

**Optimierung einer Kolbendampfmaschine
mit interner Flashverdampfung
AZ 29268-21/0**

Abschlussbericht

Deutsche Bundesstiftung Umwelt

An der Bornau 2
49090 Osnabrück

Projektlaufzeit: 24 Monate vom 1.7.11 bis 30.6.13

Projektgesamtkosten: 358.785 € Kostenplanung

Beantragter Fördermittelanteil: 55%

von

Europäisches Institut für Energieforschung (EIFER.org)

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az: 29268, Referat 21/0, Fördersumme: 197.263,00 €

Antragstitel	Umsetzung einer Kolbendampfmaschine mit interner Flashverdampfung		
Stichworte	Dreiecksprozess, Wärmekraftmaschine, ORC, Kalina, Geothermie, Abwärme, Solarthermie, Energiespeicher		
Laufzeit 2 Jahre Zwischenberichte	Projektbeginn 01.07.2011	Projektende 30.6.2013	Projektphase(n)
Bewilligungsempfänger	Universität Fridericiana Karlsruhe (T.H.) Europäisches Institut für Energieforschung Emmy-Noether Str. 11 76131 Karlsruhe	Tel 0721 6105 1427 Fax 0721 6105 1332 Projektleitung Dr.-Ing. Michael Löffler Bearbeiter Dipl.-Ing Johannes Ruf	
Kooperationspartner	Institut für Kolbenmaschinen (KIT), Rintheimer Querallee 2, 76131 Karlsruhe MOT Forschungs- und Entwicklungsgesellschaft für Motorentchnik, Optik, Thermodynamik mbH, Rintheimer Querallee 2, 76131 Karlsruhe		
Zielsetzung und Anlass des Vorhabens			
Weiterentwicklung einer Kolbendampfmaschine, die einen neuartigen, hocheffizienten thermodynamischen Kreisprozess verwirklicht. Dreiecksprozesse erlauben theoretisch eine um ca. 50% verbesserte Nutzung von Niedertemperaturwärme im Vergleich zu den gängigen Prozessen wie Clausius-Rankine-Cycle, Organic-Rankine-Cycle oder Kalina-Prozess.			
Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden			
Für den Aufbau der Testmaschine wurden folgende Arbeitsschritte ausgeführt:			
<ol style="list-style-type: none"> 1. Entwicklung von geeigneten Aktuatoren und deren Ansteuerung zur schnellen Bewegung der Einlass- und Auslassventile 2. Entwicklung von geeigneten Einlass- und Auslassventilen (Geschwindigkeit, erforderlicher Querschnitt, Dichtheit) 3. Aufbau eines neuen isothermen beheizten Zylinderkopfes mit Zyklonen, Einlass- und Auslassventilen 4. Aufbau und Inbetriebnahme eines Drehzahlstellers für den Motor/Generator 5. Erfolgreicher Aufbau eines Teststandes und Durchführung von Abscheideversuchen an einem Zyklon mit Flashentspannung 			

6. Ersatz der Zylinder-Stahl Laufbuchse durch eine Edelstahl Laufbuchse. Umkonstruktion der Kolbenabdichtungen und des Kolbens (dämmende Kolbenplatte). → dichter Kolben.

Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse der Abscheideversuche am Zyklon mit Flashentspannung waren weitaus besser als gefordert (gemessen: 99,85%, gefordert: >98%). Dieses Ergebnis weist auf eine wahrscheinliche Machbarkeit des Dreiecksprozesses hin. Die laufende Maschine und weitere Abscheideversuche sind Ziele eines geplanten halbjährigen Folgeprojekts.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Veröffentlichungen:

M. Steffen, M. Löffler, K. Schaber: Efficiency of a new Triangle Cycle with flash evaporation in a piston engine, Energy, Article accepted for publication (26 Nov 2012), Received at Elsevier (28 May 2013)

M. Steffen, M. Löffler, K. Schaber: Simulation of the efficiency of a new triangle cycle with flash evaporation in a piston engine, Vortrag, Thermodynamik-Kolloquium & 26th European Symposium on Applied Thermodynamics (ESAT) Potsdam (2012)

Der Dreiecksprozess: der Kreisprozess mit dem theoretisch höchsten Wirkungsgrad. Messestand bei der Woche der Umwelt im Schloss Bellevue Berlin (2012)

Studienarbeiten und Diplomarbeiten:

Tim Bouc: Abscheideversuche in einem Zyklon mit Flashverdampfung, Diplomarbeit, EIFER (2013)

Nike Trudel: Kreislaufsimulation eines neuartigen Prozesses zur Nutzung von Niedertemperaturwärme unter Berücksichtigung verschiedener Abwärmeequellen, ITTK (2013)

Johannes Biernath: Entspannungsverdampfung in einem Zyklon - Implementierung verschiedener Verdampfungsmodelle, Bachelorarbeit, ITTK (2012)

David Bidinger: Ausarbeitung und konstruktive Umsetzung unterschiedlicher Ventilkonzepte für einen neuartigen Prozess, Bachelorarbeit, IFKM (2012)

Teresa Blochmann: Entspannungsverdampfung in einem Zyklon - Einfluss verschiedener Verdampfungsmodelle, Studienarbeit, ITTK (2012)

Yannik Ille: Entspannungsverdampfung in einem Zyklon - Einfluß verschiedener Geometrien auf die Phasentrennung, Studienarbeit, ITTK (2012)

Christopher Hort: Ein Ansatz zur Neukonstruktion eines speziell angepassten Zylinderkopfes für die optimierte Umsetzung eines neuartigen thermodynamischen Prozesses, Diplomarbeit, IFKM (2011)

Pascal Bormann: CFD-Simulation der schnellen Abkühlung einer Flüssigkeit und deren Einfluss auf die Wandtemperatur, Diplomarbeit, ITTK (2010)

Fazit

Die Umsetzung von Niedertemperaturwärme bis ca. 350 °C ist mit dem Dreiecksprozess machbar. In Folgeprojekten sollten die bisherigen Erkenntnisse vertieft die konstruktiven Lösungen verbessert und die neue Technologie für alle denkbaren (Ab-)Wärmemärkte verfügbar gemacht werden.

Inhalt:

Projektkennblatt	1
1 Einleitung und Zusammenfassung	4
2 Stand des Vorhabens im Juni 2013	5
2.1 Konstruktion und Design	5
2.2 Strömungssimulation.....	11
2.3 Experimente	13
2.4 Ökologische Bilanzierung des Verfahrens	15
2.5 Ökonomische Bilanzierung des Verfahrens	16
2.6 Maßnahmen zur Verbreitung: Studentische Arbeiten und Veröffentlichungen	17
3 Fazit	17
4 Weiterer Projektverlauf und Ausblick	18
5 Literatur	22
6 Anhang	23
6.1 Antragssteller	23
6.2 Kooperationspartner.....	23

Abbildungsverzeichnis:

Abbildung 1: CAD Zeichnung Einlassventil	6
Abbildung 2: FEM Simulation Dichtung Einlassventil.....	7
Abbildung 3: Auslassschieber als Drehteil (links) und als Materialhybrid [2]	8
Abbildung 4: Gegendruckkammer des Auslassschiebers [2]	9
Abbildung 5: Tauchspulenaktuator und Modell	9
Abbildung 6: Auslenkung.....	10
Abbildung 7: Aktuatorenteststand.....	10
Abbildung 8: CFD Simulation der flüssigen Phase im Zyklon:	12
Abbildung 9: Schnitt durch den Zyklon	13
Abbildung 10: Abscheideversuche Zyklon	14
Abbildung 11: Prozesswirkungsgrad als Funktion der Phasentrennung.....	15

1 Einleitung und Zusammenfassung

Das vorliegende Projekt stellt die Fortsetzung eines durch die DBU geförderten Vorgängerprojektes dar (AZ 25116).

Der vorliegende Bericht beschreibt Schritte zur Realisierung eines neuartigen thermodynamischen Prozesses zur Umwandlung von Wärme in mechanische Energie. Wird eine Flüssigkeit einer plötzlichen und deutlichen Druckreduzierung unterhalb des Sattedampfdruckes ausgesetzt, besteht ein Ungleichgewicht in Form einer Überhitzung, die zu einer sehr intensiven Verdampfung – der so genannten Flash-Verdampfung – führt. Dieser physikalische Effekt war die Basis für das umgesetzte Forschungsprojektes. Im Rahmen dieses Vorhabens sollte ein Prototyp konstruiert werden, der nachweist, dass beim Flashvorgang von heißem Wasser genügend mechanische Energie erzeugt werden kann, um einen Kolbenmotor anzutreiben. Würde heißes Wasser direkt in eine Kolbendampfmaschine eingespritzt, käme es aufgrund der vorhandenen flüssigen Phase zu Wasserschlägen in den Zylinderraum. Zudem ist der Wärmeübergang von flüssiger Phase zur Zylinderwand problematisch. Deshalb sollte das Zweiphasengemisch vor Eintritt in den Zylinder in eine flüssige und eine möglichst reine dampfförmige Phase getrennt werden. In Rahmen des Vorhabens wurde diese Trennung mit einer sukzessiv verbesserten, innovativen Zyklonvorkammerlösung realisiert.

Die flüssige Phase verbleibt in dieser Vorkammer und nur der Dampf tritt in den Zylinder ein um dort den Kolben anzutreiben. Ein wesentlicher Schritt ist daher der Nachweis der tatsächlichen Abscheidung des Wassers im Zyklon.

Es wurde mehrfach gezeigt, dass der Prozess im T-s-Diagramm an ein Dreieck erinnert. Aus diesem Grund nennen wir den Prozess „Dreiecksprozess“ oder „Triangle Process“. An anderen Stellen wird er auch als „Trilateral Cycle“ bezeichnet.

Gegenüber den gängigen Prozessen zur Umwandlung von sensibler Wärme mit relativ niedriger Temperatur (bis ca. 350°C) wie Organic Rancine Cycle (ORC) oder Kalina Zyklus erreicht man mit dem Dreiecksprozess theoretisch einen um 20% bis 40% höheren Wirkungsgrad [Fischer]. Diese Aussicht rechtfertigt aus Sicht der Autoren weitergehende Bemühungen zur Nutzbarmachung des Prozesses.

Im Projekt konnten wesentliche konstruktive Probleme gelöst werden, die für den Lauf der Maschine erforderlich sind. Es konnten ausreichend schnelle und mittlerweile dichte Ventile realisiert werden, die auch den erforderlichen Querschnitt zum Einlass des Wassers in die Maschine öffnen. Keines der am Markt verfügbaren Ventile konnte hier zur Funktionserfüllung herangezogen werden. Weiterhin konnte der Auslass als selbthaltendes Ventil realisiert werden. Auf diese Weise hilft der Dampfdruck das Ventil zu dichten und die Aktuatoren werden entlastet und können deutlich kleiner ausgeführt werden.

Mit den dichten Ventilen wurden Abscheideversuche gemacht, die zeigen sollten, ob die Abscheidung im Zyklon ausreichend hohe Werte erreicht. Diese Experimente schaffen Grundlagen für den Dreiecksprozess, denn es wurden bisher unseres Wissens noch keine Versuche mit diskontinuierlicher Abscheidung in Flash-Zyklonen durchgeführt, geschweige denn Zyklone für diesen Teilprozess entworfen.

Mit dem im Projekt entworfenen Zyklon konnten Abscheideraten von 98,6 % bis 99,8 % mit undichten Ventilen und 99,85 bis 99,9% mit dichten Ventilen gemessen werden. Ein kontinuierlicher Lauf der Maschine ist ab einer Abscheiderate von ca. 98% machbar; die Wirkungsgradeinbuße ist dann < 10%, und die zusätzliche Verdampfungsleistung, die dem Testaufbau zugeführt werden muss, ca. 1 kW pro Zylinder). Die mit dichten Ventilen gemessenen Abscheideraten weisen auf eine Wirkungsgradeinbuße von 1% und eine zusätzliche Verdampfungsleistung von 100 W pro Zylinder hin. Dies entspricht vernachlässigbaren 1% der zugeführten Wärmeleistung.

Leider konnte ein kontinuierlicher Lauf der Maschine noch nicht realisiert werden, da die Dichtheit der Ventile erst im Mai 2013 erreicht werden konnte und nach wie vor Probleme bei der Ansteuerung der Einlassventile auftreten. Hierbei handelt es sich um Aussetzer, die bei den Abscheideversuchen nicht problematisch sind, aber beim kontinuierlichen Lauf zu Problemen führen würden. Zusätzlich werden Druck- und Temperaturmessungen massiv durch die Ansteuerung der Aktuatoren und des Drehzahlstellers gestört, so dass zufriedenstellende thermodynamische Auswertung des Prozesses zurzeit noch nicht möglich ist. In Zusammenarbeit mit dem Elektrotechnischen Institut (ETI) wird an diesen Problemen gearbeitet.

Festgehalten werden muss aber, dass alle technischen Herausforderungen im Laufe des Projektes, wie beispielsweise Zyklonumbauarbeiten, Ventilneu- und weiterentwicklungen, gezielt angegangen wurden und in kleinen Schritten immer die erwartenden Verbesserungen und Fortschritte erreicht werden konnten. Der Dreiecksprozess hat seine Funktionalität nachgewiesen und es fehlen keine elementaren oder nicht-kalkulierbare Entwicklungsschritte mehr, um die außerordentlichen Perspektiven dieser Technik angehen zu können. Eine erfolgreiche Weiterentwicklung des Dreiecksprozesses kann z. B. die Niedertemperaturumwandlung in Strom revolutionieren.

Die nachfolgend dargestellten wesentlichen Ziele konnten im bisherigen Projektverlauf realisiert werden:

2 Stand des Vorhabens im Juni 2013

2.1 Konstruktion und Design

Die Auslegung des Zyklons anhand theoretisch-analytischer Modelle führte zur Entwicklung einer Zyklongeometrie, die zunächst theoretisch einen geringen Tropfenmitriss in den Zylinder gewährleistet. Der Zyklon ist dabei aus Polyetheretherketon (PEEK) gefertigt worden damit möglichst wenig Wärmeaustausch zwischen Wasser und Zyklonwand auftritt.

Es wurden elektrodynamische Aktuatoren ermittelt und aufgebaut, die zusammen mit einer Ansterelektronik eine Bewegung der Ventile in der vorgeschriebenen Zeit von 6 ms um ca. 3 mm erlauben. Die Aktuatoren werden dabei kontrolliert, jedoch weit außerhalb ihrer Spezifikation betrieben; die Ansteuerung erfolgt mit 120 V statt 20 V, allerdings nur für einige ms pro 100 ms, so dass die Erwärmung der Bauteile unterhalb der zulässigen Werte bleibt.

Eine Neukonstruktion der Zylinderkopfes wurde durchgeführt und es wurden in mehreren Entwicklungsstufen Einlassventile konstruiert, die sowohl den schnellen Beschleunigungen standhalten als auch den Dichtheitsanforderungen entsprechen. Metallische Tellerventile übernehmen die Zentrierung und Aufnahme des Schließimpulses; die Abdichtung wird von Dichtungen aus Polytetrafluorethylen (PTFE) übernommen. Ausgehend von einfachen Dichtkonzepten, bei denen die Dichtfunktion durch Flächenpressung im konischen Ventilsitz erfüllt wurde, gelang die Entwicklung zuverlässiger und individueller Dichtungen als Hybrid aus mehreren Materialien. Das ursprüngliche Flächenpaar aus Edelstahl sollte durch Erhöhung der Oberflächengüte bereits ausreichende Dichtheit erreichen; dies gelang jedoch selbst in der weiteren Entwicklung für Materialkombinationen wie Edelstahl und Messing nur unzureichend.

In den weiterentwickelten Konzepten werden die Kräfte, die durch den Schließimpuls auf den Ventilschaft übertragen werden, nach wie vor durch den Edelstahlkorpus abgeleitet. Die Dichtfunktion am Ventilsitz wurde in der weiteren Designevolution von einem PTFE-Körper übernommen. FEM Simulationen gaben jedoch Hinweise darauf, dass durch die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten der beiden Werkstoffe ein Spalt am Ventilschaft entstehen würde. Eine mögliche Lösung wäre eine Verschlanung des PTFE-Dichtkörpers entgegen der Strömungsrichtung des Fluids, was lokal zu einer stärkeren Verformung und damit voraussichtlich zu Dichtheit am Ventilschaft führen würde. Da dieses Design mit seiner extrem dünnen Endlippe als fertigungstechnisch kompliziert und nicht dauerhaft eingeschätzt wurde, kam es zu keiner Fertigung und experimentellen Erprobung.

Das momentan verbaute Design basiert auf einer weiteren Trennung der Funktionen. Die Dichtung des Ventilsitzes wird von dem PTFE-Körper übernommen während das Dichten am Schaft durch einen zylindrischen Vitonkörper realisiert wird. Dieses synthetische Gummimaterial weist eine im Vergleich zum PTFE deutlich erhöhte Verformbarkeit auf und ist daher in der Lage, die unterschiedlichen Materialausdehnungen von PTFE und Edelstahl zu kompensieren. Zurzeit liegt der Ventilsitz aufgrund früherer Designansätze nach wie vor in Konusform vor; dieser ist jedoch für die weiteren Ventilentwürfe nicht mehr notwendig, darüber hinaus möglicherweise sogar nachteilig.

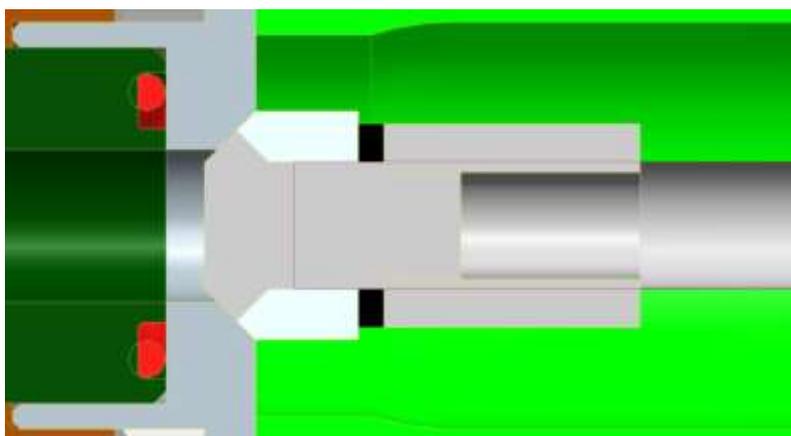


Abbildung 1: CAD Zeichnung Einlassventil

Beim aktuell verwendeten Design, das in Abbildung 1 zu sehen ist, wird die Schräge des PTFE-Körpers als kritisch eingestuft; es wird keine Dauerfestigkeit für den PTFE Teil erwartet da es durch die Querkraft, die durch die schräge Fläche induziert wird, voraussichtlich über die Materialgrenzen beansprucht wird. Der naheliegende Schritt eines rechtwinkligen Überganges zwischen Edelstahlventilkopf und PTFE-Dichtung zur vollständigen Umwandlung der Querkraft in eine Normalkraft entlang der Bewegungsachse des Ventilschafts wird zeitnah realisiert werden. Hierbei stellt die weiße Fläche in Abbildung 1 den PTFE-Körper dar, die schwarze den Vitonring. Der Edelstahlkorpus des Ventilschafts ist in Grautönen dargestellt.

Abbildung 2 zeigt das Ergebnis der FEM Simulation (Spannungsverteilung) für die Materialpaarung PTFE und Viton mit bereits senkrechter Übergangsfläche. Die Bauteile werden mit 25 bar belastet. Das Ventil ist geschlossen und in Ruhe. Die schräge Fläche links oben stellt die Sitzfläche dar.

Die größten Belastungen im PTFE-Bauteil (links) treten hier erwartungsgemäß sowohl an der äußersten Spitze der Dichtung als auch im hinteren Teil des Dichtkörpers aufgrund der Kräfteableitung auf. Der Vitonkörper (rechts) wird aufgrund seiner Fließfähigkeit nur gering belastet.

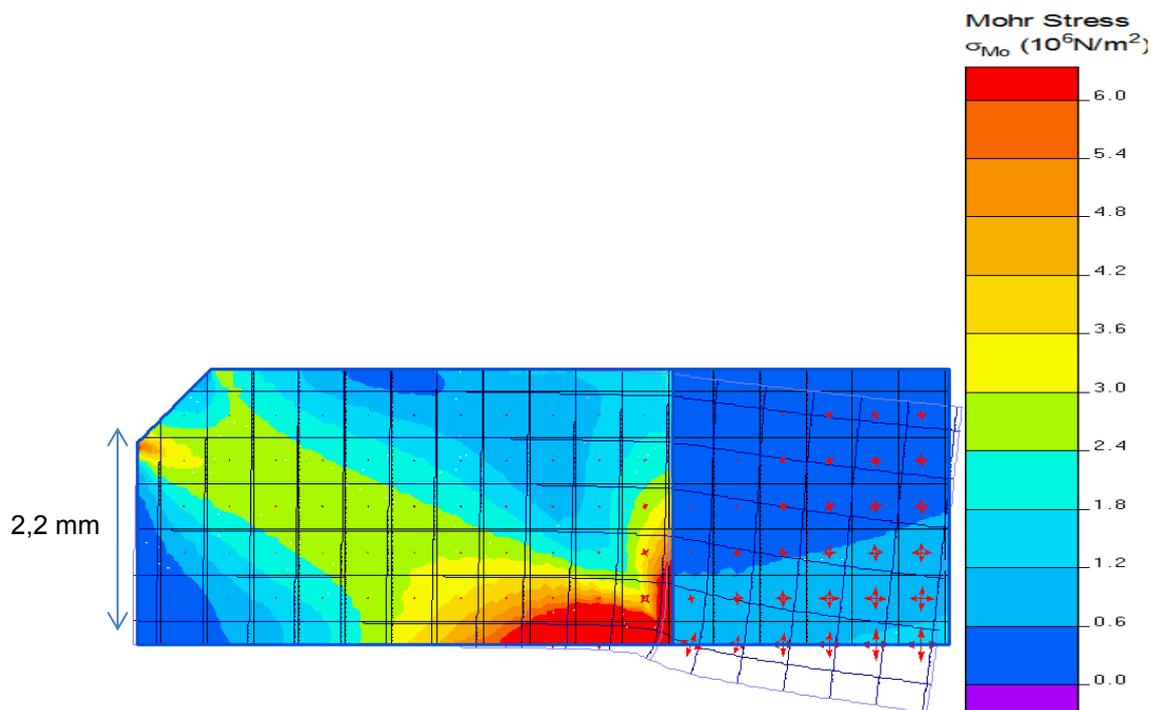


Abbildung 2: FEM Simulation Dichtung Einlassventil

Auch beim Auslasskonzept wurde ein Neudesign verwirklicht. Es wurden Auslassventile konzipiert, deren Dichtfunktion durch den Innendruck verstärkt wird. Die Querschnitte sind so gewählt, dass eine vollständige Entleerung des Zyklons beim Ausschleiben möglich ist. Die Entwicklung der Auslassventile wurde aufgeteilt in einen konstruktiven Teil [2] und einen Simulationsteil [3]. Hierdurch gelang für die ausgearbeiteten Designvorschläge die

direkte strömungstechnische Validierung. Durch die Evaluation von vier verschiedenen Designansätzen wurde so der vielversprechendste Ansatz ausgewählt und umgesetzt.

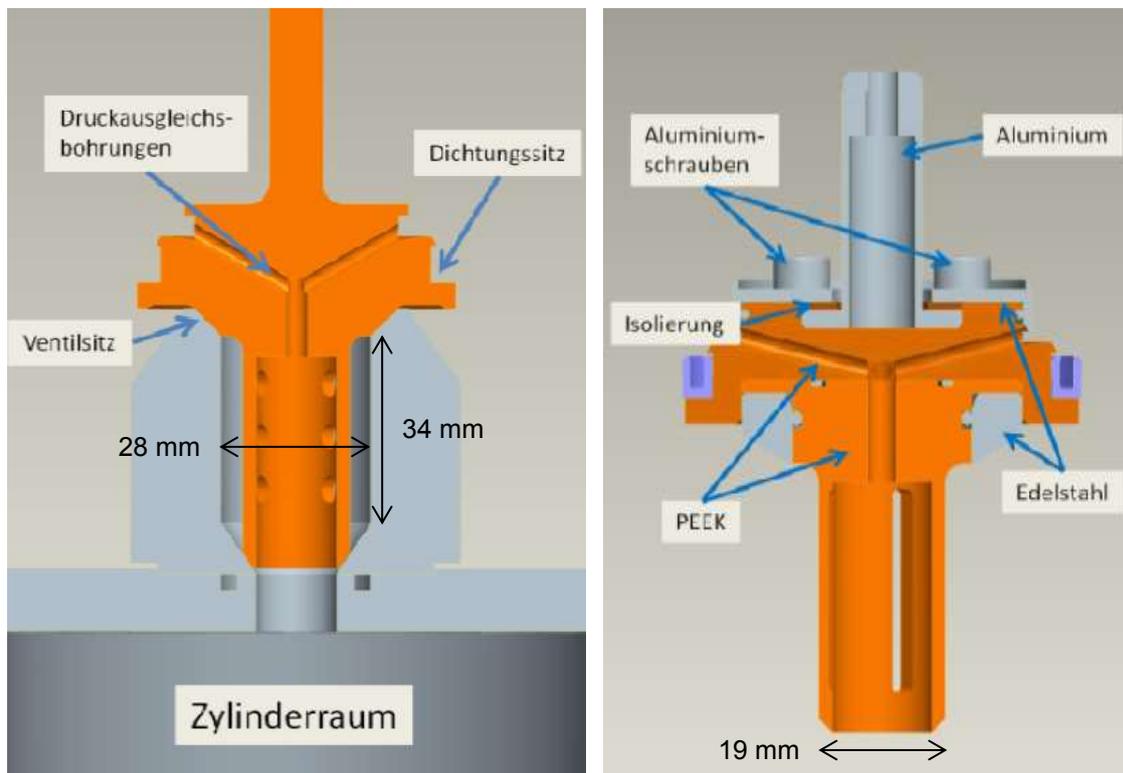


Abbildung 3: Auslassschieber als Drehteil (links) und als Materialhybrid [2]

Hierbei handelt es sich um ein Schieberventil mit Dichtfläche im Ventilsitz, Druckausgleichsbohrungen für das Überströmen in die Gegenkammer und Dichtungssitz für die verwendete Kolbendichtung der Gegenkammer. In weiteren Designschritten wurde die Dichtfläche im Ventilsitz aus Edelstahl gefertigt um plastische Verformungen des Materials wegen der schlagenden Beanspruchung an dieser Stelle zu vermeiden. Der in der linken Zeichnung in Abbildung 3 gezeigte Schieber wurde unterteilt; der obere Teil stellt den Dichtungssitz und der untere, in den Zyklon ragende Teil, ist austauschbar um alternative Geometrien erproben zu können. Außerdem wurde der Ventilschaft aus Aluminium gefertigt um eine geeignete Oberflächengüte für das führende Gleitlager zu erhalten. Die Flächenverhältnisse am Schieber sind so ausgelegt, dass bei einem Druck von 1,5 bar im Arbeitsraum der Schieber mit ca. 25 N in den Ventilsitz gedrückt wird.

Um den Anforderungen resultierend aus der thermischen Belastung während des Betriebes der Anlage zu genügen und den geforderten axialen Freiheitsgrad zu erlauben, werden zum Abdichten Kolben- und Stangendichtungen aus PTFE verwendet. Die mit dem gelben Kreis markierte Gegendruckkammer in Abbildung 4 wird durch die Dichtflächen der Stangen- und Kolbendichtung begrenzt.

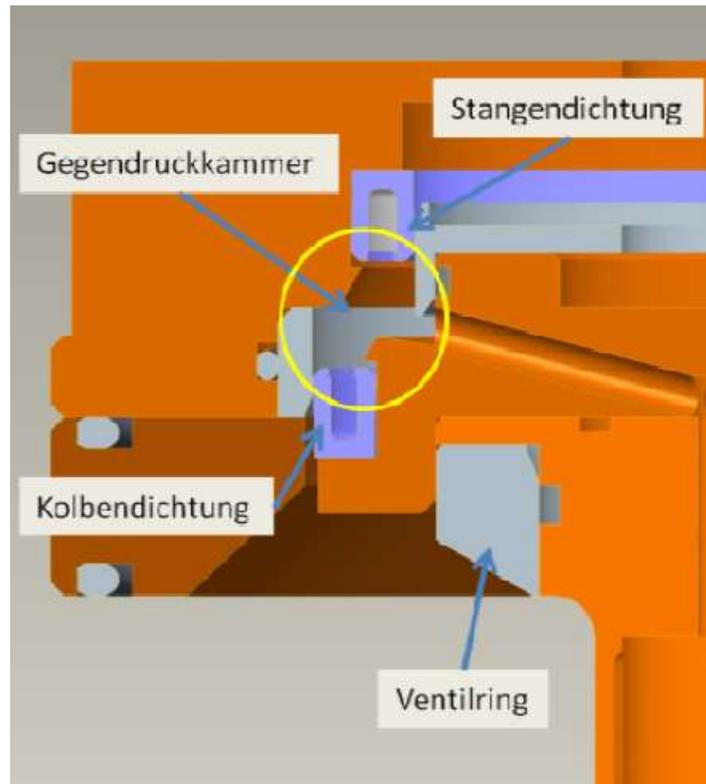


Abbildung 4: Gegendruckkammer des Auslasschiebers [2]

Da für die Ventilsteuerung, an die sehr hohe Anforderungen in Bezug auf Schnelligkeit und Genauigkeit gestellt wurden, keine auf dem Markt verfügbare Standardlösung eingesetzt werden konnte, wurde ein eigener Aktuatorenteststand aufgebaut. Abbildung 5 zeigt den verwendeten Tauchspulenaktuator sowie das mechanische und elektrische Modell.

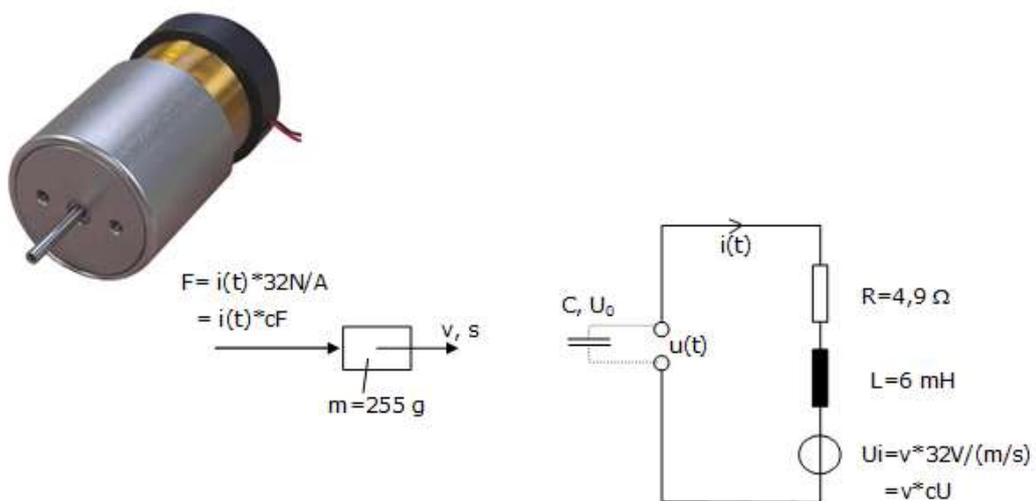


Abbildung 5: Tauchspulenaktuator und Modell

Das Gleichungssystem, das die reale Bewegung dieses Aktuators beschreibt, ist aufgrund der Konstellation der Randbedingungen nicht analytisch zugänglich. Mittels der Finite-Differenzen-Methode wurden die Gleichungen gelöst um die Ventilmovement simulieren und dadurch die Ventile einstellen zu können. Abbildung 6 zeigt die Auslenkung bei den angenommenen Randbedingungen; der dargestellte Verlauf wurde anhand von Versuchen validiert.

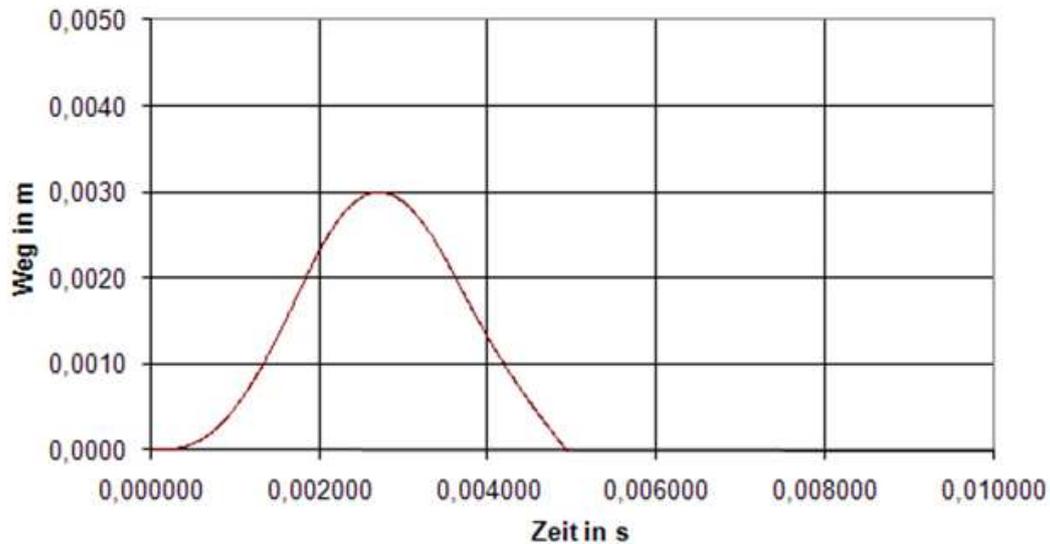


Abbildung 6: Auslenkung

Auf dem in Abbildung 7 dargestellten Teststand wurden die elektrische Ansteuerung und die Übertragung auf die Mechanik erprobt; die Auswertung wurde über einen Bewegungssensor und anhand der Ausliterung der Einspritzmasse realisiert.

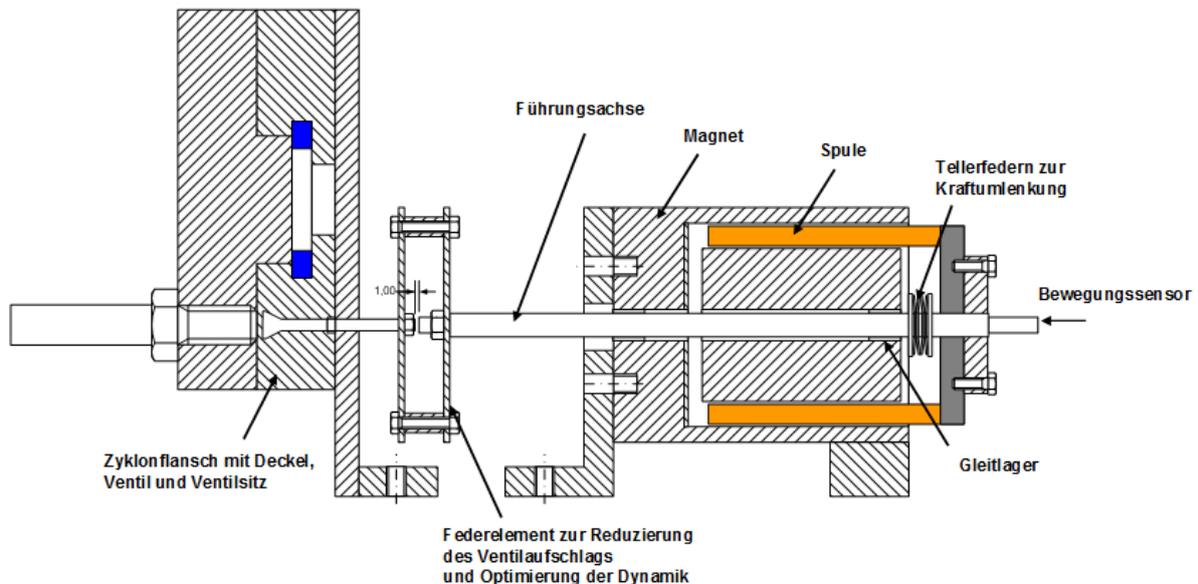


Abbildung 7: Aktuatorenteststand

2.2 Strömungssimulation

Die ermittelte Zyklongeometrie wurde anhand von Simulationen geprüft, wobei umfangreiche Anpassungen des Simulationswerkzeugs an die vorkommenden Effekte erforderlich waren; so unter anderem an die gehemmte Entspannungsverdampfung, die simultan zur Phasentrennung im Zyklon abläuft. Die Simulationsergebnisse und die Designfortschritte wurden im Rahmen von Studienarbeiten erarbeitet und dokumentiert. Sie werden zurzeit in einer Doktorarbeit zusammengestellt und erweitert.

Am ITTK wurde in Kooperation mit EIFER die CFD-basierte Modellierung der Entspannungsverdampfung im Zyklon entwickelt. Mit Hilfe einer instationären dreidimensionalen CFD-Simulation kann die Phasentrennung im Zyklon unter Einfluss der Verdampfung und der Zentrifugalbeschleunigung berechnet werden. Das CFD-Modell basiert auf den folgenden Ansätzen:

- Mehrphasenmodellierung mit der Euler/Euler-Methode.
- Flüssigkeit ist kontinuierliche Phase, Dampf ist disperse Phase.
Dies hat Einfluss auf die Berechnung der:
 - volumenspezifischen Phasengrenzfläche (→ Wärmeübergang) und
 - Wechselwirkungskräfte zwischen den Phasen (z.B. Widerstandskraft).

Die tatsächliche Morphologie des Mehrphasensystems wie Phasengrenzflächen und Blasenformen wird nicht betrachtet, da die Auflösung des Rechengitters dies nicht zulässt.

- Berechnung der Verdampfung mit dem „Thermal Phase Change-Modell“: Annahme von thermodynamischem Gleichgewicht an der Phasengrenzfläche. Berücksichtigung der Wärmeübertragungskinetik zwischen Phasengrenzfläche/Dampf und Phasengrenzfläche/Flüssigkeit.
- Modellierung der Turbulenz mit dem „Shear-Stress-Transport-Modell“: Kombination der Vorteile des $k-\omega$ -Modells in der wandnahen Strömung und des $k-\varepsilon$ -Modells in der freien Strömung. SST ist ein häufig angewendetes Modell bei Strömungssimulationen für technische Anwendungen.
- Modellierung des Widerstandsbeiwertes zwischen Blasen und Flüssigkeit: Ansatz für Blasenkollektiv bzw. Schaumströmung [4]:

$$c * W = \frac{8}{3} * (1 - \text{Dampfvolumenanteil})^2$$

- Der Blasendurchmesser der dispersen Dampfphase wird durch einen linearen Zusammenhang mit dem Volumenanteil des Dampfes modelliert.
Dies hat Einfluss auf folgende Bereiche:
 - Wärmeübergangskoeffizient (flüssigseitig: Nusselt-Korrelation)
 - volumenspezifische Phasengrenzfläche
 - Wechselwirkungskräfte zwischen den Phasen

Es konnte mit Hilfe der CFD-Simulation gezeigt werden, dass die Verdampfung im Zyklon zu einem Anstieg des Flüssigkeitsstandes führt; dieser Effekt wird auch als „Aufschäumen“ bezeichnet. Dies verschlechtert die Phasentrennung deutlich, da es verstärkt zu Mitriss der

Flüssigkeit durch die Dampfströmung kommt [3][5][6]. Allgemein hat die Modellierung des Widerstandsbeiwertes großen Einfluss auf das Aufschäumverhalten und den Mitriss von Flüssigkeit [6][7].

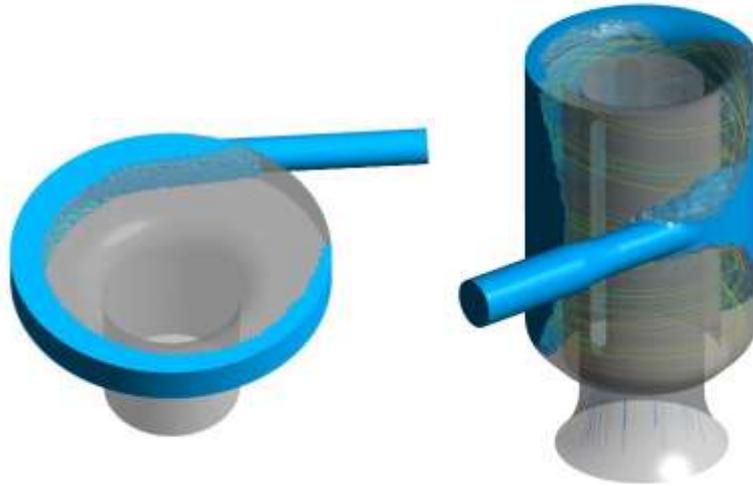


Abbildung 8: CFD Simulation der flüssigen Phase im Zyklon:
ursprüngliche (links) und aktuelle Version (rechts)

Durch eine geeignete Zyklongeometrie (h/d Verhältnis hoch), kann der Einfluss des Aufschäumens auf die Phasentrennung deutlich reduziert werden [2][3]. Im Vergleich der beiden realisierten Zyklongeometrien wird durch die CFD-Simulation eine Verbesserung des Abscheidegrades von 65% (Geometrie 1. DBU Projekt) auf 99,9% (aktuelle Version) berechnet. In Abbildung 8 sind beide Zyklongeometrien in einer 3D-Darstellung dargestellt. Weiterhin ist der Massenanteil der flüssigen Phase in einer Schnittebene durch den Zyklon in Abbildung 9 abgebildet. Das unterschiedlich starke Aufschäumverhalten in den verschiedenen Zyklongeometrien ist deutlich zu erkennen.

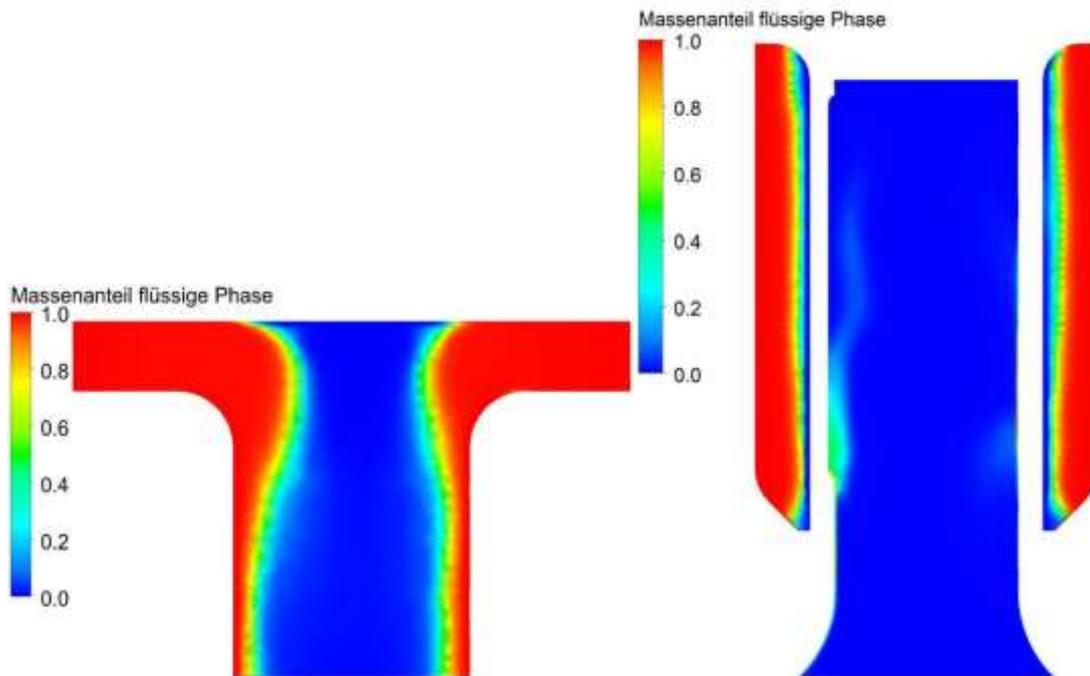


Abbildung 9: Schnitt durch den Zyklon

(links: Geometrie 1. DBU Projekt; rechts: aktuelles Design)

Neben der Phasentrennung während der Entspannungsverdampfung (1. Hälfte des Zyklus) spielt auch das Ausschieben des Arbeitsmittels (2. Hälfte des Zyklus) für die Realisierung des Prozesses im kontinuierlichen Betrieb eine bedeutende Rolle. Es muss vor allem sichergestellt werden, dass die Flüssigkeit vollständig ausgeschoben wird und nicht im Arbeitsraum akkumuliert. Das entwickelte Zyklon- und Ventilkonzept sieht vor, dass mit der Kolbenbewegung zunächst der Dampf die Flüssigkeit aus dem Arbeitsraum herausdrückt. Anschließend wird der Dampf selbst ausgeschoben. Mit Hilfe der CFD-Simulation konnte dies bestätigt werden: 98% der Flüssigkeit im Zyklon wird ausgeschoben [3].

2.3 Experimente

Mit den unter 2.1 beschriebenen Bauteilen, jedoch mit noch undichten Ventilen, konnten im Rahmen einer Diplomarbeit [8] erfolgreich Abscheideversuche durchgeführt werden. Die gemessenen Abscheidegrade (AG) von 98,9 – 99,6% reichen aus, um die technische Machbarkeit des Dreiecksprozesses zu beweisen; die Ergebnisse mit errechneten Fehlerbalken sind in Abbildung 10 zusammengefasst. Die AG_{Max} Werte entsprechen der Annahme, dass für die flüssige Phase nach Verlassen des Zyklons keine weitere Verdampfung auftritt; die AG_{Min} Werte basieren dementsprechend auf der Annahme, dass eine weitere Verdampfung und damit Massenabnahme stattfindet. Die so durchgeführte worst-case-best-case Abschätzung erlaubt die Aussage, dass der tatsächliche Abscheidegrad für den jeweiligen Versuch zwischen dem roten und grünen Balken zu finden ist.

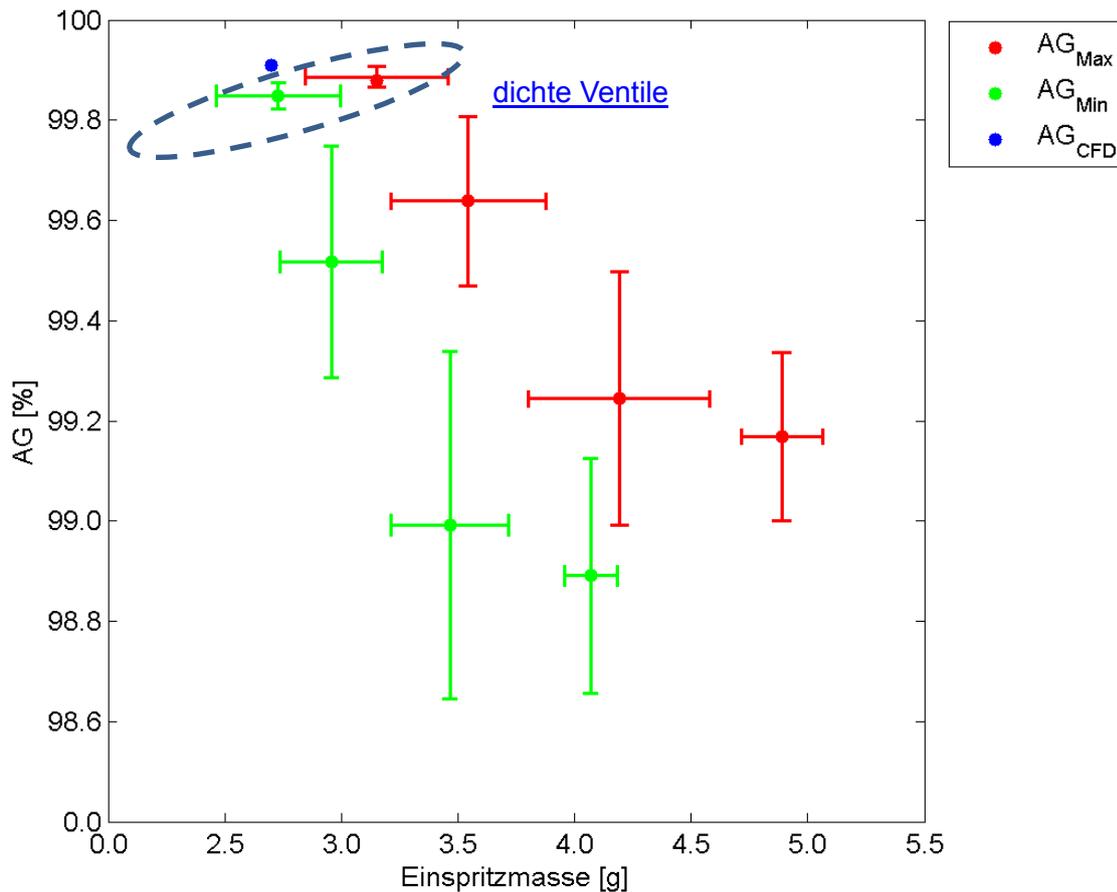


Abbildung 10: Abscheideversuche Zyklon

Nachdem eine höhere Dichtheit durch weitere Änderungen an der Ventilgeometrie erreicht wurde, konnten mit den weitestgehend dichten Ventilen weitaus bessere Abscheidegrade von 99,8% gemessen werden. Gefordert waren Abscheidegrade > 98%; dies resultiert aus der Überlegung, dass in den Kolbenraum eingeschleppte Tröpfchen an den Wänden verdampfen würden und damit in einem vom Dreiecksprozess verschiedenen thermodynamischen Kreisprozess umgesetzt werden würden. 2% flüssiges Wasser würden hierbei bereits Wirkungsgradeinbußen von ca. 10% im Vergleich zum optimalen Prozess bedeuten. Diese Abhängigkeit des Wirkungsgrades vom Massenanteil der mitgeschleppten flüssigen Farbe ist in Abbildung 11 veranschaulicht. Noch geringere Abscheidegrade könnten darüber hinaus auch Kondensationsschläge im System verursachen und dadurch die Umsetzung des Prozesskonzeptes verhindern.

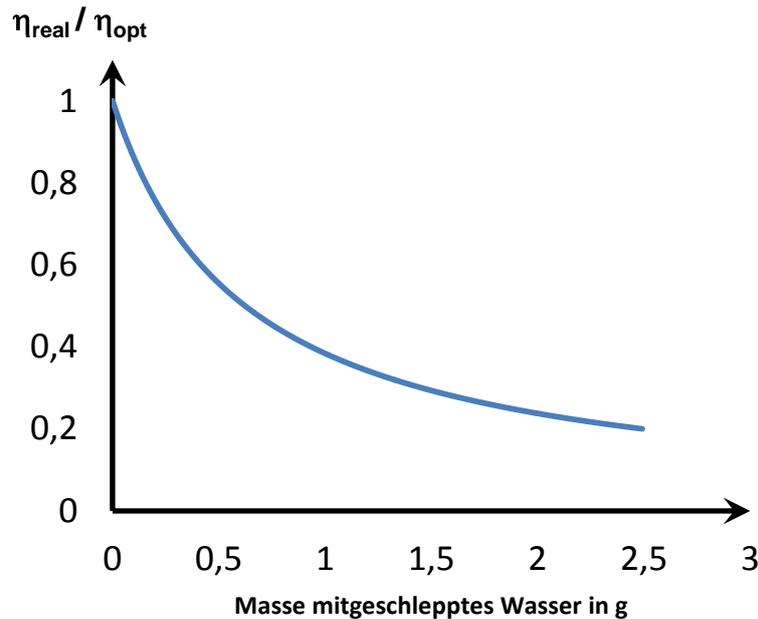


Abbildung 11: Prozesswirkungsgrad als Funktion der Phasentrennung

Der Drehzahlsteller für die elektrische Maschine wurde vom Elektrotechnischen Institut (ETI) zur Verfügung gestellt und erfolgreich getestet.

2.4 Ökologische Bilanzierung des Verfahrens

Als aktueller Stand der Technik und auf dem Markt erhältliches Produkt für Temperaturbereiche bis 350°C werden der Organic-Rankine-Cycle (ORC) und der Kalinaprozess als Vergleichsprozesse definiert.

Toxizität und Global Warming Potential (GWP) der Arbeitsmittel

Für den Dreiecksprozess werden voraussichtlich ähnliche Arbeitsmittel wie bei den Vergleichsprozessen verwendet. Generell können Kolbenmaschinen genau wie Turbinen (ORC- und Dampfturbinen) hermetisch betrieben werden. Die Technik der hermetischen Kolbenkompressoren kann somit auf Kolbenexpander übertragen werden. Deshalb ist bereits nach dem momentanen Stand der Technik gewährleistet, dass ein Austreten der potentiell menschen- und umweltgefährdenden Arbeitsmittel sicher unterbunden wird.

Der aktuelle Prototyp wird mit reinem Wasser betrieben und obliegt daher keinen besonderen Ansprüchen an Dichtheit des Arbeitsmittelkreislaufs und Rückhalten des Arbeitsfluids.

Verringerung von Treibhausgasemissionen

Der Dreiecksprozess wird genau wie die Vergleichsprozesse mit Niedertemperaturwärme als Wärmequelle betrieben. Die hieraus erzeugte elektrische Energie verdrängt demnach aus fossilen Energieträgern erzeugten Strom aus dem Netz. Die zu erwartende Steigerung der Prozesseffizienz von 30% gegenüber ORC- und Kalinaprozessen bedeutet eine dementsprechend prozentual gleichwertige Verringerung der Treibhausgasemissionen, wenn

anstatt eines ORC ein Dreiecksprozess verwendet wird. Dies gilt für große elektrische (und thermische) Leistungen, bei denen der isentrope Turbinenwirkungsgrad entsprechend hoch ist (ca. 85%). Im Bereich kleiner Leistungen sind isentrope Turbinenwirkungsgrade deutlich niedriger (< 50%), während der isentrope Wirkungsgrad von Kolbenmaschine auch bei kleinen Baugrößen hoch ist. Hier ist die Einsparung an Treibhausgasemissionen durch Dreiecksprozesse mit Kolbenmaschinen im Vergleich zu Turbinenprozessen entsprechend höher.

Noch deutlicher wird das Potential zur Verringerung der Treibhausgasemissionen wenn als Wärmequelle für den Dreiecksprozess thermische Energie eingesetzt wird, die entweder wegen ihres geringen Temperaturniveaus oder niedrigen Leistungspotentials mit den Vergleichsprozessen nicht wirtschaftlich erschlossen werden können. Dieses mögliche Revolutionierungspotential der Niedertemperaturwärmenutzung durch den Dreiecksprozess ermöglicht einen nicht zu unterschätzenden Beitrag zur Entkarbonisierung des europäischen Stromnetzes.

2.5 Ökonomische Bilanzierung des Verfahrens

Zur ökonomischen Bilanzierung des Verfahrens wurde eine Bachelorarbeit [9] durchgeführt. Die Arbeit beinhaltet eine Modellierung des Vergleichs von Dreiecksprozess, ORC und Kalinaprozess in Verbindung mit folgenden Wärmequellen:

1. Thermischer Solarkollektor (im Vergleich mit Photovoltaik)
2. Blockheizkraftwerk
3. Tiefe Geothermie

Die Wirtschaftlichkeit von Dreiecksprozessen wurde in der Arbeit für eine große Zahl von Anwendungsfällen nachgewiesen. Die Ausarbeitung zur Positionierung des Dreiecksprozesses beruht auf hypothetischen Investitionskosten für die Kolbenmaschine von 500 €/L Hubvolumen die in einer früheren studentischen Arbeit ermittelt wurden [10]. Eine wichtige Basis für diese Arbeit waren die ökonomischen Betrachtungen aus dem DBU Abschlussbericht des Vorgängerprojektes Az: 25116 – 21/0.

Besonders im niedrigen Leistungsbereich bestimmen Investitionskosten maßgeblich die Wirtschaftlichkeit. Für die weitere Umsetzung des Projektes zum Erreichen von technologischer Reife des Dreiecksprozesses findet in Kapitel 4 eine konkrete Einteilung der notwendigen Schritte in Arbeitspakete statt. Zielsetzung von 20 ist es demnach, eine eigens für den Dreiecksprozess optimierte¹ Maschine in Serie zu produzieren. Dadurch besteht die Möglichkeit, dass die oben genannten Anschaffungskosten zu hoch sind und damit die Wirtschaftlichkeit für den Dreiecksprozess besser als bisher angenommen ausfällt. Im

¹ Optimierte bedeutet in diesem Kontext: Zielsetzung ist dem im Vergleich zur Verbrennungskraftmaschine geringeren Druck (10 bar statt 100 bar), der verringerten Temperatur (200 °C statt 1000 °C) sowie der Partikelfreiheit des Arbeitsmediums (kein Ruß / Staub) in Konstruktion und Materialwahl Rechnung zu tragen. In die ökonomische Betrachtung muss auch einfließen, dass zwar keine Kraftstoffbehandlung, Zündsystem und Zylinderkühlung erforderlich ist, es sich jedoch im Gegensatz zum Verbrennungsmotor um einen geschlossenen Kreislauf mit weiteren Kreislaufaggregaten handelt.

Rahmen des Arbeitspaketes 20 wird eine detaillierte ökonomische Evaluierung der Fertigungskosten zusammen mit dem Industriepartner (z.B. einem Kolbenmaschinenhersteller) durchgeführt werden.

2.6 Maßnahmen zur Verbreitung: Studentische Arbeiten und Veröffentlichungen

Die Zwischenergebnisse wurden auf den Thermodynamik Kolloquien der vergangenen Jahre veröffentlicht; die aktuellsten Ergebnisse aus den Abscheideexperimenten werden auf dem Thermodynamik Kolloquium in Hamburg-Harburg im Oktober 2013 vorgestellt. Im Idealfall werden auch Ergebnisse aus Versuchen mit der laufenden Maschine je nach Projektverlauf vorhanden sein und in präsentierbarer Form vorliegen. Die Diplomarbeit zu den Abscheideversuchen und weitere Studienarbeiten wurden fertiggestellt. Einen Überblick über bisher im Rahmen des Projektes durchgeführte studentische Arbeiten ist im Literaturverzeichnis zu finden.

Zusätzlich gab es weitere Veröffentlichungen und es wurden folgende Veranstaltungen zur Projektpräsentation und Öffentlichkeitsarbeit genutzt:

- M. Steffen, M. Löffler, K. Schaber: Efficiency of a new Triangle Cycle with flash evaporation in a piston engine, Energy, Article accepted for publication (26 Nov 2012), Received at Elsevier (28 May 2013)
- M. Steffen, M. Löffler, K. Schaber: Simulation of the efficiency of a new triangle cycle with flash evaporation in a piston engine, Vortrag, Thermodynamik-Kolloquium & 26th European Symposium on Applied Thermodynamics (ESAT) Potsdam (2012)
- Der Dreiecksprozess: der Kreisprozess mit dem theoretisch höchsten Wirkungsgrad. Messestand bei der Woche der Umwelt im Schloss Bellevue Berlin (2012)

3 Fazit

Die erfolgreichen Abscheideversuche belegen: Der Dreiecksprozess ist machbar. Weitere Schritte zur Nutzbarmachung des Prozesses werden dringend empfohlen.

Die Zyklon bewirkt eine Abscheidung von > 99%. Damit ist der wichtigste Teilprozess des Dreiecksprozesses, die gehemmte, instationäre Entspannungsverdampfung und die simultan ablaufende Abscheidung machbar. Die Geometrie des Zyklons wurde analytisch ermittelt und die Funktion anhand von Strömungssimulationen und Messungen bestätigt. Die Ausweitung der Konstruktionen auf große eingespritzte Flüssigkeitsmengen und andere Arbeitsmittel² ist erforderlich.

Wesentliche Bauteile zur Realisierung des Prozesses konnten konstruiert werden. Die Einlassventile sind ausreichend schnell und dicht. Die Auslassventile öffnen einen Querschnitt, der das Ausschleiben der gesamten flüssigen Phase erlaubt. Weiterentwicklungen der Grundkonstruktionen der Ventile in Richtung Dauerfestigkeit und Dauerdichtigkeit für den

² Unpolare Arbeitsmittel weisen aufgrund geringerer Oberflächenspannung eine deutlich abweichende Nukleationskinetik auf. Diese wirkt u.a. auf das Aufschäumverhalten.

Einsatz in Serienmaschinen sind erforderlich. Hierfür existieren bereits teilweise konkrete Ansätze und ein generell strukturierter Plan zum zeitlichen Ablauf dieses essentiellen Projektschrittes.

Die Verwendung anderer Arbeitsmittel als Wasser, z.B. Kältemittel und organische Fluide, erlaubt in der Theorie den Aufbau von Maschinen mit deutlich höherer Leistungsdichte, so dass die Nutzung von Abwärme unter 100°C wirtschaftlich werden kann. Anwendungsbereiche und ihr Marktpotential wurden identifiziert [9] und erste Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen durchgeführt, die positive Aussichten für den Dreiecksprozess erwarten lassen, allerdings auch auf das zwingend zu erschließende Potential durch von Wasser verschiedener Arbeitsmittel hinweisen.

In weiteren interdisziplinären Forschungsprojekten sollen weitreichende Grundlagen für die Nutzbarmachung des Dreiecksprozesses erarbeitet werden³.

- Ermittlung von Zyklongeometrien für diverse Arbeitsmittel, Einspritzmengen und Entspannungszeiten. Aufbau eines Teststandes für Zyklone zur Messung von Abscheidung und Kinetik (Thermodynamik: Nukleation, Strömungssimulation)
- Entwicklung von angepassten Kolbenmaschinen (Geometrie, Material) und Ventiltrieben (Maschinenbau, Materialwissenschaften)
- Ermittlung von MSR für den Prozess
- Aufbau von Prototypen und Testständen

Der Dreiecksprozess verspricht einen wesentlichen höheren Wirkungsgrad als gängige Methoden zur Niedertemperaturumwandlung. Eine erfolgreiche Weiterentwicklung stellt einen Meilenstein für eine wirtschaftlichere und effizientere Umwandlung von erneuerbaren Energiequellen, Abwärme sowie Umweltwärme dar.

4 Weiterer Projektverlauf und Ausblick

Die weiteren Projektschritte werden konkret für eine mögliche Verlängerungsphase beschrieben und schematisch für die langfristige Projektumsetzung in Arbeitspakete unterteilt. Teilweise simultan bearbeitete Arbeitspakete erlauben volle Einflussnahme von Zwischenergebnissen und damit eine laufzeitoptimierte Projektdurchführung.

Die nachfolgend dargestellten Ziele konnten im bisherigen Projektverlauf während dem abgelaufenen Förderzeitraum nicht umgesetzt werden, wurden verworfen oder befinden sich gerade in der Umsetzung:

1. Eine um 180° gedrehte Variante des Zyklons wurde geplant, jedoch nicht umgesetzt. Hierbei würde der Zylinderkopf um 180° gestürzt und der Dampf über Rohrleitungen zum Zylinder geführt. Bei diesem Aufbau ist das Totvolumen drastisch vergrößert. Aufgrund der Tatsache, dass die Abscheidung auch ohne das Stürzen

³ Ein Projekt zur sensiblen thermischen Speicherung elektrischer Energie liegt bereits beim Forschungsträger Jülich.

ausgesprochen gut funktioniert, wird von der Umsetzung des Konzepts zunächst abgesehen.

2. Durchführung und Auswertung von Experimenten: Hier konnten bisher nur, jedoch erfolgreich, Abscheideversuche und Einspritzmengenbestimmungen durchgeführt werden. Weitere Abscheideversuche zur Erhärtung der bisherigen Ergebnisse und mit senkrechtem, nach unten gerichtetem Dampfstrahl und Funktionstests mit laufender Maschine stehen noch aus.
3. Die Variation der Drehzahl und Optimierungen an der laufenden Maschine wurden noch nicht ausgeführt.

Arbeitspaket WP-L1 (Lab): Verlängerungszeitraum (6 Monate)

1. Durchführung von Abscheideversuchen: Bisher wurden die Abscheideversuche mit horizontaler Dampfausströmung gemessen (Diplomarbeit Tim Bouc). Dies ist jedoch nicht die endgültige Einbaulage der Zyklone. Es sollen Versuchsserien mit senkrecht nach unten gerichteten Dampfstrahlen durchgeführt werden, die die hohen Abscheidegrade bestätigen. (EIFER, ITTK).
2. Probleme mit der Elektrotechnik: Die Aussetzer bei der Ansteuerung der Einlassventile sollen behoben werden. Die Ursache für die Störung der Messungen durch die Leistungselektronik muss ermittelt und beseitigt werden.
3. Laufende Maschine: Nachdem die Vorversuche zur Bestimmung der tatsächlichen Einspritzmenge durchgeführt wurden, sollen Versuche mit laufender Kolbenmaschine gefahren werden. Hier soll u.A. auch die Drehzahl variiert werden. (EIFER, ITTK).
4. Ventiltechnik: Gegebenenfalls sind neue bzw. veränderte Konstruktionsansätze der Ventile erforderlich, die gemeinsam mit MOT ausgearbeitet werden.

Die nachfolgend dargestellten Arbeitspakete geben einen Einblick in die aus Sicht der Autoren mittel- und langfristig erforderlichen konstruktiven Maßnahmen. Möglicherweise können diese Arbeiten in einem Folgeprojekt durchgeführt werden.

Arbeitspaket WP-L2 Maschinenbau und Werkstoffkunde

1. Weiterentwicklung der Einlassventile: die Einlassventile sind anfangs dicht, jedoch verlieren sie mit zunehmender Versuchsdauer leicht an Dichtheit. Es sollen fortgeschrittene Ventilvarianten ermittelt und umgesetzt werden, die dicht bleiben und möglichst für einen späteren Dauereinsatz geeignet sind. (EIFER, ITTK, MOT).
2. Weiterentwicklung der Auslassventile: Das Konzept der selbstverstärkenden Ventile hat sich bewährt, wobei zurzeit hohe Anforderungen an eine gute Führung der Ventile gestellt sind. Da die Kombination aus PEEK und Edelstahl jedoch bei hohen Temperaturen aufgrund unterschiedlicher Ausdehnungskoeffizienten „arbeitet“ und sich Halteschrauben lösen, sollen alternative Konstruktionen ermittelt werden. Hierzu wurden bereits Designvorschläge erarbeitet. (EIFER, ITTK, MOT).

Arbeitspaket WP-L3: Thermodynamik

Aufbau Zyklon Teststand:

1. Scale-up des Zyklons: Das Abdecken verschiedener Marktsegmente ist nur möglich wenn die Wärmekraftmaschine in unterschiedlichen Leistungsklassen angeboten werden kann. Ausschlaggebend ist hierfür ein erfolgreiches up-scaling des Zyklons als entscheidendem Bauteil. Die mögliche Kaskadenbauweise kommt den Anforderungen des Marktes an ein breites Leistungsspektrum entgegen.
2. Variation des Arbeitsmittels: Der Einbau eines zusätzlichen Edelstahlwärmetauschers im Sekundärkreis mit z.B. organischen Arbeitsmitteln erlaubt die weitere Verwendung des Primärkreises mit Warmwasseranlage und Kreislaufmedium Wasser. Somit wird ein relativ einfacher und finanzielle Ressourcen schonender Ausbau des Versuchsstandes realisiert, der eine Vielzahl von weiteren Experimenten ermöglicht.

Arbeitspaket WP-L4: Mess- und Regelungstechnik

1. Störungen der Stromregler: Es hat sich herausgestellt, dass die Stromregler der Aktuatoren die Messungen der Thermospannungen massiv stören. Hier wurde bisher noch keine Lösung gefunden. Während die Ventile schalten ist keine Temperatur- oder Druckmessung durchführbar. Gemeinsam mit ETI muss hier eine Lösung gefunden werden. (EIFER, ITTK, ETI).
2. Die Stromregler funktionieren nicht immer zuverlässig; es treten unerklärliche Stromprofile auf. Gemeinsam mit ETI soll dieser Zustand geprüft und beseitigt werden. Dieser Teil des Arbeitspakets wird aufgrund seiner Relevanz bereits im angestrebten Projektverlängerungszeitraum begonnen.
3. Der Einbau und die Erprobung von Differenzdruckaufnehmern zwischen Druck im Kolbenraum bei Kolben im UT und Umgebungsdruck zur Steuerung des Öffnens der Auslassventile sind vorgesehen.

Arbeitspaket WP-D1 (Design): Neuentwicklung einer spezialisierten Kolbenmaschine

1. In Zusammenarbeit mit dem Institut für Kolbenmaschinen (IFKM) wird die Auslegung einer auf die thermodynamische Prozessführung des Dreieckprozesses spezialisierten Kolbenmaschine angestrebt. Auf Basis dieser Neuentwicklung soll eine Kleinstserie produziert werden.
2. Die Werkstoffauswahl für diese Neukonstruktion soll in Zusammenarbeit mit dem Institut für Werkstoffkunde (IWK) spezifisch auf die Temperaturen und Drücke des Prozesses ausgerichtet sein; ein besonderer Schwerpunkt liegt auf ökonomischen Gesichtspunkten. Eine Hybridbauweise für ausgewählte Komponenten wird favorisiert.

Arbeitspaket WP-F1 (Field): Feldversuch

1. Die Planung und Durchführung von Feldversuchen mit einer Kleinstserie, die auf dem weiterentwickelten Prototypen basiert, wird angestrebt. Je nach Verlauf von Arbeitspaket WP-D1 und dem Fortschritt des Gesamtprojektes kann die Serie auch auf einer Neuentwicklung basieren.
2. Die Erkenntnisse über den Betrieb; sowie das Erkennen von Designschwächen und Betriebsproblematiken (z.B. Vermischung Arbeitsmittel und Öl o.Ä.) werden gezielt genutzt um die Weiterentwicklung des Prototypen voranzutreiben und die Technologiereife zu erhöhen.

5 Literatur

- [1] Christopher Hort: Ein Ansatz zur Neukonstruktion eines speziell angepassten Zylinderkopfes für die optimierte Umsetzung eines neuartigen thermodynamischen Prozesses, Diplomarbeit, IFKM (2011)
- [2] David Bidinger: Ausarbeitung und konstruktive Umsetzung unterschiedlicher Ventilkonzepte für einen neuartigen Prozess, Bachelorarbeit, IFKM (2012)
- [3] Yannik Ille: Entspannungsverdampfung in einem Zyklon - Einfluss verschiedener Geometrien auf die Phasentrennung, Studienarbeit, ITTK (2012)
- [4] Ishii, Zuber: Drag coefficient and relative velocity in bubbly, droplet or particulate flows, AIChE Journal 25,5 1979
- [5] Pascal Bormann: CFD-Simulation der schnellen Abkühlung einer Flüssigkeit und deren Einfluss auf die Wandtemperatur, Diplomarbeit, ITTK (2010)
- [6] Teresa Blochmann: Entspannungsverdampfung in einem Zyklon - Einfluss verschiedener Verdampfungsmodelle, Studienarbeit, ITTK (2012)
- [7] Johannes Biernath: Entspannungsverdampfung in einem Zyklon - Implementierung verschiedener Verdampfungsmodelle, Bachelorarbeit, ITTK (2012)
- [8] Tim Bouc: Abscheideversuche in einem Zyklon mit Flashverdampfung, Diplomarbeit, EIFER (2013)
- [9] Nike Trudel: Kreislaufsimulation eines neuartigen Prozesses zur Nutzung von Niedertemperaturwärme unter Berücksichtigung verschiedener Abwärmequellen, ITTK (2013)
- [10] Sabrina Payer: Analyse der wirtschaftlichen Randbedingungen eines neuartigen thermodynamischen Prozesses, IIP (2010)

6 Anhang

6.1 Antragssteller

European Institute for Energy Research, EifER, Emmy-Noether-Str. 11, 76131 Karlsruhe, Europäische wirtschaftliche Interessenvereinigung (WwIV), gegründet von der Electricité de France (EDF) und der Universität Karlsruhe (jetzt KIT).

Projektleiter: Dr.-Ing. Michael Löffler; Tel.: 0721 6105 1427; Fax: 721 6105 1332
loeffler@eifer.uni-karlsruhe.de; www.eifer.org

Geschäftsfelder: Forschung und Entwicklung im Bereich Energie: Die Entwicklung von Know-How und innovativen Lösungen und Produkten für die Verwendung von Energie und den damit verbundenen wirtschaftlichen und umweltpolitischen Fragen unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit; die Verbesserung der Kontakte zwischen der akademischen Forschung und Entwicklung und der Industrie zur Lösung kurz- und langfristiger industriebezogener Fragen und zur Vereinfachung des Wissenstransfers zwischen der akademischen Forschung und Entwicklung der Industrie; die Entwicklung der Verbindung mit den Forschungs- und Entwicklungsnetzen der Universitäten und der Industrie in Deutschland, insbesondere im Land Baden-Württemberg; die Stärkung der Stellung der Mitglieder bei europäischen und sonstigen öffentlichen Programmen, insbesondere im Rahmen der Entwicklung des neuen Konzepts des "Europäischen Forschungsraums"; mit dem Ziel, die wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Tätigkeiten ihrer Mitglieder zu entwickeln und bei diesen Tätigkeiten verbesserte Ergebnisse zu erzielen.

6.2 Kooperationspartner

Institut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik (ITTK), Engler-Bunte-Ring 21, D-76131 Karlsruhe

Ansprechpartner: Dipl.-Ing. Michael Steffen, Geb. 40.32, Zi.-Nr. 109, Telefon: 0721 608-2730; Fax: 0721 608-2335.

Forschung am ITTK: Stoffdaten, Prozesse zur Energiewandlung und zur thermischen Trenntechnik. Spontane Phasenübergänge (Nebelbildung in technischen Prozessen, organische Nanopartikel). Das Institut verfügt über eine Vielzahl von Versuchsanlagen vom Labor- bis zum Pilotmaßstab, die mit moderner Messtechnik ausgestattet sind. Die experimentellen Arbeiten werden durch die Entwicklung von Modellierungsmethoden und von Simulationswerkzeugen unterstützt. Die am Institut bearbeiteten Forschungsthemen reichen von Grundlagenuntersuchungen bis zur prozesstechnischen Anwendung.

MOT Forschungs- und Entwicklungsgesellschaft für Motorentechnik, Optik und Thermodynamik mbH, Rintheimer Querallee 2, 76131 Karlsruhe

Ansprechpartner: Dr.-Ing. Fatih Sarikoc, Telefon: 0721 20482 210,
fatih.sarikoc@motweb.de

Forschung bei MOT: Forschungs- und Entwicklungsarbeiten an Motoren zur Verbesserung des Prozesswirkungsgrades sowie der Schadstoffemissionen. Einsatz moderner optischer und thermodynamischer Analysemethoden.