

# A b s c h l u s s b e r i c h t

## **„Optimierung der Betriebsweise einer Absorptionskälteanlage zur Kühlung und Raumklimatisierung unter Anwendung von neuen Arbeitsstoffpaaren und Niedertemperaturantriebsquellen“**

### **Förderung:**

Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (BMWA)  
Projektträger Jülich (PTJ) des BMWA  
Herr Stephan Hebestreit  
**Förderkennzeichen: 0327320A**

### **Ausführende Stelle:**

Technische Universität Ilmenau  
Fakultät für Maschinenbau  
Fachgebiet Thermo- und Magnetofluidynamik  
Postfach 100565  
98684 Ilmenau

**Projektleiter:** Univ.-Prof. Dr.-rer. nat. habil. André Thess

### **Projektbearbeiter:**

PD Dr.-Ing. habil. Salman Ajib  
Dipl.-Ing. Ali Karno  
Dipl.-Ing. Andreas Nilus  
Dipl.-Ing. (FH) Jürgen Aust

## Vorwort

Die Kältetechnik hat eine große Bedeutung in verschiedenen Einsatzgebieten. Sie ist für die Lösung der Energie- und Versorgungsprobleme sowie für die Rationalisierung der Produktion dringend erforderlich. Deswegen ist die Forschung auf diesem Gebiet auch eine Notwendigkeit, damit diese Technik ihre Entwicklung und ihre Effektivität wirtschaftlich und umweltfreundlich aufrecht erhalten kann. Dieser Fakt erfordert, dass dem energetischen, ökonomischen und ökologischen Aufwand zur Erzeugung der notwendigen Kälte eine besondere Beachtung gewidmet werden muss.

Zur Verminderung der Schadstoffemission und Schonung der konventionellen Energieträger hat man in der letzten Zeit die Forschung auf dem Gebiet der Anwendung der regenerativen Energien zur Kälteerzeugung und Klimatisierung intensiviert. Dieses Forschungsgebiet stellt das Hauptanliegen des Forschungsvorhabens dar.

Herkömmliche Kälteerzeugungsanlagen arbeiten mit relativ hohem inneren Wirkungsgrad, die Antriebsenergie muss jedoch in Kraftwerken verlustreich erzeugt und über weite Strecken transportiert werden. Der Einsatz thermischer Kompressoren stellt eine Möglichkeit zur Nutzung anfallender Abwärme, Solarenergie und Fernwärme dar. Für viele Anwendungsfälle in der Kälte- und Klimatechnik bieten die kontinuierlichen Absorptionskältemaschinen gut angepasste Lösungen. Bei großen Lastschwankungen verringern sich die Leistungszahlen besonders im Teillastbetrieb gravierend. Dies führt zu einer Erhöhung der spezifischen Kosten der Kälteerzeugung. Die Kombination kontinuierlicher Systeme mit integrierten Kältespeichern kann eine gute Alternative zur Begrenzung dieser Nachteile bieten. Eine weitere Möglichkeit des Umgehens der Nachteile des Teillastbetriebes besteht in der Teilung des Verdampfers der Kältemaschine und so, mit der kontrollierten Kälteerzeugung weiter zu fahren.

Dadurch trägt die Anwendung der Absorptionskältemaschinen zur Kälteerzeugung und Klimatisierung einen Hauptanteil an der Lösung der Ozonproblematik und der Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bei. Sie können erstens mit FCKW-freien Kältemitteln in allen Leistungsbereichen arbeiten und zweitens haben solche Kälteerzeuger den Vorteil, dass sie mit thermischer Energie betrieben werden, die durch regenerative Energiequellen, insbesondere die solarthermische Energie und industrielle Abwärme, zur Verfügung gestellt werden können.

Ausgehend von diesen genannten Fakten wurde das Hauptziel des Vorhabens so formuliert, dass man eine Absorptionskältemaschine (AKM), die mit niedrigen Antriebstemperaturen betrieben werden kann und gleichzeitig einen hohen Wirkungsgrad hat, zu entwickeln, die dafür geeigneten Arbeitsstoffpaare zu untersuchen, die thermodynamischen Eigenschaften zu ermitteln und die Funktionsweise der Maschine durch Simulation und Messungen zu optimieren. Die Bewältigung dieser Aufgabenstellung wurde durch die enge Zusammenarbeit zwischen beiden Projektpartnern der Firma TWA Anlagenbau Thüringen, Bad Blankenburg und der Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Thermo- und Magnetofluidynamik zum größten Teil realisiert.

*Das Vorhaben wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technology (BMWi) gefördert und vom Projektträger Jülich ständig unterstützt. An dieser Stelle möchten die Autoren sich bei beiden Einrichtungen recht herzlich bedanken. Einen besonderen Dank gebührt dabei Herrn Gehrman, Dr. Börner, Herrn Schäfer, Herrn Hebestreit und Frau Keller. Einen weiteren Dank gilt auch den Firmen WEGRA GmbH, Westenfeld für die Fertigung der Speziallaborabsorptionskältemaschine und TWA Wärmeanlagenbau Thüringen GmbH & Co.KG, Bad Blankenburg für die gute Zusammenarbeit.*

**Inhaltsverzeichnis**

1	Grundlagen.....	7
1.1	Aufgabenstellung.....	7
1.2	Ausgangssituation.....	8
1.3	Vorhabensvoraussetzungen.....	8
1.4	Vorhabensplanung.....	9
1.5	Ablauf des Bearbeitungsprogramms.....	9
1.6	Darstellung des Standes der Technik.....	11
1.7	Zusammenarbeit mit externen Stellen.....	13
2	Vorhabensdurchführung.....	14
2.1	Ablauf des Vorhabens.....	14
2.2	Vorhabensänderungen.....	14
2.2.1	Technische Abweichungen.....	15
2.2.2	Organisatorische Abweichungen.....	15
2.3	Technischer Fortschritt, der während des Vorhabens bekannt geworden ist.....	15
2.4	Erfolgte Veröffentlichungen von Ergebnissen.....	15
3	Ergebnisse.....	17
3.1	Darstellung der Ergebnisse.....	17
3.1.1	Untersuchung der Materialverträglichkeit zwischen dem neuen Arbeitsstoffpaar und den Materialien der Absorptionskältemaschine.....	17
3.1.2	Ermittlung des spezifischen elektrischen Widerstandes des Arbeitsstoffpaares (Patentanmeldung).....	25
3.2	Aufbau und Auslegung eines Versuchsmusters eines Rohrbündelwärmetauschers.....	26
3.2.1	Beschreibung der Versuchsanlage.....	27
3.2.2	Ergebnisse der Untersuchungen.....	28
3.3	FEM-Untersuchungen der Einflüsse von Umlenkblechen auf den Wärmewirkungsgrad der Rohrbündelwärmetauscher.....	33
3.3.1	Physikalische Modellierung.....	33
3.3.2	Mathematische Beschreibung.....	33
3.3.3	Numerische Simulation.....	35
3.3.3.1	Einfluss der Anzahl der Umlenkbleche auf den Wärmewirkungsgrad, auf die Geschwindigkeitsverteilung und auf die Druckverluste im Wärmetauscher.....	37
3.3.3.2	Abhängigkeit des Wärmewirkungsgrades und der Druckverluste des Rohrbündelwärmetauschers von der Höhe des Ausschnitts aus den Umlenkblechen.....	40
3.3.4	Auswahl des optimierten Modells.....	47
3.3.5	Praktische Untersuchungen.....	49
3.3.6	Zusammenfassung.....	51

3.4	Untersuchungen der Labor-Absorptionskälteanlage mit den Arbeitsstoffpaaren H <sub>2</sub> O/LiBr und Aceton/Zinkbromid.....	53
3.4.1	Aufbau der Laboranlage.....	53
3.4.2	Durchgeführte Untersuchungen .....	55
3.4.2.1	Untersuchungsergebnisse der Laboranlage mit dem konventionellen Arbeitsstoff- paar H <sub>2</sub> O/LiBr.....	56
3.4.2.2	Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse der Laboranlage mit dem konventionellen Arbeitsstoffpaar H <sub>2</sub> O/LiBr .....	62
3.4.3	Untersuchungsergebnisse der Laboranlage mit dem neuen Arbeitsstoffpaar Aceton/ZnBr <sub>2</sub> .....	62
3.4.3.1	Untersuchungen der Eigenschaften des neuen Arbeitsstoffpaares Aceton/ZnBr <sub>2</sub> .....	62
3.4.3.1.1	log p, 1/T-Diagramm des neuen Arbeitstoffpaares Aceton/ZnBr <sub>2</sub> .....	62
3.4.3.1.2	Physikalische Eigenschaften des Kältemittels Aceton .....	64
3.4.3.2	Untersuchungsergebnisse der Laboranlage mit dem neuen Arbeitsstoffpaar Aceton/ZnBr <sub>2</sub> .....	65
3.4.3.2.1	Untersuchungsergebnisse der Laboranlage mit dem neuen Arbeitsstoffpaar Aceton/ZnBr <sub>2</sub> im Teillastbetrieb .....	65
3.4.3.2.2	Untersuchungsergebnisse der Laboranlage mit dem neuen Arbeitsstoffpaar Aceton/ZnBr <sub>2</sub> im Vollastbetrieb.....	69
3.4.3.3	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	71
4	Konstruktive Erkenntnisse und Probleme im Betrieb der Laboranlage.....	72
5	Auslegung der Versuchsabsorptionskälteanlage für den Industriepartner.....	73
5.1	Theoretische Grundlagen .....	73
5.2	Berechnungslauf .....	77
5.2.1	Auslegung des Verdampfers .....	77
5.2.2	Auslegung des Verflüssigers.....	79
5.2.3	Berechnung und Gestaltung des Austreibers, des Absorbers und des Lösungswärmetauschers .....	80
5.2.3.1	Bemessung des Austreibers (theoretische Grundlagen) .....	80
5.2.3.1.1	Berechnung des Wärmeübergangs auf der Heizseite bei Strömung durch eine Rohrschlange.....	80
5.2.3.1.2	Berechnung des Wärmeübergangs auf der Seite der siedenden Lösung .....	81
5.2.3.1.3	Berechnung der Wärmeübergangszahl des Austreibers .....	83
5.2.3.2	Der Absorber und seine Bauarten.....	84
5.2.3.2.1	Bestimmung des Wärmeübergangs auf der Kühlwasserseite .....	85
5.2.3.2.2	Bestimmung des Wärmeübergangs auf der Kühlwasserseite bei Berieselungsapparaten.....	85
5.2.3.2.3	Bestimmung des Wärmeübergangs auf der Seite der absorbierenden Lösung bei Berieselungsapparaten .....	86



---

5.3	Berechnung des Prozesses für das Arbeitsstoffpaar H <sub>2</sub> O/LiBr .....	88
6	Bemessung der Komponenten der AKM mit dem Arbeitsstoffpaar H <sub>2</sub> O/LiBr (vertraulich; nur für Projektträger bestimmt; Seiten fehlen) .....	101-117
7	Aufbau des Funktionsmusters beim Industriepartner (vertraulich; nur für Projektträger bestimmt; Seiten fehlen) .....	118-119
8	Berechnungsbeispiel zum Vergleich der konventionellen Arbeitsstoffpaare (NH <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O und H <sub>2</sub> O/LiBr) mit dem neuen Arbeitsstoffpaar (C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O/ZnBr <sub>2</sub> ).....	120
9	Simulationsergebnisse der Anlage.....	126
9.1	Simulation und Optimierung des Gesamtsystems .....	126
9.1.1	Modellbildung.....	126
9.1.2	Wärmeübertragungsanalyse und Energiebilanzen der Komponenten .....	127
9.1.3	EES-Simulationsmodell.....	133
9.1.4	Erstellung einer Benutzeroberfläche .....	133
9.1.5	Simulationsergebnisse .....	134
9.1.5.1	Wärmeverhältnis und spezifischer Lösungsumlauf der Aceton-Zinkbromid Absorptionskältemaschine .....	134
9.1.5.2	Einfluss der Kondensationstemperatur .....	139
9.1.5.3	Einfluss der internen Wärmetauscher .....	144
9.2	Vergleich zwischen Simulations- und Messergebnissen an einer Laborabsorptions- kälteanlage.....	150
10	Nutzen der Ergebnisse .....	153
11	Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschrittenen Verwertungsplans.....	153
12	Zusammenfassung .....	154
13	Literaturverzeichnis .....	155
Anhang		
A1	Anhang 1: Ergebniskontrollbericht.....	159
A2	Anhang 2: Thermodynamische und physikalische Eigenschaften des neuen Arbeitsstoffpaares Aceton/Zinkbromid und des neuen Kältemittels Aceton.....	162

- Leerseite -

## 1 Grundlagen

### 1.1 Aufgabenstellung

Die Aufgabe des vorliegenden Projektes besteht darin, eine Absorptionskältemaschine im unteren Leistungsbereich zu entwickeln, welche unter Anwendung eines neuen Arbeitsstoffpaares funktioniert. Als Grundlage dafür sind die theoretisch grundlegenden Stoffeigenschaften und thermischen Eigenschaften verschiedener Arbeitsstoffpaarkombinationen zu untersuchen.

Die Ziele des Vorhabens sind folgende:

- Gesamtziel des Vorhabens besteht darin, eine optimierte Absorptionskältemaschine mit neuem Arbeitsstoffpaar, welche mit Niedertemperaturantriebsquellen betrieben werden soll, zu entwickeln, als Versuchsmuster beim Forschungspartner und als Prototyp beim Verbundpartner zu bauen, in Betrieb zur Raumklimatisierung zu nehmen und zu untersuchen. Die Ergebnisse werden ausgewertet und die Verbesserungsmöglichkeiten abgeleitet.
- Das Vorhaben soll einen Beitrag zur energetischen Optimierung der Gebäudeklimatisierung leisten. Demzufolge gliedert es sich unter BMBF Förderkonzept „Solaroptimiertes Bauen, Teilkonzept 2: Solarunterstützte Heizungs-, Lüftungs-, Klimasysteme von 1995 bis 2005“. Es wird erwartet, dass durch diesen Beitrag eine optimale Nutzung der zur Verfügung stehenden solarthermischen Energie zur Raumklimatisierung, realisierbar wird.
- Die wissenschaftlichen und technischen Arbeitsziele des Vorhabens bestehen darin, dass durch den Optimierungsvorgang ein Simulationsprogramm für das Gesamtklimatisierungssystem erstellt und bearbeitet werden soll. Das Programm wird anhand praktischer Untersuchungen getestet. Die Untersuchungsergebnisse dienen zum Vergleich mit den Rechenergebnissen nach Simulationsprogramm und demzufolge zur möglichen Verbesserung des Programms. Durch die mehreren Untersuchungen am Labormuster beim Forschungspartner hat man die Möglichkeit einen optimierten Prototyp aufbauen zu können. Der Industriepartner, die Firma TWA Wärmeanlagenbau Thüringen, beschäftigt sich vorwiegend mit Wärmeerzeugung für Nahwärmeversorgung. Zu ihrem Arbeitsgebiet gehören auch Demonstrationsprojekte zur Nutzung der regenerativen Energien. Zur effektiven Nutzung der erzeugten Wärme, besonders im Sommer, ist vorgesehen, dass man zu der Demonstrationsanlage eine Absorptionskälteanlage hinzufügt, welche mit Fernwärme und solarthermischer Wärme angetrieben wird. Deswegen bestehen die technischen Arbeitsziele des Vorhabens darin, diese Absorptionskälteanlage so zu konzipieren, dass man die erzeugte Wärme ohne gravierend zusätzliche Kosten nutzen kann und so zu optimieren, dass die Kosten und die Betriebsweise am günstigsten sind. Weiterhin ist die Konzeption so zu erstellen, dass man verschiedene Arbeitsstoffpaare und Antriebstemperaturen untersuchen kann. Bei der Auswahl der Materialien der Komponenten soll die Möglichkeit des Einsatzes von verschiedenen Arbeitsstoffpaaren gegeben sein. Es sollen auch die Erfahrungen und Untersuchungsergebnisse des aktuellen Wissensstandes der Forschung berücksichtigt werden.

Zum Schluss stellt dieses Projekt gleichzeitig ein Demonstrationsprojekt und Prototyp dar.

Die o. g. Ziele wurden im Laufe der Bearbeitungszeit des Projektes verfolgt und zum größten Teil mit Erfolg erreicht.

## 1.2 Ausgangssituation

Ausgangssituation für die Abarbeitung der Forschungsarbeit war der bisherige Stand der Technik, im Rahmen dessen es derzeit keine marktfähige Anlage oder Versuchsanlage gibt, die erfolgreich mit einem alternativen Arbeitsstoffpaar betrieben wurde.

Stand der Technik sind Anlagen, die im betrachteten Leistungsbereich mit dem Arbeitsstoffpaar Lithiumbromid-Wasser betrieben werden. Grundlegende technische Anforderungen können hier beachtet und mit eingebracht werden.

## 1.3 Vorhabensvoraussetzungen

Die Voraussetzungen zur Bearbeitung und Durchführung des Vorhabens liegen begründet in den wesentlichen Arbeiten der TU Ilmenau vor. Diese umfassen die wissenschaftlichen theoretischen und praktischen Grundlagen der Funktionsweise der behandelten Anlagentechnik sowie die Möglichkeit zur Schaffung der fehlenden Kenntnis auf dem Forschungsgebiet.

Das Fachgebiet Thermo- und Magnetofluidynamik hat folgende Forschungsschwerpunkte:

- Magnetofluidynamik
- Optische Strömungsmesstechniken
- Solarthermische Systeme (darunter solarthermische Kühlung und Klimatisierung)
- Thermische Konvektion

Das Fachgebiet ist für die Grundausbildung auf folgenden Gebieten verantwortlich:

- Technische Thermodynamik
- Strömungslehre
- Wärmeübertragung

Weiterhin werden folgende zusätzliche Spezialvorlesungen angeboten:

- Energieoptimierte Gebäudetechnik
- Magnetofluidynamik
- Numerische Strömungssimulation
- Solarthermie
- Umweltmesstechnik
- Wärmeversorgungssysteme und regenerative Energien
- Wärmepumpe/Kältetechnik

Besondere Kompetenzen der TU Ilmenau bestehen durch

- mehrjährige Erfahrungen und Forschungen auf dem Gebiet der Kältetechnik, insbesondere des solarthermischen Kühlens und Klimatisieren
- mehrjährige Erfahrungen und Forschungen auf dem Gebiet der Anwendung, Messung und Auswertung der regenerativen Energien, insbesondere der solaren Energie

Auf dem Gebiet der solarthermischen Kälteerzeugungssysteme laufen Arbeiten seit 1994.

Diese Grundvoraussetzungen und Kompetenzen haben sich bei Bearbeitung des Projektes in Form von guten Ergebnissen reflektiert.

## 1.4 Vorhabensplanung

Die Erzeugung der Kälte durch Absorptionskälteanlagen ist bereits seit mehreren Jahrzehnten bekannt. Der Aufbau und die Betriebsweise solcher Anlagen sind ebenfalls bekannt. Trotzdem werden die Verbesserungs- und Entwicklungsmöglichkeiten immer erweiterbar bleiben.

Das Problem, dessen Lösung zugleich die Innovation darstellt, besteht darin, ein System der Absorptionskälteerzeugung zu schaffen, welches das optimale technische und wirtschaftliche Betriebsverhalten aufweist. Die Optimierung erstreckt sich auf die Konstruktion der Baugruppen der AKA, dass die optimalen Wärmeübertragungskoeffizienten erreicht werden können, wobei die Darstellung der Anlagen (Herstellung und Betrieb) mit vertretbaren Investitions- und Betriebskosten möglich sein muss. Es wird angestrebt ein Absorptionskälteerzeugungssystem zu entwickeln, welches mit niedrigen Antriebstemperaturen betrieben werden kann und trotzdem einen hohen Wirkungsgrad hat. Dies wird durch Optimierung des gesamten Klimatisierungssystems als Einheit mit vielen Komponenten und Varianten ausgeführt.

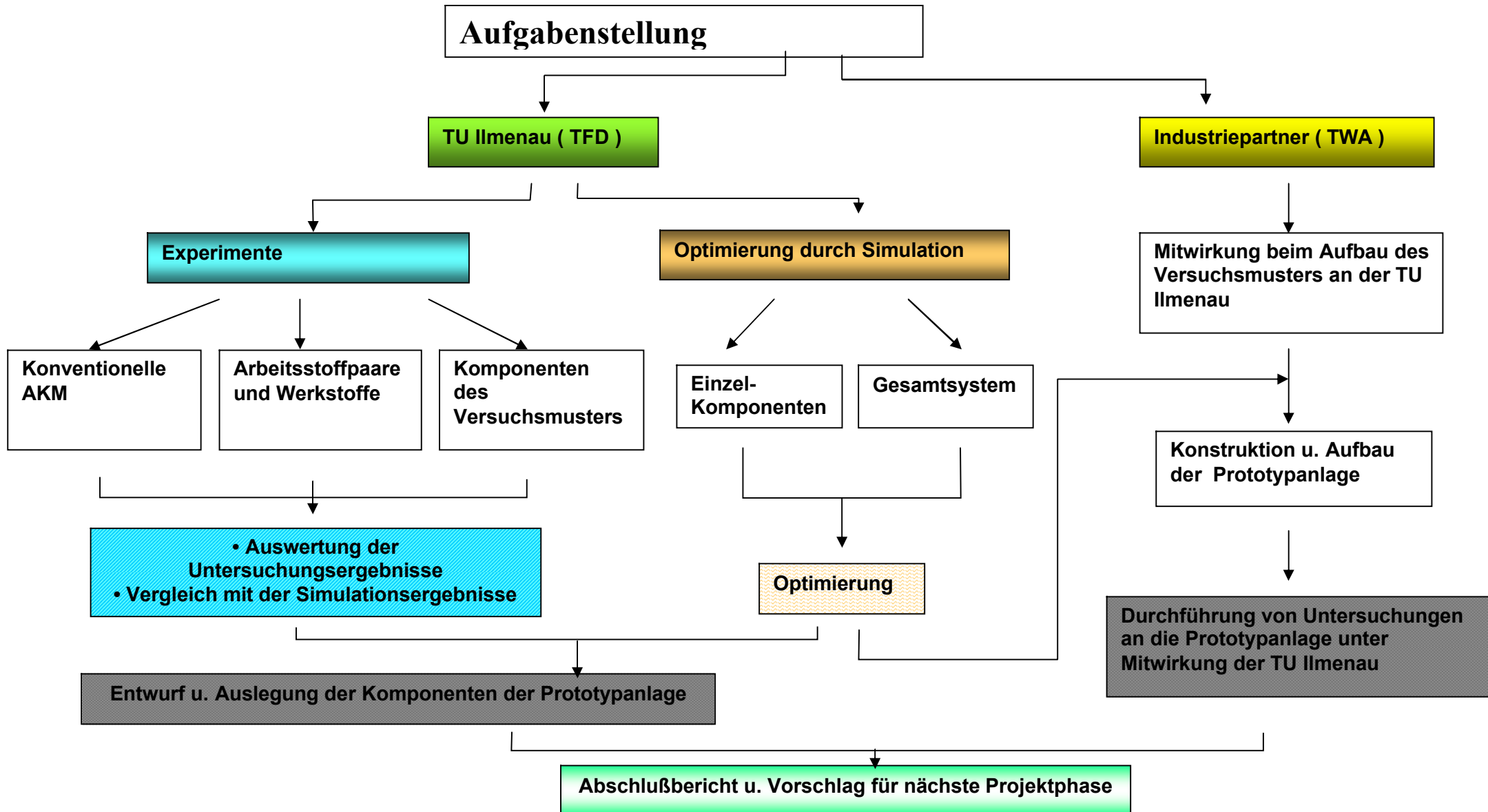
Während der Laufzeit des Vorhabens wurden folgende Arbeitsschritte bearbeitet:

- Analyse des Standes der Forschung auf dem Gebiet der Optimierungsverfahren der Absorptionskälteerzeugung
- Analyse des Standes der Forschung auf dem Gebiet der Arbeitsstoffpaare und Kältemittelgemische der Absorptionskältemaschinen
- Auswahl der Optimierungsmethode und -Varianten, bzw. -variablen
- Erstellung eines Simulationsprogramms zur Berechnung und Simulation der Systemkomponenten (Kälteerzeugungssystem)
- Auswahl der Betriebsweise der Absorptionskältemaschine unter Berücksichtigung der Randbedingungen und den ersten Optimierungsergebnissen
- Auslegung und Fertigung eines Versuchswärmetauschers
- Durchführung von Untersuchungen an den gefertigten Wärmetauscher zur Ermittlung der Wärmeübertragungskoeffizienten bei verschiedenen Betriebsmedien und Bedingungen
- Fertigung des Planes zum Aufbau der speziellen Versuchsabsorptionskälteanlage (Bestückung der Anlage mit genügender Sensorik zur Diagnose der Betriebsweise bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen und mit unterschiedlichen Arbeitsstoffpaaren).
- Voruntersuchungen auf einer konventionellen Absorptionskältemaschine als Versuchsmuster
- Auswertung der Untersuchungsergebnisse des Versuchsmusters
- Auslegung der Komponenten des Prototyps anhand des Kältebedarfs und der Verfügbarkeit der Antriebsenergie (Kombination verschiedener Antriebsquellen) unter Berücksichtigung der Optimierungsergebnisse des Versuchsmusters
- Betreuung des Aufbaues eines Versuchsmusters beim Industriepartner

## 1.5 Ablauf des Bearbeitungsprogramms

Zur Realisierung des gesamten Zieles des Vorhabens wurde folgender Lösungsweg (siehe nachfolgendes Schema) begangen:

Schema: Lösungsweg der Aufgabenstellung



## 1.6 Darstellung des Standes der Technik

Herkömmliche Kälteerzeugungsanlagen arbeiten mit einem relativ hohen inneren Wirkungsgrad, die Antriebsenergie muss jedoch in Kraftwerken verlustreich erzeugt und über weite Strecken transportiert werden. Der Einsatz von Absorptionskälteanlagen stellt eine Möglichkeit zur Nutzung anfallender industrieller Abwärme und der solarthermischen Energie dar. Dadurch ermöglichen solche Kälteerzeugungsanlagen der Schonung der konventionellen Energiequellen und der Umwelt, weil sie mit FCKW-freien Kältemitteln in allen Leistungsbereichen arbeiten können. Somit trägt die Anwendung der Absorptionskältemaschinen zur Kühlung und Klimatisierung einen Hauptanteil an der Lösung der Ozonproblematik und der Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bei.

Über die solarunterstützte Klimatisierung von Gebäuden ist viel in der Literatur veröffentlicht worden /1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12/. Bisher wurden jedoch keine Optimierungsfragen im Bezug auf die Betriebsweise und den Arbeitsstoffpaaren behandelt. Diese bildete die Motivation zur Erstellung und Bearbeitung dieses Projektes.

Die Nutzung der Solarenergie zur Klimatisierung kann auf zwei Wegen realisiert werden. Entweder durch Umwandlung der Solarenergie über Photovoltaik in elektrischer Energie, die zum Antrieb der konventionellen Technik eingesetzt wird, oder durch Anwendung der Solarenergie als thermische Energie zum ganzen oder teilweisen Antrieb von unterschiedlichen sorptiven Systemen. Die thermische Nutzung der Solarenergie ermöglicht eine direkte thermische Kopplung mit anderen regenerativen Energiequellen und darüber hinaus gute Voraussetzungen zur Nutzung von Abwärme, die aus Industrieprozessen eingebunden werden kann.

Das Austreibungstemperaturniveau bei der solarthermisch betriebenen Absorptionskälteanlage beeinflusst neben den Wirkungsgraden der Solarkollektoren den Deckungsgrad der solaren Energiebereitstellung und damit den Gesamtenergieaufwand. Deswegen stellt sich die Forderung nach einem möglichst geringen Temperaturniveau für die Nutzung der solarthermischen Energie.

Die einstufigen Absorptionskältemaschinen mit dem Arbeitsstoffpaar NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O oder H<sub>2</sub>O/LiBr benötigen hohe Austreibertemperaturen, deswegen muss man immer mit einer zusätzlichen Wärmequelle rechnen oder es müssen effiziente Hochleistungssolarkollektoren eingesetzt werden. Andere Möglichkeiten bestehen in der Anwendung von Arbeitsstoffpaaren, die mit niedrigen Antriebstemperaturen betrieben werden können. Diese Anforderung bildete ein Teilziel dieses Vorhabens.

Weltweit, besonders in den USA und in Japan, sind die Wasser/Lithiumbromid- und Ammoniak/Wasser-Absorptionskälteanlagen dominierend. Diese Anlagen sind oft gas- oder direktbefeuerte Anlagen /13/.

Durch das erhöhte Interesse an der Anwendung kostenloser solarthermischer Energie sind viele Pilotprojekte erstellt und bearbeitet worden.

Hornberger /5/ hat in seiner Dissertation ein System zur solarunterstützten Heizung und zur Kühlung von Gebäuden bearbeitet und dargestellt. Es wurden solarunterstützte Heizungssysteme und kombinierte Heiz-/Kühlssysteme mit Wärme-/Kältespeicher durch Simulationsprogramme theoretisch untersucht und teilweise experimentell geprüft. Aber es wurden keine Alternativen für die Arbeitsstoffpaare betrachtet.

Eißer /6/ hat eine Dissertation über eine solarangetriebene Absorptionskältemaschine zur Klimatisierung vorgelegt. Er hat die Einflussgrößen auf den Einsatz einer solchen Maschine analysiert und untersucht. Er kam zu dem Ergebnis, dass man durch Anwendung der solarangetriebenen AKM zur Gebäudeklimatisierung zu einer erheblichen Reduzierung des Primärenergieverbrauchs kommt. Diese Fragestellungen wurden in zahlreichen weiteren Studien bearbeitet /14, 15, 16, 17/. Im Laufe der Bearbeitungszeit des Projektes sind auch

einige Veröffentlichungen über solarthermisch betriebenen Absorptionskälteanlagen erschienen /18, 19, 20, 21/.

Durch Patentrecherchen auf dem Gebiet der niedertemperaturbetriebenen Absorptionskälteanlagen zur Raumklimatisierung wurde festgestellt, dass noch keine Absorptionskälteanlage (AKA) mit dem untersuchten Arbeitsstoffpaar als Patent für diesen Zweck angemeldet ist (außer unseren neuen Anmeldungen).

In der Offenlegungsschrift DE 195 35 841 A1 /22/ ist eine Vorrichtung zur Klimatisierung vorgestellt. Es handelt sich um eine Vorrichtung zur Klimatisierung mit einer Absorptionskältemaschine, die mit Solarenergie und anderer Hilfsenergie betrieben wird. Zur Minderung der Hilfsenergie wurde ein Heizwasserspeicher in dem Heizkreislauf aufgebaut.

Eine ähnliche Vorrichtung zur Kälteerzeugung auf Schiffen ist in der Offenlegungsschrift DE 43 07 363 A1 /23/ dargestellt. Die Anlage besteht aus einer Absorptionskältemaschine, die mit Dampf oder Heizwasser betrieben wird. Diese beiden Produkte werden aus der Abwärme der Haupt- und Hilfsdiesel erzeugt.

In der Patentschrift DE 3014320 C2 /24/ wurde ein Verfahren zur Erzeugung von Kälte und / oder Wärme mittels eines Absorptionszyklus durch zweistufige Absorptionskälteanlage beschrieben. Die Offenlegungsschrift DE 4003446 A1 /25/ beschreibt ein Verfahren zur Erzeugung von Kälte und Nutzung der Kondensationswärme.

In anderen Patentschriften, wie bei DE 196 20 460 A1 /26/, DE 196 20 462 A1 /27/ und DE 40 33 891 A1 /28/ sind Vorrichtungen als Teilkomponenten der Absorptionskältemaschine mit verbesserten Betriebseigenschaften beschrieben.

In der Patentschrift DE 101 08 768 C2 /29/ wurde eine Absorptionskälteanlage mit Niedertemperaturnutzung beschrieben. Die Besonderheit dieses Patents besteht darin, dass man versucht, durch konstruktive Maßnahmen die Effektivität der Kälteerzeugung und -nutzung zu erhöhen.

In den Offenlegungsschriften DE 195 02 543 A1 /30/ und DE 197 05 853 A1 /31/ sind solarthermisch betriebene Absorptionskälteanlagen in Kombination mit Elektro- und Gasenergie als Zusatzenergie aufgeführt.

Die Patentrecherche auf dem Gebiet der Arbeitsstoffpaare der Absorptionskältemaschinen hat folgendes ergeben:

In der Offenlegungsschrift DE 31 42 454 A1 /32/ ist ein Stoffsystem von Wasser und andere Zusätze zur Erniedrigung des Schmelzpunktes vom Wasser genannt, um die Verdampfung des Wassers im Verdampfer zu ermöglichen.

Die Offenlegungsschrift DE 3220889 A1 /33/ befasst sich mit Arbeitsstoffgemischen für Absorptionskältemaschinen auf Basis von Metallsalzgemischen und Methanol mit Wasser als Beimischung.

Die Offenlegungsschrift DE 32 18744 A1 /34/ stellt eine Zusammensetzung von Salzgemischen als Absorptionsmittel bei Absorptionsklimaanlagen dar. Ziel dieser Mischung besteht darin, die Kristallisationsgrenze bei Wasser/Lithiumbromid zu senken.

Andere Patente und Gebrauchsmuster auf diesem Gebiet beschäftigen sich mit der Entwicklung und/oder Verbesserung von Komponenten der AKA und ihrer Eigenschaften zur Erweiterung der Einsatzmöglichkeiten.

Ausgehend vom Stand der Technik und Patentsituation (es wurde eine Patentrecherche durch Patentabteilung der TU Ilmenau durchgeführt) hat sich ergeben, dass das bearbeitete Projekt mit seinen Spezifikationen noch nicht woanders behandelt wurde.



### 1.7 Zusammenarbeit mit externen Stellen

Im Projekt ist die Zusammenarbeit mit einem externen Kooperationspartner (Industriepartner) geplant. Dieser Partner ist die Firma TWA Wärmearbeitsanlagenbau Thüringen. Die TWA ist ein regional ansässiges Wärmearbeitsanlagenbauunternehmen, welches weitreichende Erfahrungen auf dem Gebiet der Errichtung und dem Betrieb von Anlagentechnik zur Erzeugung und Anwendung von Wärme im haustechnischen und industriellen Bereich vorzuweisen hat.

Durch die Zusammenarbeit zwischen beiden Partnern, Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Thermo- und Magnetofluidynamik und der Firma TWA Wärmearbeitsanlagenbau Thüringen wurden die Bearbeitungsschritte des Vorhabens so geteilt, dass man die theoretischen Ergebnisse mit den praktischen vergleichen und die notwendigen Änderungen oder Optimierungsfaktoren ableiten und praktizieren kann. Die Firma TWA Wärmearbeitsanlagenbau Thüringen übernimmt die zu praktischen Untersuchungen notwendigen Arbeiten (Konstruktion, Aufbau und Inbetriebnahme des Prototyps, Verbesserungsarbeiten am Prototyp, um die Vermarktungschancen zu erhöhen). Die langfristigen Untersuchungen des Prototyps (für ca. zwei Jahre) sollen auch bei dieser Firma durchgeführt werden. Dafür ist eine direkte Datenübertragung von der Anlage zum Datenverarbeitungssystem des Forschungspartners vorgesehen. Diese dient zur direkten und kontinuierlichen Auswertung der Untersuchungsergebnisse.

Die Arbeitsschritte des Industriepartners beinhalteten:

- Analyse der Energiebilanzen im Standort des Pilotprojektes (diese Angaben sind notwendig für die Forschungspartner zur Bestimmung des Kältebedarfs und der Verfügbarkeit der Antriebsenergie mit den zugehörigen Temperaturniveaus).
- Vorbereitende Vorarbeiten zum Aufbau des Prototyps (Platzanordnung, Materialbeschaffung, Personalplanung, etc.)
- Konstruktion der Komponenten des Prototyps
- Aufbau des Solarheizsystems unter Berücksichtigung der Kombinierbarkeit mit anderen Heizsystemen
- Aufbau des Kälteerzeugungssystems entsprechend der Konzeption des Forschungspartners
- Anbindung der Systeme miteinander
- Aufbau des Datenerfassungssystems
- Erstellung eines Untersuchungs- und Durchführungsprogramms auf der Prototypanlage in Zusammenarbeit mit dem Forschungspartner
- Durchführung der Daueruntersuchungen auf der Prototypanlage
- Auswertung der Untersuchungsergebnisse des Prototyps in Zusammenarbeit mit dem Forschungspartner
- Dokumentation und Erstellung des Abschlussberichtes.

## 2 Vorhabensdurchführung

### 2.1 Ablauf des Vorhabens

Der Vorhabensablauf war wie folgt geplant.

- 1) Fertigung des Versuchsmusters Container-Solaranlage mit den erforderlichen Strom- und Wasseranschlüssen anhand Anlagenschema u. Kostenangebote
- 2) Auslegung und Konstruktion eines Versuchsrohrbündelwärmetauschers
- 3) Fertigung des konstruierten Versuchsrohrbündelwärmetauschers
- 4) Aufbau eines Versuchsstandes mit dem Versuchsrohrbündelwärmetauscher
- 5) Beschaffung einer speziell gefertigten Laborabsorptionskälteanlage
- 6) Durchführung von Voruntersuchungen mit dem gefertigten Wärmetauscher und Solaranlage bzw. Thermostaaten zur Bestimmung der thermischen Eigenschaften des Wärmetauschers. Diese Untersuchungen beinhalteten folgende Teilschritte:
  - a) Aufbau der notwendigen Messstellen und -geräte an den entsprechenden Stellen (Strömungswächter, Druck- und Temperatursensoren, etc.)
  - b) Durchführung der Untersuchungen mit unterschiedlichen Temperatur- und Leistungsniveaus
  - c) Durchführung der Untersuchungen mit unterschiedlichen Arbeitsstoffpaaren in verschiedenen Konzentrationen und unterschiedlichen Antriebstemperaturen unter Einbeziehung der Solarenergie (zuerst werden die Untersuchungen mit Wasser durchgeführt)
  - d) Ermittlung der Betriebskurven der Absorptionskälteanlage
  - e) Auswertung der Untersuchungsergebnisse
- 7) Vorschlag der geeigneten Komponenten des neuen Versuchsmusters anhand der gewonnenen Untersuchungsergebnisse
- 8) Ermittlung der Betriebskurven des Versuchsmusters unter Berücksichtigung der Simulations- und Optimierungsergebnisse
- 9) Zusammenfassung und Entwurf der Prototypanlage, zusammen mit dem Industriepartner, beim Industriepartner
- 10) Weiteruntersuchung der Anlage unter verschiedenen Betriebsbedingungen unter dauernde Auswertung der Untersuchungsergebnisse

### 2.2 Vorhabensänderungen

Im Laufe der Bearbeitung des Projektes kam es zu keinen wesentlichen Änderungen hinsichtlich der Ziele und der Inhalte des Projektes. Die Strategie der Untersuchung und Anwendung eines neuen Arbeitsstoffpaares wurde beibehalten.

Es wurde lediglich die Wahl in der Beschaffung der Laboranlage geändert. Aufgrund von dieser Änderung kam es zu zeitlichen Verzögerungen, die durch eine kostenneutrale Verlängerung kompensiert wurden.

### **2.2.1 Technische Abweichungen**

Die technischen Abweichungen im Projekt beziehen sich lediglich, wie oben angedeutet, auf die Wahl der zu beschaffenden Laboranlage. Im Rahmen des Projektantrages wurde mit der Beschaffung einer Anlage der Fa. ZAE Bayern kalkuliert, die eigens für diesen Zweck hergestellt worden wäre. Im Laufe der ersten Projektphase kam es zu einer Veränderung der Lage auf dem Markt der Absorptionskältemaschinen. Eine Anlage der Firma WEGRA, Westenfeld, Thüringen, wurde im zu untersuchenden Leistungsbereich für das herkömmlich verwendete Arbeitsstoffpaar Wasser/Lithiumbromid entwickelt und optimiert. Die Anlagen haben sich bereits auf dem Markt bewährt.

Es bot sich aus diesen Gründen an, eine Anlage der Fa. WEGRA als Laboranlage anpassen zu lassen sowie auf das zu verwendende neue Arbeitsstoffpaar abzustimmen. Hierbei spielte die Materialauswahl anhand der im Rahmen des Projektes durchgeführten Untersuchungen sowie die in Beziehung mit dem neuen Arbeitsstoffpaar sehenden Betriebskennwerte der Anlage eine Rolle.

Die dargestellte Vorgehensweise führte zu geringeren Kosten in der Anschaffung sowie zu dem Vorteil, mit einer bereits fertig entwickelten Anlage arbeiten zu können. Diese Effizienzsteigerung kam dem ohnehin sehr zeitintensiven Gesamtprojekt zugute.

### **2.2.2 Organisatorische Abweichungen**

Organisatorische Abweichungen erfolgten im Rahmen der oben beschriebenen kostenneutralen zeitlichen Verlängerung des Projektes. Damit einhergehend dehnte sich der Arbeitsplan entsprechend, was dessen inhaltlichen Anforderungen keinen Abbruch tat.

## **2.3 Technischer Fortschritt, der während des Vorhabens bekannt geworden ist**

Hinsichtlich der Anwendungen neuer Arbeitsstoffpaare in Absorptionskältemaschinen konnte während der Vorhabenslaufzeit kein technischer Fortschritt anderer Institutionen festgestellt werden.

## **2.4 Erfolgte Veröffentlichungen von Ergebnissen**

Im Laufe des Projektbearbeitungszeitraumes wurden bereits folgende Publikationen veröffentlicht:

1. Ajib, Salman; Petzold, Reinhardt; Seitz, Thomas: "PV-Plants in autarky or network coupled operation; technical and economic comparison according to practical investigations", World Renewable Energy & Environment Conference WREEC 2006, 22-24 January 2006 Tripoly/Libya; Paper PV\_12
2. Karno, Ali; Ajib, Salman: "Effect of tube pitch on heat transfer in shell-and-tube heat exchanger-new simulation software", Heat Mass Transfer (2006) 42: 263-270
3. Ajib, Salman; Nilius, Andreas: "Sociability between a new work solution and the components of an absorption refrigeration machine", 4<sup>th</sup> International conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, 19-22 September 2005, Cairo, Egypt, Paper AS1
4. Ajib, Salman; Nilius, Andreas: "Results of experimental investigations on a solar thermal driven absorption refrigeration machine", Proceedings of IMEC2004, S. 332-343, International Mechanical Engineering Conference, ISBN: 99906 -631-4-9, December 5-8, 2004, Kuwait

5. Ajib, Salman; Nilius, Andreas; Diba, Jaber; Diab, Ali; Karno, Ali: „Betriebscharakteristik einer solarthermisch betriebenen Absorptionskältemaschine im Kleinleistungsbereich“, 49. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Technische Universität Ilmenau, 27. bis 30. September 2004
6. Karno, Ali; Ajib, Salman; Diba, Jaber; Nilius, Andreas: “FEM-Berechnungen und numerische Untersuchungen an Rohrbündelwärmetauschern mit Umlenklechen“, 49. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Technische Universität Ilmenau, 27. bis 30. September 2004
7. Ajib, Salman; Karno, Ali; Nilius, Andreas: “Thermodynamic properties of a low Temperature driver absorption refrigeration machine”, 3<sup>rd</sup> International conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, 21-24 June 2004, Cape town, South Africa, Paper AS
8. Ajib, Salman; Nilius, Andreas; Karno, Ali: “erste Untersuchungsergebnisse eines Versuchsstandes einer niedertemperaturbetriebenen Absorptionskältemaschine“, 14. Symposium Thermische Solarenergie, Kloster Banz, 12.- 14. Mai 2004, S. 488- 493
9. Ajib, Salman; Karno, Ali; Nilius, Andreas: „Anforderungen an die Betriebseigenschaften der Komponenten einer Absorptionskälteanlage mit Niedertemperaturantriebsquellen“, 48. Internationales wissenschaftliches Kolloquium, 22.-25. 09. 2003, TU Ilmenau, S. 667-668
10. Ajib; Wiltzer; Sieckmann; Voß: „Absorptionskälteanlage mit Niedertemperaturnutzung“, Patentschrift DE 101 08 768 C2, Polymer Engineering GmbH, November 2003
11. Ajib, Salman: “Beiträge zur Entwicklung und Auslegung solarthermisch betriebener Absorptionskältemaschinen zur Kälteerzeugung und Raumklimatisierung“ Habilitationsschrift, TU Ilmenau, August 2003
12. Ajib, Salman; Nilius, Andreas; Karno, Ali: „ Thermodynamic Properties of a tube bundle heat exchanger“, Thermodynamics 2003, April 9<sup>th</sup> – 11<sup>th</sup>, 2003, S. 5, Cambridge UK
13. Ajib, Salman, Karno, Ali: „Auslegungsprogramm für Rohrbündelwärmetauscher“ Deutsche Kälteklima Tagung, 20 – 23 November 2002, Magdeburg, auch als Beitrag in der Fachzeitschrift Kälte Klima Aktuell KKA 05/2003
14. Ajib, Salman; Sieckmann, Hartmut, Voß, Eberhardt; Wiltzer, Karl-Heinz: „Eine Autarke Absorptionskälteanlage“, 47. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, TU Ilmenau 23 - 26. 09. 2002
15. Ajib, Salman; Al-Najjar, Sharaf; Wegner, Reiner: The Thermodynamic Properties of a New Solution to Use as a Work Mixture for an Absorption Refrigeration Machine“, 17<sup>th</sup> IUPAC Conference on Chemical Thermodynamics, ICCT 2002, University of Rostock, July 28- August 02, 2002
16. Ajib, Salman: “Wirtschaftlichkeit der solarthermischen Energie zur Kälteerzeugung und Klimatisierung in Abhängigkeit von den Solardeckungsgraden und Arbeitsstoffpaaren“, OTTI - Zwölftes Symposium Thermische Solarenergie, 24 - 26 April 2002, Kloster Banz Staffelstein, S. 240-245
17. Ajib, Salman: „Profitability of Using solar energy for refrigeration and air conditioning“, Proceeding of INMIC 2001, IEEE International Multi-Topic Conference 28 –30 December 2001, Lahore University of Management sciences, PP 30- 37

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Darstellung der Ergebnisse

##### 3.1.1 Untersuchung der Materialverträglichkeit zwischen dem neuen Arbeitsstoffpaar und den Materialien der Absorptionskältemaschine

###### a) Untersuchung der Materialverträglichkeit zwischen dem Arbeitsstoffpaar und metallischen Materialien (Kupfer + Eisen)

Materialverträglichkeiten herkömmlicher Arbeitsstoffe in Absorptionskältemaschinen wie  $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$  oder  $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$  sind hinreichend erprobt und bekannt, jedoch eignen sich diese aufgrund der relativ hohen Antriebstemperaturen von 120 bzw. 85 °C nicht zum Einsatz als Betriebsmedien der Kälteanlagen unter Anwendung von Solarthermie im Sinne des Projektes.

Aus diesem Grund wurden die Verträglichkeiten des neu zu verwendenden Arbeitsstoffpaares Aceton/Zinkbromid in Bezug auf den Einsatz als Arbeitsstoffpaar in Absorptionskälteanlagen, speziell den Wärmeübertragern, Pumpen und der Sensorik untersucht. Hierbei wurden Materialien wie Kupfer, Stahl, Dichtungsmaterialien (Gummi) sowie Kunststoffe untersucht. Diese Materialien wurden mit Arbeitsstoffpaarkombinationen mit Konzentrationen zwischen 30 und 100 Masse% Aceton in Verbindung gebracht und nach einer Verweildauer von 3 Monaten unter Vakuumbedingungen und verschiedenen Temperaturen zwischen 15 °C und 85 °C untersucht. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen die Verträglichkeiten der Materialien unter realen Betriebsverhältnissen mit dem Arbeitsstoffpaar Aceton/Zinkbromid.

Zur Durchführung der Experimente wurden Probenstücke der zu untersuchenden Materialien unter Vakuum und unter Zugabe der entsprechenden Konzentrationen an Arbeitsstoff in Glasröhrchen verschlossen. Diese wurden in einem Thermostaten bei wechselnden Temperaturen zwischen 10 und 90 °C über 3 Monate lang aufbewahrt.

Nach diesem Experiment wurde der spezifische elektrische Widerstand der Proben vor und nach der Beprobung ermittelt, um mögliche Zersetzungen oder Verbindungen der Stoffe zu untersuchen. Dieses Experiment wurde unter verschiedener Konzentrationen und Temperaturen wiederholt.

Die Bilder 1 bis 5 zeigen die vorbereiteten Proben und Durchführung der Untersuchungen.



**Bild 1:** Probeneinschluss in Teströhrchen, Kupfer links, Eisen rechts



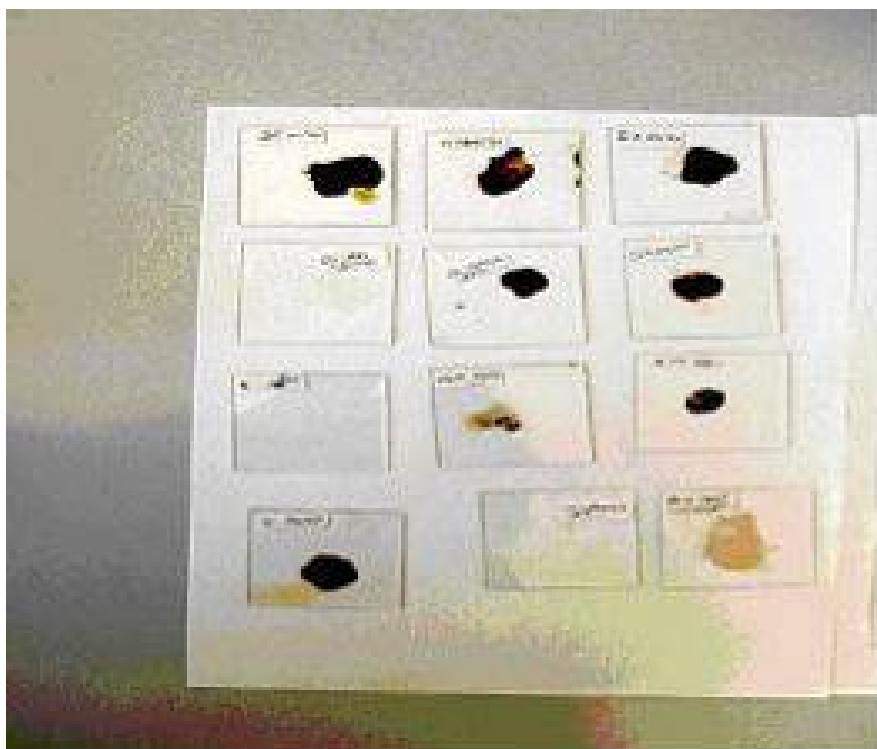
**Bild 2:** Die Proben mit verschiedenen Konzentrationen unter verschiedenen Temperaturen



**Bild 3:** Proben im Thermostatenbehälter



**Bild 4:** Proben nach Durchführung der Tests



**Bild 5:** Lösungsproben nach der 3-monatigen Testphase

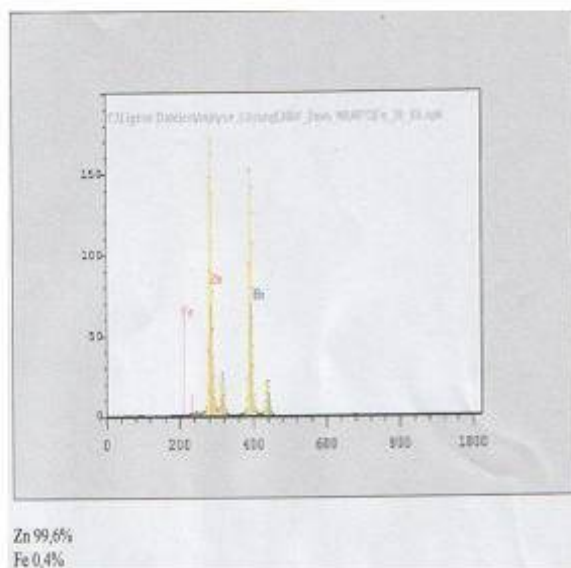


Untersuchungen der Materialzersetzung wurden mit Hilfe eines Spektrometers (RFA) durchgeführt. Zur Bestimmung der Reaktionen zwischen Arbeitsstoffpaarlösungen und den beprobten Materialien wurden die Inhaltsstoffe der Lösung nach den Tests mit dem Spektrometer untersucht (Bild 6).

Die Anzeige für Kupfermoleküle zeigte in den Proben sämtlicher Konzentrationen und Temperaturbereiche keine herausgelösten Kupfermoleküle am Ende der Testperiode. Im Gegensatz dazu wurden kleine Anteile Eisenmoleküle in der Lösung (0,4 % bzw. 1,1 % in Bezug auf die Lösungen mit den Konzentrationen von 35 % bzw. 60 % Acetonanteil in der Lösung) gefunden. (Bilder 7 und 8).

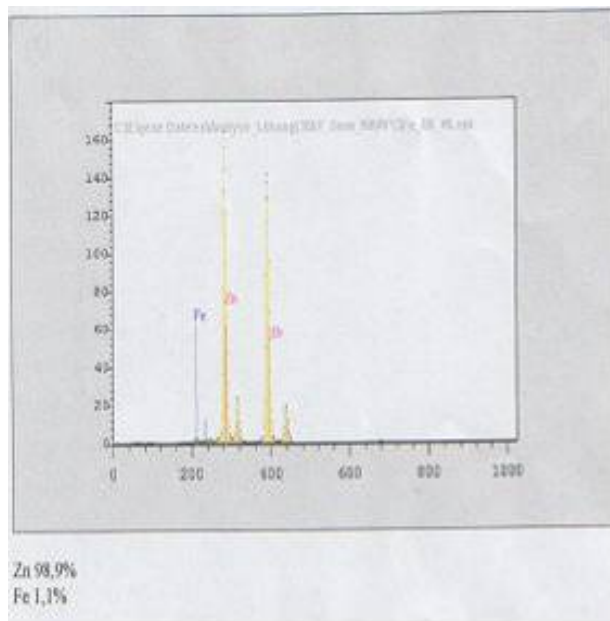


**Bild 6:** Spektrometer zum Auffinden von Metallpartikeln in der Lösung nach der 3-monatigen Testphase



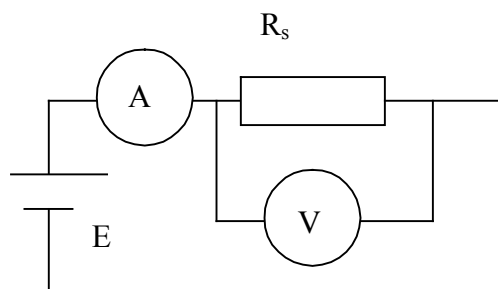
**Bild 7:** Ergebnis der Spektrometeruntersuchung (RFA) für Proben der Acetonkonzentration von 35 % bzw. 65 %



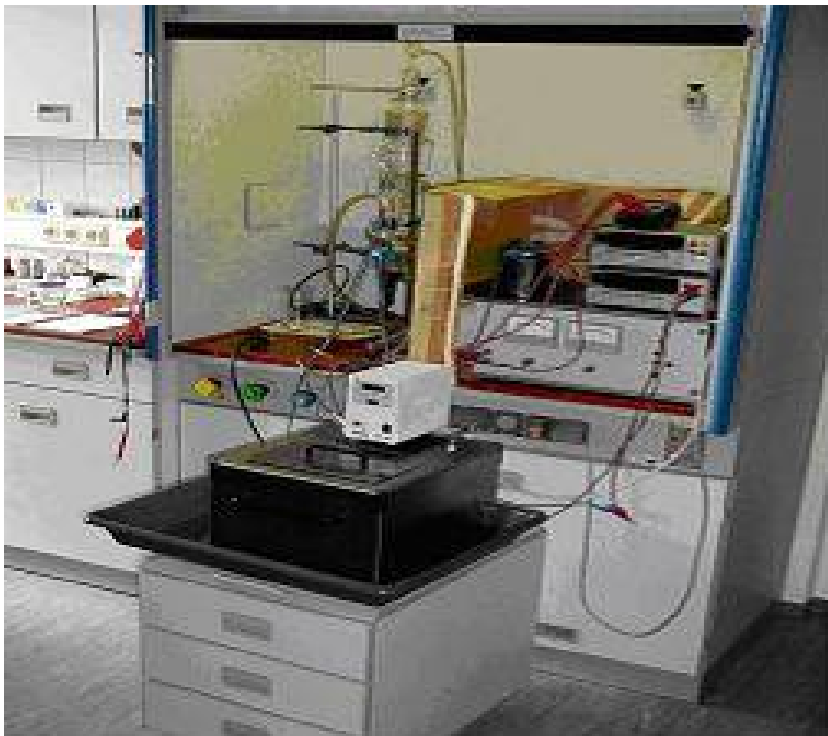


**Bild 8:** Ergebnis der Spektrometeruntersuchung (RFA) für Proben der Acetonkonzentration von 60 % bzw. 40 % Zinkbromid

Als weitere Methode der Untersuchung der Reaktionen zwischen den Materialproben und den Arbeitsstoffen wurden die Messung und der Vergleich des elektrischen Widerstandes der Proben durchgeführt (Bilder 9, 10).



**Bild 9:** Schaltanordnung zur Messung des elektrischen Widerstands der Proben nach dem Dauerversuch; E: Spannungsversorgung; A: Amperemeter; V: Voltmeter; R<sub>s</sub>: elektrischer Widerstand



**Bild 10:** Messanordnung zur Bestimmung des spezifischen elektrischen Widerstands der Lösung vor und nach der Beprobung

Die zu untersuchenden Abhängigkeiten entsprechen dem ohmschen Gesetz. Auch die Unterschiede der geometrischen Abmessungen der Proben wurden berücksichtigt. Im Fall von Materialreaktionen oder Änderungen der chemischen Eigenschaften der Probestücke ändert sich entsprechend der zu messende elektrische Widerstand des Materials (Gln. 1, 2).

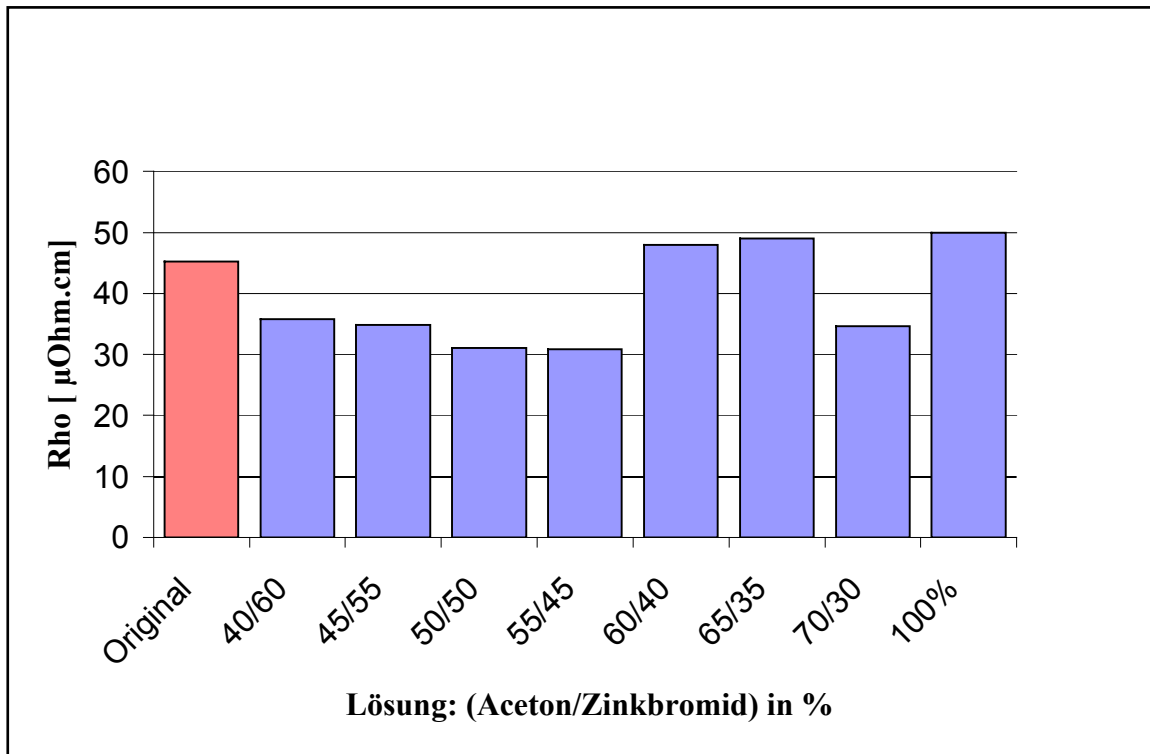
$$R_s = \frac{U}{I} = \rho \frac{l}{A} = \frac{l}{\chi A} \quad (1)$$

$$\chi = \frac{l}{A} \cdot \frac{I}{U} \quad (2)$$

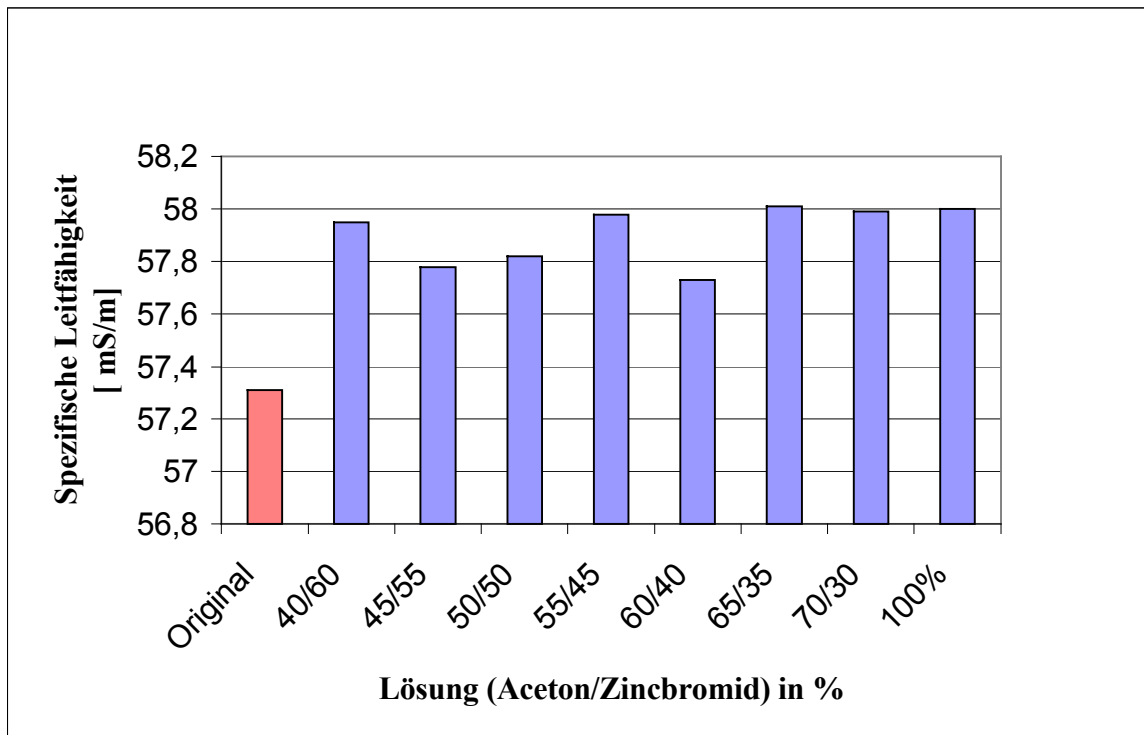
Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen, dass es größere Materialveränderungen in Eisenmaterialien als in Kupfermaterialien gab (Bilder 11 und 12). Jedoch waren die Materialveränderungen verschwindend gering. Die gemessenen Veränderungen der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit der Kupfer-Proben ergibt sich nach Gl. 3 und ist im Bild 12 dargestellt:

$$\Delta\chi\% = \frac{\chi_2 - \chi_1}{\chi_1} \cdot 100 \quad (3)$$

$$\Delta\chi\% = \frac{58 - 57,31}{57,31} \cdot 100 = +1,2\%$$



**Bild 11:** Messergebnisse des spez. elektrischen Widerstands der Eisen-Proben vor und nach dem Test (Versuchsdauer 3 Monate), Untersuchungstemperatur 85 °C



**Bild 12:** Messergebnisse der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit der Kupfer-Proben vor und nach dem Test (Versuchsdauer 3 Monate), Untersuchungstemperatur 85 °C

**b) Untersuchung der Verträglichkeit zwischen dem Arbeitsstoffpaar und synthetischen Materialien (Kunststoffe)**

Synthetische Materialien kommen innerhalb der Absorptionskälteanlagen als Dichtungselemente (spezieller Gummi, EPDM) oder als Schaugläser (Plexiglas) zum Einsatz.

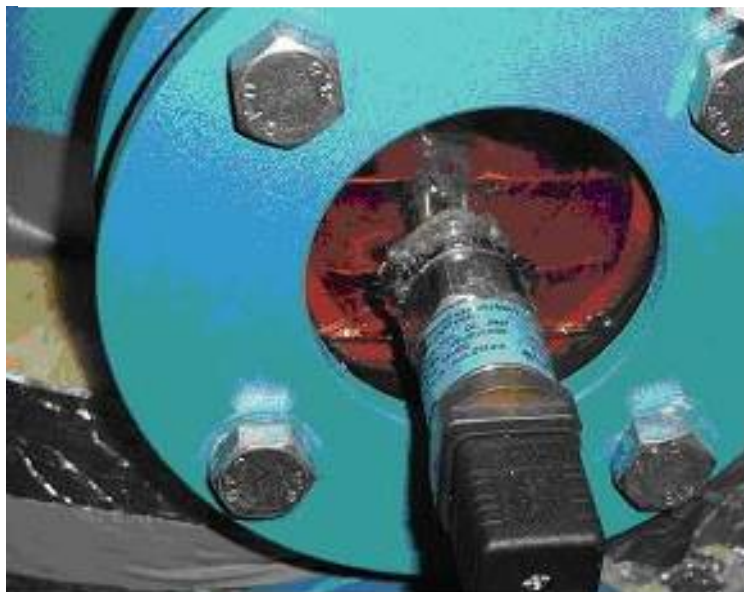
Die Untersuchung mit verschiedenen Dichtungsmaterialien der Anlage ergab, dass es keine Unverträglichkeiten mit den eingesetzten Dichtungsmaterialien gab.

Im Gegenteil dazu ergaben sich beim eingesetzten Plexiglas starke Veränderungen. Es wurde ein regelrechtes „Fließen“ des Materials aufgrund des eingesetzten Acetons als Kältemittel festgestellt, was eine Anwendung von Plexiglas unmöglich machte (Bilder 13 und 14).

Es ist nötig, gewöhnliches Glas als Schaugläser einzusetzen.



**Bild 13:** Ansicht der eingesetzten Plexiglasscheiben nach Testdauer von 3 Tagen (Verformungen sind unschwer erkennbar)



**Bild 14:** Ansicht der Plexiglasscheiben mit eingebautem Sensor

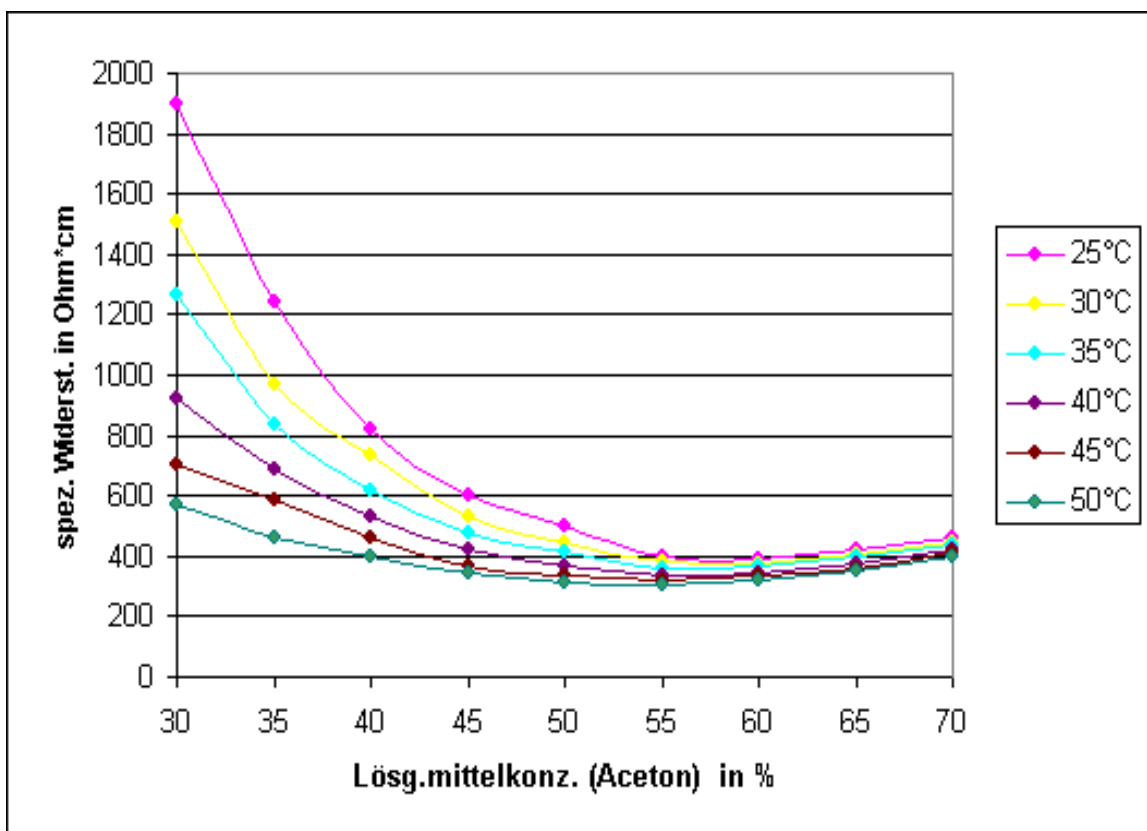
### 3.1.2 Ermittlung des spezifischen elektrischen Widerstands des Arbeitsstoffpaares (Patentanmeldung)

Um während des Betriebes und ohne Öffnen der Maschine eine reale Einschätzung über die Betriebszustände der Maschine zu gewinnen ist es hilfreich, mittels einer externen Analytik aussagekräftige Stoffeigenschaften zu bestimmen. Eine dieser Eigenschaften ist der zu messende elektrische Widerstand der Lösungen, die Auskunft über die jeweilige Konzentration der Lösung und somit dem Arbeitspunkt der Anlage gibt.

Die entsprechende mathematische Grundlage findet sich in folgender Gleichung:

$$R_s = \frac{U}{I} = \rho \frac{l}{A} \Rightarrow \rho = \frac{U}{I} \cdot \frac{A}{l} \quad (4)$$

Zu diesem Zweck wurden analytisch Vergleichswerte erstellt, die die spezifischen elektrischen Widerstände der Lösung Aceton/Zinkbromid in Abhängigkeit der Konzentrationen und verschiedener Temperaturen enthält. Das Ergebnis der Untersuchung enthält das Diagramm entsprechend Bild 15. Darüber wurde eine Rechtsschutzanmeldung gemacht /35/.



**Bild 15:** Messreihen des spezifischen elektrischen Widerstands verschiedener Lösungskonzentrationen in Abhängigkeit der Temperaturen

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich generell eine gute Materialverträglichkeit der eingesetzten Materialien an der Laboranlage ergibt. Für die Metalle Eisen und Kupfer konnten keine negativen oder kritischen Auswirkungen des neuen Arbeitsstoffpaares festgestellt werden. Somit steht einem Einsatz dieser „herkömmlichen“ Materialien nichts im Wege.

Dichtungsmaterialien, wie sie üblicherweise in Anlagen dieser Art eingesetzt werden, stellen ebenfalls kein Risiko dar. Es sollten jedoch grundsätzlich EPDM-Materialien für diesen Zweck eingesetzt werden. Weiterhin ist zu beachten, in jedem Fall eine Herstellerbestätigung für die Materialauswahl einzuholen, um aufgrund der Vielzahl von verschiedenen Einsatz- und Inhaltsstoffen der Kunststoffe unerwartete Unverträglichkeiten zu vermeiden.

Schaugläser, bestehend aus Plexiglas, sind dringend zu vermeiden. Der Einsatz dieses Materials stellt eine Gefahr für den Anlagenbetrieb dar und macht diesen unmöglich.

### 3.2 Aufbau und Auslegung eines Versuchsmusters eines Rohrbündelwärmetauschers

Die Wärmetauscher sind die wichtigsten Bestandteile der im Projekt bearbeiteten Absorptionskälteanlagen. In Ihnen finden die wesentlichen Wärmeübertragungs- und Phasenumwandlungsvorgänge statt, durch die die zu erwarteten Effekte einer „Erzeugung“ von Kälte hervorgerufen werden. Der Aufbau eines Wärmetauscherversuchsstandes und die beschriebenen Untersuchungen tragen wesentlich zum Verständnis der im realen Anlagenbetrieb zu erwartenden Effekte bei. Zur Auslegung des Versuchswärmetauschers wurde ein eigens entwickeltes Programm in MS Visual-Basic erstellt. Anhand dieses Programms wurde ein Versuchrohrbündelwärmetauscher ausgelegt, konstruiert und gefertigt. Eine Ansicht ist in Bild 17 dargestellt. Dieser Wärmetauscher dient zur Untersuchung des Wärmetransportverhältnisses zwischen verschiedenen flüssigen Medien bei verschiedenen Temperaturen. Dafür wurde ein Untersuchungsplan erstellt.

Der Versuchsaufbau (Bild 16) ist erweiterungsfähig, um Untersuchungen mit verschiedenen Stoffen durchführen zu können. Die Untersuchungen wurden zuerst mit Fluiden durchgeführt, deren physikalischen Eigenschaften bekannt sind. Danach wurden Arbeitsstoffpaare unter verschiedenen Betriebsbedingungen untersucht.

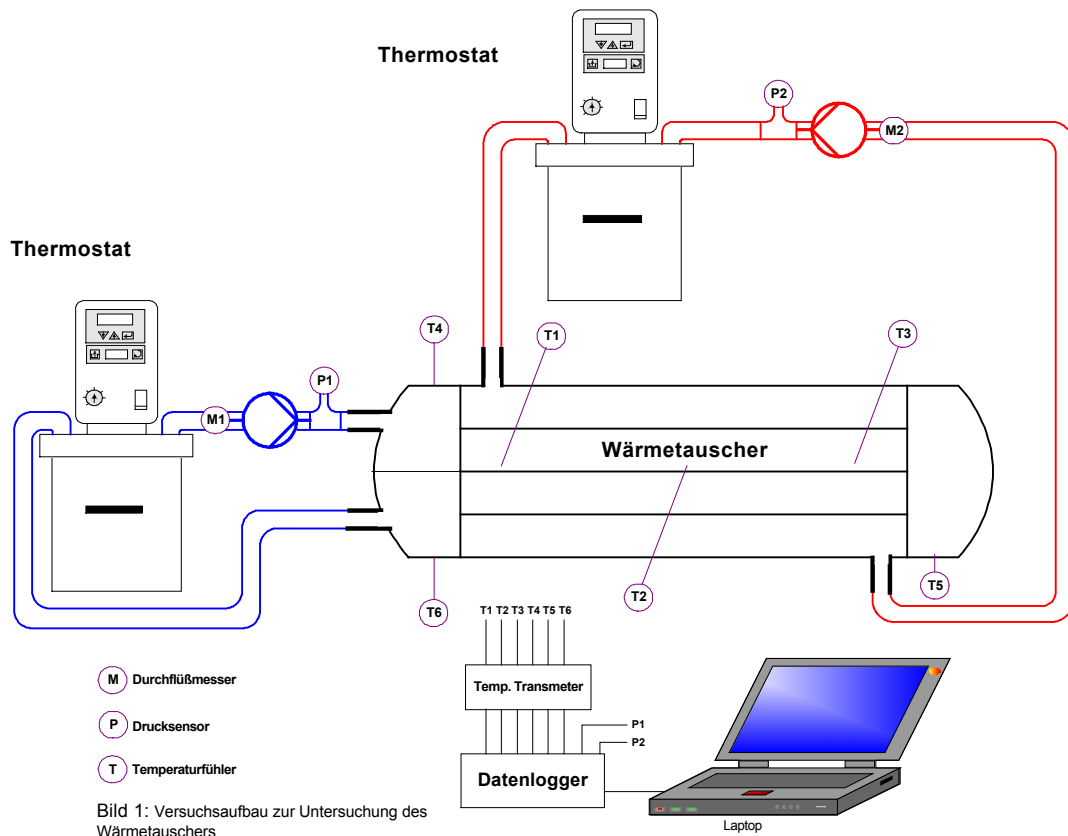
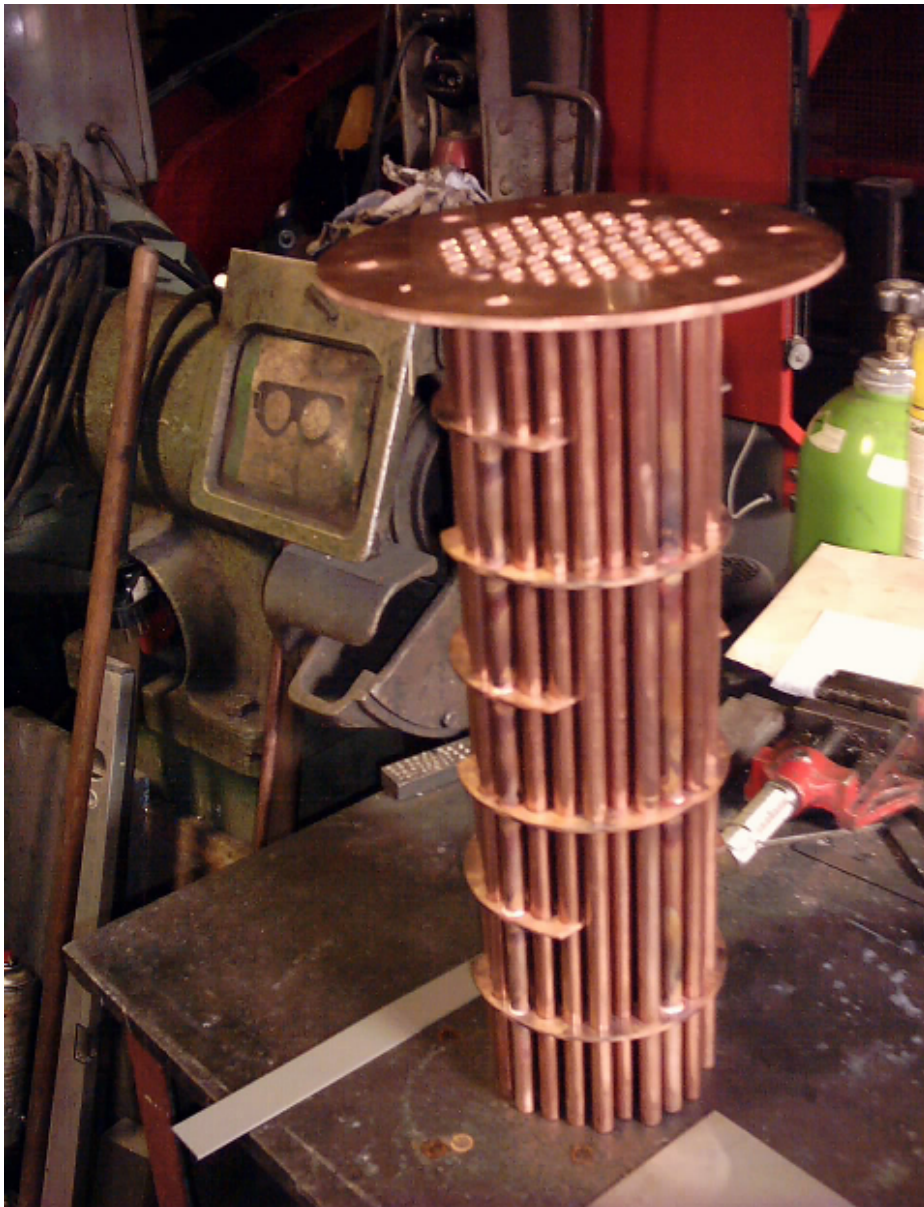


Bild 16: Versuchsaufbau Rohrbündelwärmetauscher





**Bild 17:** Ansicht des Wärmetauschers vom Innen

### 3.2.1 Beschreibung der Versuchsanlage

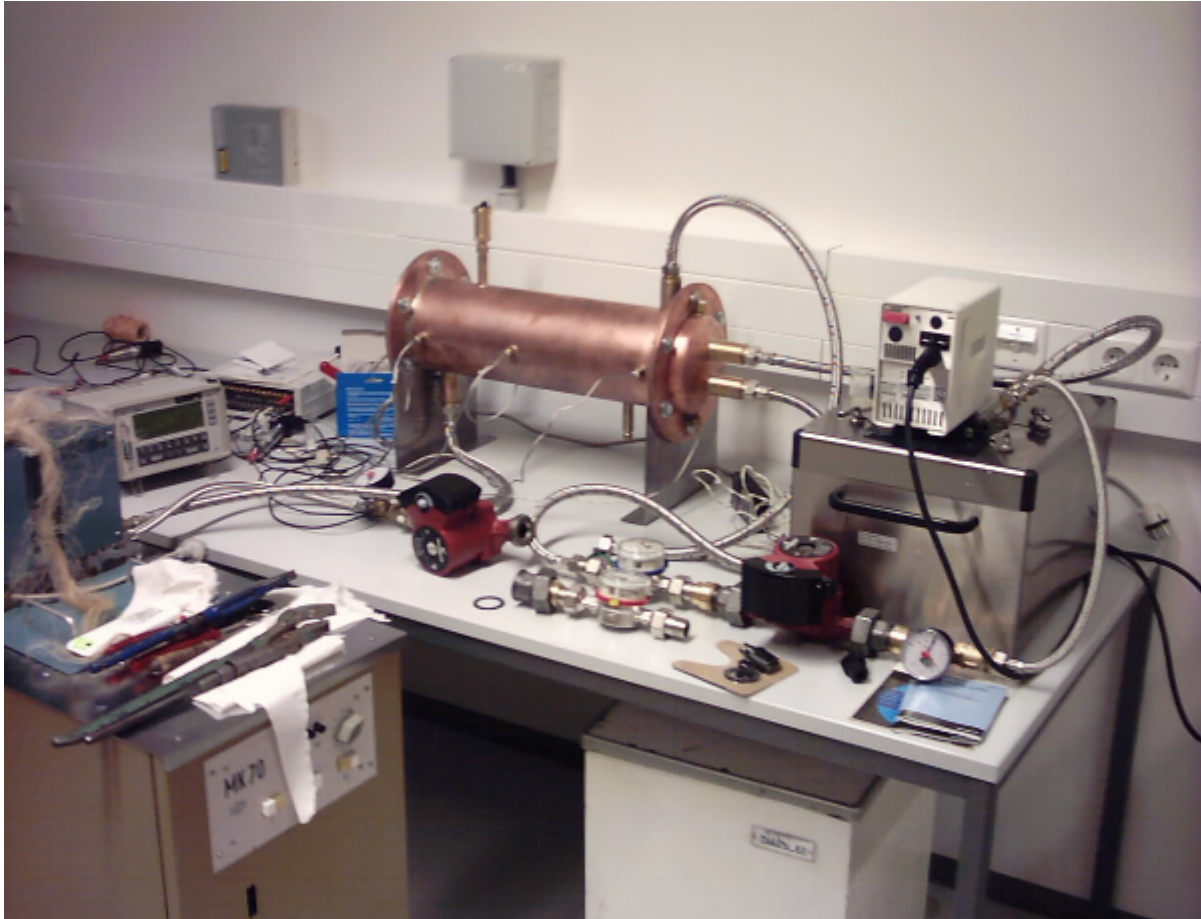
Die Versuchsanlage (Bild 18) besteht aus einem Rohrbündelwärmetauscher mit einer Ausleistungsleistung von 15 kW für verschiedene Medien. Er besteht aus 66 Rohren mit einem Innendurchmesser von 10 mm und einer Länge von 490 mm.

Die Rohre sind in einem Mantel mit einem Innendurchmesser von 150 mm untergebracht. Weiterhin beinhaltet der Wärmetauscher 6 Umlenkbleche und 8 Anschlüsse für Temperatursensoren. Peripher ist die weitere Sensorik wie Druckmessungen, Strömungsmessungen und die Pumpen- und Beheizungsanlage untergebracht.

Die Untersuchungen fanden in erster Linie mit Wasser statt. Dies gibt Auskunft über das grundlegende Verhalten der dargestellten Anlage.

Der Wärmeübertragungskoeffizient ist die wichtigste Kenngröße des Wärmeübertragers. Zur Bestimmung dieser wurden unterschiedliche Versuche gefahren. Es wurden die Geschwindigkeiten (Durchflüsse) und verschiedene Temperaturen kombiniert.

In den nächsten Schritten wurden die Versuche unter Anwendung von anderen Medien gefahren ( $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$  und Aceton/Zinkbromid).



**Bild 18:** Experimenteller Aufbau des Wärmetauscherstandes

### 3.2.2 Ergebnisse der Untersuchungen

Der Wirkungsgrad des untersuchten Rohrbündelwärmetauschers in Abhängigkeit von der Eintrittstemperatur des heißen Mediums ist im Bild 19 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass je niedriger (bis zu einem bestimmten Wert) die Eintrittstemperatur des heißen Mediums ist, desto höher ist der Wirkungsgrad des Rohrbündelwärmetauschers. Dieser Fakt ist in gute Übereinstimmung mit den Bemühungen, Niedertemperaturantriebsquellen für den Antrieb der AKM einzusetzen. Zur Realisierung dieser Möglichkeit muss man mit Arbeitsstoffpaaren, die bei solchen niedrigen Antriebstemperaturen als Arbeitsstoffpaare für AKM einsatzfähig sind, arbeiten. Solche Arbeitsstoffpaare werden in den Forschungsarbeiten des Fachgebietes Thermo- und Magnetfluidodynamik an der TU Ilmenau untersucht. Die Arbeiten beschäftigen sich u. a. mit der Suche nach Kältemitteln, die bei niedrigen Temperaturen (ab  $60\text{ °C}$ ) von der Arbeitslösung ausgetrieben werden können, aber auch bei normalen Kühltemperaturen ( $25$  bis  $35\text{ °C}$ ) durch die Lösung wieder absorbiert werden können. Es wurden die physikalischen und thermodynamischen Eigenschaften dieser Stoffe untersucht. Die Laborergebnisse haben die Einsatzmöglichkeit einiger untersuchter Arbeitsstoffpaare in einer AKM bestätigt.



In den Bildern 20, 21, 22 und 23 sind weitere Betriebskurven des untersuchten Wärmetauschers (anhand von Messergebnissen) dargestellt.

Im Bild 20 ist die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz des heißen Mediums dargestellt. Es ist ersichtlich, dass eine Proportionalität, wie es theoretisch zu erwarten ist, zwischen beiden Größen besteht. Einen ähnlichen Verlauf zeigt die Abhängigkeit der mittleren logarithmischen Temperaturdifferenz von der Temperaturdifferenz des kalten Mediums (Bild 21). Das Bild 22 zeigt die Abhängigkeit der mittleren logarithmischen Temperaturdifferenz vom Volumenstrom des heißen Mediums. Es ist auch hier eine Proportionalität zu erkennen.

Die mathematische Bestimmungsgleichungen für den Zusammenhang zwischen diesen Größen sind:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{Q}_2}{\dot{Q}_1} \quad (5)$$

$$\Delta T_m = \frac{(T_{1e} - T_{2e}) - (T_{1a} - T_{2a})}{\ln \frac{(T_{1e} - T_{2e})}{(T_{1a} - T_{2a})}} \quad (6)$$

$$\dot{Q}_1 = \dot{m}_1 \cdot C_1 (T_{1e} - T_{1a}) \quad (7)$$

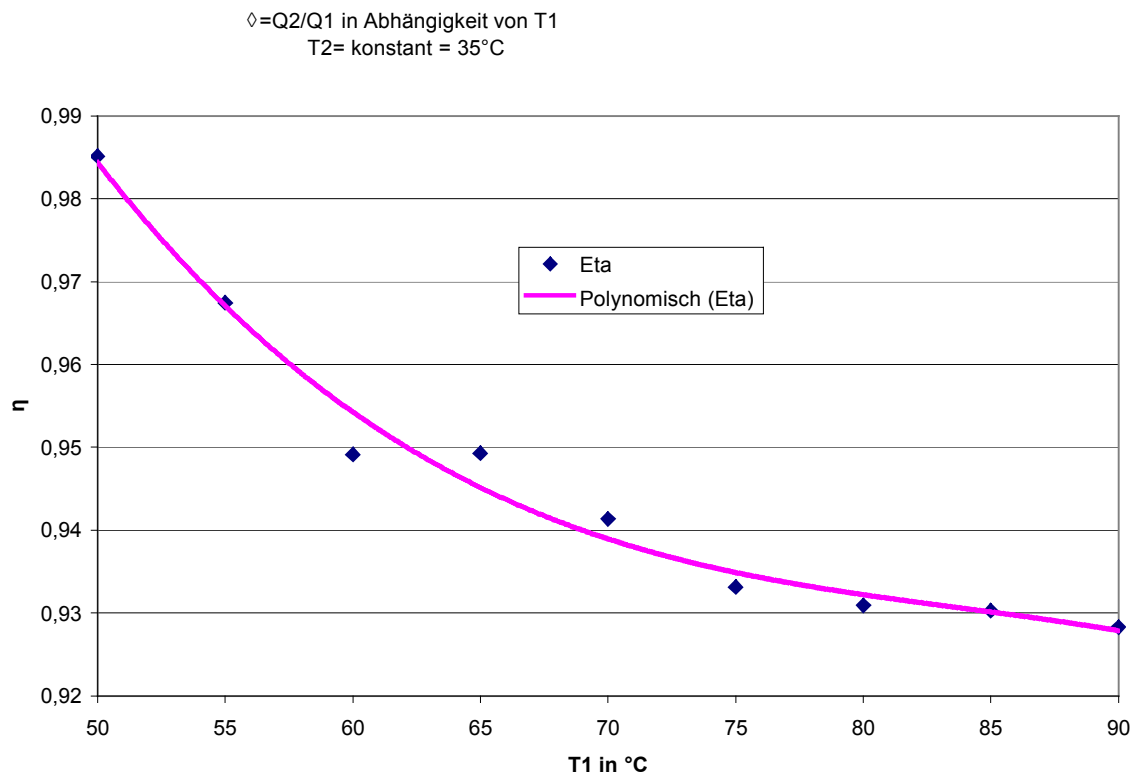
$$\dot{Q}_2 = \dot{m}_2 \cdot C_2 \cdot (T_{2e} - T_{2a}) \quad (8)$$

Der Wärmedurchgangskoeffizient des Wärmetauschers in Abhängigkeit vom  $\Delta T_m$  ist im Bild 23 dargestellt. Die Berechnungsgleichung ist nach Gl. 9 gegeben:

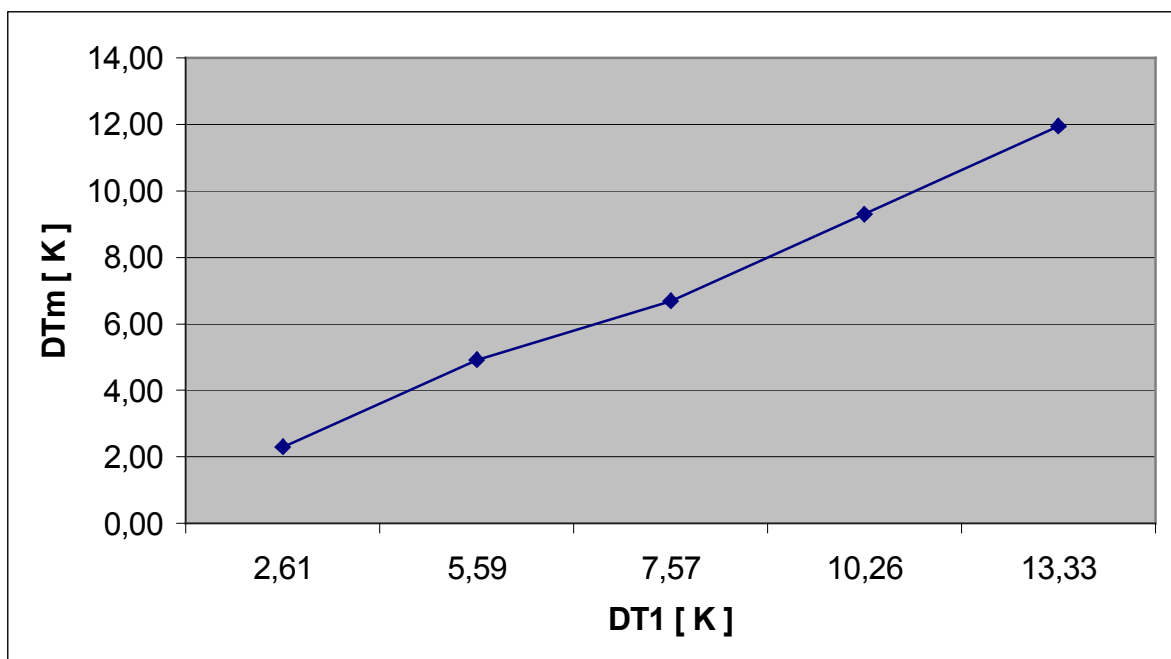
$$k = \frac{\dot{Q}}{A \cdot \Delta T_m} \quad (9)$$

Dabei sind:

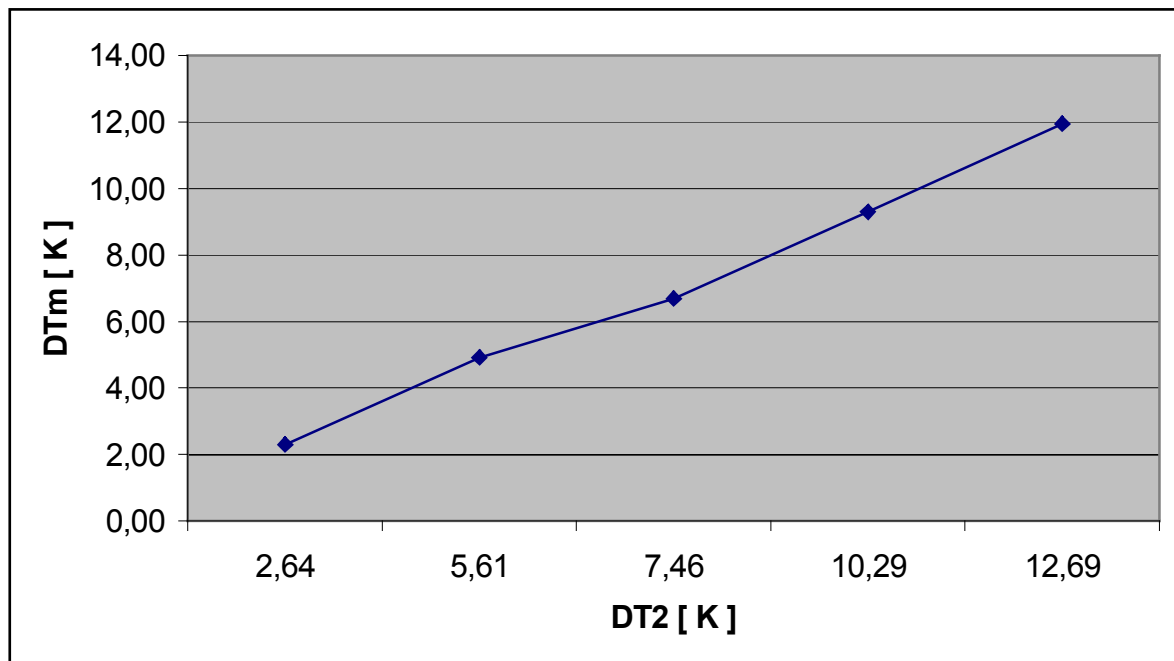
$\dot{Q}_1$ in kW	Leistung des heißen Mediums
$\dot{Q}_2$ in kW	Leistung des kalten Mediums
$\eta_{th}$	Wirkungsgrad des Wärmetauschers
$\Delta T_1$ in K	Temperaturdifferenz des heißen Mediums
$\Delta T_2$ in K	Temperaturdifferenz des kalten Mediums
A in m <sup>2</sup>	Außenübertragungsfläche des Wärmetauschers
K in W/m <sup>2</sup> ·K	Wärmedurchgangskoeffizient des Wärmetauschers
$\Delta T_m$ in K	Mittlere logarithmische Temperaturdifferenz des Wärmetauschers



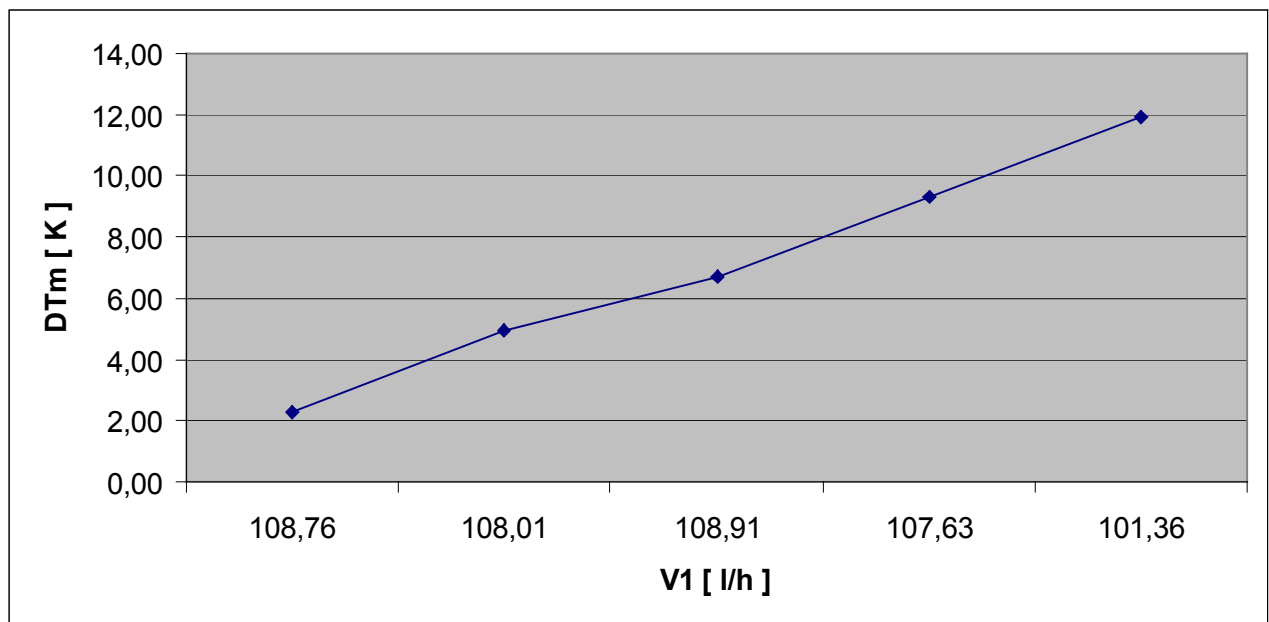
**Bild 19:** Wirkungsgrad des Rohrbündelwärmetauschers in Abhängigkeit von der Eintrittstemperatur des heißen Mediums



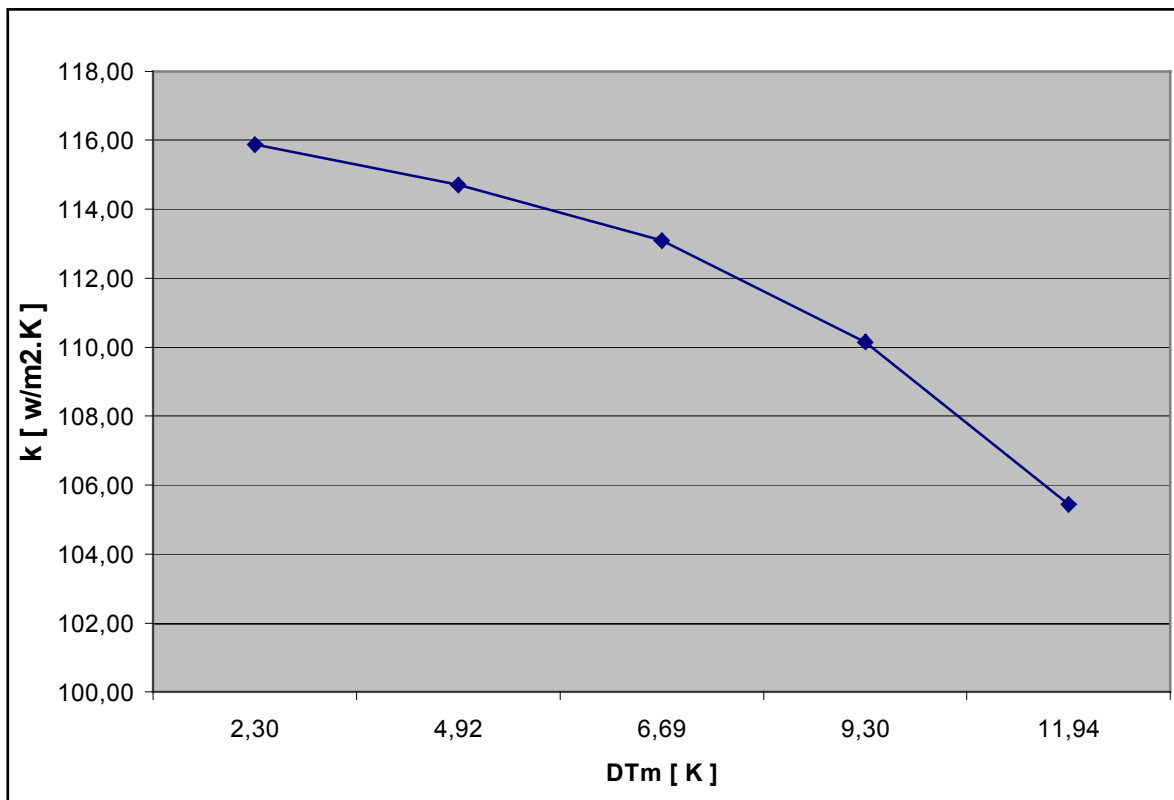
**Bild 20:** Mittlere logarithmische Temperaturdifferenz  $\Delta T_m$  des Rohrbündelwärmetauschers in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz  $\Delta T_1$  des heißen Mediums



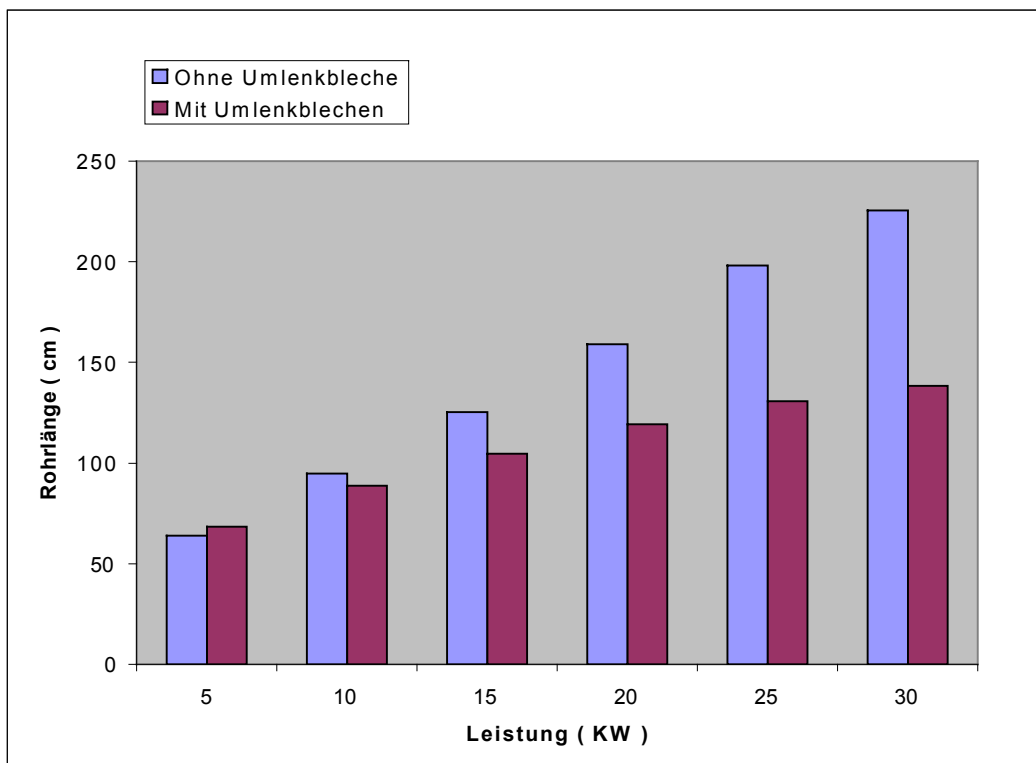
**Bild 21:** Mittlere logarithmische Temperaturdifferenz  $\Delta T_m$  des Rohrbündelwärmetauschers in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz  $\Delta T_2$  des kalten Mediums



**Bild 22:** Mittlere logarithmische Temperaturdifferenz  $\Delta T_m$  des Rohrbündelwärmetauschers in Abhängigkeit vom Volumenstrom des heißen Mediums



**Bild 23:** Wärmedurchgangskoeffizient des Rohrbündelwärmeübertragers k in Abhängigkeit von der mittleren logarithmischen Temperaturdifferenz  $\Delta T_m$  unter konstanter



**Bild 24:** Erforderliche Rohrlänge für bestimmte Wärmeleistung in Abhängigkeit vom Aufbau des Wärmetauschers (mit Umlenkleche oder ohne Umlenkleche)

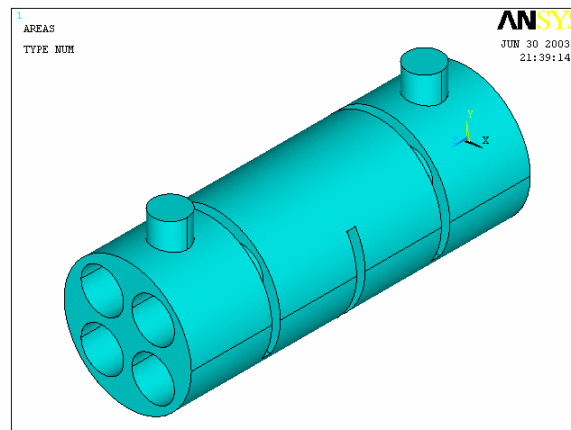
### 3.3 FEM-Untersuchungen der Einflüsse von Umlenklechen auf den Wirkungsgrad der Rohrbündelwärmetauscher

Der Wirkungsgrad und die Wärmeübertragung in den Rohrbündelwärmetauschern sind stark von der Anzahl der Umlenkleche und der Höhe des Ausschnitts im Umlenklech abhängig.

In diesem Abschnitt werden zunächst die Geschwindigkeitsverteilung und die Druckverluste im Außenraum eines Rohrbündelwärmetauschers mit Hilfe eines FEM-Softwareprogramms (ANSYS) numerisch berechnet. Die Abhängigkeit des Wirkungsgrades und der Druckverluste des Rohrbündelwärmetauschers von der Höhe des Ausschnitts aus dem Umlenklech und der Änderung der Anzahl der Umlenkleche wurden untersucht und optimiert. Das Ziel der Simulation an dieser Stelle ist, entsprechend der gewonnenen Simulationsergebnisse Vorschläge zur Konstruktionsänderung des Rohrbündelwärmetauschers in Abhängigkeit seiner Anwendungsbedingungen zu erarbeiten und mit Messergebnissen zu vergleichen und daraus Verbesserungsvorschläge abzuleiten.

#### 3.3.1 Physikalische Modellierung

Als erstes Modell für die numerischen Untersuchungen wurde in dieser Arbeit ein Rohrbündelwärmetauscher mit drei einfachen Segmentumlenklechen und einer Dicke von jeweils 4 mm eingesetzt. Der Innendurchmesser des Mantels beträgt 240 mm. Das Rohrbündel besteht aus vier geraden Glattrohren (Außendurchmesser 80 mm, Innendurchmesser 72 mm) mit einer Länge von 600 mm. Damit beträgt die Wärmetauschfläche (Außenseite der Rohre) 0,603 m<sup>2</sup> (Bild 25). Dieses Modell wird dann erweitert, um den realen Rohrbündelwärmetauscher zu simulieren und zu optimieren.



**Bild 25:** Modellgeometrie

#### 3.3.2 Mathematische Beschreibung

Das beschreibende Gleichungssystem für die numerischen Untersuchungen besteht aus den Erhaltungsgleichungen für Masse (Kontinuitätsgleichung), Impuls (Navier-Stokes-Gleichung), und Energie (Fourier-Gleichung) /36,37/.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho w_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial(\rho w_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho w_j w_i)}{\partial x_j} = X_i - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \eta \frac{\partial w_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \eta \frac{\partial w_j}{\partial x_i} \right) \quad (11)$$

$$\frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho C_p w_i T)}{\partial x_i} = q_q + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (12)$$

Ausgehend von der Basisgleichung 13 für den Wärmetransport ergeben sich die wesentlichen Variationsparameter für die Konstruktion.

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta T_m \quad (13)$$

Die Ausgangsgleichungen zur Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten  $k$  und der mittleren logarithmischen Temperaturdifferenz  $\Delta T_m$  sind:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_a} + R_a + \frac{d_a \cdot \ln \frac{d_a}{d_i}}{2\lambda_w} + \frac{d_a}{d_i} \left[ \frac{1}{\alpha_i} + R_i \right] \quad (14)$$

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_{gr} - \Delta T_{kl}}{\ln \frac{\Delta T_{gr}}{\Delta T_{kl}}} \quad (15)$$

Der Wärmewirkungsgrad des Wärmetauschers wird in Bezug auf jeweils einen der beiden Ströme in der folgenden Form definiert /38/.

$$\text{Wirkungsgrad} = \frac{\text{Temperaturänderung des betrachteten Mediums}}{\text{maximaler Temperaturunterschied im Wärmetauscher}} \quad (16)$$

und erhält z. B. in Bezug auf das kalte Medium:

$$\eta_k = \frac{T_{k,aus} - T_{k,ein}}{T_{h,ein} - T_{k,ein}} \quad (17)$$

und auf das heiße Medium:

$$\eta_h = \frac{T_{h,ein} - T_{h,aus}}{T_{h,ein} - T_{k,ein}} \quad (18)$$

Der gesamte Druckverlust im Außenraum des Wärmetauschers setzt sich aus vier Komponenten zusammen /39/.

$$\Delta p = (N_U - 1) \cdot \Delta p_Q + 2 \cdot \Delta p_{QE} + N_U \cdot \Delta p_F + \Delta p_S \quad (19)$$

Die detaillierten Bestimmungsgleichungen sind der Literatur /39 und 40/ entnommen.

### 3.3.3 Numerische Simulation

In diesem Teil wurden die Modellgeometrie des Rohrbündelwärmetauschers mit den vorgenannten geometrischen Abmessungen erstellt und die Elemente vernetzt. Die eingesetzten Randbedingungen und physikalischen Stoffeigenschaften von Wasser, welches als Betriebsmedium bei verschiedenen Temperaturen verwendet wurde, sind in den Tabellen 1, 2 und 3 angegeben:

**Tabelle 1:** Randbedingungen zur Simulation des Wärmetauschers

Randbedingungen	
$t_{1e} = 75 \text{ [}^\circ\text{C]}$	<i>die Eintrittstemperatur des heißen Mediums (in die Rohre)</i>
$t_{2e} = 25 \text{ [}^\circ\text{C]}$	<i>die Eintrittstemperatur des kalten Mediums (um die Rohre)</i>
$w_{1e} = 2 \text{ [m/s]}$	<i>die Eintrittsgeschwindigkeit des heißen Mediums</i>
$w_{2e} = 2 \text{ [m/s]}$	<i>die Eintrittsgeschwindigkeit des kalten Mediums</i>
$p_{1a} = 0 \text{ [N/m}^2\text{]}$	<i>der relative Druck des heißen Mediums am Austritt</i>
$p_{2a} = 0 \text{ [N/m}^2\text{]}$	<i>der relative Druck des kalten Mediums am Austritt</i>

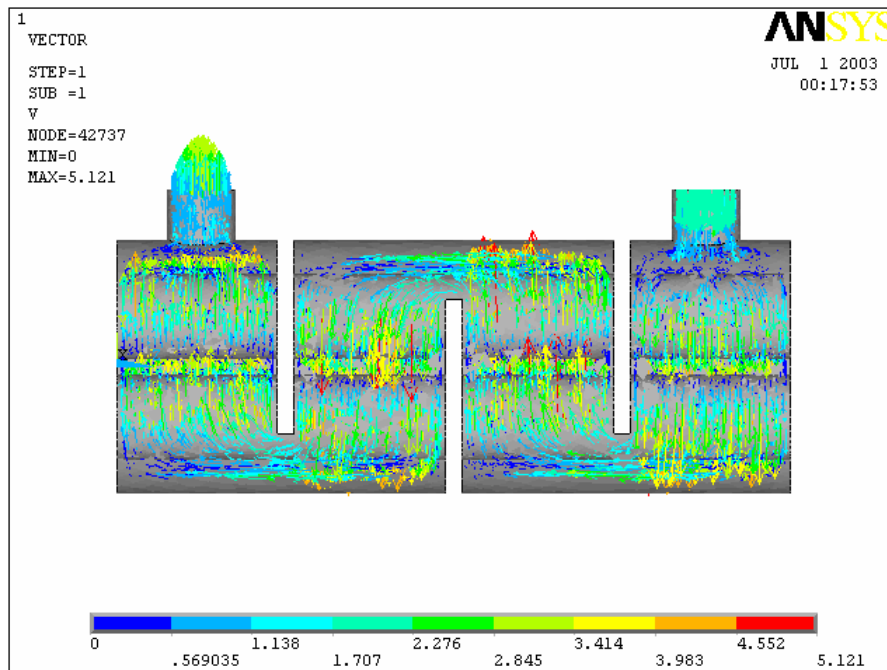
**Tabelle 2:** Stoffeigenschaften von Wasser nach /39/

Stoffeigenschaften von Wasser			
	bei $t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	bei $t = 75 \text{ }^\circ\text{C}$	
$\rho =$	997,05 [kg/m <sup>3</sup> ]	974,84 [kg/m <sup>3</sup> ]	<i>Dichte</i>
$c_p =$	4179 [J/kg.K]	4193 [J/kg.K]	<i>spezifische Wärmekapazität</i>
$\lambda =$	0,6072 [W/m.K]	0,6668 [W/m.K]	<i>Wärmeleitfähigkeit</i>
$\nu =$	$0,893 \cdot 10^{-6} \text{ [m}^2\text{/s]}$	$0,388 \cdot 10^{-6} \text{ [m}^2\text{/s]}$	<i>kinematische Viskosität</i>
$P_r =$	6,128	2,376	<i>Prandtl Zahl</i>

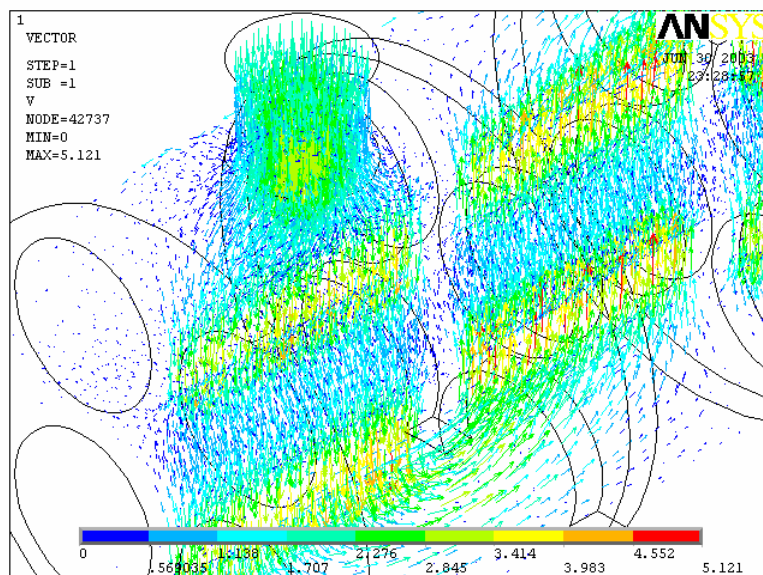
**Tabelle 3:** Stoffeigenschaften von Rohrmaterial /40/

Stoffeigenschaften von Rohrmaterial	
$\lambda_w = 343 \text{ [W/m.K]}$	<i>Wärmeleitfähigkeit für Kupfer</i>

Nach der Lösung des Problems mit Hilfe des Programms ANSYS kann man als erstes Ergebnis die Geschwindigkeitsverteilung (Bilder 26,27) und die Druckverteilung im Außenraum des Wärmetauschers (Bild 28) gewinnen.



**Bild 26:** Geschwindigkeitsverteilung (2D) innerhalb des Rohrbündelwärmetauschers



**Bild 27:** Geschwindigkeitsverteilung (3D) innerhalb des Rohrbündelwärmetauschers



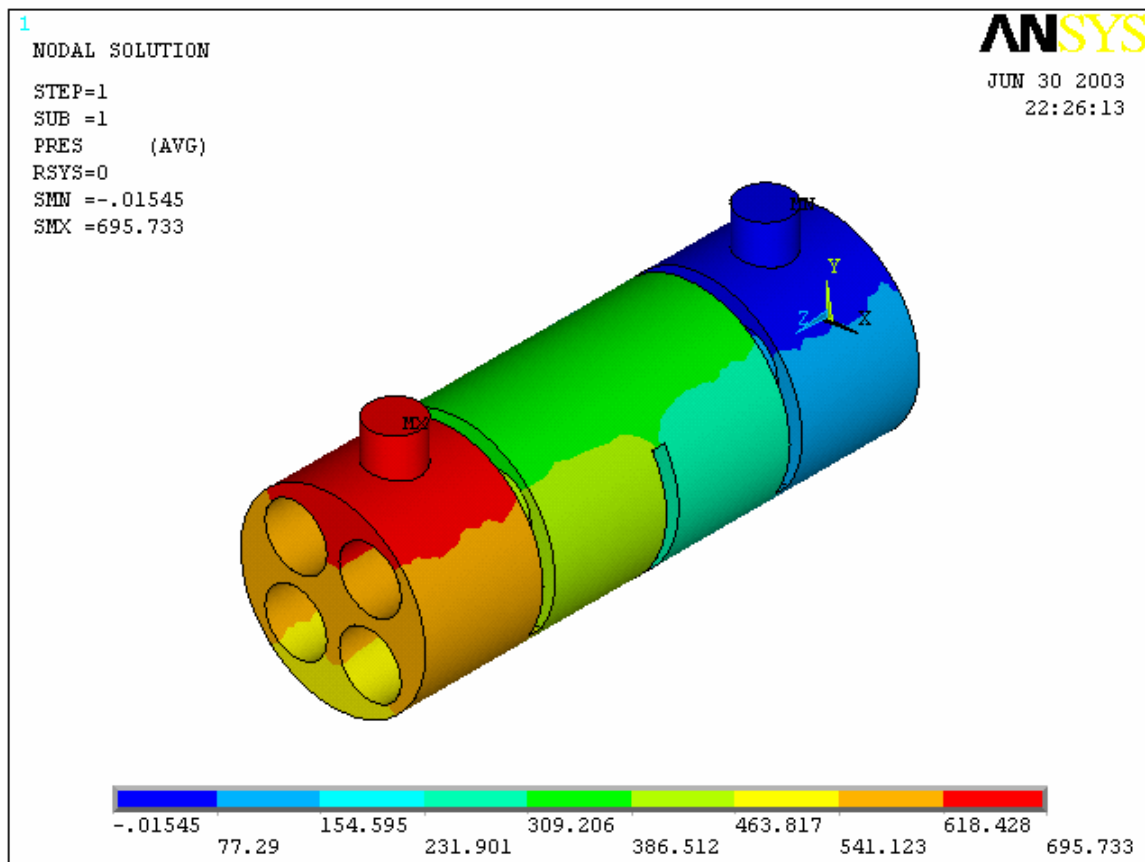


Bild 28: Druckverteilung im Außenraum des Rohrbündelwärmetauschers

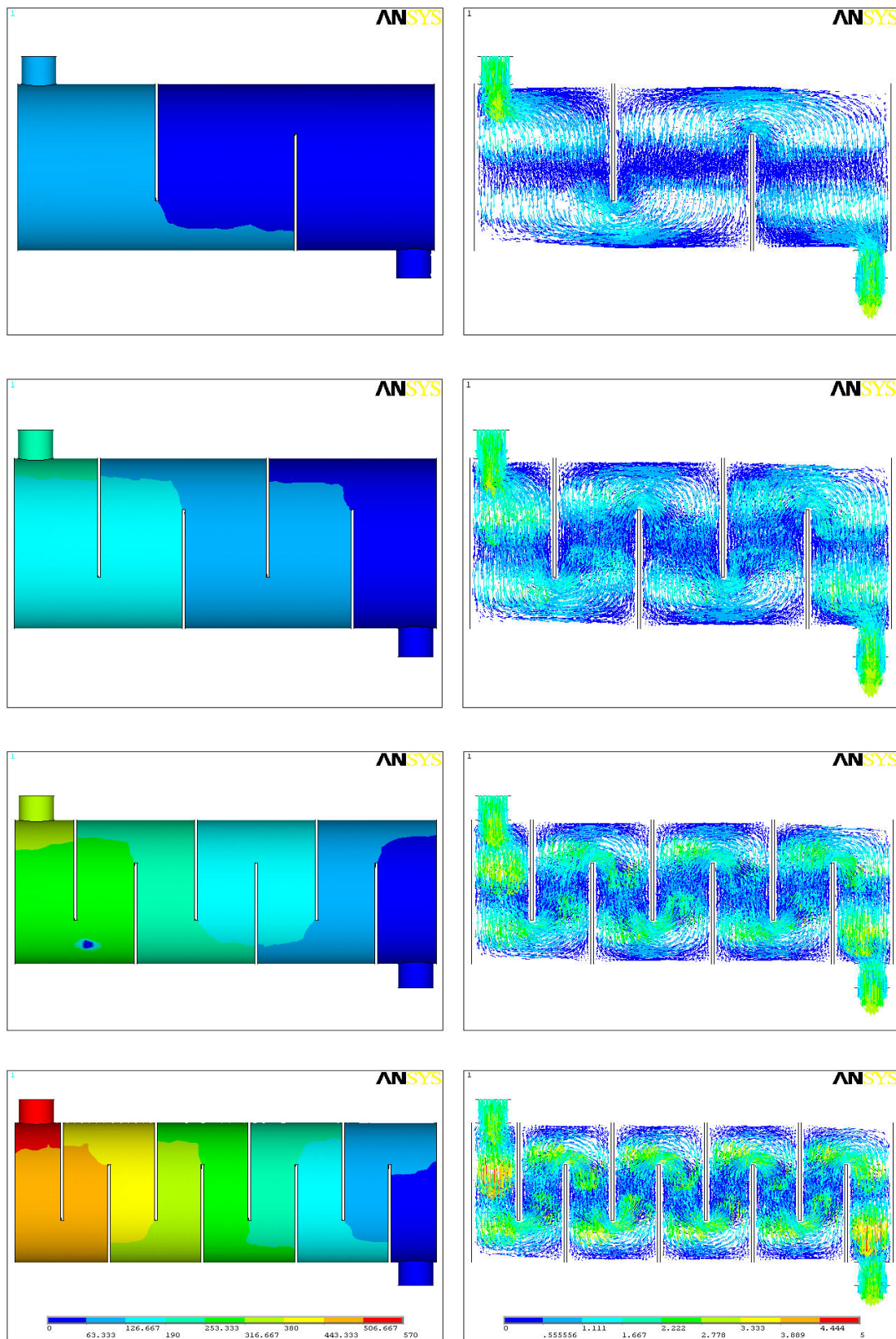
### 3.3.3.1 Einfluss der Anzahl der Umlenkmale auf den Wärmewirkungsgrad, auf die Geschwindigkeitsverteilung und auf die Druckverluste im Wärmetauscher

Um die Abhängigkeit der Temperaturfelder, Geschwindigkeitsverteilung und Druckverluste des Mediums innerhalb des Wärmetauschers numerisch zu untersuchen, wurde die Anzahl der Umlenkmale des untersuchenden Rohrbündelwärmetauschers von 2 bis 8 variiert und jeder Fall separat mit Hilfe des FEM-Programms ANSYS berechnet. Das Bild 29 zeigt die Simulationsergebnisse der Geschwindigkeit- und Druckverläufe im Rohrbündelwärmetauscher mit unterschiedlicher Anzahl der Umlenkmale. Die Abhängigkeit der Druckverluste von der Anzahl der Umlenkmale bzw. vom Verhältnis  $[S/D]$  ist in den Bildern 30 und 31 dargestellt.

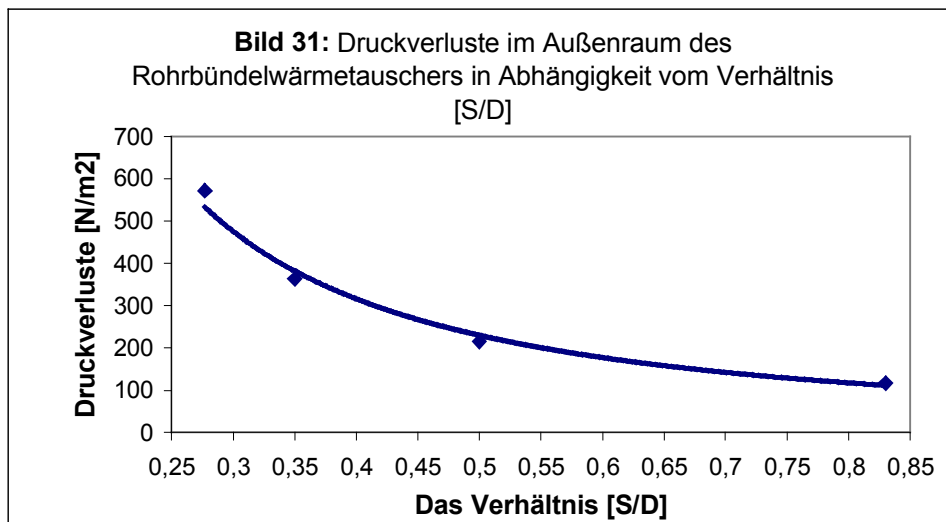
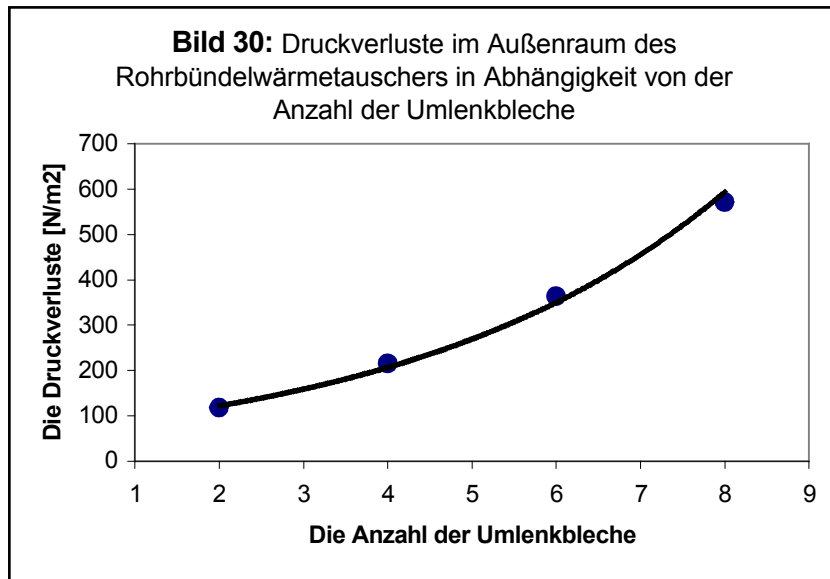
Dabei sind:

S in [m]: der Abstand zwischen zwei benachbarten Umlenkmale.

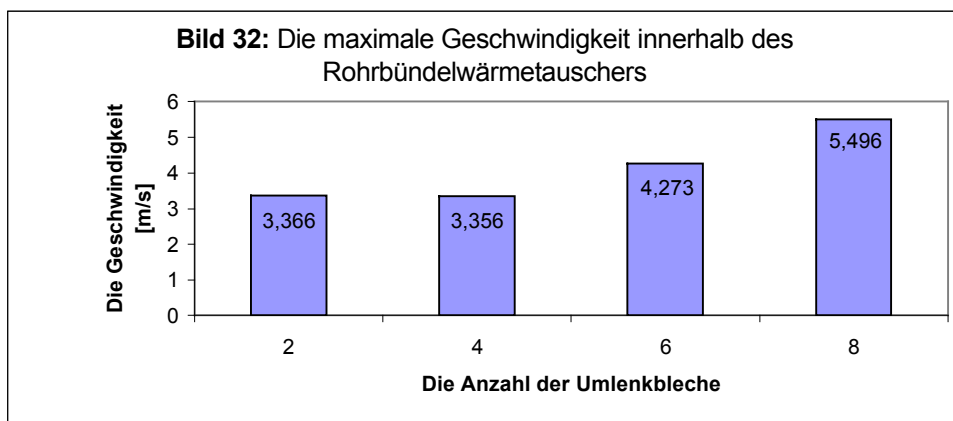
D in [m]: der Innendurchmesser des Mantels.



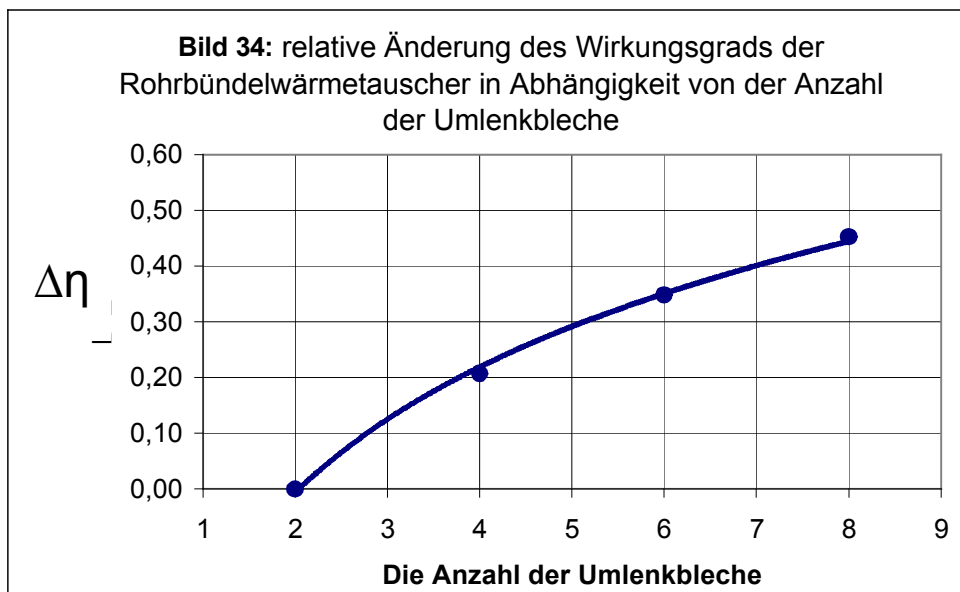
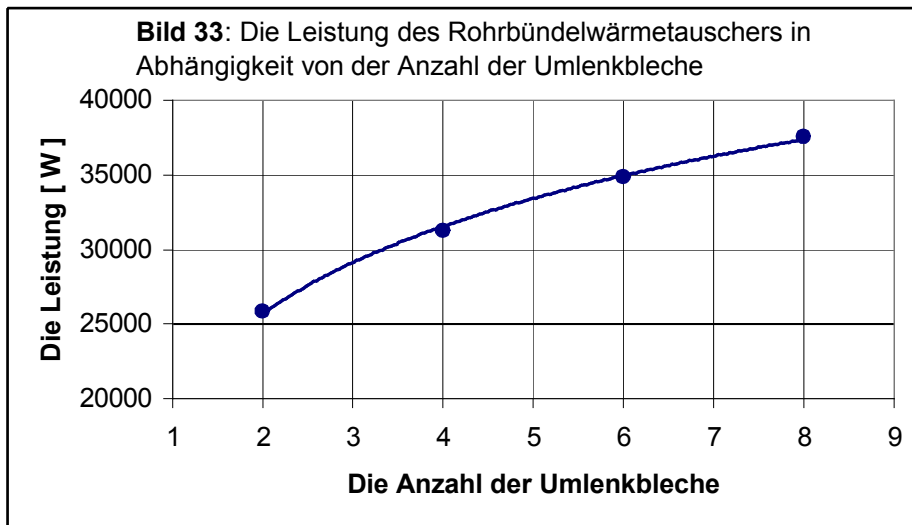
**Bild 29:** Simulationsergebnisse der Geschwindigkeit- und Druckverläufe im Rohrbündelwärmetauscher mit unterschiedlicher Anzahl der Umlenkmale



Weiterhin wurde die maximale erreichbare Geschwindigkeit innerhalb des Rohrbündelwärmetauschers in Abhängigkeit von der Anzahl der Umlenkleche im Bild 32 gezeigt.



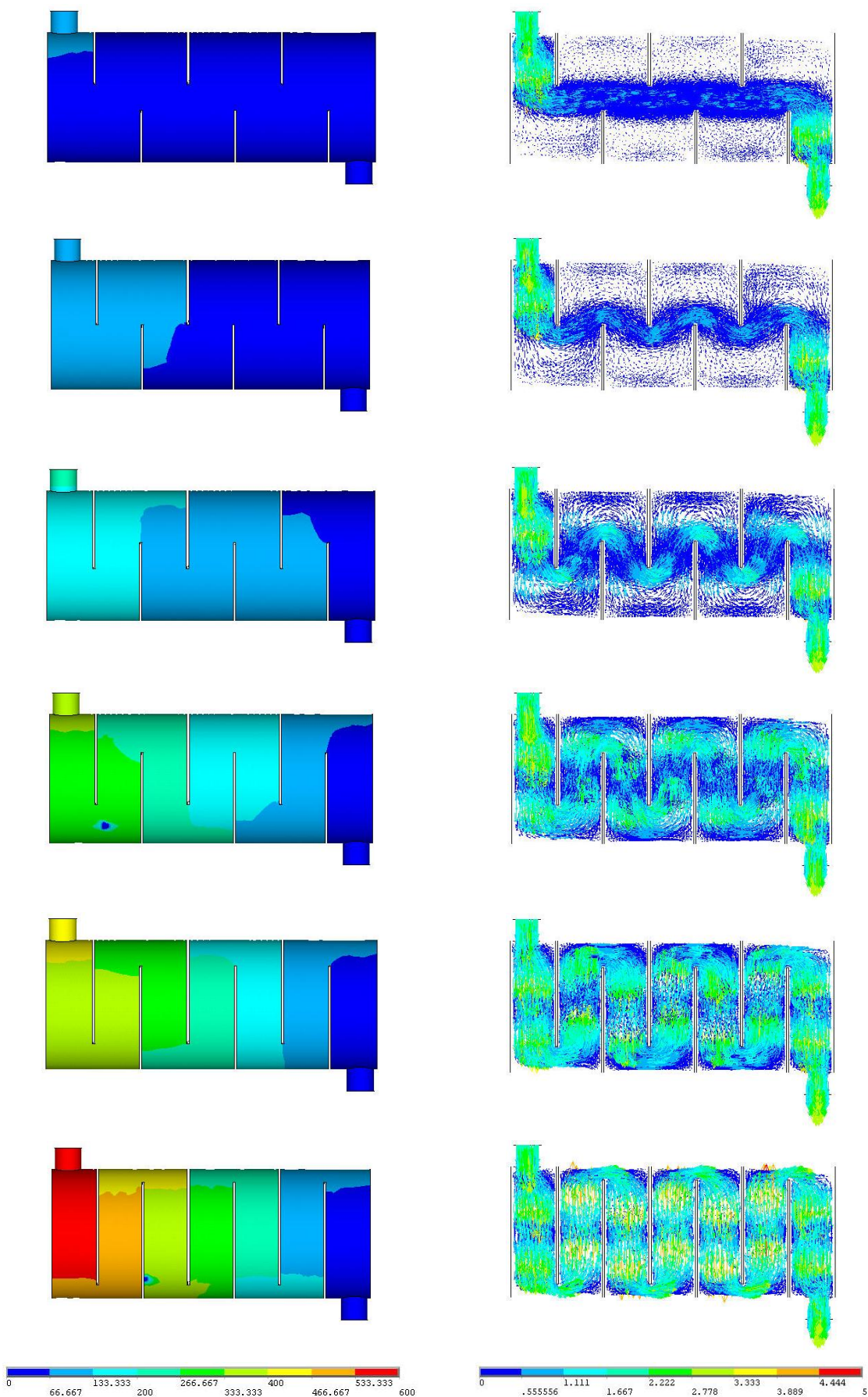
Diese maximale Geschwindigkeit verbessert den Wärmedurchgangskoeffizienten, die Leistung und den Wirkungsgrad des Wärmetauschers (Bilder 33 und 34).

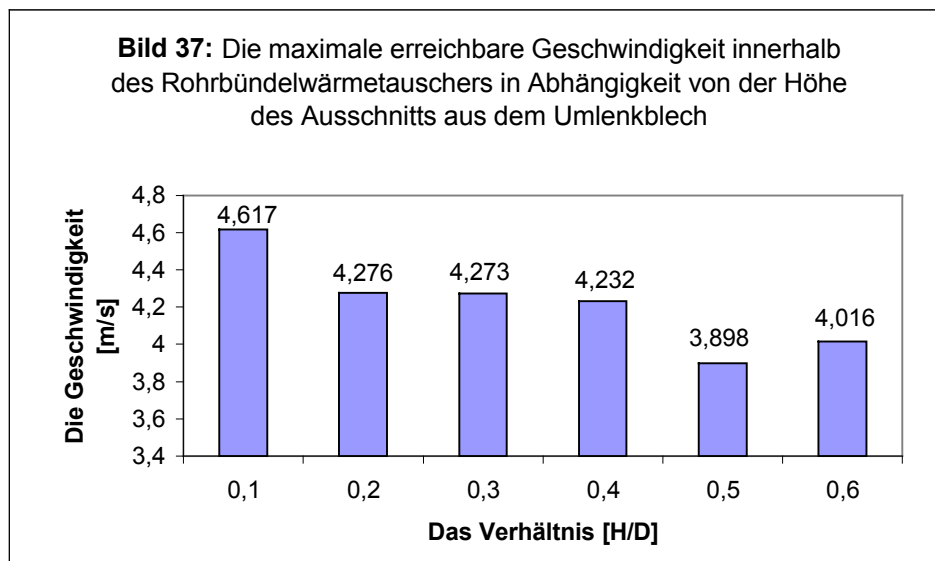
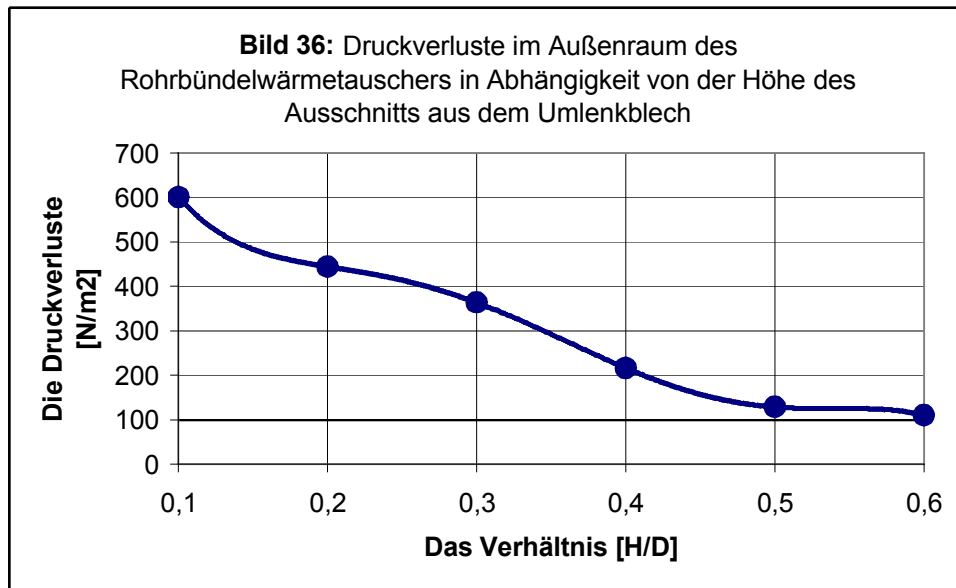


### 3.3.3.2 Abhängigkeit des Wärmewirkungsgrads und der Druckverluste der Rohrbündelwärmetauscher von der Höhe des Ausschnitts aus dem Umlenklech

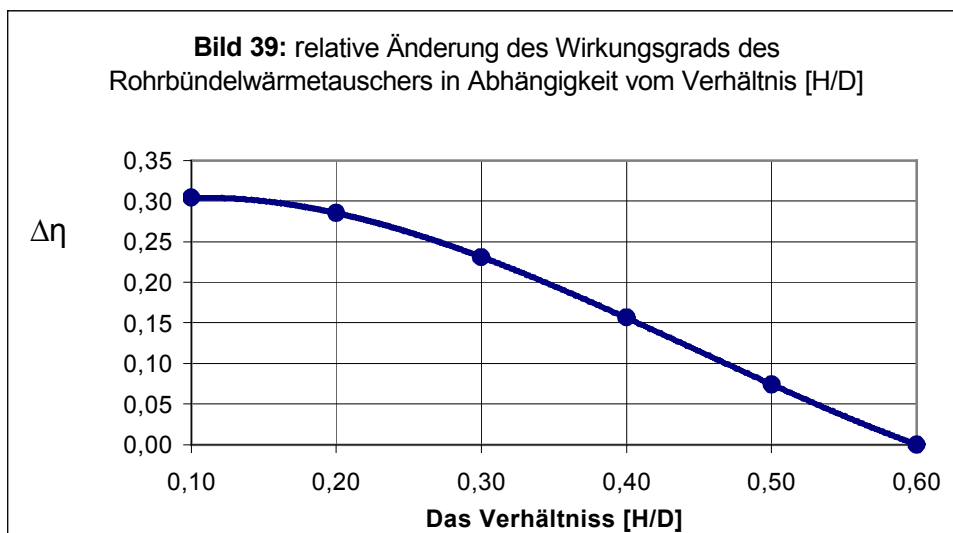
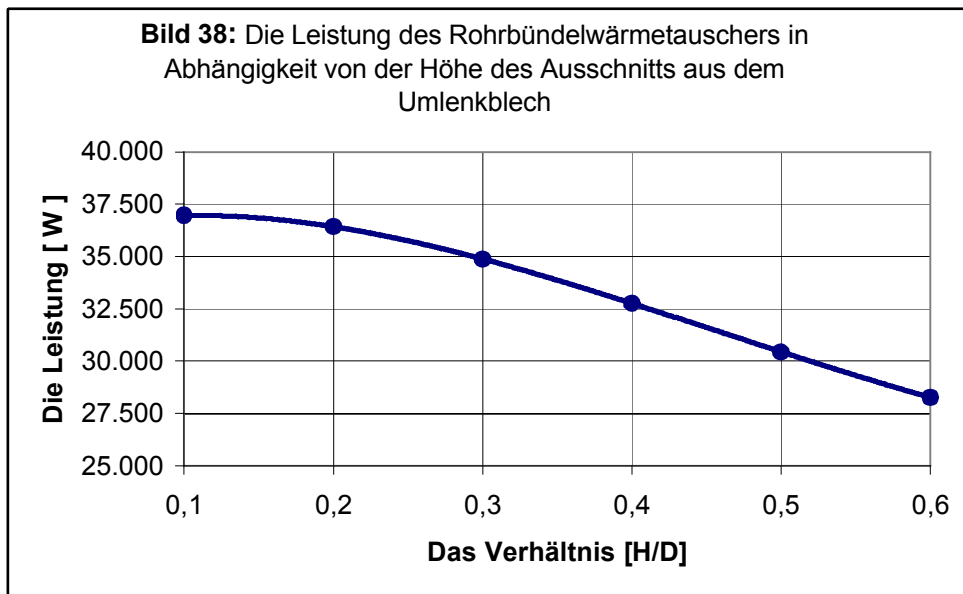
Um den Einfluss der Höhe des Ausschnitts aus dem Umlenklech auf die Geschwindigkeitsverteilung und Druckverluste im Außenraum des Rohrbündelwärmetauschers zu simulieren, wurde das Verhältnis  $[H/D]$ ; dabei ist  $H$  die Höhe des Ausschnitts aus dem Umlenklech, von 10% bis 60% variiert und jeder Fall separat mit Hilfe des FEM-Programms ANSYS berechnet. Das Bild 35 zeigt die Simulationsergebnisse der Geschwindigkeits- und Druckverläufe. Die Diagramme in den Bildern (36-39) zeigen die Abhängigkeit der Druckverluste, der maximal erreichbaren Geschwindigkeit, der Leistung und der Änderung des Wirkungsgrads des Wärmetauschers von der Höhe des Ausschnitts aus dem Umlenklech.

**Bild 35:** Simulationsergebnisse der Geschwindigkeit- und Druckverläufe im Rohrbündelwärmetauscher mit unterschiedlichen Ausschnittshöhen aus den Umlenklechen



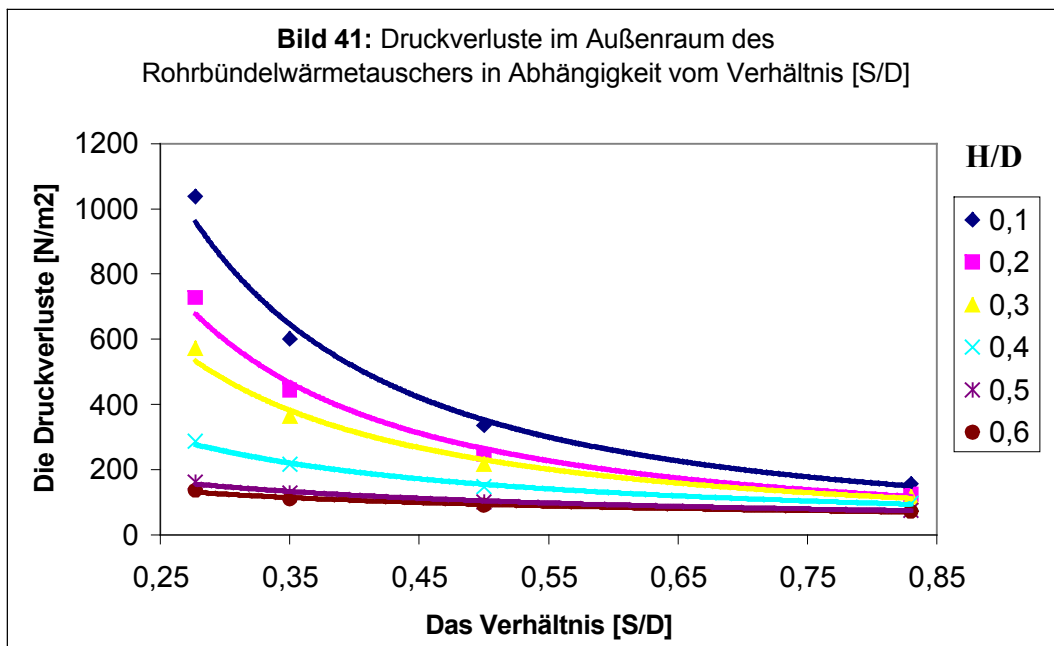
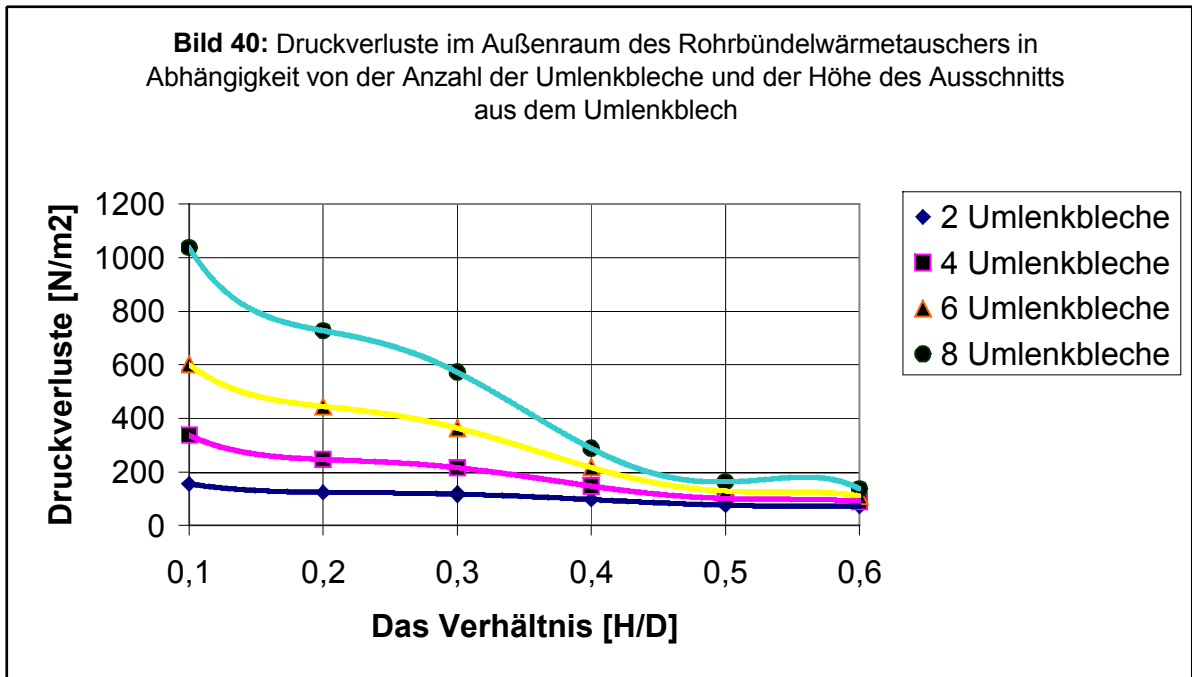




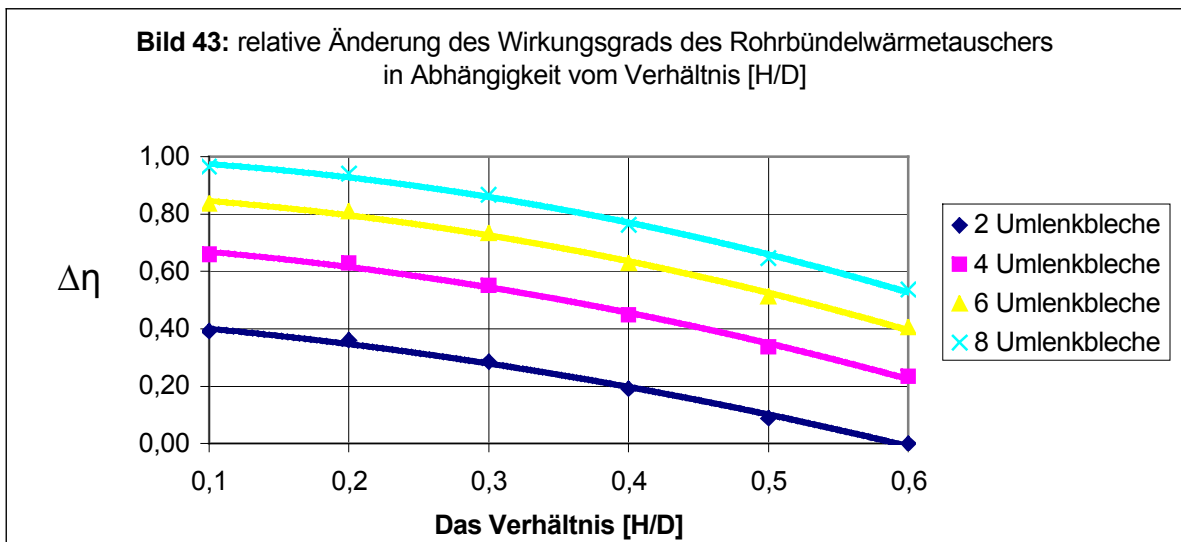
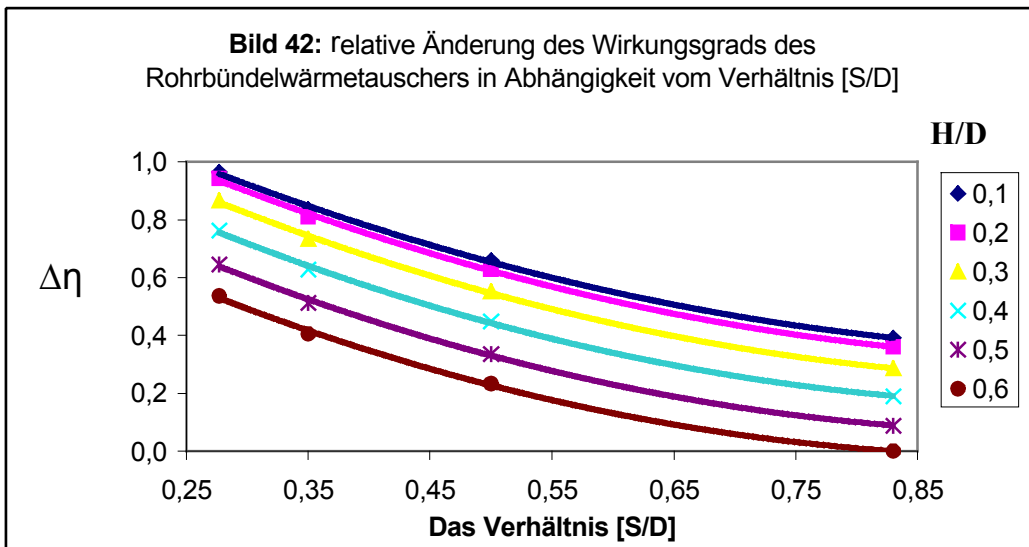


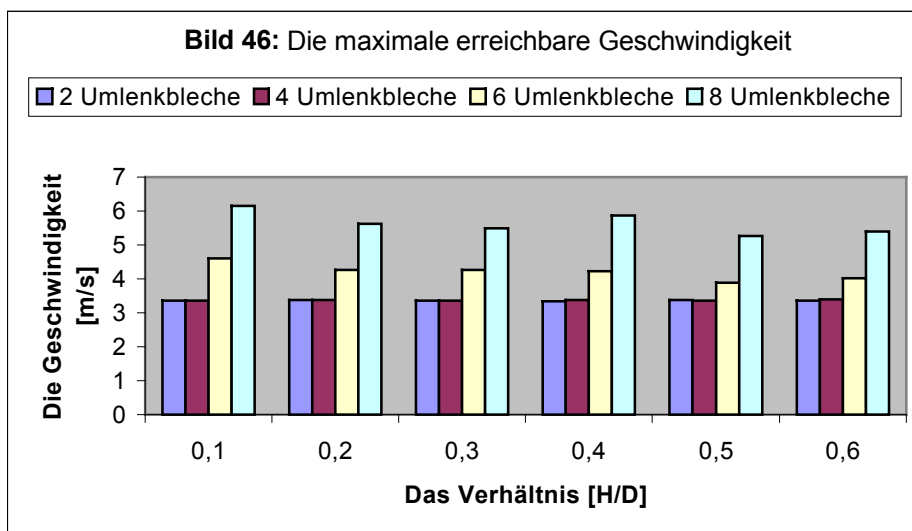
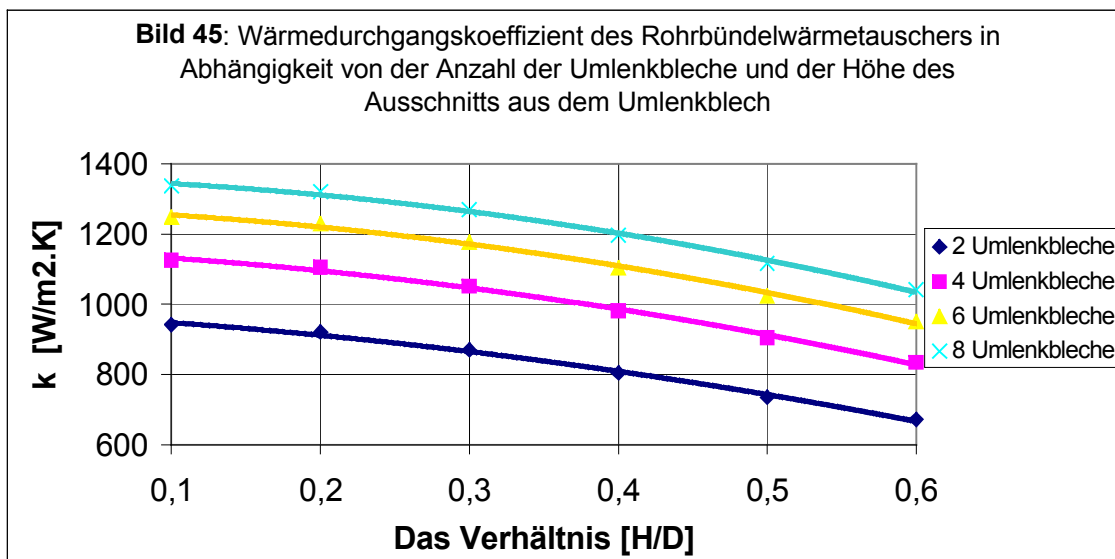
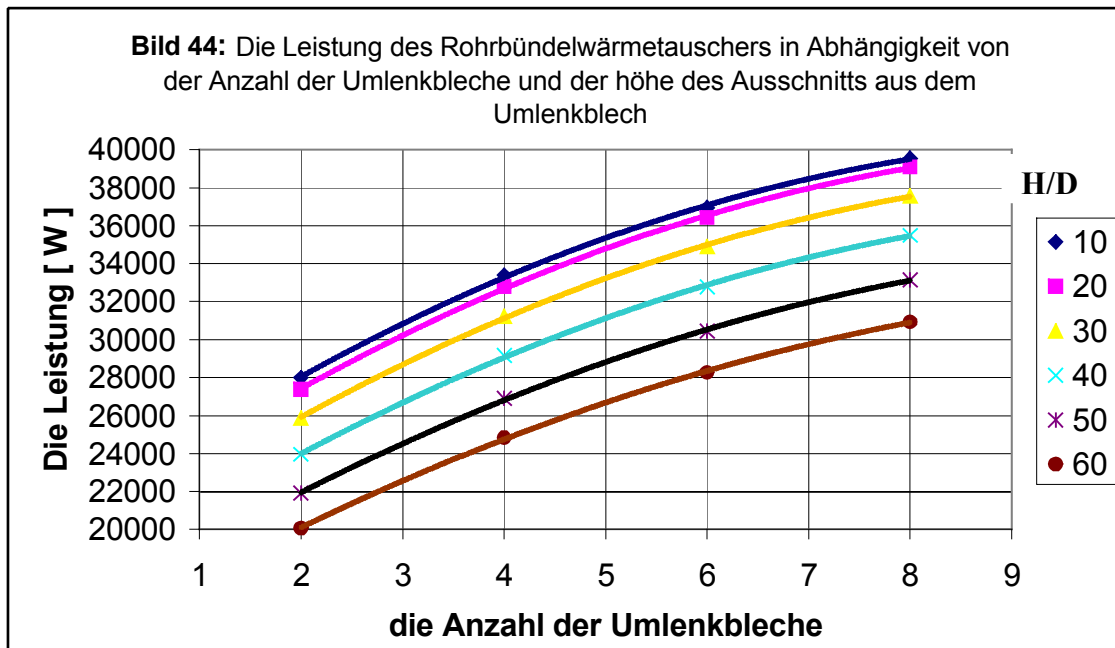
Weiterhin wurden die vorgezeigten Diagramme miteinander kombiniert, d. h. die Abhängigkeit der Druckverluste, der maximalen Geschwindigkeit, des Wärmedurchgangskoeffizienten, der Leistung und der Änderung des Wirkungsgrads des Rohrbündelwärmetauschers von der Anzahl der Umlenkleche und der Höhe des Ausschnitts aus dem Umlenklech zusammen in einem allgemeinen Diagramm gezeichnet (Bilder 40- 46).

Davon kann man den optimierten Punkt im Hinblick auf die Konstruktion, Temperaturverlauf und Energieaufwand ermitteln.





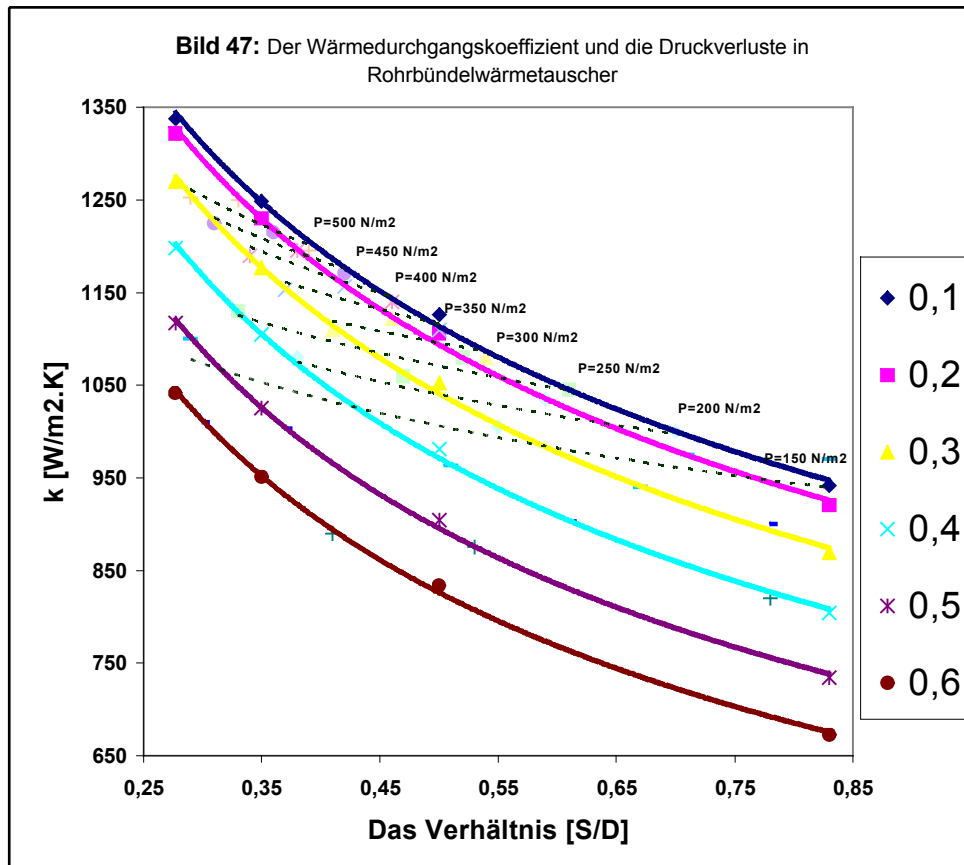




### 3.3.4 Auswahl des optimierten Modells

Zur Auswahl des optimierten Modells des Rohrbündelwärmetauschers sollen die Wärmedurchgangskoeffizienten und die Druckverluste gleichzeitig berücksichtigt werden.

Bild (47) zeigt die Abhängigkeit des Wärmedurchgangskoeffizienten und der Druckverluste jeweils von den Verhältnissen  $[S/D]$  und  $[H/D]$  in einem Diagramm.

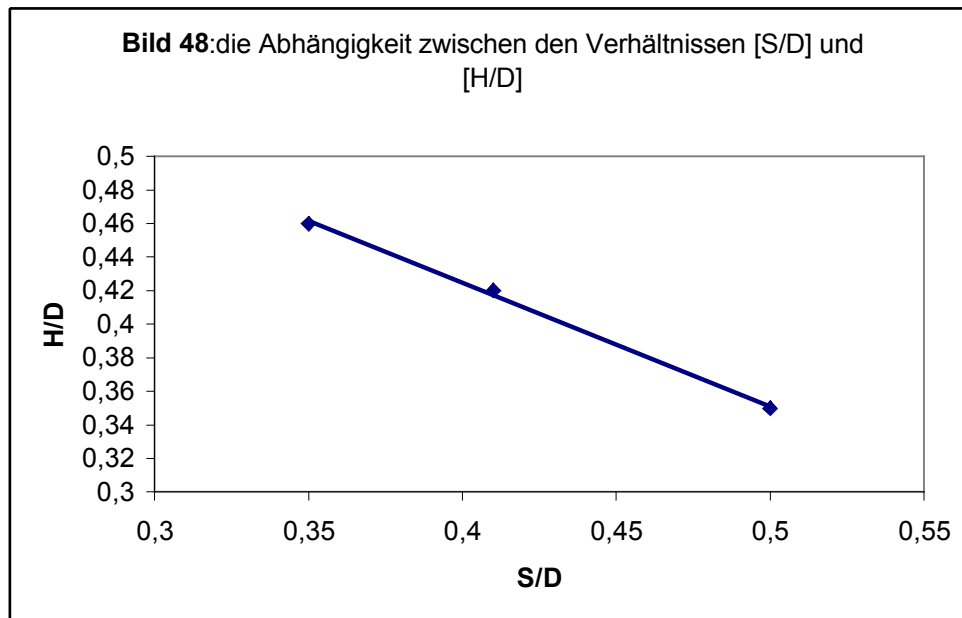


Im o. g. Diagramm ist ersichtlich, dass es bei einem konstanten Druckverlust, wie z. B. bei  $\Delta P = 150 N/m^2$ , verschiedenen Möglichkeiten zur Durchführung der Konstruktion der Rohrbündelwärmetauscher gibt. Diese sind in der Tabelle 4 eingetragen.

**Tabelle 4:** Wärmedurchgangskoeffizient des Rohrbündelwärmetauschers in Abhängigkeit der Anzahl der Umlenkbleche und ihre Ausschnitte

Anzahl der Umlenkbleche	S/D	H/D	k [W/m <sup>2</sup> .K]
2	0,83	0,15	940
3	0,62	0,28	978
4	0,50	0,35	1007
5	0,41	0,42	1030
6	0,35	0,46	1055

Durch den Vergleich der gezeigten Diagramme und Tabelle kann man feststellen, dass der optimierte Punkt der Konstruktion im Bereich:  $S/D = [0,35 \text{ bis } 0,50]$  liegt. Das Bild (48) zeigt die Abhängigkeit zwischen den beiden Verhältnissen  $[S/D]$  und  $[H/D]$  im optimierten Bereich. In diesem Bereich ist der Druckverlust am geringsten bei bestimmten annehmbaren Werten für den Wärmedurchgangskoeffizient  $k$ .



Vom Bild (48) ist ersichtlich, dass die Abhängigkeit zwischen dem Verhältnis  $[S/D]$  und dem entsprechenden Verhältnis  $[H/D]$  im optimierten Bereich linear ist und mathematisch kann sie mit der folgenden Gleichung beschrieben werden:

$$\frac{H}{D} - \left(\frac{H}{D}\right)_1 = \frac{\left(\frac{H}{D}\right)_2 - \left(\frac{H}{D}\right)_1}{\left(\frac{S}{D}\right)_2 - \left(\frac{S}{D}\right)_1} \times \left(\frac{S}{D} - \left(\frac{S}{D}\right)_1\right) \quad (20)$$

Dabei sind  $\left[\left(\frac{H}{D}\right)_1, \left(\frac{S}{D}\right)_1\right]$  und  $\left[\left(\frac{H}{D}\right)_2, \left(\frac{S}{D}\right)_2\right]$  zwei beliebige Punkte im optimierten Bereich.

Danach ergibt sich das Verhältnis  $[H/D]$  nach der Gleichung 21:

$$\frac{H}{D} = -0,733 \frac{S}{D} + 0,716 \quad (21)$$

Aus dieser vorgeschlagen Gleichung, zur Unterstützung der Konstruktion der Rohr-bündelwärmetauscher, kann das Verhältnis  $[H/D]$  als Funktion des Verhältnisses  $[S/D]$  im optimierten Bereich ermittelt werden.

### 3.3.5 Praktische Untersuchungen

Zur Überprüfung der Genauigkeit der Simulationsergebnisse wurden sie mit denjenigen Messergebnissen verglichen, welche aus Versuchen an einem aufgebauten Rohrbündelwärmetauscher gewonnen wurden (Bild 18). Dieser Rohrbündelwärmetauscher dient als Versuchsmuster und hat folgende technische Daten:

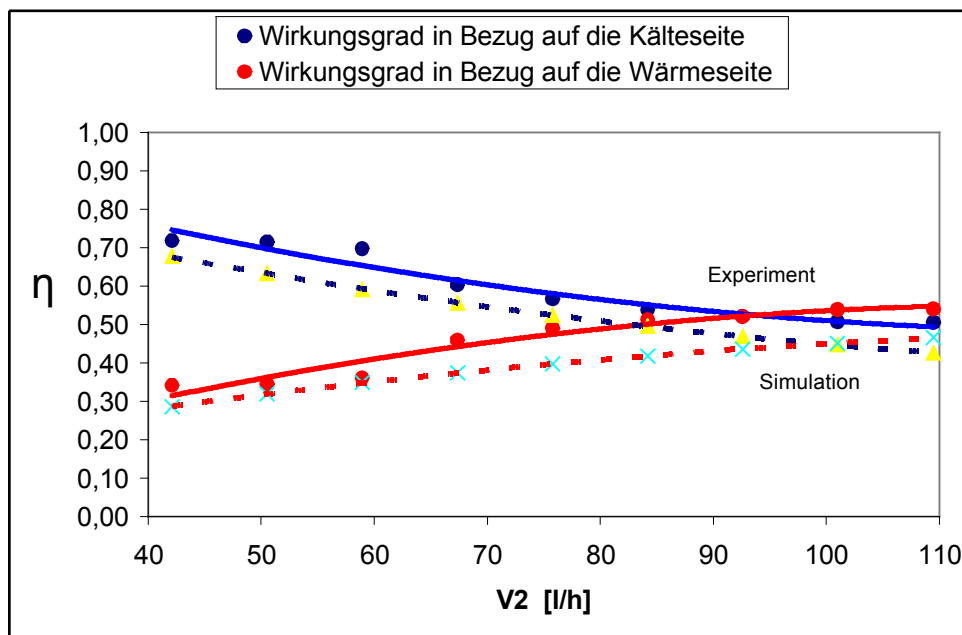
Der Innendurchmesser des Mantels beträgt 150 mm.

Das Rohrbündel besteht aus 66 geraden Rohren (Außendurchmesser 12 mm, Innendurchmesser 10 mm) mit einer Länge von 490 mm. Damit beträgt die Wärmeübertragungsfläche (Außenseite der Rohre) 1,22 m<sup>2</sup>.

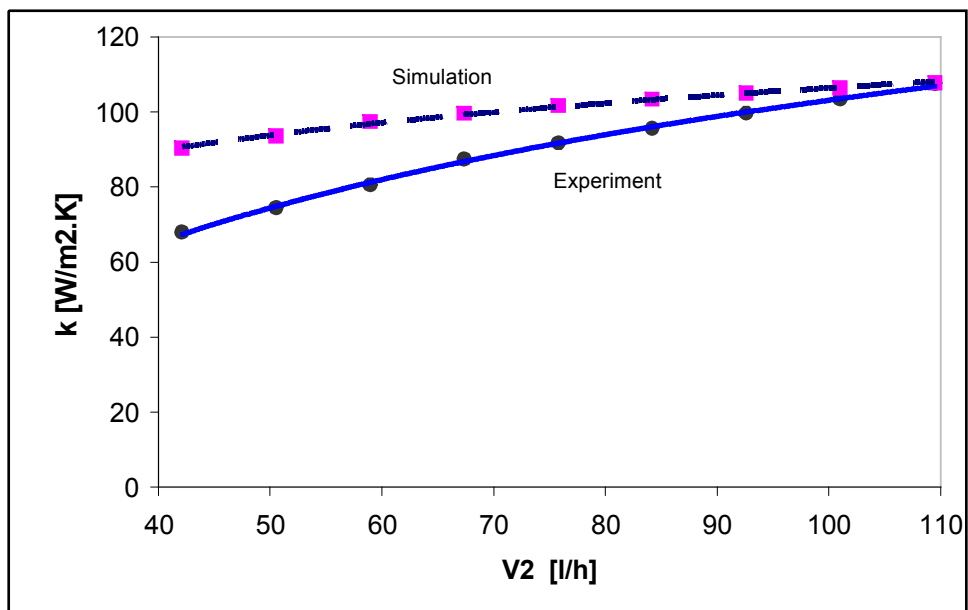
Der Apparat hat einen mantelseitigen Durchgang. Auf der Rohrseite befinden sich zwei Durchgänge. Der Apparat besitzt 6 einfache Segmentumlenkbleche mit einer Dicken von jeweils 3 mm. Damit beträgt das Verhältnis (S/D) 0,44 (innerhalb des optimierten Bereiches).

Die experimentellen Ergebnisse wurden mit den Simulationsergebnissen verglichen.

Bilder (49 und 50) zeigen den Verlauf der Wärmetauscherwirkungsgrad- und Wärmedurchgangskoeffizientenkurven in Abhängigkeit vom Volumenstrom des kalten Mediums.



**Bild 49:** Der Wärmewirkungsgrad des Wärmetauschers in Abhängigkeit vom Volumenstrom des kalten Mediums



**Bild 50:** Der Wärmedurchgangskoeffizient des Wärmetauschers in Abhängigkeit vom Volumenstrom des kalten Mediums

### 3.3.6 Zusammenfassung

Zur möglichen Nutzung von Niedertemperaturquellen zum Antrieb einer AKM müssen von einerseits die Hauptkomponenten der AKM im Hinblick auf den Wirkungsgrad optimiert werden und andererseits muss man Arbeitsstoffpaare einsetzen, die diesen Antrieb ermöglichen können.

Obwohl der Einsatz der Umlenkleche im Außenraum des Rohrbündelwärmetauschers, wie die Ergebnisse zeigen, viele Vorteile für die Verbesserung der Leistung, des Wärmedurchgangskoeffizienten und des Wärmewirkungsgrades bringen, ist die Zunahme des Druckverlustes des äußeren Mediums, welcher einen großen Energieverbrauch verursacht, ein nicht vernachlässigbarer Nachteil.

Die Druckverluste- und die Wärmedurchgangskoeffizientenkurven in Abhängigkeit jeweils von der Anzahl der Umlenkleche und von den Ausschnittshöhen aus den Umlenklechen wurden in einem Diagramm dargestellt, dadurch kann man den optimierten Punkt im Hinblick auf den Temperaturverlauf und Energieaufwand ermitteln.

Zur Überprüfung der Simulationsergebnisse wurden sie mit denjenigen Messergebnissen verglichen, welche aus Versuchen an einem aufgebauten Rohrbündelwärmetauscher stammen. Die Übereinstimmung zwischen den experimentellen Ergebnissen und den durch Simulation erhaltenen Ergebnissen bestätigt die Genauigkeit der Simulation.

Die mit dem aufgebauten Rohrbündelwärmetauscher durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass eine bestimmte Konstruktion des Wärmetauschers (Umlenklecheinbauten) zu einer Verbesserung des Wirkungsgrades führt (Bild 24). Weitere Untersuchungen mit den vorgesehenen Arbeitsstoffpaaren unter verschiedenen Arbeitsbedingungen (variierbare Antriebstemperaturen) wurden im Rahmen eines anderen Projektes weitergeführt.

**Formelzeichen des Kapitels**

$w_i$	Geschwindigkeitskomponente in der Richtung i	[m/s]
$X_i$	Massenkraft in der Richtung i	[N]
$q_q$	innere Wärmequelle in Bezug auf den Volumen	[W/m <sup>3</sup> ]
$T$	Temperatur	[K]
$P$	Druck	[N/m <sup>2</sup> ]
$t$	Zeit	[s]
$\eta$	dynamische Viskosität	[kg/m.s]
$\rho$	Dichte	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit	[W/m.K]
$C_p$	Isobare spezifische Wärmekapazität	[J/kg.K]
$Q$	Leistung des Wärmetauschers	[W]
$k$	Wärmedurchgangskoeffizienten	[W/m <sup>2</sup> .K]
$A$	Wärmetauschfläche	[m <sup>2</sup> ]
$\Delta T_m$	mittlere logarithmische Temperaturdifferenz	[K]
$\alpha_a, \alpha_i$	äußere und innere Wärmeübergangskoeffizient	[W/m <sup>2</sup> .K]
$d_a, d_i$	Außendurchmesser und Innendurchmesser der Rohre	[m]
$R_a, R_i$	Wärmewiderstände des äußeren und inneren Schmutzschichten	[m <sup>2</sup> .K/W]
$\Delta T_{gr}, \Delta T_{kl}$	größte und kleinste Temperaturdifferenz zwischen beiden strömenden Medien	[K]
$\eta_k, \eta_h$	Wirkungsgrad des Wärmetauschers in Bezug auf das kalten bzw. heißen Medium	-
$T_{k,ein}, T_{k,aus}$	Eintrittstemperatur und Austrittstemperatur des kalten Mediums	[K]
$T_{h,ein}, T_{h,aus}$	Eintrittstemperatur und Austrittstemperatur des heißen Mediums	[K]
$\Delta p$	Gesamt Druckverlust	[N/m <sup>2</sup> ]
$\Delta p_Q$	Druckverlust im Rohrbündel zwischen zwei benachbarten Umlenklechen	[N/m <sup>2</sup> ]
$\Delta p_{QE}$	Druckverlust in der Einlauf- bzw. Auslaufzone des Rohrbündels	[N/m <sup>2</sup> ]
$\Delta p_F$	Druckverlust im Blechausschnitt (Fenster)	[N/m <sup>2</sup> ]
$\Delta p_s$	Druckverlust in den beiden Mantelstützen	[N/m <sup>2</sup> ]
$N_U$	Anzahl der Umlenkungen	-
$V_2$	Volumenstrom des kalten Mediums	[m <sup>3</sup> /s]



### **3.4 Untersuchungen der Labor-Absorptionskälteanlage mit den Arbeitsstoffpaaren H<sub>2</sub>O/LiBr und Aceton/Zinkbromid**

#### **3.4.1 Aufbau der Laboranlage**

Um Aufschluss über die spezielle Charakteristik der im Projektrahmen beschafften Absorptionskälteanlage zu gewinnen, wird vor Einsatz der Anlage mit dem neuen Arbeitsstoffpaar die Anlagencharakteristik unter Einsatz des herkömmlichen und der Auslegung entsprechenden Kombination aufgenommen.

Die Versuchsanlage besteht aus einer Solarkollektoranlage und Absorptionskältemaschinenanlage. Beide Anlagen sind miteinander über einen Pufferspeicher verbunden (Bilder 51, 52).

Die technischen Daten (Nennwerten) der beiden Anlagen sind:

Solaranlage (Firma SESOL GmbH, Langewiesen):

- Flachkollektoren mit einer effektiven Absorberfläche von 10 m<sup>2</sup>
- 2 m<sup>3</sup> Pufferspeicher mit zusätzlichen elektrischen Heizpatronen

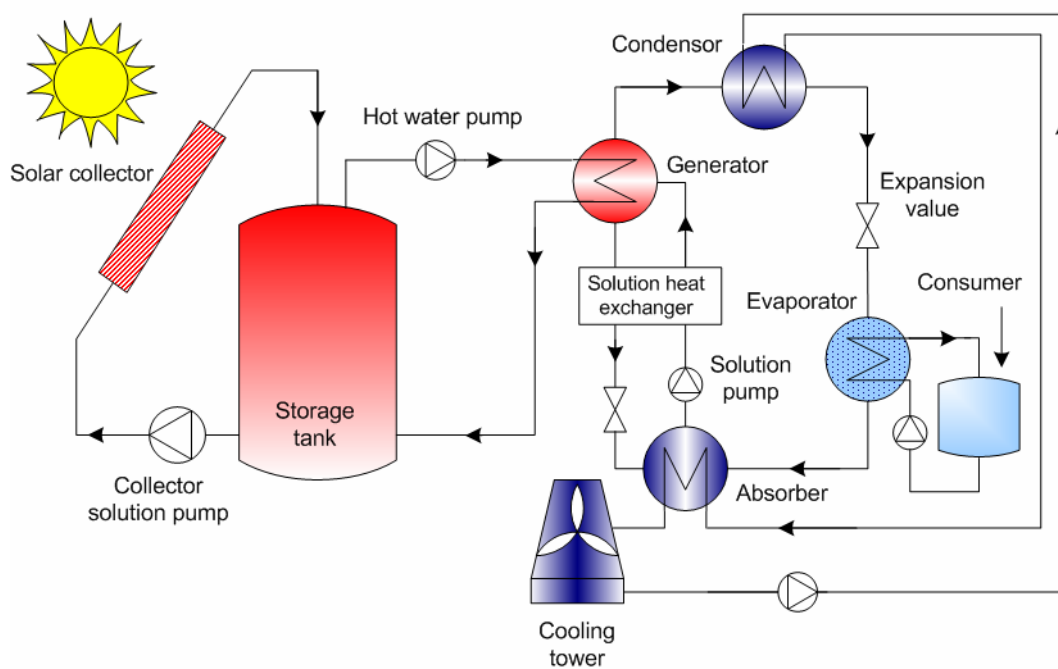
Absorptionskältemaschine (Firma WEGRA, Anlagenbau GmbH Westenfeld; mit spezieller Auslegung für den Versuchsbetrieb) :

- Kälteleistung von 10 kW
- Austreiberleistung 13 kW
- Heizwassertemperaturen 85/75 °C
- Kaltwassertemperaturen 13/8 °C
- Kühlwassertemperaturen 30/35 °C

Beide Anlagen sind mit den erforderlichen Sensoren bestückt und mit einer Datenerfassungseinheit (Datenlogger) verbunden, sodass man alle zur Diagnostik der Anlage erforderlichen Daten, ermitteln und auswerten kann.



**Bild 51:** Gesamtschaltbild der Laborabsorptionskälteanlage an der TU Ilmenau



**Bild 52:** Schematische Darstellung des betrachteten Kälteerzeugungssystems

### 3.4.2 Durchgeführte Untersuchungen

Das Untersuchungsprogramm umfasste zahlreiche Untersuchungen zur Ermittlung der Betriebskurven der Anlage unter verschiedenen Betriebsbedingungen und verschiedenen Betriebstemperaturen. Durch die spezielle Fertigung und Bestückung der Anlage mit mehreren Sensoren kann man genaue thermodynamischen Prozessverläufe ermitteln und auswerten.

Zur Ermittlung der Betriebskurven wurden die Betriebstemperaturen (Austreibertemperatur und Kühlwassertemperatur) variiert und die dabei ergebenden Leistungen, Verdampfungs-temperaturen und Wärmeverhältnissen erfasst oder berechnet.

Bei jeder Versuchsreihe wurden folgende Daten in Abhängigkeit von der Zeit und Betriebstemperaturen ermittelt:

$\dot{Q}_{\text{HSP}}$ in kW	Leistung des Wärmespeichers (zugeführte Heizleistung zum Speicher)
$\dot{Q}_{\text{HA}}$ in kW	Leistung des Austreibers (zugeführte Heizleistung am Eingang des Austreibers)
$\dot{Q}_0$ in kW	Leistung des Verdampfers (erzeugte Kälteleistung)
$\dot{Q}_k$ in kW	Leistung des Kühlwassers (zur Kühlung des Absorbers und des Kondensators)
$\dot{Q}_{\text{Hc}}$ in kW	Leistung des Solarkollektors
$\varepsilon_0$	Wärmeverhältnis (Kältezahl) der Absorptionskältemaschine
$\eta_{\text{con}}$	Wirkungsgrad der Verbindungsleitungen zwischen dem Warmwasserspeicher und dem Austreiber der Kältemaschine

Die Ermittlungsgleichung der Leistungen ist:

$$\dot{Q} = \dot{V} \cdot \rho \cdot C \cdot (T_e - T_a) \cdot 3600 \quad (22)$$

Dabei sind:

$\dot{Q}$ in kW	die zu ermittelnde Leistung
$\dot{V}$ in m <sup>3</sup> /h	Durchflussstrom des betrachteten Wassers bzw. der Lösung
$T_e$ in °C	Eintrittstemperatur des betrachteten Mediums
$T_a$ in °C	Austrittstemperatur des betrachteten Mediums
$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>	Dichte des Mediums bei der betrachteten mittleren Temperatur
$C$ in kJ/kg.K	spezifische Wärmekapazität des Mediums bei der mittleren Temperatur

Die einzelnen Betriebstemperaturen und Durchflussströme wurden durch Messungen ermittelt. Weiterhin wurden die Druckabfälle im System gemessen.

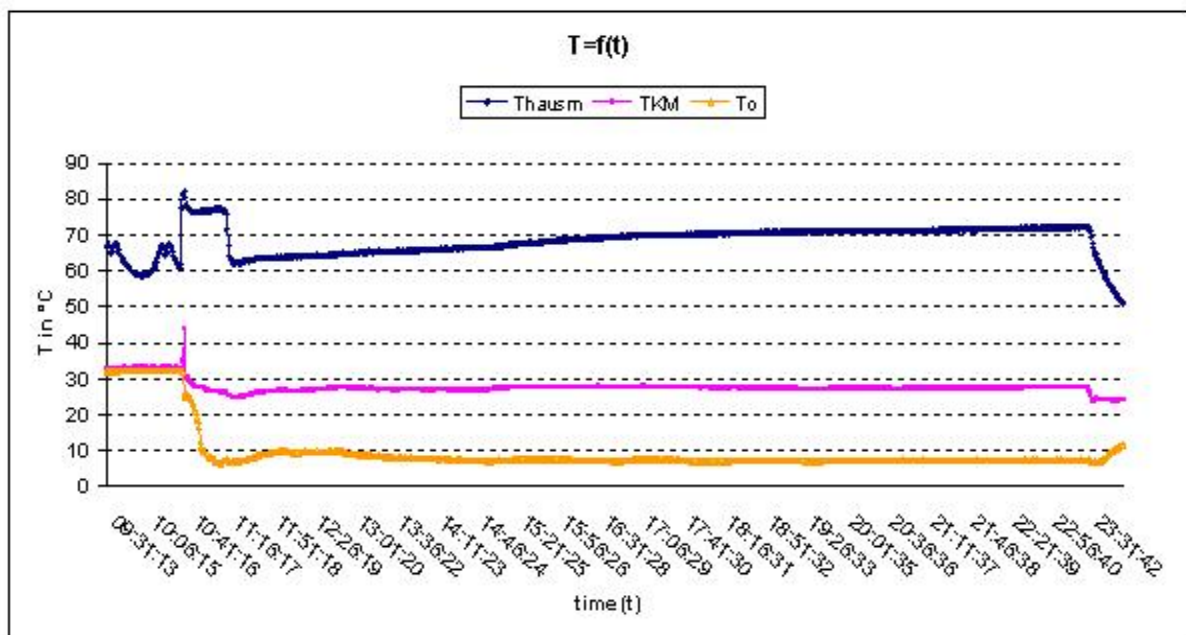
Die Ermittlungsgleichungen der Kennzahlen  $\varepsilon_0$  und  $\eta_{con}$  sind:

$$\varepsilon_0 = \frac{\dot{Q}_0}{\dot{Q}_{HA}} \tag{23}$$

$$\eta_{con} = \frac{\dot{Q}_{HA}}{\dot{Q}_{Hsp}} \tag{24}$$

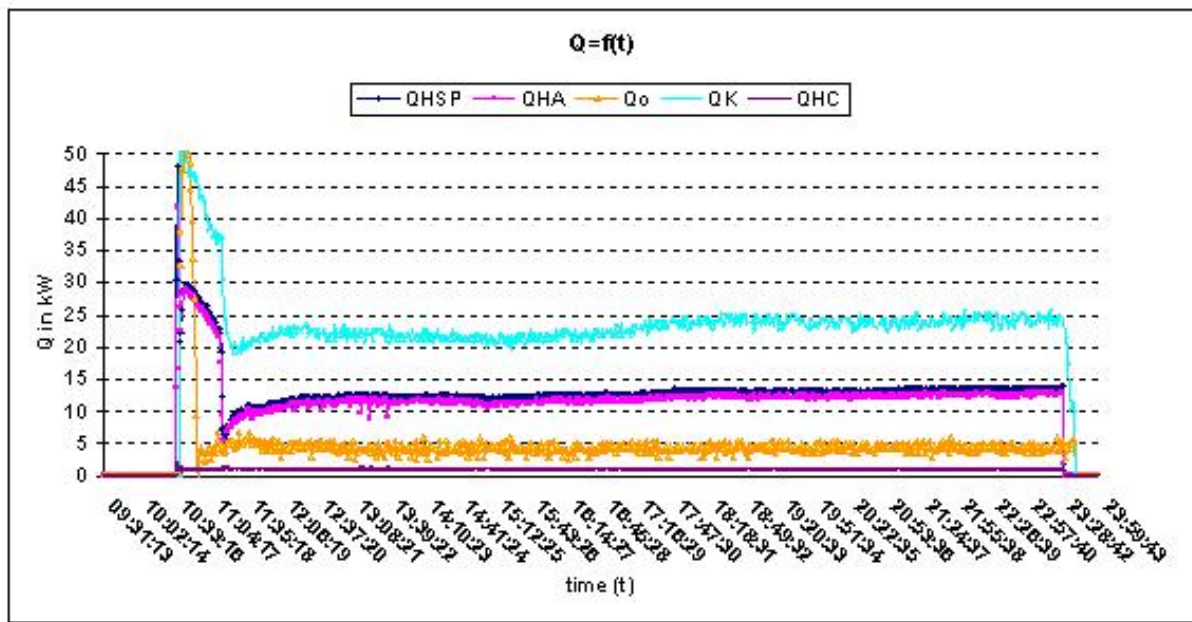
### 3.4.2.1 Untersuchungsergebnisse der Laboranlage mit dem konventionellen Arbeitsstoffpaar H<sub>2</sub>O/LiBr

Die Betriebsdaten der Anlage wurden unter bestimmten Lastbedingungen (Teillast- und Volllastbetrieb) aufgenommen. Die variierten Daten sind die Austreibertemperatur  $T_H$ , die Kühlwassertemperatur  $T_K$ , die Kaltwassertemperatur  $T_0$  und die Durchflussströme des Systems. Bei jedem Betriebszustand wurden die Leistungen und Kennzahlen des Systems ermittelt. Es wurden zahlreiche Messreihen durchgeführt. Die Messergebnisse für eine Versuchsreihe sind in den Bildern 53 bis 57 dargestellt.



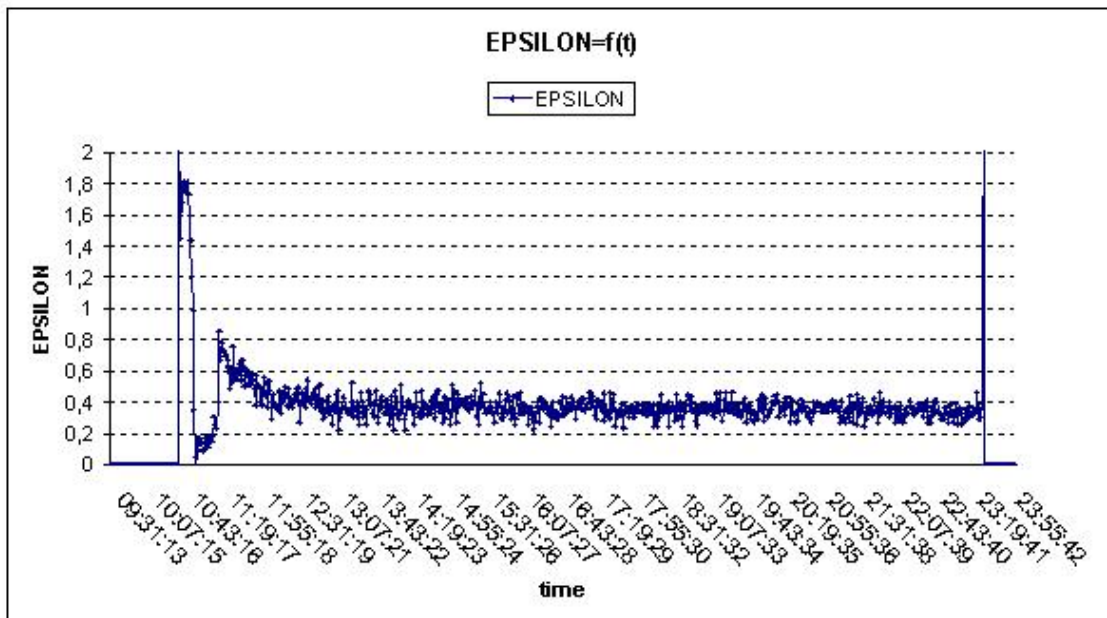
**Bild 53:** Zeitlicher Verlauf der mittleren Temperaturen im Austreiber, im Kondensator und im Verdampfer in Abhängigkeit von der Betriebszeit (Betriebsdatum: 14.03.04)

- $T_{hausm}$  in °C                      mittlere Temperatur des Austreibers
- $T_{kM}$  in °C                        mittlere Temperatur des Kühlwassers
- $T_0$  in °C                            mittlere Temperatur des erzeugten Kaltwassers

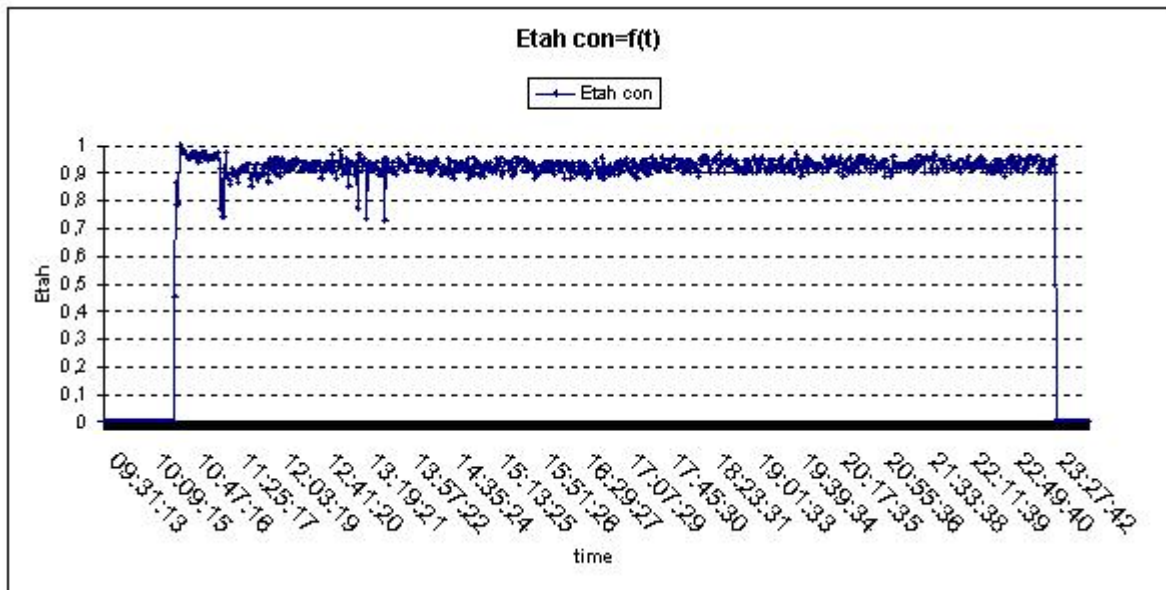


**Bild 54:** Leistungen der Laborabsorptionskältemaschine als Funktion der Betriebszeit, entsprechend der Betriebstemperaturen im Bild 53 (Betriebsdatum: 14. 03. 04).

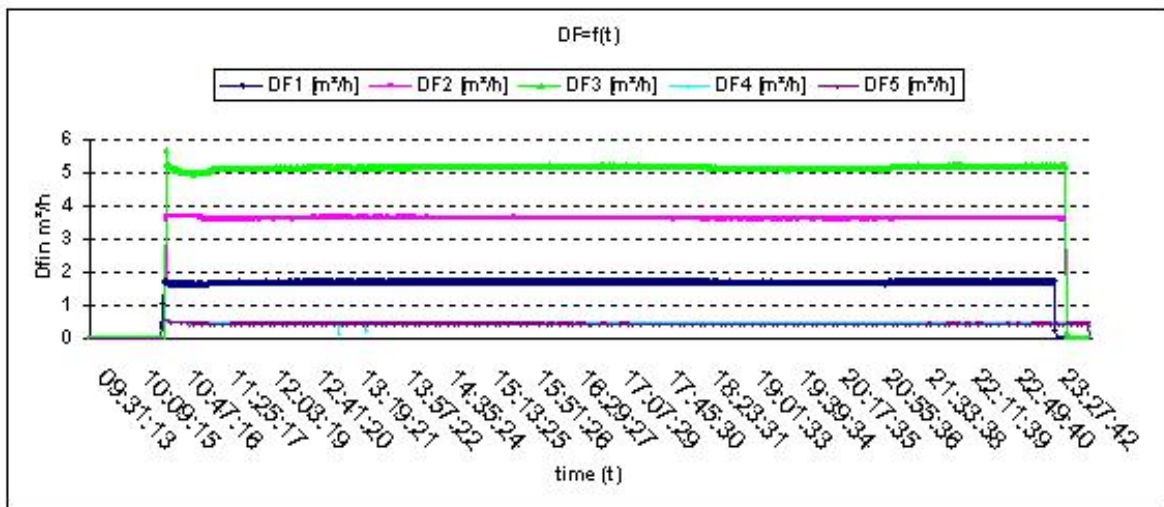
- $Q_{HSP}$  in kW Leistung des Wärmespeichers (zugeführte Heizleistung vom Speicher zum Austreiber)
- $Q_{HA}$  in kW Leistung des Austreibers (zugeführte Heizleistung)
- $Q_o$  in kW Leistung des Verdampfers (erzeugte Kälteleistung)
- $Q_K$  in kW Leistung des Kühlwassers (zur Kühlung des Absorbers und des Kondensators)
- $Q_{HC}$  in kW Leistung des Solarkollektors



**Bild 55:** Wärmeverhältnis (Verhältnis der Kälteleistung zur Heizleistung) der Laborabsorptionskältemaschine als Funktion der Betriebszeit, entsprechend der Betriebstemperaturen im Bild 53.



**Bild 56:** Wirkungsgrad des Verbindungssystems zwischen dem Wärmespeicher und dem Austreiber der Laborabsorptionskälteanlage, entsprechend der Betriebstemperaturen im Bild 53 (Versuchsreihe vom 14.03.2004)



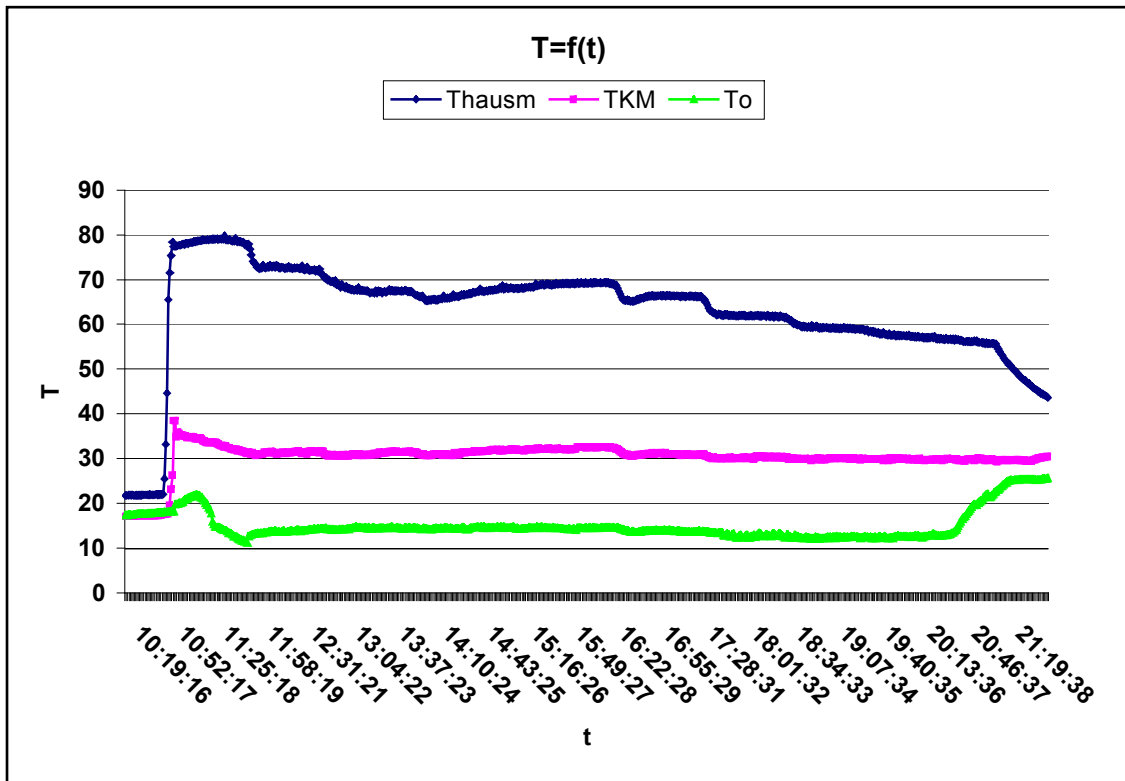
**Bild 57:** Zeitlicher Verlauf der Prozessdurchflussmengen der Laborabsorptionskältemaschine als Funktion der Betriebszeit (Betriebsdatum: 14. 03. 04):

- DF1 in m³/h Durchflussmenge des Heizwassers zum Austreiber
- DF2 in m³/h Durchflussmenge des Kaltwassers zum Verdampfer
- DF3 in m³/h Durchflussmenge des Kühlwassers zum Absorber und Kondensator
- DF4 in m³/h Durchflussmenge der reichen Lösung (vom Absorber zum Austreiber)
- DF5 in m³/h Durchflussmenge der armen Lösung (vom Austreiber zum Absorber)

Die Messergebnisse einer anderen Messreihe zeigen die Bilder 58 bis 62. Die Absorptionskältemaschine am gegebenen Versuchstag wurde nur mit Solarenergie betrieben. Es war ein sonniger Tag und der Wärmespeicher war vom vorigen Tag voll beladen. Da keine elektrische

Nachheizung des Speicherwassers stattgefunden hat, sieht man deutlich, dass die Heizwassertemperatur im Speicher ab 17:00 Uhr relativ schnell gesunken ist und dem entsprechend auch die Heizleistung des Austreibers.

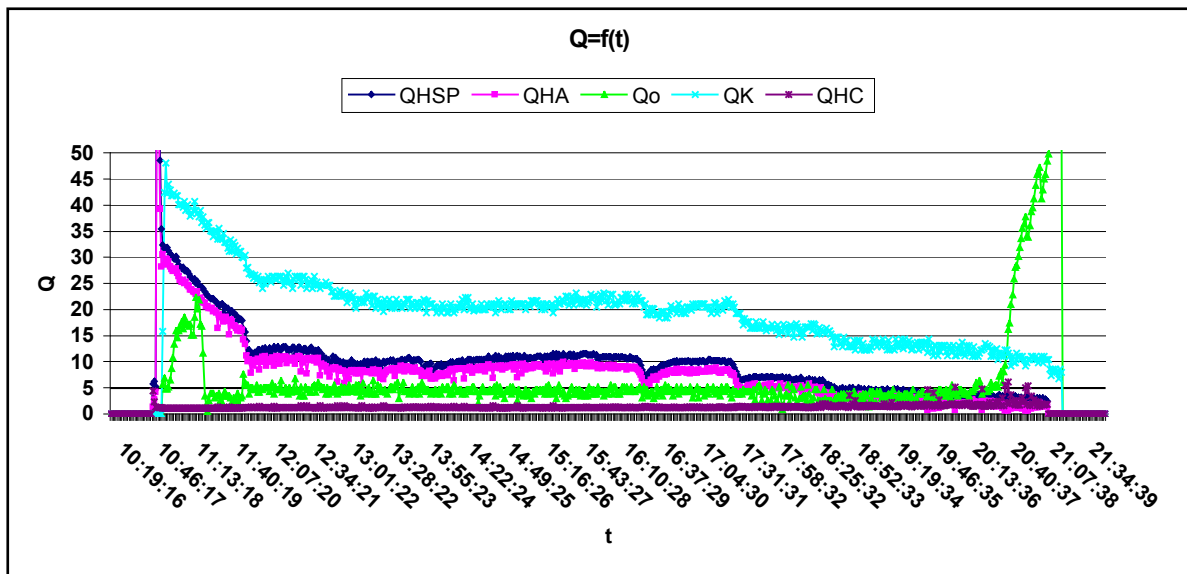
Im Gegensatz dazu änderte sich die Kaltwassertemperatur (im Verdampfer) erst ca. 2 Stunden später (Trägheit des solaren Kälteerzeugungsprozesses). Diese Eigenschaft ist sehr nützlich bei solchen Kälteerzeugungssystemen, sodass die kleinen Schwankungen in der Solareinstrahlung den Kälteerzeugungsprozess nicht negativ beeinflussen.



**Bild 58:** Zeitlicher Verlauf der mittleren Temperaturen im Austreiber, im Kondensator und im Verdampfer in Abhängigkeit von der Betriebszeit (Betriebsdatum: 22.04.04)

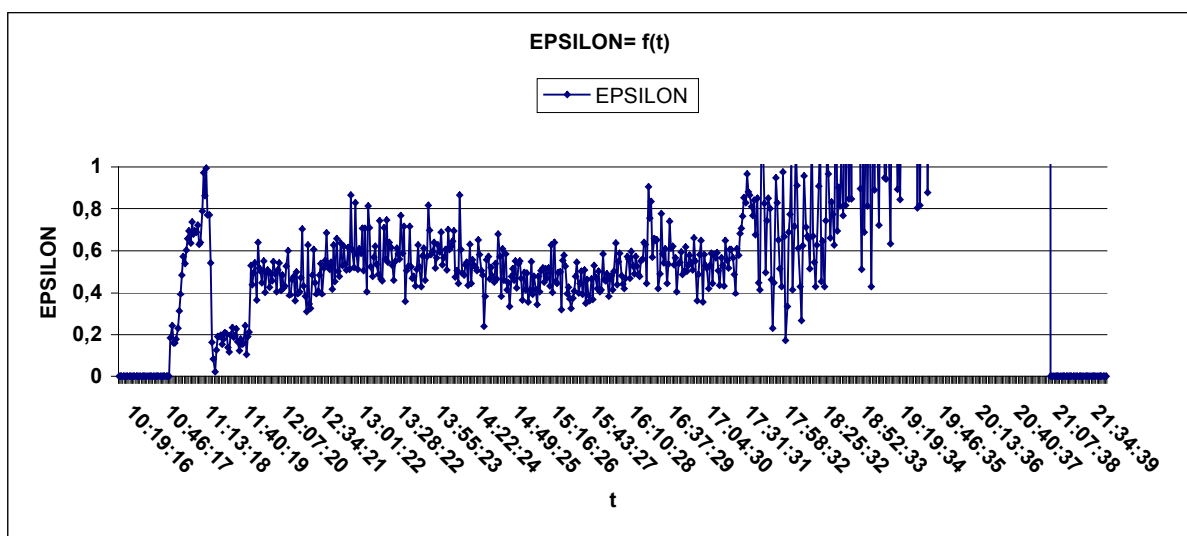
- $T_{\text{hausm}}$  in °C      mittlere Temperatur des Austreibers
- $T_{\text{KM}}$  in °C      mittlere Temperatur des Kühlwassers
- $T_0$  in °C      mittlere Temperatur des erzeugten Kaltwassers





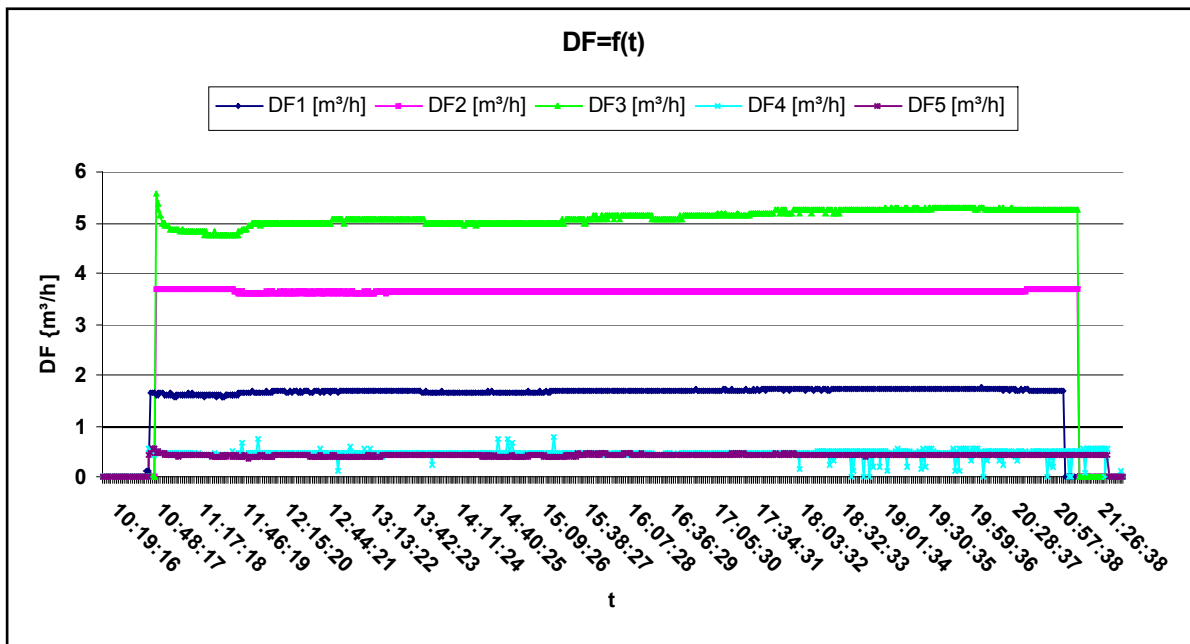
**Bild 59:** Leistungen der Laborabsorptionskältemaschine als Funktion der Betriebszeit, entsprechend der Betriebstemperaturen im Bild 58 (Betriebsdatum: 22. 04. 04).

- $Q_{HSP}$  in kW Leistung des Wärmespeichers (zugeführte Heizleistung vom Speicher zum Austreiber)
- $Q_{HA}$  in kW Leistung des Austreibers (zugeführte Heizleistung)
- $Q_0$  in kW Leistung des Verdampfers (erzeugte Kälteleistung)
- $Q_K$  in kW Leistung des Kühlwassers (zur Kühlung des Absorbers und des Kondensators)
- $Q_{HC}$  in kW Leistung des Solarkollektors



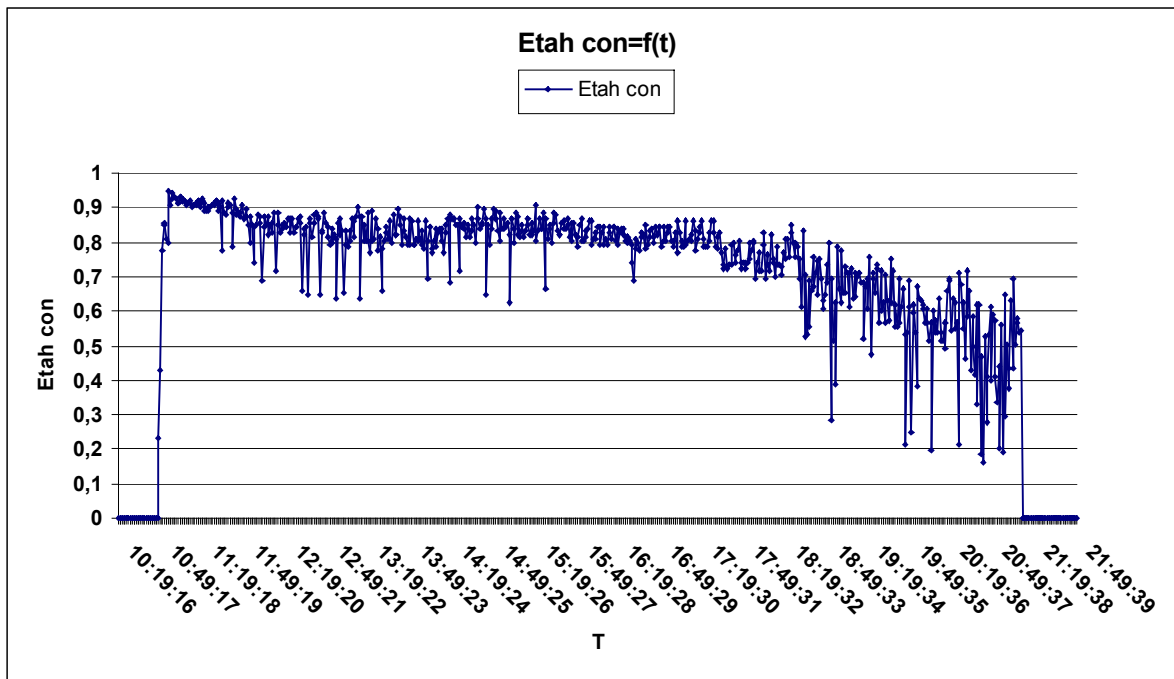
**Bild 60:** Wärmeverhältnis (Verhältnis der Kälteleistung zur Heizleistung) der Laborabsorptionskältemaschine als Funktion der Betriebszeit, entsprechend der Betriebsleistungen im Bild 58.





**Bild 61:** Zeitlicher Verlauf der Prozessdurchflussmengen der Laborabsorptionskältemaschine als Funktion der Betriebszeit (Betriebsdatum: 22. 04. 04):

- DF1 in m³/h Durchflussmenge des Heizwassers zum Austreiber
- DF2 in m³/h Durchflussmenge des Kaltwassers zum Verdampfer
- DF3 in m³/h Durchflussmenge des Kühlwassers zum Absorber und Kondensator
- DF4 in m³/h Durchflussmenge der reichen Lösung (vom Absorber zum Austreiber)
- DF5 in m³/h Durchflussmenge der armen Lösung (vom Austreiber zum Absorber)



**Bild 62:** Wirkungsgrad des Verbindungssystems zwischen dem Wärmespeicher und dem Austreiber der Laborabsorptionskälteanlage, entsprechend der Betriebstemperaturen im Bild 58 (Versuchsreihe vom 22.04.2004)

### **3.4.2.2 Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse der Laboranlage mit dem konventionellen Arbeitsstoffpaar H<sub>2</sub>O/LiBr**

Die Untersuchungen haben Auskunft darüber gegeben, wie sich das Betriebsverhalten und die entsprechende Charakteristik im Voll- und Teillastbetrieb verhalten. Es wurde gezeigt, dass die Anlage auch unter Teillastbedingungen arbeitsfähig ist. Hierbei ist festzustellen, dass das Wärmeverhältnis der Anlage bei durchgeführten Versuchsreihen zwischen 0,5 bis 0,7 in Abhängigkeit der Heiztemperaturen des Generators variierte. Somit ist es möglich, die Absorptionskältemaschine unter Nutzung solarthermischer Energie zu betreiben.

Weiterhin wurde festgestellt, dass eine zusätzliche Isolierung des Austreibers der Anlage eine Verbesserung des Verbindungswirkungsgrades zwischen dem Wärmespeicher und dem Austreiber und eine effektivere Nützung der im Wärmespeicher gespeicherten Energie mit sich bringt.

Der Wirkungsgrad der Energieverbindung zwischen dem Wärmespeicher und dem Austreiber mit Isolierung des Austreibers beträgt 0,9 bis 0,95.

### **3.4.3 Untersuchungsergebnisse der Laboranlage mit dem neuen Arbeitsstoffpaar Aceton/ZnBr<sub>2</sub>**

#### **3.4.3.1 Untersuchungen der Eigenschaften des neuen Arbeitsstoffpaares Aceton/ZnBr<sub>2</sub>**

Um eine Absorptionskältemaschine mit einem neuen Arbeitsstoffpaar betreiben zu können, mussten für dessen Auswahl die thermodynamischen Eigenschaften des jeweiligen Arbeitsstoffes und deren Mischungen untersucht werden. Diese Eigenschaften sind die Dichte, spezifische Viskosität, Wärmekapazität, die Dampfdrücke sowie die chemische Stabilität der Stoffe bzw. der Lösungen. Diese Eigenschaften üben einen starken Einfluss auf die Effizienz der Kälteanlage sowie der zu nutzenden Betriebsparameter, hier vorrangig der Höhe der benötigten Heiztemperaturen. Für die bekannten und vielfach angewandten Arbeitsstoffsysteme Ammoniak/Wasser und Wasser/Lithiumbromid führen diese spezifischen Eigenschaften zu relativ hohen Betriebstemperaturen, die als Antriebsenergie zur Verfügung stehen müssen.

Aus dieser Tatsache heraus ergibt sich der Bedarf nach Alternativen zu den herkömmlichen Arbeitsstoffpaaren, um diese Anlagen mit solarthermischer Energie betreiben zu können.

Es wurden eine Vielzahl von Untersuchungen durchgeführt, welche sich hauptsächlich auf die Arbeitsstoffpaare Aceton/Zinkbromid sowie Isopropanol/Zinkbromid konzentrierten. Alle physikalischen und thermodynamischen Versuche wurden für verschiedene Salzkonzentrationen im Kältemittel durchgeführt /41, 42, 43/. In folgenden Abschnitten werden die wichtigsten thermodynamischen und physikalischen Eigenschaften des neuen Arbeitsstoffpaares und des neuen (noch in der Untersuchungsphase) Kältemittels kurz dargestellt.

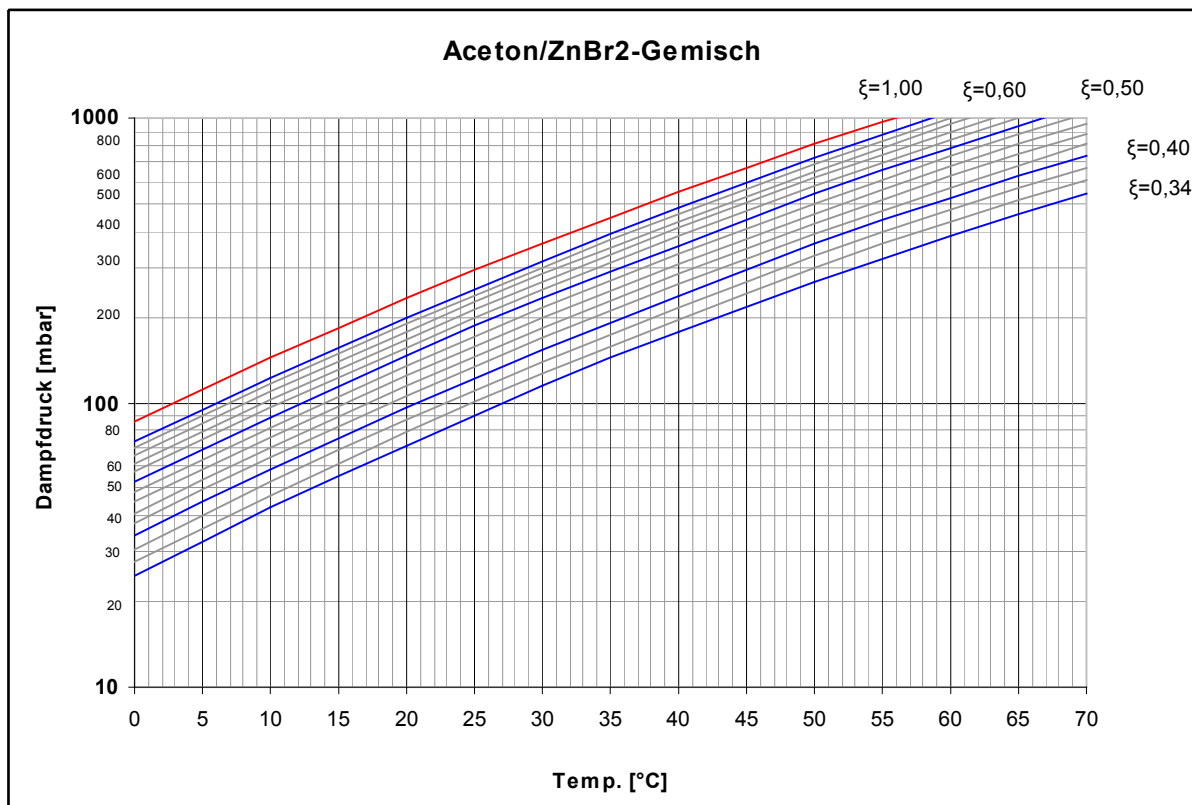
#### **3.4.3.1.1 log p, 1/T- Diagramm des neuen Arbeitsstoffpaares Aceton/ZnBr<sub>2</sub>**

Als Ergebnis der Untersuchung konnte die Darstellung der Dampfdruckcharakteristik der Lösung in Abhängigkeit der Temperatur in einem log p, 1/T – Diagramm erfolgen. In diesem Diagramm kann der Prozess der Absorptionskälteanlage dargestellt werden. Er gibt Aufschluss über die zwingend benötigte Temperatur des Heizmediums (Austreibertemperatur) sowie der Temperatur der Kühlung (Wärmeabführung in Absorber und Kondensator) des Systems.

Im Folgenden ist das ermittelte  $\log p, 1/T$ -Diagramm für den Anlagenbetrieb mit Aceton/ Zinkbromid dargestellt. Um das Diagramm darstellen zu können, müsste man zuerst die Dampfdruckcharakteristik der Lösung bei verschiedenen Konzentrationen und Temperaturen ermitteln.

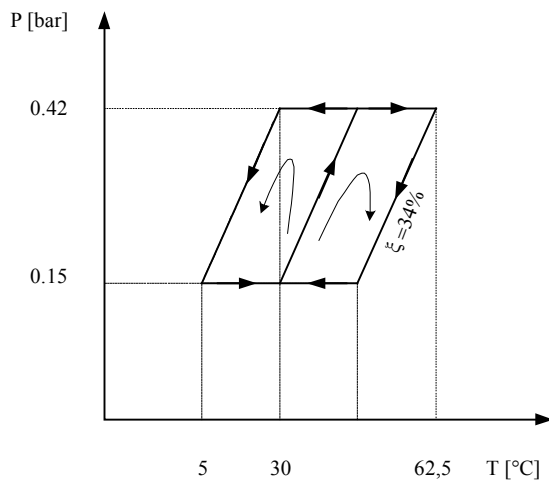
Danach wurde die Dampfdruckcharakteristik des reinen Acetons bei verschiedenen Temperaturen ermittelt. Dabei wurden die experimentellen und analytischen Methoden eingesetzt. Das Bild 63 zeigt das ermittelte  $\log p, 1/T$ -Diagramm des Arbeitsstoffpaares Aceton/ $ZnBr_2$ . Dieses Diagramm wurde später zur Berechnung des Kälteerzeugungsprozesses mit diesem Arbeitsstoffpaar und zum Vergleich der gemessenen mit den simulierten Dateien eingesetzt.

Die Bilder 64 und 65 illustrieren die  $\log p, 1/T$ -Diagramme für die Arbeitsstoffpaare Aceton/ $ZnBr_2$  und  $H_2O/LiBr$  für ein Rechenbeispiel mit bestimmten Betriebsbedingungen zum Vergleich des Arbeitsstoffpaares Aceton/ $ZnBr_2$  mit den konventionellen Arbeitsstoffpaaren  $H_2O/LiBr$  und  $NH_3/H_2O$ .

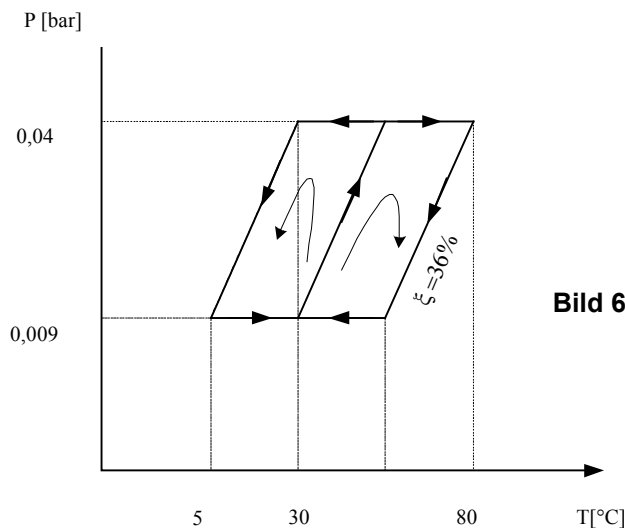


**Bild 63:**  $\log p, 1/T$ - Diagramm des Arbeitsstoffpaares Aceton/ $ZnBr_2$

Das Beispiel bezieht sich auf eine Kälteleistung von  $\dot{Q}_0 = 15 \text{ kW}$  bei  $T_0 = +5 \text{ °C}$  und  $T_k = 30 \text{ °C}$ . In diesem Zustand beträgt die Temperatur des Austreibers  $62 \text{ °C}$  bei dem Arbeitsstoffpaar Aceton/ $ZnBr_2$ . Im Vergleich dazu benötigen Anlagen auf Basis von Wasser /Lithiumbromid ungefähr  $80 \text{ °C}$  (Bild 65) sowie für Ammoniak/Wasser ca.  $85 \text{ °C}$ .



**Bild 64:** log p, 1/T-Diagramm des Arbeitsstoffpaares Aceton/ZnBr<sub>2</sub> für die gegebenen Betriebsbedingungen



**Bild 65:** log p, 1/T-Diagramm des Arbeitsstoffpaares Wasser/ Lithiumbromid für die gegebenen Betriebsbedingungen

Es ist zu erkennen, dass eine Absorptionskälteanlage unter Betrieb mit dem neuen Arbeitsstoffpaar in einem relativ höheren Druckbereich zu betreiben ist als die herkömmlichen Anlagen mit Wasser/Lithiumbromid. Letzt genannte sind bekanntermaßen im Bereich von 0,009 mbar bis 0,04 mbar zu betreiben. Für das neue Arbeitsstoffpaar Aceton-Zinkbromid ist lediglich ein Druckbereich von 135 mbar bis 420 mbar zu erreichen. Diese Tatsache liegt begründet in der niedrigeren Verdampfungstemperatur des Acetons gegenüber dem Wasser. Vorteilhaft ist dies hinsichtlich der Betriebseigenschaften der Kälteanlage sowie hinsichtlich der Störanfälligkeit und der Materialbelastungen.

### 3.4.3.1.2 Physikalische Eigenschaften des Kältemittels Aceton

Da die Kenntnis der physikalischen Eigenschaften (Arbeitsdrücke, Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität und Verdampfungswärme) des Kältemittels in Abhängigkeit der Betriebstemperaturen im Kondensator und Verdampfer von großer Bedeutung für den Kälteerzeugungsprozess und für die Berechnung der Wärmeübertragungsflächen ist, musste man diese Eigenschaften für das Aceton ermitteln. Diese Eigenschaften wurden im Rahmen einer Studienarbeit analytisch ermittelt und in Diagrammen dargestellt [44]. Einige Auszüge der Ergebnisse sind in den Tabellen 5, 6, 7, 8, 9, 10 im Anhang dargestellt.

### **3.4.3.2 Untersuchungsergebnisse der Laboranlage mit dem neuen Arbeitsstoffpaar Aceton/ZnBr<sub>2</sub>**

In Fortführung des Projektes wurden die Untersuchungen mit dem neuen Arbeitsstoffpaar durchgeführt. Hierbei kam der Anlagenaufbau entsprechend der unter Punkt 3 beschriebenen Absorptionskälteanlage in Kombination mit der Solaranlage zum Einsatz.

Hierdurch ist ein Vergleich der speziellen Charakteristika der Anlage für das herkömmliche Arbeitsstoffpaar Wasser/Lithiumbromid und dem neuen Arbeitsstoffpaar Aceton/Zinkbromid möglich.

Die technischen Daten sowie der als Laboranlage konzipierte Anlagenaufbau wurden beibehalten. Für den Versuchsbetrieb wurden die relevanten Betriebsparameter und Strömungsgeschwindigkeiten der strömenden Medien variiert:

- Heizwassertemperaturen 65/60/55/50 °C
- Kühlwassertemperaturen (für Absorber und Kondensator) 25/30/35/ °C
- Strömungsgeschwindigkeiten in Innen- und Außenkreisläufen

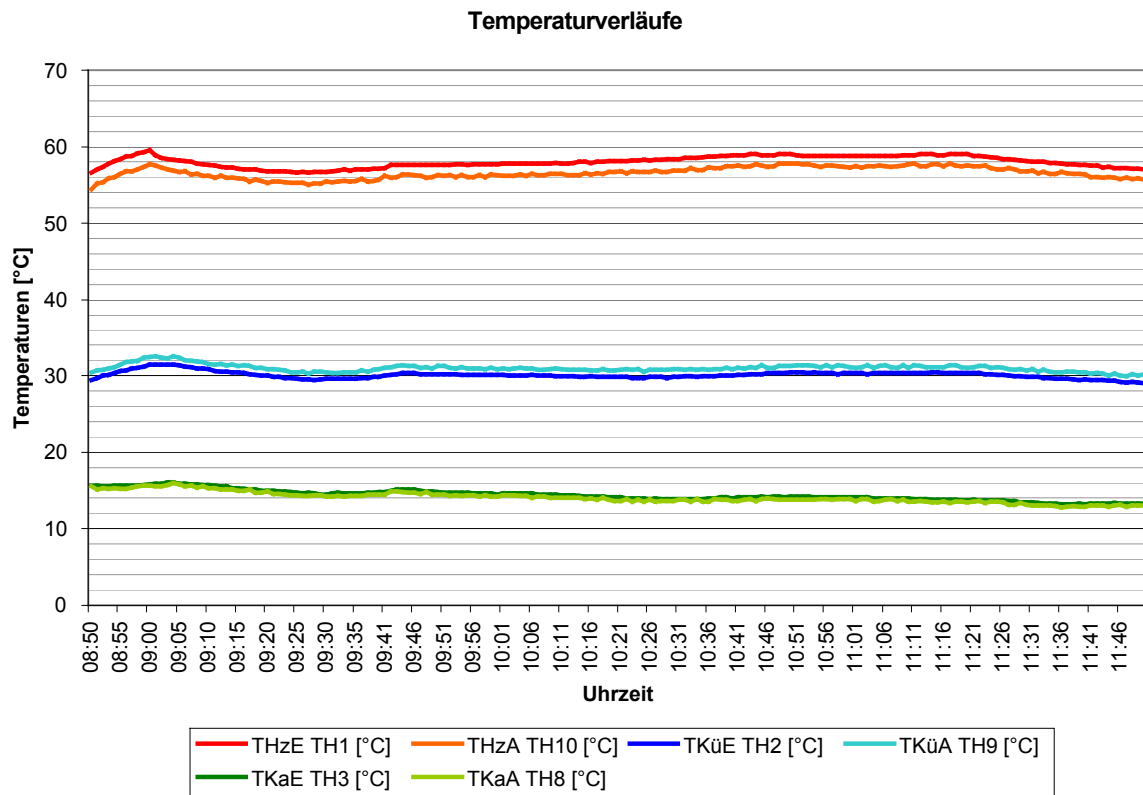
Die sich dabei ergebenden Leistungen, Verdampfungstemperaturen und Wärmeverhältnisse wurden erfasst bzw. berechnet.

Bei jeder Versuchsreihe wurden die gleichen Daten wie im Abschnitt 3.4.2 in Abhängigkeit von der Zeit und Betriebstemperaturen ermittelt (Leistungen, Temperaturen, Strömungsgeschwindigkeiten und Leistungszahlen).

Die Betriebsdaten der Anlage wurden unter bestimmten Lastbedingungen (Teillast- und Volllastbetrieb) aufgenommen. Die variierten Daten sind die Austreibertemperatur  $T_H$ , die Kühlwassertemperatur  $T_K$ , die Kaltwassertemperatur  $T_0$  und die Durchflussströme des Systems. Bei jedem Betriebszustand wurden die Leistungen und Kennzahlen des Systems ermittelt.

#### **3.4.3.2.1 Untersuchungsergebnisse der Laboranlage mit dem neuen Arbeitsstoffpaar Aceton/ZnBr<sub>2</sub> im Teillastbetrieb**

Die optimalen Ergebnisse der Versuchsreihen im Teillastbereich wurden bei Betriebstemperaturen von  $T_H = 60$  °C sowie  $T_K = 30$  °C erreicht. Ausgewählte Messreihen sind wie folgt in den Bildern 66 - 69 dargestellt.



**Bild 66:** Temperaturverlauf für Betriebsparameter:

Betriebsweise:

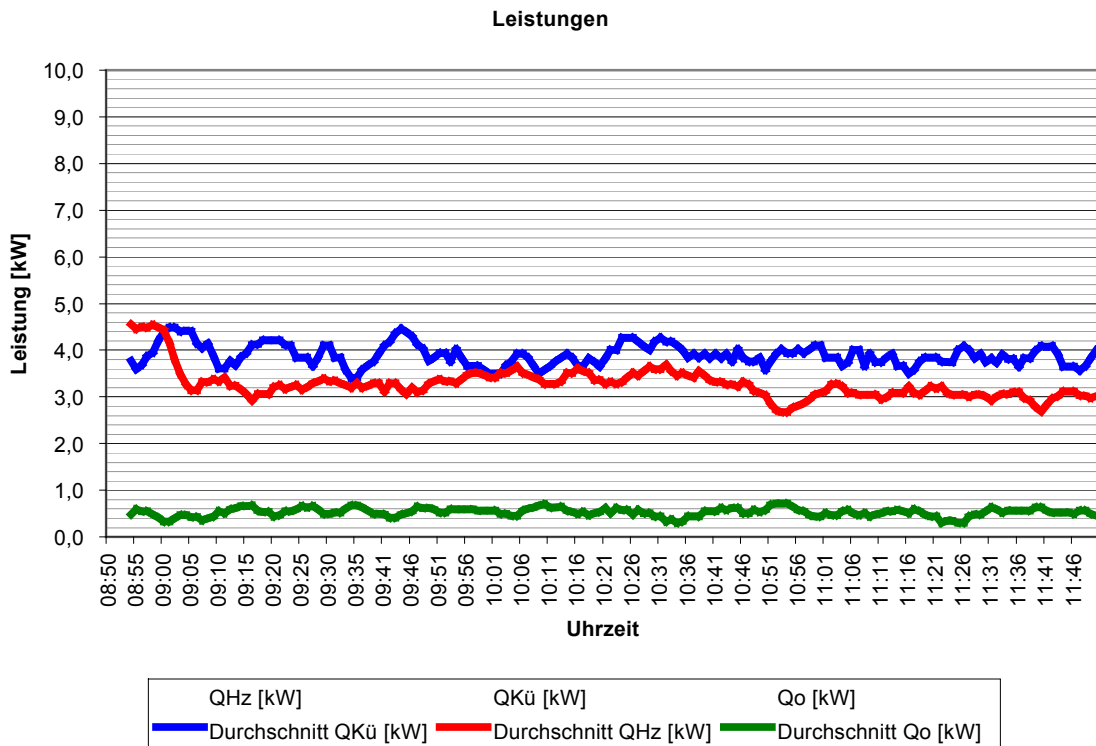
Heiztemperatur Austreiber:

Kühltemperatur Absorber/Kondensator:

Teillast

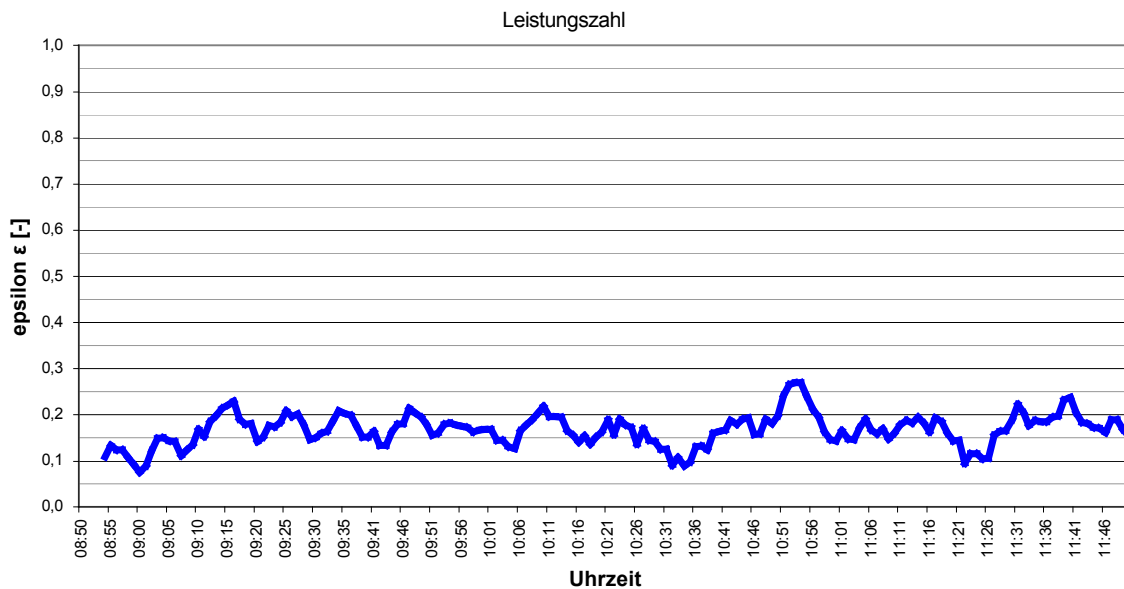
$T_H = 60 \text{ °C}$

$T_K = 30 \text{ °C}$



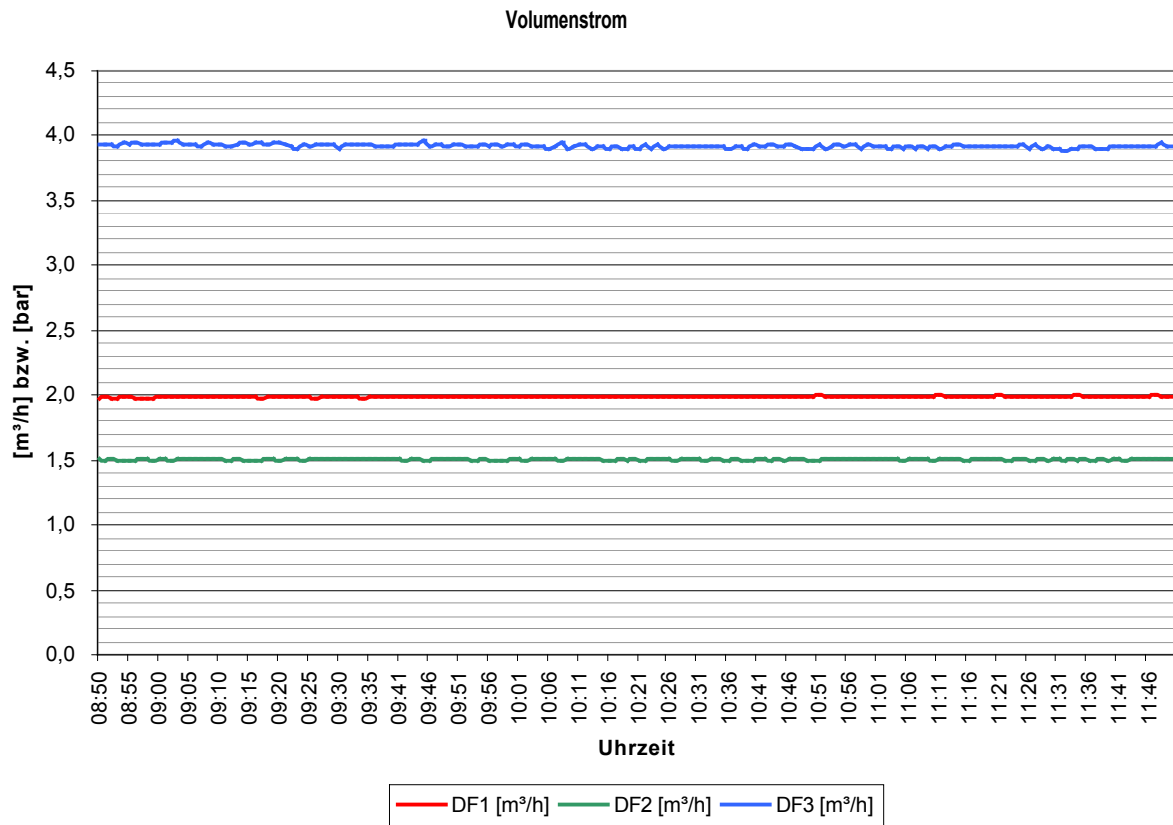
**Bild 67:** Leistungsverlauf für Betriebsparameter:

Betriebsweise:	Teillast
Heiztemperatur Austreiber :	$T_H = 60 \text{ }^\circ\text{C}$
Kühltemperatur Absorber/Kondensator:	$T_K = 30 \text{ }^\circ\text{C}$



**Bild 68:** Verlauf der Leistungszahl für Betriebsparameter:

Betriebsweise: Teillast  
Heiztemperatur Austreiber:  $T_H = 60\text{ °C}$   
Kühltemperatur Absorber/Kondensator:  $T_K = 30\text{ °C}$



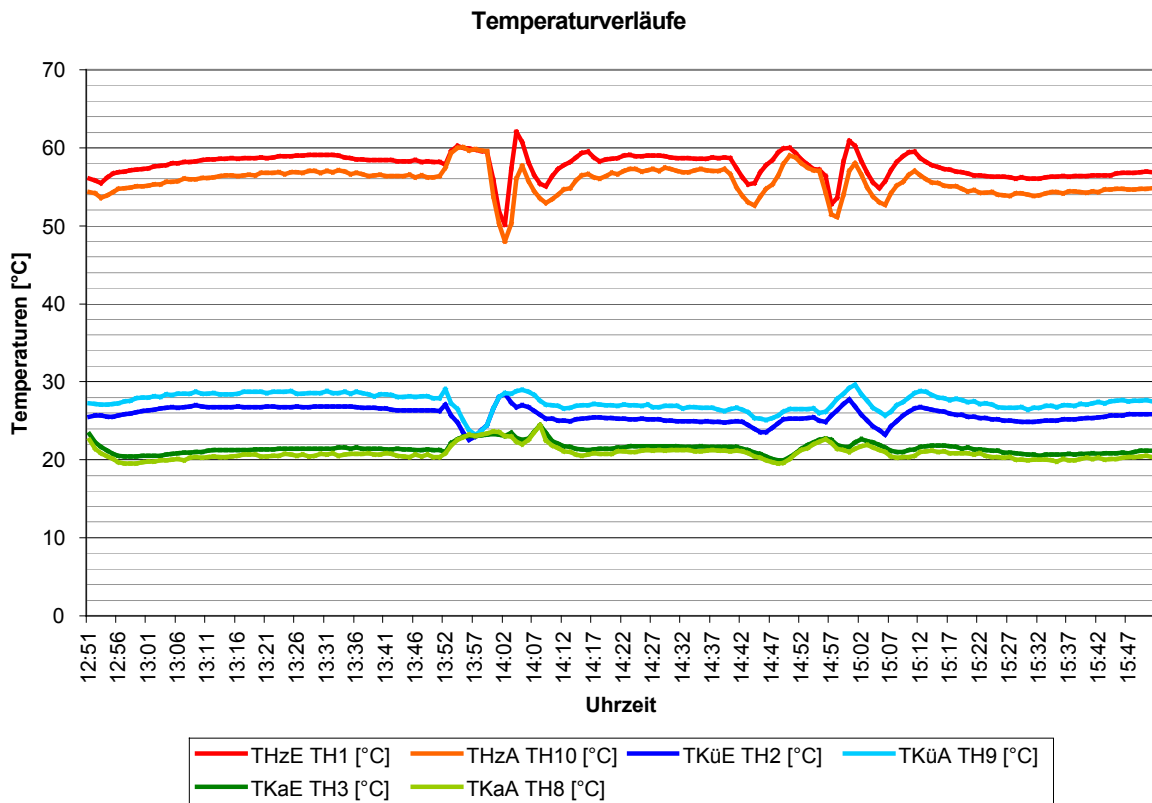
**Bild 69:** Volumenstromverläufe für Betriebsparameter:

Betriebsweise: Teillast  
Heiztemperatur Austreiber:  $T_H = 60\text{ °C}$   
Kühltemperatur Absorber/Kondensator:  $T_K = 30\text{ °C}$



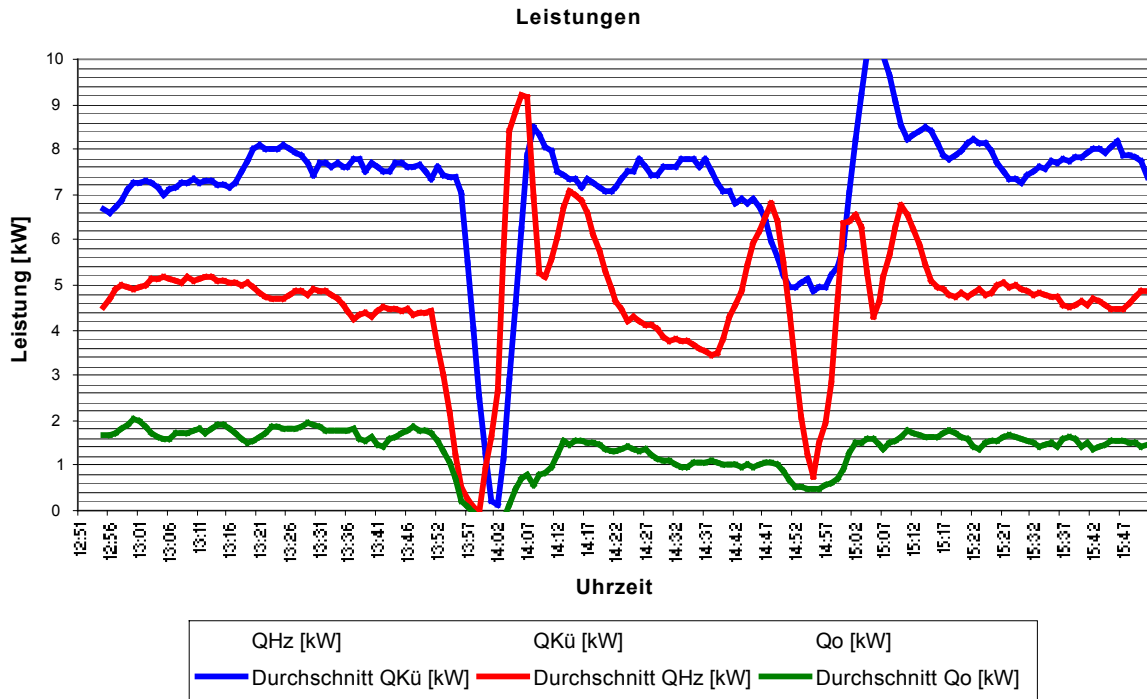
### 3.4.3.2.2 Untersuchungsergebnisse der Laboranlage mit dem neuen Arbeitsstoffpaar Aceton/ZnBr<sub>2</sub> im Volllastbetrieb

Die optimalen Ergebnisse der Versuchsreihen im Volllastbetrieb (simulierte Volllast) wurden bei Betriebstemperaturen von  $T_H = 60\text{ °C}$  sowie  $T_K = 25\text{ °C}$  erreicht. Ausgewählte Messreihen sind wie folgt in den Bildern 70 - 73 dargestellt:



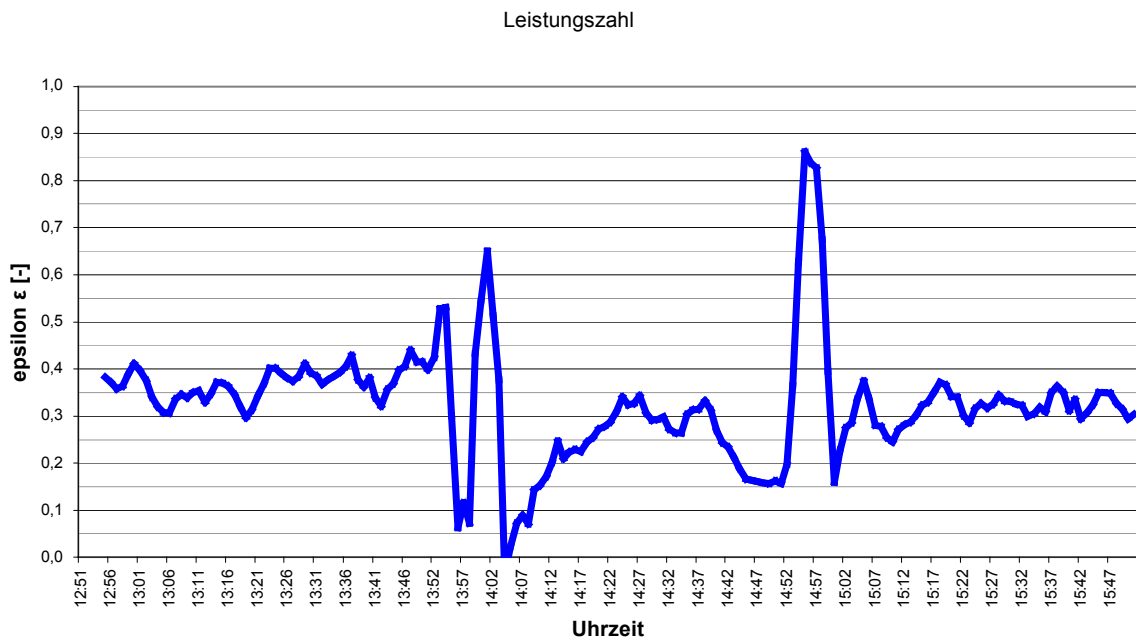
**Bild 70:** Temperaturverlauf für Betriebsparameter:

Betriebsweise:	Volllast
Heiztemperatur Austreiber:	$T_H = 60\text{ °C}$
Kühltemperatur Absorber/Kondensator:	$T_K = 25\text{ °C}$



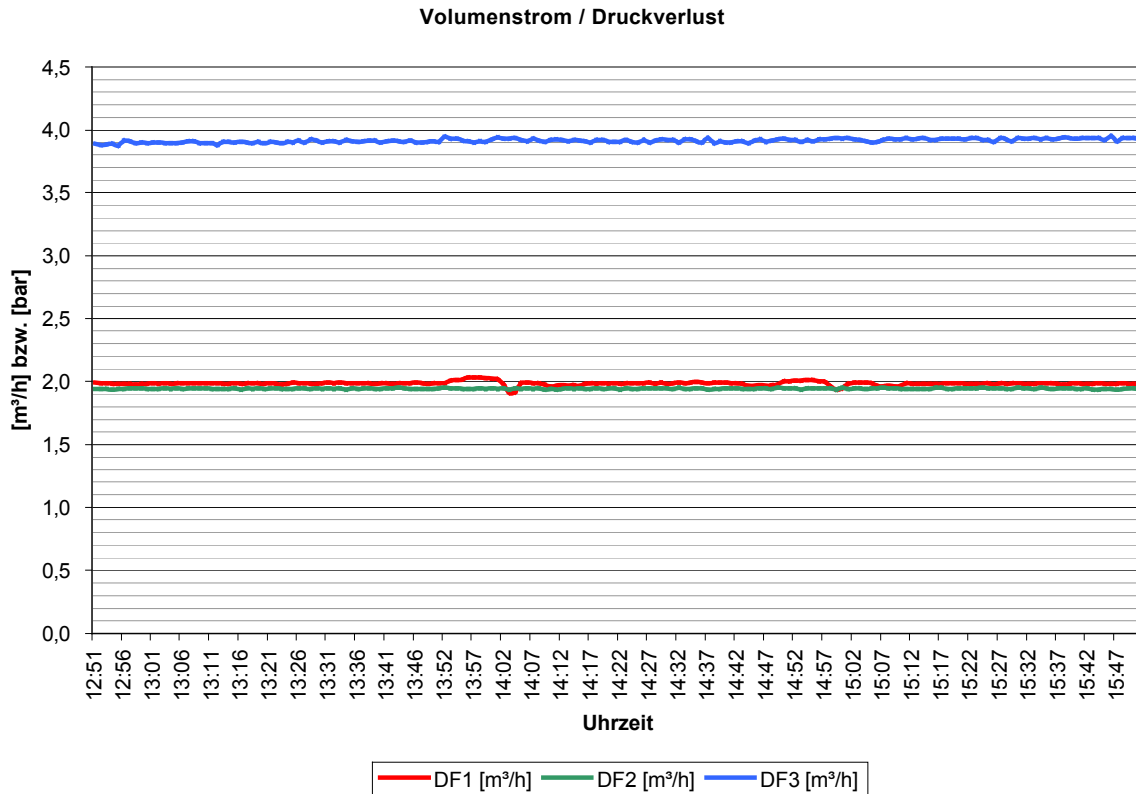
**Bild 71:**Leistungsverlauf für Betriebsparameter:

Betriebsweise:	Volllast
Heiztemperatur Austreiber:	$T_H = 60 \text{ }^\circ\text{C}$
Kühltemperatur Absorber/Kondensator:	$T_K = 25 \text{ }^\circ\text{C}$



**Bild 72:** Leistungsverlauf für Betriebsparameter:

Betriebsweise: Volllast  
 Heiztemperatur Austreiber:  $T_H = 60\text{ °C}$   
 Kühltemperatur Absorber/Kondensator:  $T_K = 25\text{ °C}$



**Bild 73:** Volumenstromverläufe für Betriebsparameter:

Betriebsweise: Volllast  
 Heiztemperatur Austreiber:  $T_H = 60\text{ °C}$   
 Kühltemperatur Absorber/Kondensator:  $T_K = 25\text{ °C}$

**3.4.3.3 Zusammenfassung der Ergebnisse**

Aus den durchgeführten Versuchsreihen bestätigt sich das Ergebnis der Berechnungen der Betriebsbedingungen der Absorptionskälteanlage beim Betrieb mit dem neuen Arbeitsstoffpaar Aceton/Zinkbromid.

Es zeigte sich, dass sich die Anlage mit Heiztemperaturen von 60 °C betreiben lässt. Somit ist die Grundvoraussetzung zur Erfüllung des Zwecks des vorliegenden Forschungsthemas gegeben. Die erreichten COP-Werte lagen im Teillastbetrieb bei 0,2 sowie bis 0,4 im Volllastbetrieb der Anlage. Hier ergab sich Spielraum für die vorgesehene Weiterentwicklung und Optimierung der Technik im Rahmen des Aufbaus der Prototypanlage auf der Grundlage oben aufgezeigter Erfahrungen. Dies gilt ebenfalls für die Leistungsfähigkeit des Verdampfers bzw. des Absorbers im Sinnen der notwendig zu erreichenden Druckabsenkung im System. Die Notwendigkeit der weiteren Optimierung dieses Sachverhaltes liegt in den noch unzureichenden Kaltwassertemperaturen von ca. 14 °C im Teillastbetrieb sowie ca. 20 °C im Volllastbetrieb. Leider konnten die gewünschten Kälteleistungen nicht erreicht werden. An dieser Stelle muss man weitere intensive Untersuchungen durchführen.

#### **4 Konstruktive Erkenntnisse und Probleme im Betrieb der Laboranlage**

Zum Betrieb der Absorptionskälteanlage wurde eine Anlage beschafft, und als Laboranlage modifiziert, die für den Betrieb mit dem Arbeitsstoffpaar Wasser/Lithiumbromid ausgeführt war.

Aufgrund der durchgeführten und oben beschriebenen Materialuntersuchungen mit dem neuen Arbeitsstoffpaar konnten einige negative Wechselwirkungen zwischen den Stoffen und den eingesetzten Materialien (Schaugläser aus Plexiglas, Dichtstoffe) festgestellt werden, die später beim Aufbau des Funktionsmusters in Betracht genommen werden müssen. Diese Untersuchungsergebnisse bestätigten sich auch im praktischen Betrieb.

Als problematisch stellten sich die Klebstellen der Liquiphanten in den Schaugläsern dar. Nach einiger Betriebszeit kam es im Klebstoff zu Zersetzungserscheinungen aufgrund des unter dauerhaften Unterdruck einwirkenden Acetons. Aus dieser Erkenntnis sind an der Prototypanlage die Niveauschalter sicher im Mantelbereich zu installieren.

Die Pumpe der reichen Lösung, die im Lösungsbereich die meiste Arbeit (Hub) verrichten muss, droht nach einiger Betriebszeit heiß zu laufen. Die Pumpen sollten daher hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit großzügig ausgelegt werden. Dies gilt für die Auslegung hinsichtlich der NPSH-Werte sowie der erreichbaren Förderhöhe. Diese sollte etwa das 1,5-fache des Normal-Arbeitspunktes betragen. Die Installation der Pumpen sollte so erfolgen, dass sie mit möglichst hohem statischen Vordruck arbeiten, damit die praktisch minimalen NPSH-Werte der Pumpen mit 0,5 noch erreicht werden, um Kavitation in den Pumpen zu vermeiden. So werden drohende Überhitzungen und vorzeitiger Verschleiß der Pumpen vermieden.

Für den Betrieb der Anlage ist das Drosselventil unbedingt mit Bedacht und exakt einzustellen. Es besitzt die fundamentale Aufgabe, den Druckunterschied zwischen beiden Kammern zu halten. Es muss fest eingedrosselt werden.

Konstruktiv ist auf die Möglichkeit einer sicheren Entleerung sämtlicher Rohrleitungen zu achten. Bei Verbleib von Restmengen in der Anlage besteht die Gefahr der Eintrocknung und folglich einer Querschnittsverengung, insbesondere bei den Umwälzpumpen. Weiterhin erschwert der Verbleib von Flüssigkeitsresten in den Leitungen die Evakuierung, da es zu Nachverdampfungen kommt und sich Salzurückstände bilden.

Die beim Betrieb der Laboranlage gefassten Erkenntnisse wurden an den Industriepartner weitergegeben und müssen bei der Errichtung der Prototypanlage beachtet werden.

## 5 Auslegung der Versuchsabsorptionskälteanlage für den Industriepartner

### 5.1 Theoretische Grundlagen

Bei der Durchführung der wärmetechnischen Berechnung der AKM werden zuerst die erforderlichen theoretischen Grundlagen kurz dargestellt.

Die Berechnung wird so vorgenommen, dass die in jedem Apparat umgesetzte Wärmemenge bestimmt wird. Aus den angegebenen und berechneten Wärmeströmen können dann die erforderlichen Wärmeaustauschflächen ermittelt werden.

Es sind zusätzlich zu den Wärmediagrammen folgende Zustandswerte erforderlich:

- a) Die Lösungswärme (l) in Abhängigkeit von der Zusammensetzung und Temperatur
- b) Die spezifische Wärme der Absorptionslösung in Abhängigkeit von Zusammensetzung und Temperatur im Berechnungsbereich. Bei Bekanntgabe der spezifischen Wärme der Lösung und des Kältemittels kann man die spezifische Wärme der Mischung nach Mischungsregeln bestimmen.
- c) Das spezifische Gewicht der Absorptionslösung in Abhängigkeit von Zusammensetzung und Temperatur
- d) Die spezifische Wärme und das spezifische Gewicht des Lösungsmitteldampfes
- e) Die Viskosität und die Wärmeleitfähigkeit der Absorptionslösung und des Kältemittels

Die o.g. Zustandswerte werden bei der Berechnung aus Tabellen und Diagrammen entnommen.

Nachfolgend werden die theoretischen Grundlagen zur Wärmeberechnung der einzelnen Apparate der AKM dargestellt /45,46/.

#### a) Der Verflüssiger:

Die abzuführende Verflüssigungswärme bei dem Verflüssiger beträgt:

$$q_k = C_{pd}(t_H - t_k) + r + C_{fl}(t_k - t_u) \quad (25)$$

Dabei sind:

- $C_{pd}$  spezifische Wärmekapazität des Kältemitteldampfes
- $C_{fl}$  spezifische Wärmekapazität der Kältemittelflüssigkeit
- $t_H$  Austreibungstemperatur
- $t_k$  Verflüssigungstemperatur
- $t_u$  Umgebungstemperatur (entspricht der Unterkühlungstemperatur)
- $r$  Verflüssigungswärme des Kältemittels
- $r_0$  Verdampfungswärme des Kältemittels

Der Ausdruck  $C_{pd}(t_H - t_k)$  entspricht der Überhitzungswärme und der Ausdruck  $C_{fl}(t_k - t_u)$  entspricht der Unterkühlungswärme.

### b) Der Verdampfer

Unter der Annahme, dass kein Flüssigkeitsnachkühler vorhanden ist, ergibt sich die spezifische Kälteenergie zu:

$$q_0 = r_0 - C_{fl}(t_u - t_0) \quad (26)$$

### c) Der Absorber

Im Absorber verläuft der Prozess wie folgt:

Zuerst muss das dampfförmig eintretende Kältemittel bei dem Druck  $p_0 = p_A$  verflüssigt werden. Dabei kühlt es sich von der Überhitzungstemperatur auf die dem Verdampfungsdruck entsprechende Verdampfungstemperatur  $t_0 = t_s$  (Sättigungstemperatur) ab. Danach erwärmt sich das flüssige Kältemittel auf die mittlere Lösungstemperatur  $t_{Am}$  und schließlich findet die Auflösung des verflüssigten Kältemittels in der Lösung statt. Dabei tritt die Lösungswärme I auf.

Bei der Berechnung der im Absorber abzuführenden Wärme werden die mittleren Werte für die Lösungswärme, die spezifische Wärme und die Lösungsmengen zugrunde gelegt.

Die mittlere Konzentration im Absorber beträgt:

$$\xi_m = \frac{\xi_r + \xi_a}{2} \quad (27)$$

Die gesamte im Absorber abzuführende Wärmemenge setzt sich aus mehreren Teilbeträgen zusammen.

1. Die im Absorber mit der Temperatur  $t_{Ae}$  eintretende arme Lösung soll auf die Anfangstemperatur  $t_{Aa}$  des Absorptionsvorganges erwärmt werden (sofern  $t_{Ae} < t_{Aa}$ ). Diese Wärme beträgt (- Vorzeichen, weil man diese Wärme an die arme Lösung zuführen muss):

$$q_{A1} = -(f-1)C_a(t_{Aa}-t_{Ae}) \quad (28)$$

2. Danach wird die Lösung während des Absorptionsvorganges von  $t_{Aa}$  bis auf die Absorptionstempertur  $t_{Ae}$  abgekühlt. Die mittlere zu kühlende Lösungsmenge ist

$$f_m = (f+f-1)/2 = f-1/2. \quad (29)$$

Die Abkühlungswärme beträgt:

$$q_{A2} = f_m * C_m(t_{Aa} - t_{Ae}) = \frac{2\xi_d - \xi_a - \xi_r}{2(\xi_r - \xi_a)} * C_m(t_{Aa} - t_{Ae}) \quad (30)$$

3. Lösungs- und Kühlungswärme des Kältemitteldampfes:

$$q_{A3} = r_0 + I - C_{fl}(t_{Am}-t_0) \quad (31)$$

4. Unterkühlung der Lösung von der Temperatur  $t_{Ae}$  auf die Temperatur  $t_{Aa}$ . Die abzuführende Wärme beträgt:

$$q_{A4} = f * C_r(t_{Ae}-t_{Aa}) \quad (32)$$

Schließlich beträgt die gesamt abzuführende Wärme des Absorbers:

$$q_A = q_{A1} + q_{A2} + q_{A3} + q_{A4} \quad (33)$$

$$q_A = -(f-1)C_a(t_{AA} - t_{Ae}) + \frac{2\xi_d - \xi_a - \xi_r}{2(\xi_r - \xi_a)} * C_m(t_{AA} - t_{AE}) + r_0 + l - C_{fl}(t_{Am} - t_0) + f * C_r(t_{AE} - t_{Aa}) \quad (34)$$

Dabei sind:

$t_{AE}$  Endtemperatur der Lösung am Ende des Absorptionsvorganges

$t_{AA}$  Anfangstemperatur des Absorptionsvorganges

$t_{Ae}$  Eintrittstemperatur der armen Lösung in den Absorber

$t_{Aa}$  Austrittstemperatur der reichen Lösung vom Absorber

#### d) Der Lösungswärmetauscher

Unter Anwendung eines Flüssigkeitswärmetauschers kühlt sich die arme Lösung von der Temperatur  $t_{HE}$  bis zur Temperatur  $t_{Ae}$  ab und die reiche Lösung erwärmt sich von der Temperatur  $t_{Aa}$  bis zur Temperatur  $t_{He}$ . Beim Abkühlungsvorgang erwärmt sich die reiche Lösung um den Wärmebetrag:

$$q_{Wt} = f * C_r(t_{He} - t_{Ae}) = (f-1) * C_a(t_{HE} - t_{Ae}) \quad (35)$$

Aus Gl. 35 kann man die unbekannte Lösungseintrittstemperatur in den Austreiber  $t_{He}$  bestimmen:

$$t_{He} = \frac{(f-1) * C_a(t_{HE} - t_{Ae}) + f * C_r * t_{AE}}{f * C_r} = t_{AE} + \frac{C_a}{C_r} * \frac{(f-1) * (t_{HE} - t_{Ae})}{f} \quad (36)$$

Bei vollkommenen Wärmeaustausch im Absorber ( $t_{Ae} = t_{AE}$ ) und der Annahme  $C_r \approx C_a \Rightarrow$

$$t_{He} = t_{AE} + \frac{(f-1) * (t_{HE} - t_{AE})}{f} \quad (37)$$

Im praktischen Betrieb beträgt der Temperaturunterschied zwischen der in den Absorber eintretenden armen Lösung  $t_{Ae}$  und der aus dem Absorber austretenden reichen Lösung  $t_{Aa}$  ca. 5 bis 8 °C, d. h.:

$$t_{Ae} = t_{Aa} + (5 \text{ bis } 8) \text{ °C} \quad (38)$$

Diesen Richtwert muss man bei der Auslegung berücksichtigen.

#### e) Der Austreiber:

Bei der Berechnung des Austreibers werden die erforderlichen Heizleistungen und -flächen bestimmt.

Die notwendige Austreibungswärme setzt sich aus folgenden Teilen zusammen:

a) Die zuzuführende Wärme für die Erhöhung der Temperatur der reichen Lösung von  $t_{He}$  bis  $t_{HA}$ . Diese Wärme beträgt:

$$q_{H1} = f * C_r(t_{HA} - t_{He}) \quad (39)$$

Dabei sind:

f Menge der reichen Lösung

$C_r$  spezifische Wärmekapazität der reichen Lösung

b) Die mittlere Lösungsmenge  $f_m = (f+1)/2$  muss von der Temperatur  $t_{HA}$  auf die Temperatur  $t_{HE}$  erwärmt werden:

$$q_{H2} = f_m \cdot C_m (t_{HE} - t_{HA}) \quad (40)$$

c) Die Wärme zur Ausdampfung des Kältemittels aus der siedenden Lösung:

$$q_{H3} = (C_{pd} - C_{fl}) \cdot (t_{Hm} - t_k) + r + l \quad (41)$$

Dabei sind:

$t_{Hm}$  die mittlere Lösungstemperatur im Austreiber bei dem Kondensationsdruck  $p_k$

$t_k$  Verflüssigungstemperatur bei dem Kondensationsdruck  $p_k$

l Lösungswärme (die Wärme, die notwendig ist, um den Kältemitteldampf von dem Absorptionsmitteldampf zu trennen)

r Verflüssigungswärme des Kältemittels

Es wird angenommen, dass der ausgetriebene Dampf den Austreiber mit der Temperatur  $t_{Hm}$  verlässt.

Schließlich ergibt sich der Gesamtbetrag der dem Austreiber zuzuführenden Heizwärme zu:

$$q_H = q_{H1} + q_{H2} + q_{H3} = f \cdot C_r (t_{HA} - t_{HE}) + f_m \cdot C_m (t_{HE} - t_{HA}) + (C_{pd} - C_{fl}) \cdot (t_{Hm} - t_k) + r + l \quad (42)$$

### f) Die Lösungspumpe

Die Lösungspumpe fördert die reiche Lösung vom Absorberdruck  $p_0 = p_A$  auf den Austreiberdruck  $p_H = p_k$ .

Die spezifische Pumpenarbeit beträgt:

$$w = (p_k - p_0) \cdot V = (p_k - p_0) \cdot \frac{f}{\rho} \quad (43)$$

$\rho$  Dichte der reichen Lösung

Der Betrag von  $w$  ist meistens vernachlässigbar gegenüber den anderen Wärmemengen.

### g) Wärmebilanz

Die Wärmebilanz der Absorptionskälteanlage (AKA) ergibt sich aus den Summen der gesamten Wärmemengen:

$$q_H + q_0 + w = q_k + q_A \quad (44)$$



## h) Wärmeverhältnis

Das Wärmeverhältnis der AKA gibt einen Überblick über die erforderliche Heizleistung bei einer bestimmten Kälteleistung:

$$\varepsilon_0 = \frac{q_0}{q_H} = \frac{r_0 - C_{fl}(t_u - t_0)}{f * C_r(t_{HA} - t_{He}) + f_m * C_m(t_{HE} - t_{HA}) + (C_{pd} - C_{fl})(t_{Hm} - t_k) + r + l} \quad (45)$$

Nachfolgend werden die Komponenten der Absorptionskälteanlage im Einzelnen nach den erforderlichen Betriebsbedingungen ausgelegt. Es werden zuerst die Hauptkomponenten (Verdampfer, Kondensator, Absorber, Austreiber und Lösungswärmetauscher) im Betracht gezogen. Eine ausführliche Beschreibung zur Auslegung der Komponenten einer Absorptionskälteanlage für bestimmte Betriebsbedingungen befindet sich in /47, 48/.

Die Anlage wird für das Arbeitsstoffpaar H<sub>2</sub>O/LiBr ausgelegt, aber sie wird mit den beiden Arbeitsstoffpaaren H<sub>2</sub>O/LiBr und Aceton/ZnBr<sub>2</sub> untersucht. Bei der Berechnung wird von der Verdampferleistung  $\dot{Q}_0$ , von der Verdampfertemperatur  $t_0$ , von der Kondensationstemperatur  $t_k$  und von der Austreibungstemperatur  $t_H$  ausgegangen.

## 5.2 Berechnungsablauf

Die o. g. theoretischen Grundlagen werden bei der Auslegung ganz- oder teilweise zu Grunde gelegt. Es werden zwei Schwerpunkte verfolgt:

- a) Bestimmung der erforderlichen Wärmeaustauschflächen
- b) Nachprüfung der Rechenergebnisse durch Vergleich mit den möglichen Konstruktionsdaten

### 5.2.1 Auslegung des Verdampfers

Die Ausgangsdaten sind:

- Verdampferleistung  $\dot{Q}_0 = 15 \text{ kW}$
- Verdampfungstemperatur  $t_0 = 1 \text{ °C}$  (bei  $\Delta T_{\min} = 7 \text{ K}$ ; Kaltwassertemperatur =  $8 \text{ °C}$ )
- Das Wasser als Kälte Träger mit  $t_{1,W} = 13 \text{ °C}$  (Wassereintrittstemperatur)  
 $t_{2,W} = 8 \text{ °C}$  (Wasseraustrittstemperatur)

Zuerst wird die erforderliche Wärmeaustauschfläche nach der Gl. 46 berechnet:

$$\dot{Q}_0 = A * k * \Delta T_m \Rightarrow A = \frac{\dot{Q}_0}{k * \Delta T_m} \quad (46)$$

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_{\text{groß}} - \Delta T_{\text{klein}}}{\ln \frac{\Delta T_{\text{groß}}}{\Delta T_{\text{klei}}}} \quad (47)$$

Zur Bestimmung der Wärmedurchgangszahl  $k$  werden folgende Gln. eingesetzt:

$$k = \frac{1}{\frac{A_a}{A_i} \left( \frac{1}{\alpha_1} + R_i \right) + \frac{\delta}{\lambda} * \frac{A_a}{A_m} + \frac{1}{\alpha_2} + R_a} \quad (48)$$

$$\alpha_1 = \frac{Nu * \lambda_w}{d_i} \quad (49)$$

$$Nu = 0,037 * (Re^{0,75} - 180) * Pr^{0,42} \left[ 1 + \left( \frac{d_i}{L} \right)^{0,667} \right] \quad (50)$$

$$Re = \frac{g_w * d_i}{\nu} \quad (51)$$

$$Pr = \frac{\nu * \rho * C}{\lambda_w} = \frac{\eta * C}{\lambda_w}$$

■ Berechnung von  $\alpha_2$  (Kältemittelseite):

Der Wärmedurchgangskoeffizient auf der Kältemittelseite lässt sich nach der Gl. 52 bestimmen /46/:

$$\alpha_2 = C * \dot{q}^n * p^m * R^l \quad (52)$$

Dabei sind:

C Ein Wert, welcher vom Kältemittel abhängig ist

$\dot{q}$  in W/m<sup>2</sup> Wärmestromdichte (Austauschflächenbelastung)

p in bar Verdampfungsdruck

R in  $\mu\text{m}$  Rauigkeit des Rohres

n, m, l Konstante, welche folgende Werte haben: n= 0,7, m= 0,13, l= 0,133

In den Parametern C und n sind die Einflussgrößen berücksichtigt.

Nach Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten lässt sich die erforderliche Wärmeaustauschfläche nach der Gl. 53 berechnen:

$$\dot{Q}_0 = A_{ges} * \dot{q}_0 = A * k * \Delta T_m \Rightarrow A_{ges} = \frac{\dot{Q}_0}{\dot{q}_0} \quad (53)$$

Danach werden bestimmte Konstruktionsdaten angenommen und nach ihrer Anwendbarkeit laut den Richtwerten geprüft. Die Rechenergebnisse werden in Tabellen zusammengefasst.

Es wird zuerst einen Rohrbündelverdampfer angenommen. Die Rohrzahl  $N_R$  bei einem Füllfaktor von 0,75 und Rohrteilung von  $d_{a,T} = 1,3d_a$  ergibt sich zu:

$$N_R = 0,75 * \frac{\pi * D_i^2}{\pi * d_{a,T}^2} = 0,75 * \left( \frac{D_i}{d_{a,T}} \right)^2$$

Röhre  $\Rightarrow$  die nutzbare Wärmeaustauschfläche bei 1 m Rohrlänge beträgt:

$$A_{nut,1m} = N_R * \pi * d_a * 1 \text{ [m}^2\text{/m]}$$

Danach lässt sich die erforderliche Rohrlänge nach der Gl. 54 berechnen:

$$L_R = \frac{A_{ges}}{A_{nut,1m}} \quad (54)$$

Nach der Bestimmung der erforderlichen Rohrlänge soll geprüft werden, ob das Verhältnis

$$\frac{L_R}{D_a} = 4 \text{ bis } 12 \text{ (als Richtwert)} \quad (55)$$

eingehalten wird.

### **Berechnung des erforderlichen Querschnittes für die angenommene Wassergeschwindigkeit:**

$$A_{erf} = \frac{\dot{V}}{g_w} \quad (56)$$

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{\dot{Q}_0}{\rho^* C p^* \Delta T_w} \quad (57)$$

Gesamt verfügbarer Querschnitt:

$$A_{ges} = N_R^* \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (58)$$

Wasserwegzahl (Anzahl der Gänge):

$$N_{pass} = \frac{A_{ges}}{A_{erf, w}} \quad (59)$$

### **5.2.2 Auslegung des Verflüssigers**

Die Aufgabe des Verflüssigers besteht darin, mit Hilfe von Kühlmittel, Wasser oder Luft, den vom Austreiber kommenden Kältemitteldampf zu verflüssigen.

Die Anwendung von Wasser zur Kühlung hat den Vorteil, dass man eine gleichmäßige und niedrige Verflüssigungstemperatur erzielen kann. Demzufolge kann man auch niedrige Verdampfungstemperaturen erreichen.

Der Nachteil der Wasserkühlung besteht in der möglichen Veränderung der Qualität des Kühlwassers.

Als Bauarten kommen die gleichen Bauformen wie bei dem Verdampfer in Frage.

Beim Aufbau des Verflüssigers muss man auf die Reinheit in den Rohren achten. Eine Untersuchung von STARNER /43/ hat ergeben, dass bei einer Veränderung des Verschmutzungsbeiwertes von  $1,2 \cdot 10^{-4}$  auf  $2,4 \cdot 10^{-4}$  ( $\text{m}^2 \cdot \text{K}$ )/W der Flächenbedarf um 38% steigt. Auch die nicht verflüssigbaren Gase haben einen negativen Einfluss auf die Wärmeübertragung. Eine Untersuchung von MIRMOV /49/ hat gezeigt, dass ein Luftanteil von 2,5 % des Verflüssigervolumens die gleiche Auswirkung wie eine Ölschichtdicke von 0,01 mm

( $R = \frac{\delta}{\lambda} = \frac{0,00001}{0,12} = 8,3 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$ ) hat. Die Auslegungsgleichungen des Verflüssigers sind

ähnlich wie des Verdampfers. Mehr Details können der Arbeit /50/ entnommen werden.

### 5.2.3 Berechnung und Gestaltung des Austreibers, des Absorbers und des Lösungswärmetauschers

#### 5.2.3.1 Bemessung des Austreibers (theoretische Grundlagen)

Der Austreiber der Absorptionskältemaschine (AKM) kann entweder mit Heißdampf oder mit Heißwasser beheizt werden. Bei dampfbeheiztem Austreiber können die Heizflächen als Rohrschlängensystem, Doppelrohrsystem oder Rohrbündelsystem ausgewählt werden.

Man kann den Austreiber als liegenden oder stehenden Austreiber ausführen. Die liegenden Austreiber eignen sich besonders für Absorptionskälteanlagen mit größeren Kälteleistungen. Die stehenden dagegen für Anlagen mit niedrigen Kälteleistungen. Diese Bauart ist platzsparend und flexibel bei der Aufstellung.

Bei Heißwasser oder anderen heißen Flüssigkeiten können liegende Austreiber als Röhrenkessel angewendet werden. Dabei strömt die heiße Flüssigkeit in den Rohren und die reiche Lösung rieselt an der Oberfläche der Rohre.

#### 5.2.3.1.1 Berechnung des Wärmeüberganges auf der Heizseite bei Strömung durch eine Rohrschlange

Der Vorteil der Beheizung des Austreibers mit strömendem Dampf in einer Rohrschlange besteht darin, dass bei dieser Strömungsart und durch die Krümmung des Rohres Zentrifugalkräfte auftreten, die eine Sekundärströmung hervorrufen. Diese Sekundärströmung erhöht den Wärmeübergangskoeffizienten.

Der Nachteil solcher Strömung besteht darin, dass sich der Druckverlust in der Rohrschlange erhöht.

Der mittlere Krümmungsdurchmesser  $D$  der Rohrwendel ergibt sich nach Wärmeatlas Gc1 /51/ zu:

$$D = D_w \left[ 1 + \left( \frac{h}{\pi * D_w} \right)^2 \right] \quad (60)$$

$$D_w = \sqrt{D_s^2 - \left( \frac{h}{\pi} \right)^2} \quad (61)$$

Dabei ist :

- $D_w$  mittlere Durchmesser der Rohrwendel
- $l$  Rohrlänge
- $n$  Windungszahl
- $h$  Höhe der Wendung (Der Abstand zwischen zwei übereinander liegenden Wendungen)
- $D_s$  Windungsdurchmesser der Rohrwendel

Für laminare Strömung in der Rohrwendel werden folgende Gleichungen eingesetzt:

$$Nu = \left\{ 3,66 + 0,08 \left[ 1 + 0,8 \left( \frac{d}{D} \right)^{0,9} \right] Re^m Pr^{\frac{1}{3}} \right\} \left( \frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0,14} \quad (62)$$

$$m = 0,5 + 0,2903 \left( \frac{d}{D} \right)^{0,194} \quad (63)$$

$$Nu = \frac{\alpha * d}{\lambda} \quad (64)$$

$$Re = \frac{w * d}{\nu} \quad (65)$$

Die Stoffwerte sind bei der mittleren Temperatur des Fluids einzusetzen:

$$t_m = \frac{t_E - t_A}{2} \quad (66)$$

Die Prandtl- Zahl  $Pr_w$  soll bei der Rohrwandtemperatur ermittelt werden.

Bei **turbulenter Strömung** ( $Re > 2,2 \cdot 10^4$ ) hat Gnielinski /51/ folgende Gleichungen eingesetzt:

$$Nu = \frac{\frac{\xi}{8} \cdot Re Pr}{1 + 12,7 \sqrt{\frac{\xi}{8}} \left( Pr^{\frac{2}{3}} - 1 \right)} \left( \frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0,14} \quad (67)$$

$$\xi = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} + 0,03 \left( \frac{d}{D} \right)^{0,5} \quad (68)$$

Im **Übergangsbereich** ( $Re_{krit} < Re < 2,2 \cdot 10^4$ ):

$$Nu = \eta Nu_{(Re_{krit})} + (1 - \eta) Nu_{(Re = 2,2 \cdot 10^4)} \quad (69)$$

$$\eta = \frac{2,2 \cdot 10^4 - Re}{2,2 \cdot 10^4 - Re_{krit}} \quad (70)$$

Dabei werden  $Nu_{(Re_{krit})}$  nach Gl. 62 und  $Nu_{(Re=2,2 \cdot 10^4)}$  nach Gl. 67 bei  $Re = 2,2 \cdot 10^4$  berechnet.

Dabei berechnet sich  $Re_{krit}$  nach der Gl. 71:

$$Re_{krit} = 2300 \left[ 1 + 8,6 \left( \frac{d}{D} \right)^{0,45} \right] \quad (71)$$

### 5.2.3.1.2 Berechnung des Wärmeüberganges auf der Seite der siedenden Lösung

Für den Wärmeübergang bei der Verdampfung der siedenden Flüssigkeit ist die Heizflächenbelastung von großer Bedeutung:

$$\dot{q}_H = \frac{\dot{Q}_H}{A} = \alpha_{sF} * \Delta T \quad (72)$$

Dabei sind:

$\alpha_{sF}$  Wärmeübergangszahl der siedenden Flüssigkeit

$\Delta T$  Der Temperaturunterschied zwischen der mittleren Temperatur der Heizfläche und der Temperatur der Flüssigkeit außerhalb der heißen Grenzschicht

Die Wärmeübergangszahl  $\alpha_{sF}$  wird nach folgenden Gleichungen berechnet /45/:

$$\alpha_{sF} = C_1 \dot{q}_H^n = C_2 (\Delta T)^m \quad (73)$$

Die konstanten  $C_1$  und  $C_2$  sind von den physikalischen Eigenschaften der verdampfenden Flüssigkeit und von der Beschaffenheit der Heizfläche abhängig. Die Exponenten  $n$ ,  $m$  werden von der geometrischen Bauart des Wärmetauschers beeinflusst.

Bei  $H_2O/LiBr$ -Anlagen und für siedendes Wasser bei  $100\text{ }^\circ\text{C}$  ist nach folgenden Gleichungen zu berechnen:

a) Für kleine Heizflächenbelastung und freie Konvektion:

$$\alpha_{sW} = 158 \dot{q}_H^{0,26} \frac{W}{m^2 K} \quad (74)$$

b) Für große Heizflächenbelastung und siedende Flüssigkeit:

$$\alpha_{sW} = 1,65 \dot{q}_H^{0,75} \frac{W}{m^2 K} \quad (75)$$

Gl. 72 ist besonders anwendbar bei Rohrschlängenaustreibern.

Für senkrechte Rohre und natürlichem Umlauf der siedenden Flüssigkeit erhält man für das siedende Wasser bei  $100\text{ }^\circ\text{C}$ :

$$\alpha_{sW} = 3,61 \dot{q}_H^{0,7} \frac{W}{m^2 K} \quad (76)$$

Gl. 74 gilt auch für senkrechte Heizbündelsysteme, bei denen die siedende Flüssigkeit in den Rohren aufsteigt und die Beheizung von außen durchgeführt wird /45/.

Der o. g. Gleichungen sind bei atmosphärischem Druck gültig. Bei anderen Drücken gilt die Gl. 77:

$$\frac{\alpha_{sFp}}{\alpha_{sFn}} = \left( \frac{p}{1} \right)^r \quad (77)$$

Dabei sind:

$\alpha_{sFp}$  Wärmeübergangszahl bei dem Druck  $p$

$\alpha_{sFn}$  Wärmeübergangszahl bei normalem Druck

Für Drücke bis  $2,72\text{ bar}$  ist  $r = 0,4$

Für Drücke über  $2,72\text{ bar}$  ist  $r = 0,3$

### 5.2.3.1.3 Berechnung der Wärmedurchgangszahl des Austreibers

Die Berechnung des Austreibers wird nach zwei Heizungsarten durchgeführt.

#### a) Beheizung durch Wasserdampf, welcher an senkrecht stehenden Rohren kondensiert:

Unter Annahme folgender Konstruktionsdaten:

- Temperatur des strömenden Dampfes  $t_D = 132 \text{ °C}$  (bei einem Dampfdruck  $p = 3 \text{ bar}$ )
- Höhe der Rohre  $H_R = 1 \text{ m}$
- Rohrdurchmesser  $d_a = 0,020 \text{ m}$ ; Dreieckteilung 25 mm
- Heizflächenbelastung  $\dot{q}_H = 20000 \frac{W}{m^2}$
- Die Temperaturdifferenz zwischen Dampf und Rohrwand  $t_D - t_W = 2 \text{ °C}$
- Die Temperaturdifferenz zwischen Heizdampf und siedender Lösung  
 $\Delta t = t_W - t_{Lm} = 7 \text{ °C}$

ergibt sich anhand des Bildes 74 (nach /45/) eine Wärmeübergangszahl

$$\alpha_1 = 11472 \text{ W/(m}^2\text{K)}.$$

Nach der Ermittlungsgleichung von Schaack ergibt sich die Wärmeübergangszahl zu:

$$\alpha_1 = 1,163 \left( \frac{5800 + 23(t_D + t_W)}{\sqrt[4]{H_R(t_D - t_W)}} \right) \quad (78)$$

$$\alpha_1 = 1,163 \left( \frac{5800 + 23(130 + 128)}{\sqrt[4]{1(130 - 128)}} \right) = 11475 \frac{W}{m^2 K}$$

Es ist ersichtlich, dass eine Übereinstimmung zwischen Diagrammwert und dem ergebenden Wert nach Gl. 78 besteht. Es wird bei der Berechnung der kleinere Wert ausgewählt.

#### b) Beheizung durch heißes Wasser, welches durch senkrecht stehende Rohre strömt:

Unter Annahme folgender Konstruktionsdaten:

- Die mittlere Wassertemperatur  $t_{fl} = 90 \text{ °C}$
- Höhe der Rohre  $H_R = 1 \text{ m}$
- Röhrendurchmesser  $d_a = 0,020 \text{ m}$ ; Dreieckteilung 25 mm
- Die Temperaturdifferenz zwischen dem Heizwasser und der siedenden Lösung  
 $\Delta t = t_W - t_{Lm} = 7 \text{ °C}$
- Heizwassergeschwindigkeit  $w_W = 0,8 \text{ m/s}$

Nach der Ermittlungsgleichung von Schack /45/ ergibt sich die Wärmeübergangszahl für Rohre mit Durchmesser von  $d_a > 0,005 \text{ m}$  bis  $d_a = 0,1 \text{ m}$  zu:

$$\alpha_1 = 3372 \omega w^{0,85} (1 + 0,014 t_{fl}) \frac{W}{m^2 K} \quad (79)$$

$$\alpha_1 = 3372 \cdot 0,8^{0,85} (1 + 0,014 \cdot 90) = 6304 \frac{W}{m^2 K}$$

### c) Beheizung durch heißes Wasser, welches durch waagerechte Rohren strömt:

Unter Annahme folgender Konstruktionsdaten:

- Die mittlere Wassertemperatur  $t_{fl} = 90 \text{ °C}$
- Höhe der Rohre  $H_R = 1 \text{ m}$
- Röhrendurchmesser  $d_a = 0,020 \text{ m}$ ; Dreieckteilung 25 mm
- Die Temperaturdifferenz zwischen dem Heizwasser und der siedenden Lösung  
 $\Delta t = t_W - t_{Lm} = 7 \text{ °C}$
- Heizwassergeschwindigkeit  $w_W = 0,8 \text{ m/s}$

Nach der Ermittlungsgleichung von Schack /45/ ergibt sich die Wärmeübergangszahl für Rohre mit Durchmesser von  $d_a > 0,005 \text{ m}$  bis  $d_a = 0,1 \text{ m}$  zu:

$$\alpha_1 = 3372 \omega w^{0,85} (1 + 0,014 t_{fl}) \frac{W}{m^2 K}$$

$$\alpha_1 = 3372 \cdot 0,8^{0,85} (1 + 0,014 \cdot 90) = 6304 \frac{W}{m^2 K}$$

Zur Ermittlung von  $\alpha_2$  werden Diagramme und Anhaltswerte aus der Literatur zugrunde gelegt. Dies wird im Kapitel 6 näher behandelt.

#### 5.2.3.2 Der Absorber und seine Bauarten

Bei der Absorption im Absorber handelt es sich um einen Stoff- und Wärmeübertragungsvorgang. Dabei geht der vom Verdampfer kommende Kältemitteldampf in die absorbierende Lösung über. Der Absorptionsvorgang erfordert eine große Berührungsfläche zwischen dem Kältemitteldampf und der Lösung. Außerdem ist dieser Vorgang mit einer Wärmeübertragung verbunden.

Es gibt verschiedene Absorber-Bauarten. Am häufigsten werden in der Praxis folgende eingesetzt:

- Doppelrohr- und Mehrbündelrohrabsorber
- Berieselungsabsorber
- Mantel- und Röhrenabsorber

Bei der letzten Bauart fließt das Kühlwasser in den Rohren und der Kältemitteldampf und die Lösung strömen in Gegenstromrichtung über die Rohre.

Bei Rieselabsorber ist die Stoffaustauschfläche gleichzeitig die Wärmeaustauschfläche. Davon gibt es zwei Bauarten:

- a) Liegende Rieselabsorber: Diese Bauart eignet sich für Kälteanlagen mit sehr großen Kälteleistungen.
- b) Stehende Rieselabsorber: Diese Bauart kann für kleine- und mittlere Kälteleistungen eingesetzt werden. Der Vorteil solcher Ausführung besteht in der niedrigen erforderlichen



Grundfläche und der starken Berieselung. Der Nachteil besteht in der Notwendigkeit, dass man sauberes Wasser anwenden muss (wegen Schwierigkeit der Säuberung der langen stehenden Rohre).

### 5.2.3.2.1 Bestimmung des Wärmeübergangs auf der Kühlwasserseite

Die Kühlwassergeschwindigkeit in den kältetechnischen Apparaten beträgt 0,5 bis 1,3 m/s. Bei höherer Geschwindigkeit erhöht sich die Wärmeübertragung, aber auch der Druckverlust. Die Austrittstemperatur des Kühlwassers soll im allgemein 50 °C nicht überschreiten, sonst bilden sich kesselsteinartige Niederschläge an den Rohrwänden, welche einen schlechten Wärmeübergang verursachen.

In diesen Apparaten fließt das Wasser durch die Rohre mit turbulenter Strömung. Für eine solche Strömungsweise ergibt sich die Nußelt-Zahl zu:

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda} = 0,024 Re^{0,8} Pr^n \quad (80)$$

Dabei hat die Konstante n folgende Werte:

n= 0,37 für Wärmeübergang von der Wand an die Flüssigkeit

n= 0,30 für Wärmeübergang von der Flüssigkeit an die Wand des Rohres

Bei dem Kühlwasser geht die Wärme von der Wand an das Kühlwasser über, demzufolge ergibt sich der Wärmeübergang zu (n= 0,37):

$$\alpha_w = 0,024 \frac{\lambda}{d} Re^{0,8} Pr^{0,37} \quad (81)$$

### 5.2.3.2.2 Bestimmung des Wärmeübergangs auf der Kühlwasserseite bei Berieselungsapparaten

Für den Wärmeübergang des rieselnden Kühlwassers über horizontale Rohre kann man das Bild 75 nach ADAMS /45/ verwenden.

Bei einem Berieselungsabsorber mit Außendurchmesser von  $d_a = 38$  mm rechnet man mit einer Berieselungsstärke von  $G = 900$  bis  $1400$  kg/(m·h) und bei  $d_a = 57$  mm rechnet man mit einer Berieselungsstärke von  $G = 1800$  bis  $2500$  kg/(m·h).

Zur Bestimmung der Wärmeübergangszahl am senkrecht berieselten Rohr hat SEXAUER folgende Gleichung für Kühlwasser mit mittleren Stoffwerten zwischen 0 und 40 °C eingesetzt:

Für Eisenrohr:

$$\alpha_w = 2300 G^{0,5} H^{-0,065} (1 + 0,01442 \cdot \vartheta) \quad (82)$$

Für Messingrohr:

$$\alpha_w = 3160 G^{0,5} H^{-0,065} (1 + 0,01442 \cdot \vartheta) \quad (83)$$

Dabei sind:

H Höhe des Rohres

ϑ Bezugstemperatur für die Stoffwerte des Wassers. Diese entspricht dem arithmetischen Mittelwert aus der mittleren Temperatur des Wassers und der mittleren Temperatur der Rohrwand.

Durch Bild 76 kann man den Wärmeübergangskoeffizienten für Kühlwasser bei Berieselung über senkrechte Rohre nach /45/ bestimmen.

### 5.2.3.2.3 Bestimmung des Wärmeübergangs auf der Seite der absorbierenden Lösung bei Berieselungsabsorbieren

Die Wärmeübergangszahl der an senkrechten Rohren oder Wandflächen herabrieselnden absorbierenden Lösung kann nach Gleichung von SEXAUER, solange die Stoffeigenschaften bekannt sind, berechnet werden /45/:

$$Nu = K Re^{0,5} Pr^{0,15} \left( \frac{H}{H_0} \right)^{0,935} \quad (84)$$

Dabei sind:

- H            Höhe der berieselnden Rohre  
 H<sub>0</sub> = 1m    Bezugshöhe  
 K            Rauigkeitsfaktor und hat folgende Werte:  
               K= 137        für Eisenrohre  
               K= 189        für Messingrohre  
 G            Berieselungsstärke

Die Reynoldsche-Kennzahl ist in diesem Fall nach der Gleichung (85) zu berechnen:

$$Re = \frac{G}{0,0353\eta(10^6)} \quad (85)$$

Durch Umformulierung ergibt sich dann die Wärmeübergangszahl zu:

$$\alpha_L = \frac{\lambda}{H} K G^{0,5} \left[ \frac{1}{0,353(\eta 10^6)} \right]^{0,5} Pr^{0,15} \left( \frac{H}{H_0} \right)^{0,935} \quad (86)$$

Die praktischen Anhaltswerte der Wärmedurchgangszahlen für verschieden Absorber-Bauarten sind in der Tabelle 11 nach Plank /45/ dargestellt.

**Tabelle 11:** Praktische Zahlenwerte der Wärmedurchgangszahlen für Absorber-Bauarten nach Plank /45/

Absorber-Bauart	Kühlwasser-geschwindigkeit $t$ [m/s]	Lösungsriesel-menge [g/s]	Wärmedurch-gangszahl [W/m <sup>2</sup> K]	Flächen-belastung [W/m <sup>2</sup> ]
Doppelrohr-absorber	0,5		232 bis 255	3256
	1,0		348 bis 395	4652
	1,5		488 bis 500	5233
Röhrenkessel-absorber	0,65		315	2870
Turmabsorber	$\dot{m}_w = 4000 \frac{kg}{mh}$	84	550	7000 bis 8700
		139	640	
		278	725	
Röhrenkessel-Rieselabsorber	0,7	14	348	
		28	440	
		139	686	
		278	800	

Als Beispiel, bei einer mittleren logarithmischen Temperaturdifferenz von  $\Delta T_m = 5^\circ C$  und der Annahme eines Röhrenkessel-Rieselabsorbers mit einem Wärmedurchgangskoeffizienten von  $k=686 \text{ W/m}^2\text{K}$  ergibt sich die erforderliche Absorberwärmeaustauschfläche bei einer Absorberleistung von  $\dot{Q}_a = 26 \text{ kW}$  zu:

$$A_a = \frac{\dot{Q}_a}{k \Delta T_m} = \frac{26000}{686 \cdot 5} = 7,58 \text{ m}^2$$

Unter Annahme eines stehenden Röhrenkessel-Rieselabsorbers mit Röhrendurchmesser von  $d_a = 0,020 \text{ m}$  und Röhrenhöhe von  $H_R = 1,2 \text{ m}$  ergibt sich die erforderliche Röhrenlänge- und zahl zu:

$$L_{aerf} = \frac{A_a}{\pi \cdot d_a} = \frac{7,58}{\pi \cdot 0,02} = 121 \text{ m} \Rightarrow$$

$$N_R = \frac{L_{aerf}}{H_R} = \frac{121}{1,2} = 100 \text{ Rohre}$$

Der Manteldurchmesser ergibt sich dann nach Wärmetlas zu:

$$D_i = 350 \text{ mm}$$

### 5.3 Berechnung des Prozesses für das Arbeitsstoffpaar H<sub>2</sub>O/LiBr:

Die Berechnung wird anhand der in vorigen Abschnitten durchgeführten theoretischen Grundlagen und mit Hilfe der h,  $\xi$ -Diagramme von H<sub>2</sub>O/LiBr ausgeführt. Es werden drei Betriebsbedingungen berücksichtigt:

1)

- Austreibungsendtemperatur  $t_{HE} = 65 \text{ °C}$
- Verdampfungsendtemperatur  $t_{0E} = +1 \text{ °C} \Rightarrow p_0 = 6,62 \text{ mbar}$
- Absorbierend- und Verflüssigertemperatur  $t_k = t_{AE} = 20 \text{ °C} \Rightarrow p_k = 23,4 \text{ mbar}$
- Kälteleistung  $\dot{Q}_0 = 15 \text{ kW}$

Aus h,  $\xi$ -Diagramm von H<sub>2</sub>O/LiBr (Bild 77) und Dampftafel von H<sub>2</sub>O ermittelt man folgende Daten:

a) die Konzentrationen und den spezifischen Lösungsumlauf:

$$\xi_r = 0,515 \Rightarrow \rho = 1485 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{Bild 25 nach /52/})$$

$$\xi_a = 0,41$$

$$\xi_d = 1$$

$$f = \frac{\xi_d - \xi_a}{\xi_r - \xi_a} = \frac{1 - 0,41}{0,515 - 0,41} = 5,62 \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$$

b) die Enthalpiewerte (vom h,  $\xi$ -Diagramm):

$$h'_{HE} = 162 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (\text{bei } t_{HE} = 65 \text{ °C})$$

$$h'_{He} = 86 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (\text{bei } t_{He} = 42 \text{ °C})$$

$$h'_{AE} = 38 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (\text{bei } t_{AE} = 20 \text{ °C})$$

$$h'_{Ae} = 71 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (\text{bei } t_{Ae} = 20 \text{ °C})$$

c) die spezifischen Energien:

$$q_k = h'_1 - h'_2 = 2586 - 86 = 2500 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (\text{Verflüssigungswärme})$$

$$q_A = h_7 - h'_A = 2512 - (-226) = 2738 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (\text{Absorptionswärme})$$

$$q_0 = h_7 - h'_2 = 2512 - 86 = 2426 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (\text{Verdampfungswärme})$$

$$q_H = h'_1 - h'_A = 2586 - (-226) = 2812 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (\text{Austreibungswärme})$$

$$w = (p_k - p_0) \cdot V \cdot \frac{1}{\eta_{PL}} = (p_k - p_0) \cdot \frac{f}{\rho} \cdot \frac{1}{\eta_{PL}}$$

$$w = 1,7 \cdot \frac{5,62}{1485} \cdot \frac{1}{0,5} = 0,013 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (\text{spezifische Antriebsenergie der Lösungspumpe})$$

$$q_{Wt} = f(h'_{He} - h'_{AE}) = 5,62(86 - 38) = 269,76 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (\text{Lösungswärmetauscherwärme})$$

$$\eta_{wt} = \frac{T_{HE} - T_{AA}}{T_{HE} - T_{AE}} = \frac{65 - 30}{65 - 20} = \frac{35}{45} = 0,77$$

d) Kontrolle der Wärmebilanz des Prozesses:

$$q_H + q_{0N} = q_K + q_A \Rightarrow$$

$$5238 = 5238 \Rightarrow \Delta q = 0 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{ und } \Delta q\% = 0\%$$

e) Bestimmung der Prozessleistungen bei der entsprechenden Kälteleistung:

In der Tabelle 12 sind die Prozessleistungen und -größen dargestellt. Die dafür notwendigen Bestimmungsgleichungen sind:

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_0}{q_0} \quad (87)$$

$$\dot{Q}_k = \dot{m} \cdot q_k \quad (88)$$

$$\dot{Q}_A = \dot{m} \cdot q_A \quad (89)$$

$$\dot{Q}_H = \dot{m} \cdot q_H \quad (90)$$

$$\dot{Q}_{Wt} = \dot{m} \cdot q_{Wt} \quad (91)$$

$$\dot{f} = \dot{m} \cdot f \quad (92)$$

$$W = (p_k - p_0) \cdot \dot{V} = (p_k - p_0) \cdot \frac{\dot{f}}{\rho} \cdot \frac{1}{\eta_{PL}} \quad (93)$$

$$\eta_{wt} = \frac{h_{HE} - h_{AA}}{h_{HE} - h_{AE}} = \frac{T_{HE} - T_{AA}}{T_{HE} - T_{AE}} \quad (94)$$

$$\varepsilon_0 = \frac{\dot{Q}_0}{\dot{Q}_H} \quad (95)$$

2)

- Austreibungsendtemperatur  $t_{HE} = 80 \text{ °C}$
- Verdampfungsendtemperatur  $t_{0E} = +1 \text{ °C} \Rightarrow p_0 = 6,62 \text{ mbar}$
- Absorbierend- und Verflüssigertemperatur  $t_k = t_{AE} = 30 \text{ °C} \Rightarrow p_k = 42,5 \text{ mbar}$
- Kälteleistung  $\dot{Q}_0 = 15 \text{ kW}$

Aus h,  $\xi$ -Diagramm von  $\text{H}_2\text{O} / \text{LiBr}$  (Bild 79) und Dampf tabel von  $\text{H}_2\text{O}$  ermittelt man folgende Daten:

f) die Konzentrationen und den spezifischen Lösungsumlauf:

$$\xi_r = 0,451 \Rightarrow \rho = 1580 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{Bild 78})$$

$$\xi_a = 0,37$$

$$\xi_d = 1$$

$$f = \frac{\xi_d - \xi_a}{\xi_r - \xi_a} = \frac{1 - 0,37}{0,451 - 0,37} = 7,87 \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$$

g) die Enthalpiewerte:

$$h'_{HE} = 208 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (\text{bei } t_{HE} = 80 \text{ °C})$$

$$h'_{He} = 133 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (\text{bei } t_{He} = 58 \text{ °C})$$

$$h'_{AE} = 72,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (\text{bei } t_{AE} = 30 \text{ °C})$$

$$h'_{Ae} = 122 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (\text{bei } t_{Ae} = 30 \text{ °C})$$

h) die spezifischen Energien:

$$q_K = h''_1 - h'_2 = 2614 - 125 = 2489 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (\text{Verflüssigungswärme})$$

$$q_A = h_7 - h'_A = 2512 - (-346) = 2858 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (\text{Absorptionswärme})$$

$$q_0 = h_7 - h'_2 = 2512 - 125 = 2387 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (\text{Verdampfungswärme})$$

$$q_H = h''_1 - h'_A = 2614 - (-346) = 2960 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (\text{Austreibungswärme})$$

$$w = (p_k - p_0) \cdot V \cdot \frac{1}{\eta_{PL}} = (p_k - p_0) \cdot \frac{f}{\rho} \cdot \frac{1}{\eta_{PL}}$$

$$w = 3,4 \cdot \frac{7,87}{1580} \cdot \frac{1}{0,5} = 0,034 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (\text{spezifische Antriebsenergie der Lösungspumpe})$$

$$q_{wt} = f(h'_{He} - h'_{AE}) = 7,87(133 - 72) = 480 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (\text{Lösungswärmetauscherwärme})$$

$$\eta_{wt} = \frac{T_{HE} - T_{AA}}{T_{HE} - T_{AE}} = \frac{80 - 45}{80 - 30} = \frac{35}{50} = 0,7$$

i) Kontrolle der Wärmebilanz des Prozesses:

$$q_H + q_{0N} = q_K + q_A \Rightarrow$$

$$5347 = 5347 \Rightarrow \Delta q = 0 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{ und } \Delta q\% = 0\%$$

j) Bestimmung der Prozessleistungen bei der entsprechenden Kälteleistung:

In der Tabelle 12 sind die Prozessleistungen und -größen dargestellt. Die dafür notwendigen Bestimmungsgleichungen sind die Gln. 87 bis 95.

3)

■ Austreibungsendtemperatur	$t_{HE} = 75 \text{ °C}$
■ Verdampfungsendtemperatur	$t_{0E} = +1 \text{ °C} \Rightarrow p_0 = 6,62 \text{ mbar}$
■ Absorberend- und Verflüssigertemperatur	$t_k = t_{AE} = 30 \text{ °C} \Rightarrow p_k = 42,5 \text{ mbar}$
■ Kälteleistung	$\dot{Q}_0 = 15 \text{ kW}$

Aus h,  $\xi$ -Diagramm von H<sub>2</sub>O / LiBr (Bild 80) und Dampftafel von H<sub>2</sub>O ermittelt man folgende Daten:

k) die Konzentrationen und den spezifischen Lösungsumlauf:

$$\xi_r = 0,438 \Rightarrow \rho = 1600 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{Bild 78})$$

$$\xi_a = 0,388$$

$$\xi_d = 1$$

$$f = \frac{\xi_d - \xi_a}{\xi_r - \xi_a} = \frac{1 - 0,388}{0,438 - 0,388} = 12,24 \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$$

l) die Enthalpiewerte:

$$h'_{HE} = 188 \frac{kJ}{kg} \quad (\text{bei } t_{HE} = 75 \text{ °C})$$

$$h'_{He} = 147 \frac{kJ}{kg} \quad (\text{bei } t_{He} = 40 \text{ °C})$$

$$h'_{AE} = 76 \frac{kJ}{kg} \quad (\text{bei } t_{AE} = 30 \text{ °C})$$

$$h'_{Ae} = 109 \frac{kJ}{kg} \quad (\text{bei } t_{Ae} = 30 \text{ °C})$$

m) die spezifischen Energien:

$$q_K = h''_1 - h'_2 = 2616 - 123 = 2493 \frac{kJ}{kg} \quad (\text{Verflüssigungswärme})$$

$$q_A = h_7 - h'_A = 2512 - (-295) = 2807 \frac{kJ}{kg} \quad (\text{Absorptionswärme})$$

$$q_0 = h_7 - h'_2 = 2512 - 123 = 2389 \frac{kJ}{kg} \quad (\text{Verdampfungswärme})$$

$$q_H = h''_1 - h'_A = 2616 - (-295) = 2911 \frac{kJ}{kg} \quad (\text{Austreibungswärme})$$

$$w = (p_k - p_0) \cdot V \cdot \frac{1}{\eta_{PL}} = (p_k - p_0) \cdot \frac{f}{\rho} \cdot \frac{1}{\eta_{PL}}$$

$$w = 3,54 \cdot \frac{12,24}{1600} \cdot \frac{1}{0,5} = 0,054 \frac{kJ}{kg} \quad (\text{spezifische Antriebsenergie der Lösungspumpe})$$

$$q_{wt} = f(h'_{He} - h'_{AE}) = 12,24 (147 - 76) = 869 \frac{kJ}{kg} \quad (\text{Lösungswärmetauscherwärme})$$

$$\eta_{wt} = \frac{T_{HE} - T_{AA}}{T_{HE} - T_{AE}} = \frac{75 - 35}{75 - 30} = \frac{40}{45} = 0,88$$

n) Kontrolle der Wärmebilanz des Prozesses:

$$q_H + q_{0N} = q_K + q_A \Rightarrow$$

$$5300 = 5300 \Rightarrow \Delta q = 0 \frac{kJ}{kg} \text{ und } \Delta q\% = 0\%$$

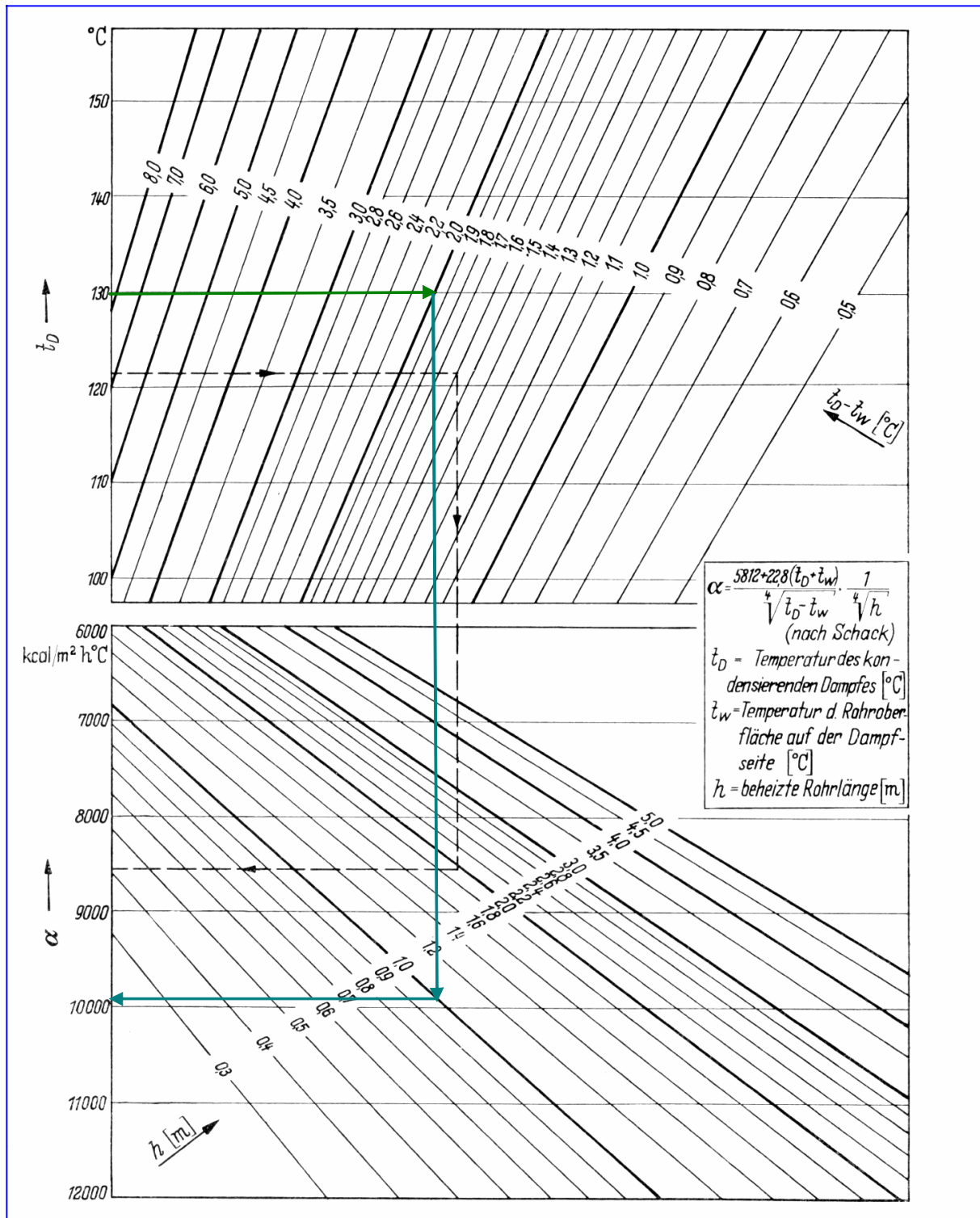
o) Bestimmung der Prozessleistungen bei der entsprechenden Kälteleistung:

In der Tabelle 12 sind die Prozessleistungen und -größen dargestellt. Die dafür notwendigen Bestimmungsgleichungen sind die Gln. 87 bis 95.

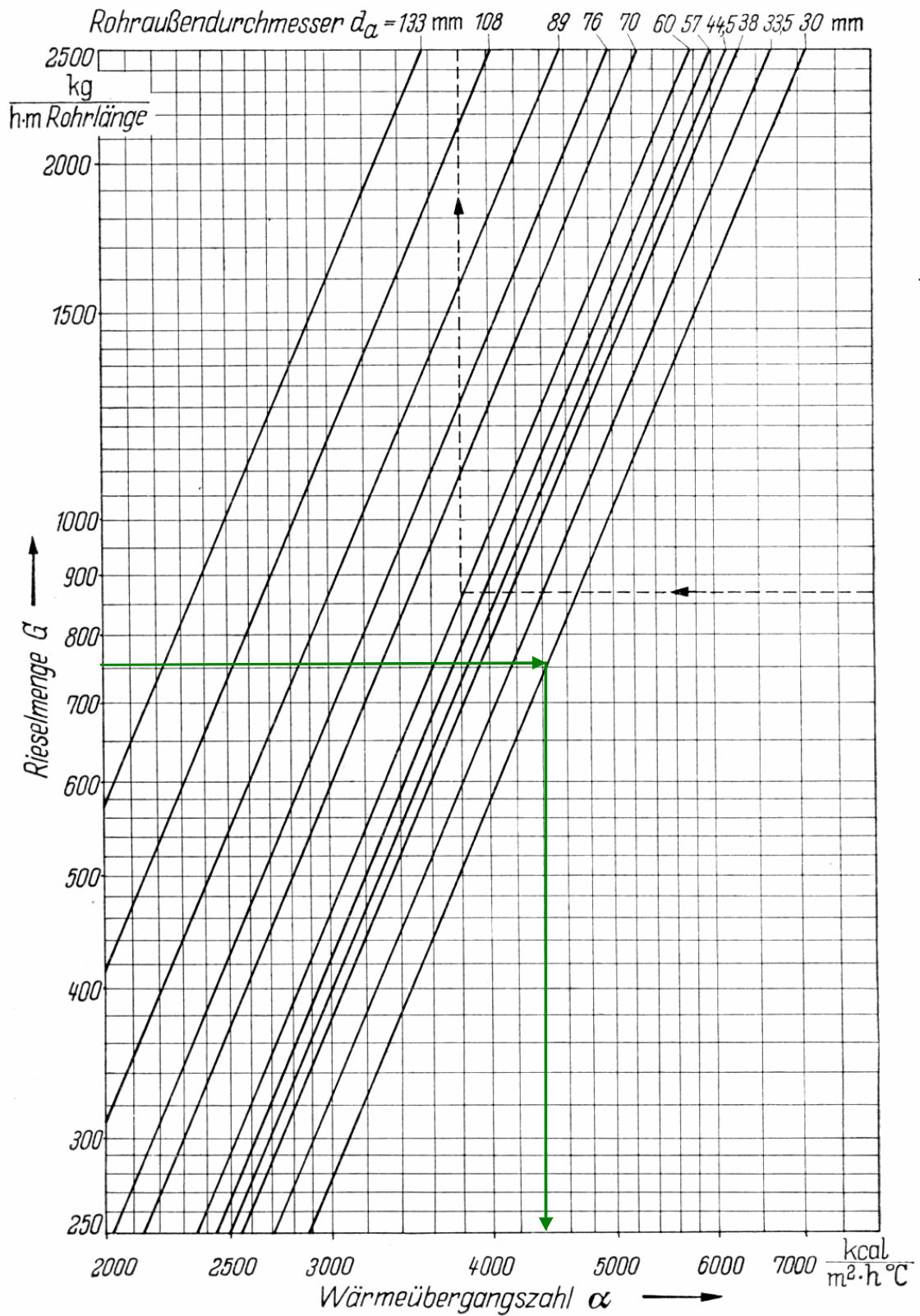


**Tabelle 12:** Kenndaten des Maschinenprozesses mit dem Arbeitsstoffpaar H<sub>2</sub>O/LiBr entsprechend den Betriebsbedingungen

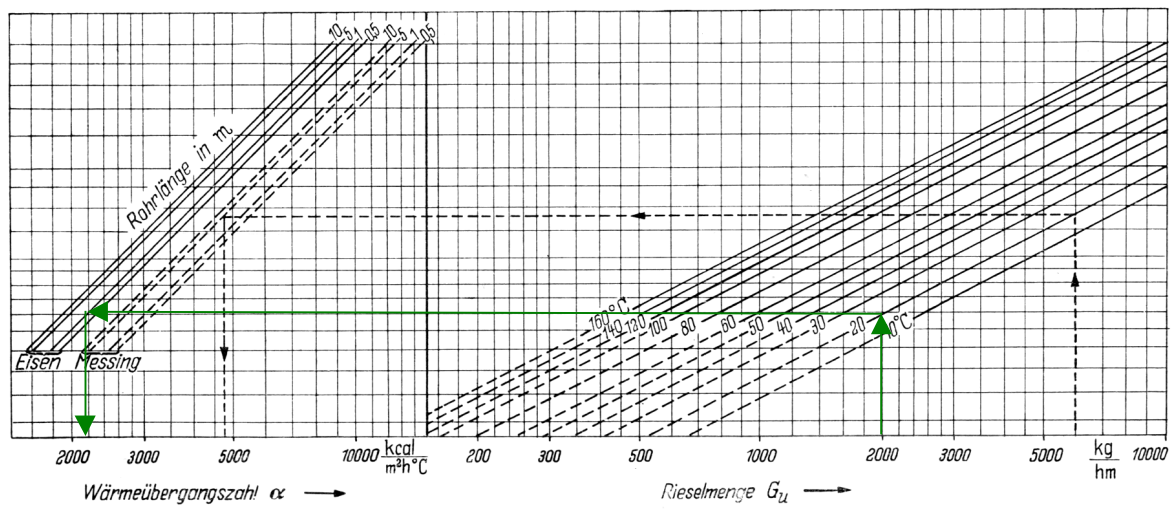
	<b>Betriebs- bedingungen</b>		
	$t_{HE} = 65 \text{ °C}$ $t_{0E} = +1 \text{ °C}$ $t_k = t_{AE} = 20 \text{ °C}$	$t_{HE} = 80 \text{ °C}$ $t_{0E} = +1 \text{ °C}$ $t_k = t_{AE} = 30 \text{ °C}$	$t_{HE} = 75 \text{ °C}$ $t_{0E} = +1 \text{ °C}$ $t_k = t_{AE} = 30 \text{ °C}$
$\dot{Q}_0$ [kW]	<b>15</b>	<b>15</b>	<b>15</b>
$\dot{m}$ [kg/s]	0,0062	0,0063	0,0063
$\dot{Q}_k$ [kW]	15,5	15,68	15,7
$\dot{Q}_A$ [kW]	17	18	17,7
$\dot{Q}_H$ [kW]	17,5	18,7	18,5
$\dot{Q}_{wi}$ [kW]	1,67	3,07	5,5
$\dot{f}$ [kg/s]	0,035	0,05	0,077
<b>W</b> [kW]	0,0008	0,0021	0,0035
$\varepsilon_0$	0,85	0,80	0,81



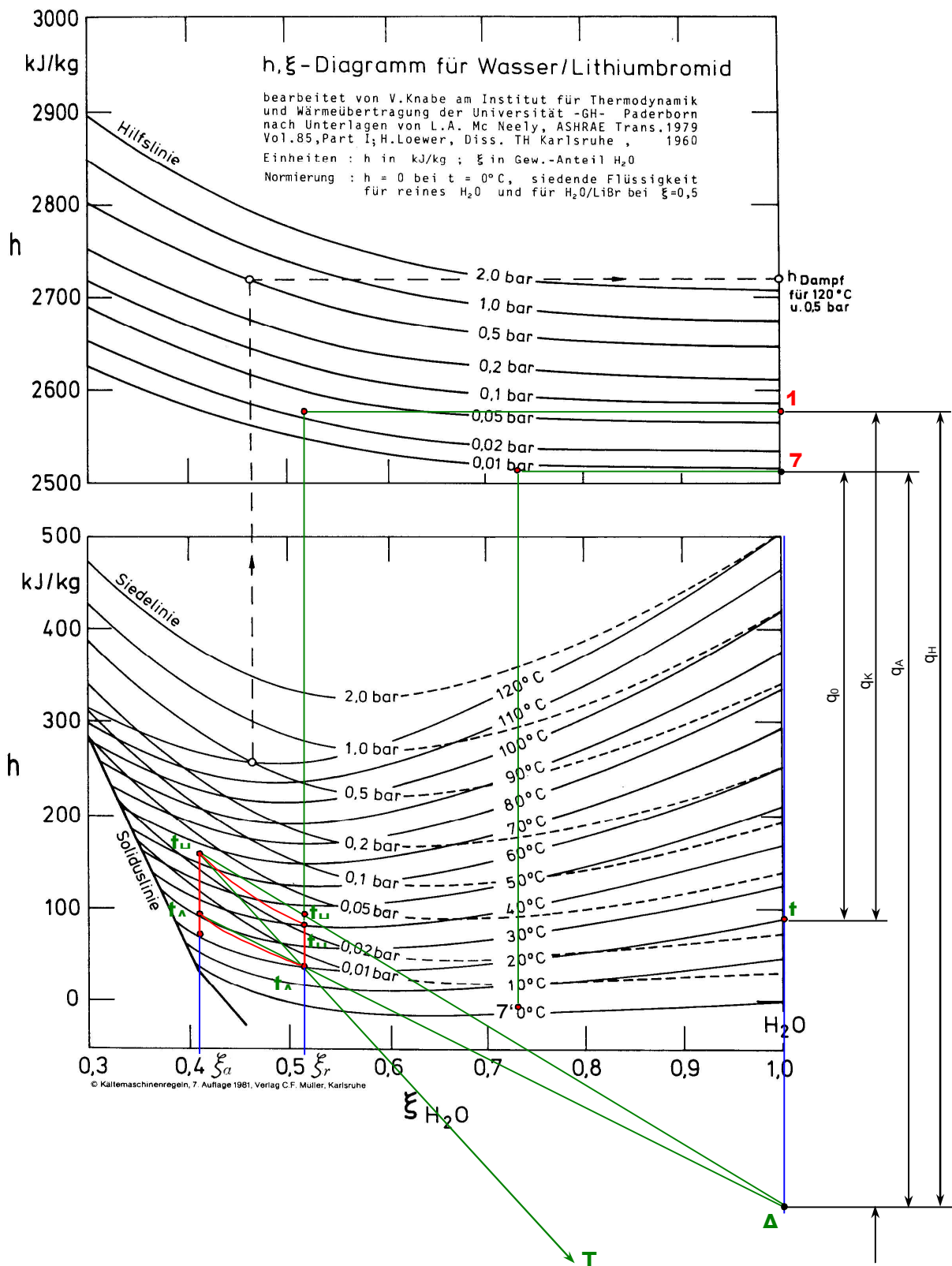
**Bild 74** : Nomogramm zur Bestimmung der Wärmeübergangszahl von kondensierendem Wasserdampf an senkrechten Rohren nach /45/



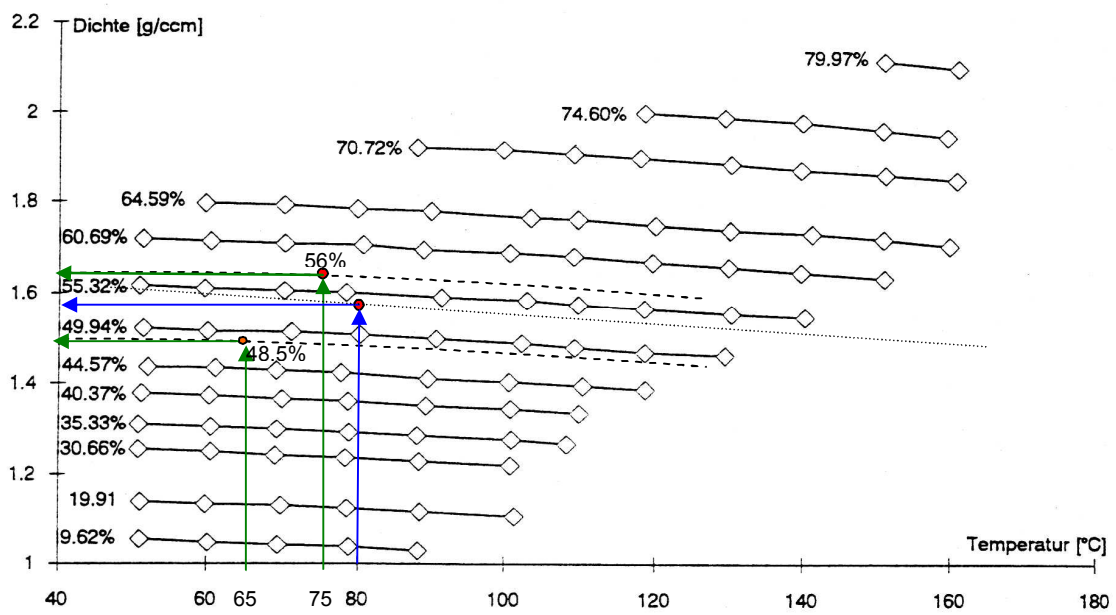
**Bild 75:** Wärmeübergangszahl  $\alpha_w$  für Kühlwasser bei außen berieselten, horizontalen Rohren als Funktion der Rieselmengen nach /45/.



**Bild 76:** Nomogramm zur Bestimmung der Wärmeübergangszahl  $\alpha_w$  für Kühlwasser bei Berieselung senkrechter Rohre nach /45/.

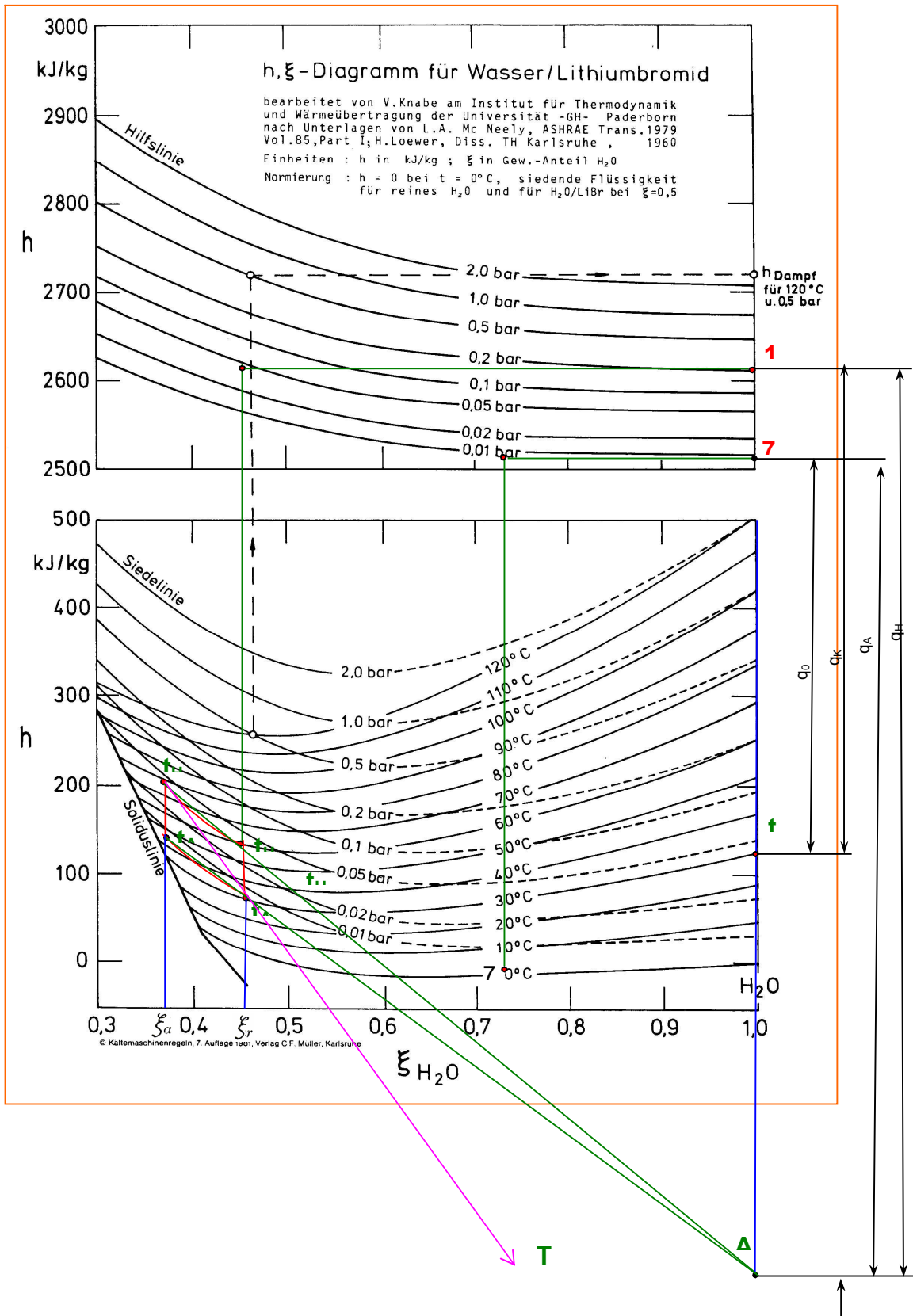


**Bild 77:** h-ξ-Diagramm für H<sub>2</sub>O /LiBr -Gemische und die spezifischen Energien der Komponenten der AKM unter den Betriebsbedingungen: t<sub>HE</sub> = 65 °C; t<sub>k</sub>=t<sub>AE</sub> = 20 °C; t<sub>0E</sub> = +1 °C

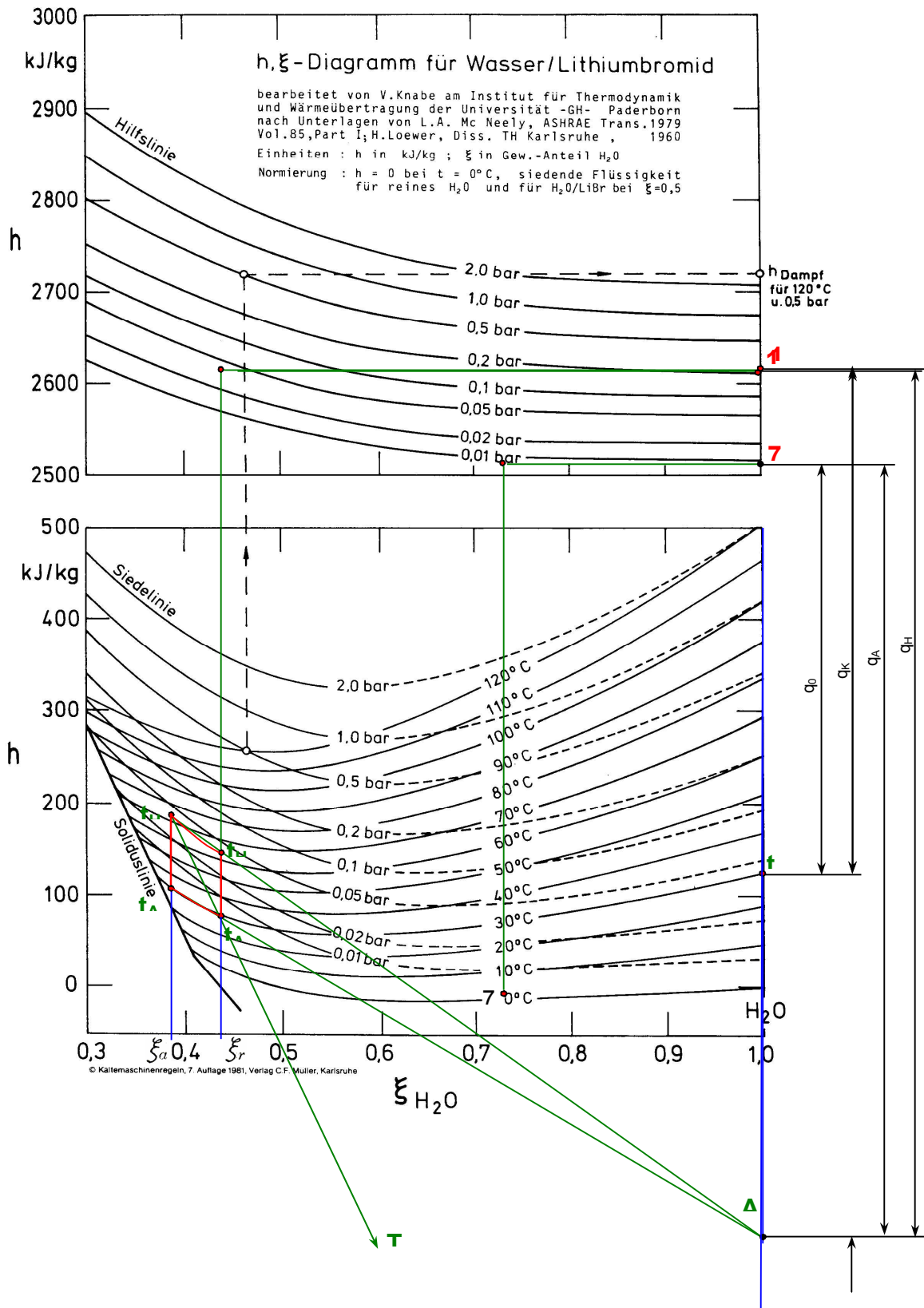


**Bild 78:** Dichte der H<sub>2</sub>O/LiBr-Lösung in Abhängigkeit von der Temperatur und Konzentration (Diagramm nach /52/). Die angegebenen Konzentrationen sind für LiBr in der Lösung.





**Bild 79:** h-ξ-Diagramm für H<sub>2</sub>O / LiBr-Gemische und die spezifischen Energien der Komponenten der AKM unter den Betriebsbedingungen: t<sub>HE</sub> = 80 °C; t<sub>k</sub>=t<sub>AE</sub> = 30 °C; t<sub>OE</sub>=+ 1 °C



**Bild 80:** h-ξ-Diagramm für H<sub>2</sub>O / LiBr-Gemische und die spezifischen Energien der Komponenten der AKM unter den Betriebsbedingungen: t<sub>HE</sub> = 75 °C; t<sub>k</sub>=t<sub>AE</sub> = 30 °C; t<sub>0E</sub>=+ 1 °C



## 8 Berechnungsbeispiel zum Vergleich der konventionellen Arbeitsstoffpaare (NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O und H<sub>2</sub>O/LiBr) mit dem neuen Arbeitsstoffpaar (C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O/ZnBr<sub>2</sub>)

Zum Vergleich des neuen vorgesehenen Arbeitsstoffpaares (C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O /ZnBr<sub>2</sub>) mit den konventionellen Arbeitsstoffpaaren (NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O und H<sub>2</sub>O/LiBr) werden die erforderlichen Antriebstemperaturen, Kühlwassertemperaturen und Druckverhältnis sowie das Wärmeverhältnis des Carnot-Prozesses zugrunde gelegt. Diese Parameter wurden für folgende Betriebsbedingungen ermittelt:

- Kälteleistung von  $\dot{Q}_0 = 15 \text{ kW}$
- Verdampfungstemperatur von  $T_0 = 278 \text{ K}$  und
- Kondensationstemperatur von  $T_k = 303 \text{ K}$

Das Lösungsfeld der Arbeitsstoffpaare H<sub>2</sub>O/LiBr und C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O /ZnBr<sub>2</sub> im log P, 1/T-Diagramm wurde anhand der Dampfdruckkurven der beiden Arbeitsstoffpaare ermittelt und in den Bildern 83 bzw. 84 dargestellt. Die Dampfdruckkurven des Arbeitsstoffpaares C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O /ZnBr<sub>2</sub> wurden im Rahmen der Forschungsarbeiten ermittelt und in Bild 63 wiedergegeben.

Aus den Dampfdruckdiagrammen der gegebenen Arbeitsstoffpaare kann man die maximalen notwendigen Austreibungstemperaturen und die Entgasungsbreite (die Differenz zwischen reicher und armer Lösung) des Gemisches unter den gegebenen Betriebsbedingungen ablesen.

Diese sind:

a) Für C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O/ZnBr<sub>2</sub>

- $T_{Hmax} = 62,5 \text{ °C}$
- $\xi_r = 38 \%$
- $\xi_a = 34 \%$
- $P_0 = 150 \text{ mbar}$
- $P_k = 420 \text{ mbar}$

- spezifischer Lösungsumlauf  $f = \frac{\xi_d - \xi_a}{\xi_r - \xi_a} = \frac{1 - 0,34}{0,38 - 0,34} = 16,5 \frac{\text{Kg}}{\text{Kg}}$

- Druckverhältnis  $\phi = \frac{P_k}{P_0} = 2,8$

b) Für H<sub>2</sub>O/LiBr

- $T_{Hmax} = 80 \text{ °C}$
- $\xi_r = 46 \%$
- $\xi_a = 36 \%$
- $P_0 = 9 \text{ mbar}$
- $P_k = 42 \text{ mbar}$

$$\text{- spezifischer Lösungsumlauf} \quad f = \frac{\xi_d - \xi_a}{\xi_r - \xi_a} = \frac{1 - 0,36}{0,46 - 0,36} = 6,4 \frac{\text{Kg}}{\text{Kg}}$$

$$\text{- Druckverhältnis} \quad \phi = \frac{P_k}{P_0} = 4,66$$

c) Für NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O (vom h,  $\xi$ -Diagramm)

$$\text{- } T_{\text{Hmax}} = 85 \text{ °C}$$

$$\text{- } \xi_r = 47,6 \%$$

$$\text{- } \xi_a = 44,3 \%$$

$$\text{- } P_0 = 4 \text{ bar}$$

$$\text{- } P_k = 14 \text{ bar}$$

$$\text{- Spezifischer Lösungsumlauf} \quad f = \frac{\xi_d - \xi_a}{\xi_r - \xi_a} = \frac{0,975 - 0,443}{0,476 - 0,443} = 16,12 \frac{\text{Kg}}{\text{Kg}}$$

$$\text{- Druckverhältnis} \quad \phi = \frac{P_k}{P_0} = 3,5$$

Die spezifische Verdampfungsenthalpie vom Wasser und Ammoniak am Siedepunkt ist aus Tabellen und Diagrammen bekannt.

Zur Berechnung der spezifischen Verdampfungsenthalpie von Aceton ergibt sich Gl. 98 nach Veter in /53/:

$$\Delta h_{vs} = \frac{\tilde{R}T_c}{\tilde{M}} T_{sr} \frac{0,4343 \ln pc - 0,69377 + 0,89584 T_{sr}}{0,37691 - 0,37306 T_{sr} + \frac{0,15057}{pc T^2_{sr}}} \quad (98)$$

Dabei sind:

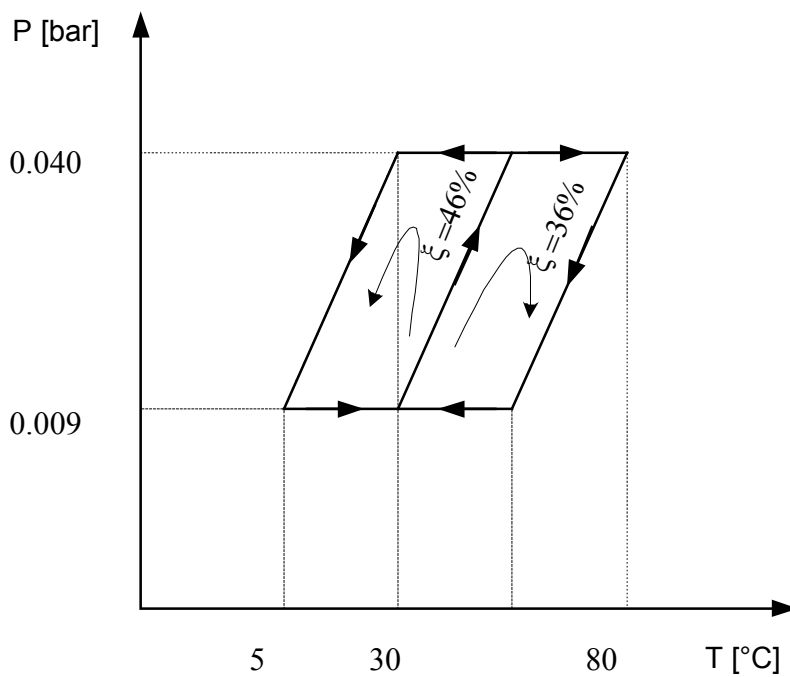
$\tilde{R}$  Molare Gaskonstante [kJ/kmol K]

$\tilde{M}$  Molarmasse des Stoffes [kg/kmol]

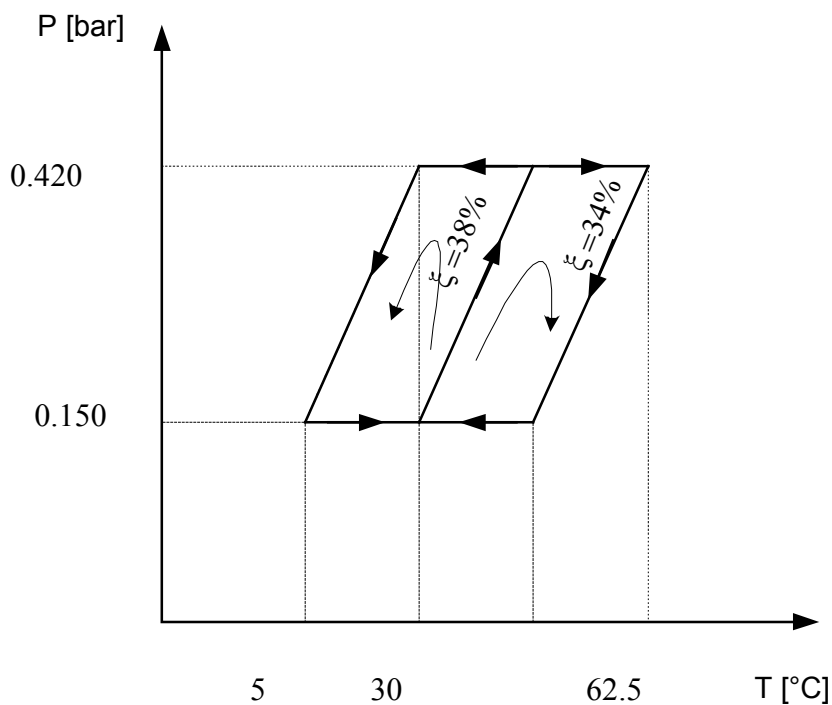
$P_c$  kritischer Druck des Stoffes [bar]

$T_c$  kritische Temperatur des Stoffes in [K]

$T_{rs}$  reduzierte Siedetemperatur des Stoffes,  $T_{rs} = \frac{T_s}{T_c}$



**Bild 83:** log p, 1/T- Diagramm für das Gemisch H<sub>2</sub>O/LiBr unter den gegebenen Betriebsbedingungen



**Bild 84:** log p, 1/T- Diagramm für das Gemisch C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O/ZnBr<sub>2</sub> unter den gegebenen Betriebsbedingungen

$$\Delta h_{v(T_2)} = \Delta h_{v(T_1)} \left( \frac{1 - T_2}{1 - T_1} \right)^{0,38} \quad (99)$$

Dabei sind:

$\Delta h_{V(T_2)}$  spezifische Verdampfungsenthalpie [kJ/kg] bei der Temperatur  $T_2$

$\Delta h_{V(T_1)}$  spezifische Verdampfungsenthalpie [kJ/kg] bei der Temperatur  $T_1$   
(meistens ist die bekannte Siedetemperatur)

$T_{r1}$  reduzierte Temperatur  $T_1$  des Stoffes,  $Tr1 = \frac{T1}{Tc}$

$T_{r2}$  reduzierte Temperatur  $T_2$  des Stoffes,  $Tr2 = \frac{T2}{Tc}$

Werden die Gleichungen (98) und (99) unter Berücksichtigung der charakteristischen Stoffkonstanten des Acetons vom /53/ eingesetzt, ergibt sich:

$$\tilde{R} = 8,314 \text{ kJ}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$$

$$\tilde{M} = 58,08 \text{ kg}/\text{kmol}$$

$$P_c = 47 \text{ bar}$$

$$T_c = 508,1 \text{ K}$$

$$T_s = 329,4 \text{ K}$$

$$Trs = \frac{T_s}{T_c} = \frac{329,4}{508,1} = 0,648$$

$$\Delta h_{V(T_1)} =$$

$$\Delta h_{V1} = \frac{8,314 \cdot 508,1}{58,08} \cdot 0,648 \frac{0,4343 \ln 47 - 0,69377 + 0,89584 \cdot 0,648}{0,37691 - 0,37306 \cdot 0,648 + \frac{0,15057}{47 \cdot 0,648^2}} = 514,51 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$T_{r0}$  bei Verdampfungstemperatur von  $T_0 = 278,15 \text{ K}$  ergibt sich zu

$$T_{r0} = \frac{T_0}{T_c} = \frac{278,15}{508,1} = 0,547$$

danach ergibt sich die spezifische Verdampfungsenthalpie bei diesem Wert nach Gl. (99) zu

$$\Delta h_{V(T_0)} = \Delta h_{V(T_1)} \left( \frac{1 - T_{r0}}{1 - T_{r1}} \right)^{0,38} = q_0 = 514,51 \left( \frac{1 - 0,547}{1 - 0,648} \right)^{0,38} = 566,27 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Danach lässt sich der erforderliche Massenstrom des Kältemittels ( $C_3H_6O$ ) bei der gegebenen Kälteleistung von  $\dot{Q}_0 = 15 \text{ kW}$  nach Gl. (87) ermitteln:

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_0}{q_0}$$

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_0}{q_0} = \frac{15}{566,27} = 0,0265 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Zur Berechnung der erforderlichen Heizleistung, der die Austreiberleistung der AKM entspricht, wird von der spezifischen Verdampfungsenthalpie des Kältemittels bei der gegebenen Antriebstemperatur (Austreibungstemperatur) und von Gl. (99) ausgegangen.

Anhand der Dampfdruckkurve des Gemisches  $C_3H_6O/ZnBr_2$  und angegebenen Betriebsbedingungen beträgt die erforderliche Antriebstemperatur  $T_{H\max} = 62,5 \text{ °C}$ . Wird dieser Wert zur Ermittlung der spezifischen Verdampfungsenthalpie des Kältemittels im Austreiber eingesetzt, ergeben sich folgende Werte:

$$T_{rH} = \frac{T_H}{T_c} = \frac{335,65}{508,1} = 0,661$$

$$\Delta h_{V(T_{rH})} = \Delta h_{V(T_{r1})} \left( \frac{1 - T_{rH}}{1 - T_{r1}} \right)^{0,38} = q_{vH} = 514,51 \left( \frac{1 - 0,661}{1 - 0,648} \right)^{0,38} = 507,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Zur Berechnung der Kältezah  $\varepsilon_{0ab}$  muss noch die erforderliche Heizwärme, die zur Überwindung der Lösungswärme notwendig ist, berücksichtigt werden. Diese Wärme ist annäherungsweise gleichgroß wie die spezifische Verdampfungswärme des Acetons bei der ermittelten Austreibungstemperatur. Demzufolge ergibt sich die erforderliche spezifische Heizwärme zu:

$$q_H = q_{vH} + q_{LH} = 2 q_{vH} = 1014,4 \text{ kJ/kg}$$

Danach ergibt sich die erforderliche Austreiberleistung nach zu:

$$\dot{Q}_H = \dot{m} \cdot q_H = 26,86 \text{ kW}$$

Anschließend ergibt sich die Kältezahl  $\varepsilon_{0ab}$  zu:

$$\varepsilon_{0ab} = \frac{\dot{Q}_0}{\dot{Q}_H} = \frac{15}{26,86} = 0,56$$

Zum übersichtlichen Vergleich zwischen allen drei ausgewählten Arbeitsstoffpaaren sind die Berechnungsergebnisse nochmals in Tabelle 14 wiedergegeben. Diese Ergebnisse wurden durch praktische Messungen am Versuchstand (Bild 51) nachgeprüft.

**Tabelle 14:** Vergleich der Prozessgrößen der AKM mit den Arbeitsstoffpaaren NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>O/LiBr und C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O/ZnBr<sub>2</sub> unter den Betriebsbedingungen:  $\dot{Q}_0 = 15 \text{ kW}$ ,  $t_0 = 5 \text{ °C}$ ;  $t_k = 30 \text{ °C}$

Thermodynamische Größe	Arbeitsstoffpaar		
	NH <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O/LiBr	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O/ZnBr <sub>2</sub>
$\dot{Q}_0$ in kW	15	15	15
$\dot{m}$ in kg/s	0,0138	0,0154	0,026
$T_H$ in °C	85	80	62,5
$\dot{Q}_H$ in kW	27,6	29	26,9
$P_k/P_0$	3,5	4,66	2,8
$\varepsilon_{0ab}$	0,54	0,51	0,56

Die Tabellenwerte für die beiden Arbeitsstoffpaare NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O und H<sub>2</sub>O/LiBr bei den gegebenen Betriebsbedingungen sind der Arbeit /54/ entnommen worden. Es ist ersichtlich, dass das neue vorgesehene Arbeitsstoffpaar C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O/ZnBr<sub>2</sub> im Hinblick auf Kältezah, Druckverhältnis und Austreibungstemperatur am besten abschneidet. Deswegen werden die Untersuchungen in Nachfolgearbeiten auf dieses Arbeitsstoffpaar im Detail weiter durchgeführt.

Anhand der Auswertung der Untersuchungsergebnisse wird dann später eine optimierte Prototypanlage gefertigt und für Serienproduktion vorbereitet. Mehr Details darüber werden im Abschlussbericht des Industriepartners dargestellt.

## 9 Simulationsergebnisse der Anlage

### 9.1 Simulation und Optimierung des Gesamtsystems

In diesem Kapitel wird ein Simulationsmodell entwickelt, in dem die physikalischen und thermodynamischen Vorgänge in den Komponenten des Systems durch mathematische Gleichungen beschrieben werden. Das eigentliche Ziel dieser Simulation ist die Schaffung von Betriebseigenschaften für solarbetriebene Absorptionskältesysteme, die mit dem neuen Arbeitsstoffpaar Aceton-Zinkbromid arbeiten. Die Detailbeschreibung der Vorgehensweise und der Simulationsergebnisse ist der Arbeit /55/, welche zum größten Teil im Rahmen des Projektes entstand, zu entnehmen. Deswegen werden in diesem Kapitel nur die Hauptergebnisse dargestellt.

#### 9.1.1 Modellbildung

Die wichtigsten Komponenten des Kreislaufes einer einstufigen Absorptionskältemaschine sind im Bild 85 (Erweiterung des Bildes 52) dargestellt. Diese sind der Austreiber (1), der Kondensator (2), die Drosselventile (3,7), der Verdampfer (4), der Absorber (5) und die Lösungspumpe (6). Zusätzliche Komponenten, wie der Lösungswärmetauscher (8) und der Kältemittelwärmetauscher (9; nicht in allen Absorptionskältemaschinen vorhanden), werden zur Steigerung der Effektivität der Absorptionskältemaschine eingesetzt. Für ein vereinfachtes Berechnungsmodell einer Absorptionskältemaschine werden einige Grundannahmen getroffen:

- Es entstehen keine Druckverluste in den Komponenten, der Druck im Austreiber ist gleich dem Druck im Kondensator und der Druck im Absorber ist gleich dem Druck im Verdampfer.
- Die Temperaturen der Komponenten (Austreiber, Kondensator, Verdampfer und Absorber) sind konstant.
- Die Kältemittelkonzentration im Kältemittelkreislauf beträgt 100 %.
- Es entstehen keine Wärmeverluste an die Umgebung.
- Die reiche Lösung verlässt den Absorber als gesättigte Flüssigkeit mit der gleichen Temperatur  $T_A$  und Konzentration, die im Absorber existiert.
- Die arme Lösung verlässt den Austreiber mit der gleichen Temperatur  $T_H$  und Konzentration, die im Austreiber existiert.
- Die Kältemittelflüssigkeit verlässt den Kondensator mit der Kondensationstemperatur  $T_K$  und der Kältemitteldampf verlässt den Verdampfer mit der Verdampfungstemperatur  $T_o$ .
- Die Drosselventile arbeiten isenthalp.
- Die Massenströme, Temperaturen und Stoffwerten der Hilfsströme (Heißwasser von der Solaranlage, Kühlwasser vom Kühlturm, Kaltwasser zur Klimatisierung) werden als konstante Parameter angenommen.

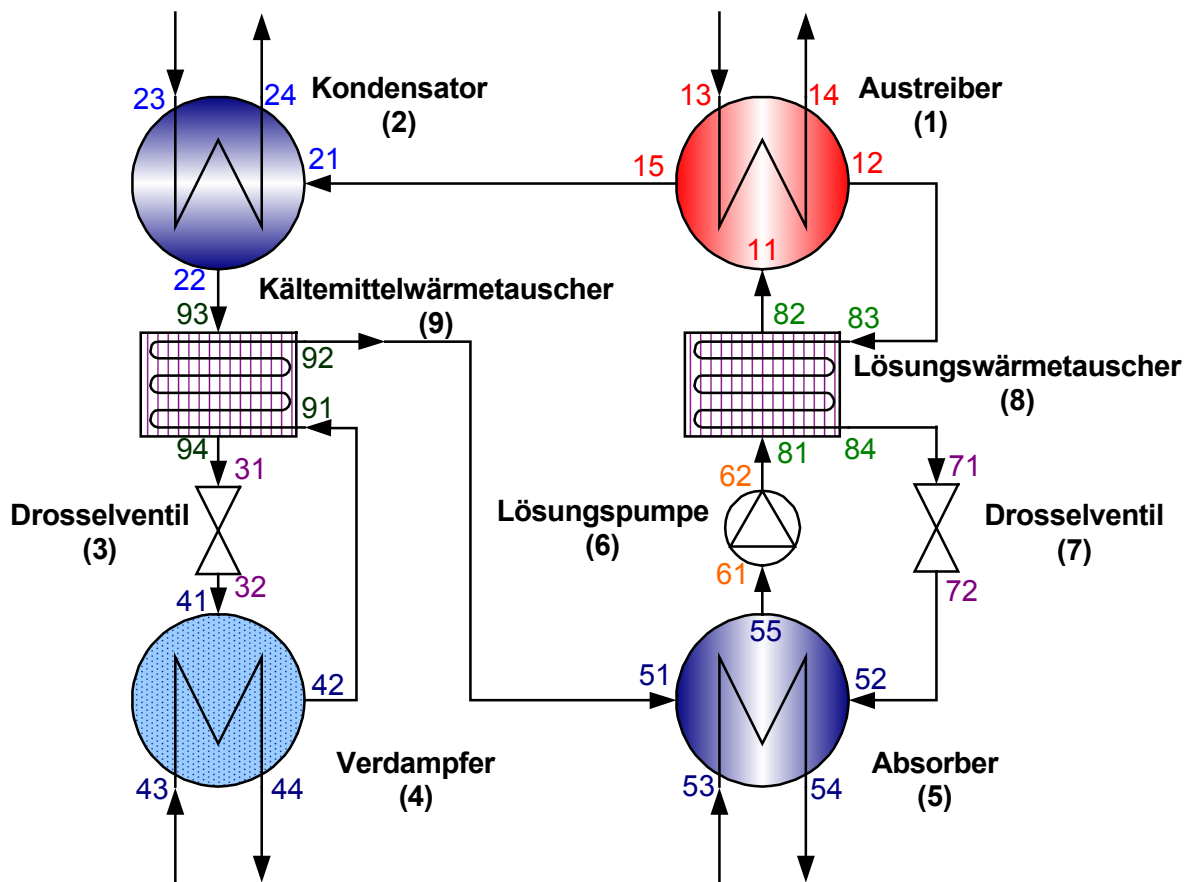


Bild 85: Fließbild einer einstufigen Absorptionskältemaschine

### 9.1.2 Wärmeübertragungsanalyse und Energiebilanzen der Komponenten

Die Berechnung der einstufigen Absorptionskältemaschine kann energetisch, wie in den vorigen Abschnitten ausgeführt wurden, mit Bilanzbetrachtungen um die einzelnen Komponenten durchgeführt werden. Es werden sowohl Enthalpie- als auch Massenstrombilanzen angesetzt. Die Berechnung wird anhand Bild 85 wie folgt durchgeführt.

- **Der Austreiber (1)**

Für die Energiebilanz des Austreibers gilt:

$$\dot{Q}_H + \dot{m}_{11} \cdot h_{11} = \dot{m}_{15} \cdot h_{15} + \dot{m}_{12} \cdot h_{12} \quad (100)$$

Unter Berücksichtigung folgender Gleichungen:

$$h_{15} = c_{p22} \cdot T_K + \Delta h_K + c_{p15} (T_H - T_K) \quad (101)$$

$$h_{12} = c_{p12} \cdot T_H \quad (102)$$

$$h_{11} = c_{p82} \cdot T_{82} \quad (103)$$

$$\dot{m}_{15} = \dot{m}_d \text{ Massenstrom des reinen Kältemittels} \quad (104)$$



$$\dot{m}_{11} = \dot{m}_r \text{ Massenstrom der reichen Lösung} \quad (105)$$

$$\dot{m}_{12} = \dot{m}_a \text{ Massenstrom der armen Lösung} \quad (106)$$

wird die Austreibungsleistung:

$$\dot{Q}_H = \dot{m}_d \cdot c_{p22} \cdot T_K + \dot{m}_d \cdot \Delta h_K + \dot{m}_d \cdot c_{p15} (T_H - T_K) + \dot{m}_a \cdot c_{p12} \cdot T_H - \dot{m}_r \cdot c_{p82} \cdot T_{82} \quad (107)$$

Die zugeführte Austreibungsleistung vom Heizwasser ergibt sich als:

$$\dot{Q}_H = \dot{m}_{13} \cdot c_{p13} \cdot (T_{13} - T_{14}) \quad (108)$$

- **Der Kondensator (2)**

Im Kondensator wird der Kältemitteldampf unter Energieabgabe kondensiert, für die Energiebilanz des Kondensators gilt:

$$\dot{Q}_K + \dot{m}_{22} \cdot h_{22} = \dot{m}_{21} \cdot h_{21} \quad (109)$$

Unter Berücksichtigung folgender Gleichungen:

$$\dot{m}_{21} = \dot{m}_{22} = \dot{m}_d \text{ (Massenbilanz)} \quad (110)$$

$$h_{21} = h_{15} \quad (111)$$

$$h_{22} = c_{p22} \cdot T_K \quad (112)$$

wird die Kondensationsleistung:

$$\dot{Q}_K = \dot{m}_d \cdot \Delta h_K + \dot{m}_d \cdot c_{p15} (T_H - T_K) \quad (113)$$

Die abgegebene Leistung an das Kühlwasser ist folglich:

$$\dot{Q}_K = \dot{m}_{23} \cdot c_{p23} \cdot (T_{24} - T_{23}) \quad (114)$$

- **Das Drosselventil (3)**

Für die Energiebilanz im Ventil gilt:

$$\dot{m}_{31} \cdot h_{31} = \dot{m}_{32} \cdot h_{32} \quad (115)$$

und Massenbilanz:

$$\dot{m}_{31} = \dot{m}_{32} = \dot{m}_d \quad (116)$$

$$\Rightarrow h_{32} = h_{31} = h_{94} = c_{p94} \cdot T_{94} \quad (117)$$

- **Der Verdampfer (4)**

Hier wird das Kältemittel verdampft. Dabei nimmt es Energie vom Kaltwasser bzw. von der Umgebung auf. Die aufgenommene Leistung entspricht der Nutzleistung (Kälteleistung) der Absorptionskältemaschine. Für die Energiebilanz des Verdampfers gilt:

$$\dot{Q}_o + \dot{m}_{41} \cdot h_{41} = \dot{m}_{42} \cdot h_{42} \quad (118)$$

Unter Berücksichtigung folgender Gleichungen:

$$\dot{m}_{41} = \dot{m}_{42} = \dot{m}_d \text{ (Massenbilanz)} \quad (119)$$

$$h_{41} = h_{32} \quad (120)$$

$$h_{42} = c_{p'} \cdot T_o + \Delta h_o \quad (121)$$

wird die Verdampfungsleistung:

$$\dot{Q}_o = \dot{m}_d \cdot \Delta h_o + \dot{m}_d \cdot c_{p'} \cdot T_o - \dot{m}_d \cdot c_{p_{94}} \cdot T_{94} \quad (122)$$

Dabei ist  $c_{p'}$  spezifische Wärmekapazität der gesättigten Kältemittelflüssigkeit bei der Verdampfungstemperatur.

Für die vom Kaltwasser entzogene Leistung ergibt sich:

$$\dot{Q}_o = \dot{m}_{43} \cdot c_{p_{43}} \cdot (T_{43} - T_{44}) \quad (123)$$

- **Der Absorber (5)**

Im Absorber wird der Kältemitteldampf aus dem Verdampfer von der armen Lösung absorbiert. Für die Energiebilanz des Absorbers gilt:

$$\dot{Q}_A + \dot{m}_{55} \cdot h_{55} = \dot{m}_{51} \cdot h_{51} + \dot{m}_{52} \cdot h_{52} \quad (124)$$

Unter Berücksichtigung folgender Gleichungen:

$$h_{51} = h_{92} = h_{42} + c_{p_{42}} (T_{92} - T_o) \quad (125)$$

$$h_{52} = h_{84} = c_{p_{84}} \cdot T_{84} \quad (126)$$

$$h_{55} = c_{p_{55}} \cdot T_A \quad (127)$$

$$\dot{m}_{51} = \dot{m}_d \quad (128)$$

$$\dot{m}_{52} = \dot{m}_a \quad (129)$$

$$\dot{m}_{55} = \dot{m}_r \quad (130)$$

wird die Absorptionsleistung:

$$\dot{Q}_A = \dot{m}_d \cdot c_{p'} \cdot T_o + \dot{m}_d \cdot \Delta h_o + \dot{m}_d \cdot c_{p_{42}} (T_{92} - T_o) + \dot{m}_a \cdot c_{p_{84}} \cdot T_{84} - \dot{m}_r \cdot c_{p_{55}} \cdot T_A \quad (131)$$

Die abgegebene Leistung an das Kühlwasser ist folglich:

$$\dot{Q}_A = \dot{m}_{53} \cdot c_{p_{53}} \cdot (T_{54} - T_{53}) \quad (132)$$

- **Die Lösungspumpe (6)**

Für die Energiebilanz der Lösungspumpe gilt:

$$\dot{Q}_P + \dot{m}_{61} \cdot h_{61} = \dot{m}_{62} \cdot h_{62} \quad (133)$$

Unter Berücksichtigung folgender Gleichungen:

$$\dot{m}_{61} = \dot{m}_{62} = \dot{m}_r \quad (\text{Massenbilanz}) \quad (134)$$

$$h_{61} = c_{p_{61}} \cdot T_A \quad (135)$$

$$h_{62} = c_{p_{62}} \cdot T_{62} \quad (136)$$

wird die Leistung der Pumpe:

$$\dot{Q}_P = \dot{m}_r (c_{p_{62}} \cdot T_{62} - c_{p_{61}} \cdot T_A) \quad (137)$$

Andererseits kann die elektrische Leistung der Pumpe wie folgt berechnet werden:

$$\dot{Q}_P = \frac{\dot{m}_r \cdot (P_{62} - P_{61})}{\rho_{61} \cdot \eta_p} \quad (138)$$

Dabei sind:

$P_{62}$  Austreibungsdruck

$P_{61}$  Verdampfungsdruck

$\eta_p$  Wirkungsgrad der Lösungspumpe

Die Antriebsleistung der Lösungspumpe beträgt nur ca. 1 % und wird meistens bei der Berechnung in der Literatur vernachlässigt. Aber ich werde sie im Simulationsprogramm nicht vernachlässigen, um die Austrittstemperatur  $T_{62}$  genau zu bestimmen.

$$T_{62} = T_A + \frac{\dot{Q}_P}{\dot{m}_r \cdot c_{p_{61}}} \quad (139)$$

- **Das Drosselventil (7)**

Für die Energiebilanz im Ventil gilt:

$$\dot{m}_{71} \cdot h_{71} = \dot{m}_{72} \cdot h_{72} \quad (140)$$

und Massenbilanz:

$$\dot{m}_{71} = \dot{m}_{72} = \dot{m}_a \quad (141)$$

$$\Rightarrow h_{71} = h_{72} \Rightarrow h_{52} = h_{84} = c_{p_{84}} \cdot T_{84} \quad (142)$$

- **Der Lösungswärmetauscher (8)**

Für die Energiebilanz des Lösungswärmetauschers gilt:

$$\dot{m}_r \cdot c_{p_{81}} (T_{82} - T_{81}) = \dot{m}_a \cdot c_{p_{83}} (T_{83} - T_{84}) \quad (143)$$

Der Wirkungsgrad des Lösungswärmetauschers ist:

$$\eta_{LWT} = \frac{T_{83} - T_{84}}{T_{83} - T_{81}} \quad (144)$$

Unter Berücksichtigung folgender Gleichungen:

$$T_{83} = T_{12} = T_H \quad (145)$$

$$T_{81} = T_{62} \quad (146)$$

ergibt sich die Austrittstemperatur der armen Lösung:

$$T_{84} = T_H - \eta_{LWT} (T_H - T_{62}) \quad (147)$$

und die Austrittstemperatur der reichen Lösung:

$$T_{82} = T_{62} + \frac{\dot{m}_a \cdot c_{p_{83}}}{\dot{m}_r \cdot c_{p_{81}}} (T_H - T_{84}) \quad (148)$$

- **Kältemittelwärmetauscher (9)**

Für die Energiebilanz des Kältemittelwärmetauschers gilt:

$$c_{p_{93}} (T_{93} - T_{94}) = c_{p_{91}} (T_{92} - T_{91}) \quad (149)$$

Der Wirkungsgrad des Kältemittelwärmetauschers ist:

$$\eta_{KMWT} = \frac{T_{92} - T_{91}}{T_{93} - T_{91}} \quad (150)$$

Unter Berücksichtigung folgender Gleichungen:

$$T_{91} = T_{42} = T_o \quad (151)$$

$$T_{93} = T_{22} = T_K \quad (152)$$

ergeben sich die Austrittstemperaturen:

$$T_{92} = T_o + \eta_{KMWT} (T_K - T_o) \quad (153)$$

$$T_{94} = T_K - \frac{c_{p_{91}}}{c_{p_{93}}} (T_{92} - T_o) \quad (154)$$

- **Der spezifische Lösungsumlauf**

Die Lösungsmenge  $f$  tritt in den Austreiber mit der Konzentration  $\xi_r$  und wird dort durch Wärmezufuhr bis zur Konzentration  $\xi_a$  entgast. Die Massenbilanz des Kältemittels Aceton ergibt sich dann zu:

$$\xi_r \cdot \dot{m}_r = \xi_d \cdot \dot{m}_d + \xi_a \cdot \dot{m}_a \quad (155)$$

und die Gesamtbilanz zu:

$$\dot{m}_r = \dot{m}_d + \dot{m}_a \quad (156)$$

Daraus lässt sich der Massenstrom der reichen Lösung berechnen:

$$\dot{m}_r = \frac{\xi_d - \xi_a}{\xi_r - \xi_a} \cdot \dot{m}_d = \frac{1 - \xi_a}{\xi_r - \xi_a} \cdot \dot{m}_d \quad (157)$$

der Massenstrom der armen Lösung:

$$\dot{m}_a = \frac{\xi_d - \xi_r}{\xi_r - \xi_a} \cdot \dot{m}_d = \frac{1 - \xi_r}{\xi_r - \xi_a} \cdot \dot{m}_d \quad (158)$$

und die spezifische umlaufende Masse des Lösungsmittels:

$$f = \frac{\dot{m}_r}{\dot{m}_d} = \frac{1 - \xi_a}{\xi_r - \xi_a} \left[ \frac{\text{Kg Lösung}}{\text{Kg Kältemittel}} \right] \quad (159)$$

- **Der Nutzungsgrad des Gesamtsystems**

Die Effektivität einer Absorptionskältemaschine wird durch das Wärmeverhältnis COP (coefficient of performance), welches als Verhältnis zwischen die dem Verdampfer zugeführte Wärme  $\dot{Q}_o$  und die aufzuwendender Antriebswärme definiert wird, bestimmt.

Daraus ergibt sich:

$$COP = \frac{\dot{Q}_o}{\dot{Q}_H + \dot{Q}_P} \quad (160)$$

Aus den o.g. Gleichungen lässt sich das Wärmeverhältnis bestimmen:

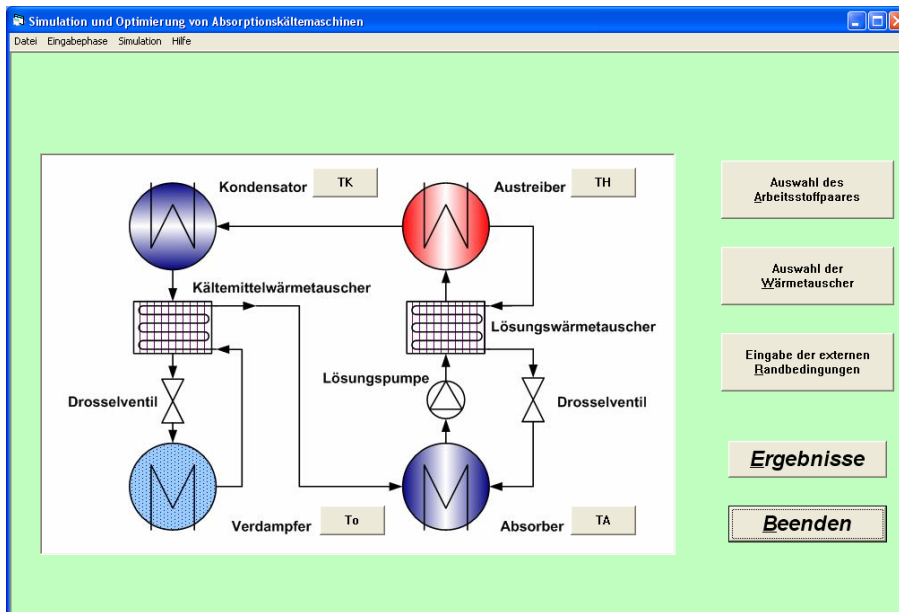
$$COP = \frac{\dot{m}_d \cdot c_p' \cdot T_o + \dot{m}_d \cdot \Delta h_o - \dot{m}_d \cdot c_{p94} \cdot T_{94}}{\dot{m}_d \cdot c_{p22} \cdot T_K + \dot{m}_d \cdot \Delta h_K + \dot{m}_d \cdot c_{p15} \cdot (T_H - T_K) + \dot{m}_d \cdot c_{p12} \cdot T_H - \dot{m}_r \cdot c_{p82} \cdot T_{82} + \dot{m}_r \cdot (c_{p62} \cdot T_{62} - c_{p61} \cdot T_A)} \quad (161)$$

### 9.1.3 EES-Simulationsmodell

Es wurde mit dem Simulationsprogramm EES ein Modell zur Berechnung des Wärmeverhältnisses und zur Optimierung des Gesamtsystems entwickelt. Das verwendete Modell erlaubt die adäquate Berechnung des stationären Betriebsverhaltens einer Absorptionskältemaschine bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen und für verschiedene Arbeitsstoffpaare. Dafür wurden die thermodynamischen Eigenschaften des neuen Arbeitsstoffpaares Aceton-Zinkbromid (spezifische Enthalpie, spezifische Wärmekapazität) bei den verschiedenen Werten der Parameter (Druck, Temperatur, Aceton-Konzentration) in Unterprogrammen gespeichert, um die Berechnungen für zahlreiche Betriebszustände durchzuführen.

### 9.1.4 Erstellung einer Benutzeroberfläche

Zur Vereinfachung der Berechnungen, Simulation und Optimierung von Absorptionskältemaschinen, wurde ebenfalls mit Hilfe des Programms Visual Basic eine Software mit einer Benutzeroberfläche entwickelt (Bild 86).



**Bild 86:** Benutzeroberfläche des erstellten Simulationsprogramms für das Gesamtsystem

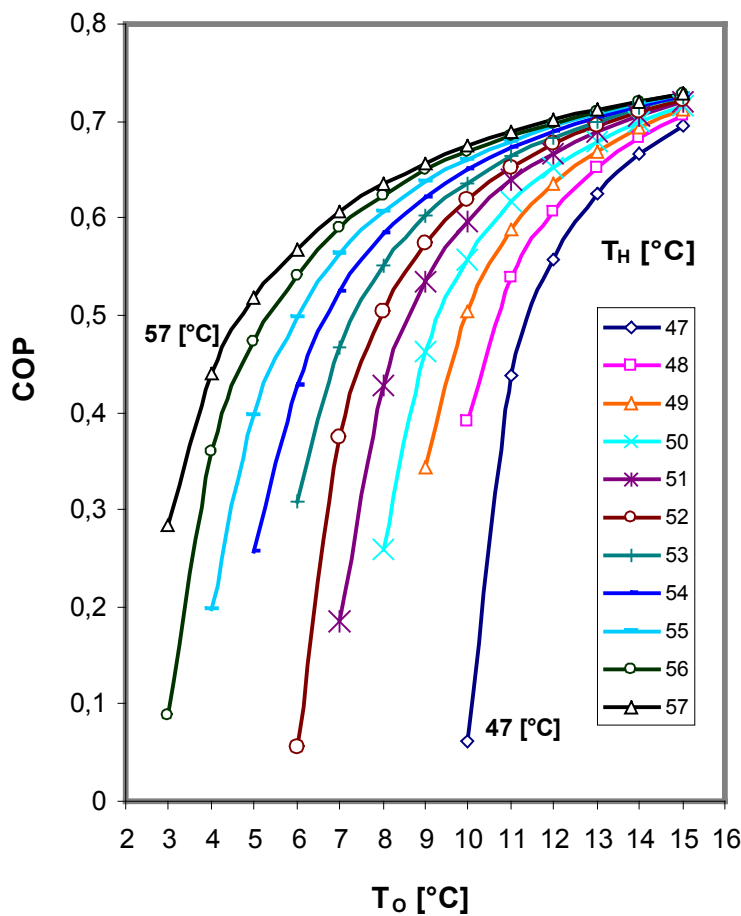
Nach der Eingabe der internen Komponententemperaturen hat man die Möglichkeit das verwendete Arbeitsstoffpaar auszuwählen sowie die weiteren erforderlichen Randbedingungen einzugeben und im Anschluss die Berechnungsergebnisse zu erhalten.

### 9.1.5 Simulationsergebnisse

Anhand des erstellten Simulationsmodells können alle unbekannt Parameter (wie z. B. Leistungszahl, Prozessleistungen, spezifischer Lösungsumlauf ...) wie folgt ermittelt werden, wenn bestimmte Betriebszustände eingegeben werden.

#### 9.1.5.1 Wärmeverhältnis und spezifischer Lösungsumlauf der Aceton-Zinkbromid Absorptionskältemaschine

Bild 87 zeigt das Wärmeverhältnis COP einer Aceton-Zinkbromid Absorptionskältemaschine in Abhängigkeit von den Austreibungs- bzw. Verdampfungstemperaturen. Die Kondensations- bzw. Absorptionstemperatur beträgt für diese Darstellung 28 °C. Der Wärmewirkungsgrad des Lösungswärmetauschers beträgt 75 %.



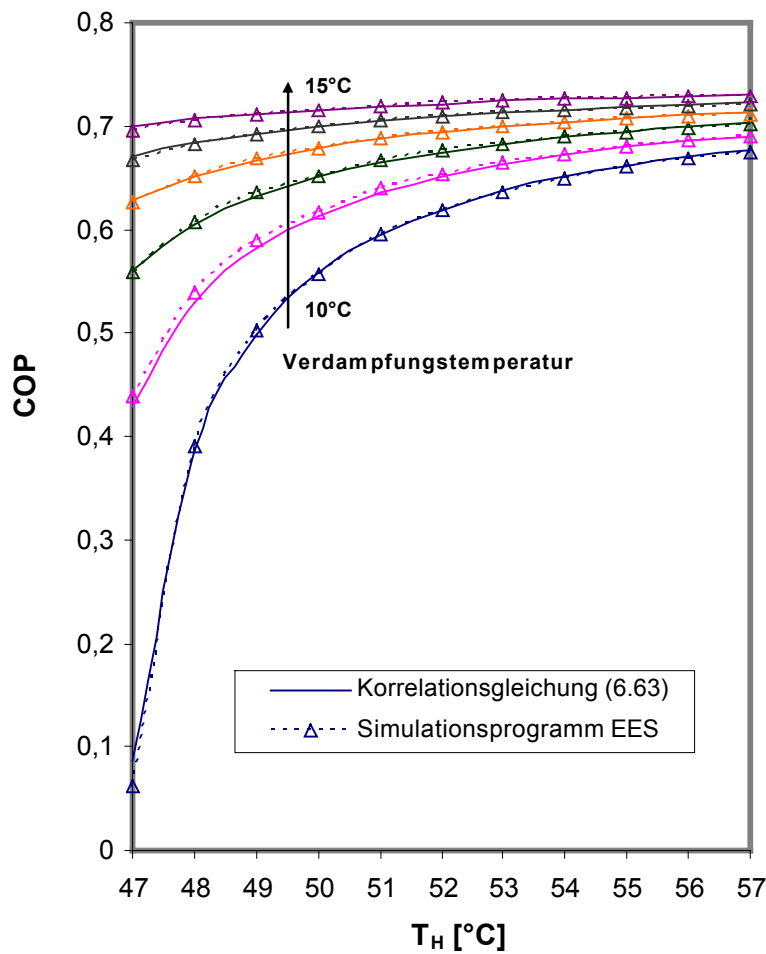
**Bild 87:** Leistungszahl einer Aceton-Zinkbromid Absorptionskältemaschine in Abhängigkeit von der Verdampfungstemperatur und Austreibungstemperatur bei Kondensationstemperatur von 28 °C, Absorptionstemperatur von 28 °C und Wärmewirkungsgrad des Lösungswärmetauschers von 75 %.

Mit steigender Verdampfungstemperatur steigt das Wärmeverhältnis anfangs steil an und läuft dann flacher einem Endwert entgegen. Es steigt ebenfalls mit steigender Austreibungstemperatur an. Wenn sich die Verdampfungstemperatur von 10 °C bis 15 °C ändert, steigt das Wärmeverhältnis von 0,39 bis 0,70 bei T<sub>H</sub> = 48 °C, aber von 0,67 bis 0,73 bei T<sub>H</sub> = 57 °C. D. h. die Steigerungsrate im Wärmeverhältnis ist bei großen Austreibungs- bzw. Verdampfungstemperaturen geringer als bei niedrigen Temperaturen. Um die Simulationsergebnisse der Leistungszahl in eine mathematische Formulierung in Abhängigkeit von T<sub>H</sub> und T<sub>0</sub> zu bringen, konnte die folgende Korrelationsgleichung mit Hilfe des Programms *TableCurve* aufgestellt werden:

$$COP = \frac{0,78 - 0,0134 \cdot T_H - 0,015 \cdot T_0}{1 - 0,018 \cdot T_H - 0,0177 \cdot T_0} \tag{162}$$

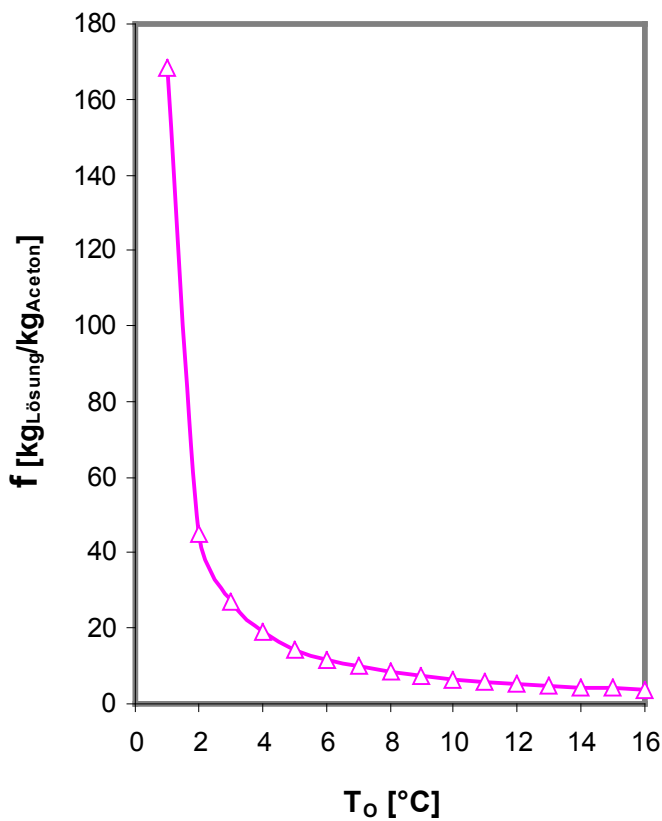
Die angegebene Gleichung wurde im Bereich: 46 °C < T<sub>H</sub> < 58 °C und 9 °C < T<sub>0</sub> < 19 °C angepasst. Bild 88 zeigt den Vergleich der Ergebnisse vom Simulationsprogramm EES mit den Ergebnissen aus der Korrelationsgleichung (162).





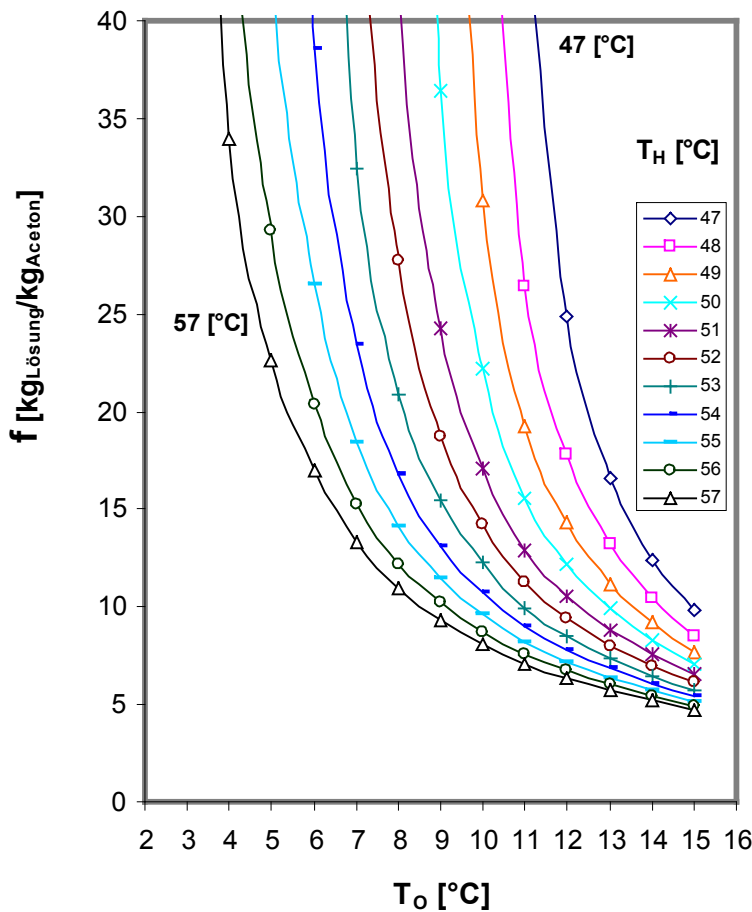
**Bild 88:** Leistungszahl einer Aceton-Zinkbromid Absorptionskältemaschine in Abhängigkeit von der Austreibungstemperatur und Verdampfungstemperatur bei Kondensationstemperatur von 28 °C, Absorptionstemperatur von 28 °C und Wärmewirkungsgrad des Lösungswärmetauschers von 75 %.

Im vorliegenden Diagramm liegt eine hohe Übereinstimmung der Ergebnisse aus der aufgestellten Gleichung (162) und der durch den erstellten EES-Modul ermittelten Punkte mit einem Fehler unter 0,01 vor. Bild 89 zeigt den spezifischen Lösungsumlauf  $f$  einer Aceton-Zinkbromid Absorptionskältemaschine in Abhängigkeit von der Verdampfungstemperatur. Die Kondensationstemperatur beträgt in dieser Darstellung 31 °C, die Absorptionstemperatur 26 °C und die Austreibungstemperatur 60 °C.



**Bild 89:** Spezifischer Lösungsumlauf einer Aceton-Zinkbromid Absorptionskältemaschine in Abhängigkeit von der Verdampfungstemperatur bei Kondensationstemperatur von 31 °C, Absorptionstemperatur von 26 °C und Austreibungstemperatur von 60 °C.

Bei niedrigen Verdampfungstemperaturen ist der spezifische Lösungsumlauf und damit der Energieaufwand für das Pumpen des Lösungsmittels vom Absorber zum Austreiber sehr hoch. Deswegen ist es empfehlenswert, dass man die Anlage bei Verdampfungstemperaturen die höher als 4 °C sind, zu betreiben. Bild 90 zeigt auch den spezifischen Lösungsumlauf einer Aceton-Zinkbromid Absorptionskältemaschine in Abhängigkeit von der Austreibungs- bzw. Verdampfungstemperatur. Die Kondensations- bzw. Absorptionstemperatur beträgt in dieser Darstellung 28 °C. Der Wärmewirkungsgrad des Lösungswärmetauschers beträgt 75 %.

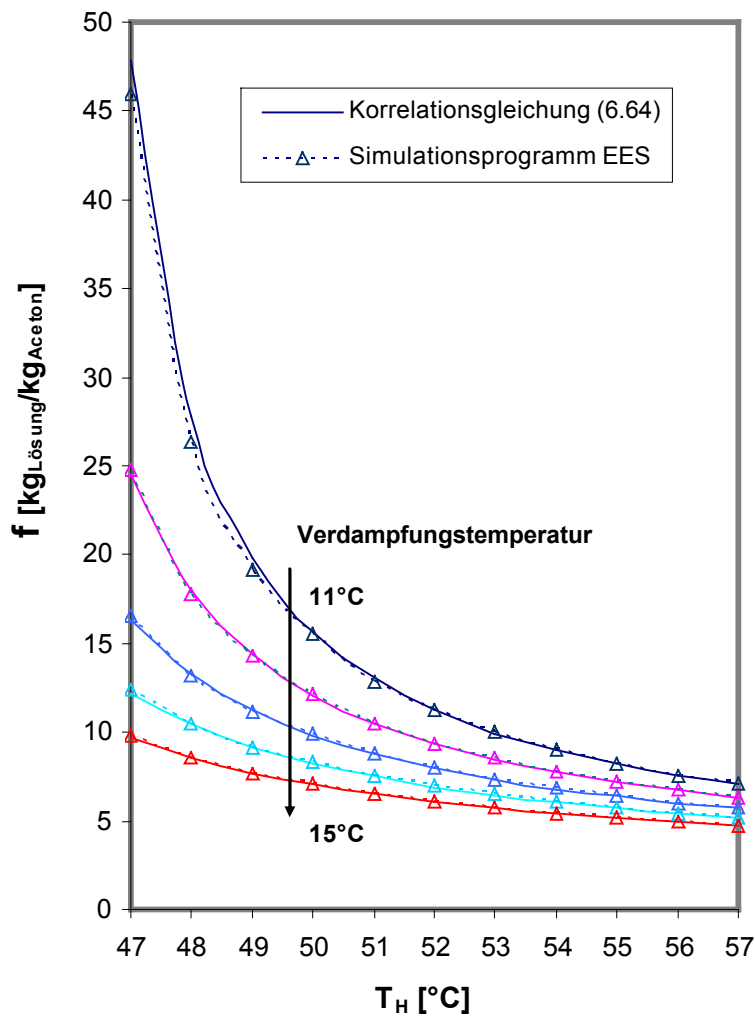


**Bild 90:** Spezifischer Lösungsumlauf einer Aceton-Zinkbromid Absorptionskältemaschine in Abhängigkeit von der Verdampfungstemperatur und Austreibungstemperatur, bei Kondensationstemperatur von 28 °C, Absorptionstemperatur von 28 °C und Wärmewirkungsgrad des Lösungswärmetauschers von 75 %.

Mit steigender Austreibungstemperatur sinkt der erforderliche Lösungsumlauf ab und steigt das Wärmeverhältnis an. Der spezifische Lösungsumlauf kann ebenfalls durch eine Funktion mit hoher Übereinstimmung zu den Simulationsergebnissen (Bild 91) wiedergegeben werden:

$$f = \frac{0,205 - 0,03 \cdot T_H + 0,0138 \cdot T_o}{1 - 0,017 \cdot T_H - 0,02 \cdot T_o} \tag{163}$$

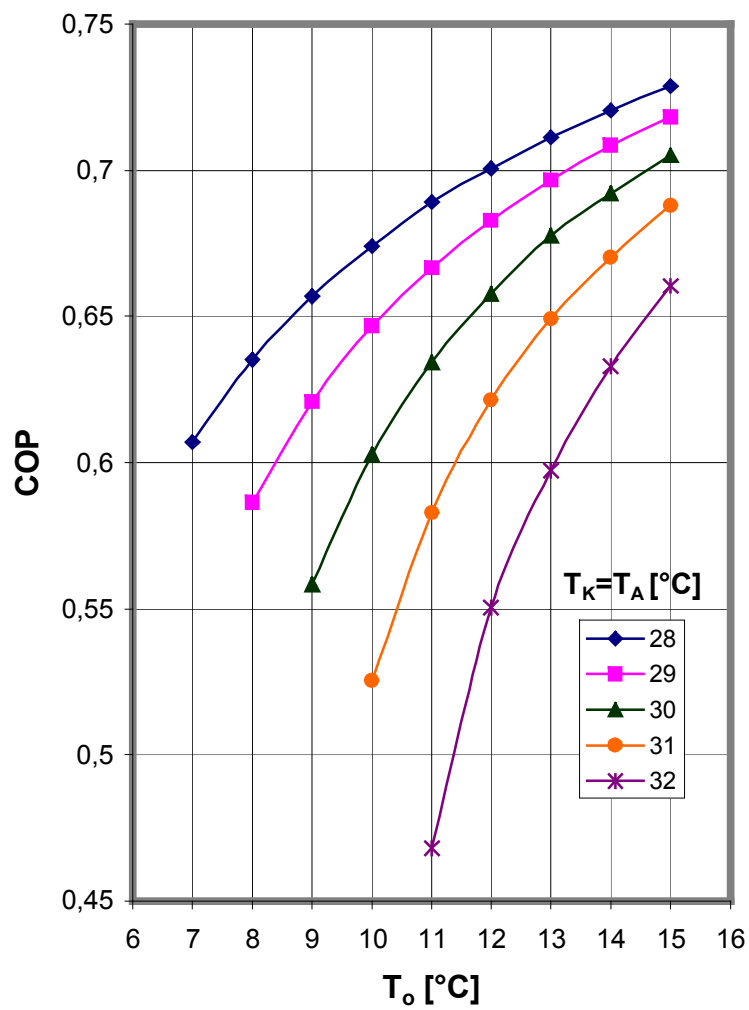
Die angegebene Gleichung wurde im Bereich:  $46\text{ °C} < T_H < 58\text{ °C}$  und  $9\text{ °C} < T_o < 19\text{ °C}$  angepasst. Man erkennt vom Bild 6.8, dass der optimale Arbeitsbereich im Hinblick auf die Austreibungstemperatur ab 55 °C liegt.



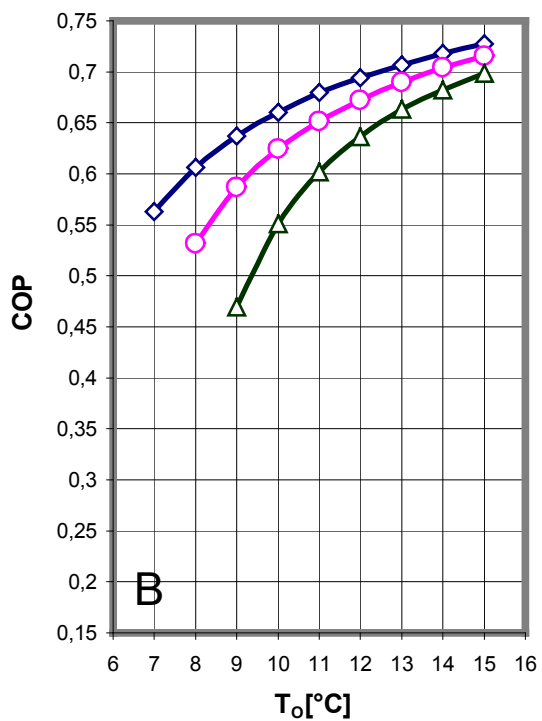
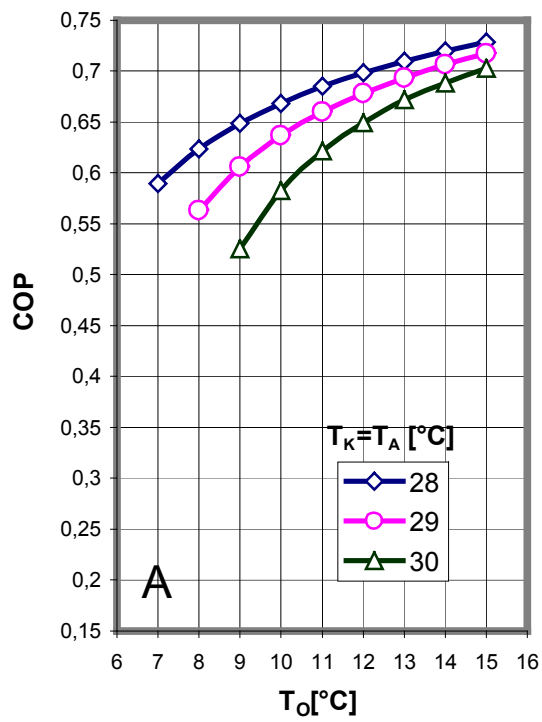
**Bild 91:** Spezifischer Lösungsumlauf einer Aceton-Zinkbromid Absorptionskältemaschine in Abhängigkeit von der Austreibungstemperatur und Verdampfungstemperatur bei Kondensationstemperatur von 28 °C, Absorptionstemperatur von 28 °C und Wirkungsgrad des Lösungswärmetauschers 75 %.

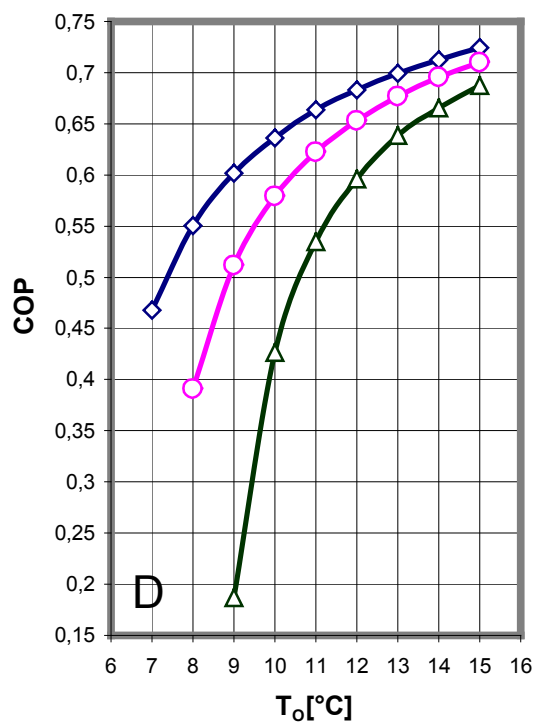
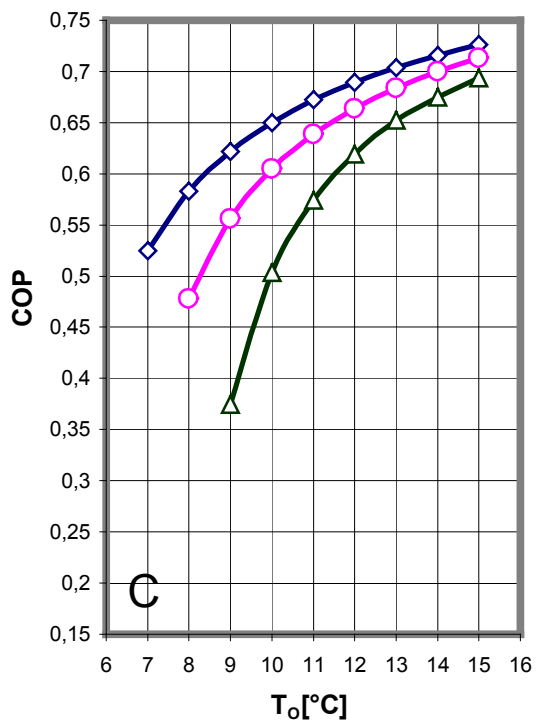
### 9.1.5.2 Einfluss der Kondensationstemperatur

Die Bilder 92-94 zeigen den Zusammenhang zwischen dem Wärmeverhältnis und den Kondensations- bzw. Absorptionstemperaturen. Die Diagramme wurden für verschiedene Kondensations- bzw. Absorptionstemperaturen (28- 32 °C) dargestellt. Die Austreibungstemperatur beträgt für Bild 92 (57 °C), für Bild 93 (von 53 °C bis 56 °C) und für Bild 94 (von 47 °C bis 50 °C).

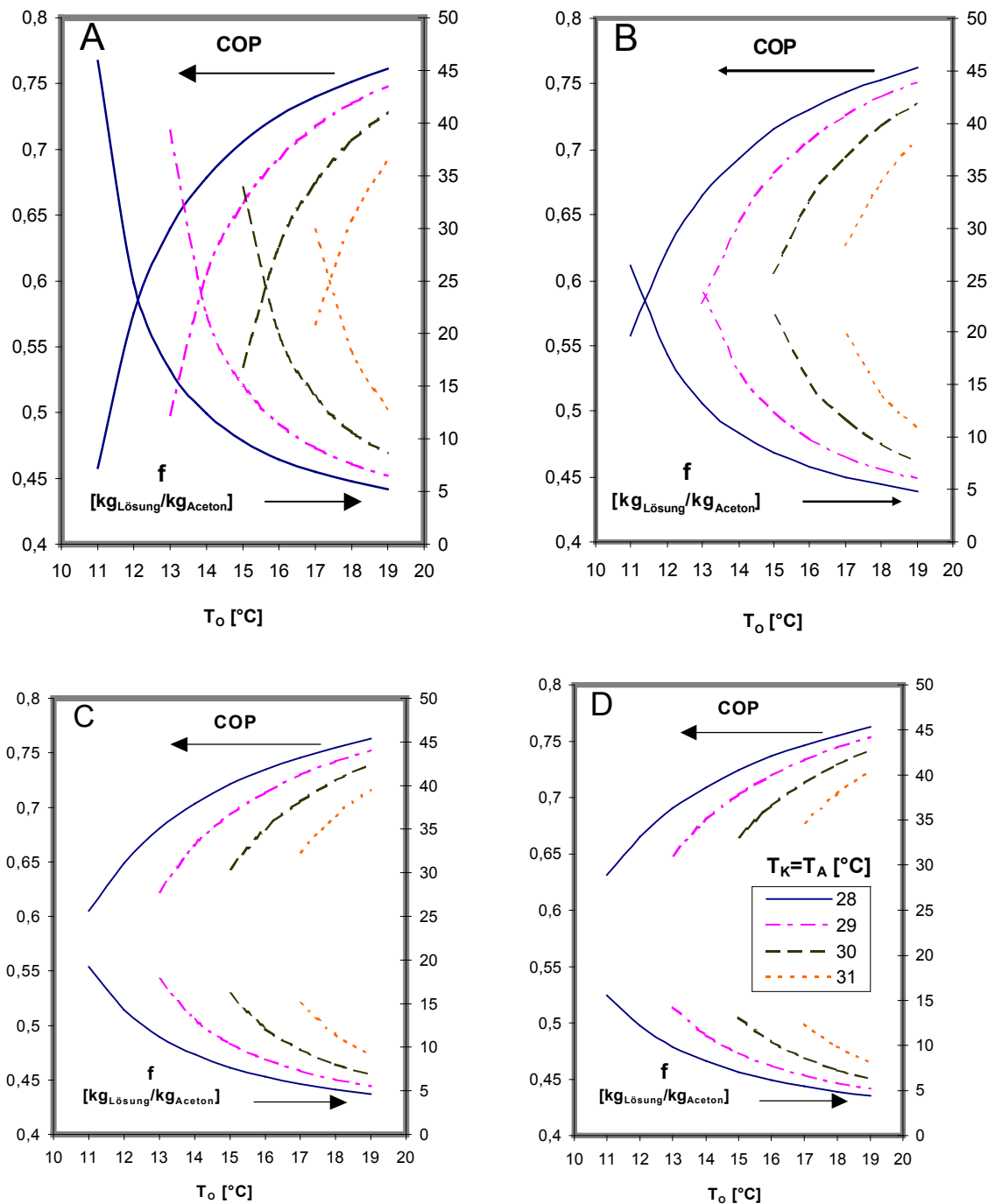


**Bild 92:** Leistungszahl einer Aceton-Zinkbromid Absorptionskältemaschine in Abhängigkeit von der Verdampfungstemperatur bei verschiedenen Kondensations- bzw. Absorptionstemperaturen (28– 32 °C), Austreibungstemperatur 57 °C





**Bild 93:** Leistungszahl einer Aceton-Zinkbromid Absorptionskältemaschine in Abhängigkeit von der Verdampfungstemperatur bei verschiedenen Kondensations- bzw. Absorptionstemperaturen (28–30 °C) und verschiedenen Austreibungstemperaturen: A: 56 °C, B: 55 °C, 54 °C, D: 53 °C



**Bild 94:** Leistungszahl und spezifischer Lösungsumlauf einer Aceton-Zinkbromid Absorptionskältemaschine in Abhängigkeit von der Verdampfungstemperatur bei verschiedenen Kondensations- bzw. Absorptionstemperaturen (28–31 °C) und verschiedenen Austreibungstemperaturen: A: 47 °C, B: 48 °C, C: 49 °C, D: 50 °C

Außerdem wurde in Bild 94 auch der spezifische Lösungsumlauf der Maschine für jede Kondensations- bzw. Absorptionstemperatur dargestellt. Aus den Bildern 92-94 ist es ersichtlich, dass das Wärmeverhältnis mit steigender Kondensations- bzw. Absorptionstemperatur sinkt und der Lösungsumlauf steigt. Um ein hohes Wärmeverhältnis zu erzielen, wie die Bilder 87-94 zeigen, muss die Absorptionskältemaschine bei niedrigen Werten des spezifischen Lösungsumlaufs betrieben werden. D. h. die Maschine sollte möglichst, wenn es



ausreichend ist, bei höheren Austreibungs- bzw. Verdampfungstemperaturen und bei niedrigen Absorptions- bzw. Kondensationstemperaturen betrieben werden.

Als Verfahren zur Abschätzung der Leistungszahl des Gesamtsystems in Abhängigkeit von den internen Temperaturen ( $T_o$ ,  $T_K$ , und  $T_H$ ) bei dem Arbeitsstoffpaar Aceton-Zinkbromid wurden folgende Korrelationsgleichungen anhand des Programms *TableCurve* aufgestellt:

$$COP = \frac{k_1 + k_2 \cdot T_o + k_3 \cdot T_K}{1 + k_4 \cdot T_o + k_5 \cdot T_K} \quad (164)$$

$$k_1 = a_1 + \frac{b_1}{T_H^2} + c_1 \cdot e^{-T_H} \quad (165)$$

$$k_2 = a_2 + \frac{b_2}{T_H^2} + c_2 \cdot e^{-T_H} \quad (166)$$

$$k_3 = a_3 + b_3 \cdot T_H + \frac{c_3}{T_H} \quad (167)$$

$$k_4 = a_4 + \frac{b_4}{T_H^{0,5}} + c_4 \cdot e^{-T_H} \quad (168)$$

$$k_5 = a_5 + b_5 \cdot T_H + c_5 \cdot e^{-T_H} \quad (169)$$

Die Gültigkeitsbereiche dieser Gleichungen liegen bei  $46 \text{ °C} < T_H < 58 \text{ °C}$ ,  $6 \text{ °C} < T_o < 20 \text{ °C}$  und  $27 \text{ °C} < T_K < 33 \text{ °C}$ . Die Parameter sind in der Tabelle 15 gegeben.

**Tabelle 15:** Koeffizienten zur Berechnung der Leistungszahl einer Aceton-Zinkbromid Absorptionskältemaschine anhand der Gleichungen (162-167)

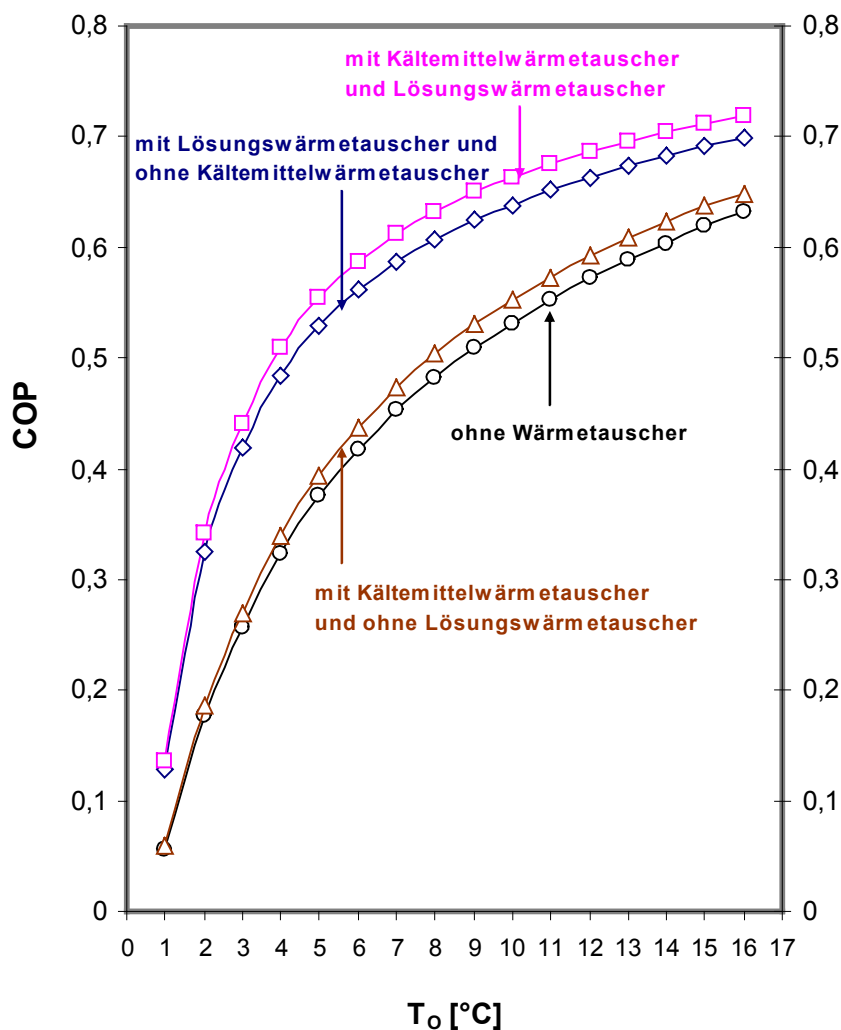
<b>a<sub>1</sub></b>	0,69178322	<b>b<sub>1</sub></b>	228,76787	<b>c<sub>1</sub></b>	-1,39 E+18
<b>a<sub>2</sub></b>	0,011646484	<b>b<sub>2</sub></b>	15,049146	<b>c<sub>2</sub></b>	8,77 E+16
<b>a<sub>3</sub></b>	0,05395573	<b>b<sub>3</sub></b>	-0,0005127431	<b>c<sub>3</sub></b>	-3,0366403
<b>a<sub>4</sub></b>	0,0031684386	<b>b<sub>4</sub></b>	0,12497938	<b>c<sub>4</sub></b>	2,164 E+17
<b>a<sub>5</sub></b>	-0,068300074	<b>b<sub>5</sub></b>	0,000568055	<b>c<sub>5</sub></b>	-2,7749 E+17

### 9.1.5.3 Einfluss der internen Wärmetauscher

Im Bild 95 sind die Einflüsse von Lösungs- und Kältemittelwärmetauschern (in der aufgebauten Laboranlage ist nur der Lösungswärmetauscher vorhanden) auf das Wärmeverhältnis COP einer Aceton-Zinkbromid Absorptionskältemaschine bei verschiedenen Verdampfungstemperaturen dargestellt. Für diese Darstellung beträgt die Kondensationstemperatur  $31 \text{ °C}$ , die Absorptionstemperatur  $26 \text{ °C}$  und die Austreibungstemperatur  $60 \text{ °C}$ . Aus dem Bild ist zu erkennen, dass die Steigerung des Wärmeverhältnisses bei Anwendung eines Lösungswärmetauschers viel größer als bei Anwendung eines Kältemittelwärmetauschers ist.

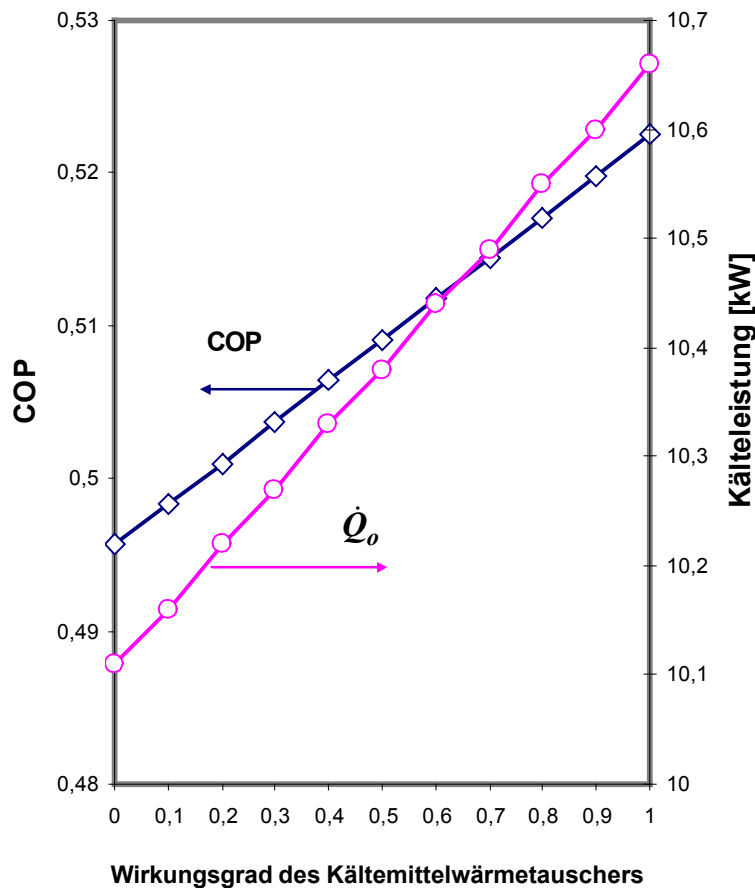
Weiterhin ist es ersichtlich, dass der Einfluss des Kältemittelwärmetauschers auf das Wärmeverhältnis kleiner als der Einfluss des Lösungswärmetauschers ist.

Wie das Bild zeigt, erhöht sich beim Einsatz eines Kältemittelwärmetauschers bei einer Verdampfungstemperatur von  $T_0 = 8\text{ °C}$  das Wärmeverhältnis von 0,48 auf 0,50, aber beim Einsatz eines Lösungswärmetauschers, unter gleichen Randbedingungen, dagegen von 0,48 auf 0,60. Die Gründe dafür sind der höhere Temperaturbereich sowie der größere Temperaturunterschied zwischen der armen Lösung und der reichen Lösung im Lösungswärmetauscher gegenüber dem Kältemitteldampf und der Kältemittelflüssigkeit im Kältemittelwärmetauscher.



**Bild 95:** Vergleich der Leistungszahl einer Aceton-Zinkbromid Absorptionskältemaschine in Abhängigkeit von der Verdampfungstemperatur bei Anwendung von internen Wärmetauschern bei Kondensationstemperatur von  $31\text{ °C}$ , Absorptionstemperatur von  $26\text{ °C}$  und Austreibungstemperatur von  $60\text{ °C}$ .

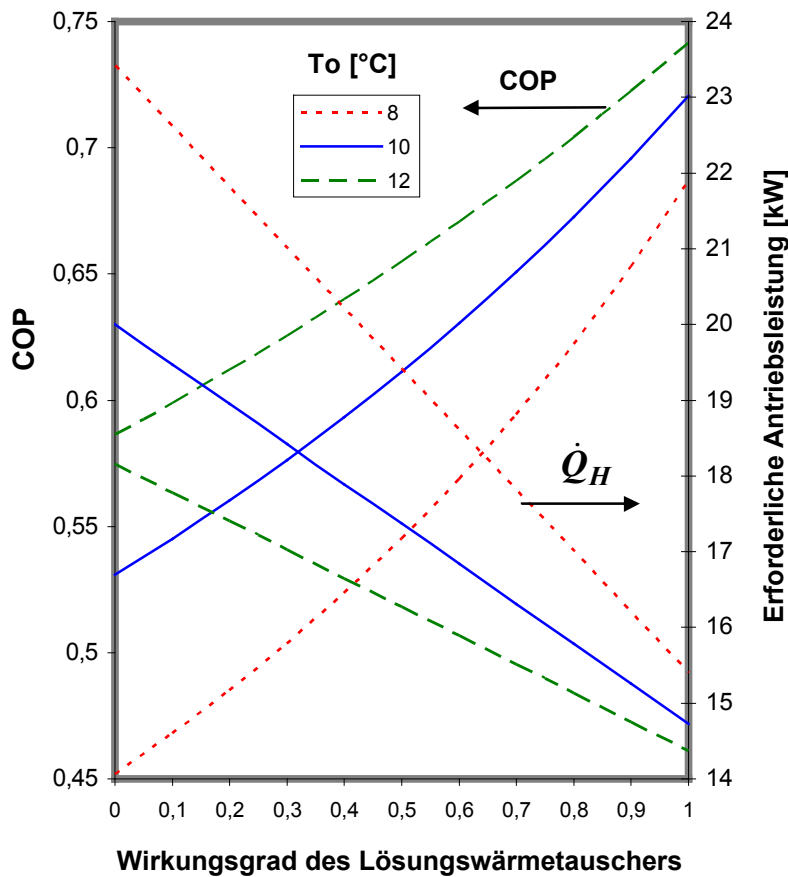
Im Bild 96 ist der Einfluss des Wärmewirkungsgrades des Kältemittelwärmetauschers auf das Wärmeverhältnis und die Kälteleistung einer Aceton-Zinkbromid Absorptionskältemaschine dargestellt. Die Randbedingungen für diese Darstellung sind: Verdampfungstemperatur 6 °C, Kondensations- bzw. Absorptionstemperatur 28 °C und Austreibungstemperatur 55 °C.



**Bild 96:** Leistungszahl und Kälteleistung einer Aceton-Zinkbromid Absorptionskältemaschine in Abhängigkeit vom Wärmewirkungsgrad des Kältemittelwärmetauschers bei Verdampfungstemperatur von 6 °C, Kondensationstemperatur von 28 °C, Absorptionstemperatur 28 °C und Austreibungstemperatur von 55 °C.

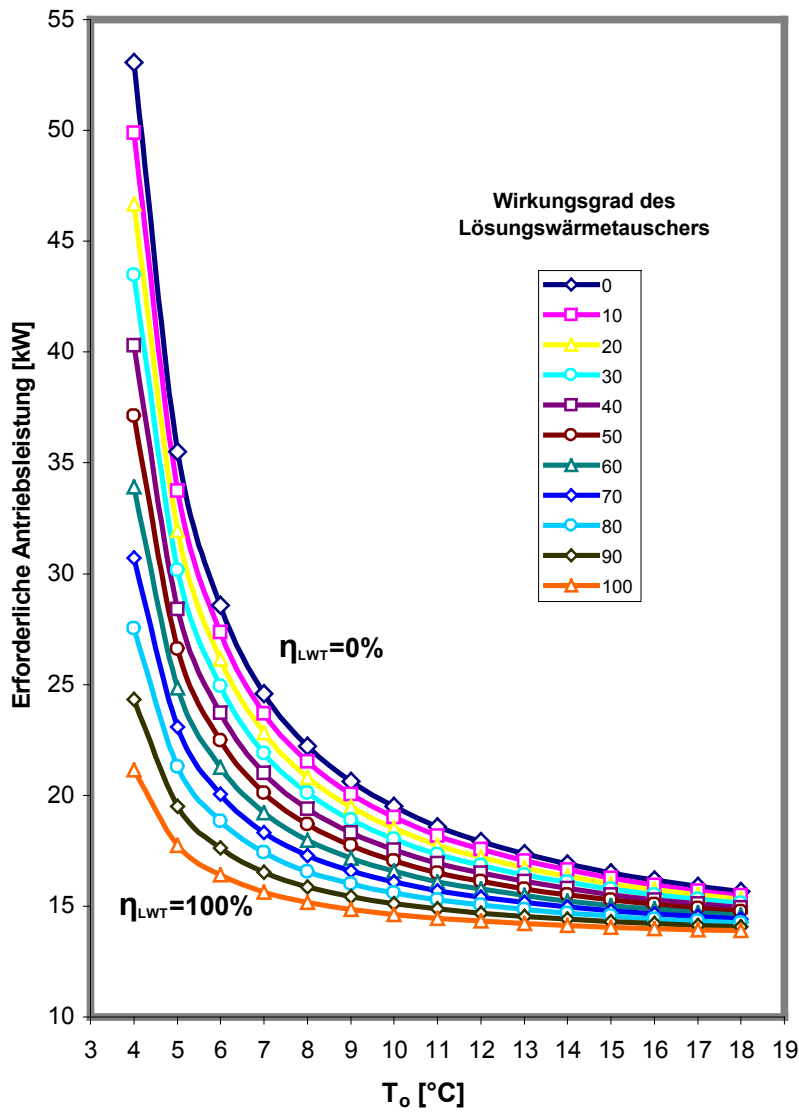
Wie das Bild 96 zeigt, je größer der Wirkungsgrad des Kältemittelwärmetauschers ist, desto größer sind die Kälteleistung bzw. das Wärmeverhältnis der Absorptionskältemaschine. Der Grund dafür ist die Absenkung der Temperatur der gesättigten Kältemittelflüssigkeit nach dem Kondensator und in Folge dessen die Erhöhung des Flüssigkeitsanteils sowie die Verdampfungsenthalpie im Verdampfer (Absenkung des dritten Teils in der Gleichung 122).

Im Bild 97 ist der Einfluss des Wärmewirkungsgrades des Lösungswärmetauschers auf das Wärmeverhältnis und die erforderliche Antriebsleistung einer Aceton-Zinkbromid Absorptionskältemaschine für drei verschiedene Verdampfungstemperaturen (8, 10, 12 °C) dargestellt. Die Berechnungen wurden hier mit einer Kondensationstemperatur von 28 °C, einer Absorptionstemperatur von 28 °C und einer Austreibungstemperatur von 55 °C durchgeführt.

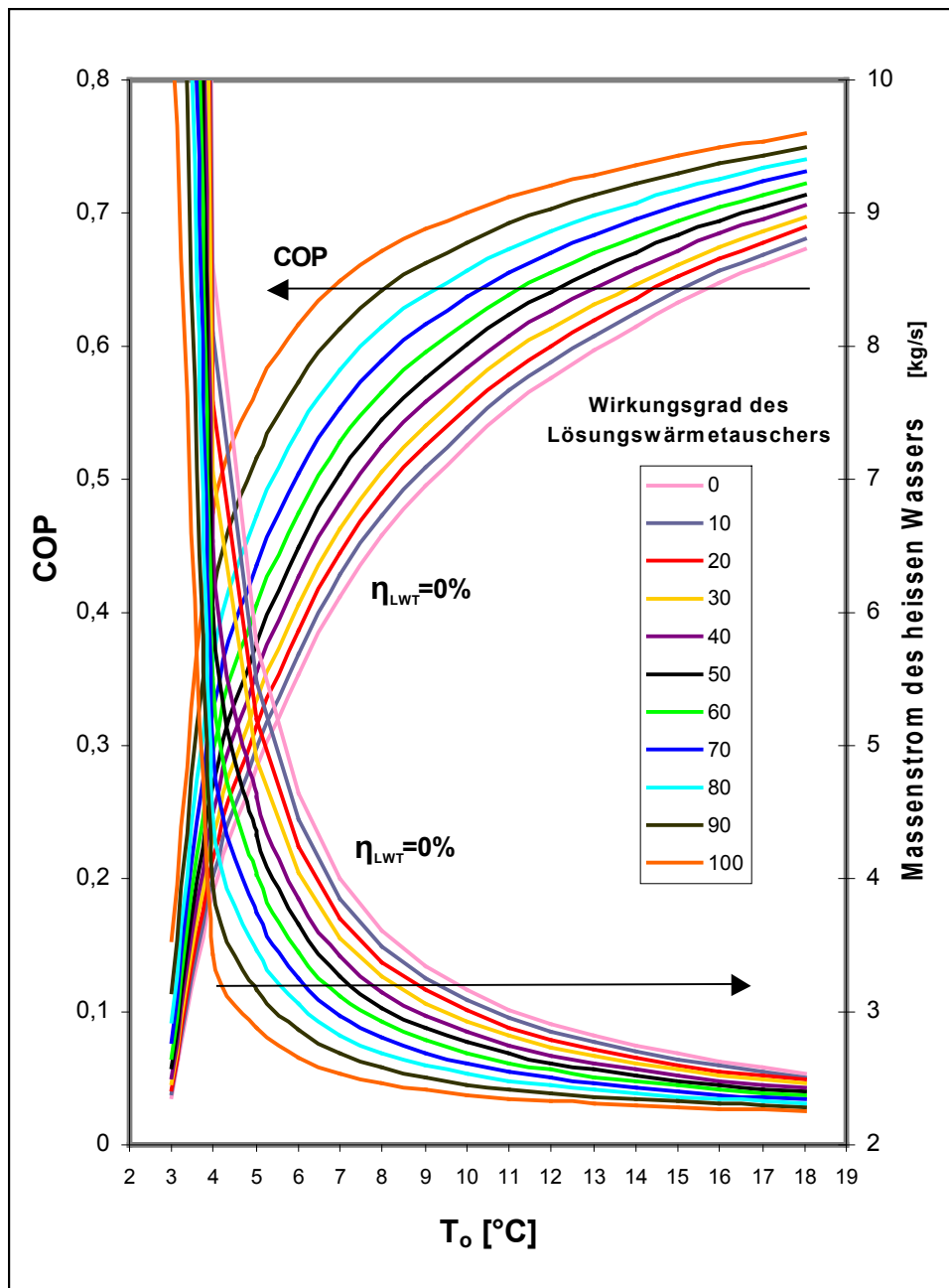


**Bild 97:** Die Leistungszahl und die erforderliche Antriebsleistung einer Aceton-Zinkbromid Absorptionskältemaschine in Abhängigkeit vom Wirkungsgrad des Lösungswärmetauschers bei verschiedenen Verdampfungstemperaturen (8-12 °C), bei Kondensationstemperatur von 28 °C, bei Absorptionstemperatur von 28 °C und bei Austreibungstemperatur von 55 °C (bei konstanter Kälteleistung)

Mit steigendem Wärmewirkungsgrad des Lösungswärmetauschers steigt das Wärmeverhältnis an und erreicht den höchsten Wert bei der größten Verdampfungstemperatur. Je größer der Wärmewirkungsgrad des Lösungswärmetauschers ist, wie das Bild 98 zeigt, desto kleiner ist die von der Sonne oder dem Wärmespeicher erforderliche Antriebsleistung bei konstanter Kälteleistung. Der Grund dafür ist die Erhöhung der Temperatur der in den Austreiber eingehenden reichen Lösung (Erhöhung des letzten Teiles in der Gleichung 107). Deswegen wird die erforderliche Antriebsleistung kleiner und in Folge weniger Massenstrom des heißen Wassers von den Kollektoren oder vom Wärmespeicher benötigt (Bild 99).



**Bild 98:** Erforderliche Austreibungsleistung einer Aceton-Zinkbromid Absorptionskältemaschine in Abhängigkeit von der Verdampfungstemperatur bei verschiedenen Wärmewirkungsgraden des Lösungswärmetauschers und bei folgenden Betriebstemperaturen: Kondensationstemperatur von 28 °C, Absorbtemperatur von 28 °C und Austreibungstemperatur von 56 °C.



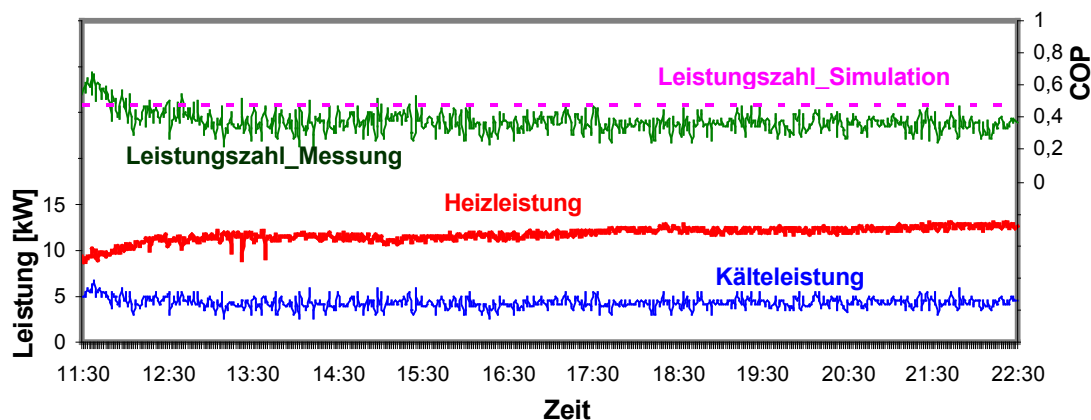
**Bild 99:** Massenstrom des zur Austreibung erforderlichen heißen Wassers und Leistungszahl einer Aceton-Zinkbromid Absorptionskältemaschine in Abhängigkeit von der Verdampfungstemperatur bei verschiedenen Wirkungsgraden des Lösungswärmetauschers und bei folgenden Betriebstemperaturen: Kondensationstemperatur von 28 °C, Absorbtemperatur von 28 °C und Austreibungstemperatur von 56 °C.

## 9.2 Vergleich zwischen Simulations- und Messergebnissen an einer Laborabsorptionskälteanlage

Die im Rahmen des Projektes geschaffene Laborabsorptionskälteanlage (Bild 51) wurde mit verschiedenen Betriebsbedingungen und unter Nutzung der beiden untersuchten Arbeitsstoffpaare ( $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$  und  $\text{Aceton}/\text{ZnBr}_2$ ) betrieben. Wie anfangs beschrieben wurde, ist diese Anlage mit vielen zusätzlichen Sensoren bestückt, sodass man die Betriebscharakteristik der Anlage unter den verschiedenen Betriebsbedingungen ermitteln kann. In diesem Abschnitt werden einige praktische Untersuchungsergebnisse mit denjenigen durch Simulation erhaltenen Ergebnissen verglichen und einige Aussagen über die Abweichungen gemacht.

Für die Durchführung des Versuchsbetriebes ist eine kontinuierliche Wärmeversorgung der Absorptionskältemaschine notwendig, deshalb sind zwei Elektroheizpatronen mit je 9 kW im Pufferspeicher integriert und können bei Bedarf über einen Thermostat stufenlos Heizwasser bis 95 °C bereitstellen.

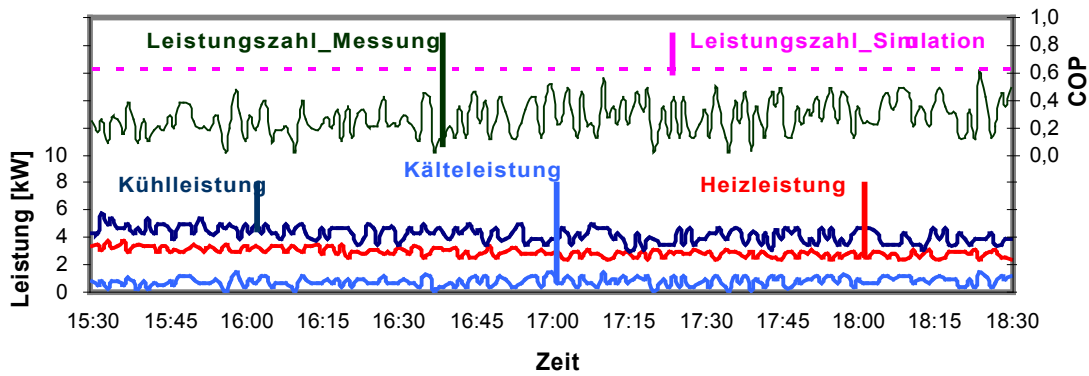
Ziel der Untersuchungen der beschriebenen Anlage besteht darin, die Betriebskurven der Laborabsorptionskältemaschine unter verschiedenen Randbedingungen und Arbeitsstoffpaaren zu ermitteln und daraus einige Optimierungsvorschläge für die vorgesehene solarthermisch betriebene Absorptionskältemaschine abzuleiten. Umfangreiche Messreihen /56,57/ wurden am Anfang zur Erprobung der Anlage mit dem Arbeitsstoffpaar Wasser-Lithiumbromid durchgeführt und ausgewertet. Ein Leistungsvergleich ist im Bild 100 zu sehen.



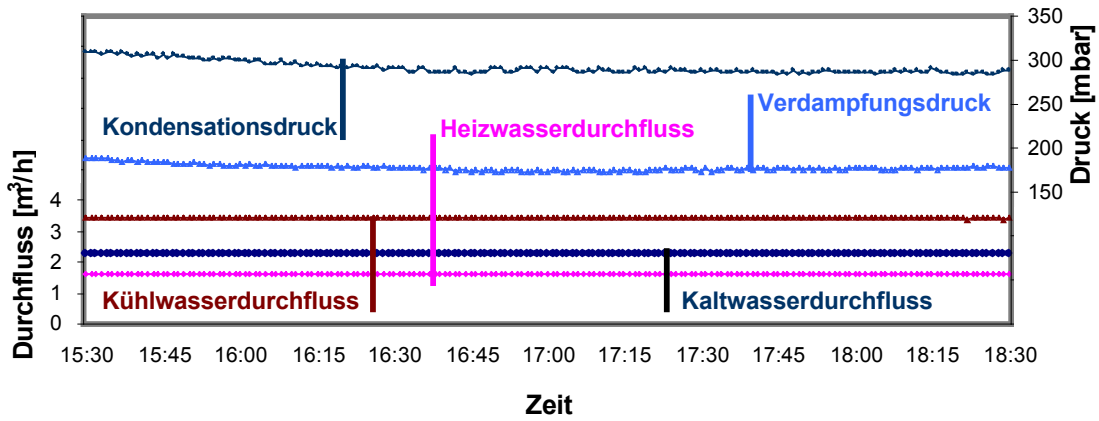
**Bild 100:** Ergebnisse einer Messreihe an der Laborabsorptionskälteanlage mit dem Arbeitsstoffpaar Wasser-Lithiumbromid an der TU Ilmenau (gemessene Prozessleistungen sowie gemessene und berechnete Leistungszahl)

Zur Ermittlung der Betriebskurven wurden die Betriebstemperaturen (Heizwassertemperatur und Kühlwassertemperatur) variiert und die dabei sich ergebenden Leistungen, Verdampfungstemperaturen und Leistungszahlen erfasst oder berechnet. Die Untersuchungsergebnisse unter verschiedenen Betriebszuständen haben gezeigt, dass die Anlage mit dem Arbeitsstoffpaar Wasser-Lithiumbromid eine minimale Heizwassertemperatur von 70 °C benötigt. Bei noch kleineren Heizwassertemperaturen sinkt die Leistungszahl unter 0,5 und ein kontinuierlicher Betrieb ist nicht mehr gewährleistet.

Im Gegensatz dazu konnte die Anlage mit dem neuen Arbeitsstoffpaar (Aceton-Zinkbromid) bei einer Austreibertemperatur ab 50 °C betrieben werden. Die Kaltwassertemperatur lag dabei am Anfang des Versuchs bei 20 °C und sank auf 13 °C ab. Die Messergebnisse einer Messreihe sind in den Bildern (101-103) dargestellt.

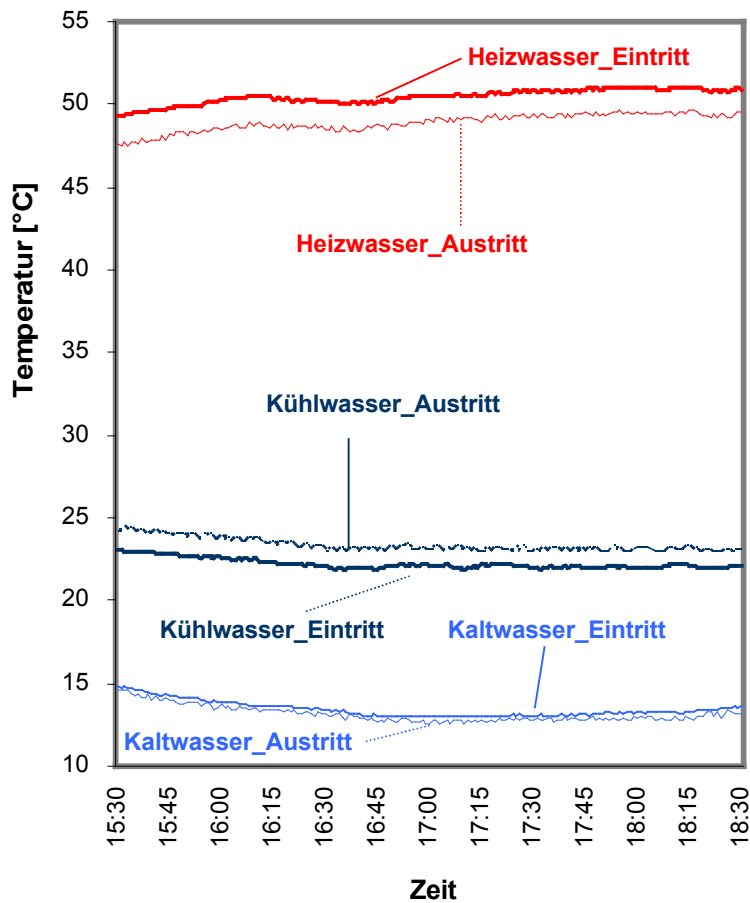


**Bild 101:** Gemessene Prozessleistungen sowie gemessene und berechnete Leistungszahl einer Messreihe an der Laborabsorptionskälteanlage mit dem Arbeitsstoffpaar Aceton-Zinkbromid an der TU Ilmenau



**Bild 102:** Ergebnisse einer Messreihe an der Laborabsorptionskälteanlage mit dem Arbeitsstoffpaar Aceton-Zinkbromid an der TU Ilmenau (gemessene Anlagendrucke sowie Durchflüsse der externen Medien)





**Bild 103:** Ergebnisse einer Messreihe an der Laborabsorptionskälteanlage mit dem Arbeitsstoffpaar Aceton-Zinkbromid an der TU Ilmenau (Temperaturverläufe der externen Medien)

Die Ergebnisse (Bilder 101-103) zeigen, dass sich die Absorptionskälteanlagen mit dem neuen Arbeitsstoffpaar Aceton-Zinkbromid bei Heiztemperaturen ab 50 °C problemlos betreiben lassen. Die erreichte Leistungszahl COP liegt bei ca. 0,40 (durch Messungen) und ca. 0,60 (durch Simulation). Wesentlicher Bestandteil der nächsten Arbeitsphasen ist das Erreichen höherer Leistungszahlen sowie das Erreichen der optimierten Betriebsweise der Anlage durch das Erproben der Maschine bei verschiedenen Randbedingungen und anschließend der Vergleich der Messergebnisse mit den Ergebnissen aus der Simulation.

## 10 Nutzen der Ergebnisse

Wie bereits im Rahmen der Formulierung des Vorhabenszwecks dargestellt wurde, besteht ein sehr weites Potenzial zur Nutzung der im Rahmen des Projektes untersuchten Anlagentechnik.

Das vorgelegte Ergebnis bietet die Möglichkeit der weiteren Verwertbarkeit des erlangten Wissens. Es wurden wesentliche neue Erkenntnisse über das thermodynamische System der Absorptionskältetechnik und über die Anwendbarkeit alternativer Arbeitsstoff-Kombinationen in der Simulation und in der technischen Anwendung gewonnen. Durch den im Laufe des Projektes stets währenden Fokus auf das Ziel der Anwendung im Niedertemperaturbereich konnten spezielle Erkenntnisse in Bezug auf die Konstruktion der Anlagentechnik gewonnen werden.

Aus diesen Erkenntnissen heraus bieten sich weitreichende Einsatzfelder. Diese sind hauptsächlich die Anwendung von Solartechnik in Bezug auf den Bedarf an Kälteenergie sowie die Nutzung von Niedertemperatur-Abwärmequellen aus industriellen Prozessen oder haustechnischen Anwendungen zur Kälteerzeugung. Bei der Nutzung der Solarenergie zur Kälteerzeugung steht der gleichzeitige Bedarf an Kälteenergie und die Solareinstrahlung im Einklang. Hieraus ergibt sich ein nützlicher Beitrag zur Einsparung an CO<sub>2</sub> sowie an Primärenergie. Weiterhin ergibt sich ein direkter Effizienznutzen beim Nutzer der untersuchten technischen Anlagen.

## 11 Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschrittenen Verwertungsplans

Mit der erfolgreichen Erprobung der Pilotanlage hat der Verbundpartner eine erhebliche Verbesserung und Erweiterung der Marktchancen seiner Produkte im In- und Ausland. Die Möglichkeit der Einführung einer Absorptionskälteanlage zum Betrieb mit Temperaturen zwischen 55 und 70 °C in den Markt bietet große Chancen einer weiteren Festigung und Sicherung der Marktposition und die positive Erweiterung des Produktprofils. Dies kann nachhaltig zu gesicherten Arbeitsplätzen führen und dem Verbundpartner langfristige Ertragsaussichten sichern. Der Bedarf an die Klimatisierungsanlagen unter technischer, ökologischer und wirtschaftlicher Optimierung derer Merkmale ist weltweit schier unerschöpflich.

Weiterhin besteht durch die Anwendung der Anlage als Demonstrationsanlage die Möglichkeit der Werbung für solche neue umweltfreundliche Technik in der Gebäudeklimatisierung. Dadurch wird ein Beitrag zur Umweltschonung geleistet.

Aus wissenschaftlicher Sicht werden durch Bearbeitung des Vorhabens wissenschaftliche Ergebnisse, besonders auf dem Gebiet der Systemsimulation, Systemoptimierung und Auswertung, erwartet. Die Auswertungsergebnisse werden direkt in den Lehrmaterialien zur Studentenausbildung integriert. Weiterhin waren Studenten und Doktoranden an der Bearbeitung des Projektes beteiligt. Dadurch haben sie neue Kenntnisse und Erfahrungen gesammelt. Mit diesen neuen Erfahrungen werden sie für die Verbreitung dieser neuen Technik beitragen und gleichzeitig den Anwenderkreis vergrößern.

## 12 Zusammenfassung

In diesem Bericht wurden die Hauptuntersuchungsergebnisse des o. g. Vorhabens dargestellt. Der Bericht beinhaltet 13 Kapitel und einen Anhang mit Ergebniskontrollbericht und einigen Tabellen. Im ersten Kapitel wurden die Ziele des Vorhabens und die Bearbeitungsschritte zur Erreichung dieser Ziele beschrieben. Im zweiten Kapitel wurden die Vorhabensdurchführung beschrieben und die daraus erfolgten Veröffentlichungen dargestellt. Das dritte Kapitel stellt die Hauptergebnisse des Vorhabens vor. Dieses Kapitel besteht aus mehreren Unterabschnitten. Dabei wurden die Ergebnisse der Materialuntersuchungen und Materialverträglichkeit mit dem neuen Arbeitsstoffpaar dargestellt. Weiterhin wurden in diesem Kapitel die Untersuchungsergebnisse an einem aufgebauten Versuchsrohrbündelwärmetauscher und an einer speziell angefertigten Laborabsorptionskältemaschine dargestellt. Die Voruntersuchungen dienten zur Ermittlung der Betriebscharakteristik des Kälteerzeugungssystems mit dem konventionellen Arbeitsstoffpaar  $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$  und mit dem neuen Arbeitsstoffpaar Aceton/Zinkbromid. Somit konnte man die Vor- und Nachteile der beiden Arbeitsstoffpaare gegenüberstellen und miteinander vergleichen. Der Hauptvorteil des neuen Arbeitsstoffpaares liegt in der Möglichkeit Niedertemperaturantriebsquellen (ab  $55\text{ °C}$ ) zum Antrieb der Absorptionskältemaschine einsetzen zu können.

In den Kapiteln 5 bis 7 wurden die theoretischen und praktischen Grundlagen zur Berechnung und Auslegung der neuen Absorptionskälteanlage beim Industriepartner dargestellt und dem Industriepartner zum Aufbau des Versuchsmusters vorgelegt.

Im Kapitel 8 wurde ein Rechenbeispiel zum Vergleich des neuen Arbeitsstoffpaares mit den konventionellen Arbeitsstoffpaaren dargelegt. Es wurde gezeigt, dass das neue Arbeitsstoffpaar einige Vorzüge im Hinblick auf erforderliche Antriebstemperatur und Druckverhältnis bei den gleichen Randbedingungen gegenüber den konventionellen Arbeitsstoffpaaren besitzt.

Im 9. Kapitel wurden die Simulationsergebnisse des Kälteerzeugungssystems zur Ableitung der Optimierungsmöglichkeiten der Betriebsweise der Absorptionskältemaschine mit dem neuen Arbeitsstoffpaar dargestellt. Weiterhin wurde ein Vergleich zwischen den Simulations- und Messergebnissen durchgeführt.

Im Anhang wurden der Ergebniskontrollbericht und die thermodynamischen Eigenschaften des neuen Arbeitsstoffpaares und des neuen Kältemittels (Aceton) dargestellt.

**Literaturverzeichnis**

- [1] Franzke, U.: „Solarunterstützte Entfeuchtung und Temperaturabsenkung zur Klimatisierung“, Solarunterstützte Klimatisierung Tagungsband zum BMFT-Workshop: „Einsatz von Solarenergie zur Gebäude-Klimatisierung,“, FIA (Forschungs-Informations-Austausch), 1994, Bietigheim-Bissingen
- [2] Lävemann, E.; Schölkopf, W.: „Klimatisierung über Sorption“ Solarunterstützte Klimatisierung, Tagungsband zum BMFT-Workshop: „Einsatz von Solarenergie zur Gebäude-Klimatisierung“, FIA (Forschungs-Informations-Austausch), 1994, Bietigheim-Bissingen
- [3] Steimel, F.: „Luftentfeuchtung und Temperaturabsenkung mittels solarunterstützter sorptiver Verfahren“, Solarunterstützte Klimatisierung, Tagungsband zum BMFT-Workshop: „Einsatz von Solarenergie zur Gebäude-Klimatisierung“, FIA (Forschungs-Informations-Austausch), 1994, Bietigheim-Bissingen
- [4] Heidt, F.D.; Lang, B.: „Systemauswahl und -Optimierung einer solarthermischen Anlage zur Kühlung, Heizung und Warmwassererzeugung“, 2. Internationales Sonnenforum, 12-14 Juli 1978, Hamburg, Volume 1, S. 487-501
- [5] Hornberger, M.: „Solar Unterstützte Heizung und Kühlung von Gebäuden“, Diss. A, Universität Stuttgart 1994
- [6] Eißer, W.: „Untersuchung des solarbeheizten Absorptions-Kältemaschinenprozesses zur Klimatisierung von Gebäuden“, Diss. A, Universität Dortmund 1983
- [7] Ajib, Salman; Sieckmann Hartmut; Voß, Eberhardt; Wiltzer, Karl-Heinz: „Eine autarke Absorptionskälteanlage“, 47. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, TU Ilmenau, 23 - 26. 09. 2002,
- [8] Albring, P.: „Anlagen und Systeme der solaren Kälteerzeugung“, Tagungsband Erstes Symposium Solares Kühlen in der Praxis, 2001, HfT Stuttgart, S: 105-123
- [9] Albers, J.: „Betriebserfahrungen mit solar gestützter Absorptionskälte bei den Bundesbauten in Berlin“, Band Zweites Symposium Solares Kühlen in der Praxis, 2002, HfT Stuttgart, 10.-11. Juni, S: 135-144
- [10] Eicker, U.: „Entwicklungstendenzen solarthermischer Kühlverfahren“, Band Zweites Symposium Solares Kühlen in der Praxis, 2002, HfT Stuttgart 10.-11. Juni 2002, S: 6-16
- [11] Höper, F.: „Primärenergetischer Vergleich von Verfahren der solarunterstützten Kühlung zur Gebäudeklimatisierung“ Diss. Uni. Dortmund, Fakultät Bauwesen, 1998, ISBN 3-8265-4564-8
- [12] Müller, F.U.: „Thermische Solarenergie erfolgreich nutzen“ Franzis-Verlag GmbH, 1997, Feldkirchen, ISBN 3-7723-4622-7
- [13] Moran, D.: „Weltweit Markttendenzen der Absorptionskältetechnik“ Wärme macht Kälte-Absorptionskälteerzeugung in der Praxis, S. 21-33; Internationale ASUE-Fachtagung 24. und 25. Januar 1996, Dresden
- [14] Grallert, H.; Herbricht, M.; Margulies, M.: „Vergleichende Konzeptstudie für den Einsatz von solarbeheizten bzw. betriebenen Absorptions- und Kompressionskältemaschinen“ BMFT-FB-T 81-165, (1981)
- [15] Ajib, S.; Schultheis, P.: „Untersuchungsergebnisse einer solarthermisch betriebenen Absorptionskälteanlage“, Fachzeitschrift Technik am Bau TAB 2/98 S. 49 – 54
- [16] Alefeld, G. u. a.: „Absorptionswärmepumpe mit variabler Wärmeauskopplung auf zwei Temperaturniveaus“, Informationszentrum Wärmepumpen + Kältetechnik IZW-Bericht 1/95

- [17] Molor, S.: „Solarbetriebene Sorptionskälteanlage für den Einsatz in Entwicklungsländer“, Diss. A, TU Dresden 1997
- [18] Meißner, E.: „Projekterfahrungen mit solaren Kältemaschinen: 17 kW NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O Absorptionskälteanlage für Weinkühlung beim Weingut Peitler in der Steiermark/Österreich“ Band Drittes Symposium Solares Kühlen in der Praxis, 2004, HfT Stuttgart 26.-27. April, S: 59-80
- [19] Safarik, M.; Weidner, G.: „Neue 15 kW H<sub>2</sub>O-LiBr Absorptionskälteanlage im Feldtest für thermische Anwendungen“ Band Drittes Symposium Solares Kühlen in der Praxis, 2004, HfT Stuttgart 26.-27. April, S: 159-172
- [20] Schweigler, C.; Costa, A.; Högenauer-Lego, M.; Harm, M.; Ziegler, F.: „Entwicklung und Betrieb einer 10 kW H<sub>2</sub>O/LiBr-Absorptionskältemaschine“, Band Zweites Symposium Solares Kühlen in der Praxis, 2002, HfT Stuttgart, 10.-11. Juni, S: 110-134
- [21] Jakob, U.; Schneider, D.; Eicker, U.: „Entwicklung einer Diffusions-Absorptionskältemaschine kleiner Leistung (2,5 kW)“ Band Drittes Symposium Solares Kühlen in der Praxis, 2004, HfT Stuttgart 26.-27. April, S: 125-144
- [22/ Dietz, B.; Kunkel, R.; Noeres, P.: „Vorrichtung zur Klimatisierung“, Offenlegungsschrift DE 19535841 A1, 1997
- [23] Hochhaus, K.-H.: „Vorrichtung zur Kälteerzeugung auf Schiffen“ Offenlegungsschrift DE 4307363 A1, 1994
- [24] Rojey, Georges; Le Pecq: „Verfahren zur Erzeugung von Kälte und/ oder Wärme mittels eines Absorptionszyklus“, Patentschrift DE 3014320 C2, 1991
- [25] Curtius, Friedrich: „Verfahren zur Erzeugung von Kälte und zur Umwandlung des vorhandenen Energiepotenzial in nutzbare Wärme und Energie“, Offenlegungsschrift DE 4003446 A1, 1991
- [26] Summerer, F.: „Flüssigkeitsdrossel, insbesondere für eine Absorptionswärmepumpe oder Absorptionskältemaschine“, Offenlegungsschrift DE 19620460 A1, 1997
- [27] Summerer, Franz: „Absorber/Verdampfer-Einheit“, Offenlegungsschrift DE 19620462 A1, 1997
- [28] Kleinmeir, H.-P.: „Austreiber/Absorber-Einheit“, Offenlegungsschrift DE 4033891A1, 1992
- [29] Ajib, S.; Siegmann, H; Voß, E.; Wiltzer, K.-H.: „Absorptionskälteanlage mit Niedertemperaturnutzung“, Patentschrift DE 101 08 768 C2, 2002
- [30] Ajib, S.: „Solarthermisch betriebene Absorptionskälteanlage“, Offenlegungsschrift DE 195 02 543 A1, Anmeldetag: 27. 01. 95
- [31] Ajib, S.: „Hybrid betriebene Absorptionskälteanlage“, Offenlegungsschrift DE 197 05 853 A1, Anmeldetag: 15. 02. 97
- [32] Jesinghaus, J.: „Stoffsysteme für Sorptionswärmepumpen“, Offenlegungsschrift DE 3142454 A1, 1983
- [33] Ziegenbein, B.: „Absorptionsmaschine“, Offenlegungsschrift DE 3220889 A1, 1983
- [34] Ohuchi, Y.; Osaka, J.P. u.a.: „Zusammensetzung eines Absorptionsmittels für Absorptions-Klimaanlage und Heißwasser-Versorgungsanlagen“, Offenlegungsschrift DE 3218744 A1, 1982
- [35] Ajib, S.: „Vorrichtung und Verfahren zur Bestimmung der Lösungskonzentration in einer Absorptionskältemaschine und Verfahren zur Regelung der Leistung einer Absorptionskältemaschine“, Patentanmeldung 102005 033 990.5, Anmeldetag: 21. 07. 2005

- [36] n. n.: „Training Manual, ANSYS (Heat Transfer)“ Inventory number: 001785, first edition, release 7.0, 2003
- [37] n. n.: „Training Manual, ANSYS (CFD Analysis)“ Inventory number: 001778, first edition, release 7.0, 2003
- [38] Schlünder, E.U.; Martin, H.: „Einführung in die Wärmeübertragung“ 8., neu bearbeitete Auflage, Braunschweig, 1995
- [39] VDI Wärmeatlas : „Berechnungsblätter für den Wärmeübergang“, GVC, 6.Auflage, Düsseldorf, 1991
- [40] Schnell, H. ; Slipcevic, B. : „Rohrbündelwärmetauscher, Grundlagen, Aufbau, Anwendung“, Böblingen 1990
- [41] Ajib, S.; Al-Najjar, S.; Wegner, R.: „Ein Arbeitsstoffgemisch für niedertemperaturbetriebene Absorptionskälteanlage“, angemeldete Patentschrift 100 43153.4, TU Ilmenau Juli 2000
- [42] Ajib, Salman; Al-Najjar, Sharaf; Wegner, Reiner: The Thermodynamic Properties of a New Solution to Use as a Work Mixture for an Absorption Refrigeration Machine“ 17th IUPAC Conference on Chemical Thermodynamics, ICCT 2002, University of Rostock, July 28- August 02, 2002.
- [43] Al-Najjar, S.: „Untersuchung geeigneter Arbeitsstoffpaare für Absorptionskältemaschinen unter Berücksichtigung der Wärmeprozessoptimierung“ Diss. A, TU Ilmenau, Januar 2002
- [44] Schmidt, D.: «Analytische Ermittlung der thermodynamischen Eigenschaften des Acetons zur Anwendung als Kältemittel », Studienarbeit, TU Ilmenau, 2005
- [45] R. Plank: „Sorptionskältemaschinen“, Handbuch der Kältetechnik, VII Band, Springer Verlag, Berlin, 1959
- [46] Jungnickel; Agsten; Kraus: „Wärmeübertrager“, Grundlagen der Kältetechnik, 2. Auflage VEB Verlag Technik, Berlin, 1980
- [47] Breidert, H.: „Projektierung von Kälteanlagen“, Berechnung. Auslegung. Beispiele, C. F. Müller Verlag, Heidelberg, 1995
- [48] Reinhart, A.: „Berechnung von Verdampfer und Verflüssiger“, Aufgabensammlung Kältetechnik, S. 91-104, C. F. Müller Verlag, Karlsruhe 1995
- [49] Dölz, H.; Otto, D.: „Wärmeübertrager und Stoffwerte“, Ammoniakverdichter-Kälteanlagen, Band 1 und 2, Verlag C. F. Müller, Heidelberg, 1993
- [50] Ajib, S.: „Beiträge zur Entwicklung und Auslegung solarthermisch betriebener Absorptionskältemaschinen zur Kälteerzeugung und Raumklimatisierung“ Habilitationsschrift, TU-Ilmenau, 2003
- [51] VDI Wärmeatlas: „Wärmeübertragung bei der Strömung durch Rohre“, Berechnungsblätter für die Wärmeübertragung, 5. Auflage, VDI Verlag Düsseldorf 1988
- [52] G. Alefeld u. a.: „Untersuchung fortgeschrittener Absorptionswärmepumpen“ Informationszentrum Wärmepumpen+Kältetechnik IZW-Bericht 3/92, S. III-18
- [53] Lucas, K.; Luckas, M.: „Berechnungsmethoden für Stoffeigenschaften“ In VDI-Wärmeatlas. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1993, S: Da
- [54] Ajib, S.; Thess, A. Siegmann, H; Voß, E.; Wiltzer, K.-H.: „Entwicklung eines neuen Systems zur Absorptionskälteerzeugung im niedrigen Leistungsbereich für die Trocknung/Klimatisierung von Prozessstickstoff in der Polyamidherstellung“, Abschlußbericht, AiF-Projekt, TU Ilmenau, 2001

- 
- [55] Karno, A.: "Simulation und Optimierung der Betriebsweise einer solarthermisch betriebenen Absorptionskältemaschine unter Berücksichtigung verschiedener Arbeitsstoffpaare", eingereichte Dissertationsschrift, TU Ilmenau, Feb. 2006
- [56] Ajib, S.; Nilius, A.; Dieba, J.; Diab, A.; Karno, A.: „Betriebscharakteristik einer solarthermisch betriebenen Absorptionskältemaschine im Kleinleistungsbereich“, 49. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Technische Universität Ilmenau, 27.-30. September 2004, Conference Proceedings, Volume 2, S: 85-91.
- [57] Ajib, S.; Nilius, A.; Karno, A. () „Erste Untersuchungsergebnisse eines Versuchsstandes einer niedertemperaturbetriebenen Absorptionskältemaschine“ 14. Symposium Thermische Solarenergie, 12. bis 14. Mai 2004, Bad Staffelstein, S:488- 493.

## Anhang

### A 1 Anlage 1: Ergebniskontrollbericht

#### A 1.1 Konkludenz des Ergebnisses zu den förderpolitischen Anforderungen des Vorhabens

Das förderpolitische Ziel des Vorhabens besteht in der Entwicklung einer Absorptionskälteanlagentechnik, die unter Verwendung von Niedertemperatur-Antriebsquellen betrieben werden kann. Dieses soll unter Einsatz eines alternativen Arbeitsstoffpaares erfolgen.

Das Ergebnis dieses Projektes lässt sich in folgenden Punkten auf die förderpolitischen Ziele des Projektes beziehen:

- Der Betrieb der Absorptionskälteanlage ist mit dem neuen Arbeitsstoffpaar möglich.
- Die Anlagentechnik lässt sich mit Temperaturen von ca. 60 – 65 °C betreiben.
- Es ergeben sich damit neue Möglichkeiten zur Nutzung von Niedertemperaturquellen, z. B. zur Nutzung von Solartechnik, Abwärmequellen in industriellen Prozessen.

Die erworbenen Erkenntnisse im Betrieb der Absorptionskältetechnik mit einem alternativen Arbeitsstoffpaar bilden die Grundlage für weitere Forschungen und Entwicklungen auf dem Gebiet dieser Technik. Weiterhin sind die Grundlagen geschaffen, diese Technik aus dem Labormaßstab über die Phase der Prototypenherstellung (Bestandteil dieses Projektes beim Industriepartner) in den Markt zu überführen.

#### A 1.2 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse, Nebenergebnisse, gesammelte wesentliche Erfahrungen

Die wissenschaftlich-technischen Ergebnisse des Projektes sollen an dieser Stelle noch einmal in Bezug auf die Arbeitspakete dargestellt werden.

Im ersten Teil des Projekts wurden die theoretischen Grundlagen der Aufgabenstellung erarbeitet. Hier wurden einerseits die Grundlagen der Wärme- und Stoffübertragungsvorgänge untersucht, die im Prozess der Absorptionskälteanlagentechnik die wesentlichen Vorgänge darstellen. Es wurden Methoden zur Simulation und Berechnung der Vorgänge, auch unter Anwendung der neuen Arbeitsstoffpaarkombination, entwickelt. Hieraus wurden erste Erfahrungen im Umgang mit den Stoffen gesammelt und wesentliche Erkenntnisse zu den Besonderheiten der Auslegung der Anlage gezogen.

In einem zweiten Arbeitspaket wurden die grundlegenden Stoffeigenschaften der Arbeitsstoffpaarkombination sowie der Einzelstoffe untersucht. Besonderer Wert wurde auf die thermodynamischen Eigenschaften und das hydraulische Verhalten der Stoffe gelegt. Im Ergebnis wurden die zur Bewertung der in der Absorptionskältemaschine wesentlich stattfindenden Prozesse unentbehrlichen Dampfdruckkurven entwickelt. Dies erfolgte unter großem Aufwand für sämtliche wesentliche Mischungsverhältnisse der bis dahin noch unbekanntem Arbeitsstoffpaarkombination.

Die praktischen Untersuchungen begannen mit dem Betrieb der Laboranlage vorerst mit dem herkömmlichen Arbeitsstoffpaar Wasser/Lithiumbromid. Im zweiten Teil wurden äquivalente Untersuchungen mit der neuen Arbeitsstoffpaarkombination durchgeführt. Es konnten Erkenntnisse über die wesentlichen Betriebskennzahlen der Absorptionskältetechnik gewonnen werden. In dessen Ergebnis konnte gezeigt werden, dass unter Einsatz des neuen Arbeitsstoffpaares ein Betrieb der Absorptionskältetechnik unter Nutzung von geringeren Beheizungs-temperaturen ab 60 °C möglich ist. Dies geschieht ohne wesentliche Einbuße des COP-Wertes und der erreichten Leistung der Anlage gegenüber dem Betrieb mit dem herkömmlichen Arbeitsstoffpaar.



### **A 1.3 Fortschreibung des Verwertungsplans**

#### **A 1.3.1 Erfindungen und Schutzrechtsanmeldungen sowie Schutzrechte**

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde eine Erfindung zur Konzentrationsbestimmung und Regelung der Anlage angemeldet /35/. Es ist auch vorgesehen, die beim Industriepartner aufgebaute Anlage durch Patentanmeldung zu schützen. Weitere zwei Patentanmeldungen sind nach Abschluss des Projektes durchgeführt.

#### **A 1.3.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende**

In erster Linie zeigte das vorliegende Projekt die technischen Möglichkeiten für die Nutzung von Absorptionskälteanlagen unter Anwendung alternativer Arbeitsstoffpaare. Es wurde in den zahlreichen Versuchen nachgewiesen, dass die Anwendung der alternativen Arbeitsstoffpaarkombination dazu führt, die Anlagen mit niederkalorischen Antriebsquellen ab einer Temperatur von 60 °C zu betreiben.

Diese Erkenntnis ist der wesentliche wirtschaftlich verwertbare Vorhabenszweck, aber auch die wesentliche Erkenntnis des Vorhabens.

Das beinahe größte Potenzial zur Effizienzsteigerung in der Energieanwendung besteht darin, möglichst Temperaturniveaus sinnvoll nutzbar zu machen, die möglichst weit an das Niveau der Umgebung heranreicht. Je näher ein Niveau am Umgebungsniveau liegt, desto häufiger liegen Abenergieströme, Energieverluste oder überschüssige Energien vor. Umso höher ist das wirtschaftliche Potenzial, sofern es - wie im vorliegenden Projekt - sinnvoll nutzbar gemacht werden kann. Den Opportunitätsaufwendungen zur Erzeugung von Kälteenergie ist nur mit höherwertigerer und somit teurerer Energie entgegenzutreten. Durch den möglichen Einsatz von quasi kostenlos (aufgrund nur selten vorliegender alternativer Nutzbarkeit) zur Verfügung stehender Antriebsenergie ist nicht nur ein herausregender wirtschaftlicher Nutzen zu erwarten sondern darüber hinaus auch der umweltpolitische Aspekt zu nennen. Es erfolgt durch den Einsatz der untersuchten Technik ein wesentlicher Beitrag zur Primärenergieeinsparung sowie zur Reduzierung des globalen CO<sub>2</sub>-Ausstoßes.

#### **A 1.3.3 Funktionale Zwecke**

Der wesentliche funktionale Zweck ergibt sich aus der möglich gewordenen Nutzung niederkalorischer Antriebsquellen zur Erzeugung von Kälteenergie.

Es ergeben sich Einsatzfelder im Bereich der rationellen Energieanwendung auf dem Gebiet der Kälteerzeugung im Allgemeinen.

Im Speziellen ergeben sich besonders sinnvolle Einsatzfelder in Gebieten der Welt, in denen die Sonneneinstrahlung mit größerer Wahrscheinlichkeit permanent ausreichend für die betrachtete Anlagentechnik zur Verfügung steht und andererseits auch wesentliche Belastungen von Mensch und Technik hervorruft. Hier steht die angebotene Energie der Sonne mit dem funktionalen Zweck der betrachteten Anlagentechnik mustergültig im Einklang.

Es wird durch den funktionalen Hintergrund nicht nur der Zweck der rationellen Anwendung von erneuerbarer Energiequellen forciert, sondern darüber hinaus eine Schonung humaner und technologischer Ressourcen in Bereichen, in denen die Bereitstellung herkömmlicher hochwertiger Energieträger nicht möglich wäre.

#### **A 1.3.4 Wissenschaftliche Nutzungsmöglichkeiten**

Wie in den vorigen Abschnitten aufgeführt, wurden im Laufe der Bearbeitung des Projektes mehrere wissenschaftliche Arbeiten (Studien-, Projekt- und Diplomarbeiten sowie eine Doktorarbeit und eine Habilitation) durchgeführt und gefertigt. Aber auch mehreren Veröffentlichungen wurden auf Tagungen und in Fachzeitschriften publiziert. Dadurch werden die Projektergebnisse für die Öffentlichkeit erreichbar und die Chancen zur Verbreitung der Anwendbarkeit dieser neuen Technik größer. Außerdem werden die wissenschaftlichen Ergebnisse in den Lehrmaterialien für die Studenten integriert.

#### **A 1.4 Anschlussmöglichkeiten für weitere Projektphase**

Die im Rahmen des Projekts dargestellten positiven Ergebnisse führen zwangsläufig zur Motivation zur Beantragung eines Anschlussprojekts im Sinne einer weiteren Untersuchungen an der Laboranlage des Industriepartners zur weiteren Optimierung und der Markteinführung der untersuchten Technik.

#### **A 1.5 Versunkene Arbeiten (Arbeiten ohne Lösung)**

Im Laufe des Projektes wurden alle Arbeiten bzw. Teilaufgaben, die zur Findung des geplanten Resultats beigetragen haben und notwendig waren, durchgeführt und führten zu Ergebnissen. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben, wurden nicht bekannt. Trotzdem gibt es noch ein großes Potenzial zur weiteren Optimierung der Anlage im Hinblick auf die Leistung und Leistungszahl. Diese wird bei Weiterführung des Projektes durchgeführt.

#### **A 1.6 Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung**

Die ursprüngliche Zeitplanung entsprechend dem Projektantrag konnte durch nicht vorgesehene Schwierigkeiten nicht eingehalten. Während der Vorhabensabarbeitung kam es zu Verzögerungen bei der vorgesehenen Beschaffung der Laboranlage. Es wurde durch den Projektträger eine beantragte kostenneutrale Verlängerung des Forschungsprojektes genehmigt.

Durch die zeitliche Verlängerung kam es zu keiner Erhöhung der Projektkosten.

## A 2 Anlage 2: Thermodynamische und physikalische Eigenschaften des neuen Arbeitsstoffpaares Aceton/Zinkbromid und des neuen Kältemittels Aceton

### A) Stoffwerte für Aceton-Zinkbromid (modulierte Daten von [43])

#### Spezifische Wärmekapazität [kJ/kg K]

Temperatur [°C]	25	30	35	40	45	50	55	60
Acetonanteil %								
30	1,018	1,023	1,028	1,033	1,038	1,044	1,049	1,055
35	1,078	1,084	1,089	1,095	1,101	1,107	1,113	1,119
40	1,140	1,147	1,153	1,160	1,166	1,173	1,180	1,187
45	1,204	1,212	1,219	1,226	1,234	1,241	1,249	1,256
50	1,270	1,278	1,286	1,294	1,302	1,310	1,319	1,327
55	1,335	1,344	1,353	1,362	1,371	1,380	1,389	1,399
60	1,400	1,409	1,419	1,429	1,439	1,449	1,459	1,470
65	1,462	1,472	1,483	1,494	1,505	1,516	1,527	1,539
70	1,521	1,532	1,544	1,555	1,567	1,579	1,592	1,604

#### Dampfdruck [bar]

Temperatur [°C]	25	30	35	40	45	50	55	60
Acetonanteil %								
30	0,065	0,080	0,098	0,121	0,148	0,180	0,215	0,255
35	0,086	0,107	0,134	0,167	0,206	0,251	0,302	0,357
40	0,117	0,147	0,186	0,234	0,290	0,353	0,424	0,503
45	0,158	0,200	0,254	0,320	0,397	0,483	0,579	0,684
50	0,200	0,255	0,324	0,407	0,503	0,611	0,729	0,857
55	0,230	0,291	0,369	0,463	0,570	0,689	0,820	0,961
60	0,243	0,305	0,385	0,479	0,588	0,710	0,842	0,986
65	0,254	0,314	0,392	0,485	0,592	0,712	0,843	0,984
70	0,285	0,347	0,426	0,520	0,629	0,750	0,883	1,027

**Dichte [g/cm<sup>3</sup>]**

Temperatur [°C]	25	30	35	40	45	50	55	60
<b>Acetonanteil %</b>								
<b>30</b>	2,617	2,604	2,591	2,578	2,565	2,553	2,540	2,527
<b>35</b>	2,292	2,279	2,266	2,253	2,241	2,228	2,215	2,202
<b>40</b>	2,013	2,001	1,988	1,975	1,962	1,949	1,936	1,923
<b>45</b>	1,778	1,765	1,752	1,739	1,726	1,713	1,700	1,687
<b>50</b>	1,581	1,568	1,555	1,542	1,529	1,517	1,504	1,491
<b>55</b>	1,420	1,407	1,394	1,381	1,368	1,356	1,343	1,330
<b>60</b>	1,291	1,278	1,265	1,252	1,240	1,227	1,214	1,201
<b>65</b>	1,191	1,178	1,165	1,152	1,139	1,126	1,113	1,101
<b>70</b>	1,115	1,102	1,089	1,077	1,064	1,051	1,038	1,025

**Dynamische Viskosität [mPa S]**

Temperatur [°C]	25	30	35	40	45	50	55	60
<b>Acetonanteil %</b>								
<b>30</b>	263,295	191,626	142,103	106,703	80,862	61,789	47,686	37,338
<b>35</b>	71,999	58,427	47,100	37,698	29,959	23,667	18,642	14,732
<b>40</b>	20,268	17,384	14,825	12,578	10,631	8,971	7,588	6,470
<b>45</b>	6,953	6,180	5,485	4,867	4,323	3,855	3,460	3,137
<b>50</b>	3,356	3,060	2,793	2,555	2,345	2,163	2,010	1,884
<b>55</b>	1,973	1,832	1,704	1,590	1,489	1,402	1,328	1,268
<b>60</b>	1,291	1,213	1,143	1,080	1,024	0,976	0,935	0,902
<b>65</b>	0,895	0,848	0,805	0,766	0,733	0,703	0,679	0,659
<b>70</b>	0,638	0,607	0,579	0,554	0,532	0,513	0,497	0,484

**Wärmeleitfähigkeit [W/m K]**

Temperatur [°C]	25	30	35	40	45	50	55	60
<b>Acetonanteil %</b>								
<b>30</b>	0,0976	0,0963	0,0951	0,0939	0,0926	0,0914	0,0901	0,0888
<b>35</b>	0,1928	0,1015	0,1002	0,0989	0,0976	0,0963	0,0949	0,0935
<b>40</b>	0,1080	0,1066	0,1052	0,1039	0,1024	0,1011	0,0996	0,0982
<b>45</b>	0,1129	0,1115	0,1101	0,1087	0,1072	0,1057	0,1042	0,1027
<b>50</b>	0,1178	0,1163	0,1148	0,1133	0,1117	0,1103	0,1087	0,1071
<b>55</b>	0,1225	0,1209	0,1194	0,1178	0,1162	0,1147	0,1130	0,1114
<b>60</b>	0,1270	0,1254	0,1238	0,1222	0,1205	0,1189	0,1172	0,1155
<b>65</b>	0,1314	0,1298	0,1281	0,1264	0,1247	0,1230	0,1213	0,1196
<b>70</b>	0,1357	0,1340	0,1323	0,1306	0,1288	0,1270	0,1252	0,1234

**Spezifische Enthalpie [kJ/kg]**

<b>Temperatur [°C]</b>	<b>25</b>	<b>30</b>	<b>35</b>	<b>40</b>	<b>45</b>	<b>50</b>	<b>55</b>	<b>60</b>
<b>Acetonanteil %</b>								
<b>30</b>	-4,805	0,3824	5,598	10,84	16,09	21,36	26,65	31,95
<b>40</b>	27,89	33,7	39,55	45,42	51,32	57,24	63,19	69,17
<b>50</b>	60,58	67,03	73,5	80,01	86,55	93,13	99,74	106,4
<b>60</b>	93,28	100,3	107,5	114,6	121,8	129	136,3	143,6
<b>70</b>	126	133,7	141,4	149,2	157	164,9	172,8	180,8
<b>80</b>	158,7	167	175,4	183,8	192,2	200,8	209,4	218
<b>90</b>	191,4	200,3	209,3	218,4	227,5	236,7	245,9	255,3
<b>100</b>	224,1	233,6	243,3	252,9	262,7	272,5	282,5	292,5

**B) Stoffwerte für Aceton** (modulierte Daten von [44])**Tabelle 5:** Dampfdrücke von Aceton nach Reid [bar]

<b>T [K]</b>	<b>Tr</b>	<b>fr°(Tr)</b>	<b>fr 1(Tr)</b>	<b>LN(Psr)</b>	<b>Psr</b>	<b>Ps [bar]</b>
250	0,492029128	-5,54703145	-7,070644752	-7,731860679	0,000438627	<b>0,02088</b>
251	0,493997245	-5,502752915	-6,997250777	-7,664903405	0,000469002	<b>0,02233</b>
252	0,495965361	-5,458844536	-6,92464808	-7,598560793	0,000501172	<b>0,02386</b>
253	0,497933478	-5,41530181	-6,852826352	-7,532825152	0,000535224	<b>0,02548</b>
254	0,499901594	-5,372120305	-6,781775453	-7,46768892	0,000571247	<b>0,02720</b>
255	0,501869711	-5,32929566	-6,711485405	-7,403144651	0,000609334	<b>0,02901</b>
256	0,503837827	-5,286823582	-6,641946393	-7,339185018	0,00064958	<b>0,03093</b>
257	0,505805944	-5,244699844	-6,573148757	-7,27580281	0,000692084	<b>0,03295</b>
258	0,50777406	-5,202920285	-6,505082996	-7,212990931	0,00073695	<b>0,03509</b>
259	0,509742177	-5,161480807	-6,437739757	-7,150742392	0,000784282	<b>0,03734</b>
260	0,511710293	-5,120377378	-6,371109835	-7,089050317	0,000834189	<b>0,03972</b>
261	0,51367841	-5,079606025	-6,305184174	-7,027907935	0,000886785	<b>0,04222</b>
262	0,515646526	-5,039162838	-6,239953858	-6,96730858	0,000942185	<b>0,04486</b>
263	0,517614643	-4,999043964	-6,175410112	-6,907245688	0,00100051	<b>0,04763</b>
264	0,519582759	-4,95924561	-6,111544296	-6,847712798	0,001061882	<b>0,05056</b>
265	0,521550876	-4,91976404	-6,048347909	-6,788703544	0,001126428	<b>0,05363</b>
266	0,523518992	-4,880595575	-5,985812577	-6,730211661	0,00119428	<b>0,05686</b>
267	0,525487109	-4,841736588	-5,923930059	-6,672230976	0,001265572	<b>0,06025</b>
268	0,527455225	-4,803183509	-5,862692239	-6,614755411	0,001340443	<b>0,06382</b>
269	0,529423342	-4,76493282	-5,802091127	-6,557778978	0,001419034	<b>0,06756</b>
270	0,531391458	-4,726981056	-5,742118852	-6,501295781	0,001501492	<b>0,07149</b>
271	0,533359575	-4,689324801	-5,682767665	-6,445300009	0,001587968	<b>0,07560</b>
272	0,535327691	-4,651960691	-5,624029936	-6,389785941	0,001678615	<b>0,07992</b>
273	0,537295808	-4,61488541	-5,565898147	-6,334747937	0,001773593	<b>0,08444</b>
274	0,539263924	-4,57809569	-5,508364894	-6,280180443	0,001873063	<b>0,08918</b>
275	0,541232041	-4,541588313	-5,451422886	-6,226077985	0,001977191	<b>0,09413</b>
276	0,543200157	-4,505360105	-5,395064938	-6,17243517	0,00208615	<b>0,09932</b>
277	0,545168274	-4,469407937	-5,339283973	-6,119246684	0,002200113	<b>0,10475</b>
278	0,54713639	-4,433728727	-5,284073019	-6,066507289	0,00231926	<b>0,11042</b>
279	0,549104507	-4,398319436	-5,229425207	-6,014211824	0,002443774	<b>0,11635</b>
280	0,551072623	-4,363177068	-5,175333768	-5,962355202	0,002573843	<b>0,12254</b>
281	0,55304074	-4,328298669	-5,121792034	-5,910932408	0,002709659	<b>0,12901</b>
282	0,555008857	-4,29368133	-5,068793433	-5,8599385	0,002851419	<b>0,13576</b>
283	0,556976973	-4,259322177	-5,016331488	-5,809368607	0,002999323	<b>0,14280</b>
284	0,55894509	-4,225218382	-4,964399816	-5,759217925	0,003153577	<b>0,15014</b>
285	0,560913206	-4,191367152	-4,912992128	-5,70948172	0,00331439	<b>0,15780</b>
286	0,562881323	-4,157765736	-4,862102222	-5,660155323	0,003481976	<b>0,16578</b>
287	0,564849439	-4,12441142	-4,811723988	-5,611234132	0,003656554	<b>0,17409</b>
288	0,566817556	-4,091301526	-4,761851402	-5,562713609	0,003838346	<b>0,18274</b>
289	0,568785672	-4,058433414	-4,712478524	-5,514589278	0,004027581	<b>0,19175</b>
290	0,570753789	-4,025804481	-4,663599501	-5,466856727	0,00422449	<b>0,20113</b>
291	0,572721905	-3,993412158	-4,615208559	-5,419511603	0,004429309	<b>0,21088</b>
292	0,574690022	-3,961253912	-4,567300009	-5,372549614	0,00464228	<b>0,22102</b>

<b>T [K]</b>	<b>Tr</b>	<b>fr°(Tr)</b>	<b>fr 1(Tr)</b>	<b>LN(Psr)</b>	<b>Psr</b>	<b>Ps [bar]</b>
<b>293</b>	0,576658138	-3,929327242	-4,519868238	-5,325966527	0,004863648	<b>0,23156</b>
<b>294</b>	0,578626255	-3,897629684	-4,472907714	-5,279758167	0,005093662	<b>0,24251</b>
<b>295</b>	0,580594371	-3,866158804	-4,42641298	-5,233920415	0,005332578	<b>0,25388</b>
<b>296</b>	0,582562488	-3,834912203	-4,380378656	-5,188449208	0,005580655	<b>0,26569</b>
<b>297</b>	0,584530604	-3,803887512	-4,334799435	-5,143340538	0,005838155	<b>0,27795</b>
<b>298</b>	0,586498721	-3,773082395	-4,289670083	-5,098590451	0,006105346	<b>0,29068</b>
<b>299</b>	0,588466837	-3,742494546	-4,244985438	-5,054195046	0,006382502	<b>0,30387</b>
<b>300</b>	0,590434954	-3,712121688	-4,200740408	-5,010150474	0,0066699	<b>0,31755</b>
<b>301</b>	0,59240307	-3,681961577	-4,156929971	-4,966452938	0,00696782	<b>0,33174</b>
<b>302</b>	0,594371187	-3,652011995	-4,113549171	-4,923098689	0,007276548	<b>0,34644</b>
<b>303</b>	0,596339303	-3,622270756	-4,070593121	-4,880084031	0,007596376	<b>0,36166</b>
<b>304</b>	0,59830742	-3,5927357	-4,028056999	-4,837405313	0,007927597	<b>0,37743</b>
<b>305</b>	0,600275536	-3,563404696	-3,985936046	-4,795058934	0,008270511	<b>0,39376</b>
<b>306</b>	0,602243653	-3,534275639	-3,944225568	-4,753041339	0,008625422	<b>0,41066</b>
<b>307</b>	0,604211769	-3,505346452	-3,902920933	-4,71134902	0,008992638	<b>0,42814</b>
<b>308</b>	0,606179886	-3,476615086	-3,862017569	-4,669978515	0,009372471	<b>0,44622</b>
<b>309</b>	0,608148002	-3,448079515	-3,821510966	-4,628926403	0,009765237	<b>0,46492</b>
<b>310</b>	0,610116119	-3,419737741	-3,781396672	-4,588189312	0,010171259	<b>0,48425</b>
<b>311</b>	0,612084235	-3,391587789	-3,741670294	-4,54776391	0,01059086	<b>0,50423</b>
<b>312</b>	0,614052352	-3,363627712	-3,702327495	-4,507646908	0,011024371	<b>0,52487</b>
<b>313</b>	0,616020468	-3,335855585	-3,663363995	-4,467835059	0,011472125	<b>0,54619</b>
<b>314</b>	0,617988585	-3,308269506	-3,62477557	-4,428325158	0,011934461	<b>0,56820</b>
<b>315</b>	0,619956701	-3,2808676	-3,586558049	-4,389114038	0,012411721	<b>0,59092</b>
<b>316</b>	0,621924818	-3,253648013	-3,548707316	-4,350198573	0,01290425	<b>0,61437</b>
<b>317</b>	0,623892934	-3,226608913	-3,511219305	-4,311575678	0,013412399	<b>0,63856</b>
<b>318</b>	0,625861051	-3,199748492	-3,474090005	-4,273242304	0,013936523	<b>0,66352</b>
<b>319</b>	0,627829167	-3,173064965	-3,437315452	-4,23519544	0,014476981	<b>0,68925</b>
<b>320</b>	0,629797284	-3,146556566	-3,400891737	-4,197432113	0,015034133	<b>0,71578</b>
<b>321</b>	0,631765401	-3,120221553	-3,364814995	-4,159949386	0,015608348	<b>0,74311</b>
<b>322</b>	0,633733517	-3,094058202	-3,329081413	-4,122744359	0,016199995	<b>0,77128</b>
<b>323</b>	0,635701634	-3,068064814	-3,293687224	-4,085814166	0,016809448	<b>0,80030</b>
<b>324</b>	0,63766975	-3,042239706	-3,258628708	-4,049155977	0,017437086	<b>0,83018</b>
<b>325</b>	0,639637867	-3,016581219	-3,223902192	-4,012766996	0,01808329	<b>0,86095</b>
<b>326</b>	0,641605983	-2,991087711	-3,189504046	-3,976644461	0,018748445	<b>0,89261</b>
<b>327</b>	0,6435741	-2,965757559	-3,155430687	-3,940785642	0,019432941	<b>0,92520</b>
<b>328</b>	0,645542216	-2,940589163	-3,121678574	-3,905187842	0,020137172	<b>0,95873</b>
<b>329</b>	0,647510333	-2,915580937	-3,088244211	-3,869848398	0,020861532	<b>0,99322</b>
<b>330</b>	0,649478449	-2,890731317	-3,055124142	-3,834764677	0,021606422	<b>1,02868</b>
<b>331</b>	0,651446566	-2,866038756	-3,022314955	-3,799934077	0,022372247	<b>1,06514</b>
<b>332</b>	0,653414682	-2,841501724	-2,989813279	-3,765354027	0,023159412	<b>1,10262</b>
<b>333</b>	0,655382799	-2,81711871	-2,957615781	-3,731021987	0,023968328	<b>1,14113</b>
<b>334</b>	0,657350915	-2,792888221	-2,925719171	-3,696935445	0,024799409	<b>1,18070</b>
<b>335</b>	0,659319032	-2,76880878	-2,894120195	-3,66309192	0,025653073	<b>1,22134</b>
<b>336</b>	0,661287148	-2,744878926	-2,86281564	-3,629488959	0,026529739	<b>1,26308</b>
<b>337</b>	0,663255265	-2,721097216	-2,831802329	-3,596124136	0,027429831	<b>1,30593</b>
<b>338</b>	0,665223381	-2,697462224	-2,801077124	-3,562995056	0,028353776	<b>1,34992</b>
<b>339</b>	0,667191498	-2,673972539	-2,770636923	-3,530099348	0,029302005	<b>1,39507</b>

<b>T [K]</b>	<b>Tr</b>	<b>fr°(Tr)</b>	<b>fr 1(Tr)</b>	<b>LN(Psr)</b>	<b>Psr</b>	<b>Ps [bar]</b>
<b>340</b>	0,669159614	-2,650626764	-2,74047866	-3,49743467	0,030274949	<b>1,44139</b>
<b>341</b>	0,671127731	-2,627423522	-2,710599305	-3,464998708	0,031273046	<b>1,48891</b>
<b>342</b>	0,673095847	-2,604361449	-2,680995861	-3,43278917	0,032296734	<b>1,53765</b>
<b>343</b>	0,675063964	-2,581439194	-2,651665369	-3,400803793	0,033346456	<b>1,58762</b>
<b>344</b>	0,67703208	-2,558655424	-2,622604901	-3,369040339	0,034422656	<b>1,63886</b>
<b>345</b>	0,679000197	-2,536008821	-2,593811564	-3,337496594	0,035525782	<b>1,69138</b>
<b>346</b>	0,680968313	-2,513498079	-2,565282496	-3,30617037	0,036656285	<b>1,74521</b>
<b>347</b>	0,68293643	-2,491121907	-2,53701487	-3,275059502	0,037814619	<b>1,80035</b>
<b>348</b>	0,684904546	-2,46887903	-2,509005889	-3,244161849	0,03900124	<b>1,85685</b>
<b>349</b>	0,686872663	-2,446768183	-2,481252788	-3,213475295	0,040216606	<b>1,91471</b>
<b>350</b>	0,688840779	-2,424788119	-2,453752832	-3,182997744	0,041461179	<b>1,97397</b>
<b>351</b>	0,690808896	-2,402937601	-2,426503317	-3,152727126	0,042735423	<b>2,03463</b>
<b>352</b>	0,692777012	-2,381215408	-2,39950157	-3,122661393	0,044039805	<b>2,09674</b>
<b>353</b>	0,694745129	-2,359620329	-2,372744946	-3,092798517	0,045374794	<b>2,16029</b>
<b>354</b>	0,696713245	-2,338151167	-2,346230829	-3,063136493	0,046740863	<b>2,22533</b>
<b>355</b>	0,698681362	-2,31680674	-2,319956632	-3,033673339	0,048138484	<b>2,29187</b>
<b>356</b>	0,700649478	-2,295585874	-2,293919797	-3,004407091	0,049568135	<b>2,35994</b>
<b>357</b>	0,702617595	-2,274487411	-2,268117792	-2,975335809	0,051030295	<b>2,42955</b>
<b>358</b>	0,704585711	-2,253510204	-2,242548114	-2,946457571	0,052525444	<b>2,50074</b>
<b>359</b>	0,706553828	-2,232653117	-2,217208285	-2,917770477	0,054054068	<b>2,57351</b>
<b>360</b>	0,708521944	-2,211915026	-2,192095854	-2,889272645	0,055616651	<b>2,64791</b>
<b>361</b>	0,710490061	-2,191294819	-2,167208398	-2,860962214	0,057213682	<b>2,72394</b>
<b>362</b>	0,712458178	-2,170791396	-2,142543516	-2,832837342	0,058845651	<b>2,80164</b>
<b>363</b>	0,714426294	-2,150403666	-2,118098837	-2,804896207	0,060513052	<b>2,88103</b>
<b>364</b>	0,716394411	-2,130130553	-2,09387201	-2,777137004	0,062216378	<b>2,96212</b>
<b>365</b>	0,718362527	-2,109970986	-2,069860711	-2,749557946	0,063956127	<b>3,04495</b>
<b>366</b>	0,720330644	-2,089923911	-2,046062641	-2,722157267	0,065732798	<b>3,12954</b>
<b>367</b>	0,72229876	-2,06998828	-2,022475522	-2,694933217	0,067546893	<b>3,21591</b>
<b>368</b>	0,724266877	-2,050163058	-1,999097102	-2,667884063	0,069398914	<b>3,30408</b>
<b>369</b>	0,726234993	-2,030447219	-1,975925151	-2,641008091	0,071289367	<b>3,39409</b>
<b>370</b>	0,72820311	-2,010839747	-1,952957461	-2,614303603	0,07321876	<b>3,48595</b>
<b>371</b>	0,730171226	-1,991339638	-1,930191848	-2,587768919	0,075187603	<b>3,57968</b>
<b>372</b>	0,732139343	-1,971945894	-1,907626149	-2,561402374	0,077196406	<b>3,67532</b>
<b>373</b>	0,734107459	-1,95265753	-1,885258223	-2,535202321	0,079245685	<b>3,77289</b>
<b>374</b>	0,736075576	-1,93347357	-1,863085949	-2,509167128	0,081335953	<b>3,87240</b>
<b>375</b>	0,738043692	-1,914393046	-1,841107229	-2,48329518	0,083467731	<b>3,97390</b>
<b>376</b>	0,740011809	-1,895415001	-1,819319985	-2,457584876	0,085641536	<b>4,07739</b>
<b>377</b>	0,741979925	-1,876538485	-1,79772216	-2,432034633	0,087857892	<b>4,18291</b>
<b>378</b>	0,743948042	-1,85776256	-1,776311715	-2,40664288	0,090117322	<b>4,29049</b>
<b>379</b>	0,745916158	-1,839086294	-1,755086634	-2,381408064	0,092420352	<b>4,40013</b>
<b>380</b>	0,747884275	-1,820508765	-1,734044918	-2,356328645	0,094767511	<b>4,51188</b>
<b>381</b>	0,749852391	-1,80202906	-1,713184588	-2,331403097	0,097159327	<b>4,62576</b>
<b>382</b>	0,751820508	-1,783646273	-1,692503685	-2,306629912	0,099596335	<b>4,74178</b>
<b>383</b>	0,753788624	-1,765359509	-1,672000266	-2,282007591	0,102079068	<b>4,85998</b>
<b>384</b>	0,755756741	-1,747167879	-1,65167241	-2,257534654	0,104608062	<b>4,98039</b>
<b>385</b>	0,757724857	-1,729070502	-1,631518212	-2,233209629	0,107183857	<b>5,10302</b>
<b>386</b>	0,759692974	-1,711066507	-1,611535784	-2,209031064	0,109806993	<b>5,22791</b>



<b>T [K]</b>	<b>Tr</b>	<b>fr°(Tr)</b>	<b>fr 1(Tr)</b>	<b>LN(Psr)</b>	<b>Psr</b>	<b>Ps [bar]</b>
<b>387</b>	0,76166109	-1,693155029	-1,591723257	-2,184997515	0,112478013	<b>5,35508</b>
<b>388</b>	0,763629207	-1,675335212	-1,572078779	-2,161107555	0,115197463	<b>5,48455</b>
<b>389</b>	0,765597323	-1,657606207	-1,552600516	-2,137359767	0,11796589	<b>5,61636</b>
<b>390</b>	0,76756544	-1,639967173	-1,533286649	-2,113752748	0,120783844	<b>5,75052</b>
<b>391</b>	0,769533556	-1,622417276	-1,514135377	-2,090285108	0,123651877	<b>5,88707</b>
<b>392</b>	0,771501673	-1,60495569	-1,495144914	-2,066955469	0,126570544	<b>6,02602</b>
<b>393</b>	0,773469789	-1,587581596	-1,476313492	-2,043762465	0,129540402	<b>6,16742</b>
<b>394</b>	0,775437906	-1,570294182	-1,457639357	-2,020704743	0,13256201	<b>6,31128</b>
<b>395</b>	0,777406022	-1,553092643	-1,439120771	-1,997780961	0,135635931	<b>6,45763</b>
<b>396</b>	0,779374139	-1,535976181	-1,420756012	-1,974989788	0,138762729	<b>6,60649</b>
<b>397</b>	0,781342255	-1,518944005	-1,402543374	-1,952329907	0,141942972	<b>6,75790</b>
<b>398</b>	0,783310372	-1,501995331	-1,384481163	-1,92980001	0,14517723	<b>6,91189</b>
<b>399</b>	0,785278488	-1,485129381	-1,366567702	-1,907398801	0,148466075	<b>7,06847</b>
<b>400</b>	0,787246605	-1,468345384	-1,348801328	-1,885124995	0,151810083	<b>7,22768</b>
<b>401</b>	0,789214722	-1,451642576	-1,331180393	-1,862977318	0,155209833	<b>7,38954</b>
<b>402</b>	0,791182838	-1,435020199	-1,313703262	-1,840954507	0,158665906	<b>7,55408</b>
<b>403</b>	0,793150955	-1,4184775	-1,296368314	-1,819055309	0,162178887	<b>7,72134</b>
<b>404</b>	0,795119071	-1,402013735	-1,279173941	-1,797278483	0,165749365	<b>7,89133</b>
<b>405</b>	0,797087188	-1,385628163	-1,262118551	-1,775622795	0,169377929	<b>8,06408</b>
<b>406</b>	0,799055304	-1,369320051	-1,245200562	-1,754087024	0,173065174	<b>8,23963</b>
<b>407</b>	0,801023421	-1,353088671	-1,228418407	-1,732669959	0,176811699	<b>8,41800</b>
<b>408</b>	0,802991537	-1,336933303	-1,211770532	-1,711370397	0,180618104	<b>8,59923</b>
<b>409</b>	0,804959654	-1,320853229	-1,195255395	-1,690187146	0,184484995	<b>8,78333</b>
<b>410</b>	0,80692777	-1,304847741	-1,178871466	-1,669119024	0,18841298	<b>8,97034</b>
<b>411</b>	0,808895887	-1,288916133	-1,162617229	-1,648164857	0,192402671	<b>9,16029</b>
<b>412</b>	0,810864003	-1,273057706	-1,146491178	-1,62732348	0,196454686	<b>9,35321</b>
<b>413</b>	0,81283212	-1,257271767	-1,13049182	-1,60659374	0,200569644	<b>9,54912</b>
<b>414</b>	0,814800236	-1,241557628	-1,114617675	-1,58597449	0,204748171	<b>9,74806</b>
<b>415</b>	0,816768353	-1,225914606	-1,098867272	-1,565464593	0,208990895	<b>9,95006</b>
<b>416</b>	0,818736469	-1,210342024	-1,083239153	-1,545062922	0,21329845	<b>10,15514</b>
<b>417</b>	0,820704586	-1,194839208	-1,067731871	-1,524768357	0,217671473	<b>10,36334</b>
<b>418</b>	0,822672702	-1,179405493	-1,052343991	-1,504579786	0,222110608	<b>10,57469</b>
<b>419</b>	0,824640819	-1,164040215	-1,037074086	-1,484496107	0,226616502	<b>10,78921</b>
<b>420</b>	0,826608935	-1,148742717	-1,021920744	-1,464516227	0,231189808	<b>11,00695</b>
<b>421</b>	0,828577052	-1,133512346	-1,00688256	-1,444639057	0,235831183	<b>11,22792</b>
<b>422</b>	0,830545168	-1,118348456	-0,991958141	-1,424863522	0,24054129	<b>11,45217</b>
<b>423</b>	0,832513285	-1,103250404	-0,977146104	-1,40518855	0,245320797	<b>11,67972</b>
<b>424</b>	0,834481401	-1,08821755	-0,962445076	-1,385613079	0,250170379	<b>11,91061</b>
<b>425</b>	0,836449518	-1,073249262	-0,947853695	-1,366136054	0,255090714	<b>12,14487</b>
<b>426</b>	0,838417634	-1,058344911	-0,933370607	-1,346756428	0,26008249	<b>12,38253</b>
<b>427</b>	0,840385751	-1,043503872	-0,918994468	-1,327473162	0,265146397	<b>12,62362</b>
<b>428</b>	0,842353867	-1,028725524	-0,904723946	-1,308285223	0,270283134	<b>12,86818</b>
<b>429</b>	0,844321984	-1,014009253	-0,890557715	-1,289191587	0,275493406	<b>13,11624</b>
<b>430</b>	0,8462901	-0,999354446	-0,876494461	-1,270191234	0,280777922	<b>13,36784</b>
<b>431</b>	0,848258217	-0,984760497	-0,862532877	-1,251283156	0,286137402	<b>13,62300</b>
<b>432</b>	0,850226333	-0,970226802	-0,848671666	-1,232466347	0,291572571	<b>13,88177</b>
<b>433</b>	0,85219445	-0,955752763	-0,834909539	-1,21373981	0,297084161	<b>14,14418</b>

<b>T [K]</b>	<b>Tr</b>	<b>fr°(Tr)</b>	<b>fr 1(Tr)</b>	<b>LN(Psr)</b>	<b>Psr</b>	<b>Ps [bar]</b>
<b>434</b>	0,854162566	-0,941337784	-0,821245218	-1,195102556	0,302672912	<b>14,41026</b>
<b>435</b>	0,856130683	-0,926981275	-0,80767743	-1,176553601	0,308339571	<b>14,68005</b>
<b>436</b>	0,858098799	-0,912682649	-0,794204914	-1,158091967	0,314084894	<b>14,95358</b>
<b>437</b>	0,860066916	-0,898441322	-0,780826414	-1,139716685	0,319909644	<b>15,23090</b>
<b>438</b>	0,862035032	-0,884256717	-0,767540686	-1,121426789	0,325814594	<b>15,51203</b>
<b>439</b>	0,864003149	-0,870128256	-0,75434649	-1,103221321	0,331800524	<b>15,79702</b>
<b>440</b>	0,865971265	-0,856055369	-0,741242596	-1,085099331	0,337868223	<b>16,08591</b>
<b>441</b>	0,867939382	-0,842037487	-0,728227782	-1,067059872	0,34401849	<b>16,37872</b>
<b>442</b>	0,869907499	-0,828074046	-0,715300833	-1,049102004	0,350252133	<b>16,67550</b>
<b>443</b>	0,871875615	-0,814164485	-0,702460543	-1,031224793	0,356569969	<b>16,97630</b>
<b>444</b>	0,873843732	-0,800308247	-0,68970571	-1,013427312	0,362972824	<b>17,28114</b>
<b>445</b>	0,875811848	-0,786504778	-0,677035144	-0,995708637	0,369461537	<b>17,59006</b>
<b>446</b>	0,877779965	-0,772753527	-0,664447658	-0,978067853	0,376036956	<b>17,90312</b>
<b>447</b>	0,879748081	-0,759053948	-0,651942074	-0,960504049	0,382699938	<b>18,22034</b>
<b>448</b>	0,881716198	-0,745405495	-0,639517222	-0,943016317	0,389451353	<b>18,54178</b>
<b>449</b>	0,883684314	-0,73180763	-0,627171937	-0,925603759	0,396292082	<b>18,86747</b>
<b>450</b>	0,885652431	-0,718259815	-0,614905062	-0,908265479	0,403223017	<b>19,19745</b>
<b>451</b>	0,887620547	-0,704761514	-0,602715445	-0,891000587	0,410245061	<b>19,53177</b>
<b>452</b>	0,889588664	-0,691312199	-0,590601943	-0,873808199	0,417359132	<b>19,87047</b>
<b>453</b>	0,89155678	-0,677911339	-0,578563417	-0,856687435	0,424566158	<b>20,21359</b>
<b>454</b>	0,893524897	-0,664558411	-0,566598737	-0,839637421	0,431867081	<b>20,56119</b>
<b>455</b>	0,895493013	-0,651252893	-0,554706776	-0,822657287	0,439262855	<b>20,91330</b>
<b>456</b>	0,89746113	-0,637994266	-0,542886417	-0,805746168	0,446754448	<b>21,26998</b>
<b>457</b>	0,899429246	-0,624782012	-0,531136544	-0,788903205	0,454342843	<b>21,63126</b>
<b>458</b>	0,901397363	-0,61161562	-0,519456053	-0,772127541	0,462029036	<b>21,99720</b>
<b>459</b>	0,903365479	-0,598494579	-0,50784384	-0,755418326	0,469814038	<b>22,36785</b>
<b>460</b>	0,905333596	-0,585418382	-0,496298811	-0,738774714	0,477698875	<b>22,74324</b>
<b>461</b>	0,907301712	-0,572386522	-0,484819876	-0,722195864	0,485684587	<b>23,12344</b>
<b>462</b>	0,909269829	-0,559398498	-0,47340595	-0,705680937	0,493772232	<b>23,50850</b>
<b>463</b>	0,911237945	-0,546453811	-0,462055955	-0,689229101	0,501962883	<b>23,89845</b>
<b>464</b>	0,913206062	-0,533551963	-0,450768816	-0,672839528	0,510257628	<b>24,29337</b>
<b>465</b>	0,915174178	-0,52069246	-0,439543466	-0,656511392	0,518657575	<b>24,69329</b>
<b>466</b>	0,917142295	-0,507874811	-0,428378842	-0,640243873	0,527163847	<b>25,09827</b>
<b>467</b>	0,919110411	-0,495098525	-0,417273885	-0,624036155	0,535777586	<b>25,50837</b>
<b>468</b>	0,921078528	-0,482363115	-0,406227543	-0,607887426	0,544499951	<b>25,92364</b>
<b>469</b>	0,923046644	-0,469668098	-0,395238767	-0,591796877	0,553332121	<b>26,34414</b>
<b>470</b>	0,925014761	-0,457012991	-0,384306515	-0,575763704	0,562275293	<b>26,76993</b>
<b>471</b>	0,926982877	-0,444397314	-0,373429747	-0,559787106	0,571330684	<b>27,20105</b>
<b>472</b>	0,928950994	-0,43182059	-0,362607431	-0,543866286	0,580499531	<b>27,63758</b>
<b>473</b>	0,93091911	-0,419282343	-0,351838536	-0,528000451	0,589783092	<b>28,07957</b>
<b>474</b>	0,932887227	-0,406782101	-0,341122039	-0,512188811	0,599182645	<b>28,52709</b>
<b>475</b>	0,934855343	-0,394319392	-0,330456919	-0,49643058	0,608699491	<b>28,98018</b>
<b>476</b>	0,93682346	-0,381893747	-0,31984216	-0,480724975	0,618334952	<b>29,43893</b>
<b>477</b>	0,938791576	-0,369504701	-0,30927675	-0,465071217	0,628090373	<b>29,90338</b>
<b>478</b>	0,940759693	-0,357151789	-0,298759683	-0,449468531	0,637967121	<b>30,37361</b>
<b>479</b>	0,942727809	-0,344834548	-0,288289954	-0,433916144	0,647966589	<b>30,84969</b>
<b>480</b>	0,944695926	-0,332552518	-0,277866564	-0,418413286	0,658090193	<b>31,33167</b>

<b>T [K]</b>	<b>Tr</b>	<b>fr°(Tr)</b>	<b>fr 1(Tr)</b>	<b>LN(Psr)</b>	<b>Psr</b>	<b>Ps [bar]</b>
<b>481</b>	0,946664043	-0,32030524	-0,267488519	-0,402959193	0,668339372	<b>31,81964</b>
<b>482</b>	0,948632159	-0,308092259	-0,257154825	-0,3875531	0,678715593	<b>32,31365</b>
<b>483</b>	0,950600276	-0,295913119	-0,246864497	-0,372194249	0,689220349	<b>32,81378</b>
<b>484</b>	0,952568392	-0,283767368	-0,23661655	-0,356881882	0,699855158	<b>33,32010</b>
<b>485</b>	0,954536509	-0,271654555	-0,226410003	-0,341615246	0,710621567	<b>33,83269</b>
<b>486</b>	0,956504625	-0,259574231	-0,216243881	-0,32639359	0,721521148	<b>34,35162</b>
<b>487</b>	0,958472742	-0,247525949	-0,206117209	-0,311216167	0,732555505	<b>34,87697</b>
<b>488</b>	0,960440858	-0,235509264	-0,196029019	-0,296082231	0,743726268	<b>35,40881</b>
<b>489</b>	0,962408975	-0,223523731	-0,185978344	-0,28099104	0,755035101	<b>35,94722</b>
<b>490</b>	0,964377091	-0,21156891	-0,17596422	-0,265941854	0,766483694	<b>36,49229</b>
<b>491</b>	0,966345208	-0,199644359	-0,165985689	-0,250933937	0,778073772	<b>37,04409</b>
<b>492</b>	0,968313324	-0,187749641	-0,156041793	-0,235966555	0,789807089	<b>37,60272</b>
<b>493</b>	0,970281441	-0,175884317	-0,14613158	-0,221038975	0,801685434	<b>38,16824</b>
<b>494</b>	0,972249557	-0,164047953	-0,136254098	-0,20615047	0,813710628	<b>38,74076</b>
<b>495</b>	0,974217674	-0,152240115	-0,126408401	-0,191300311	0,825884528	<b>39,32036</b>
<b>496</b>	0,97618579	-0,140460371	-0,116593544	-0,176487776	0,838209026	<b>39,90713</b>
<b>497</b>	0,978153907	-0,128708289	-0,106808585	-0,161712142	0,850686046	<b>40,50116</b>
<b>498</b>	0,980122023	-0,11698344	-0,097052586	-0,146972689	0,863317555	<b>41,10255</b>
<b>499</b>	0,98209014	-0,105285397	-0,08732461	-0,132268701	0,876105553	<b>41,71139</b>
<b>500</b>	0,984058256	-0,093613733	-0,077623724	-0,117599463	0,889052079	<b>42,32777</b>
<b>501</b>	0,986026373	-0,081968022	-0,067948998	-0,102964262	0,902159214	<b>42,95180</b>
<b>502</b>	0,987994489	-0,070347842	-0,058299502	-0,088362388	0,915429076	<b>43,58358</b>
<b>503</b>	0,989962606	-0,058752769	-0,048674311	-0,073793132	0,928863827	<b>44,22321</b>
<b>504</b>	0,991930722	-0,047182384	-0,039072502	-0,059255787	0,942465668	<b>44,87079</b>
<b>505</b>	0,993898839	-0,035636265	-0,029493154	-0,04474965	0,956236846	<b>45,52644</b>
<b>506</b>	0,995866955	-0,024113995	-0,019935347	-0,030274017	0,970179651	<b>46,19025</b>
<b>507</b>	0,997835072	-0,012615156	-0,010398167	-0,01582819	0,984296418	<b>46,86235</b>
<b>508</b>	0,999803188	-0,001139333	-0,000880698	-0,001411468	0,998589527	<b>47,54285</b>
<b>508,1</b>	1	7E-06	7E-05	2,863E-05	1,00002863	<b>47,61136</b>

**Tabelle 6:** Spezifische Wärmekapazität des flüssigen Acetons nach Reid [kJ/kg·K]

T [K]	Tr	Cp [kJ/kgK]	T [K]	Tr	Cp [kJ/kgK]
250	0,492029128	2,18973	289	0,568785672	2,28353
251	0,493997245	2,19178	290	0,570753789	2,28630
252	0,495965361	2,19384	291	0,572721905	2,28908
253	0,497933478	2,19593	292	0,574690022	2,29188
254	0,499901594	2,19804	293	0,576658138	2,29470
255	0,501869711	2,20016	294	0,578626255	2,29753
256	0,503837827	2,20231	295	0,580594371	2,30039
257	0,505805944	2,20447	296	0,582562488	2,30326
258	0,50777406	2,20666	297	0,584530604	2,30615
259	0,509742177	2,20886	298	0,586498721	2,30905
260	0,511710293	2,21108	299	0,588466837	2,31197
261	0,51367841	2,21333	300	0,590434954	2,31491
262	0,515646526	2,21559	301	0,59240307	2,31787
263	0,517614643	2,21787	302	0,594371187	2,32085
264	0,519582759	2,22017	303	0,596339303	2,32384
265	0,521550876	2,22248	304	0,59830742	2,32685
266	0,523518992	2,22482	305	0,600275536	2,32988
267	0,525487109	2,22717	306	0,602243653	2,33293
268	0,527455225	2,22955	307	0,604211769	2,33600
269	0,529423342	2,23194	308	0,606179886	2,33908
270	0,531391458	2,23435	309	0,608148002	2,34218
271	0,533359575	2,23678	310	0,610116119	2,34530
272	0,535327691	2,23922	311	0,612084235	2,34844
273	0,537295808	2,24169	312	0,614052352	2,35160
274	0,539263924	2,24417	313	0,616020468	2,35477
275	0,541232041	2,24667	314	0,617988585	2,35796
276	0,543200157	2,24919	315	0,619956701	2,36118
277	0,545168274	2,25172	316	0,621924818	2,36441
278	0,54713639	2,25428	317	0,623892934	2,36766
279	0,549104507	2,25685	318	0,625861051	2,37092
280	0,551072623	2,25944	319	0,627829167	2,37421
281	0,55304074	2,26205	320	0,629797284	2,37752
282	0,555008857	2,26467	321	0,631765401	2,38084
283	0,556976973	2,26731	322	0,633733517	2,38419
284	0,55894509	2,26997	323	0,635701634	2,38755
285	0,560913206	2,27265	324	0,63766975	2,39094
286	0,562881323	2,27534	325	0,639637867	2,39434
287	0,564849439	2,27806	326	0,641605983	2,39777
288	0,566817556	2,28079	327	0,6435741	2,40121

<b>T [K]</b>	<b>Tr</b>	<b>Cp [kJ/kgK]</b>	<b>T [K]</b>	<b>Tr</b>	<b>Cp [kJ/kgK]</b>
<b>328</b>	0,645542216	<b>2,40468</b>	<b>369</b>	0,726234993	<b>2,56720</b>
<b>329</b>	0,647510333	<b>2,40816</b>	<b>370</b>	0,72820311	<b>2,57177</b>
<b>330</b>	0,649478449	<b>2,41167</b>	<b>371</b>	0,730171226	<b>2,57637</b>
<b>331</b>	0,651446566	<b>2,41519</b>	<b>372</b>	0,732139343	<b>2,58101</b>
<b>332</b>	0,653414682	<b>2,41874</b>	<b>373</b>	0,734107459	<b>2,58569</b>
<b>333</b>	0,655382799	<b>2,42231</b>	<b>374</b>	0,736075576	<b>2,59040</b>
<b>334</b>	0,657350915	<b>2,42590</b>	<b>375</b>	0,738043692	<b>2,59515</b>
<b>335</b>	0,659319032	<b>2,42951</b>	<b>376</b>	0,740011809	<b>2,59994</b>
<b>336</b>	0,661287148	<b>2,43315</b>	<b>377</b>	0,741979925	<b>2,60478</b>
<b>337</b>	0,663255265	<b>2,43680</b>	<b>378</b>	0,743948042	<b>2,60965</b>
<b>338</b>	0,665223381	<b>2,44048</b>	<b>379</b>	0,745916158	<b>2,61456</b>
<b>339</b>	0,667191498	<b>2,44418</b>	<b>380</b>	0,747884275	<b>2,61952</b>
<b>340</b>	0,669159614	<b>2,44790</b>	<b>381</b>	0,749852391	<b>2,62451</b>
<b>341</b>	0,671127731	<b>2,45165</b>	<b>382</b>	0,751820508	<b>2,62956</b>
<b>342</b>	0,673095847	<b>2,45542</b>	<b>383</b>	0,753788624	<b>2,63465</b>
<b>343</b>	0,675063964	<b>2,45921</b>	<b>384</b>	0,755756741	<b>2,63978</b>
<b>344</b>	0,67703208	<b>2,46303</b>	<b>385</b>	0,757724857	<b>2,64496</b>
<b>345</b>	0,679000197	<b>2,46687</b>	<b>386</b>	0,759692974	<b>2,65019</b>
<b>346</b>	0,680968313	<b>2,47074</b>	<b>387</b>	0,76166109	<b>2,65547</b>
<b>347</b>	0,68293643	<b>2,47463</b>	<b>388</b>	0,763629207	<b>2,66080</b>
<b>348</b>	0,684904546	<b>2,47854</b>	<b>389</b>	0,765597323	<b>2,66618</b>
<b>349</b>	0,686872663	<b>2,48248</b>	<b>390</b>	0,76756544	<b>2,67161</b>
<b>350</b>	0,688840779	<b>2,48645</b>	<b>391</b>	0,769533556	<b>2,67709</b>
<b>351</b>	0,690808896	<b>2,49044</b>	<b>392</b>	0,771501673	<b>2,68264</b>
<b>352</b>	0,692777012	<b>2,49446</b>	<b>393</b>	0,773469789	<b>2,68823</b>
<b>353</b>	0,694745129	<b>2,49850</b>	<b>394</b>	0,775437906	<b>2,69389</b>
<b>354</b>	0,696713245	<b>2,50257</b>	<b>395</b>	0,777406022	<b>2,69960</b>
<b>355</b>	0,698681362	<b>2,50667</b>	<b>396</b>	0,779374139	<b>2,70538</b>
<b>356</b>	0,700649478	<b>2,51080</b>	<b>397</b>	0,781342255	<b>2,71121</b>
<b>357</b>	0,702617595	<b>2,51496</b>	<b>398</b>	0,783310372	<b>2,71712</b>
<b>358</b>	0,704585711	<b>2,51914</b>	<b>399</b>	0,785278488	<b>2,72308</b>
<b>359</b>	0,706553828	<b>2,52335</b>	<b>400</b>	0,787246605	<b>2,72911</b>
<b>360</b>	0,708521944	<b>2,52760</b>	<b>401</b>	0,789214722	<b>2,73522</b>
<b>361</b>	0,710490061	<b>2,53187</b>	<b>402</b>	0,791182838	<b>2,74139</b>
<b>362</b>	0,712458178	<b>2,53618</b>	<b>403</b>	0,793150955	<b>2,74763</b>
<b>363</b>	0,714426294	<b>2,54051</b>	<b>404</b>	0,795119071	<b>2,75395</b>
<b>364</b>	0,716394411	<b>2,54488</b>	<b>405</b>	0,797087188	<b>2,76035</b>
<b>365</b>	0,718362527	<b>2,54928</b>	<b>406</b>	0,799055304	<b>2,76682</b>
<b>366</b>	0,720330644	<b>2,55371</b>	<b>407</b>	0,801023421	<b>2,77338</b>
<b>367</b>	0,72229876	<b>2,55817</b>	<b>408</b>	0,802991537	<b>2,78002</b>
<b>368</b>	0,724266877	<b>2,56267</b>	<b>409</b>	0,804959654	<b>2,78675</b>

<b>T [K]</b>	<b>Tr</b>	<b>Cp [kJ/kgK]</b>	<b>T [K]</b>	<b>Tr</b>	<b>Cp [kJ/kgK]</b>
410	0,80692777	2,79356	451	0,887620547	3,20414
411	0,808895887	2,80046	452	0,889588664	3,21977
412	0,810864003	2,80746	453	0,89155678	3,23588
413	0,81283212	2,81455	454	0,893524897	3,25249
414	0,814800236	2,82175	455	0,895493013	3,26963
415	0,816768353	2,82904	456	0,89746113	3,28733
416	0,818736469	2,83644	457	0,899429246	3,30563
417	0,820704586	2,84395	458	0,901397363	3,32455
418	0,822672702	2,85158	459	0,903365479	3,34414
419	0,824640819	2,85932	460	0,905333596	3,36444
420	0,826608935	2,86718	461	0,907301712	3,38550
421	0,828577052	2,87516	462	0,909269829	3,40736
422	0,830545168	2,88327	463	0,911237945	3,43007
423	0,832513285	2,89152	464	0,913206062	3,45370
424	0,834481401	2,89990	465	0,915174178	3,47831
425	0,836449518	2,90842	466	0,917142295	3,50397
426	0,838417634	2,91709	467	0,919110411	3,53076
427	0,840385751	2,92592	468	0,921078528	3,55875
428	0,842353867	2,93490	469	0,923046644	3,58805
429	0,844321984	2,94405	470	0,925014761	3,61876
430	0,8462901	2,95337	471	0,926982877	3,65099
431	0,848258217	2,96286	472	0,928950994	3,68486
432	0,850226333	2,97254	473	0,93091911	3,72052
433	0,85219445	2,98241	474	0,932887227	3,75812
434	0,854162566	2,99248	475	0,934855343	3,79785
435	0,856130683	3,00276	476	0,93682346	3,83990
436	0,858098799	3,01325	477	0,938791576	3,88450
437	0,860066916	3,02397	478	0,940759693	3,93189
438	0,862035032	3,03492	479	0,942727809	3,98238
439	0,864003149	3,04611	480	0,944695926	4,03628
440	0,865971265	3,05756	481	0,946664043	4,09398
441	0,867939382	3,06928	482	0,948632159	4,15592
442	0,869907499	3,08127	483	0,950600276	4,22261
443	0,871875615	3,09356	484	0,952568392	4,29463
444	0,873843732	3,10615	485	0,954536509	4,37268
445	0,875811848	3,11905	486	0,956504625	4,45758
446	0,877779965	3,13230	487	0,958472742	4,55031
447	0,879748081	3,14589	488	0,960440858	4,65204
448	0,881716198	3,15985	489	0,962408975	4,76418
449	0,883684314	3,17420	490	0,964377091	4,88846
450	0,885652431	3,18895	491	0,966345208	5,02702

T [K]	Tr	Cp [kJ/kgK]	T [K]	Tr	Cp [kJ/kgK]
492	0,968313324	5,18252	501	0,986026373	8,52780
493	0,970281441	5,35833	502	0,987994489	9,50607
494	0,972249557	5,55877	503	0,989962606	10,86752
495	0,974217674	5,78951	504	0,991930722	12,89266
496	0,97618579	6,05806	505	0,993898839	16,22403
497	0,978153907	6,37464	506	0,995866955	22,72825
498	0,980122023	6,75354	507	0,997835072	41,06060
499	0,98209014	7,21534	508	0,999803188	426,12853
500	0,984058256	7,79074			

Tabelle 7: Verdampfungsenthalpie des Acetons [kJ/kg]

T [K]	Tr	$\Delta h_v$ [kJ/kg]	T [K]	Tr	$\Delta h_v$ [kJ/kg]
250	0,492029128	581,68	282	0,555008857	553,14
251	0,493997245	580,82	283	0,556976973	552,21
252	0,495965361	579,96	284	0,55894509	551,28
253	0,497933478	579,10	285	0,560913206	550,34
254	0,499901594	578,24	286	0,562881323	549,40
255	0,501869711	577,37	287	0,564849439	548,46
256	0,503837827	576,50	288	0,566817556	547,52
257	0,505805944	575,63	289	0,568785672	546,57
258	0,50777406	574,76	290	0,570753789	545,62
259	0,509742177	573,89	291	0,572721905	544,67
260	0,511710293	573,01	292	0,574690022	543,72
261	0,51367841	572,13	293	0,576658138	542,76
262	0,515646526	571,25	294	0,578626255	541,80
263	0,517614643	570,37	295	0,580594371	540,84
264	0,519582759	569,48	296	0,582562488	539,87
265	0,521550876	568,59	297	0,584530604	538,90
266	0,523518992	567,70	298	0,586498721	537,93
267	0,525487109	566,81	299	0,588466837	536,96
268	0,527455225	565,92	300	0,590434954	535,98
269	0,529423342	565,02	301	0,59240307	535,00
270	0,531391458	564,12	302	0,594371187	534,01
271	0,533359575	563,22	303	0,596339303	533,03
272	0,535327691	562,32	304	0,59830742	532,04
273	0,537295808	561,41	305	0,600275536	531,05
274	0,539263924	560,50	306	0,602243653	530,05
275	0,541232041	559,59	307	0,604211769	529,05
276	0,543200157	558,68	308	0,606179886	528,05
277	0,545168274	557,76	309	0,608148002	527,05
278	0,54713639	556,84	310	0,610116119	526,04
279	0,549104507	555,92	311	0,612084235	525,03
280	0,551072623	555,00	312	0,614052352	524,02
281	0,55304074	554,07	313	0,616020468	523,00

T [K]	Tr	$\Delta hv$ [kJ/kg]
314	0,617988585	521,98
315	0,619956701	520,96
316	0,621924818	519,93
317	0,623892934	518,90
318	0,625861051	517,87
319	0,627829167	516,83
320	0,629797284	515,79
321	0,631765401	514,74
322	0,633733517	513,70
323	0,635701634	512,65
324	0,63766975	511,59
325	0,639637867	510,53
326	0,641605983	509,47
327	0,6435741	508,41
328	0,645542216	507,34
329	0,647510333	506,27
330	0,649478449	505,19
331	0,651446566	504,11
332	0,653414682	503,03
333	0,655382799	501,94
334	0,657350915	500,85
335	0,659319032	499,75
336	0,661287148	498,66
337	0,663255265	497,55
338	0,665223381	496,45
339	0,667191498	495,33
340	0,669159614	494,22
341	0,671127731	493,10
342	0,673095847	491,98
343	0,675063964	490,85
344	0,67703208	489,72
345	0,679000197	488,58
346	0,680968313	487,44
347	0,68293643	486,30
348	0,684904546	485,15
349	0,686872663	483,99
350	0,688840779	482,83
351	0,690808896	481,67
352	0,692777012	480,50
353	0,694745129	479,33
354	0,696713245	478,15
355	0,698681362	476,97
356	0,700649478	475,79
357	0,702617595	474,60
358	0,704585711	473,40
359	0,706553828	472,20
360	0,708521944	470,99

T [K]	Tr	$\Delta hv$ [kJ/kg]
361	0,710490061	469,78
362	0,712458178	468,57
363	0,714426294	467,34
364	0,716394411	466,12
365	0,718362527	464,89
366	0,720330644	463,65
367	0,72229876	462,41
368	0,724266877	461,16
369	0,726234993	459,90
370	0,72820311	458,65
371	0,730171226	457,38
372	0,732139343	456,11
373	0,734107459	454,83
374	0,736075576	453,55
375	0,738043692	452,26
376	0,740011809	450,97
377	0,741979925	449,67
378	0,743948042	448,36
379	0,745916158	447,05
380	0,747884275	445,73
381	0,749852391	444,40
382	0,751820508	443,07
383	0,753788624	441,73
384	0,755756741	440,39
385	0,757724857	439,04
386	0,759692974	437,68
387	0,76166109	436,31
388	0,763629207	434,94
389	0,765597323	433,56
390	0,76756544	432,17
391	0,769533556	430,78
392	0,771501673	429,38
393	0,773469789	427,97
394	0,775437906	426,55
395	0,777406022	425,13
396	0,779374139	423,70
397	0,781342255	422,26
398	0,783310372	420,81
399	0,785278488	419,35
400	0,787246605	417,89
401	0,789214722	416,41
402	0,791182838	414,93
403	0,793150955	413,44
404	0,795119071	411,94
405	0,797087188	410,43
406	0,799055304	408,92
407	0,801023421	407,39



T [K]	Tr	$\Delta hv$ [kJ/kg]
408	0,802991537	405,85
409	0,804959654	404,31
410	0,80692777	402,75
411	0,808895887	401,19
412	0,810864003	399,61
413	0,81283212	398,03
414	0,814800236	396,43
415	0,816768353	394,82
416	0,818736469	393,21
417	0,820704586	391,58
418	0,822672702	389,94
419	0,824640819	388,29
420	0,826608935	386,63
421	0,828577052	384,96
422	0,830545168	383,27
423	0,832513285	381,57
424	0,834481401	379,86
425	0,836449518	378,14
426	0,838417634	376,40
427	0,840385751	374,66
428	0,842353867	372,89
429	0,844321984	371,12
430	0,8462901	369,33
431	0,848258217	367,52
432	0,850226333	365,70
433	0,85219445	363,87
434	0,854162566	362,02
435	0,856130683	360,16
436	0,858098799	358,28
437	0,860066916	356,38
438	0,862035032	354,47
439	0,864003149	352,54
440	0,865971265	350,59
441	0,867939382	348,62
442	0,869907499	346,64
443	0,871875615	344,64
444	0,873843732	342,62
445	0,875811848	340,58
446	0,877779965	338,52
447	0,879748081	336,43
448	0,881716198	334,33
449	0,883684314	332,21
450	0,885652431	330,06
451	0,887620547	327,89
452	0,889588664	325,69
453	0,89155678	323,48
454	0,893524897	321,23

T [K]	Tr	$\Delta hv$ [kJ/kg]
455	0,895493013	318,96
456	0,89746113	316,67
457	0,899429246	314,34
458	0,901397363	311,99
459	0,903365479	309,61
460	0,905333596	307,20
461	0,907301712	304,76
462	0,909269829	302,28
463	0,911237945	299,77
464	0,913206062	297,23
465	0,915174178	294,65
466	0,917142295	292,03
467	0,919110411	289,38
468	0,921078528	286,68
469	0,923046644	283,94
470	0,925014761	281,16
471	0,926982877	278,33
472	0,928950994	275,46
473	0,93091911	272,53
474	0,932887227	269,56
475	0,934855343	266,53
476	0,93682346	263,44
477	0,938791576	260,29
478	0,940759693	257,07
479	0,942727809	253,79
480	0,944695926	250,44
481	0,946664043	247,02
482	0,948632159	243,52
483	0,950600276	239,93
484	0,952568392	236,25
485	0,954536509	232,47
486	0,956504625	228,60
487	0,958472742	224,61
488	0,960440858	220,50
489	0,962408975	216,27
490	0,964377091	211,90
491	0,966345208	207,37
492	0,968313324	202,67
493	0,970281441	197,79
494	0,972249557	192,71
495	0,974217674	187,40
496	0,97618579	181,83
497	0,978153907	175,97
498	0,980122023	169,76
499	0,98209014	163,17
500	0,984058256	156,11
501	0,986026373	148,48

T [K]	Tr	$\Delta hv$ [kJ/kg]
501	0,986026373	148,48
502	0,987994489	140,16
503	0,989962606	130,94
504	0,991930722	120,52

T [K]	Tr	$\Delta hv$ [kJ/kg]
505	0,993898839	108,37
506	0,995866955	93,46
507	0,997835072	73,10
508	0,999803188	29,39

Tabelle 8: Wärmeleitfähigkeit des flüssigen Acetons nach Reid [W/m·K]

T [K]	Tr	$\lambda'$ [W/mK]
250	0,492029128	0,16211
251	0,493997245	0,16176
252	0,495965361	0,16141
253	0,497933478	0,16107
254	0,499901594	0,16072
255	0,501869711	0,16037
256	0,503837827	0,16003
257	0,505805944	0,15968
258	0,50777406	0,15934
259	0,509742177	0,15899
260	0,511710293	0,15865
261	0,51367841	0,15830
262	0,515646526	0,15796
263	0,517614643	0,15762
264	0,519582759	0,15727
265	0,521550876	0,15693
266	0,523518992	0,15658
267	0,525487109	0,15624
268	0,527455225	0,15590
269	0,529423342	0,15555
270	0,531391458	0,15521
271	0,533359575	0,15487
272	0,535327691	0,15452
273	0,537295808	0,15418
274	0,539263924	0,15384
275	0,541232041	0,15349
276	0,543200157	0,15315
277	0,545168274	0,15281
278	0,54713639	0,15246
279	0,549104507	0,15212
280	0,551072623	0,15178
281	0,55304074	0,15143
282	0,555008857	0,15109
283	0,556976973	0,15075
284	0,55894509	0,15040
285	0,560913206	0,15006
286	0,562881323	0,14972
287	0,564849439	0,14937

T [K]	Tr	$\lambda'$ [W/mK]
288	0,566817556	0,14903
289	0,568785672	0,14869
290	0,570753789	0,14834
291	0,572721905	0,14800
292	0,574690022	0,14765
293	0,576658138	0,14731
294	0,578626255	0,14697
295	0,580594371	0,14662
296	0,582562488	0,14628
297	0,584530604	0,14593
298	0,586498721	0,14559
299	0,588466837	0,14524
300	0,590434954	0,14490
301	0,59240307	0,14455
302	0,594371187	0,14421
303	0,596339303	0,14386
304	0,59830742	0,14352
305	0,600275536	0,14317
306	0,602243653	0,14282
307	0,604211769	0,14248
308	0,606179886	0,14213
309	0,608148002	0,14178
310	0,610116119	0,14144
311	0,612084235	0,14109
312	0,614052352	0,14074
313	0,616020468	0,14039
314	0,617988585	0,14005
315	0,619956701	0,13970
316	0,621924818	0,13935
317	0,623892934	0,13900
318	0,625861051	0,13865
319	0,627829167	0,13830
320	0,629797284	0,13795
321	0,631765401	0,13760
322	0,633733517	0,13725
323	0,635701634	0,13690
324	0,63766975	0,13654
325	0,639637867	0,13619

T [K]	Tr	$\lambda'$ [W/mK]
326	0,641605983	0,13584
327	0,6435741	0,13549
328	0,645542216	0,13513
329	0,647510333	0,13478
330	0,649478449	0,13442
331	0,651446566	0,13407
332	0,653414682	0,13371
333	0,655382799	0,13336
334	0,657350915	0,13300
335	0,659319032	0,13264
336	0,661287148	0,13229
337	0,663255265	0,13193
338	0,665223381	0,13157
339	0,667191498	0,13121
340	0,669159614	0,13085
341	0,671127731	0,13049
342	0,673095847	0,13013
343	0,675063964	0,12977
344	0,67703208	0,12941
345	0,679000197	0,12904
346	0,680968313	0,12868
347	0,68293643	0,12832
348	0,684904546	0,12795
349	0,686872663	0,12759
350	0,688840779	0,12722
351	0,690808896	0,12685
352	0,692777012	0,12649
353	0,694745129	0,12612
354	0,696713245	0,12575
355	0,698681362	0,12538
356	0,700649478	0,12501
357	0,702617595	0,12464
358	0,704585711	0,12427
359	0,706553828	0,12389
360	0,708521944	0,12352
361	0,710490061	0,12314
362	0,712458178	0,12277
363	0,714426294	0,12239
364	0,716394411	0,12202
365	0,718362527	0,12164
366	0,720330644	0,12126
367	0,72229876	0,12088
368	0,724266877	0,12050
369	0,726234993	0,12012
370	0,72820311	0,11973
371	0,730171226	0,11935

T [K]	Tr	$\lambda'$ [W/mK]
372	0,732139343	0,11896
373	0,734107459	0,11858
374	0,736075576	0,11819
375	0,738043692	0,11780
376	0,740011809	0,11741
377	0,741979925	0,11702
378	0,743948042	0,11663
379	0,745916158	0,11624
380	0,747884275	0,11585
381	0,749852391	0,11545
382	0,751820508	0,11505
383	0,753788624	0,11466
384	0,755756741	0,11426
385	0,757724857	0,11386
386	0,759692974	0,11346
387	0,76166109	0,11305
388	0,763629207	0,11265
389	0,765597323	0,11224
390	0,76756544	0,11184
391	0,769533556	0,11143
392	0,771501673	0,11102
393	0,773469789	0,11061
394	0,775437906	0,11019
395	0,777406022	0,10978
396	0,779374139	0,10936
397	0,781342255	0,10895
398	0,783310372	0,10853
399	0,785278488	0,10811
400	0,787246605	0,10768
401	0,789214722	0,10726
402	0,791182838	0,10683
403	0,793150955	0,10641
404	0,795119071	0,10598
405	0,797087188	0,10554
406	0,799055304	0,10511
407	0,801023421	0,10468
408	0,802991537	0,10424
409	0,804959654	0,10380
410	0,80692777	0,10336
411	0,808895887	0,10291
412	0,810864003	0,10247
413	0,81283212	0,10202
414	0,814800236	0,10157
415	0,816768353	0,10112
416	0,818736469	0,10066
417	0,820704586	0,10021

T [K]	Tr	$\lambda'$ [W/mK]
418	0,822672702	0,09975
419	0,824640819	0,09929
420	0,826608935	0,09882
421	0,828577052	0,09836
422	0,830545168	0,09789
423	0,832513285	0,09741
424	0,834481401	0,09694
425	0,836449518	0,09646
426	0,838417634	0,09598
427	0,840385751	0,09550
428	0,842353867	0,09501
429	0,844321984	0,09452
430	0,8462901	0,09403
431	0,848258217	0,09354
432	0,850226333	0,09304
433	0,85219445	0,09253
434	0,854162566	0,09203
435	0,856130683	0,09152
436	0,858098799	0,09101
437	0,860066916	0,09049
438	0,862035032	0,08997
439	0,864003149	0,08945
440	0,865971265	0,08892
441	0,867939382	0,08839
442	0,869907499	0,08785
443	0,871875615	0,08731
444	0,873843732	0,08677
445	0,875811848	0,08622
446	0,877779965	0,08566
447	0,879748081	0,08510
448	0,881716198	0,08454
449	0,883684314	0,08397
450	0,885652431	0,08340
451	0,887620547	0,08282
452	0,889588664	0,08224
453	0,89155678	0,08164
454	0,893524897	0,08105
455	0,895493013	0,08045
456	0,89746113	0,07984
457	0,899429246	0,07922
458	0,901397363	0,07860
459	0,903365479	0,07797
460	0,905333596	0,07734
461	0,907301712	0,07670
462	0,909269829	0,07605
463	0,911237945	0,07539

T [K]	Tr	$\lambda'$ [W/mK]
464	0,913206062	0,07472
465	0,915174178	0,07405
466	0,917142295	0,07336
467	0,919110411	0,07267
468	0,921078528	0,07197
469	0,923046644	0,07125
470	0,925014761	0,07053
471	0,926982877	0,06980
472	0,928950994	0,06905
473	0,93091911	0,06829
474	0,932887227	0,06752
475	0,934855343	0,06674
476	0,93682346	0,06594
477	0,938791576	0,06513
478	0,940759693	0,06431
479	0,942727809	0,06346
480	0,944695926	0,06261
481	0,946664043	0,06173
482	0,948632159	0,06083
483	0,950600276	0,05991
484	0,952568392	0,05897
485	0,954536509	0,05801
486	0,956504625	0,05703
487	0,958472742	0,05601
488	0,960440858	0,05497
489	0,962408975	0,05390
490	0,964377091	0,05279
491	0,966345208	0,05164
492	0,968313324	0,05046
493	0,970281441	0,04922
494	0,972249557	0,04794
495	0,974217674	0,04661
496	0,97618579	0,04520
497	0,978153907	0,04373
498	0,980122023	0,04218
499	0,98209014	0,04053
500	0,984058256	0,03876
501	0,986026373	0,03685
502	0,987994489	0,03478
503	0,989962606	0,03248
504	0,991930722	0,02988
505	0,993898839	0,02686
506	0,995866955	0,02316
507	0,997835072	0,01811
508	0,999803188	0,00728

**Tabelle 9:** Dichte des flüssigen Acetons nach Reid [kg/m<sup>3</sup>]

<b>T [K]</b>	<b>Tr</b>	<b><math>\rho'</math> [mol/cm<sup>3</sup>]</b>	<b><math>\rho'</math> [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>T [K]</b>	<b>Tr</b>	<b><math>\rho'</math> [mol/cm<sup>3</sup>]</b>	<b><math>\rho'</math> [kg/m<sup>3</sup>]</b>
250	0,492029	0,014432568	838,24	294	0,578626	0,013622969	791,22
251	0,493997	0,014414699	837,21	295	0,580594	0,01360394	790,12
252	0,495965	0,014396809	836,17	296	0,582562	0,013584879	789,01
253	0,497933	0,014378897	835,13	297	0,584531	0,013565786	787,90
254	0,499902	0,014360962	834,08	298	0,586499	0,01354666	786,79
255	0,50187	0,014343004	833,04	299	0,588467	0,013527502	785,68
256	0,503838	0,014325024	832,00	300	0,590435	0,013508311	784,56
257	0,505806	0,014307021	830,95	301	0,592403	0,013489087	783,45
258	0,507774	0,014288995	829,90	302	0,594371	0,013469829	782,33
259	0,509742	0,014270946	828,86	303	0,596339	0,013450537	781,21
260	0,51171	0,014252873	827,81	304	0,598307	0,013431211	780,08
261	0,513678	0,014234777	826,76	305	0,600276	0,01341185	778,96
262	0,515647	0,014216657	825,70	306	0,602244	0,013392454	777,83
263	0,517615	0,014198513	824,65	307	0,604212	0,013373024	776,71
264	0,519583	0,014180344	823,59	308	0,60618	0,013353557	775,57
265	0,521551	0,014162151	822,54	309	0,608148	0,013334055	774,44
266	0,523519	0,014143934	821,48	310	0,610116	0,013314517	773,31
267	0,525487	0,014125692	820,42	311	0,612084	0,013294942	772,17
268	0,527455	0,014107424	819,36	312	0,614052	0,01327533	771,03
269	0,529423	0,014089132	818,30	313	0,61602	0,013255681	769,89
270	0,531391	0,014070814	817,23	314	0,617989	0,013235994	768,75
271	0,53336	0,01405247	816,17	315	0,619957	0,013216269	767,60
272	0,535328	0,014034101	815,10	316	0,621925	0,013196506	766,45
273	0,537296	0,014015706	814,03	317	0,623893	0,013176704	765,30
274	0,539264	0,013997284	812,96	318	0,625861	0,013156863	764,15
275	0,541232	0,013978836	811,89	319	0,627829	0,013136983	763,00
276	0,5432	0,013960361	810,82	320	0,629797	0,013117062	761,84
277	0,545168	0,013941859	809,74	321	0,631765	0,013097102	760,68
278	0,547136	0,01392333	808,67	322	0,633734	0,0130771	759,52
279	0,549105	0,013904773	807,59	323	0,635702	0,013057058	758,35
280	0,551073	0,013886189	806,51	324	0,63767	0,013036974	757,19
281	0,553041	0,013867577	805,43	325	0,639638	0,013016848	756,02
282	0,555009	0,013848937	804,35	326	0,641606	0,012996679	754,85
283	0,556977	0,013830268	803,26	327	0,643574	0,012976468	753,67
284	0,558945	0,013811571	802,18	328	0,645542	0,012956214	752,50
285	0,560913	0,013792845	801,09	329	0,64751	0,012935916	751,32
286	0,562881	0,01377409	800,00	330	0,649478	0,012915573	750,14
287	0,564849	0,013755305	798,91	331	0,651447	0,012895186	748,95
288	0,566818	0,013736491	797,82	332	0,653415	0,012874754	747,77
289	0,568786	0,013717647	796,72	333	0,655383	0,012854277	746,58
290	0,570754	0,013698773	795,62	334	0,657351	0,012833753	745,38
291	0,572722	0,013679868	794,53	335	0,659319	0,012813183	744,19
292	0,57469	0,013660933	793,43	336	0,661287	0,012792566	742,99
293	0,576658	0,013641966	792,33	337	0,663255	0,012771901	741,79

T [K]	Tr	$\rho'$ [mol/cm <sup>3</sup> ]	$\rho'$ [kg/m <sup>3</sup> ]
338	0,665223	0,012751189	<b>740,59</b>
339	0,667191	0,012730428	<b>739,38</b>
340	0,66916	0,012709617	<b>738,17</b>
341	0,671128	0,012688757	<b>736,96</b>
342	0,673096	0,012667847	<b>735,75</b>
343	0,675064	0,012646886	<b>734,53</b>
344	0,677032	0,012625874	<b>733,31</b>
345	0,679	0,01260481	<b>732,09</b>
346	0,680968	0,012583694	<b>730,86</b>
347	0,682936	0,012562525	<b>729,63</b>
348	0,684905	0,012541302	<b>728,40</b>
349	0,686873	0,012520025	<b>727,16</b>
350	0,688841	0,012498693	<b>725,92</b>
351	0,690809	0,012477305	<b>724,68</b>
352	0,692777	0,012455861	<b>723,44</b>
353	0,694745	0,012434361	<b>722,19</b>
354	0,696713	0,012412803	<b>720,94</b>
355	0,698681	0,012391187	<b>719,68</b>
356	0,700649	0,012369512	<b>718,42</b>
357	0,702618	0,012347778	<b>717,16</b>
358	0,704586	0,012325984	<b>715,89</b>
359	0,706554	0,012304128	<b>714,62</b>
360	0,708522	0,012282211	<b>713,35</b>
361	0,71049	0,012260232	<b>712,07</b>
362	0,712458	0,012238189	<b>710,79</b>
363	0,714426	0,012216083	<b>709,51</b>
364	0,716394	0,012193911	<b>708,22</b>
365	0,718363	0,012171675	<b>706,93</b>
366	0,720331	0,012149371	<b>705,64</b>
367	0,722299	0,012127001	<b>704,34</b>
368	0,724267	0,012104563	<b>703,03</b>
369	0,726235	0,012082055	<b>701,73</b>
370	0,728203	0,012059478	<b>700,41</b>
371	0,730171	0,01203683	<b>699,10</b>
372	0,732139	0,012014111	<b>697,78</b>
373	0,734107	0,011991319	<b>696,46</b>
374	0,736076	0,011968454	<b>695,13</b>
375	0,738044	0,011945514	<b>693,80</b>
376	0,740012	0,011922499	<b>692,46</b>
377	0,74198	0,011899407	<b>691,12</b>
378	0,743948	0,011876238	<b>689,77</b>
379	0,745916	0,01185299	<b>688,42</b>
380	0,747884	0,011829662	<b>687,07</b>
381	0,749852	0,011806254	<b>685,71</b>
382	0,751821	0,011782764	<b>684,34</b>
383	0,753789	0,011759191	<b>682,97</b>
384	0,755757	0,011735534	<b>681,60</b>

T [K]	Tr	$\rho'$ [mol/cm <sup>3</sup> ]	$\rho'$ [kg/m <sup>3</sup> ]
385	0,757725	0,011711792	<b>680,22</b>
386	0,759693	0,011687963	<b>678,84</b>
387	0,761661	0,011664046	<b>677,45</b>
388	0,763629	0,011640041	<b>676,05</b>
389	0,765597	0,011615945	<b>674,65</b>
390	0,767565	0,011591757	<b>673,25</b>
391	0,769534	0,011567476	<b>671,84</b>
392	0,771502	0,011543101	<b>670,42</b>
393	0,77347	0,01151863	<b>669,00</b>
394	0,775438	0,011494062	<b>667,58</b>
395	0,777406	0,011469395	<b>666,14</b>
396	0,779374	0,011444628	<b>664,70</b>
397	0,781342	0,011419759	<b>663,26</b>
398	0,78331	0,011394787	<b>661,81</b>
399	0,785278	0,011369709	<b>660,35</b>
400	0,787247	0,011344525	<b>658,89</b>
401	0,789215	0,011319233	<b>657,42</b>
402	0,791183	0,01129383	<b>655,95</b>
403	0,793151	0,011268316	<b>654,46</b>
404	0,795119	0,011242688	<b>652,98</b>
405	0,797087	0,011216944	<b>651,48</b>
406	0,799055	0,011191082	<b>649,98</b>
407	0,801023	0,011165101	<b>648,47</b>
408	0,802992	0,011138999	<b>646,95</b>
409	0,80496	0,011112773	<b>645,43</b>
410	0,806928	0,011086421	<b>643,90</b>
411	0,808896	0,011059941	<b>642,36</b>
412	0,810864	0,011033331	<b>640,82</b>
413	0,812832	0,011006588	<b>639,26</b>
414	0,8148	0,010979711	<b>637,70</b>
415	0,816768	0,010952696	<b>636,13</b>
416	0,818736	0,010925541	<b>634,56</b>
417	0,820705	0,010898244	<b>632,97</b>
418	0,822673	0,010870801	<b>631,38</b>
419	0,824641	0,010843211	<b>629,77</b>
420	0,826609	0,01081547	<b>628,16</b>
421	0,828577	0,010787576	<b>626,54</b>
422	0,830545	0,010759525	<b>624,91</b>
423	0,832513	0,010731314	<b>623,27</b>
424	0,834481	0,010702941	<b>621,63</b>
425	0,83645	0,010674401	<b>619,97</b>
426	0,838418	0,010645692	<b>618,30</b>
427	0,840386	0,01061681	<b>616,62</b>
428	0,842354	0,010587752	<b>614,94</b>
429	0,844322	0,010558513	<b>613,24</b>
430	0,84629	0,01052909	<b>611,53</b>
431	0,848258	0,010499479	<b>609,81</b>

T [K]	Tr	$\rho'$ [mol/cm <sup>3</sup> ]	$\rho'$ [kg/m <sup>3</sup> ]	T [K]	Tr	$\rho'$ [mol/cm <sup>3</sup> ]	$\rho'$ [kg/m <sup>3</sup> ]
432	0,850226	0,010469676	<b>608,08</b>	458	0,901397	0,009609499	<b>558,12</b>
433	0,852194	0,010439677	<b>606,34</b>	459	0,903365	0,009572209	<b>555,95</b>
434	0,854163	0,010409477	<b>604,58</b>	460	0,905334	0,009534514	<b>553,76</b>
435	0,856131	0,010379071	<b>602,82</b>	461	0,907302	0,009496399	<b>551,55</b>
436	0,858099	0,010348456	<b>601,04</b>	462	0,90927	0,009457851	<b>549,31</b>
437	0,860067	0,010317626	<b>599,25</b>	463	0,911238	0,009418854	<b>547,05</b>
438	0,862035	0,010286575	<b>597,44</b>	464	0,913206	0,009379391	<b>544,76</b>
439	0,864003	0,0102553	<b>595,63</b>	465	0,915174	0,009339444	<b>542,43</b>
440	0,865971	0,010223793	<b>593,80</b>	466	0,917142	0,009298997	<b>540,09</b>
441	0,867939	0,010192051	<b>591,95</b>	467	0,91911	0,009258028	<b>537,71</b>
442	0,869907	0,010160066	<b>590,10</b>	468	0,921079	0,009216517	<b>535,30</b>
443	0,871876	0,010127833	<b>588,22</b>	469	0,923047	0,009174442	<b>532,85</b>
444	0,873844	0,010095346	<b>586,34</b>	470	0,925015	0,009131779	<b>530,37</b>
445	0,875812	0,010062597	<b>584,44</b>	471	0,926983	0,009088502	<b>527,86</b>
446	0,87778	0,01002958	<b>582,52</b>	472	0,928951	0,009044585	<b>525,31</b>
447	0,879748	0,009996288	<b>580,58</b>	473	0,930919	0,008999999	<b>522,72</b>
448	0,881716	0,009962713	<b>578,63</b>	474	0,932887	0,008954711	<b>520,09</b>
449	0,883684	0,009928847	<b>576,67</b>	475	0,934855	0,008908689	<b>517,42</b>
450	0,885652	0,009894683	<b>574,68</b>	476	0,936823	0,008861896	<b>514,70</b>
451	0,887621	0,009860211	<b>572,68</b>	477	0,938792	0,008814292	<b>511,93</b>
452	0,889589	0,009825423	<b>570,66</b>	478	0,94076	0,008765835	<b>509,12</b>
453	0,891557	0,009790309	<b>568,62</b>	479	0,942728	0,008716478	<b>506,25</b>
454	0,893525	0,009754861	<b>566,56</b>	480	0,944696	0,00866617	<b>503,33</b>
455	0,895493	0,009719066	<b>564,48</b>	481	0,946664	0,008614855	<b>500,35</b>
456	0,897461	0,009682915	<b>562,38</b>	482	0,948632	0,008562474	<b>497,31</b>
457	0,899429	0,009646397	<b>560,26</b>				

Tabelle 10: Dynamische Viskosität des flüssigen Acetons nach Reid [ $10^{-5}$  Ns/m<sup>2</sup>]

T [K]	Tr	$\eta'$ [ $10^{-5}$ Ns/m <sup>2</sup> ]	T [K]	Tr	$\eta'$ [ $10^{-5}$ Ns/m <sup>2</sup> ]
250	0,492029	<b>51,1648</b>	265	0,521551	<b>42,6619</b>
251	0,493997	<b>50,5145</b>	266	0,523519	<b>42,1789</b>
252	0,495965	<b>49,8775</b>	267	0,525487	<b>41,7048</b>
253	0,497933	<b>49,2534</b>	268	0,527455	<b>41,2396</b>
254	0,499902	<b>48,6420</b>	269	0,529423	<b>40,7830</b>
255	0,50187	<b>48,0429</b>	270	0,531391	<b>40,3347</b>
256	0,503838	<b>47,4558</b>	271	0,53336	<b>39,8946</b>
257	0,505806	<b>46,8803</b>	272	0,535328	<b>39,4625</b>
258	0,507774	<b>46,3162</b>	273	0,537296	<b>39,0382</b>
259	0,509742	<b>45,7631</b>	274	0,539264	<b>38,6216</b>
260	0,51171	<b>45,2209</b>	275	0,541232	<b>38,2123</b>
261	0,513678	<b>44,6891</b>	276	0,5432	<b>37,8103</b>
262	0,515647	<b>44,1676</b>	277	0,545168	<b>37,4154</b>
263	0,517615	<b>43,6560</b>	278	0,547136	<b>37,0274</b>
264	0,519583	<b>43,1542</b>	279	0,549105	<b>36,6462</b>

T [K]	Tr	$\eta'$ [ $10^{-5}$ Ns/m <sup>2</sup> ]
280	0,551073	36,2715
281	0,553041	35,9034
282	0,555009	35,5415
283	0,556977	35,1858
284	0,558945	34,8361
285	0,560913	34,4924
286	0,562881	34,1544
287	0,564849	33,8220
288	0,566818	33,4951
289	0,568786	33,1736
290	0,570754	32,8574
291	0,572722	32,5464
292	0,57469	32,2403
293	0,576658	31,9393
294	0,578626	31,6430
295	0,580594	31,3515
296	0,582562	31,0646
297	0,584531	30,7823
298	0,586499	30,5044
299	0,588467	30,2308
300	0,590435	29,9615
301	0,592403	29,6963
302	0,594371	29,4352
303	0,596339	29,1781
304	0,598307	28,9250
305	0,600276	28,6756
306	0,602244	28,4301
307	0,604212	28,1882
308	0,60618	27,9499
309	0,608148	27,7151
310	0,610116	27,4838
311	0,612084	27,2560
312	0,614052	27,0314
313	0,61602	26,8101
314	0,617989	26,5921
315	0,619957	26,3771
316	0,621925	26,1653
317	0,623893	25,9564
318	0,625861	25,7506
319	0,627829	25,5476
320	0,629797	25,3475
321	0,631765	25,1502
322	0,633734	24,9556
323	0,635702	24,7638
324	0,63767	24,5745
325	0,639638	24,3879
326	0,641606	24,2039

T [K]	Tr	$\eta'$ [ $10^{-5}$ Ns/m <sup>2</sup> ]
327	0,643574	24,0223
328	0,645542	23,8432
329	0,64751	23,6665
330	0,649478	23,4921
331	0,651447	23,3201
332	0,653415	23,1504
333	0,655383	22,9829
334	0,657351	22,8177
335	0,659319	22,6545
336	0,661287	22,4936
337	0,663255	22,3347
338	0,665223	22,1778
339	0,667191	22,0230
340	0,66916	21,8702
341	0,671128	21,7193
342	0,673096	21,5703
343	0,675064	21,4232
344	0,677032	21,2779
345	0,679	21,1345
346	0,680968	20,9929
347	0,682936	20,8530
348	0,684905	20,7148
349	0,686873	20,5783
350	0,688841	20,4436
351	0,690809	20,3104
352	0,692777	20,1789
353	0,694745	20,0490
354	0,696713	19,9206
355	0,698681	19,7937
356	0,700649	19,6684
357	0,702618	19,5446
358	0,704586	19,4222
359	0,706554	19,3013
360	0,708522	19,1818
361	0,71049	19,0637
362	0,712458	18,9469
363	0,714426	18,8315
364	0,716394	18,7175
365	0,718363	18,6047
366	0,720331	18,4933
367	0,722299	18,3831
368	0,724267	18,2742
369	0,726235	18,1664
370	0,728203	18,0600
371	0,730171	17,9547
372	0,732139	17,8505
373	0,734107	17,7476



T [K]	Tr	$\eta'$ [ $10^{-5}$ Ns/m <sup>2</sup> ]
374	0,736076	17,6457
375	0,738044	17,5450
376	0,740012	17,4454
377	0,74198	17,3469
378	0,743948	17,2495
379	0,745916	17,1531
380	0,747884	17,0578
381	0,749852	16,9634
382	0,751821	16,8701
383	0,753789	16,7778
384	0,755757	16,6865
385	0,757725	16,5962
386	0,759693	16,5068
387	0,761661	16,4183
388	0,763629	16,3308
389	0,765597	16,2441
390	0,767565	16,1584
391	0,769534	16,0736
392	0,771502	15,9896
393	0,77347	15,9065
394	0,775438	15,8243
395	0,777406	15,7429
396	0,779374	15,6623
397	0,781342	15,5825
398	0,78331	15,5036
399	0,785278	15,4254
400	0,787247	15,3480
401	0,789215	15,2714
402	0,791183	15,1955
403	0,793151	15,1204
404	0,795119	15,0461
405	0,797087	14,9724
406	0,799055	14,8995
407	0,801023	14,8273
408	0,802992	14,7558
409	0,80496	14,6850
410	0,806928	14,6149
411	0,808896	14,5454
412	0,810864	14,4766
413	0,812832	14,4085
414	0,8148	14,3410
415	0,816768	14,2742
416	0,818736	14,2079
417	0,820705	14,1424
418	0,822673	14,0774
419	0,824641	14,0130
420	0,826609	13,9492

T [K]	Tr	$\eta'$ [ $10^{-5}$ Ns/m <sup>2</sup> ]
421	0,828577	13,8860
422	0,830545	13,8235
423	0,832513	13,7614
424	0,834481	13,7000
425	0,83645	13,6391
426	0,838418	13,5787
427	0,840386	13,5190
428	0,842354	13,4597
429	0,844322	13,4010
430	0,84629	13,3428
431	0,848258	13,2851
432	0,850226	13,2280
433	0,852194	13,1713
434	0,854163	13,1152
435	0,856131	13,0596
436	0,858099	13,0044
437	0,860067	12,9497
438	0,862035	12,8955
439	0,864003	12,8418
440	0,865971	12,7886
441	0,867939	12,7358
442	0,869907	12,6834
443	0,871876	12,6315
444	0,873844	12,5801
445	0,875812	12,5291
446	0,87778	12,4785
447	0,879748	12,4284
448	0,881716	12,3787
449	0,883684	12,3294
450	0,885652	12,2805
451	0,887621	12,2320
452	0,889589	12,1839
453	0,891557	12,1362
454	0,893525	12,0890
455	0,895493	12,0421
456	0,897461	11,9956
457	0,899429	11,9495
458	0,901397	11,9037
459	0,903365	11,8584
460	0,905334	11,8134
461	0,907302	11,7687
462	0,90927	11,7245
463	0,911238	11,6805
464	0,913206	11,6370
465	0,915174	11,5938
466	0,917142	11,5509
467	0,91911	11,5084

T [K]	Tr	$\eta'$ [ $10^{-5}$ Ns/m <sup>2</sup> ]
468	0,921079	11,4662
469	0,923047	11,4243
470	0,925015	11,3828
471	0,926983	11,3416
472	0,928951	11,3007
473	0,930919	11,2602
474	0,932887	11,2199
475	0,934855	11,1800
476	0,936823	11,1404
477	0,938792	11,1011
478	0,94076	11,0620
479	0,942728	11,0233
480	0,944696	10,9849
481	0,946664	10,9468
482	0,948632	10,9089
483	0,9506	10,8714
484	0,952568	10,8341
485	0,954537	10,7971
486	0,956505	10,7604
487	0,958473	10,7240
488	0,960441	10,6878

T [K]	Tr	$\eta'$ [ $10^{-5}$ Ns/m <sup>2</sup> ]
489	0,962409	10,6520
490	0,964377	10,6163
491	0,966345	10,5810
492	0,968313	10,5459
493	0,970281	10,5110
494	0,97225	10,4764
495	0,974218	10,4421
496	0,976186	10,4080
497	0,978154	10,3742
498	0,980122	10,3406
499	0,98209	10,3072
500	0,984058	10,2741
501	0,986026	10,2413
502	0,987994	10,2086
503	0,989963	10,1762
504	0,991931	10,1441
505	0,993899	10,1121
506	0,995867	10,0804
507	0,997835	10,0489
508	0,999803	10,0176