

Förderverhalten eines Plattenaustreibers mit nachgeschaltetem Förderrohr für thermisch angetriebene Kälteanlagen

Bernd Bierling, Fabian Schmid, Klaus Spindler

bierling@itw.uni-stuttgart.de

**Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW)
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 6, 70550 Stuttgart**

Kurzfassung

Diffusions-Absorptionskältemaschinen (DAKM) werden durch Wärme angetrieben, die am Austreiber bzw. an der Thermosiphonpumpe zugeführt wird. Die Wärmezufuhr führt zur partiellen Verdampfung von flüssigem Kältemittel und zur Entstehung von Dampfblasen. Diese schließen sich zu Kolben zusammen und fördern die Lösung in der Thermosiphonpumpe mit nach oben. Die partielle Verdampfung sorgt neben der Förderung dafür, dass das Kältemittel aus der Lösung ausgetrieben wird.

Am Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) werden Untersuchungen zur Beheizung einer DAKM über einen Austreiber in Form eines Plattenwärmeübertragers mit nachgeschaltetem vertikalen Förderrohr durchgeführt. Die Beheizung des Plattenaustreibers am Fußpunkt der Thermosiphonpumpe ermöglicht ein gutes Förderverhalten und eine kompakte Bauweise der DAKM. Die Beheizung erfolgt über einen externen Heizkreislauf. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Förderung der Lösung mittels Plattenwärmeübertrager im Vergleich zu einem Doppelrohrwärmeübertrager bei deutlich geringerer logarithmischer Temperaturdifferenz zwischen Heiz- und Arbeitsmedium auftritt.

Das Förderverhalten von verschiedenen Plattenaustreibern mit nachgeschaltetem Förderrohr wird mit demineralisiertem Wasser als Reinstoff sowie dem Zweistoffgemisch Ethanol-Wasser als Arbeitsmedium dargestellt. Das Förderverhalten der Thermosiphonpumpe wird unter der Variation der Antriebstemperatur des Heizkreislaufs, der Plattenstruktur, der Strömungsart sowie -führung des Plattenaustreibers analysiert. Zudem wird der Übergang vom Plattenaustreiber auf das nachgeschaltete Förderrohr untersucht. Zusammenhänge der Zweiphasenströmung im Plattenaustreiber und im Förderrohr unter Verwendung eines Zweistoffgemisches werden erläutert.

Stichworte: *Plattenaustreiber, Thermosiphonpumpe, Vertikales Förderrohr, Zweistoffgemisch, Zweiphasenströmung, Förderverhältnis*

1. Einleitung und Motivation

Das Thermosiphonprinzip kommt vielfältig zum Einsatz. Zu den Einsatzgebieten mit einem Reinstoff als Arbeitsmedium gehören unter anderem elektrisch beheizte Filterkaffeemaschinen und thermisch beheizte Naturumlaufverdampfer. Ein wichtiges Einsatzgebiet von Thermosiphonpumpen ist die Diffusions-Absorptionskältemaschine (DAKM). DAKMs werden mit dem Stoffpaar Ammoniak-Wasser betrieben, wobei als Hilfsgas entweder Helium oder Wasserstoff verwendet wird. Die Thermosiphonpumpe einer DAKM wird thermisch beheizt. Einerseits dient die Thermosiphonpumpe als Antrieb einer DAKM. Durch die Beheizung verdampft das Kältemittel partiell. Die entstandenen Dampfblasen schließen sich bestenfalls zu Kolben zusammen und fördern die flüssige Lösung mit sich nach oben. Andererseits ist die Thermosiphonpumpe der Austreiber einer DAKM, wobei Kältemittel aus der Lösung desorbiert wird. Im kommerziellen Bereich werden DAKMs als Hotel- und Camping-Kühlschränke eingesetzt. Dabei wird die benötigte Wärme mittels elektrischem Heizstab oder Gasbrenner im unteren Bereich der Thermosiphonpumpe zugeführt.

Am Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) ist die DAKM ein aktuelles Forschungsthema. SCHMID entwickelte eine direkt angetriebene solare Kälteanlage mit einer Kälteleistung von bis zu 400 W [1]. Die Thermosiphonpumpe ist dabei direkt in einem doppelt verglasten Flachkollektor integriert und wird somit solarthermisch flächig beheizt. Die Thermosiphonpumpe besteht aus sechs parallel angeordneten Förderrohren. Die flächige Beheizung der Thermosiphonpumpe mit einer relativen Heizlänge von etwa $\varphi = 95\%$ hat jedoch im Vergleich zu einer teilflächigen bzw. punktuellen Beheizung ein schlechteres Förderverhältnis [2]. Aufgrund der höheren mittleren Dichte über der Förderrohrlänge wird bei gleicher Menge des erzeugten Dampfes weniger Flüssigkeit gefördert. Nachteilig am Konzept der direkten Nutzung der Solarstrahlung ist der zugeführte Wärmestrom, der zeitlich schwankt. Der zugeführte Wärmestrom ist aufgrund des niedrigen Kollektorwirkungsgrades des Prototyps zudem gering und stellt somit einen limitierenden Faktor für die DAKM dar. Des Weiteren besteht ein Konflikt zwischen dem für die einfallende Solarstrahlung optimalen Aufstellwinkel des Solarkollektors und der für die Förderung in der Thermosiphonpumpe optimalen, senkrechten Stellung der Förderrohre.

Ein neues Beheizungskonzept für die DAKM wurde entwickelt, das die aufgeführten Schwachstellen beseitigt. Beim neuen Beheizungskonzept wird ein Plattenwärmeübertrager (PWÜ) als Austreiber und ein nachgeschaltetes Förderrohr als Thermosiphonpumpe eingesetzt. Der PWÜ wird über einen externen Heizkreislauf beheizt. Dieses Konzept kann zu einer Steigerung der Leistungszahl und der Leistungsdichte einer DAKM führen. Ein wesentlicher Vorteil ist die Beheizung am unteren Ende des

Förderrohres über eine große wärmeübertragende Fläche. Die Beheizung am unteren Ende des Förderrohres führt zu einer geringen mittleren Dichte über der Förderrohrlänge und somit zu einem hohen Fördermassenstrom [2]. Aufgrund der großen wärmeübertragenden Fläche ergibt sich wiederum eine niedrige externe Antriebstemperatur. Eine kompakte Bauweise der Anlage bei gleichzeitiger Entkopplung von Wärmeübertragung und Förderung ist die Folge. Verschiedene Wärmequellen können zur Beheizung der DAKM über den externen Heizkreislauf verwendet werden.

2. Stand der Technik

2.1 DAKMs mit thermisch beheizter Thermosiphonpumpe über einen externen Heizkreislauf

Untersuchungen zu einer DAKM mit thermisch beheizter Thermosiphonpumpe über einen externen Kreislauf wurden von JAKOB ET. AL durchgeführt [3], [4]. Eine solar angetriebene Thermosiphonpumpe in Form eines Rohrbündelwärmeübertragers wurde entwickelt [5]. Dabei strömt das Arbeitsmedium (Ammoniak-Wasser) in vertikalen Förderrohren. Das Heizmedium befindet sich im Mantelraum. Die notwendige externe Antriebstemperatur liegt im Bereich zwischen 100 °C und 150 °C.

Die gute Tauglichkeit von rein thermisch angetriebenen dezentralen Kältemaschinen über einen externen Heizkreislauf beschreiben RATTNER und GARIMELLA [6], [7], [8]. Dies ist durch die gesteigerte Wärmeübertragungsfläche gegenüber punktuell beheizter Thermosiphonpumpen möglich. RATTNER und GARIMELLA setzen einen Doppelrohrwärmeübertrager (DWÜ) als Thermosiphonpumpe ein, wobei das Innenrohr als Förderrohr dient. Hauptaugenmerk wird dabei auf die extern benötigte Antriebstemperatur gelegt, mit dem Ziel, Wärmequellen auf möglichst geringem Temperaturniveau nutzbar zu machen. Die relative Heizlänge beträgt $\varphi = 91 \%$. Der DWÜ wird im Gleichstrom betrieben.

2.2 Verdampfen im PWÜ

Eine Übersicht über Arbeiten zum Verdampfen in Plattenwärmeübertragern gibt SCHMADL [9]. Die von SCHMADL durchgeführte Literaturrecherche dient zur Gewinnung von Erkenntnissen für die Gestaltung von Versuchsanlagen. Eingesetzte Messtechnik, Messergebnisse und daraus abgeleitete Korrelationen im Hinblick auf Auslegungsg Grundlagen sind Schwerpunkte der Analyse.

ANDRÉ ET. AL betrachten den Wärmeübergang bei der Verdampfung von Ammoniak in einem PWÜ [10]. Mittels über der Höhe des PWÜs angebrachter Thermolemente werden lokale Wärmeübergangskoeffizienten ermittelt. ANDRÉ untersucht in seiner

Dissertation überflutete Verdampfer mit dem Arbeitsmedium Ammoniak [11]. An zwei Verdampfer-Plattentypen, die sich durch den Prägewinkel unterscheiden, werden Untersuchungen durchgeführt. Wärmeübergangskoeffizienten werden in Abhängigkeit vom Strömungsdampfgehalt, der Massen- und der Wärmestromdichte ermittelt.

Ähnliches untersuchen auch DJORDJEVIC und KABELAC mit Ammoniak sowie R134a als Kältemittel [12]. Zusätzlich dazu wird der Einfluss der Strömungsart (Gegen- und Gleichstrombetrieb) auf die Verdampfung untersucht. Um bessere Kenntnisse zur lokalen Wärmeübertragung bei der Zweiphasenströmung im PWÜ zu bekommen, untersuchen GRABENSTEIN und KABELAC Strömungsformen, die bei der zweiphasigen Strömung im PWÜ auftreten [13]. Des Weiteren wird eine Strömungsformkarte für die Kondensation in PWÜs dargestellt.

Zusammenhänge über die Wärmeübertragung bei der Verdampfung in einem PWÜ für das Stoffpaar Ammoniak/Wasser beschreiben TÁBOAS ET. AL [14].

3. Grundlagen der Thermosiphonpumpe

Das Grundprinzip der Thermosiphonpumpe wird anhand der schematischen Darstellung aus Abbildung 3.1 erläutert. Zwei vertikale Säulen, bestehend aus Reservoir und Förderrohr, sind über eine horizontale Leitung miteinander verbunden und bilden ein U-Rohr.

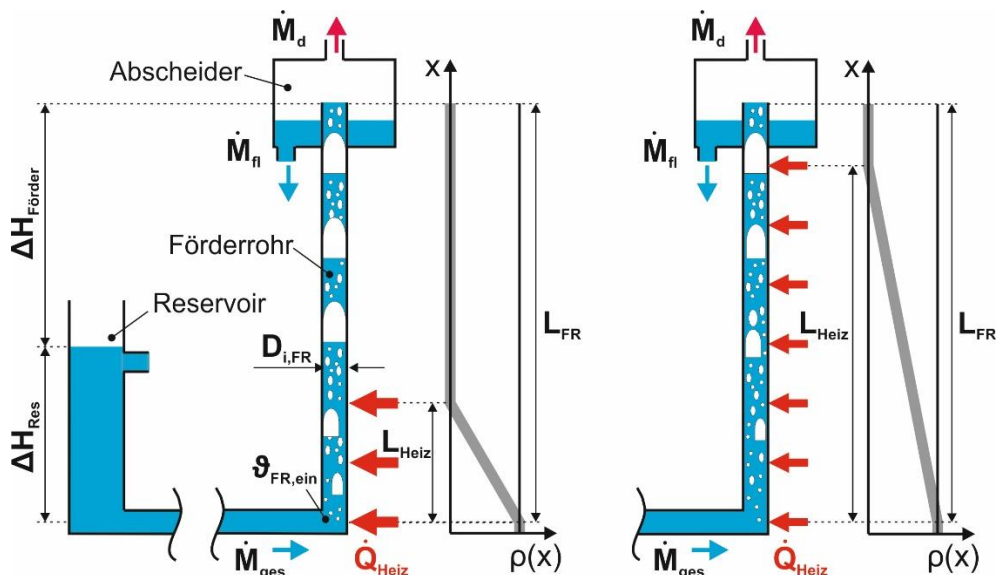


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung einer Thermosiphonpumpe mit Dichteverlauf bei teilflächiger (links) und flächiger Beheizung (rechts) [2]

Das Arbeitsmittel befindet sich im flüssigen Zustand im Reservoir mit einem definierten Füllstand (ΔH_{Res}). Durch Wärmezufuhr am Förderrohr verdampft das Arbeitsmedium partiell, sodass ein Zweiphasengemisch entsteht. Aufgrund der geringen mittleren

Dichte im Förderrohr im Vergleich zur hohen Dichte im Reservoir sowie durch die starke Auftriebskraft des entstehenden Dampfes und der damit verbundenen Förderung der Flüssigkeit strömt das Zweiphasengemisch in den Abscheider. Eine theoretische Erläuterung hierzu ist in [2] aufgeführt.

Messergebnisse aus [2] zeigen, dass bei gleichem Dampfmassenstrom ein besseres Förderverhältnis b_m erzielt werden kann, je geringer die relative Heizlänge φ ist. Das Förderverhältnis b ist ein Bewertungskriterium für Thermosiphonpumpen und wird folgendermaßen definiert:

$$b_v = \frac{\dot{V}_{fl}}{\dot{V}_d} \sim b_m = \frac{\dot{M}_{fl}}{\dot{M}_d} \quad 3-1$$

Die relative Heizlänge berechnet sich wie folgt:

$$\varphi = \frac{L_{Heiz}}{L_{FR}} \quad 3-2$$

Je geringer die relative Heizlänge φ ist, desto geringer ist die mittlere Dichte über der Länge des Förderrohres $\bar{\rho}_{FR}$, welche wie folgt definiert ist:

$$\bar{\rho}_{FR} = \frac{1}{L_{FR}} \cdot \int_0^{L_{FR}} \rho(x) dx \quad 3-3$$

Aus dem Dichteverlauf in Abbildung 3.1 geht hervor, dass eine Wärmezufuhr mittels teilflächiger Beheizung im unteren Bereich des Förderrohres im Vergleich zu einer flächigen Beheizung für ein hohes Förderverhältnis anzustreben ist.

4. Aufbau des Thermosiphonprüfstands

Der Aufbau des Thermosiphonprüfstands wird anhand des in Abbildung 4.1 dargestellten Messschemas mit dem PWÜ als Beheizungsart beschrieben. Sämtliche Temperaturen werden mit Thermoelementen gemessen. Über einen Relativdrucksensor unterhalb des Reservoirs (II) wird der Vorlagendruck im Stillstand bei aufgeheizter Anlage eingestellt.

Das Arbeitsmedium strömt im flüssigen Zustand vom Reservoir (I) über eine waagrechte Zulaufstrecke zum PWÜ (III). Eine am Reservoir angebrachte Heizschnur sowie zwei Doppelrohrwärmeübertrager temperieren das Arbeitsmedium auf nahe Siedetemperatur. Der PWÜ wird mit dem Wärmestrom \dot{Q}_{Heiz} beheizt. Das Arbeitsmedium verdampft partiell und es entsteht ein Zweiphasengemisch. Das Zweiphasengemisch verlässt den PWÜ horizontal (VI) und wird über einen Rohrbogen ins vertikale Förderrohr geleitet. Das Zweiphasengemisch strömt im Förderrohr nach oben und tritt in den Abscheider ein.

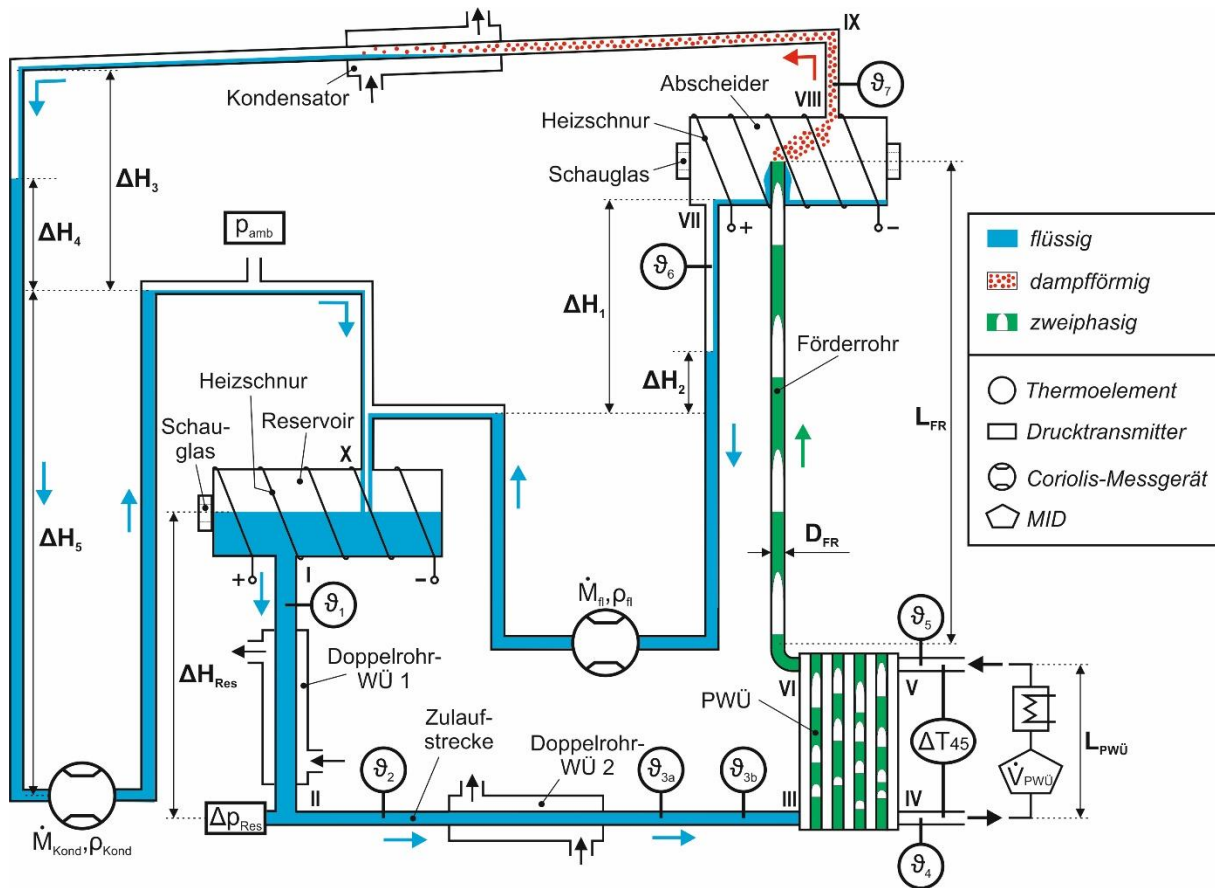


Abbildung 4.1: Messschema des Thermosiphonprüfstands mit PWÜ

Im Abscheider werden die beiden Phasen voneinander getrennt. Die geförderte Flüssigkeit fließt vom Abscheider (VII) über ein Coriolis-Durchflussmessgerät zurück ins Reservoir (X). Der Flüssigkeitsmassenstrom \dot{M}_{fl} sowie die Dichte der Flüssigkeit ρ_{fl} werden somit kontinuierlich gemessen. Der Dampf strömt vom Abscheider in den Kondensator und wird dort verflüssigt. Der Kondensatmassenstrom ($\dot{M}_{Kond} = \dot{M}_d$) sowie die Dichte des Kondensats (ρ_{Kond}) werden ebenfalls über ein Coriolis-Durchflussmessgerät kontinuierlich gemessen. Eine unter der Wärmedämmung des Abscheiders angebrachte Heizschnur ist so eingestellt, dass die Wärmeverluste, die bei Siedetemperatur auftreten, ausgeglichen werden.

Eine detaillierte Darstellung der externen Kreisläufe ist in Abbildung 4.2 zu sehen. Das Arbeitsmedium im Primärkreislauf wird durch das Heizmedium im Sekundärkreislauf über den PWÜ beheizt. Als Heizmedium dient Wasser bei einem Absolutdruck von ca. 4 bar. Das Heizmedium wird mittels Pumpe umgewälzt. Über eine Drossel kann der Volumenstrom eingestellt bzw. variiert werden. Der PWÜ kann sowohl im Gegenstrom, wie in Abbildung 4.2 dargestellt, als auch im Gleichstrom betrieben werden.

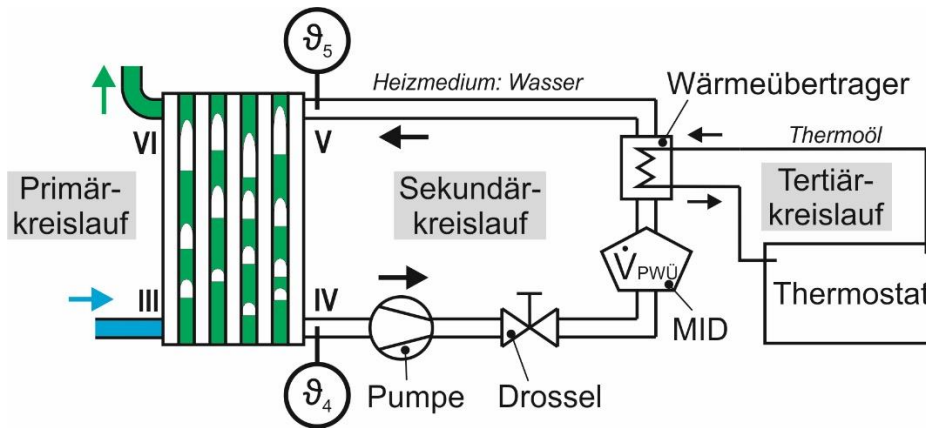


Abbildung 4.2: Darstellung der externen Kreisläufe zur Beheizung des PWÜs

Das Heizmedium im Sekundärkreislauf wird wiederum durch einen externen PWÜ über den Tertiärkreislauf beheizt. Im Tertiärkreislauf befindet sich Thermoöl, welches durch ein Thermostat (Unistat T326, 6 kW Heizleistung, Peter Huber Kältemaschinenbau GmbH) temperiert wird. Unter der Vernachlässigung von Wärmeverlusten berechnet sich der am PWÜ zugeführte Wärmestrom \dot{Q}_{Heiz} wie folgt:

$$\dot{Q}_{Heiz} = \dot{V}_{PWÜ} \cdot \rho(\vartheta_4) \cdot c_p(\vartheta_{m,45}) \cdot \Delta T_{45} \quad 4-1$$

Der Volumenstrom des Heizmediums ($\dot{V}_{PWÜ}$) wird über ein magnetisch-induktives Durchflussmessgerät (MID) ermittelt. Die Dichte $\rho(\vartheta_4)$ wird anhand der Temperatur ϑ_4 und die spezifische Wärmekapazität $c_p(\vartheta_{m,45})$ bei der arithmetisch gemittelten Temperatur $\vartheta_{m,45} = (\vartheta_4 + \vartheta_5)/2$ berechnet [15]. Die Temperaturdifferenz $\Delta T_{45} = \vartheta_5 - \vartheta_4$ wird direkt zwischen externem Ein- (V) und Austritt (IV) des PWÜs gemessen.

4.1 Versuchsbedingungen

Die Versuchsbedingungen sind in Abbildung 4.3 aufgeführt. Die Untersuchungen werden einerseits mit demineralisiertem Wasser als Reinstoff durchgeführt. Andererseits wird ein Zweistoffgemisch aus Ethanol und demineralisiertem Wasser eingesetzt. Im Folgenden wird demineralisiertes Wasser lediglich als Wasser bezeichnet. Das Ethanol (C_2H_5OH) ist zu 99,5 % rein. Beim verwendeten Medium ist auf 200 l Ethanol 1 l Petroether beigemischt. Bei den Versuchen beträgt die Massenkonzentration der im Reservoir vorliegenden flüssigen Ethanol-Wasser-Lösung $\xi_{Res} = 0,43 \text{ kg}_{C_2H_5OH} \text{ kg}_{ges}^{-1}$. Die Siedetemperatur der Lösung am Eintritt in den PWÜ beträgt somit ca. $\vartheta_s = 82,1 \text{ }^\circ\text{C}$. Ein Zweistoffgemisch wird verwendet, um die Übertragbarkeit der Messergebnisse auf eine DAKM zu ermöglichen. Ethanol-Wasser eignet sich als Zweistoffgemisch, da es ebenfalls im Prüfstand offen zur Umgebung betrieben werden kann. Da der Prüfstand

in der Höhe limitiert ist (vgl. ΔH_1 und ΔH_3 in Abbildung 4.1), darf der maximal mögliche Dampfmassenstrom mit Wasser als Arbeitsmedium $\dot{M}_{d,max} = 1,10 \text{ kg h}^{-1}$ betragen. Mit $\dot{M}_{d,max} = 0,85 \text{ kg h}^{-1}$ liegt der maximal mögliche Dampfmassenstrom bei Ethanol-Wasser in einem vergleichbaren Bereich.

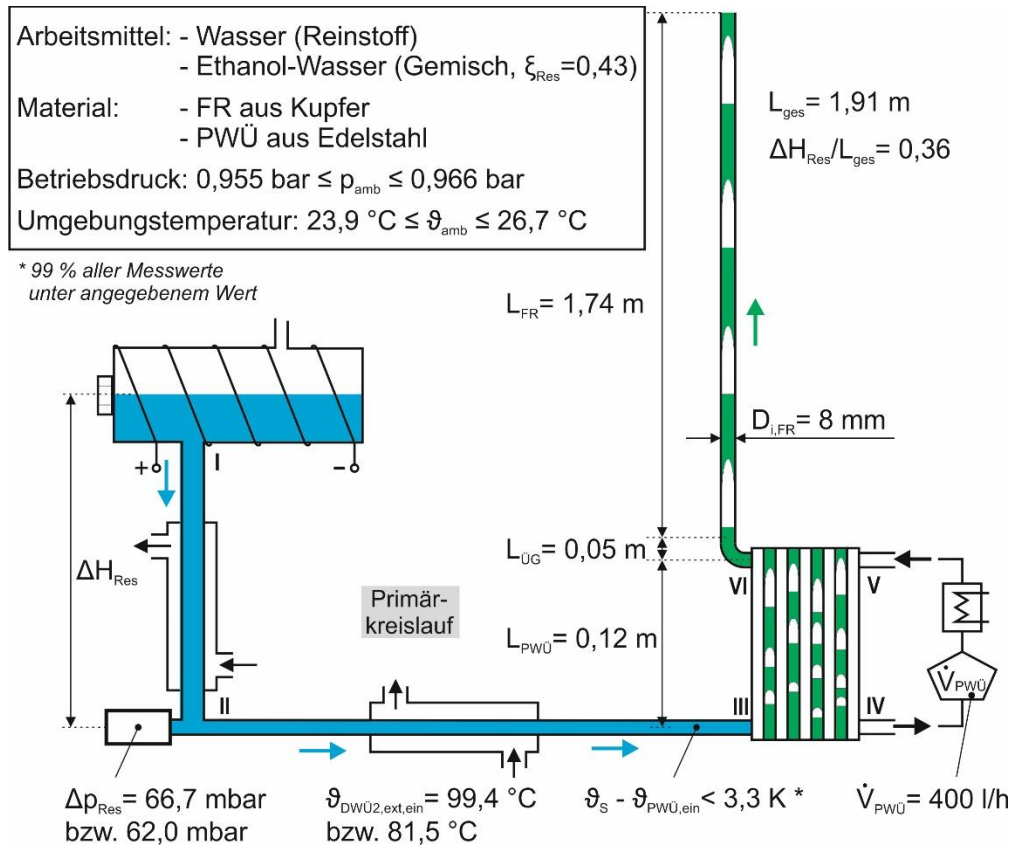


Abbildung 4.3: Versuchsbedingungen

Der Vorlagedruck Δp_{Res} wird vor jeder Messreihe bei aufgeheiztem Prüfstand im Stillstand auf einen definierten Wert eingestellt. Bei Messreihen, die lediglich mit Wasser durchgeführt wurden, beträgt der Vorlagedruck $\Delta p_{Res} = 66,7 \text{ mbar}$ (vgl. Kapitel 6.1). Messreihen mit Ethanol-Wasser sowie dazu vergleichbare Messreihen mit Wasser haben einen Vorlagedruck von $\Delta p_{Res} = 62,0 \text{ mbar}$ (vgl. Kapitel 6.2). Die externe Eintrittstemperatur am horizontalen DWÜ beträgt bei sämtlichen Messreihen mit Wasser als Arbeitsmedium $\vartheta_{DWÜ2,ext,ein} = 99,4 \text{ °C}$, wohingegen bei Messreihen mit Ethanol-Wasser $\vartheta_{DWÜ2,ext,ein} = 81,5 \text{ °C}$ eingestellt wird. Die Eintrittstemperatur des Arbeitsmediums in den PWÜ $\vartheta_{PWÜ,ein}$ liegt dadurch bei 99 %, aller Messwerte innerhalb von $3,3 \text{ K}$ unter Siedetemperatur ϑ_s .

Alle PWÜs sind vom Typ ZD4 von der Firma TTZ GmbH & Co.KG. Der PWÜ vom Typ ZD4 hat von der Mitte des Eintritts- zur Mitte des Austrittsstutzens eine Länge von $L_{PWÜ} = 120 \text{ mm}$. Die relative Heizlänge beträgt $\phi_{PWÜ} = 6,3 \%$ (vgl. Gleichung 3-2). Der PWÜ hat eine Breite von $B_{PWÜ} = 70 \text{ mm}$. Die Anzahl der Platten beträgt bei allen

PWÜs zehn. Das Heizmedium durchströmt stets fünf Spalte, also auch die beiden äußeren, wohingegen das Arbeitsmedium vier Spalte durchströmt. Die in den folgenden Kapiteln dargestellten Kennlinien des geförderten Flüssigkeitsmassenstroms über dem erzeugten Dampfmassenstrom resultieren aus der Absenkung des Heizwärmestroms \dot{Q}_{Heiz} , indem die externe Eintrittstemperatur des Heizmediums $\vartheta_{PWÜ,ext,ein}$ reduziert wird (vgl. Gleichung 4-1 bzw. ϑ_5 in Abbildung 4.1). Der Volumenstrom des Sekundärkreislaufs beträgt bei allen Messungen konstant $\dot{V}_{PWÜ} = 400 \text{ l h}^{-1}$.

4.2 Messgeräte und Messunsicherheit

Die Messunsicherheit setzt sich aus dem spezifischen Fehler des Messgeräts und dem Fehler der Messdatenerfassung zusammen. Eine Fehlerrechnung der jeweiligen Messkette mit den Messungenauigkeiten von den beiden Coriolis-Durchflussmessgeräten sowie von den Thermoelementen ist aus [2] zu entnehmen. Tabelle 4.1 zeigt eine Übersicht der eingesetzten Messgeräte sowie der berechneten Messfehler. Im Vergleich zu [2] wurde der Relativdrucksensor ersetzt sowie ein magnetisch induktives Durchflussmessgerät (MID) in den externen Kreislauf eingebaut (gekennzeichnet durch * in Tabelle 4.1).

Messgerät	Messbereich	Maximaler Fehler der Messkette	Ausgangssignal	Typ
Thermo- element ($\vartheta_1 - \vartheta_7$)	$-10 \text{ }^\circ\text{C}$	$\pm 0,02 \text{ K}$	Spannung	Rössel; Typ K; $\varnothing 1,5 \text{ mm}$; Klasse 1
	$140 \text{ }^\circ\text{C}$	$\pm 0,06 \text{ K}$		
Coriolis- Messgerät (\dot{M}_{fl})	5 kg h^{-1}	$\pm 0,03 \text{ kg h}^{-1} (\pm 0,62 \%)$	Stromstärke	Endress+Hauser; Promass 63A – DN4
	45 kg h^{-1}	$\pm 0,08 \text{ kg h}^{-1} (\pm 0,17 \%)$		
Coriolis- Messgerät (\dot{M}_d)	$0,02 \text{ kg h}^{-1}$	$\pm 0,0009 \text{ kg h}^{-1} (\pm 4,43 \%)$	Stromstärke	Siemens; Sitrans FC Mass 2100 – DI1,5
	1 kg h^{-1}	$\pm 0,0016 \text{ kg h}^{-1} (\pm 0,16 \%)$		
Relativ- drucksensor (Δp_{Res}) *	$66,7 \text{ mbar}$	$\pm 0,04 \text{ mbar} (\pm 0,06 \%)$	Spannung	Newport Omega; PXM409 – 170HG10V
MID ($\dot{V}_{PWÜ}$) *	400 l h^{-1}	$\pm 0,84 \text{ l h}^{-1} (\pm 0,21 \%)$	Stromstärke	Danfoss; Magflo 1100 / 5000 – DN6

Tabelle 4.1: Übersicht der Messunsicherheiten der Messgeräte

Der Relativdrucksensor der Firma Newport Omega mit einem Messbereich von $0 \text{ mbar} \leq p_{rel} \leq 170 \text{ mbar}$ wurde werksseitig kalibriert. Der Fehler des Relativdrucksensors setzt sich aus dem Fehler des Kalibrierpolynoms sowie dem Fehler der Messdatenerfassung (Agilent) zusammen.

Das MID der Firma Danfoss wird im Messbereich von $0 \text{ l h}^{-1} \leq \dot{V} \leq 1000 \text{ l h}^{-1}$ betrieben und wurde für diesen Bereich werksseitig kalibriert. Der Fehler des MIDs setzt sich aus dem Fehler des Kalibrierpolynoms von Messaufnehmer (MAG1100) und Elektronik (MAG5000) sowie dem Fehler der Messdatenerfassung (Meier-NT, ADL-MX) zusammen.

5. Bewertung des neuen Beheizungskonzeptes

Das neue Beheizungskonzept bietet Vorteile für den Einsatz in einer DAKM. Um das Beheizungskonzept bestehend aus dem PWÜ mit nachgeschaltetem Förderrohr bewerten zu können, wird dieses mit bereits untersuchten Beheizungsarten verglichen.

5.1 Vergleich mit flächiger Beheizung mittels Heizband aus [2]

Zunächst wird der Einfluss der mittleren Dichte über der Förderrohrlänge $\bar{\rho}_{FR}$ auf den geförderten Massenstrom \dot{M}_{fl} thematisiert. Dazu sind in Abbildung 5.1 die Kennlinien dargestellt, die sich durch die Beheizung mittels PWÜ sowie durch eine flächige Beheizung mittels elektrischem Heizband ergeben. Der eingesetzte PWÜ wird im Gegenstrom betrieben und in Z-Form durchströmt. Die Platten sind speziell für Verdampfungsprozesse strukturiert (vgl. Kapitel 6). Die Kennlinie, die sich durch die flächige Beheizung ergab, wurde am gleichen Prüfstand mit den gleichen Versuchsbedingungen durchgeführt. Eine nähere Erläuterung zur flächigen Beheizung ist [2] zu entnehmen. Die relative Heizlänge (vgl. Gleichung 3-2) beträgt bei der Beheizung mittels PWÜ $\varphi_{PWÜ} = 6,3 \%$ und bei der flächigen Beheizung $\varphi_{Band} = 92,1 \%$.

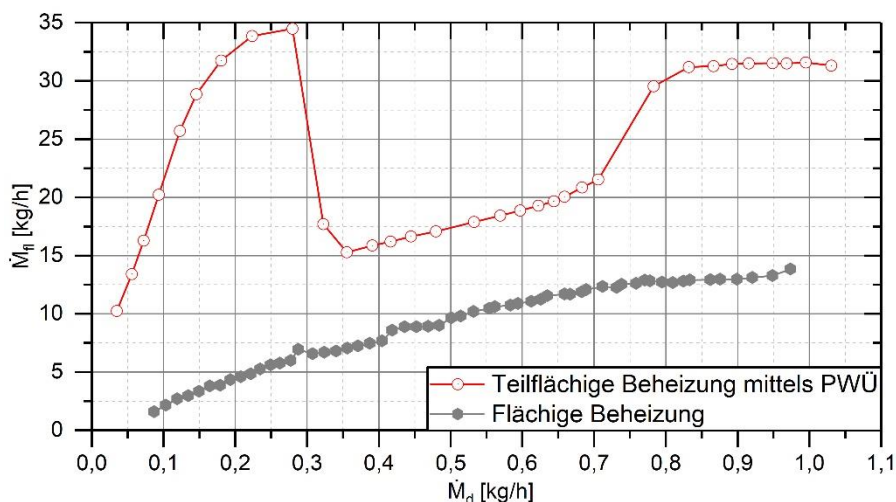


Abbildung 5.1: Kennlinien bei teilflächiger Beheizung mittels PWÜ und flächiger Beheizung mittels elektrisch betriebenem Heizband

Aus Abbildung 5.1 geht hervor, dass auch beim neuen Beheizungskonzept über den gesamten Bereich des Dampfmassenstroms der in Kapitel 3 aufgeführte Zusammenhang zutrifft: je geringer φ , desto geringer $\bar{\rho}_{FR}$ und desto größer \dot{M}_{fl} . Übertragen auf den Einsatz in einer DAKM bedeutet das, dass durch das neue Beheizungskonzept eine Steigerung von \dot{M}_{fl} möglich ist. Falls \dot{M}_{fl} jedoch nicht gesteigert werden soll, ist eine Reduktion von ΔH_{Res} (vgl. Abbildung 4.1) und dadurch eine kompakte Bauweise möglich. Je geringer ΔH_{Res} ist, desto geringer ist \dot{M}_{fl} [16].

5.2 Vergleich mit flächiger Beheizung mittels DWÜ aus [6]

Werden ausschließlich thermisch angetriebene Thermosiphonpumpen mit einem externen Heizkreislauf miteinander verglichen, ist ein entscheidendes Kriterium die Höhe der externen Antriebstemperatur $\vartheta_{Antrieb,ext}$. Um Wärmequellen mit niedrigem Temperaturniveau nutzbar zu machen, muss $\vartheta_{PWÜ,ext,ein}$ möglichst gering sein. Eine Bewertung des neuen Beheizungskonzeptes wird anhand des Vergleichs mit der von RATTNER und GARIMELLA untersuchten Thermosiphonpumpe in Form eines DWÜs durchgeführt (vgl. Kapitel 2.1). Dabei ist das Förderrohr das Innenrohr des DWÜs [6]. Bei ähnlichen Randbedingungen und einem zugeführten Wärmestrom von beispielsweise $\dot{Q}_{Heiz} = 200 \text{ W}$ unterscheidet sich die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta_{m,log}$ wie folgt:

- $\Delta\vartheta_{m,log,PWÜ} = 2,9 \text{ K}$
- $\Delta\vartheta_{m,log,DWÜ} = 24,0 \text{ K}$

Durch den Einsatz des PWÜs mit einer ca. doppelt so großen wärmeübertragenden Fläche ($A_{WÜ,PWÜ} \approx 2 \cdot A_{WÜ,DWÜ}$) ist $\Delta\vartheta_{m,log}$ im Vergleich zum DWÜ um den Faktor 8,3 kleiner. Der Wärmedurchgangskoeffizient ist beim PWÜ damit ca. viermal so groß. Die benötigte externe Antriebstemperatur $\vartheta_{Antrieb,ext}$ kann somit deutlich reduziert werden, sodass auch Solarthermie sowie Nah- und Fernwärme als Wärmequelle genutzt werden kann. Die Entkopplung von Wärmeübertragung im PWÜ und Förderung im Förderrohr ist von wesentlichem Vorteil. Bei einer vorgegebenen externen Antriebstemperatur $\vartheta_{Antrieb,ext}$ ist der zugeführte Wärmestrom \dot{Q}_{Heiz} beim DWÜ durch die festgelegte wärmeübertragende Fläche $A_{WÜ}$ aufgrund der festgelegten Geometrie des Förderrohres ($D_{i,FR}$ und L_{FR}) begrenzt. Die wärmeübertragende Fläche $A_{WÜ}$ kann hingegen beim PWÜ frei gestaltet werden.

6. Variation von PWÜ-Konfigurationen

Ziel der Variation von PWÜ-Konfigurationen ist es, Erkenntnisse hinsichtlich der Auslegung eines PWÜs mit nachgeschaltetem Förderrohr für den Einsatz in DAKMs zu gewinnen.

6.1 Messergebnisse mit Wasser (Reinstoff)

Die Messreihen zur Untersuchung des Einflusses des Übergangs zwischen PWÜ und nachgeschaltetem Förderrohr sowie der Plattenstruktur wurden exemplarisch mit Wasser als Arbeitsmedium durchgeführt. Die Erkenntnisse sind auf andere Arbeitsmedien übertragbar. Die externe Eintrittstemperatur des Heizmediums liegt im Bereich von $101\text{ °C} \leq \vartheta_{PWÜ,ext,ein} \leq 103,4\text{ °C}$, wodurch sich der Bereich des Heizwärmestroms von ungefähr $130\text{ W} \leq \dot{Q}_{Heiz} \leq 830\text{ W}$ ergibt. Die Siedetemperatur des Arbeitsmediums am Eintritt in den PWÜ beträgt ca. $\vartheta_S = 100,5\text{ °C}$. Die Wärmestromdichte liegt im Bereich von $1178\text{ W m}^{-2} \leq \dot{q}_{Heiz} \leq 7518\text{ W m}^{-2}$. Eine Messreihe ergibt sich aus der Absenkung von $\vartheta_{PWÜ,ext,ein}$ im Zeitschritt von $t = 90\text{ min}$. Die Messpunkte einer Kennlinie ergeben sich aus dem arithmetischen Mittelwert der letzten 60 min des jeweiligen Zeitabschnittes. Die in Tabelle 6.1 aufgeführten Messreihen wurden mit folgenden Versuchsbedingungen durchgeführt:

- Strömungsart: Gegenstrom
- Vorlagedruck: 66,7 mbar

Typ	Strömungsführung	Plattenstruktur	Übergang	Name
ZD4 (TTZ)	C-Form	H	ÜG1	„ZD4H-10-C-GG-ÜG1“
			ÜG2	„ZD4H-10-C-GG“
		P2	„ZD4P2-10-C-GG“	

Tabelle 6.1: Messungen bei $p_{Res} = 66,7\text{ mbar}$ mit Wasser

6.1.1 Einfluss des Übergangs vom PWÜ zum Förderrohr

Abbildung 6.1 zeigt die beiden untersuchten Übergänge vom PWÜ zum Förderrohr. Bei Übergang 1 tritt direkt nach dem Anschlussstutzen vom PWÜ eine sprunghafte Verengung auf. Der Winkel ist mit einer scharfen Kante an der Innenseite versehen. Übergang 2 hingegen ist strömungsoptimiert aufgebaut. Durch weniger Kanten und Staupunkte ist der Druckverlust von Übergang 2 im Vergleich zu Übergang 1 geringer. Der Innendurchmesser des Austrittsstutzens von $D_{i,Stutzen} = 22,0\text{ mm}$ wird erst nach dem Rohrbogen kontinuierlich auf den Innendurchmesser des Förderrohres von $D_{i,FR} = 8,0\text{ mm}$ reduziert.

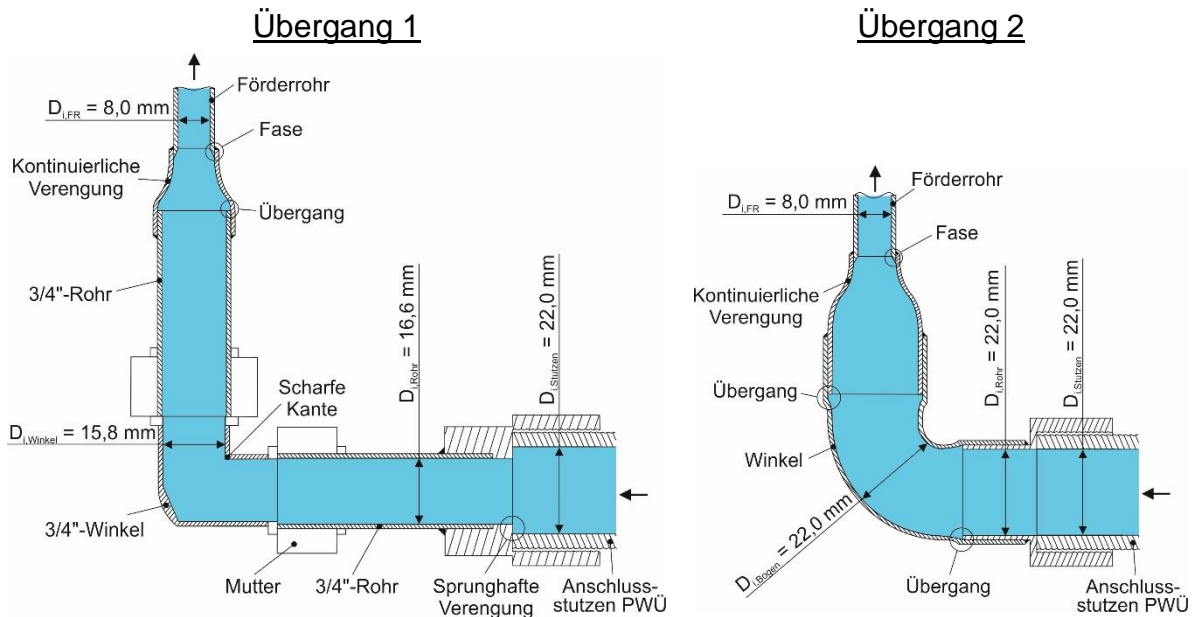


Abbildung 6.1: Darstellung der untersuchten Übergänge zwischen PWÜ und Förderrohr

In Abbildung 6.2 sind die Kennlinien dargestellt, die sich beim Einsatz von Übergang 1 („ZD4H-10-C-GG-ÜG1“) und Übergang 2 („ZD4H-10-C-GG“) ergeben haben.

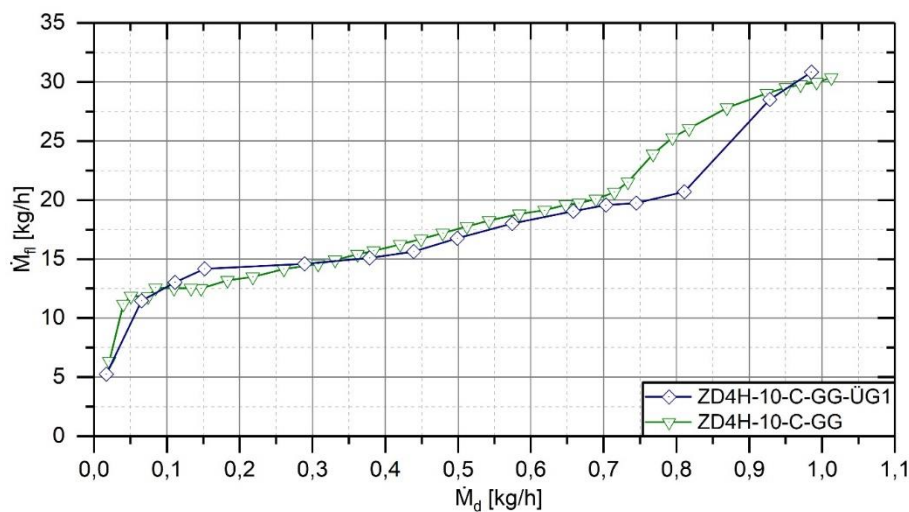


Abbildung 6.2: Kennlinien in Abhängigkeit vom Übergang zwischen PWÜ und Förderrohr

Die Kennlinien verlaufen bis zu einem Dampfmassenstrom von ca. $\dot{M}_d = 0,7 \text{ kg h}^{-1}$ nahezu deckungsgleich. Im Bereich zwischen $0,7 \text{ kg h}^{-1} < \dot{M}_d < 0,9 \text{ kg h}^{-1}$ wird durch den Einsatz des strömungsoptimierten Übergangs mehr Flüssigkeit gefördert. Dies ist womöglich durch den hohen Druckverlust aufgrund des hohen Dampfanteils erklärbar. Allerdings liegen die Kennlinien bei hohen Dampfmassenströmen von $\dot{M}_d > 0,9 \text{ kg h}^{-1}$ wieder nahezu übereinander, was dieser Erläuterung widerspricht. Dennoch geht aus

Abbildung 6.2 hervor, dass sich ein strömungsoptimierter Übergang positiv auf das Förderverhältnis b_m auswirkt.

6.1.2 Einfluss der Plattenstruktur

Des Weiteren wird der Einfluss der Plattenstruktur auf das Förderverhalten untersucht. Dabei wird eine harte Plattenstruktur (H-Platte) sowie eine Plattenstruktur, die speziell für Verdampfungsvorgänge ausgelegt ist (P2-Platte), verwendet. Laut Hersteller unterscheiden sich die Plattenstrukturen lediglich durch den Prägewinkel φ (vgl. Abbildung 6.3). Der Prägewinkel beträgt bei der H-Platte $\varphi = 63^\circ$, wohingegen dieser bei der P2-Platte im Bereich von $0^\circ < \varphi < 30^\circ$ variiert. Die sich laut Hersteller ergebenden Vorteile sind eine reduzierte Staupunktströmung durch weniger Berührungsstrecken, ein geringerer Druckverlust und eine optimierte Verteilung des Arbeitsmediums über der Plattenbreite.

Die beiden Förderkennlinien der Messreihen „ZD4H-10-C-GG“ und „ZD4P2-10-C-GG“ mit jeweils strömungsoptimiertem Übergang sind in Abbildung 6.4 aufgetragen. Unterteilt man Abbildung 6.4 in drei Bereiche, ergeben sich für die Bereiche A und C ein höherer geförderter Flüssigkeitsmassenstrom \dot{M}_{fl} beim Einsatz der P2-Platte. Im Bereich B liegen die Kennlinien übereinander.

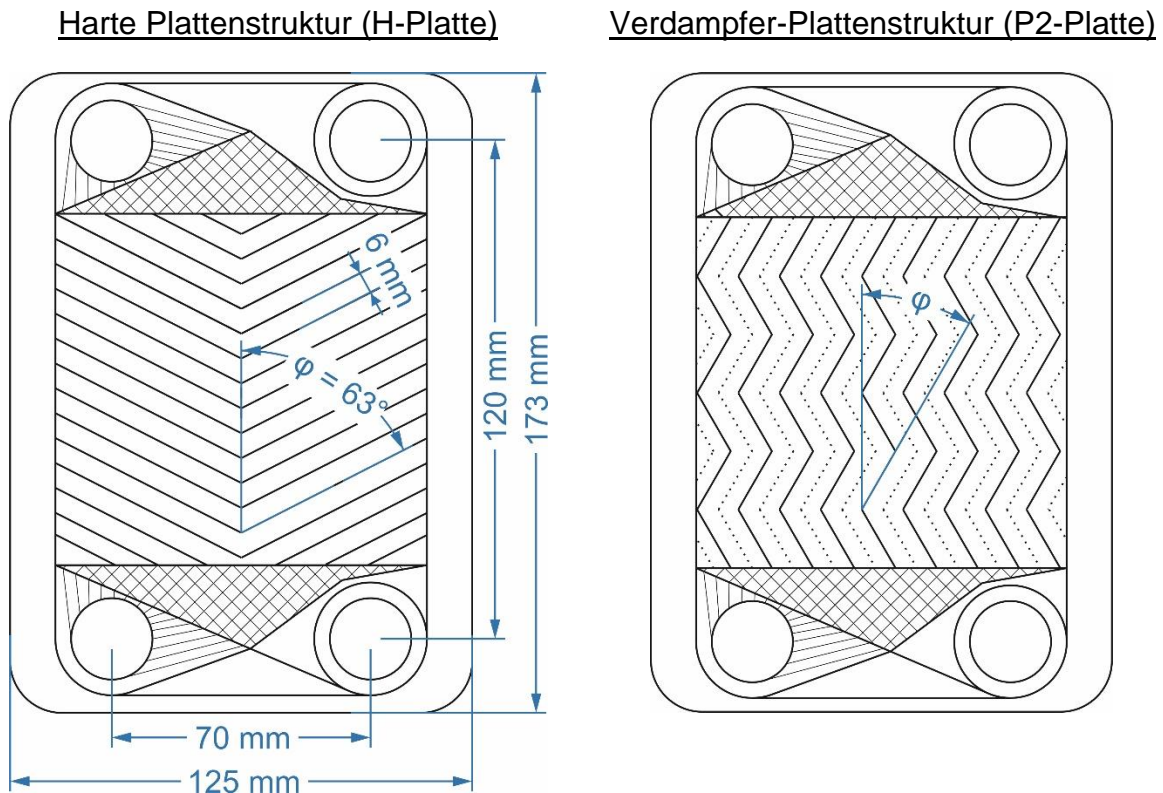


Abbildung 6.3: Schematische Skizzen der Plattenstrukturen H und P2 mit Bemaßung

Die durch Messreihe „ZD4P2-10-C-GG“ entstandene Kennlinie weist einen typischen Verlauf für die punktuelle Beheizung einer Thermosiphonpumpe mit einem Reinstoff als Arbeitsmedium auf. Die Kennlinie hat in Bereich A ein lokales Maximum, steigt in Bereich B linear an und erreicht in Bereich C ein absolutes Maximum [2]. Der Verlauf ist voraussichtlich durch Umschläge in der Strömungsform zu erklären.

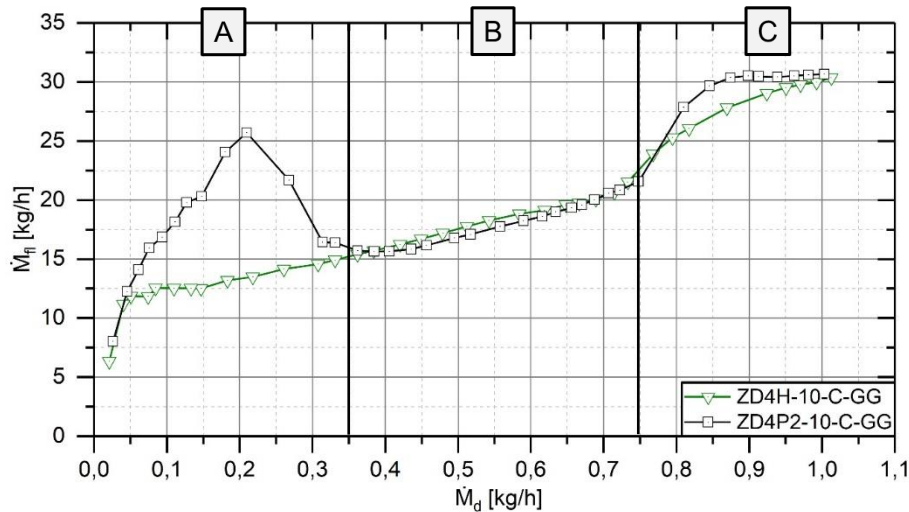


Abbildung 6.4: Kennlinien in Abhängigkeit von der Plattenstruktur H und P2

Im Hinblick auf den Einsatz in einer DAKM lässt sich durch die lineare Förderkennlinie, die sich durch einen PWÜ mit harter Plattenstruktur ergibt, eine sichere Auslegung erzielen. Soll ein möglichst großer Flüssigkeitsmassenstrom \dot{M}_{fl} gefördert werden, ist je nach erzeugtem Dampfmassenstrom ein PWÜ mit Verdampfer-Plattenstruktur vorteilhaft.

6.2 Messergebnisse mit Wasser (Reinstoff) sowie Ethanol-Wasser (Zweistoffgemisch)

Der Einfluss der Strömungsführung und der Strömungsart wird für Wasser (Reinstoff) sowie Ethanol-Wasser (Zweistoffgemisch) untersucht. Die externe Eintrittstemperatur des Heizmediums liegt bei Messungen mit Ethanol-Wasser im Bereich von $83,4\text{ °C} \leq \vartheta_{PWÜ,ext,ein} \leq 85,7\text{ °C}$, wodurch sich der Bereich des Heizwärmestroms von ungefähr $100\text{ W} \leq \dot{Q}_{Heiz} \leq 370\text{ W}$ ergibt. Die Siedetemperatur des Zweistoffgemischs am Eintritt in den PWÜ beträgt für $\xi_{Res} = 0,43\text{ kg}_{C_2H_5OH}\text{ kg}_{ges}^{-1}$ ca. $\vartheta_s = 82,1\text{ °C}$. Die Wärmestromdichte liegt im Bereich von $906\text{ W m}^{-2} \leq \dot{q}_{Heiz} \leq 3352\text{ W m}^{-2}$. Eine Messreihe ergibt sich aus der Absenkung von $\vartheta_{PWÜ,ext,ein}$ im Zeitschritt von $t = 45\text{ min}$. Die Messpunkte einer Kennlinie ergeben sich aus dem arithmetischen Mittelwert der letzten 30 min des jeweiligen Zeitabschnittes. Die in Tabelle 6.2 aufgeführten Messreihen wurden mit folgenden Versuchsbedingungen durchgeführt:

- Plattenstruktur: P2
- Vorlagedruck: 62,0 mbar
- Übergang: ÜG2

Typ	Medium	Strömungsführung	Strömungsart	Name
ZD4 (TTZ)	Wasser	C-Form	Gleichstrom	„ZD4P2-10-C-GL-62“
			Gegenstrom	„ZD4P2-10-C-GG-62“
		Z-Form	Gleichstrom	„ZD4P2-10-Z-GL-62“
			Gegenstrom	„ZD4P2-10-Z-GG-62“
	Ethanol - Wasser	C-Form	Gleichstrom	„ZD4P2-10-C-GL-62-EW“
			Gegenstrom	„ZD4P2-10-C-GG-62-EW“
		Z-Form	Gegenstrom	„ZD4P2-10-Z-GG-62-EW“
			Gleichstrom	„ZD4P2-10-Z-GL-62-EW“

Tabelle 6.2: Messungen bei $p_{Res} = 62 \text{ mbar}$ mit Wasser sowie Ethanol-Wasser

6.2.1 Einfluss der Strömungsführung

Hinsichtlich des Einflusses der Strömungsführung wird ein PWÜ in C-Form mit einem PWÜ in Z-Form verglichen (siehe Abbildung 6.5). Das Arbeitsmedium tritt jeweils an der Stelle III im flüssigen Zustand nahe Siedetemperatur in den PWÜ ein. Bei der C-Form tritt das Arbeitsmedium zweiphasig auf der gleichen Seite wieder aus, wohingegen es bei der Z-Form auf der gegenüberliegenden Seite austritt (jeweils Stelle VI).

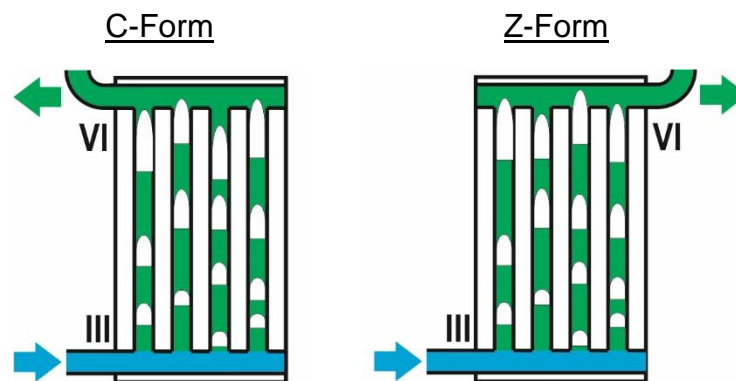


Abbildung 6.5: Darstellung der Strömungsführungen C-Form und Z-Form

Abbildung 6.6 zeigt die Kennlinien in Abhängigkeit von der Strömungsführung mit dem Arbeitsmedium Wasser. Die Kennlinien der Messreihen mit der C-Form („ZD4P2-10-C-GG-62“) und der Z-Form („ZD4P2-10-Z-GG-62“) im Gegenstrombetrieb ist im oberen Diagramm von Abbildung 6.6 dargestellt. Unterteilt man dieses Diagramm erneut in drei Bereiche, ergibt sich für den Bereich A und C ein höherer geförderter Flüssigkeitsmassenstrom \dot{M}_{fl} bei der Messreihe mit Z-Form. Im Bereich B liegen die Kennlinien übereinander. Die Kennlinien von den Messreihen „ZD4P2-10-C-GL-62“

und „ZD4P2-10-Z-GL-62“ im Gleichstrombetrieb sind im unteren Diagramm von Abbildung 6.6 dargestellt.

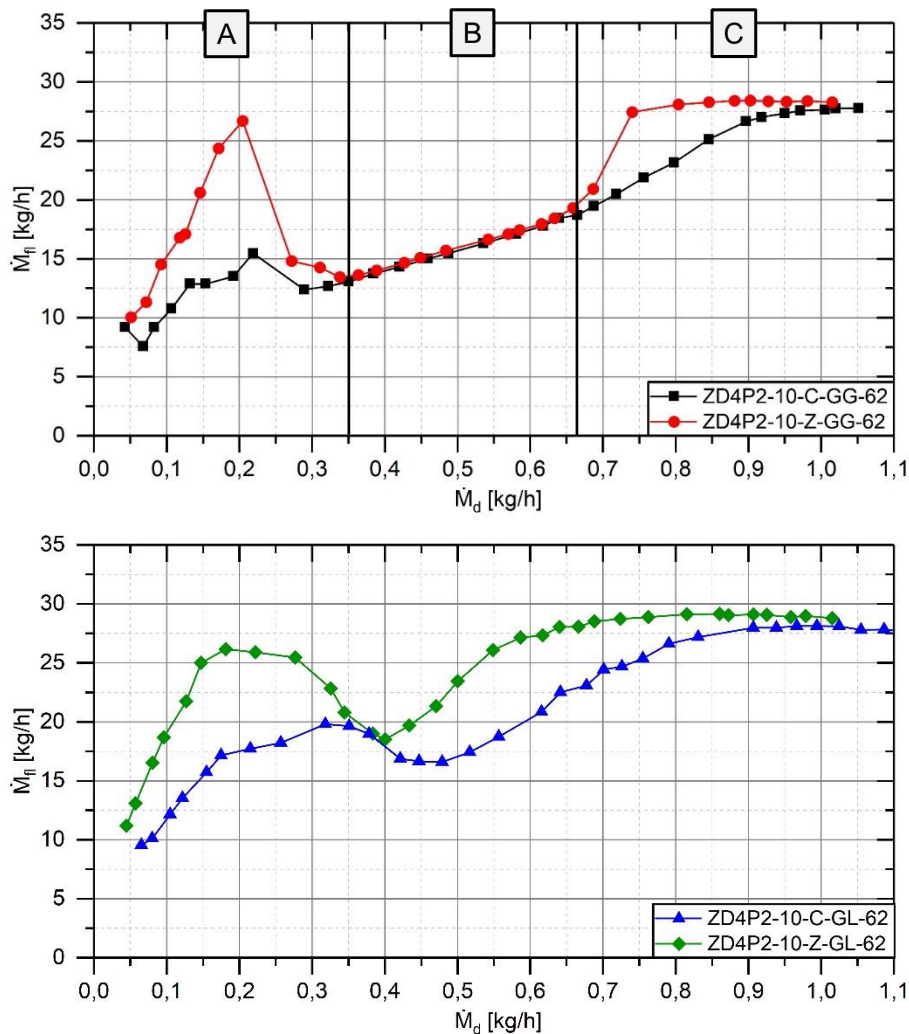


Abbildung 6.6: Kennlinien mit Wasser in Abhängigkeit von der Strömungsführung im Gegenstrom- (oben) und Gleichstrombetrieb (unten)

Für die Z-Form ergibt sich über nahezu den gesamten ein höherer geförderter Flüssigkeitsmassenstrom \dot{M}_{fl} . Sämtliche in Abbildung 6.6 aufgeführte Kennlinien weisen den in Kapitel 6.1.2 beschriebenen typischen Verlauf für eine punktuelle Beheizung der Thermosiphonpumpe mit Wasser als Arbeitsmedium auf. Das lokale Maximum ist bei den Messreihen mit Z-Form stärker ausgeprägt und das absolute Maximum wird bereits bei geringerem Dampfmassenstrom \dot{M}_d erreicht.

Abbildung 6.7 zeigt die Kennlinien der Messreihen in Abhängigkeit von der Strömungsführung für das Zweistoffgemisch Ethanol-Wasser. Die in Abbildung 6.7 aufgeführten Kennlinien verlaufen im Vergleich zu den Kennlinien aus Abbildung 6.6 unter-

schiedlich. Dennoch ergibt sich sowohl für den Gegen- (oben) als auch Gleichstrombetrieb (unten) ebenfalls für die Z-Form über nahezu den gesamten Bereich ein höherer geförderter Flüssigkeitsmassenstrom \dot{M}_{fl} .

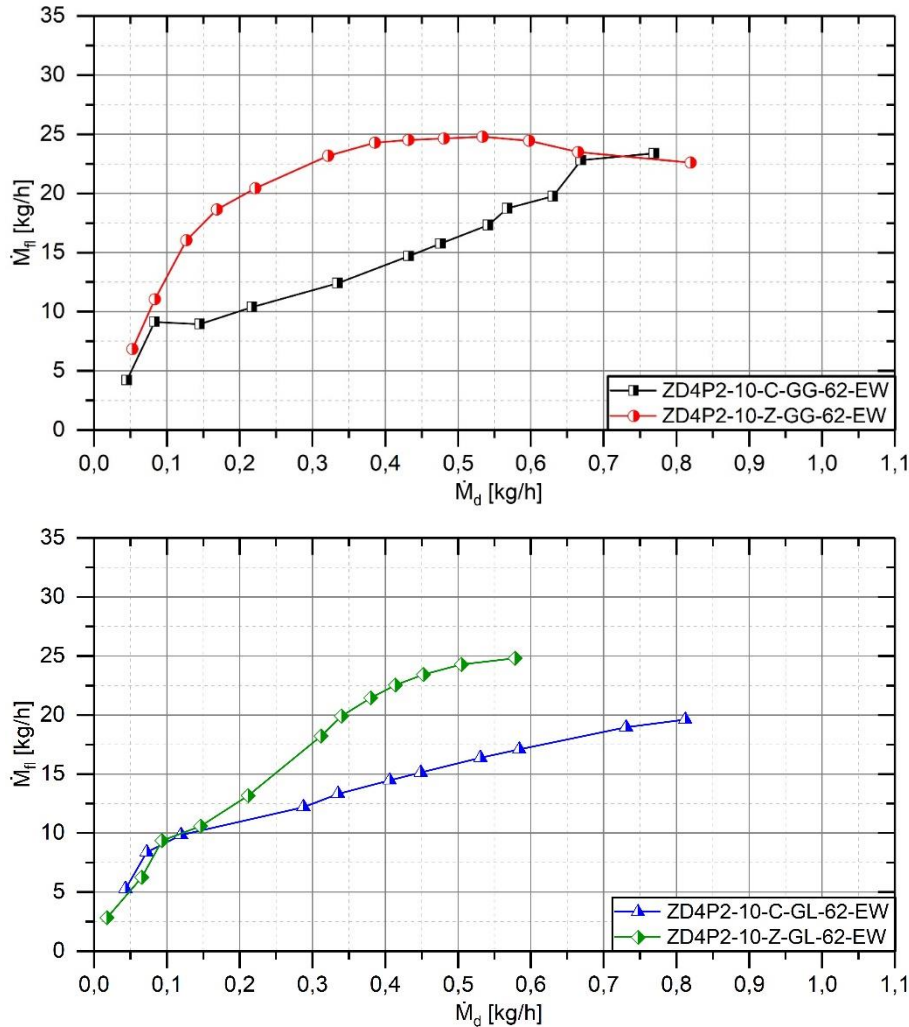


Abbildung 6.7: Kennlinien mit Ethanol-Wasser in Abhängigkeit von der Strömungsführung im Gegenstrom- (oben) und Gleichstrombetrieb (unten)

Im Wesentlichen unterscheiden sich die Z-Form und die C-Form in der Verteilung des Heizmediums auf die einzelnen Plattenspalte. Eine gleichmäßigere Verteilung des Heizmediums auf die einzelnen Plattenspalte bei der Z-Form führt somit unabhängig vom eingesetzten Arbeitsmedium zu einer höheren Förderkennlinie.

6.2.2 Einfluss der Strömungsart

Aus Kapitel 6.2.1 geht hervor, dass bei der Z-Form sowohl im Gegen- als auch im Gleichstrombetrieb höhere Förderverhältnisse b_m erreicht werden. Nun wird der Einfluss der Strömungsart bei der Z-Form detaillierter untersucht. Abbildung 6.8 zeigt schematisch die beiden Strömungsarten Gegenstrom und Gleichstrom.

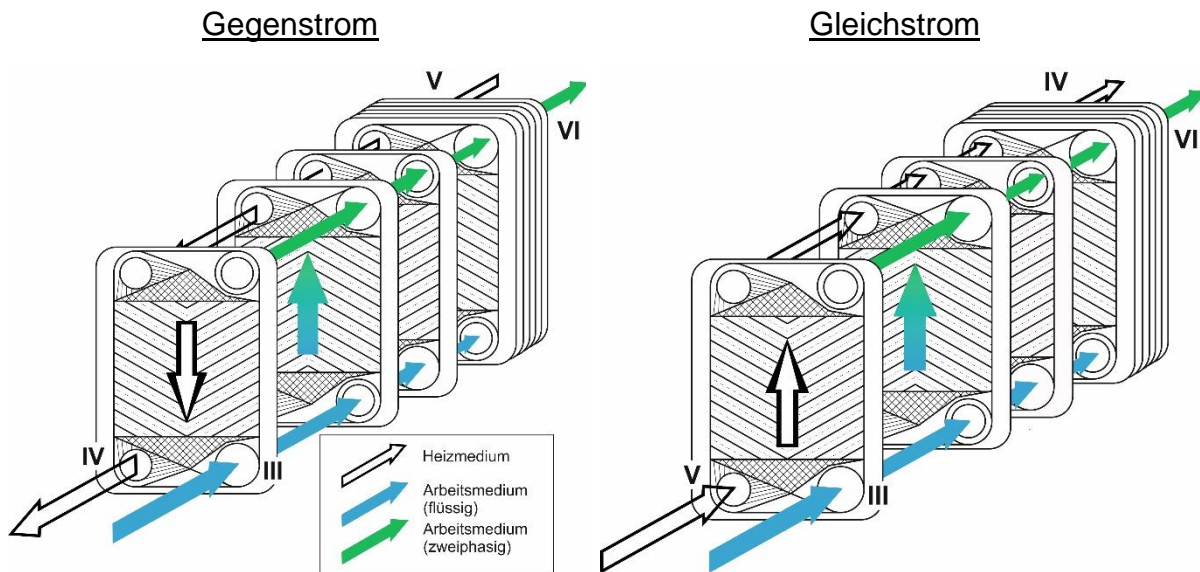


Abbildung 6.8: Darstellung der Strömungsarten Gegenstrom und Gleichstrom

In Abbildung 6.9 sind die Kennlinien der Messreihen mit unterschiedlicher Strömungsart gegenübergestellt. Die Kennlinien mit Wasser als Arbeitsmedium im Gegen- („ZD4P2-10-Z-GG-62“) und Gleichstrombetrieb („ZD4P2-10-Z-GL-62“) sind im oberen Diagramm von Abbildung 6.9 dargestellt. Daraus geht hervor, dass der Gleichstrombetrieb über nahezu den gesamten Bereich höhere Flüssigkeitsmassenströme aufweist. Der Grund dafür ist eine größere lokale Temperaturdifferenz am Eintritt des Arbeitsmediums beim Gleichstrombetrieb (III zu V) im Vergleich zum Gegenstrombetrieb (III zu IV). Dies wiederum führt dazu, dass die Dampfblasen weiter unten im PWÜ entstehen und somit eine punktuellere Beheizung des Arbeitsmediums erfolgt [12]. Je punktueller die Beheizung von Thermosiphonpumpen ist, desto höher ist der geförderte Massenstrom [2].

Die Kennlinien der Messreihen im Gegen- („ZD4P2-10-Z-GG-62-EW“) und im Gleichstrombetrieb („ZD4P2-10-Z-GL-62-EW“) mit Ethanol-Wasser sind in Abbildung 6.9 unten dargestellt. Daraus geht hervor, dass beim Einsatz eines Zweistoffgemisches höhere Fördermassenströme durch den Gegenstrombetrieb resultieren.

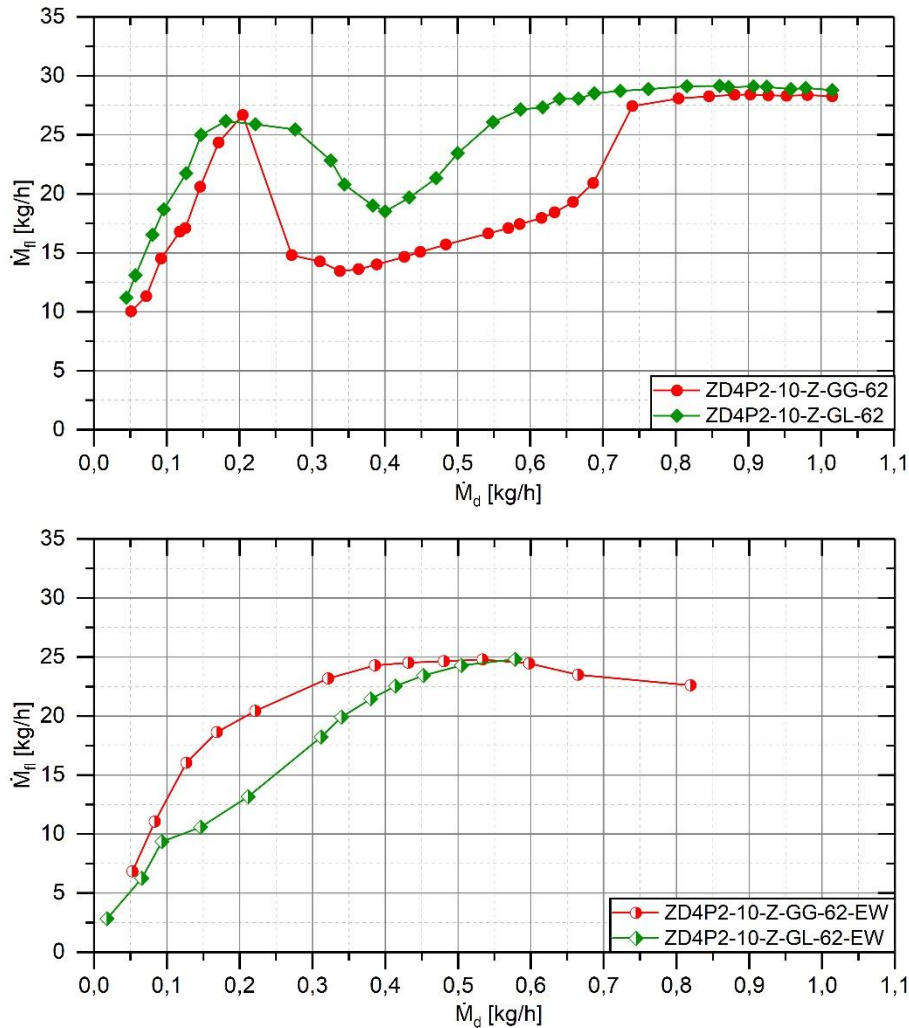


Abbildung 6.9: Kennlinien in Abhängigkeit von der Strömungsart mit der Z-Form als Strömungsführung mit Wasser (oben) und Ethanol-Wasser (unten)

7. Zusammenfassung

Für eine Diffusions-Absorptionskältemaschine (DAKM) wurde ein neues Beheizungskonzept entwickelt. Ein Plattenwärmeübertrager (PWÜ) wird dabei als Austreiber und ein nachgeschaltetes Förderrohr als Thermosiphonpumpe eingesetzt. Dadurch ist es möglich, die Leistungszahl und die Leistungsdichte einer DAKM zu steigern. Um das neue Beheizungskonzept zu bewerten, wurde dieses mit anderen Beheizungsarten hinsichtlich externer Antriebstemperatur sowie gefördertem Flüssigkeitsmassenstrom verglichen. Es wurde aufgezeigt, dass die große wärmeübertragende Fläche, die ein PWÜ bietet, niedrige externe Antriebstemperaturen ermöglicht. Der Wärmedurchgangskoeffizienten beim PWÜ im Vergleich zu einem Doppelrohrwärmeübertrager ist deutlich höher. Zudem führt die Beheizung am unteren Ende des Förderrohres zu einem hohen geförderten Flüssigkeitsmassenstrom.

Um Erkenntnisse hinsichtlich der Auslegung eines PWÜs mit nachgeschaltetem Förderrohr für den Einsatz in DAKMs zu gewinnen, wurden unterschiedliche PWÜ-Konfigurationen messtechnisch untersucht. Die Untersuchungen wurden sowohl mit Wasser als Reinstoff als auch mit Ethanol-Wasser durchgeführt. Der Einfluss des Übergangs von PWÜ auf das Förderrohr, der Plattenstruktur, der Strömungsführung und der Strömungsart auf das Förderverhalten wurden untersucht. Tabelle 7.1 gibt eine Übersicht der betrachteten Parameter und deren Auswirkung auf das Förderverhältnis b_m .

Parameter \ Medium	Wasser	Ethanol-Wasser
Übergang	Strömungsoptimiert	
Plattenstruktur	P2-Platte	
Strömungsführung	Z-Form	
Strömungsart	Gleichstrom	Gegenstrom

Tabelle 7.1: Übersicht der Parameter mit positiver Auswirkung auf das Förderverhältnis

8. Literaturverzeichnis

- [1] Schmid, F.: "Entwicklung einer direkt solarthermisch angetriebenen Diffusions-Absorptionskältemaschine", *Dissertation, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik, Universität Stuttgart*, Stuttgart, 2016.
- [2] Bierling, B.; Schmid, F.; Spindler, K.: "Influence of different heating types on the pumping performance of a bubble pump", *Heat Mass Transfer*, published online: 13 November 2017, DOI: 10.1007/s00231-017-2210-5.
- [3] Jakob, U.; Eicker, U.; Schneider, D.; Taki, A.H.; Cook, M.J.: "Entwicklung einer optimierten solar betriebenen Diffusions-Absorptionskältemaschine" in *13. Symposium Thermische Solarenergie*, pp. 259–264, 2003.
- [4] Jakob, U.; Schneider, D.; Eicker, U.: "Entwicklung einer Diffusions-Absorptionskältemaschine kleiner Leistung (2.5kW)" in *Drittes Symposium "Solares Kühlen in der Praxis"*, pp. 125–144, 2004.
- [5] Jakob, U.; Eicker, U.; Schneider, D.; Teußler, A.: "Experimental investigation of bubble pump and system performance for a solar driven 2,5 kW diffusion absorption cooling machine" in *Heat SET 2007 - Heat Transfer in Components and Systems for Sustainable Energy Technologies*, Chambéry, France, 2007.

- [6] Rattner, A.S.; Garimella, S.: “Coupling-fluid heated bubble pump generators: Experiments and model development”, *Science and Technology for the Built Environment*, vol. 21, no. 3, pp. 332–347, 2015.
- [7] Rattner, A.S.; Garimella, S.: “Low-source-temperature diffusion absorption refrigeration. Part I: Modeling and cycle analysis”, *International Journal of Refrigeration*, vol. 65, pp. 287–311, 2016.
- [8] Rattner, A.S.; Garimella, S.: “Low-source-temperature diffusion absorption refrigeration. Part II: Experiments and model assessment”, *International Journal of Refrigeration*, vol. 65, pp. 312–329, 2016.
- [9] Schmadl, J.; Briesenick, C.; Gerking, J.-U.; Haß, M.; Schult, I.; Schult, J.: “Neuartige Plattenwärmeübertrager: Teil C: Literaturanalyse zur Verdampfung und Kondensation in Plattenspalten”, *Wissenschaftlicher Artikel in einer Zeitschrift der TH Wildau*, vol. 10, pp. 98–104, 2005.
- [10] André, M.; Kabelac, S.; Vries, B. de: “Wärmeübertragung bei der Verdampfung von Ammoniak in einem Plattenwärmeübertrager”, *Chemie Ingenieur Technik*, vol. 75, no. 11, pp. 1628–1633, 2003.
- [11] André, M.: “Wärmeübergang bei der Verdampfung von Ammoniak in Plattenwärmeübertragern”, *Dissertation, Institut für Thermodynamik, Universität Hannover*, Hannover, 2004.
- [12] Djordjevic, E.; Kabelac, S.: “Flow boiling of R134a and ammonia in a plate heat exchanger”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 51, no. 25-26, pp. 6235–6242, 2008.
- [13] Grabenstein, V.; Kabelac, S.: “Strömungsformen in zweiphasig durchströmten Plattenwärmeübertragern” in *Jahrestagung des Deutschen Kälte- und Klimatechnischen Vereins AA.II.1.05*, Magdeburg, 2010.
- [14] Táboas, F.; Vallès, M.; Bourouis, M.; Coronas, A.: “Flow boiling heat transfer of ammonia/water mixture in a plate heat exchanger”, *International Journal of Refrigeration*, vol. 33, no. 4, pp. 695–705, 2010.
- [15] Verein Deutscher Ingenieure (VDI) - Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC): “VDI-Wärmeatlas”, 11th ed., *Springer-Verlag*, Berlin, Heidelberg, 2013.
- [16] Cattaneo, A.G.: “Über die Förderung von Flüssigkeiten mittels der eigenen Dämpfe: (Thermosiphon-Prinzip)”, *Zeitschrift für die gesamte Kälte-Industrie*, vol. 42, no. 1-3, pp. 2–52, 1935.