Klaus Radomski (Autor)

Theoretische und experimentelle Analyse von Dosierungs- und Verdampfungsvorgängen in porösen Werkstoffen zur Atemgaskonditionierung

https://cuvillier.de/de/shop/publications/1468

Copyright:
Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentzsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: https://cuvillier.de

1 Einführung und Motivation

Bei der künstlichen Beatmung von Patienten, die über einen längeren Zeitraum andauern kann, spielt die Atemgaskonditionierung eine entscheidende Rolle. Beispielsweise können bei intubierten Patienten die natürlichen Mechanismen der Atemgaskonditionierung ihre Funktion nicht entfalten, weil die oberen Atemwege überbrückt sind. Um ein Austrocknen dieser Patienten zu vermeiden, muss das aus dem Beatmungsgerät ausströmende Atemgas mit Hilfe von Zusatzgeräten auf physiologisch erforderliche Werte angefeuchtet und erwärmt werden.

Die Bedeutung der Atemgasanfeuchtung kann anhand folgender Zahlen verdeutlicht werden. Bei einer natürlichen Nasenatmung in Ruhe wird die eingeatmete Umgebungsluft in den oberen Atemwegen angefeuchtet und erreicht in der Lunge eine relative Feuchte von 100 % bei etwa 37 °C, bzw. eine absolute Feuchte von 44 mg/L. Bei der Exspiration kann jedoch nur ein Teil der Feuchte aus der Ausatemluft wieder aufgenommen werden, so dass diese beim Austreten aus der Nase eine absolute Feuchte von 34 mg/L aufweist. Die Differenz in der absoluten Feuchte zwischen der Exspiration und der Inspiration beträgt bei der Nasenatmung typischerweise etwa 24 mg/L und wird vom Körper ausgeglichen. Bei der künstlichen Beatmung mit trockenen Atemgasen ist die Differenz in der absoluten Feuchte deutlich größer als bei der Nasenatmung, weil das Inspirationsgas nahezu keine Feuchte enthält. Bei der Beatmung durch einen Tubus ist außerdem die Aufnahmefähigkeit der Feuchte bei der Exspiration stark eingeschränkt. Das direkt in die Lunge eingeleitete Atemgas entzieht dieser die Feuchtigkeit. Dieser Feuchteverlust kann auf Dauer vom Organismus nicht ersetzt werden, so dass schwere Schädigungen der Lunge die Folge sein können. Rathgeber zeigt beispielsweise, dass nach 10stündiger Beatmung mit trockenen Atemgasen das Ziliarepithel aus dem Hauptbronchusbereich eines Schweines schwere Schädigungen erleiden kann [59]. Bereits nach wenigen Minuten der Beatmung mit trockenen Atemgasen würden dagegen die irreversiblen Schädigungen der Flimmerhärchen bei Früh- oder Neugeborenen auftreten. Zur Vermeidung dieser Schädigungen müssen die Patienten mit einem feuchten und warmen Atemgas beatmet werden.

Grundsätzlich gibt es viele unterschiedliche Anfeuchtertypen und -bauformen, die bereits in [57] ausführlich vorgestellt und bewertet worden sind. Daher sollen an dieser Stelle nur die wichtigsten Vertreter erwähnt werden:

HME (Heat and Moisture Exchanger),

auch passive künstliche Nase genannt, ist ein Filter aus einem hygroskopischen Material, das patientennah am Y-Stück angebracht wird. Bei der Exspiration wird die Feuchte in dem Filter aufgenommen und gespeichert. Die absolute Feuchte des Ausatemgases nach dem HME beträgt so nur 6 mg/L. Gleichzeitig wird das Atemgas abgekühlt. Bei der Inspiration nimmt dann das trockene Atemgas die Feuchte und die Wärme aus dem HME wieder auf. Die Austrocknung der Lunge kann so verhindert oder mindestens verringert werden. Die passive künstliche Nase wird kostengünstig als Einwegteil hergestellt und aufgrund der einfachen Handhabung, zumindest bei der Kurzzeitbeatmung von Erwachsenen, häufig eingesetzt. Sie benötigt keine weitere Energie- oder Wasserzufuhr. Die Verwendung von HME's ist aber auch mit einigen Nachteilen verbunden. Das Filter stellt einen relativ hohen Strömungswiderstand, die Resistance, dar, die sich im Laufe der Beatmung und je nach Feuchtebeladung ändern kann, vgl. Lucato [44]. In der Neonatologie werden künstliche Nasen aufgrund des zusätzlichen Totraums und der dadurch deutlich reduzierten CO_2-Auswaschung nicht akzeptiert. Die Anfeuchtungsperformance ist für die Langzeitbeatmung mit einer negativen Netto-Wasserbilanz von 6 mg/L ebenfalls nicht ausreichend. Diesen Nachteil können aktive künstliche Nasen durch zusätzliche Wasserdosierung zwar

ausgleichen, die anderen Nachteile werden aber dadurch nicht behoben. Außerdem erhöht sich durch das Anbringen einer weiteren Wasserleitung und in der Regel auch eines weiteren Kabels für die aktive Beheizung der Handhabungsaufwand. Weiterhin ist die Gefahr des Wasserdurchbruchs oder einer Überhitzung der patientennahen Anordnung besonders kritisch zu bewerten.

Verdunster

Der Marktführer auf dem Gebiet der Atemgasanfeuchtung ist das System von der Firma Fisher&Paykel. Der Anfeuchter ist einfach aufgebaut und besteht aus einer Heizplatte mit einer darauf angebrachten Befeuchtungskammer. Diese Kammer wird mit Wasser gefüllt und durch die Energiezufuhr von der Heizplatte auf eine Wassertemperatur im Bereich von 40 bis 70 °C erwärmt. Durch ein einfaches Schwimmerventil ist eine automatische Befüllung der Kammer möglich. Das anzufeuchtende Atemgas wird in die Kammer geleitet, wo es über der erwärmten Wasseroberfläche Feuchtigkeit aufnimmt und gleichzeitig erwärmt wird. Durch Vergrößerung der Wasseroberfläche mit Hilfe von Dochtsystemen kann eine bessere Anfeuchtungsperformance erreicht werden, die aber, wie beispielsweise von Müller-Hansen [50] gezeigt, bei Atemgasvolumenströmen oberhalb von 15 L/min oder steigenden Atemgaseintrittstemperaturen abnimmt. Die Resistance des Gesamtsystems ist gering, durch konsequente Verkleinerung der Befeuchtungskammer wurde die Compliance, also das durch das Atemgas komprimierbare Volumen der Kammer, auf einen akzeptablen Wert reduziert. Allerdings ist die Befeuchterkammer MR290 mit ca. 250 mL komprimierbarem Volumen für bestimmte Anwendungen, z. B. die Hochfrequenzbeatmung von Neugeborenen, relativ groß. Weiterhin ist eine unabhängige Einstellung der Feuchte und der Atemgasaustrittstemperatur bei diesem Aufbau der Befeuchtungskammer nur indirekt und begrenzt möglich, da das Atemgas bei gleichbleibenden Einströmbedingungen passiv durch das Strömen über der Wasseroberfläche auf einen konstanten Wert angefeuchtet wird. Die Reduzierung der relativen Feuchte ist somit nur durch eine Erhöhung der Atemgastemperatur in einem beheizten Inspirationsschlauch realisierbar. **Abbildung 1.1** zeigt ein CPAP[1]-Gerät von Fisher&Paykel mit integriertem Atemgasanfeuchter und einem beheizten Inspirationsschlauch für die Anwendung bei der Heimbeatmung, beispielsweise für Patienten mit Schlafapnoe.

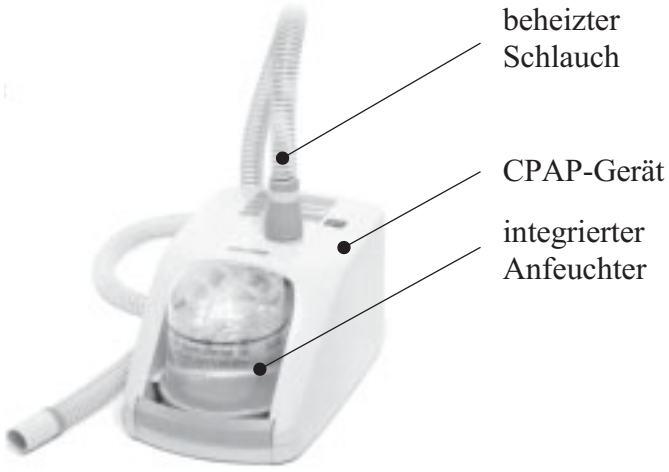

Abbildung 1.1: Sleep Style^{TM} 600 CPAP series [http://www.fphcare.com]

Bei vielen Anfeuchtungsprinzipien können zum Teil schwerwiegende Nachteile, sei es in der Handhabung oder in der Anfeuchtungsleistung identifiziert werden. Beispielhaft sei

[1] continuous positive airway pressure

an dieser Stelle auf die Veröffentlichungen von RATHGEBER oder LELLOCHE [42, 60] verwiesen. Ein grundsätzliches Problem bei allen aktiven Anfeuchtern ist die Gefahr der Kondensation des feuchten Atemgases am Anfeuchterausgang, die die Sensorik und damit die Regelung des Anfeuchters negativ beeinflussen kann. Die Kondensation in den Atemschläuchen muss ebenfalls verhindert werden, weil diese die Sensorik und die Aktorik am Beatmungsgerät negativ beeinträchtigen kann. Weiterhin ist sie aus der Sicht der Hygiene eine wichtige Ursache für die Kreuzkontamination des Atemsystems. Das Kondensat kann beispielsweise durch Verwendung von beheizten Atemschläuchen verhindert, bzw. deutlich reduziert werden, dessen Regelung im Gesamtanfeuchtungskonzept berücksichtigt werden muss.

An den vorangehenden Überlegungen erkennt man einen Bedarf an einem Anfeuchtungsprinzip, das sehr gute Verdampfungsleistung über einen weiten Flowbereich und insbesondere bei hohen Flows bis 50 L/min liefert, dabei kleine Resistance und Compliance aufweist und einfach aufgebaut ist. Geht man von dem Verdunstungsprinzip aus, so muss dazu die wirksame, wasserbenetzte Oberfläche vergrößert werden. Die Möglichkeit der Verwendung einer größeren Verdampfungskammer kommt aufgrund der damit verbundenen Vergrößerung der Compliance nicht in Betracht. Eine Abhilfe kann hier ein poröser Werkstoff liefern, der bei kleinen geometrischen Abmessungen eine große Oberfläche bereit stellen kann. Andererseits sind poröse Materialien in der Lage, Flüssigkeiten aufgrund von Kapillarkräften zu transportieren. Die Kapillarität ist ein Phänomen, das z. B. in dünnen Kapillarröhrchen auftritt. Wird die Oberfläche des Kapillarröhrchens von der Flüssigkeit benetzt, so entsteht an der Meniskusoberfläche der Flüssigkeit eine nach oben resultierende Kapillarkraft, die eine entsprechende Bewegung der Flüssigkeit hervorruft. Die erste wissenschaftliche Abhandlung über die Kapillarität ist von LEONARDO DA VINCI (1452-1519) überliefert. Darin beobachtet er den Flüssigkeitstransport in Weinpflanzen und das Eindringen des Wassers in einen Schwamm und zeigt, dass diese Vorgänge den gleichen Ursprung haben[2]. Eine ausführliche geschichtliche Aufzeichnung der wissenschaftlichen Fortschritte bei der Untersuchung des Kapillaritätsphänomens ist in der Arbeit von RICKEN [62] zu finden. Im Alltag begegnet uns die Kapillarität z. B. bei der Benutzung von Kerzen. Das geschmolzene Wachs wird nämlich mit Hilfe von Kapillarkräften im Docht zur Feuerstelle transportiert, verdampft und verbrennt dort und bringt mit seiner Flamme das noch feste Wachs zum Schmelzen.

Betrachtet man die porösen Werkstoffe aus dem Blickwinkel des Stofftransports, so können diese also als Dochte, bzw. Kapillarpumpen aufgefasst werden. Es stehen somit Pumpen zur Verfügung, die keine externe Energiezufuhr benötigen und keinem mechanischen Verschleiß unterliegen, vgl. **Abbildung 1.2**. In Bezug auf deren Einsatz in Atemgasanfeuchtern sind das sehr wichtige Voraussetzungen, die den Aufbau eines einfachen und robusten Systems ermöglichen. Aus den Gesichtspunkten der Hygiene und in Analogie zu den Vorgängen beim Brennen einer Kerze liegt es nahe, die von der Kapillarpumpe bereitgestellte Flüssigkeit zu verdampfen und dem Atemgas zuzuführen. Das poröse Material der Kapillarpumpe würde hier in vorteilhafter Weise dem Leidenfrosteffekt entgegenwirken und zu einer gleichmäßigen Verdampfung beitragen [23]. Damit wäre eine kompakte Anordnung, ein sogenannter Kapillarverdampfer, vorstellbar, der große Dampfmengen produzieren und ausschließlich über den Wärmeeintrag in den Verdampfer, d. h. direkt über die eingestellte elektrische Leistung, geregelt werden könnte.

Um eine solche Kapillarpumpe für den Einsatz in einem Atemgasanfeuchter auslegen zu können, sollen die wissenschaftlichen Grundlagen der Transportvorgänge erarbeitet und unter den speziellen Randbedingungen der Beatmungstechnik betrachtet und analysiert

[2] vgl. T. Lücke: *Leonardo da Vinci - Tagebücher und Aufzeichnungen.* Leipzig, Paul List Verlag, 1940

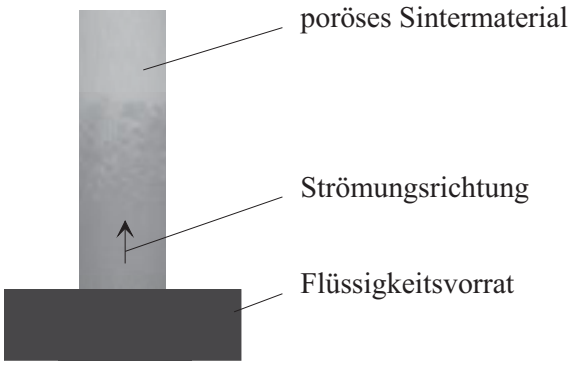

Abbildung 1.2: Kapillarpumpe aus porösem Sintermaterial mit aufsteigender Flüssigkeit

werden. In diesem Zusammenhang sind insbesondere der Kapillartransport bei wechselndem Beatmungsdruck und die Verdampfungsvorgänge in porösen Werkstoffen, also das strömungsmechanische und thermische Gleichgewicht bei der Verdampfung, zu untersuchen. Dieses Gleichgewicht kann insbesondere bei einer intermittierenden Beatmung mit diskontinuierlichem Flow und unterschiedlichen Druckniveaus sehr instabil sein. Die Kapillarpumpe sollte in einem solchen dynamischen Fall in der Lage sein, den Beatmungsdruck zu überwinden und eine ausreichende Flüssigkeitsversorgung auch bei wechselnden Gegendrücken zu gewährleisten. Diese Aufgabenstellung bildet daher die Motivation für die vorliegende Arbeit und wird im nächsten Kapitel detaillierter beschrieben und präzisiert. Außerdem werden die für den Einsatz in einem Kapillarverdampfer in Frage kommende Werkstoffe analysiert und im Hinblick auf ihre Eigenschaften charakterisiert.

In Kapitel 3 werden dann die für die Modellierung der Vorgänge in einer Verdampfereinheit erforderlichen theoretischen Grundlagen erläutert. Insbesondere wird auf die Mehrphasenströmung und die Wärmeübertragung im Rahmen der Theorie poröser Medien (Theory of Porous Media) eingegangen.

Kapitel 4 beschäftigt sich mit der Analyse des auf einem Kapillarverdampfer basierenden Anfeuchtungsprinzips. Ausgehend von den Randbedingungen werden die Vorgänge in den porösen Medien modelliert und mit Hilfe einer numerischen Simulation berechnet. Die Erkenntnisse aus der Simulation fließen in den Aufbau von Funktionsmustern, deren experimentelle Untersuchungen ebenfalls vorgestellt werden, ein.

Es ist leicht erkennbar, dass Kapillarpumpen für den Transport verschiedenster Flüssigkeiten benutzt werden können. In der Beatmungstechnik hat neben der Atemgasanfeuchtung für die Langzeitbeatmung, die Erzeugung von inhalativen Narkosemitteldämpfen für die Anästhesie eine große Bedeutung. In Kapitel 5 erfolgt deswegen eine Übertragung des Verdampfungskonzepts auf die Verdampfung von volatilen Anästhetika. Neben der analytischen Betrachtung wird auch hier ein Funktionsmuster entwickelt und experimentell untersucht.

Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt also auf der analytischen Modellierung von Mehrphasenströmungen mit Phasenwechsel in porösen Feststoffstrukturen und der experimentellen Analyse dieser Vorgänge mit Hilfe von Funktionsmustern der Kapillarverdampfereinheiten.

2 Stand des Wissens und Zielsetzung der Arbeit

2.1 Einsatzgebiete poröser Medien

Um die vorteilhaften Eigenschaften poröser Werkstoffe für eine Anwendung in der Beatmungstechnik zu nutzen, lohnt sich zunächst ein Blick auf andere technische Gebiete, auf denen diese Werkstoffe erfolgreich eingesetzt werden. Im Folgenden soll also ein grober Überblick über den Stand der Technik bei den porösen Medien gegeben werden. Zum Einen sind in diesem Zusammenhang metallische bzw. keramische poröse Materialien mit relativ hoher Wärmeleitfähigkeit zu nennen. Dröschel untersucht beispielsweise die thermodynamischen Eigenschaften von selbst hergestellten und kommerziell erwerblichen porösen Siliziumkarbid- und Aluminiumoxidkeramiken mit unterschiedlichem Porenaufbau bezüglich eines Einsatzes als Verdampferbauteile [23]. Anhand der Auswertungen von Einzeltropfenverdampfungsversuchen kommt er zu dem Schluss, dass diese Werkstoffe hervorragende Verdampferwerkstoffe sind. Entscheidend ist dabei die Porenstruktur: bei hochpermeablen Werkstoffen ist der Bereich des Blasensiedens deutlich zu höheren Temperaturen verschoben. Außerdem ist der Verdampfungsvorgang deutlich unempfindlicher gegenüber möglichen Schwankungen der Verdampfertemperatur. Auch offenporige metallische Schäume eignen sich sehr gut als Wärmeübertrager und Wärmetauscher, wie die Arbeit von Benke belegt [6]. Boomsma zeigt, dass Aluminiumschäume aufgrund ihrer sehr hohen Wärmeleitfähigkeit und geringem Gewicht besonders effektiv als Wärmetauscher eingesetzt werden können [13]. Bei sogenannten Porenbrennern wird der Brennraum ebenfalls mit einem porösen inerten Medium ausgestattet. Dadurch wird die Verbrennung vergleichmäßigt, die Verbrennungseffektivität gesteigert und weniger Abgase produziert. Stellvertretend für viele Veröffentlichungen auf diesem Gebiet sei an dieser Stelle auf die Arbeit von Trimis [74] verwiesen.

Unter einem ganz anderen Gesichtspunkt werden poröse Materialien im Bauwesen betrachtet. Dort will man verhindern, dass die Baumaterialien zu viel Feuchtigkeit aufnehmen, die dann z. B. in den Wänden aufsteigen kann. Untersuchungen zur Feuchtigkeitsaufnahme, dem Feuchtigkeitstransport über mehrere Schichten, sowie die Bestimmung von Speicherkoeffizienten mineralischer Baustoffe wurden beispielsweise von Krus [39] und Künzel [40] durchgeführt.

Beim Verfahren der mechanisch-thermischen Entwässerung (MTE) werden feste Brennstoffe als poröse Medien betrachtet. Feuchte Braunkohle kann mit diesem Verfahren bei erhöhten Temperaturen durch mechanische Kräfte entwässert werden. Der Wassergehalt der Braunkohle wird so energetisch effizient reduziert. Beispielhaft sei in diesem Zusammenhang auf die Arbeiten von Bergins [9] und Crone [17] verwiesen.

Bemerkenswert ist weiterhin, dass Strömungen in porösen Medien bei unterschiedlichsten Fragestellungen bedeutsam sind. So stellt die kapillare Flüssigkeitsbewegung beim Bedrucken von Papier einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität des Druckes dar [46]. Ein weiteres Beispiel ist das Auftragen dünner Flüssigkeitsschichten auf bewegte Bänder, das mit Hilfe von porösen Faserpackungen oder Vliesen erfolgen kann. Um eine gleichbleibende Schichtdicke zu erhalten, muss u. a. der Flüssigkeitstransport in solchen Packungen bekannt sein. Eine analytische Betrachtung dieser Strömungsvorgänge findet sich in [4].

Offenporöse Glassinterwerkstoffe können als eine Parallelschaltung von dünnen Glaskapillaren betrachtet werden. In Verbindung mit wässrigen Lösungen kommt es in solchen Werkstoffen zu Ausbildung von Kapillarströmungen. Diese Eigenschaft kann für den Bau von elektroosmotischen Pumpen verwendet werden, vgl. Santiago et al. [75, 89, 90, 92].

In diesen Veröffentlichungen findet man auch einige Untersuchungen der eingesetzten porösen Werkstoffe z. B. bezüglich der Charakterisierung ihrer Porenstruktur.

Bei der Benutzung von Öl- oder Petroleumlampen muss der Docht in regelmäßigen Abständen ersetzt werden. Für solche Brenner, die mit flüssigem Brennstoff betrieben werden, wurde von der Firma Vapore, Inc. ein neues Konzept der Verbrennung entwickelt [69]. Eine aus mehreren Schichten aufgebaute, poröse Keramikeinheit ersetzt dabei den eigentlichen Docht und wird in die zu verbrennende Flüssigkeit eingetaucht. Die gesamte Mantelfläche der Keramikeinheit ist zur Umgebung gasdicht verschlossen. Auch die obere Stirnfläche ist bis auf eine kleine, in der Mitte der Einheit angebrachte Öffnung gasdicht. Sobald die Flüssigkeitsdämpfe erstmalig angezündet werden, wird die Wärme in die Keramikeinheit übertragen. Aufgrund der zugeführten Wärme beginnt die Verdampfung der Flüssigkeit in der Einheit, so dass unterhalb der Ausströmöffnung ein hoher Dampfdruck aufgebaut wird. Dieser Dampfdruck kann je nach verwendeter Flüssigkeit mehrere Bar betragen [61]. Der aus der Öffnung ausströmende Dampf wird anschließend verbrannt und stellt für die Verdampfung der kapillar nachfließenden Flüssigkeit die erforderliche Wärme dar, so dass der Prozess automatisch aufrecht erhalten wird.

Eine Übertragung dieses Konzeptes auf die Verdampfung von Wasser ist mit einigen schwerwiegenden Nachteilen verbunden. Prinzipbedingt muss in der Keramikeinheit ein hoher Dampfdruck aufgebaut werden, damit die erforderliche Dampfmenge aus einer relativ kleinen Öffnung ausströmen kann. Der hohe Dampfdruck wirkt sich aber negativ auf den Kapillardruck und damit auf den geförderten Flüssigkeitsvolumenstrom und die erreichbare Verdampfungsleistung aus. Möglicherweise muss deswegen der kapillare Flüssigkeitstransport mit mechanischen Pumpen unterstützt werden. Der Dampfdruckaufbau geht außerdem mit einer hohen Temperatur des produzierten Dampfes, bzw. mit einer hohen Heizungstemperatur einher. Um der Keramikeinheit die erforderliche Wärme zuzuführen, müssen die Heizelemente direkt auf der oberen Stirnfläche angebracht werden. Sie haben damit Kontakt mit der Flüssigkeit und möglicherweise mit dem Atemgas. Eine bei hohen Leistungen betriebene Heizung darf allerdings, wegen der Entzündungsgefahr der Atemgase beim Kontakt mit einer zu heißen Oberfläche oder bei einem elektrischen Kurzschluss im Fehlerfall, nicht verwendet werden (EN ISO 8185, IEC 60601-1). Soll die Keramikeinheit als wegwerfbares Zubehör ausgeführt werden, ist ihr mehrschichtiger Aufbau aus Kostengründen besonders kritisch zu bewerten.

Das in der vorliegenden Arbeit vorgestellte Verdampfungskonzept behebt die oben dargestellen Nachteile des Konzeptes der Firma Vapore, Inc. unter Beibehaltung der verschleißfreien, kapillarinduzierten Flüssigkeitsversorgung der Verdampfereinheit.

2.2 Aufgabenstellung und Ziele der Arbeit

Die Motivation für die vorliegende Arbeit leitet sich aus dem Aufbau einer Verdampfereinheit für die Verdampfung von Wasser ab. **Abbildung 2.1** zeigt den konzeptionellen Aufbau der Verdampfereinheit. Einer Kapillarpumpe wird dabei in geeigneter Weise Flüssigkeit zugeführt. Sie ist aus einem porösen Glassinter aufgebaut und fördert die Flüssigkeit zum Verdampfer. Dieser ist direkt auf der Kapillarpumpe angebracht und derart ausgeführt, dass die Heizelemente keinen direkten Kontakt mit der Flüssigkeit oder dem Atemgas haben. Der Verdampfer besteht aus einem porösen Metall- oder Keramiksinter und ist somit dampfdurchlässig. Durch die gute Wärmeleitung des Metallsinters wird Wärme zu der zu verdampfenden Flüssigkeit übertragen, so dass diese verdampft, aus dem Verdampfer ausströmt und sich mit dem Atemgas, das vom Beatmungsgerät geliefert wird, vermischt. Innerhalb der Verdampfereinheit sind somit mehrphasige

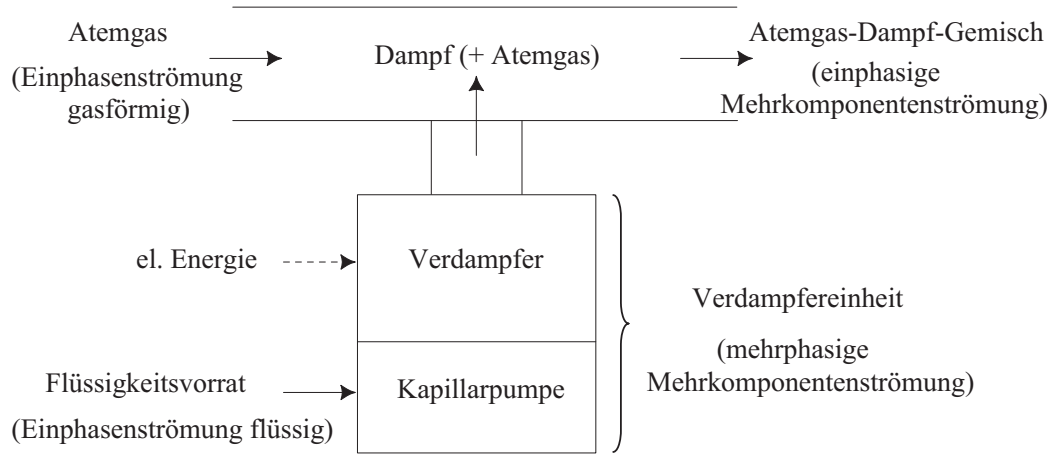

Abbildung 2.1: Konzeptioneller Aufbau der Verdampfereinheit

Mehrkomponentenströmungen zu betrachten. Die relativ schlechte Wärmeleitfähigkeit des Glassinters vermindert den konduktiven Wärmestrom durch die Kapillarpumpe und somit die ungewollten Wärmeverluste zur Flüssigkeitsseite. Bei einer konstant eingestellten elektrischen Leistung sollte ein strömungsmechanisches Gleichgewicht aus der kapillar nachfließenden Flüssigkeit und dem abfließenden Dampf, sowie ein thermodynamisches Gleichgewicht aus dem Wärmeeintrag in die Verdampfereinheit und der Erhöhung des Enthalpiestromes des Fluids eine stabile, kontinuierliche Verdampfung gewährleisten.

Das Zusammenspiel zwischen der Verdampfereinheit und dem Beatmungsgerät, sowie Teilprozesse in der Verdampfereinheit zeigt **Abbildung 2.2**. Idealerweise wird die Verdampfereinheit in das Beatmungsgerät integriert und kann von diesem geregelt werden. Die Vorerwärmung des Atemgases kann erforderlich werden, um das Atemgas zusätzlich zur Anfeuchtung zu erwärmen und die Kondensation bei der Mischung des Atemgases mit dem Wasserdampf zu vermeiden.

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit ist es, ein Verständnis für die in der Verdampfereinheit ablaufenden Prozesse aufzubauen und daraus konkrete Auslegungskriterien für die Entwicklung von porösen Verdampfern in Abhängigkeit von der zu verdampfenden Flüssigkeit abzuleiten. Dazu sind folgende Schritte erforderlich:

1. Theoretische und experimentelle Analyse der kapillaren Strömungsvorgänge in porösen Sinterwerkstoffen, Ermittlung der wichtigsten Einflussparameter unter den gegebenen Randbedingungen
2. Modellierung der mehrphasigen Mehrkomponentenströmungen mit Phasenwechsel in porösen Werkstoffen nach den Grundsätzen der Theorie poröser Medien, Implementierung der Zusammenhänge in eine Simulation nach dem Finite-Volumen-Verfahren, Durchführung von numerischen Berechnungen
3. Entwicklung und messtechnische Untersuchung von Funktionsmustern
4. Überprüfung der Aussagefähigkeit und Betrachtung der Grenzen des Modells bzgl. der Vorhersagbarkeit der Verdampfungseigenschaften, Validierung des Anfeuchtungsprinzips

Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Betrachtung des Kapillarverdampfers im Umfeld der Beatmungstechnik ist die Schnelligkeit der Dampfproduktion. Vorzugsweise sollte nur soviel Dampf produziert bzw. bereit gestellt werden, dass der momentane Atemgasvolumenstrom auf den erforderlichen Wert gesättigt wird. Die Dampfzufuhr erfolgt in diesem