Jens Meinert

Transport und Speicherung von Energie

Forschungsarbeiten zur Hochleistungsbauteilkühlung

Neben der Umwandlung von Energie gehören deren Transport und Speicherung zu den wichtigsten ingenieurwissenschaftlichen Problemfeldern. Die optimale Ausnutzung beider Mechanismen könnte entscheidend zur Überwindung der häufig existierenden örtlichen und zeitlichen Diskrepanz zwischen Notwendigkeit und Verfügbarkeit energetischer Ressourcen beitragen. Dies steht im Mittelpunkt von Forschungsarbeiten am Graduiertenkolleg Hochleistungsbauteilkühlung und der gleichnamigen Juniorprofessur am Institut für Thermodynamik und Technische Gebäudeausrüstung der TU Dresden. Sie beschäftigen sich zum einen mit der Optimierung von Wärmetransportmechanismen vor allem zur Kühlung und zum anderen mit der Speicherung stoffgebundener Energie. Die notwendigen strömungs- und wärmetechnischen Untersuchungen sind sowohl auf experimentellem als auch auf numerischem Gebiet angesiedelt.

Alongside energy conversion, the transfer and storage of energy represent two of the most important research areas in the field of engineering sciences. The optimal use of both mechanisms could make a significant contribution to overcoming the frequently encountered local and temporal discrepancy between demand and the availability of energy resources. The research within the graduate college on high-performance cooling at the Institut für Thermodynamik und Technische Gebäudeausrüstung of TU Dresden, together with that of a corresponding junior professorship, is focussed on the optimisation of heat transfer processes for cooling purposes and for the storage of thermal energy. The necessary investigations of flow and heat transfer are based on experimental as well as numerical methods.

1 Grundlagen

Die wichtigsten Energieformen im Hinblick auf energietechnische Anwendungen[1] werden mit Hilfe einer Energiebilanz zusammengefasst, die auf Erfahrungen basiert und als der Erste Hauptsatz der Thermodynamik bekannt ist. Eine grundlegende Unterscheidung erfolgt dabei in stoffgebundene und nicht stoffgebundene Energie, wobei in beiden Fällen eine weitere Unterteilung in thermische und mechanische Energieformen möglich ist. Vor diesem thermodynamischen Hintergrund fokussiert dieser Beitrag einerseits auf die Speicherung von Energie in stoffgebundener Form (innere Energie) und andererseits auf den nicht stoffgebundenen Energietransport infolge von Temperaturunterschieden (Wärme). So befasst sich eines der Forschungsprojekte am Institut für Thermodynamik und Technische Gebäudeausrüstung der TU Dresden mit der sogenannten Latentkältespeicherung. Dies bedeutet, dass stoffgebundene Energie mit Hilfe des Phasenwechsels eines Mediums gespeichert wird.

Zahlreiche weitere Forschungsvorhaben sind dem umfangreichen Gebiet der Kühlung zuzuordnen, womit die Optimierung von Wärmetransportprozessen begrifflich zusammengefasst wird. Dabei werden alle wichtigen Transportmechanismen wie Wärmeleitung, Konvektion und Temperaturstrahlung berücksichtigt. Wärmeströme sind von der Temperaturdifferenz als Triebkraft abhängig und können mit zwei wichtigen Gesetzmäßigkeiten beschrieben werden:

$$\dot{Q} = \underbrace{-\lambda A \,\mathrm{grad}\, t}_{\text{FOURIER}} = \underbrace{\alpha A \Delta t}_{\text{NEWTON}} .$$

Das Fouriersche Erfahrungsgesetz besagt, dass der Wärmestrom $\dot{Q}$ linear vom Temperaturanstieg grad t abhängt, immer in Richtung abnehmender Temperaturen fließt und als Proportionalitätsfaktoren die Wärmeleitfähigkeit λ des Mediums und die Übertragungsfläche A zu berücksichtigen sind. Der NEWTON'sche Ansatz vereinfacht diese Schreibweise durch Einführen des Wärmeübergangskoeffizienten α, sodass der meist schwer bestimmbare Temperaturgradient grad t durch eine Temperaturdifferenz Δt ersetzt werden kann.

Kühlaufgaben gehen nahezu immer mit der Zielstellung einher, die Oberflächentemperatur eines Bauteils so einzustellen, dass eine materialspezifische Obergrenze nicht überschritten wird. Im Falle einer Wärmequelle mit einer bestimmten Intensität, z. B. der CPU[2] eines Rechners bei der Elektronikkühlung, muss der Wärmeübergangskoeffizient maximiert werden, um für einen optimalen Wärmeabtransport zu sorgen. Strömt dagegen ein Heißgas über eine Bauteiloberfläche (Triebwerkskühlung), dann wird eine optimale Kühlung durch die Minimierung des Wärmetransportes erreicht. Aufgrund der Komplexität der physikalischen Vorgänge müssen in jedem Fall theoretische und experimentelle Untersuchungen kombiniert werden.

2 Hochleistungsbauteilkühlung

Das gleichnamige Graduiertenkolleg und die Juniorprofessur am Institut für Thermodynamik und Technische Gebäudeausrüstung der TU Dresden beschäftigen sich mit der Hochleistungsbauteilkühlung. Die

[1] Ohne elektrische, chemische, magnetische oder nukleare Energieformen.

[2] Computer Processor Unit (Prozessor eines PC).

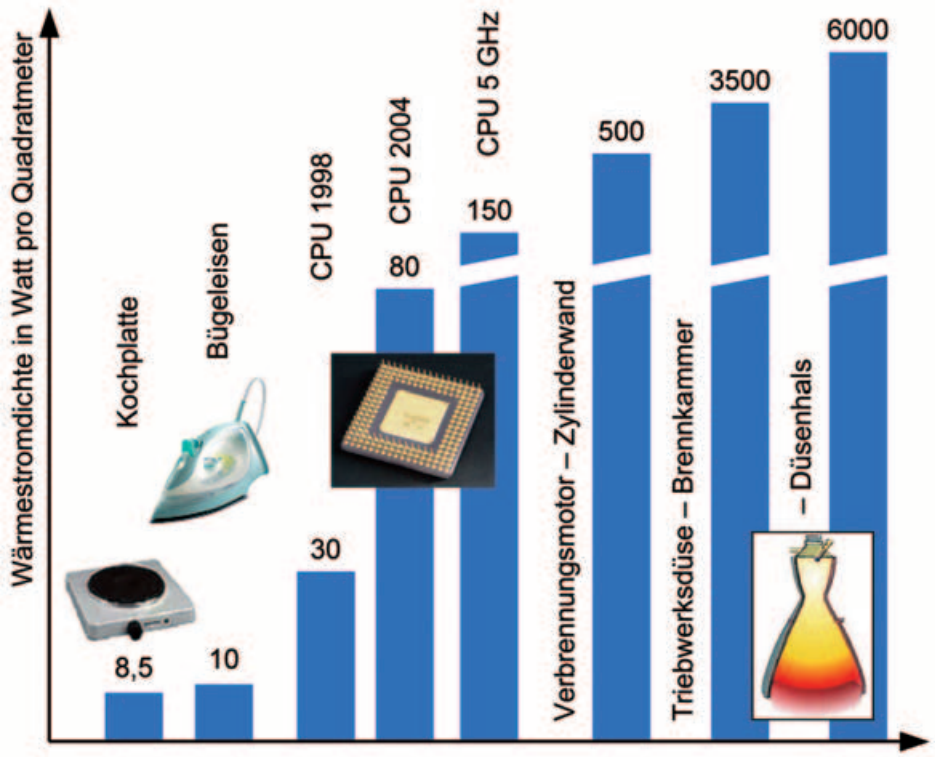

Bild 1. Vergleichende Darstellung typischer Wärmestromdichten (flächenbezogene Wärmeströme) in unterschiedlichen technischen Bereichen

Finanzierung der Stipendiaten im Kolleg erfolgt durch externe Fördermittelgeber[3] oder aus eigenen Mitteln der Juniorprofessur. Die Namensgebung leitet sich dabei aus den pro Flächeneinheit übertragenen Wärmeströmen ab. Ein großer Wärmestrom kann problemlos transportiert werden, wenn dazu eine ausreichend große Fläche zur Verfügung steht. Dies ist jedoch in den wenigsten Fällen gegeben.

Auch wenn die Absolutwerte der Wärmeströme an einer Herdplatte oder einem Bügeleisen wesentlich größer sind als die von einer CPU erzeugten, so verdeutlicht die flächenbezogene Darstellung in Bild 1 doch anschaulich, dass an modernen CPUs bereits die zehnfache *Wärmestromdichte* auftreten kann. Damit wächst die ingenieurtechnische Herausforderung zur Entwicklung geeigneter Kühlverfahren an. Anhand der Darstellung lässt sich weiterhin extrapolieren, welch enorme Anstrengungen zur effektiven Kühlung von Verbrennungsmotoren oder Triebwerksbrennkammern bzw. -düsen notwendig sind. Verschiedene Projekte im Graduiertenkolleg Hochleistungsbauteilkühlung untersuchen die Speicherung und den Transport von Energie.

3 Latentkältespeicherung

Das Projekt Latentkältespeicherung beschäftigt sich damit, stoffgebundene Energie durch den Übergang eines geeigneten Mediums von der festen zur flüssigen Phase zu speichern. Der in der Energietechnik weit verbreitete Begriff der Kälte weist darauf hin, dass die Speicherung bei einer Temperatur unterhalb der Umgebungstemperatur erfolgt. Das Ziel der Arbeiten besteht darin, kompakte Kältespeicher zur Erhöhung der Energieeffizienz klimatechnischer Anlagen zu entwickeln. Betrachtet man einen – willkürlich gewählten – Tagesverlauf der benötigten Kälteleistung einer Klimaanlage (Bild 2), dann wird schnell deutlich, dass ohne Einsatz eines Speichers eine Auslegung der Anlage entsprechend der mittäglichen Lastspitze erfolgen muss. Daraus resultieren einerseits eine Überdimensionierung der Anlage und andererseits häufig auftretende Betriebspunkte in energetisch ineffizienten Teillastbereichen. Dies lässt sich vermeiden, wenn nicht benötigte Kälteleistung in den Morgen- und Abendstunden zur Beladung eines Speichers genutzt und dieser dann zur Abdeckung der Spitzenlast wieder entladen wird. Dadurch kann die Klimaanlage optimal dimensioniert werden. Wenn man den anhaltenden Trend zur Klimatisierung berücksichtigt, wird das diesbezügliche Einsparpotenzial schnell quantifizierbar (vgl. auch [1]).

Der Aufbau eines solchen Speichers ist schematisch ebenfalls in Bild 2 dargestellt. Beim Beladen (mit „Kälte“) strömt ein Kälteträger in den Speicher und wird erwärmt, während das als PCM[4] bezeichnete Speichermedium, welches zum Beispiel in Platten- oder Kugelform gekapselt ist, erstarrt und dabei stoffgebundene Energie abgibt. Beim Entladen wird dieser Vorgang umgekehrt – das PCM schmilzt. Die dazu benötigte Energie wird dem durchströmenden Fluid entzogen, sodass es sich abkühlt. Herkömmliche Speicher arbeiten häufig mit Wasser als PCM (sogenannte Eisspeicher) – dort findet der Phasenwechsel bekanntermaßen bei 0 °C statt. Dies erfordert beim Beladen eine Vorlauftemperatur im negativen Celsiusbereich, die den Einsatz von Wasser als Kälteträger ausschließt und außerdem spezielle Anforderungen an die Klimaanlage stellt.[5] Aktuelle Bestrebungen orientieren deshalb auf den Einsatz von PCM mit einer für Klimatisierungszwecke optimalen Schmelztemperatur von 6 bis 8 °C. Dafür kommen beispielsweise Paraffine oder verschiedene Salzhydrate infrage.

[3] Dazu zählen unter anderem die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) mit Sitz in Osnabrück, die FORON-Stiftung „Besser Leben“ mit Sitz in Annaberg-Buchholz sowie Industriepartner.

[4] Phase Change Material (Speichermedium mit Phasenwechsel).

[5] Normalerweise werden derartige Temperaturbereiche für die Klimatisierung, z. B. eines Raumes, nicht benötigt.

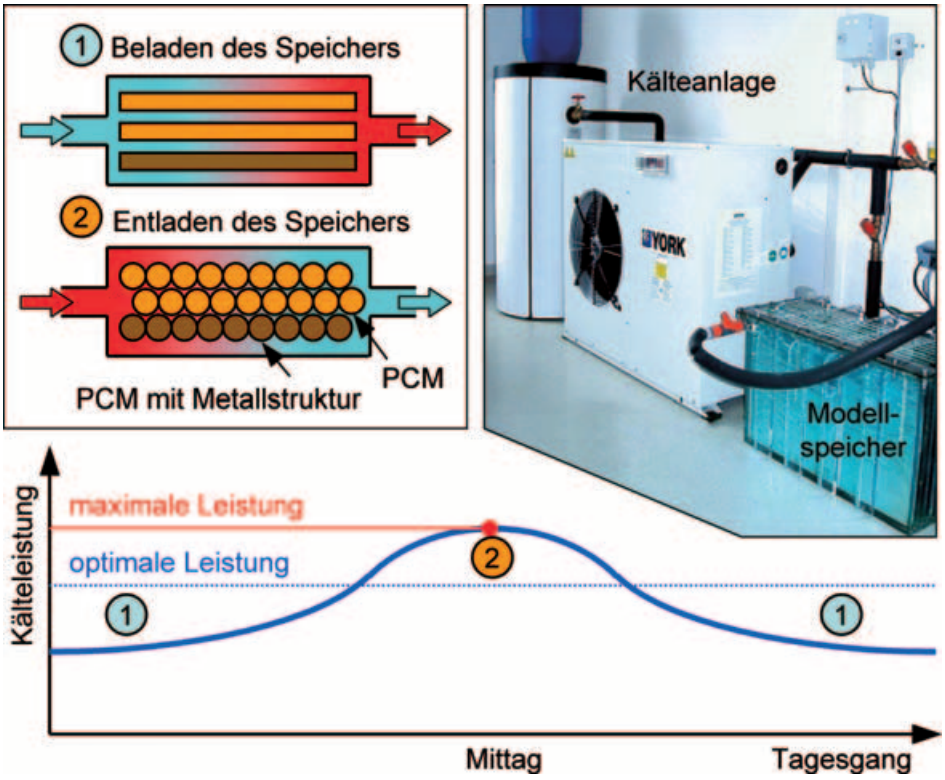

Bild 2. Schematisierter Tagesgang der Kälteleistung einer Klimaanlage. Markiert sind die Leistungsreserven zur Beladung des Latentkältespeichers (1) und der Bereich der Entladung (2). Der während des Be- und Entladens dargestellte Speicher enthält das PCM wahlweise gekapselt in Platten- oder Kugelform jeweils mit oder ohne Metallstruktur zur Verbesserung der inneren Wärmeleitung. Das Foto zeigt die Kälteanlage im Labor mit einem zur Messung angeschlossenen Modellspeicher.

Die Schwerpunkte der projektbezogenen Forschungsarbeiten liegen neben der Suche und dem Test geeigneter PCM auf der strömungs- und wärmetechnischen Optimierung der Speicherkonfiguration (Platten, Kugelschüttung), um ein schnelles Be- und Entladen zu gewährleisten. Dabei spielt nicht nur der Wärmeübergang zwischen Fluid und Speichermedium (NEWTON'scher Ansatz) eine Rolle, sondern auch der Wärmetransport im PCM (FOURIER'sches Gesetz). Zur Kompensation der schlechten Wärmeleitfähigkeit eines Paraffins könnten Metallschaumstrukturen als „Wärmeleitgitter" im Inneren der Speicherkapseln Anwendung finden, wie dies in Bild 2 bereits angedeutet ist. Die Kopplung experimenteller Untersuchungen an einer speziell errichteten Kälteanlage am Institut für Thermodynamik und Technische Gebäudeausrüstung der TU Dresden mit detaillierten numerischen Modellen soll die Grundlagen für eine Optimierung der Speicherauslegung schaffen.

4 Elektronikkühlung

Der Begriff Elektronikkühlung bezeichnet verkürzt die Kühlung Wärme erzeugender elektronischer Bauteile, z. B. CPUs. Am Graduiertenkolleg Hochleistungsbauteilkühlung besteht die Aufgabe darin, den in der Elektronik entstehenden Wärmestrom derart effektiv abzutransportieren, dass die zulässige Maximaltemperatur eines Bauteils nicht überschritten wird. Die technischen Möglichkeiten dazu lassen sich aus dem NEWTON'schen Ansatz für den Wärmeübergang ableiten. So käme erstens eine Vergrößerung der Temperaturdifferenz Δt in Betracht. Sowohl die Temperatur der Wärmequelle (etwa 65 °C bei einer CPU) als auch die Umgebungstemperatur (unter sommerlichen Bedingungen in einem PC-Gehäuse schnell über 35 °C) sind vorgegeben und scheiden daher als Freiheitsgrad für preiswerte, serientaugliche Kühlsysteme[6] aus. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Flächenvergrößerung A, wie dies bei der Entwicklung verschiedenster Kühlkörperstrukturen für die klassischen Luftkühlsysteme praktiziert wird. Allerdings ist zu beachten, dass die zusätzliche Fläche nur dann an der Wärmeübertragung beteiligt ist, wenn deren Temperatur sich deutlich von der Umgebungstemperatur unterscheidet. Der Entwicklung effektiver Kühlkörper für die Luftkühlung sind wärmetechnisch Grenzen gesetzt und bereits erreicht. Mit Blick auf die zukünftig zu bewältigenden Wärmestromdichten (Bild 1) muss der dritte Freiheitsgrad, die Verbesserung des Wärmeübergangskoeffizienten α, ausgenutzt werden. Im Vergleich zur Kühlung mit Luft lässt sich beim Einsatz einer Flüssigkeit als Kühlmittel der 100-fache Wärmeübergangskoeffizient erreichen. Eine nochmalige Verzehnfachung ergibt sich dann, wenn die Flüssigkeit an der Wärmequelle verdampft (Strömungssieden, [2]). Im Projekt Elektronikkühlung werden konkret Mikrokühlkreisläufe mit Phasenübergang und Zwangsumlauf entwickelt.

Ein solcher Mikrokühlkreislauf besteht – wie in Bild 3 integriert in ein PC-Gehäuse dargestellt – aus einem Mikroverdampfer (1), einer Mikropumpe (2) und einem Kompaktkondensator (3) sowie einem Sammelbehälter. In drei Teilprojekten werden diese Komponenten entwickelt. Ein viertes Projekt beschäftigt sich mit der Kopplung aller Bauteile und damit dem Systemverhalten des Gesamtkreislaufes.

Für die Auslegung eines Mikroverdampfers ist zunächst die Auswahl eines geeigneten Kühlmittels von Bedeutung. Zur Gewährleistung der geforderten CPU-Temperatur von 65 °C darf die Siedetemperatur des Fluids maximal bei 50 bis 55 °C liegen. Der Einsatz von Wasser würde eine starke Druckabsenkung im Kühlsystem erfordern, die aus techno-

[6] Selbstverständlich lässt sich die Umgebungstemperatur zum Beispiel durch eine Flüssigstickstoff-Kühlung weit absenken. Dies gehört jedoch in den Bereich der Experimentaltechnik.

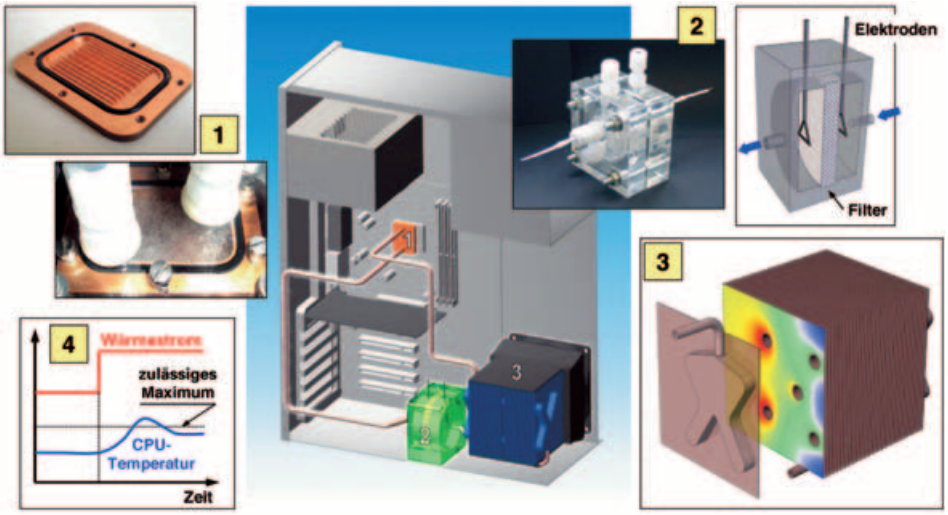

Bild 3. Darstellung eines PC-Gehäuses mit integriertem Mikrokühlsystem. Im Bereich 1 (Projekt Mikroverdampfer) sind die Unterschale eines Verdampfers mit eingefräster Kanalstruktur sowie ein Verdampfermodell zur Visualisierung des Siedevorganges zu sehen. Bereich 2 (Projekt Mikropumpe) zeigt die untersuchte elektrokinetische Modellpumpe als Foto und deren vereinfachte Schnittdarstellung. Ein Kondensator mit farblich markierten Temperaturverteilungen ist im Bereich 3 (Projekt Kompaktkondensator) dargestellt, während Bereich 4 (Projekt Systemverhalten) schematisch den zeitlichen Temperaturverlauf nach einer sprunghaften Leistungserhöhung zeigt.

logischen Gründen[7] vermieden werden sollte. Vielmehr wird auf alternative Kühlmittel orientiert (Alkohole oder Kohlenwasserstoffe), deren Einsatz im Labor des Graduiertenkollegs untersucht wird. Das Design eines Mikroverdampfers erfordert zudem die Wärmeübergangs- und Druckverlustberechnung beim Strömungssieden in Mikrokanälen[8]. Die bisher fehlenden theoretischen Grundlagen dazu werden ebenfalls im Projekt durch Modellmessungen erarbeitet.

Das zweite Teilprojekt im Bereich Elektronikkühlung befasst sich mit der Entwicklung bzw. der Auswahl einer geeigneten Förderpumpe. Umfassende Untersuchungen dazu wurden an einer elektrokinetischen Modellpumpe (Bild 3) durchgeführt. Das Wirkprinzip basiert auf dem Transport von Ladungsträgern[9] in einem elektrischen Feld zwischen zwei Elektroden. Die umfangreichen Tests haben gezeigt, dass die Eignung einer solchen Pumpe derzeit als gering eingeschätzt werden muss [3]. Daher soll zukünftig auf andere Pumpentypen orientiert werden.

Das Design eines kompakten Kondensators ist ebenfalls Bestandteil des Projektes. Um dessen Baugröße zu minimieren, muss der Hauptfokus hier auf der Optimierung des gasseitigen Wärmeüberganges liegen. In Bild 3 ist eine Variante mit fünf Rohren und dem Kondensatsammler dargestellt. Die farbliche Kennzeichnung der Lamellenoberfläche (Berippung der Rohre) entspricht der Temperaturverteilung, die aus 3-D-Berechnungen mit einer eigens entwickelten Software bestimmt wurde. Rote und gelbe Bereiche markieren große Übertemperaturen zur Kühlluft und damit eine effektive Wärmeübertragung.

Schließlich befasst sich ein viertes Teilprojekt mit der Modellierung des dynamischen Verhaltens des Gesamtkreislaufes. Dabei stellt sich die Frage, wie der zeitliche Verlauf der Temperatur an der Oberfläche der Wärmequelle (CPU) nach einer sprunghaften Erhöhung des Wärmestromes[10] aussieht. Wie in Bild 3 dargestellt, ist es denkbar, dass vor Erreichen des neuen stationären Zustandes ein Überschwingen auftritt, währenddessen die zulässige CPU-Temperatur überschritten wird. Ein auf Messdaten an einem Modellkühlkreislauf basierender Berechnungsalgorithmus soll das instationäre Verhalten beliebig dimensionierter Mikrokühlsysteme zuverlässig modellieren.

5 Triebwerkskühlung

An Bild 1 wird deutlich, dass die Triebwerks- oder Brennkammerkühlung zweifelsfrei dem Bereich der Hochleistungsbauteilkühlung zuzuordnen ist. Obwohl die hier vorgestellten Kühlverfahren verschieden anwendbar sind, sollen sie am Beispiel der Kühlung einer Triebwerksdüse erläutert werden. Die Verbrennungsprodukte[11] aus der Brennkammer strömen hier mit über 3000 °C durch die Schubdüse, sodass deren thermischer Schutz große Anstrengungen erfordert. Dabei besteht das Ziel – im Gegensatz zur Elektronikkühlung – in einer Minimierung des Wärmeübergangskoeffizienten α, da Fläche und Temperaturdifferenz bereits weitgehend vorgegeben sind. Kühlverfahren mit Massetransport durch die Wand, z. B. die Effusions- oder Transpirationskühlung – sie werden in den Teilprojekten A und B untersucht – zeichnen sich diesbezüglich durch eine besonders hohe Kühleffektivität auf der Heißgasseite der Düsenwand aus [4]. Daneben ist jedoch auch die Kühlung auf der Außenseite der Düse von großer Bedeutung. Diese Aufgabe übernimmt der Treibstoff, der vor Erreichen der Brennkammer in Kühlkanälen entlang der Düsenkontur strömt. Bei Verwendung von Kohlenwasserstoffen als Treibstoff (Kerosin) muss hierbei die Problematik des Verkokens (Teilprojekt C) beachtet werden. Dadurch können Druckverlust und Wärmeübergang in den Kühlkanälen negativ beeinflusst werden.

Der Kühlmitteltransport durch die Wand erfordert selbstverständlich entsprechende Öffnungen, die einerseits (Bild 4 links) als rasterförmig angeordnete Bohrungen ausgeführt sein können – man spricht dann von Effusionskühlung (A). Andererseits kann ein poröses Wandmaterial (Sinter- oder

[7] Die Druckabsenkung an sich stellt technologisch kein Problem dar, allerdings sind alle Systemkomponenten darauf abzustimmen (z. B. Rohre statt flexibler Schlauchleitungen). Leckagen müssen während der gesamten Betriebsdauer vermieden werden, da ein Druckanstieg zur Erhöhung der Siedetemperatur und zur Zerstörung der CPU führt.

[8] Mikrokanäle beziehen sich hier auf einen (effektiven) Kanaldurchmesser im Bereich von 1 bis 2 mm.

[9] Diese Ladungsträger entstehen im Fluid bei Kontakt mit dem Material des Filters (Spezialglas) und „schleppen“ die nicht geladenen Bestandteile des Fluides durch Zähigkeitskräfte mit.

[10] Dies passiert beispielsweise, wenn nach „Abschicken“ eines Berechnungs-„Jobs“ die Prozessorauslastung plötzlich von wenigen Prozent auf nahezu 100 % ansteigt.

[11] Bei Raketen der Ariane-Familie zum großen Teil Wasser (Wasserstoff als Brennstoff), bei Sojus-Raketen Wasser, Kohlenmonoxid und -dioxid sowie verschiedene Kohlenwasserstoffe (Kerosin als Treibstoff).

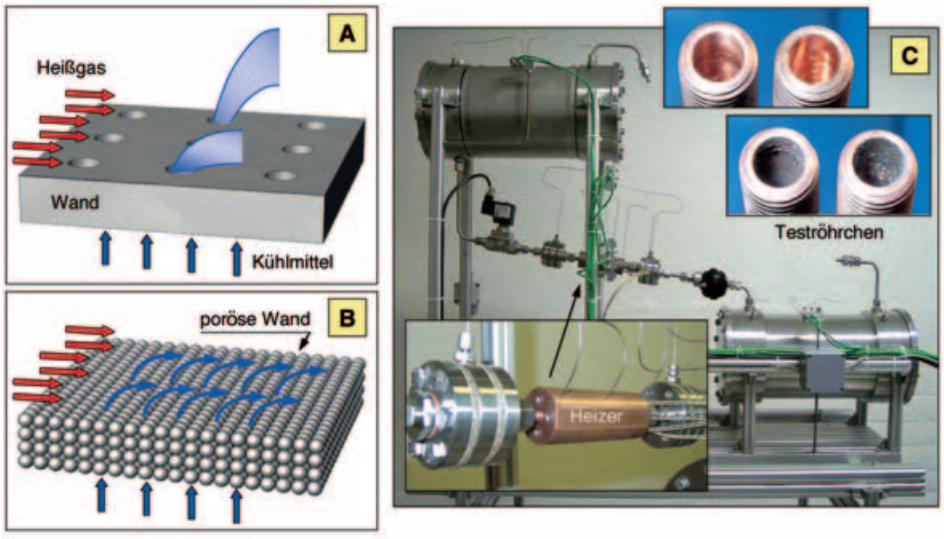

Bild 4. Illustration verschiedener Teilprojekte zur Triebwerkskühlung. Im Bereich A (Effusionskühlung) ist das Austrittsverhalten des Kühlmittelstrahls („Ausblasfahne“) aus den Bohrungen der heißgasbeaufschlagten Wand dargestellt. Bereich B (Transpirationskühlung) zeigt alternativ zum Einsatz eines Bohrungsrasters die Verwendung eines Sintermaterials. Die Versuchsanlage zur Untersuchung des Verkokungsverhaltens ist im Bereich C (Verkokung) zu sehen mit einer Detaildarstellung der Heizersektion und einigen Ablagerungen in den Teströhrchen.

Faserwerkstoff) mit unstrukturierten Poren[12] zum Einsatz gelangen. Es handelt sich dabei um die sogenannte Transpirationskühlung (B). In beiden Fällen strömt ein Teil des Kühlmittels durch die Öffnungen und sorgt neben dem direkten Wärmetransport aus der Wand insbesondere für eine Verminderung des heißgasseitigen Wärmeüberganges. Dieser Effekt lässt sich mit dem FOURIER’schen Erfahrungsgesetz leicht erklären, denn der Temperaturanstieg grad t in der Heißgasgrenzschicht unmittelbar an der Wand verringert sich. Hinsichtlich der Kühleffektivität ist die Transpirationskühlung der Effusionskühlung weit überlegen. Poröse Materialien sind jedoch mechanisch wesentlich instabiler als das entsprechende Vollmaterial mit einem Bohrungsraster.

Das Hauptaugenmerk bei der Effusionskühlung lag in den bisherigen Publikationen (z. B. [5]) meist auf der integralen Untersuchung der Wandtemperaturverteilung. Im Graduiertenkolleg Hochleistungsbauteilkühlung soll das Kühlmittel-Ausströmverhalten im Detail untersucht werden (Bild 4A), da die Wärme übertragende Fläche in der Wand klein ist und daher die Effekte auf der Heißgasseite von großer Bedeutung sind. Eine wirksame Verminderung des Wärmeüberganges gelingt nur dann, wenn sich das Kühlmittel, wie in der vorderen Bohrung dargestellt, möglichst in Wandnähe verteilt. Ein mit hohem Impuls austretender Kühlmittelstrahl (Bohrung hinten) verfehlt seine Wirkung nahezu vollständig. Mittels experimenteller und numerischer Methoden wird der Kühlmittelaustritt unter verschiedensten Bedingungen (Gestalt, Neigung, Länge und Durchmesser der Bohrung, Rasterteilung) untersucht. Im Windkanal des Instituts für Thermodynamik und Technische Gebäudeausrüstung der TU Dresden wird die Verbreitung des austretenden Kühlmittels (Helium oder Argon) in der Strömung (Heißluft) über einer Effusionsplatte mit Hilfe eines Konzentrationsmessverfahrens bestimmt. Messung und Berechnung sollen die Grundlagen zur Schaffung einfacher empirischer Beziehungen für die Optimierung der Effusionskühlung liefern.

Im Falle der Transpirationskühlung besteht dieses Problem nicht, da das Kühlmittel immer gleichmäßig verteilt aus der porösen Struktur austritt (Bild 4B). Hier konzentrieren sich die Arbeiten darauf, die zahlreichen Messergebnisse zur Haftreibung und dem Wärmeübergang in einer Grenzschicht über einer transpirationsgekühlten Sinterplatte für praktische Anwendungen nutzbar zu machen. Messungen am Windkanal bei maximal 300 °C können nur unter Zuhilfenahme der geltenden Bilanzgleichungen (Impuls-, Energie- und Stofftransport) auf praxisrelevante Parameter übertragen werden; eine einfache Extrapolation ist nicht zulässig. Aufgrund der eingeschränkten Möglichkeiten kommerzieller Codes bei der Modellierung von Grenzschichten mit Transpiration soll ein eigener Berechnungsalgorithmus diese Aufgabe zuverlässig übernehmen. Dieser wird zusätzlich zur Auswertung experimenteller Untersuchungen zum turbulenten Stoff- und Wärmetransport[13] benötigt.

Teilprojekt C im Bereich Triebwerkskühlung (Bild 4 rechts), in dem das Verkokungsverhalten kohlenwasserstoffhaltiger Treibstoffe untersucht wird, basiert auf rein qualitativen Methoden. Strömt ein Kohlenwasserstoff (z. B. Kerosin) durch einen Kühlkanal mit hoher Wandtemperatur, insbesondere bei Kupfer als Kanalwand, dann zersetzt sich das Fluid teilweise und Kohlenstoff lagert sich ab (Verkokung). Passiert dies im Kühlkanal eines Raketentriebwerkes, erhöht sich der Druckverlust[14] durch die Querschnittsverengung und die Kühlwirkung vermindert sich durch die zusätzliche thermische Schutzschicht. Veröffentlichungen darüber sind schwer zu systematisieren, sodass mit Hilfe der Versuchsanlage eigene Tests durchgeführt wurden. Dabei strömt Kerosin Schwerkraft getrieben aus einem oberen Tank durch ein auf eine konstante Temperatur beheiztes Teströhrchen (Heizer, max. 400 °C) in einen unteren Tank. Dies geschieht bei sehr hohem Druck innerhalb der Anlage (Vermeidung von Siedevorgängen), die ihrerseits wiederum in einem Vakuumtank installiert wird, damit eventuell austretendes Kerosin sich nicht entzünden kann. Die Vorher-/Nachher-Fotos der Teströhrchen in Bild 4 zeigen auch bei Dauerversuchen nur geringfügige Ablagerungen, die technisch kein Problem darstellen sollten.

6 Lamellenwärmeübertrager

Das Ziel dieses Projektes besteht darin, mathematische Grundlagen für die strömungs- und wärmetechnische

[12] Die in Bild 4 dargestellte flächenzentrierte Kugelschüttung stellt natürlich einen praktisch nicht erreichbaren Idealfall dar.

[13] Mit Hilfe der Konzentrationsmesstechnik am Windkanal werden umfangreiche Grenzschichtmessungen durchgeführt und zur Bestimmung der gesuchten turbulenten Transportgrößen verwendet.

[14] Damit sinken der Brennkammerdruck und der Schub des Triebwerkes, da der Treibstoff aus den Kühlkanälen in die Brennkammer strömt.

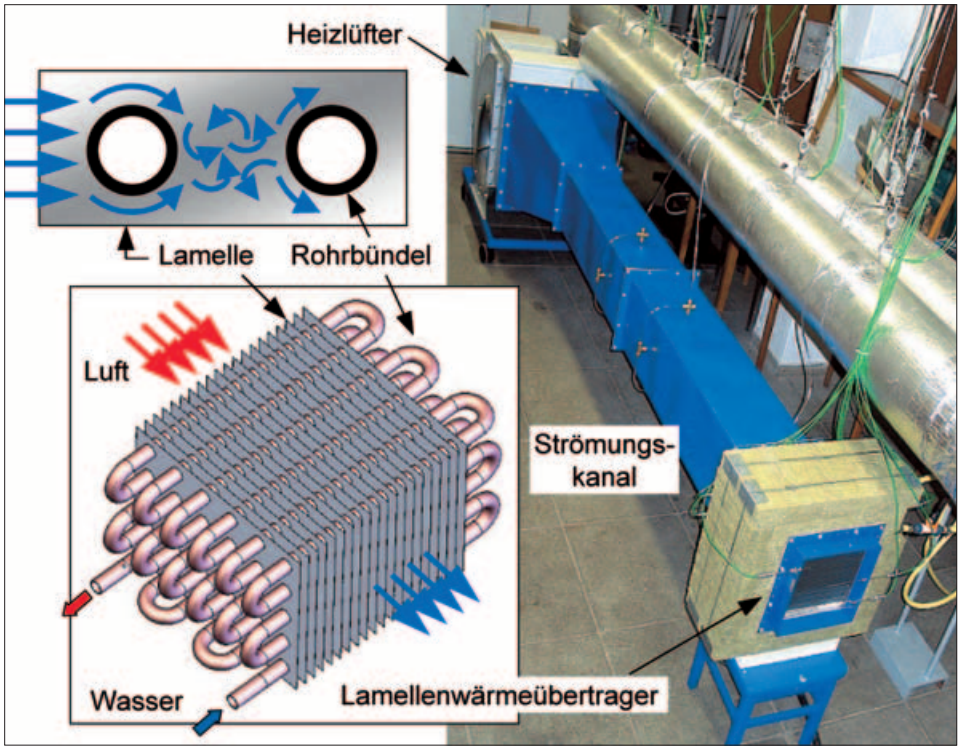

Bild 5. Versuchsanlage zur Untersuchung der Strömung und des Wärmeüberganges in Lamellen-Rohrbündel-Wärmeübertragern. Im linken Teil die schematische Darstellung eines Lamellenblockes mit den Strömungsverhältnissen, darüber eine Skizze zur Veranschaulichung der Problematik der Wirbelbildung im Nachlauf der Rohrreihen.

Auslegung von Lamellen-Rohrbündel-Wärmeübertragern zu schaffen. Wird ein solcher Wärmeübertrager als Luftkühler verwendet, dann tritt die heiße Luft in die Lamellenspalte ein (Bild 5) und wird dort abgekühlt. Das Kühlwasser strömt durch ein Rohrbündel und die Lamellenbleche übernehmen dabei die Funktion einer äußeren Berippung. Unsicherheiten in der Auslegung liegen insbesondere auf der Luftseite, wobei es sich physikalisch betrachtet um die Überlagerung[15] einer reinen Spaltströmung in den Lamellenzwischenräumen und einer Rohrbündelumströmung handelt. Bekannte Arbeiten beschäftigen sich mit der wenig praxisrelevanten rein laminaren Strömung [6].

Mit Hilfe einer speziellen Versuchsanlage wurden Wärmeübergang und Druckverlust in vier unterschiedlichen Lamellenblöcken (variable Spaltbreite) experimentell untersucht. Ein stufenlos temperatur- und drehzahlregelbarer Heizlüfter liefert dafür Luft mit einer Temperatur von bis zu 100 °C, die im Testblock mit Wasser gekühlt wird. Neben den Ein- und Austrittstemperaturen der Luft und des Wassers werden auch die Volumenströme erfasst, sodass der gasseitige Wärmeübergang aus der Energiebilanz bestimmt werden kann. Die gemessenen Druckverluste und Wärmeübergangskoeffizienten weichen bis zu 50 % von den berechneten Werten ab, was die exakte Dimensionierung derartiger Wärmeübertrager unmöglich macht.

Zur Verbesserung dieser Situation wurde das Projekt mit finanzieller Unterstützung zweier mittelständischer Unternehmen aus der Region am Graduiertenkolleg etabliert. Auch hier soll die Kopplung experimenteller und numerischer Methoden zur Erfassung der in der Lamellen-Rohrbündel-Geometrie ablaufenden Strömungs- und Wärmetransportvorgänge herangezogen werden. Mittels moderner Messverfahren wie zum Beispiel der Mehrkanal-Hitzdrahtanemometrie sollen maßgebliche Phänomene des Impuls- und Wärmetransportes untersucht werden. Dazu zählt unter anderem die die Spaltströmung beeinflussende Wirbelbildung im Nachlauf der Rohrreihen (Skizze in Bild 5). Begleitende Berechnungen mit kommerzieller Software erlauben eine komfortable Variation verschiedener Einflussparameter und können so den Experimentieraufwand reduzieren helfen. Am Ende sollen wiederum empirische Beziehungen für die ingenieurtechnische Anwendung stehen.

7 Zusammenfassung

Am Graduiertenkolleg Hochleistungsbauteilkühlung der TU Dresden wird das weitreichende Arbeitsgebiet der Speicherung und des Transports von Energie in verschiedenen Projekten erforscht. Schwerpunktmäßig geht es dabei um die Minimierung bzw. Maximierung nicht stoffgebundener Energieströme. Alle Projekte arbeiten mit der Kopplung experimenteller und theoretischer Methoden und haben das Ziel, ingenieurtechnisch einfach handhabbare Berechnungs- und Auslegungswerkzeuge zu schaffen. Vertiefende Informationen zu allen Projekten und zum Graduiertenkolleg finden sich unter www.cooling.tu-dresden.de.

Der Autor dankt allen Stipendiaten im Kolleg für die bisherige engagierte Arbeit und wünscht viel Erfolg für den noch verbleibenden Weg bis zum Erreichen der Promotion.

[15] Beide Strömungstypen sind einzeln relativ sicher berechenbar; deren Überlagerung wie hier bereitet jedoch Probleme.

Literatur

[1] *Hilligweg, A.; Hofmann, P.:* Vordimensionierung von Eisspeichern – Die Größe der Klimaanlage minimieren. In: TGA-Fachplaner **2** (2004) 6, S. 29 – 35

[2] *Jiang, L. et al.:* Closed-Loop Electroosmotic Microchannel Cooling System for VLSI Circuits. In: IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies **25** (2002) 3, S. 347 – 355

[3] *Synowzik, S.:* Experimentelle Untersuchung des elektrokinetischen Wirkprinzips für die praktische Umsetzung in einer kompakten Fluidförderpumpe. Diplomarbeit. TU Dresden, Institut für Thermodynamik und Technische Gebäudeausrüstung, 2006

[4] *Meinert, J.; Huhn, J.; Serbest, E.; Haidn, O. J.:* Turbulent Boundary Layers with Foreign Gas Transpiration. In: Journal of Spacecraft and Rockets **38** (2001) 2, S. 191 – 198

[5] *Kwak, J. S.; Han, J.:* Heat Transfer Coefficients and Film-Cooling Effectiveness on a Gas Turbine Blade. In: Journal of Heat Transfer **125** (2003) 6, S. 494 – 502

[6] *Kaminski, S.:* Numerische Simulation der luftseitigen Strömungs- und Wärmetransportvorgänge in Lamellenrohr-Wärmeübertragern. Dissertation. TU Bergakademie Freiberg, 2002

Manuskripteingang: 12.3.2007
Angenommen am: 30.4.2007

Meinert, Jens
Jun.-Prof. Dr.-Ing.
Studium Strömungsmechanik und Thermodynamik von 1988 bis 1993 an der TU Dresden ♦ 2000 Promotion zum Dr.-Ing ♦ von 2004 bis 2007 Leiter einer Nachwuchswissenschaftlergruppe ♦ seit 2007 Juniorprofessor für Hochleistungsbauteilkühlung am Institut für Thermodynamik und Technische Gebäudeausrüstung, Fakultät Maschinenwesen der TU Dresden