

Aktive Thermografie für die Untersuchung von Transportprozessen

Christoph S. GARBE, Uwe SCHIMPF, Bernd JÄHNE, Interdisziplinäres Zentrum für Wissenschaftliches Rechnen (IWR) und Institut für Umweltwissenschaften (IUP),
Universität Heidelberg;

Debasish BANERJEE, Papierfabrikation und mechanische Verfahrenstechnik,
Technische Universität Darmstadt

Kurzfassung. Die Transportvorgänge von Wärme, Impuls und Masse spielen eine zentrale Rolle für eine Reihe komplexer umwelphysikalischer, biologischer und industrieller Systeme. In diesem Vortrag werden neuartige Messmethoden präsentiert, mit denen aus thermografischen Bildsequenzen mittels digitaler Bildfolgenanalyse die Transportprozesse aufgelöst und untersucht werden können.

In den Umweltwissenschaften werden mit einem CO₂ Laser Strukturen auf die Wasseroberfläche geschrieben. Durch eine raumzeitliche Analyse dieser Strukturen kann neben der Oberflächenströmung auch die Scherung in der viskosen Grenzschicht und damit der windinduzierte Impulstransport bestimmt werden. Mit einem ähnlichen Verfahren können in biologischen Fragestellungen der Wassertransport in Pflanzenblättern direkt gemessen werden. Ein Verfahren basierend auf der Lock-in Thermografie kann benutzt werden, um den Wassergehalt und die Wärmetransfergeschwindigkeit an Pflanzenblättern zu untersuchen. Dieses Verfahren wurde auch auf Prozesse in der Papierherstellung ausgedehnt, durch die Wassergehalt und Wärmetransfergeschwindigkeit während des Trocknungsprozesses gemessen werden können.

Thermografie ermöglicht es die Transportvorgänge räumlich und zeitlich hoch aufgelöst zu vermessen. Somit können neue Einblicke in die zugrunde liegenden Prozesse gewonnen werden. Dies ist durch die vorgestellten Methoden in weiten Anwendungsgebieten erstmalig möglich. Der vergleichsweise einfache Versuchsaufbau ermöglicht Messungen im Labor ebenso wie im Feld.

1. Einleitung

Auf den Gebieten der Fluidodynamik, Wärmeübertrag und Stofftransfer spielen Transportprozesse eine fundamentale Rolle. In diesem Beitrag sollen thermografische Methoden vorgestellt werden, die es erlauben, quantitative Einblicke in Transportprozesse in umwelphysikalischen, biologischen, aber auch industriellen Fragestellungen zu ermöglichen. Hierbei soll der Wärme- und Impulstransfer zwischen Atmosphäre und Ozean, der Massetransport in Pflanzenblättern und der Wärmetransfer in Papiertrocknungsprozessen beleuchtet werden. Für die hier vorgestellten Anwendungen sind die Vorteile der Thermografie essenziell, nämlich hohe örtliche und zeitliche Auflösungen. Dies wird am Beispiel der Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Ozean leicht einsichtig. Intermittente Prozesse wie Wellenbrechen erhöhen drastisch die Transferraten von Wärme und Gasen. Diese Prozesse spielen sich aber örtlich und zeitlich auf kleinen Skalen ab, so dass sie nur durch hoch aufgelöste Systeme erfasst werden können.

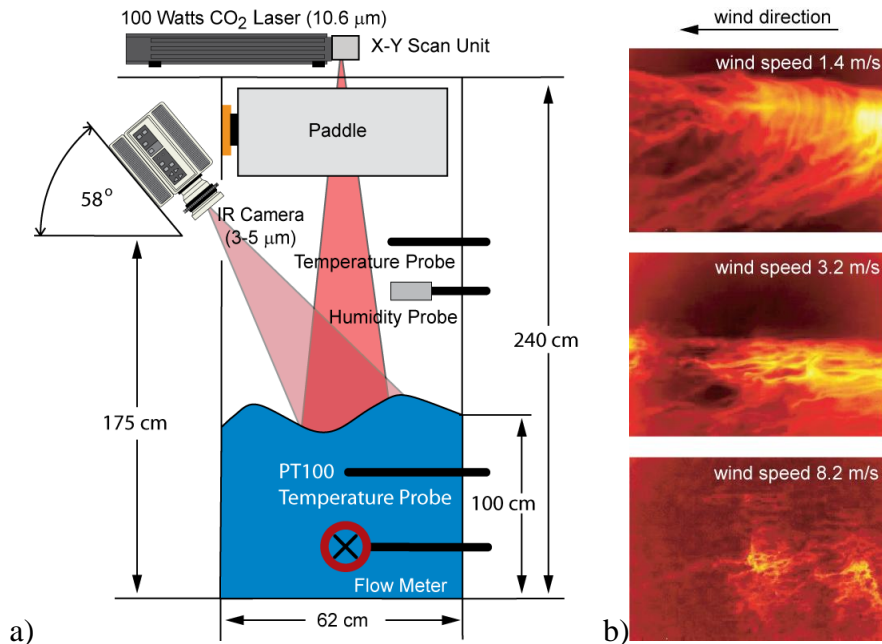


Abb. 1: Der Aufbau des thermografischen Systems für Messungen an der Wasseroberfläche in a) für Labormessungen. In b) sind einige exemplarische Bilder mit unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten dargestellt.

Der Transport von Wärme zwischen Atmosphäre und Ozean beeinflusst entscheidend unser globales Klimageschehen. Ein tiefes Verständnis dieses Transportes trägt daher für die Verbesserung von Modellen und Vorhersagen bei. Gleichzeitig wird durch den Wind als treibende Kraft Impuls von der Atmosphäre in den Ozean eingebracht. Somit werden Turbulenzen erzeugt, die wiederum maßgeblich den Transport von Gasen und Wärme zwischen Wasser und Luft beschleunigen können. Daher ist es wichtig, gleichzeitig Wärme- und Impulstransport örtlich aufgelöst messen zu können. Thermografische Verfahren, die erstmalig solche Messungen ermöglichen, werden hier vorgestellt.

Im Gegensatz zu der freien Wasseroberfläche können Pflanzen die Verdunstung von Wasser aktiv durch Öffnungen, den sogenannten Stomata, kontrollieren. Neben Wasserdampf werden so die gasförmigen Abfallprodukte des pflanzlichen Stoffwechsels ausgeschieden. Einher mit der Transpiration von Wasser geht ein Sog von Wasser durch die Blattadern. Durch ihre Transpiration können Pflanzen die Wasserfließgeschwindigkeiten in ihren Blättern kontrollieren und lenken. Präzise Messungen sind schwer zugänglich, so dass der hier vorgestellte thermografische Ansatz neue Perspektiven für die Beantwortung physiologischer Frage bieten.

In der Papierfertigung stellt der Trocknungsprozess den höchsten Energieverbrauch dar. Durch den steigenden Bedarf an homogenen Papiersorten und aufgrund der Einführung von zusätzlichen Prozessstufen in der Hochgeschwindigkeitsproduktion von Papier ist eine örtlich hoch aufgelöste Messtechnik vonnöten. Durch sie kann die Homogenität des Papiers im Trocknungsprozess untersucht werden. Im Weiteren soll eine Technik vorgestellt werden, die hoch aufgelöst die Wärmetransfergeschwindigkeit während der Trocknung mittels aktiver Thermografie misst.

2. Transport von Impuls an der Wasseroberfläche

Um den Impulstransport zwischen Luft und Wasser untersuchen zu können, wird ein aktiver thermografischer Aufbau verwendet, wie er in Abbildung 1 skizziert ist. Dabei werden mit einem CO₂ Laser Strukturen auf die Wasseroberfläche geschrieben. Diese

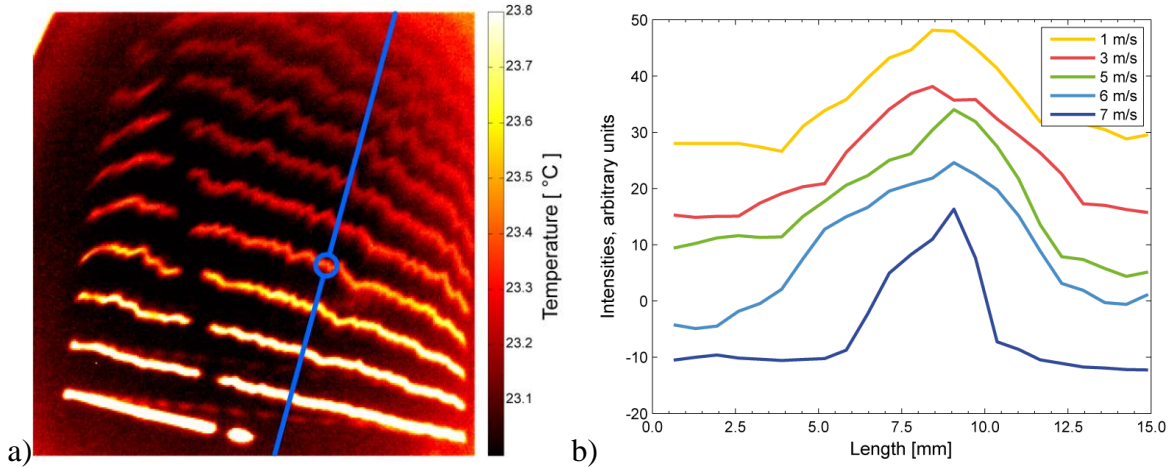


Abb. 2: Falschfarbenbild der auf der Wasseroberfläche erwärmten Linienstrukturen in a). In b) ist der im blauen Kreis von a) gezeigte Querschnitt bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten abgebildet.

werden mit einer IR-Kamera (Amber Radiance 1, InSb Detektor, Spektralbereich 3-5 μm , NEAT 20mK) visualisiert, die unter einem Winkel von 60° auf die Wasseroberfläche gerichtet ist, um Reflexionen des Sensors zu vermeiden.

Durch die Windscherung an der Wasseroberfläche bildet sich in der viskosen Grenzschicht ein lineares Geschwindigkeitsprofil aus. Dieser Prozess kann als Couette Strömung modelliert werden. In dem Spektralbereich von 3-5 μm entspricht die Eindringtiefe der thermischen Strahlung etwa 46 μm , in dem des CO₂ Lasers (10.8 μm) verringert sie sich auf 10 μm . Über diese Eindringtiefe muss die visualisierte thermische Strahlung aufgrund des Abbildungsprozesses integriert werden. Somit kommt es zu einer „Versmierung“ der geschriebenen Strukturen. Dieser Prozess ist in Abb. 2 dargestellt. Einen simulierten Querschnitt durch die viskose Grenzschicht wird in Abb. 3 gezeigt.

Berücksichtigt man die Eindringtiefe der thermischen Strahlung, so lässt sich mittels eines Verfahrens der digitalen Bewegtbildanalyse die Strömungsgeschwindigkeit der Wasseroberfläche samt des Impulstransports berechnen [4]. Hierfür ist das inverse Problem

$$\left[\frac{T}{t}, \frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y}, \frac{\partial T}{\partial t} \right] \cdot [\xi, u_1, u_2, 1]^T = 0$$

zu lösen, wobei T die mit der Infrarotkamera gemessene Temperatur ist, t ist die Zeit die seit dem Schreiben der Struktur mit dem CO₂ Laser verstrichen ist, u_1 und u_2 sind die Geschwindigkeiten der Wasseroberfläche in x und y -Richtung. Aus ξ und dem Betrag der Geschwindigkeit $|u|$ ergibt sich dann die viskose Scherspannung τ , die gleichbedeutend mit der Impulsflussdichte ist. Das Ergebnis einer solchen Messung unter Laborbedingungen ist in Abb. 3 dargestellt. Hier wurde $u_* = \sqrt{\tau/\rho}$ gegen die Windgeschwindigkeit aufgetragen, wobei ρ die Dichte von Wasser ist. Eine detaillierte Herleitung des Verfahrens ist in [4] gegeben. Die Erweiterung des Verfahrens auf beliebige Strömungsprofile wird in [3] vorgestellt.

Ebenfalls mit aktiver Thermografie kann die Wärmetransfergeschwindigkeit gemessen werden [12]. Auch aus der passiven Thermografie (ohne den Einsatz eines CO₂ Lasers) ist die Wärmeflussdichte ebenso wie die Wärmetransfergeschwindigkeit zu bestimmen [5, 11, 7, 13]. Auf diese Verfahren soll hier aus Platzgründen nicht weiter eingegangen werden.

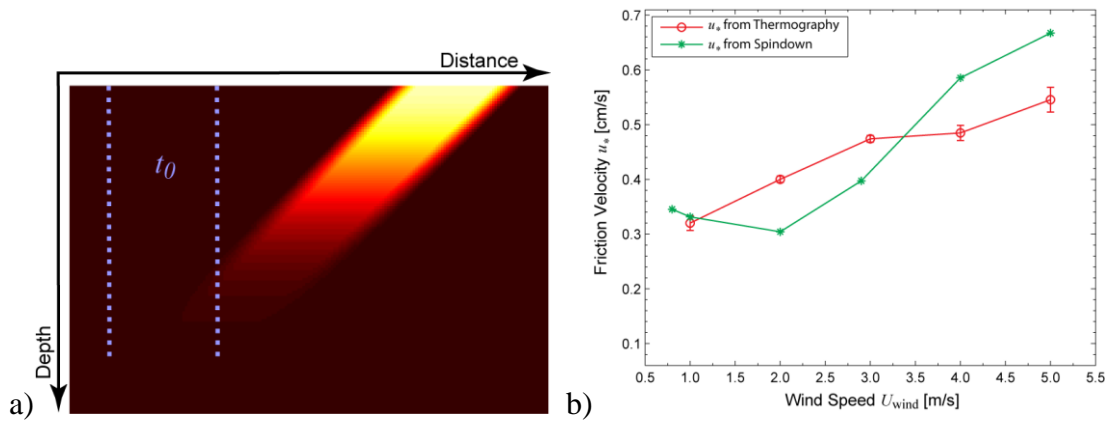


Abb. 3: Simulierter Querschnitt durch die viskose Grenzschicht, in welcher zum Zeitpunkt t_0 das Wasser aufgeheizt wurde und durch das lineare Geschwindigkeitsprofil verformt wurde in a). Die Ergebnisse einer Labormessung sind in b) dargestellt.

3. Wassertransport in Pflanzenblättern

Um die Transportgeschwindigkeit von Wasser in Pflanzenblättern messen zu können, wurde ein ähnlicher Aufbau verwendet wie im vorangegangenen Abschnitt. Der Strahl eines CO_2 Lasers wird mithilfe eines Zylinderspiegels in einer Dimension aufgeweitet, so dass auf dem Pflanzenblatt ein Streifen erhitzt wird. Der erwärmte Blattbereich wird mit einer IR Kamera (Amber Radiance 1) visualisiert. Der Skizze des Aufbaus ist in Abb. 4 wiedergegeben.

Das Messprinzip besteht darin, das Wasserpakete mit dem Laser erhitzt und damit markiert werden. Die Ausbreitung dieser Wasserpakete wird mit der IR Kamera visualisiert und mittels digitaler Bildfolgenanalyse quantifiziert. Neben dem konvektiven Transport des Wassers breitet sich die Wärme auch durch Konduktion aus. Diese beiden Transportprozesse überlagern sich und müssen voneinander getrennt werden. Wieder ist ein inverses Problem aus den Bilddaten zu lösen [11]. Die Zwangsbedingung, die Bewegung mit der gemessenen Temperatur verbindet, lautet hier

$$\left[-\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}, \frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y}, \frac{\partial T}{\partial t} \right] \bullet [D, u_1, u_2, 1]^T = 0,$$

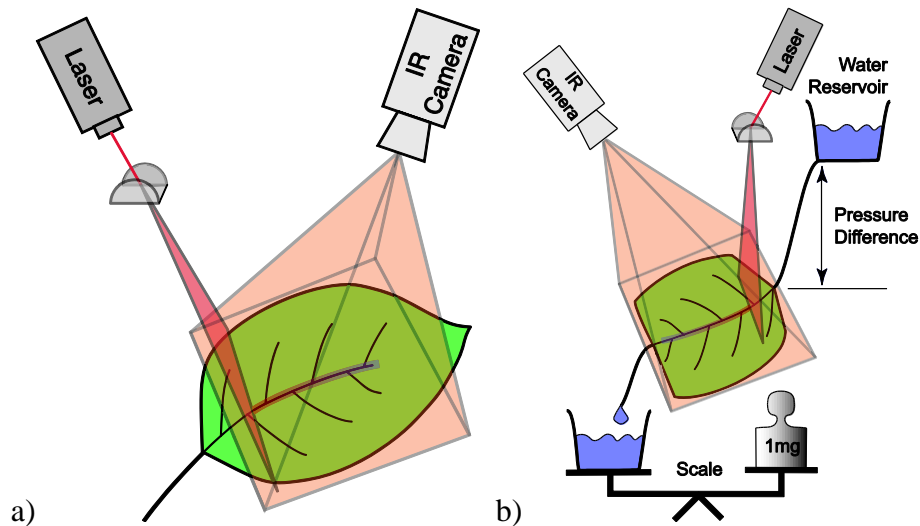


Abb 4.: Skizze des Versuchsaufbaus für die Wassertransportmessungen in Pflanzenblättern in a). Adaptionen für die Perfusionsmessung sind in b) zu sehen.

wobei D die Diffusionskonstante ist. Hierbei wurde eine reine 2D Konduktion der Wärme in dem Pflanzenblatt angenommen. Aufgrund des realen Wärmetransfers von dem Blatt an den Luftraum über und unter dem Blatt, wird die gemessene Diffusionskonstante D nicht genau der Diffusionskonstante von Wärme in Wasser entsprechen. Unabhängig hiervon wird die Geschwindigkeit des konvektiven Transports richtig gemessen.

Um die Genauigkeit des Verfahrens zu überprüfen, wurden Perfusionsmessungen durchgeführt. Dabei wird eine Vene des Blattes so präpariert, dass der Durchfluss einer druckgetriebenen Strömung mit einer Präzisionswaage genau bestimmt werden kann. Das Ergebnis dieses Vergleiches ist in Abb. 5 dargestellt. Es konnte eine gute Übereinstimmung zwischen der gemessenen Strömungsgeschwindigkeit und dem Volumendurchfluss festgestellt werden [6].

Mit dem Verfahren wurden die Strömungsgeschwindigkeiten entlang der Hauptvene eines Rizinusblattes gemessen. In diesen Messungen konnte eine gute Übereinstimmung zwischen dem Durchmesser des Leiterbündels (Xylem) und der Strömungsgeschwindigkeit festgestellt werden [6].

Ein weiterer interessanter Aspekt ist der der Veränderung der lokalen Strömungsänderung des Wassers in einem Blatt, nachdem Teile des Blattgewebes entfernt wurden. Das Ergebnis einer solchen Messung ist in Abb. 6 dargestellt. Es ist zu sehen, dass die Strömungsgeschwindigkeit neben der verletzen Stelle ansteigt. Dies liegt vermutlich daran, dass Teile des Gewebes oberhalb des Einschnittes weiterhin mit Wasser versorgt werden. Dieses Wasser muss durch weniger Leiterbündel transportiert werden, wodurch die Geschwindigkeit darin ansteigt.

Mit dieser vorgestellten thermografischen Methode ist es erstmalig möglich, solche Untersuchungen an lebenden, freistehenden Pflanzen durchzuführen. Somit eröffnet dieses Verfahren neuartige botanische Untersuchungen.

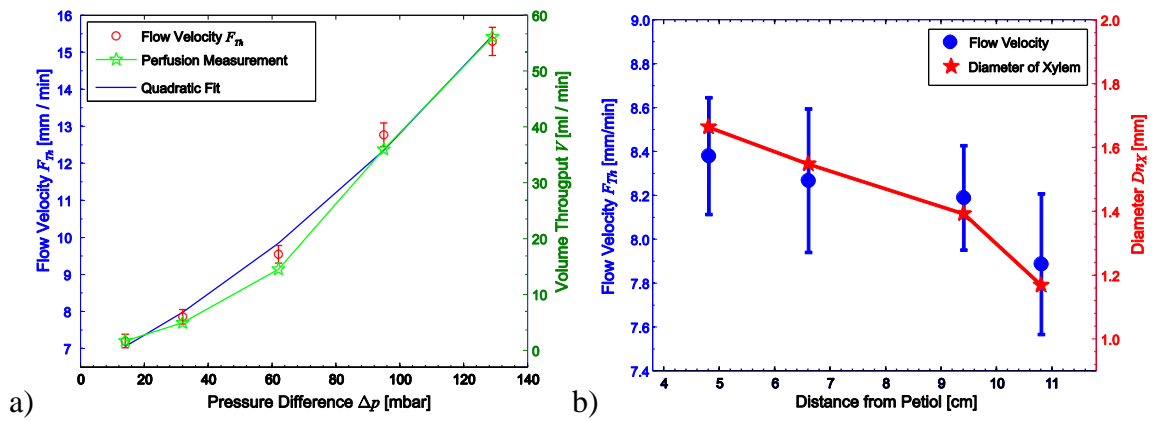


Abb. 5.: Der Vergleich der gemessenen Geschwindigkeit zum Sollwert in Perfusionsmessungen in a). Das Ergebnis einer Messung an einem Freistehenden Blatt zeigt den Zusammenhang von Strömungsgeschwindigkeit und Leiterbündeldurchmesser.

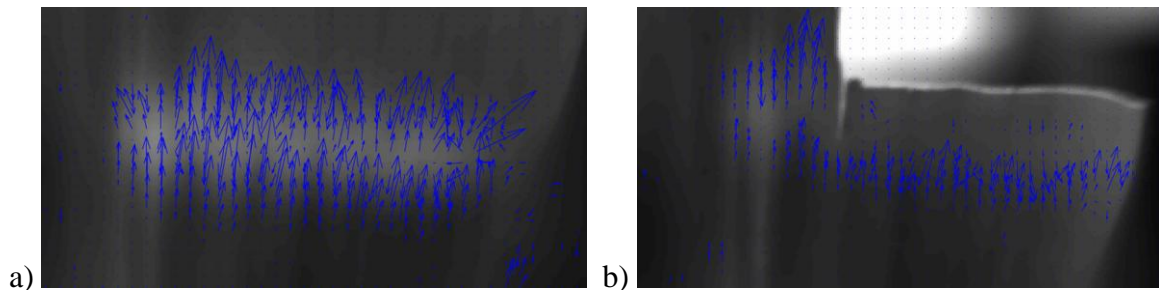


Abb. 6.: Die gemessene Strömungsgeschwindigkeit in einem Maisblatt a) vor und b) nachdem ein Teil des Blattes abgeschnitten wurde.

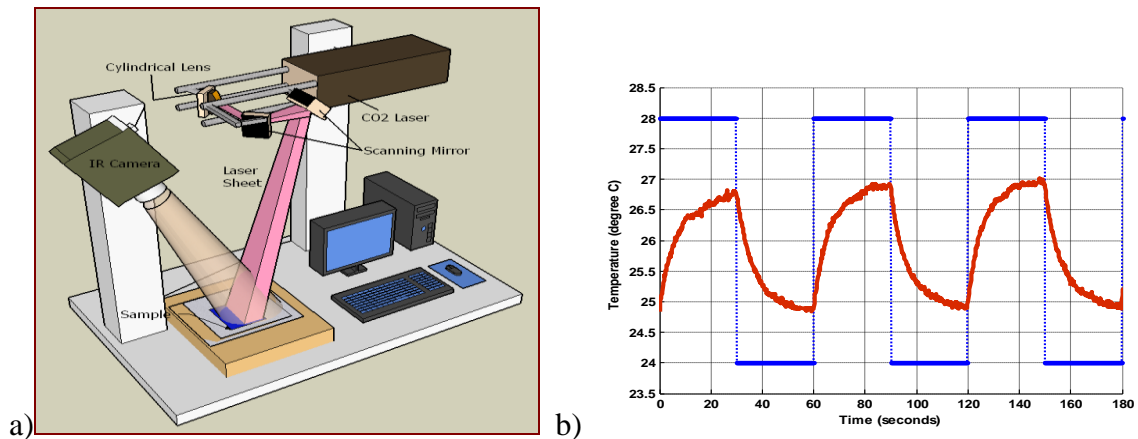


Abb. 7.: Versuchsaufbau in a) und die Temperaturmessung des Blatt Papiers bei aktiver Anregung mit einem CO₂ Laser.

4. Wärmetransport und Wassergehalt von trocknendem Papier

Für die Prozesskontrolle in der Papierindustrie ist es von großem Interesse, die Homogenität des hergestellten Papiers zu überprüfen und die Herstellungsparameter entsprechend zu optimieren. Hierfür wurde ein Verfahren entwickelt [1], welches ähnlich

der Lock-In Thermografie ist [14, 15, 2]. Dabei wird die zu untersuchende Papierprobe mit einem flächig aufgeweiteten CO₂ Laser periodisch erhitzt. Der Versuchsaufbau sowie Antwort des Blattes of die anregende Laserfrequenz ist in Abb. 7 dargestellt.

Die Phasenverschiebung und Amplitudendämpfung des angeregten Blattes in Bezug auf die periodisch anregende Laserenergie kann mittels FFT (Fast Fourier Transform) pixelweise bestimmt werden. Der doppellogarithmische Plot einer solchen Messung ist in Abb. 8 wiedergegeben. Dabei wurde die anregende Laserfrequenz variiert. Die Phasenverschiebung ist weniger stark von Intensitätsschwankungen des Lasers abhängig und sollte daher eine genauere Aussage ermöglichen. Die Zeitkonstante τ aus diesen Messungen konnte zu ≈ 17 Sekunden bestimmt werden [1]. Aus dieser Zeitkonstanten ergibt sich zusammen mit der Diffusionskonstante sofort die Wärmetransfergeschwindigkeit k des trocknenden Blattes. Diese gibt Aufschluss über den Trocknungsprozess und dadurch entstehende Inhomogenitäten in dem Blatt Papier. Eine räumliche Messung der Phasenverschiebung ist für eine Blattprobe in Abb. 9 gezeigt.

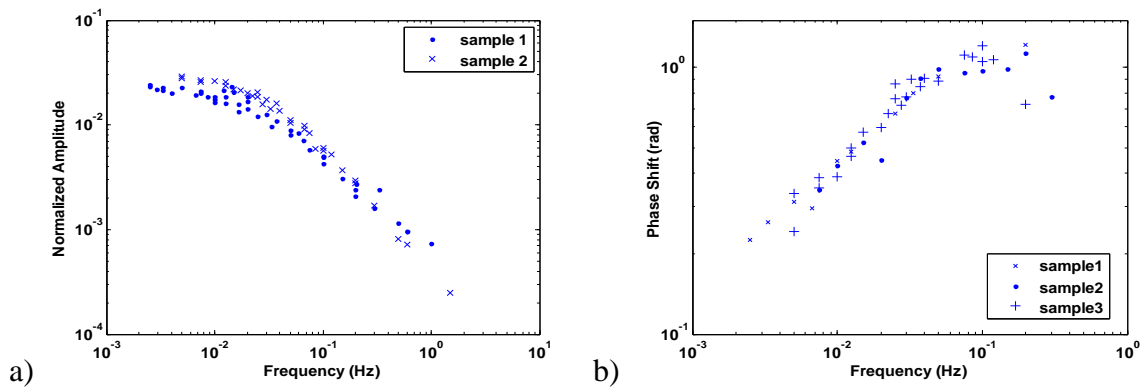


Abb. 8.: Messung der spektralen Amplitudendämpfung in a) und der Phasenverschiebung in b).

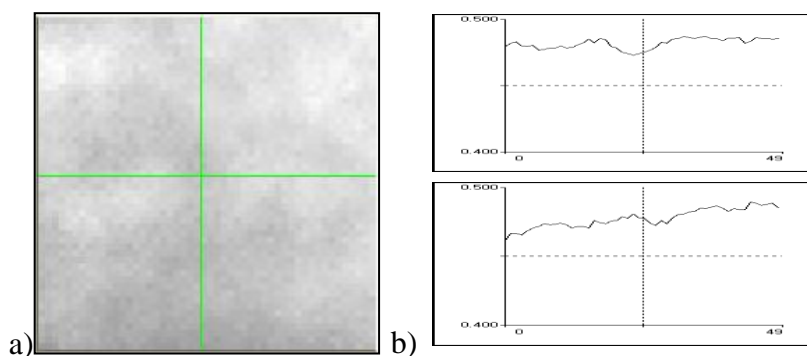


Abb. 9.: Die gemessene Phasenverschiebung grauwertkodiert in a). In b) sind ein horizontales und ein vertikales Profil durch a) gezeigt.

Eine weitere wichtige Größe ist die Wärmekapazität des Blattes pro Fläche C/A . Inhomogenitäten dieser Größe lassen Rückschlüsse auf die Wasserverteilung in dem Blatt zu. Diese Messungen sind ähnlich denen, die bereits an Pflanzenblättern durchgeführt wurden [10, 8, 9]. Es lässt sich die folgende Differentialgleichung aufstellen [9]

$$\frac{d}{dt}T(t) = -\frac{1}{\tau}T(t) - b - z(t)$$

in welcher die Substitutionen

$$\tau^{-1} \equiv \left(\frac{A}{C}\right)_{paper} (8\alpha_{ir}^{paper} \sigma T_{air}^3 + 2\rho c_p k); \quad b \equiv \left(\frac{A}{C}\right)_{paper} (\alpha_{sol}^{paper} j_{in} + j_{lat}); \quad z(t) \equiv \left(\frac{A}{C}\right)_{paper} j_{act}(t)$$

eingeführt wurden. $j_{act}(t)$ ist die durch periodisches Ein- und Ausschalten des Lasers hervorgerufene Wärmeflussdichte. In der ersten dieser Substitutionsgleichungen ist die Zeitkonstante τ zu bestimmen, ebenso wie die Transfargeschwindigkeit k , wie im letzten Abschnitt beschrieben. Die restlichen Größen in dieser Gleichung sind Materialkonstanten oder lassen sich leicht messen. Somit ist C/A aus dieser Gleichung zu bestimmen.

Ergebnisse einer solchen Messung sind in Abb. 10 wiedergegeben [1]. Örtliche Inhomogenitäten sind deutlich zu erkennen. Vergleichsmessungen wurden mit einem differentiellen Scan-Kalorimeter durchgeführt. Die maximale Abweichung zu der thermografischen Methode betrug 20%.

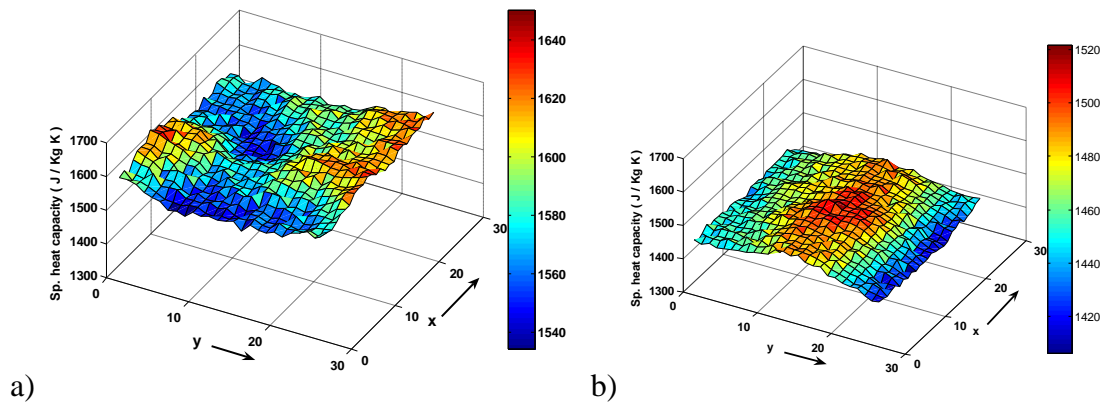


Abb. 10.: Örtliche Verteilung der Wärmekapazität zweier unterschiedlicher Blattproben.

5. Ausblick

Die gezeigten Beispiele sind nur ein paar Einsatzmöglichkeiten der Thermografie für die Untersuchung und Quantifizierung von Transportprozessen in Umwelt- und Biowissenschaften. Zum Teil wurden in diesem Bereich - ohne von den entsprechenden Entwicklungen in den Ingenieurwissenschaften zu wissen - unabhängig die gleichen Verfahren entwickelt. Zum anderen zeigt dieser Beitrag auch einige neuartige Methoden, die auch für die Ingenieurwissenschaften von Interesse sein könnten. Gerade auf dem Gebiet der digitalen Bildverarbeitung und der damit verbundenen Prozessmodellierung konnten einige Fortschritte erzielt werden. Ein intensiver Erfahrungsaustausch zwischen den Anwendungen der Thermografie in den Umwelt- und Ingenieurwissenschaften wird zukünftig für beide Seiten von großem Nutzen sein.

Es ist zu erwarten, dass mit der weiteren technischen Entwicklung, insbesondere der Verfügbarkeit billigerer ungekühlter Wärmebildkameras, die Thermografie als bildgebende Technik wesentlich weniger aussagekräftige punktuell messende Verfahren auf breiter Basis ersetzen werden. Das setzt allerdings voraus, dass entsprechende automatische und robust funktionierende Bildanalysemethoden entwickelt werden.

Referenzen

- [1] D. Banerjee, C. S. Garbe, U. Schimpf, B. Jähne and S. Schabel, *An active thermographic technique for highly resolved heat transport measurements in paper drying*, 61st Appita Annual Conference Proceedings, APPITA, Gold Coast, Australia, 2007, pp. 161-167.
- [2] G. Busse, D. Wu and W. Karpen, *Thermal Wave Imaging with Phase Sensitive Modulated Thermography*, Journal of Applied Physics, 71 (1992), pp. 3962-3965.
- [3] C. S. Garbe, *Fluid Flow Estimation Through Integration of Physical Flow Configurations*, in F. Hamprecht, C. Schnörr and B. Jähne, eds., *Pattern Recognition*, Springer, Heidelberg, 2007.
- [4] C. S. Garbe, K. Degreif and B. Jähne, *Estimating the Viscous Shear Stress at the Water Surface from Active Thermography*, in C. S. Garbe, R. A. Handler and B. Jähne, eds., *Transport at the Air Sea Interface - Measurements, Models and Parametrizations*, Springer-Verlag, 2007, pp. 223-239.
- [5] C. S. Garbe, B. Jähne and H. Haußecker, *Measuring the Sea Surface heat Flux and Probability Distribution of Surface Renewal Events*, Gas Transfer at Water Surfaces, Geophysical Monograph, 127 (2002), pp. 109-114.
- [6] C. S. Garbe, R. Pieruschka and U. Schurr, *Thermographic Measurements of Xylem Flow in Plant Leaves*, submitted (2007).
- [7] C. S. Garbe, U. Schimpf and B. Jähne, *A surface renewal model to analyze infrared image sequences of the ocean surface for the study of air-sea heat and gas exchange*, Journal of Geophysical Research, 109 (2004), pp. 1-18.
- [8] C. S. Garbe, U. Schimpf, U. Schurr and B. Jähne, *Thermographic measurements in environmental and bio sciences*, *Quantitative Infrared Thermography*, 2002, pp. 253-259.
- [9] C. S. Garbe, U. Schurr and B. Jähne, *Thermographic measurements on plant leaves*, in X. P. Maldague and A. E. Rozlosnik, eds., *ThermoSense*, SPIE, 2002, pp. 407-416.
- [10] C. S. Garbe, N. Smoljar, M. Komiyenko, U. Schurr and B. Jähne, *Water relations in plant leaves, Image Sequence Analysis to Investigate Dynamic Processes*, Springer-Verlag, Heidelberg, 2003, pp. 180-220.
- [11] C. S. Garbe, H. Spies and B. Jähne, *Estimation of surface flow and net heat flux from infrared image sequences*, Journal of Mathematical Imaging and Vision, 19 (2003), pp. 159-174.
- [12] C. Popp, *Untersuchungen zum windinduzierten Wärmeaustausch durch die wasserseitige Grenzschicht an der Wasseroberfläche mittels aktiver Thermographie*, Univ. of Heidelberg, 2006.
- [13] U. Schimpf, C. S. Garbe and B. Jähne, *Investigation of transport processes across the sea surface microlayer by infrared imagery*, Journal of Geophysical Research, 109 (2004).
- [14] D. Wu and G. Busse, *Remote inspection of wood with lock-in-thermography*, Tappi Journal, 79 (1996), pp. 119-123.
- [15] D. Wu, A. Salerno, J. Rantala and G. Busse, *Characterization of layered materials using lock-in thermography*, Progress in Natural Science, 6 (1996), pp. S76-S79.