

8.Test A-B und E&F (Gaszuführung):

| V Gas [l/min] | Dp [%] | p [mbar (ü)] | V Liq [l/min] |
|---------------|--------|--------------|---------------|
| 4,0 | 69,2 | 357,12 | 4,8 |
| 5,0 | 70,9 | 388,74 | 4,7 |
| 6,0 | 72,3 | 414,78 | 4,6 |

MaMeKo Nr.36:

Test 1.-4. mit Gas (Luft) durchgeführt.

1.Test A-B:

| V Gas [l/s] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|-------------|--------|--------------|
| 1 | 53,6 | 66,96 |
| 1,5 | 56,6 | 122,76 |
| 2 | 59,7 | 180,42 |
| 2,5 | 65 | 279,00 |

2.Test E-B:

| V Gas [l/s] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|-------------|--------|--------------|
| 1,0 | 60,0 | 186,00 |
| 1,5 | 65,5 | 288,30 |
| 2,0 | 73,5 | 437,10 |
| 2,5 | 83,0 | 613,80 |

3.Test E-F:

| V Gas [l/s] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|-------------|--------|--------------|
| 1 | 55,4 | 0,00 |
| 1,5 | 58,3 | 53,94 |
| 2 | 62,9 | 139,50 |
| 2,5 | 69,5 | 262,26 |

4.Test C-D:

| V Gas [l/s] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|-------------|--------|--------------|
| 1 | 53 | 55,80 |
| 1,5 | 54,5 | 83,70 |
| 2 | 57 | 130,20 |
| 2,5 | 60,1 | 187,86 |

Test 5.-6. sind mit Wasser durchgeführt worden.

5.Test C-D:

| V Liq [l/min] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|---------------|--------|--------------|
| 0,0 | 49,5 | -9,30 |
| 2,7 | 55,2 | 96,72 |
| 3,0 | 55,5 | 102,30 |
| 3,6 | 56,0 | 111,60 |
| 4,0 | 56,7 | 124,62 |
| 5,0 | 58,6 | 159,96 |

6.Test A-B:

| V Liq [l/min] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|---------------|--------|--------------|
| 0 | 48,6 | -26,04 |
| 2 | 55,2 | 96,72 |
| 3 | 56,5 | 120,90 |
| 3,3 | 57,2 | 133,92 |

| | | |
|-----|------|--------|
| 4,1 | 58,9 | 165,54 |
| 4,8 | 60,8 | 200,88 |
| 5 | 61,5 | 213,90 |
| 5,5 | 63,4 | 249,24 |

Test 7.-8. sind mit Wasser und Gas durchgeführt worden.

7.Test A-B und E (Gaszuführung):

| V Gas [l/min] | Dp [%] | p [mbar (ü)] | V Liq [l/min] |
|---------------|--------|--------------|---------------|
| 2,0 | 60,3 | 191,58 | 3 |
| 2,0 | 61,9 | 221,34 | 4 |
| 4,0 | 62,3 | 228,78 | 3 |
| 4,0 | 63,8 | 256,68 | 4 |
| 6,0 | 63,6 | 252,96 | 3 |
| 6,0 | 65,5 | 288,30 | 4 |
| 6,0 | 66,2 | 301,32 | 4,3 |

8.Test A-B und E&F (Gaszuführung):

| V Gas [l/min] | Dp [%] | p [mbar (ü)] | V Liq [l/min] |
|---------------|--------|--------------|---------------|
| 2,0 | 60,9 | 202,74 | 3 |
| 2,0 | 61,9 | 221,34 | 4 |
| 2,5 | 62,7 | 236,22 | 4 |
| 3,0 | 61,9 | 221,34 | 3 |
| 3,0 | 63,1 | 243,66 | 4 |
| 4,0 | 62,3 | 228,78 | 3 |
| 4,0 | 64 | 260,40 | 4 |
| 5,0 | 63,4 | 249,24 | 3 |
| 5,0 | 64,3 | 265,98 | 4 |
| 6,0 | 63,6 | 252,96 | 3 |
| 6,0 | 65,5 | 288,30 | 4 |

MaMeKo Nr.37:

Test 1.-4. mit Gas (Luft) durchgeführt.

1.Test A-B:

| V Gas [l/s] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|-------------|--------|--------------|
| 1 | 53 | 55,80 |
| 1,5 | 56,4 | 119,04 |
| 2 | 61,7 | 217,62 |
| 2,5 | 69,4 | 360,84 |

2.Test E-B:

| V Gas [l/s] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|-------------|--------|--------------|
| 1 | 56,6 | 122,76 |
| 1,5 | 61,2 | 208,32 |

| | | |
|-----|------|--------|
| 2 | 67,6 | 327,36 |
| 2,5 | 75,3 | 470,58 |

3.Test E-F:

| V Gas [l/s] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|-------------|--------|--------------|
| 1 | 50 | 0,00 |
| 1,5 | 51,2 | 22,32 |
| 2 | 53,3 | 61,38 |
| 2,5 | 56,1 | 113,46 |

4.Test C-D:

| V Gas [l/s] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|-------------|--------|--------------|
| 1 | 52,1 | 39,06 |
| 1,5 | 55,1 | 94,86 |
| 2 | 60,7 | 199,02 |
| 2,5 | 67,9 | 332,94 |

Test 5.-6. sind mit Wasser durchgeführt worden.

5.Test C-D:

| V Liq [l/min] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|---------------|--------|--------------|
| 0 | 49,6 | -7,44 |
| 2 | 55,9 | 109,74 |
| 2,5 | 56,6 | 122,76 |
| 3 | 58,3 | 154,38 |
| 4 | 61 | 204,60 |
| 5 | 63,8 | 256,68 |

6.Test A-B:

| V Liq [l/min] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|---------------|--------|--------------|
| 0 | 50,4 | 7,44 |
| 2 | 56,9 | 128,34 |
| 2,5 | 57,3 | 135,78 |
| 3 | 59,8 | 182,28 |
| 3,5 | 62,7 | 236,22 |
| 4 | 63 | 241,80 |
| 5 | 66,1 | 299,46 |

Test 7.-8. sind mit Wasser und Gas durchgeführt worden.

7.Test A-B und E (Gaszuführung):

| V Gas [l/min] | Dp [%] | p [mbar (ü)] | V Liq [l/min] |
|---------------|--------|--------------|---------------|
| 2,0 | 58,4 | 156,24 | 3 |
| 2,0 | 60 | 186,00 | 4 |
| 4,0 | 61,2 | 208,32 | 3 |
| 4,0 | 62 | 223,20 | 4 |
| 6,0 | 63,6 | 252,96 | 3 |
| 6,0 | 64,3 | 265,98 | 4 |

8.Test A-B und E&F (Gaszuführung):

| V Gas [l/min] | Dp [%] | p [mbar (ü)] | V Liq [l/min] |
|---------------|--------|--------------|---------------|
|---------------|--------|--------------|---------------|

| | | | |
|-----|------|--------|---|
| 2,0 | 59,1 | 169,26 | 3 |
| 2,0 | 59,8 | 182,28 | 4 |
| 3,0 | 60 | 186,00 | 3 |
| 3,0 | 60,8 | 200,88 | 4 |
| 4,0 | 60,7 | 199,02 | 3 |
| 4,0 | 62,2 | 226,92 | 4 |
| 5,0 | 62,5 | 232,50 | 3 |
| 5,0 | 63,5 | 251,10 | 4 |
| 6,0 | 63,8 | 256,68 | 3 |
| 6,0 | 64,4 | 267,84 | 4 |

MaMeKo Nr.38:

Test 1.-4. mit Gas (Luft) durchgeführt.

1.Test A-B:

| V Gas [l/s] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|-------------|--------|--------------|
| 1 | 53,3 | 61,38 |
| 1,5 | 56,9 | 128,34 |
| 2 | 61,3 | 210,18 |
| 2,5 | 66,9 | 314,34 |

2.Test E-B:

| V Gas [l/s] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|-------------|--------|--------------|
| 1,0 | 60,6 | 197,16 |
| 1,5 | 65,7 | 292,02 |
| 2,0 | 73,6 | 438,96 |
| 2,5 | 83,4 | 621,24 |

3.Test E-F:

| V Gas [l/s] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|-------------|--------|--------------|
| 1 | 57 | 0,00 |
| 1,5 | 62,5 | 102,30 |
| 2 | 71,1 | 262,26 |
| 2,5 | 81,7 | 459,42 |

4.Test C-D:

| V Gas [l/s] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|-------------|--------|--------------|
| 1 | 53,2 | 59,52 |
| 1,5 | 54,9 | 91,14 |
| 2 | 58 | 148,80 |
| 2,5 | 64,5 | 269,70 |

Test 5.-6. sind mit Wasser durchgeführt worden.

5.Test C-D:

| V Liq [l/min] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|---------------|--------|--------------|
| 0,0 | 51,1 | 20,46 |

| | | |
|-----|------|-------|
| 2,9 | 54,7 | 87,42 |
| 3,3 | 55,0 | 93,00 |
| 5,2 | 55,3 | 98,58 |

6. Test A-B:

| V Liq [l/min] | Dp [%] | p [mbar (ü)] |
|---------------|--------|--------------|
| 2,6 | 50,9 | 16,74 |
| 3,3 | 53,5 | 65,10 |
| 3,7 | 54,8 | 89,28 |
| 4,7 | 55,5 | 102,30 |
| 5 | 56 | 111,60 |
| 5,5 | 57,1 | 132,06 |

Anhang Messung Membrankontaktofen in der AKM

wird von TU Berlin nachgereicht

Anhang Modell Membranabsorption

Bei der Modellierung der thermodynamischen Bilanzen an den Membranabsorber wurde angenommen, dass der transmembrane Druck beidseitig im Gleichgewicht steht, was in der Praxis nicht unbedingt immer der Fall ist. Hierbei wurde die Bilanzierung in den Membranporen auf eine Grenzfläche zwischen dem Ammoniakgas und der Lösung beschränkt, wobei auf die Berechnung der Lösungswärme verzichtet wurde.

Die Stoffdaten wurden von Tillner-Roth (1998) übernommen, [1]. Ammoniakgas im Hohlfaserlumen wurde als rein angenommen.

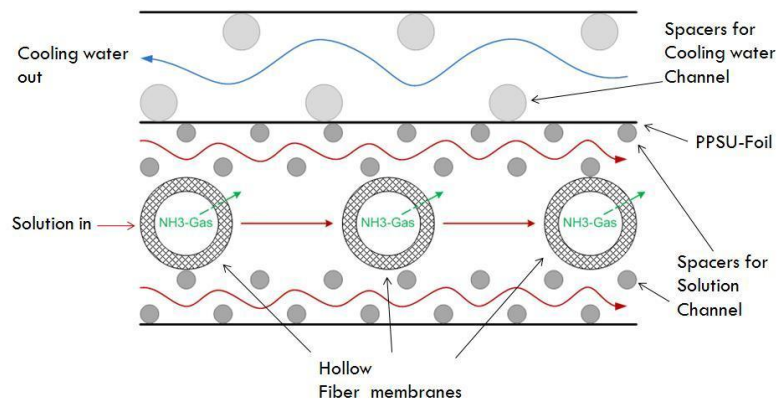


Abbildung 1: Schemata der Strömungsführung in einem kleinen Ausschnitt der simultangekühlten Membranabsorber

Abbildung 1 zeigt die Methode, wie die Lage der Hohlfasermembranen im Lösungskanal. Es wird auch gezeigt, wie die Kühlwasserkanäle durch Spacer offen gespannt werden. Die so genannten „Feed Spacers“ haben nicht nur die Aufgabe den nötigen Abstand zu halten, sie wirken auch als so genannte „Turbulentpromoter“, die durch die Steigerung der Turbulenz in der Strömung den Energie- und Massentransport steigern. Es gibt unterschiedliche Spacertypen, wobei die Wahl der Spacer einen großen Einfluss auch auf die Druckverluste hat.

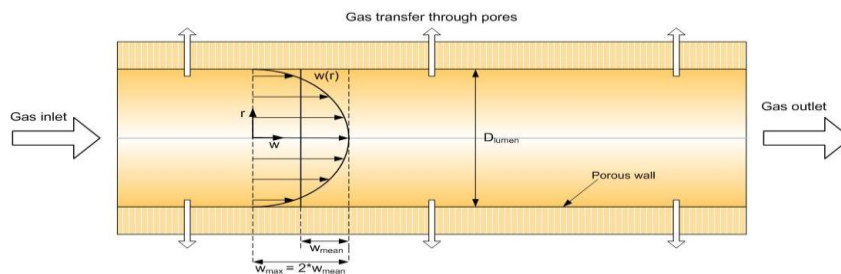


Abbildung 2: Schemata des Längsschnitts der Ammoniak Gasführung in Hohlfaserlumen, Parabolische Geschwindigkeitsprofile in einer laminaren Viskosen-Strömung

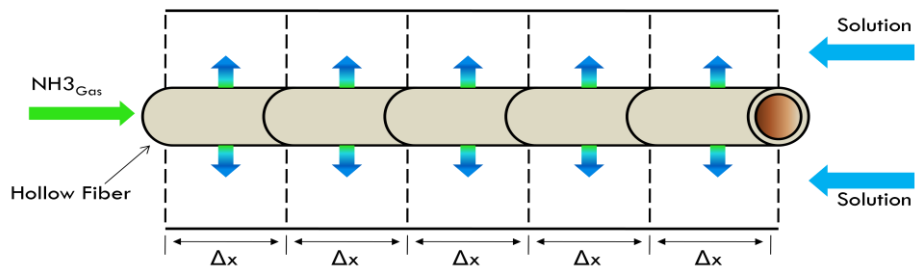


Abbildung 3: Schemata der Ammoniakströmung aus der Hohlfaser in Kreuzstrom zu der Lösung

Die Abbildungen 2 und 3 zeigen die Schemata der Ammoniak Gasführung in einem kleinen Ausschnitt der Hohlfaserlumen. Hier sieht man, dass Ammoniakgas aus den Hohlfasern in Kreuzstrom zu der Lösung ausströmt.

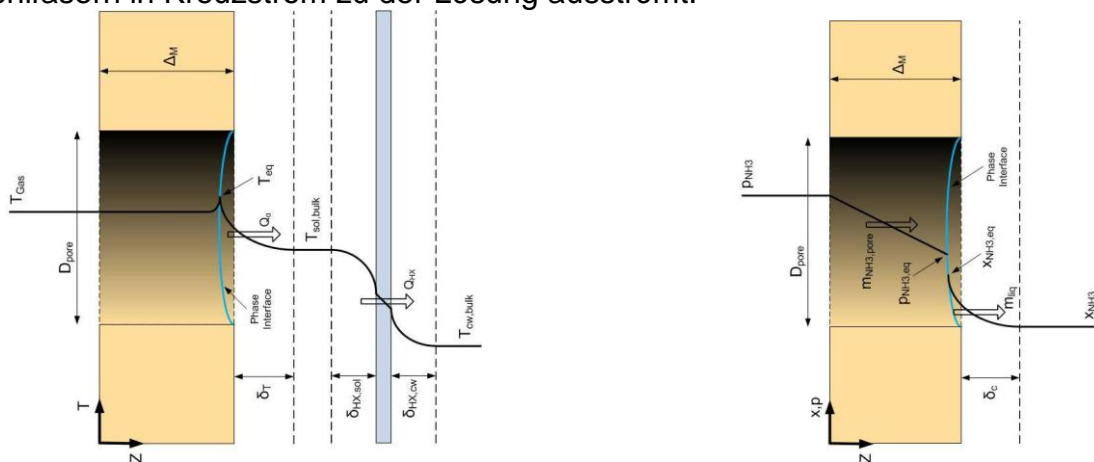


Abbildung 4: Schemata der Temperatur-, Druck- und Konzentrationsprofile in der Membranumgebung.

Abbildung 4 repräsentiert den Temperatur-, Druck und Konzentrationsverlauf während des Absorptionsprozesses. Die Simulation der Druckverluste des Ammoniakgases in den Lumen ergab, dass die Druckverluste in den Lumen vernachlässigbar sind. Die größten Widerstände werden durch den Ammoniak Massentransport durch die Poren und in der Grenzschicht verursacht.

Die Abbildungen 5 und 6 zeigen eine diskrete 2D Aufteilung zwischen der Kühlwasserseite und der Lösungsseite, wobei die Lösungsseite wiederum in Elemente mit und ohne Hohlfaser aufgeteilt wird. In den Elementen mit Hohlfasern werden Absorptionsleistung, Druckverlust und Wärmeübertragung berechnet. In den Elementen ohne Hohlfasern werden jeweils nur die Druckverluste und die Wärmeübertragung berechnet. Abbildung 5 zeigt den Gleichstromzustand zwischen Kühlwasser und Lösung, Abbildung 6 den Gegenstrom.

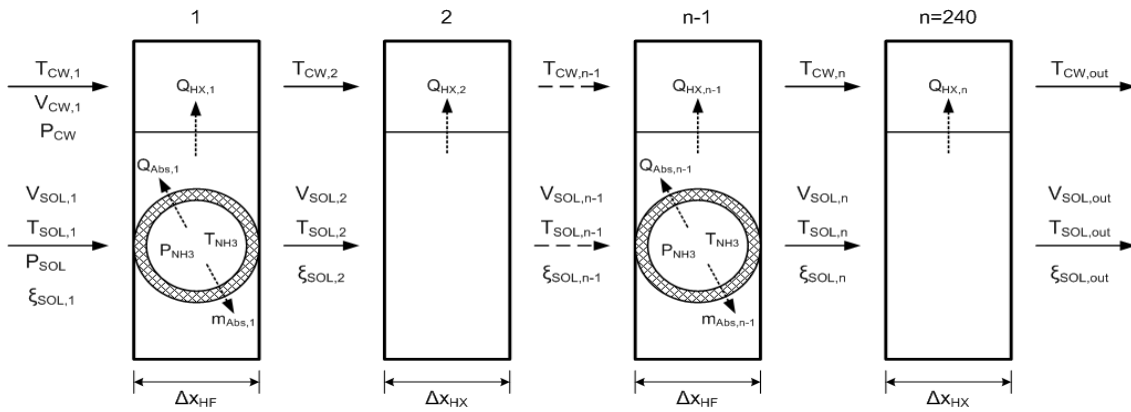


Abbildung 5: Modellierung des Gleichstromes der simultangekühlten Membranabsorber

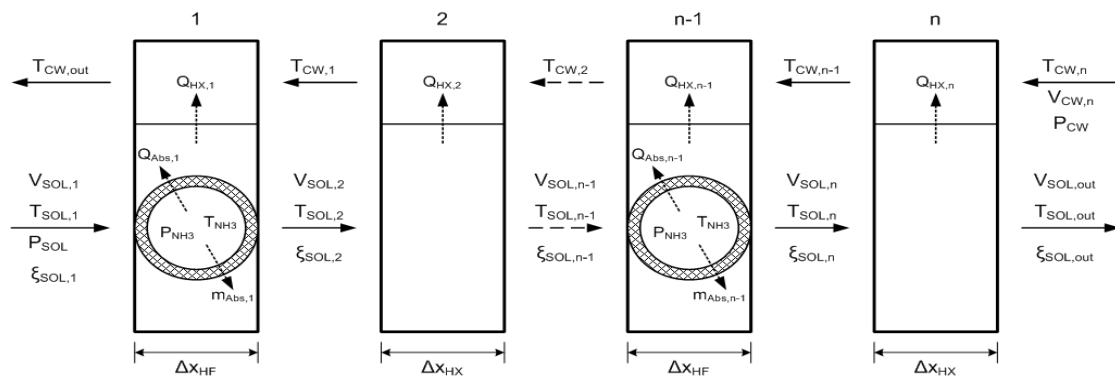


Abbildung 6: Modellierung des Gegenstromes der simultangekühlten Membranabsorber

Abbildung 7 zeigt einen Überblick über die Aufteilung der Länge und Breite des Moduls in Simulationselemente, das als Ergebnis sich zu einer 2-Dimensionalen Matrix zusammensetzt. Da Ammoniakgas und Lösung in Kreuzstrom zueinander verlaufen, ist eine solche Konfiguration sehr sinnvoll.

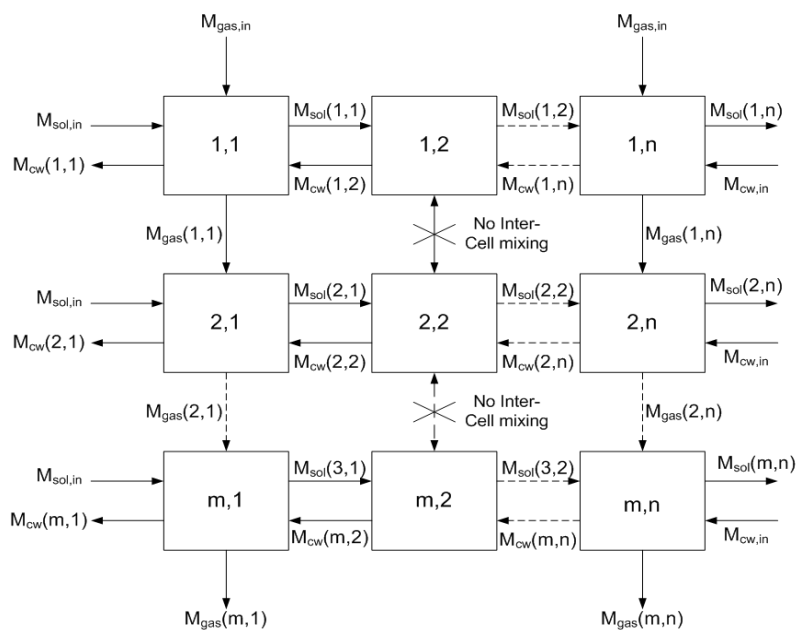


Abbildung 7: Diskrete 2D Methode zur Simulation der Strömung im simultangekühlten Membranabsorber, Ammoniakgas führt in Kreuzstrom zu Lösung, Kühlwasser und Lösung in Gegenstrom zueinander.

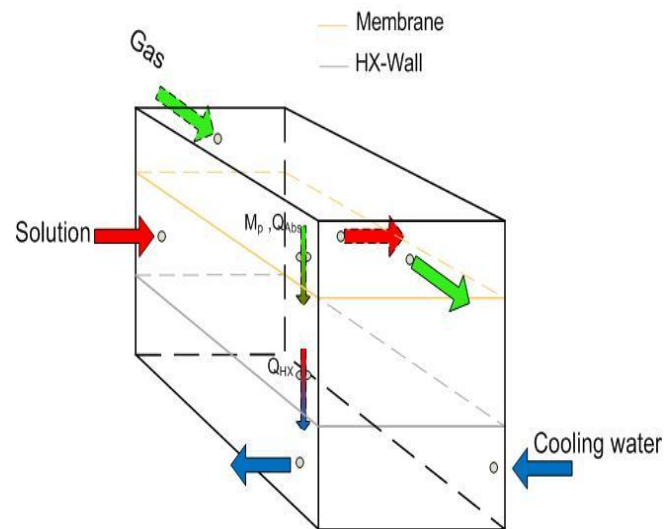


Abbildung 8: Schemata zur Führung der Strömung im einen Ausschnitt der simultangekühlten Membranabsorber. Ammoniakgas führt im Kreuzstrom zur Lösung, Kühlwasser und Lösung in Gegenstrom zueinander.

[1] Tillner-Roth, R.; Friend, D.G.: A Helmholtz Free energy Formulation of the Thermodynamic Properties of the Mixtures Water/Ammonia, Journal of Physical and Chemical Reference Data (1998)