

NEUARTIGE SEQUENTIELLE ZWEIFARBENFLUORESCENZ- MESSTECHNIK ZUR BESTIMMUNG DES LOKALEN WÄRMEÜBERGANGS IN MIKROWÄRMEÜBERTRAGERKANÄLEN

NEW SEQUENTIAL TWO DYES FLUORESCENCE MEASURING TECHNIQUE FOR THE LOCAL HEAT TRANSFER IN MICRO-STRUCTURED HEATEXCHANGER CHANNELS

Christine Klein

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik, Postfach 3640, 76021 Karlsruhe, Christine.Klein@kit.edu

Rhodamin B, Sulforhodamin 101, Temperaturfeld, Fluoreszenz
rhodamine B, sulforhodamine 101, temperature field, fluorescence

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird ein neues Messverfahren für das lokale Temperaturfeld für von Wasser durchströmten Mikrowärmeübertragerkanälen vorgestellt. Bisher sind experimentelle Daten in der Literatur zum Wärmeübergang in Mikrokanälen, basierend auf integralen Messungen der Ein- und Austrittstemperatur, widersprüchlich, unvollständig und weisen größere Diskrepanzen im Vergleich zu makroskopischen Korrelationen auf. Ein ortsauflösendes Messverfahren kann helfen, die Widersprüche zu klären und grundlegende Messungen in Mikrokanälen durchzuführen. Für die experimentellen Untersuchungen wird ein Versuchsaufbau mit einer modularen, optisch zugänglichen Mikrokanalbaugruppe mit einem einzelnen Rechteckkanal, in dem Reynolds-Zahlen bis $Re < 1100$ realisiert werden können, konzipiert. Der symmetrische Aufbau gewährleistet einen symmetrischen Wandwärmestrom. Druck, Einlaufftemperatur, Massenstrom und Wandtemperatur können hochpräzise kontrolliert werden, um das Messverfahren mit isothermen Temperaturfeldern (Genauigkeit von unter $0,02\text{ °C}$) kalibrieren unter genau definierten Versuchsbedingungen messen zu können. Um das Temperaturfeld im Mikrokanal zu messen, wird eine auf induzierter Fluoreszenz basierende neuartige Zwei-Farben-Messtechnik mit sequentieller Detektion des Fluoreszenzsignals von Rhodamin B und Sulforhodamin 101 angewendet. Bei Rhodamin B hängt die Fluoreszenzintensität in einem eindeutigen Zusammenhang nur von der Temperatur ab, wenn bestimmte andere Einflussgrößen (wie z.B. die anregende Lichtintensität) konstant gehalten werden. Mit Hilfe von Sulforhodamin 101 kann der Einfluss der anregenden Lichtintensität und damit Brechungseffekte aufgrund von Brechungsindexgradienten eliminiert werden. Um der begrenzten räumlichen Zugänglichkeit Rechnung zu tragen, wird das Verfahren zu einem Epifluoreszenzmikroskopieverfahren modifiziert. Durch eine niedrige Farbstoffkonzentration von $0,01\text{ g/l}$ in Kombination mit dem symmetrischen Aufbau können Absorptionseffekte eliminiert und dadurch ein höhengemitteltetes Temperatursignal ohne Wichtung registriert werden. Durch diese Maßnahmen ist es erstmals möglich, lokale Temperaturen mit einer Genauigkeit von weniger als $0,3\text{ °C}$ reproduzierbar zu messen. Die zweidimensionale Temperaturverteilung kann bis zu $5\text{ }\mu\text{m}$ Entfernung von der Wand gemessen werden. Anhand der experimentell bestimmten Temperaturfelder und -gradienten im Fluid wird der Wärmeübergang von der Kanalwand zum Fluid mit Hilfe eines eindimensionalen Modells

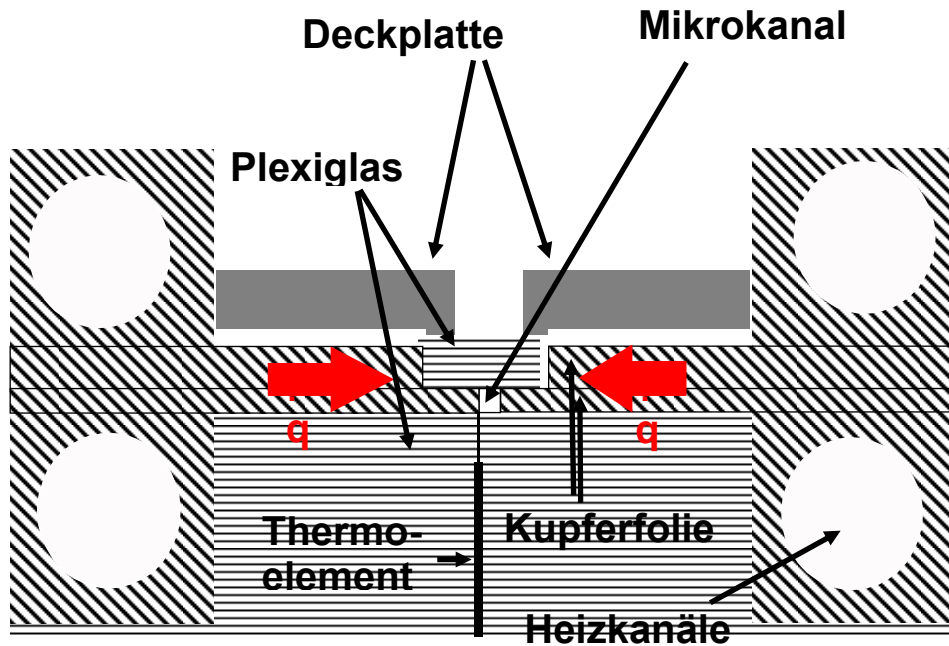


Abb. 1: Schematischer Querschnitt Mikrokanalmodul

Licht koaxial durch das Mikroskopobjektiv (Vertikalbeleuchtung oder Ploem-Beleuchtung) geführt, um das ganze Sehfeld auszuleuchten. Als Lichtquelle wird eine Xenon-Lampe (Hamamatsu Super Quiet Xenon-Lamp), die eine hohe und konstante Lichtintensität breitbandig emittiert, verwendet. Der Anregungsfilter filtert den gewünschten Wellenlängenbereich von $515 < \lambda < 560 \text{ nm}$ heraus. Das Anregungslicht wird mit Hilfe eines dichromatischen Strahlenteilers (Transmission für Wellenlängenbereich $\lambda > 580 \text{ nm}$ und Reflexion für $\lambda < 580 \text{ nm}$) vollständig in den Strahlengang des *LEICA DMLM* Mikroskops koaxial durch das Objektiv in den Mikrokanal reflektiert. Rhodamin B wird durch das Anregungslicht im Kanal zur Fluoreszenz angeregt, in Bereichen mit niedrigerer Temperatur ist die Fluoreszenzintensität höher, in Bereichen mit höherer Temperatur ist sie niedriger. Als Planobjektive werden ein Leica HCX PL FL mit 20facher Vergrößerung und einer numerischen Apertur von 0,40 und ein Leica N PLAN mit 5facher Vergrößerung und einer numerischen Apertur von 0,12 eingesetzt. Das Fluoreszenzintensitätsfeld wird durch das Objektiv auf den CCD Chip einer *Image Intense* Kamera der Firma *PCO* mit 12-Bit-Auflösung und 1376×1040 Pixel abgebildet. Streulicht und reflektiertes Licht werden durch ein Sperrfilter (Langpassfilter 590 nm) blockiert. Fokussiert wird für alle Aufnahmen auf den oberen Kanalrand. Der CCD-Sensor zeigt eine gute Linearität zwischen Lichtintensität und Messsignal. Die Bilder werden von der Kamera an einen Computer übertragen und mit der Software *Davis 6.2* von *LaVision* analysiert. Mit diesem speziellen Aufbau und einer moderaten Fluoreszenz-Farbstoff-Konzentration von $0,01 \text{ g/l}$ ist es möglich, siehe Klein 2008, die höhengemittelte Fluoreszenz-Intensität im Kanal, die sich proportional zur höhengemittelten Temperatur T im Kanal (Höhe h) verhält, zu erfassen.

$$I_F = I_0 c \overline{\Phi(T)} \varepsilon h \propto \overline{T^{-1}} \quad (2)$$

Kalibrierung: Selbst wenn die Konzentration c konstant gehalten werden kann, bleibt diese Verhältnis von geringem praktischem Wert für die Temperaturmessung, da die Anregungslichtintensität weder zeitlich noch räumlich konstant ist: $I_0 = I_0(x, y, t)$. Zeitliche Schwankungen aufgrund von Schwankungen der Lichtquelle können durch Mittelung über die Zeit beseitigt werden: $I_0(x, y) = \overline{I_0(x, y, t)}$. Es werden in der weiteren Darstellung ausschließlich zeitlich gemittelte Werte verwendet. Zur Vereinfachung wird im nachfolgenden Text auf das Mit-

110) werden die beiden Farbstoff-Emissions-Spektren diskriminiert, ihre Intensitätsfelder separat mit unterschiedlichen Kameras registriert. Die Intensitäten werden analog zu Gleichung (4) durcheinander dividiert, um den Einfluss der lokalen Beleuchtung zu eliminieren. Der größte Nachteil des Verfahrens von Sakakibara und Adrian 1999 ist, dass es das Ziel hat, Strahlablenkungen durch Brechungseffekte zu berücksichtigen, Lichtbrechung aber wellenlängenabhängig ist (chromatische Dispersion $n=n(\lambda)$). Die Strahlablenkung für Rhodamin B und Sulforhodamin hingegen ist aufgrund gleicher Absorptions- und Emissionsspektren (zusätzlich wird das gleiche Bereich herausgefiltert) identisch. Ein weiterer Nachteil des Verfahrens von Sakakibara und Adrian sind spektrale Konflikte. So können sich zum einen die Emissionsbereiche der beiden Farben überschneiden. Bei nicht adäquater Filterung wird so Fluoreszenzlicht der einen Farbe fälschlich der anderen zugeordnet. Ferner liegt der Emissionsbereich der einen Farbe meist im Absorptionsbereich der anderen Farbe. Das Fluoreszenzlicht der einen Farbe wird dann von der anderen Farbe absorbiert, die wiederum einen Teil dieses absorbierten Lichts als Fluoreszenzlicht emittiert. Folglich ist die anregende Lichtintensität für den absorbierenden Farbstoff nicht mehr exakt die gleiche wie für den anderen Farbstoff. Entsprechend muss deshalb mit einer höheren Farbkonzentration der einzelnen Farbstoffe gearbeitet werden, was wiederum Probleme hinsichtlich Oligomerbildung und Lichtabsorption nach sich ziehen kann. Beim sequenziellen Zweifarbenfluoreszenzverfahren treten keine spektralen Konflikte auf. Es ist nur eine Bildaufnahmeeinheit notwendig, sodass die optischen Abbildungsbedingungen inklusive möglicher Abbildungsverzerrungen identisch für beide Aufnahmen sind. Für die Skalierung in Gleichung (3) werden die Intensitätsverhältnisse aus Gleichung (4) benutzt:

$$I_{Korr2}(x, y, T) = \frac{\frac{\overline{I_R(x, y, t, T)}}{\overline{I_S(x, y, t, T)}} - \frac{I_{R / Ref}(x, y)}{I_{S / Ref}(x, y)}}{\frac{I_{R / Ref}(x, y)}{I_{S / Ref}(x, y)}} = I_{Korr2}(\Phi_R(T(x, y)), \Phi_S(T(x, y))) \quad (5)$$

Kalibrierungsmessungen: Mit einer konstanten Referenztemperatur T_{Ref} hängt dann diese Beziehung ausschließlich von der lokalen Temperatur ab. An jeder gewünschten Kanalposition, an der das Temperaturfeld gemessen werden soll, muss eine Kalibrierung durchgeführt werden. Ziel der Kalibrierung ist es, mit Gleichung 5 eine Funktion zur Umrechnung der Lichtintensität in die entsprechende Temperatur für jedes Pixel zu erhalten. Dazu werden eine Serie von isothermen Messungen bei $T_{Ref} = 24^\circ C$, $26^\circ C$ und $28^\circ C$ durchgeführt. Dazu werden die Eintritts-, Austritts- und Wandtemperatur auf den exakt gleichen Wert eingestellt und das Testfluid mit der gleichen Reynolds-Zahl $Re = 300$ durch den Kanal gepumpt. Messungen mit isothermen Testtemperaturfeldern zeigen, dass mit der vorgestellten Technik das lokale Temperaturfeld genauer als $0,3^\circ C$ gemessen werden kann.

Ergebnisse

Mit dem beschriebenen Verfahren werden Temperaturfeldmessungen in einem Kanal mit einer Breite von $200,5 \mu m$ und einer Höhe von $215 \mu m$ an der Kanalposition $x = 1,8 \text{ mm}$ und $x = 10,5 \text{ mm}$ stromabwärts vom Eintritt bei Reynolds- Zahlen von $Re = 326$, $Re = 627$ und $Re = 1121$ bei Wärmeübergang durchgeführt. Bei jeder Reynolds-Zahl stellen sich unterschiedliche Ein- und Austrittstemperaturen ein: und $T_{Eintritt} = 24,4^\circ C$ und $T_{Austritt} = 28,4^\circ C$ für $Re = 326$, $T_{Eintritt} = 24,3^\circ C$, $T_{Austritt} = 26,85^\circ C$ für $Re = 627$, $T_{Eintritt} = 24,2^\circ C$, $T_{Austritt} = 25,95^\circ C$ für $Re = 1121$. Die aufgenommenen Intensitätsfelder erfassen typischerweise beim 20fach Objekt die gesamte Kanalbreite (y) und in x -Richtung $0,44 \text{ mm}$. Es wird

Bei gleichem experimentellem Aufbau, bei den gleichen Parametern und Randbedingungen, wie oben beschrieben, lediglich mit einem Mikroskopobjektiv mit der Vergrößerung 5x (Leica N PLAN L) wird erneut eine Messreihe durchgeführt. Aufgrund der geringeren Vergrößerung wird dabei pro Aufnahme eine Länge von 1,76 mm (x) des Kanals und die komplette Breite (in y) erfasst. Von den errechneten Temperaturfeldern werden durch Mittlung über die Kanal-

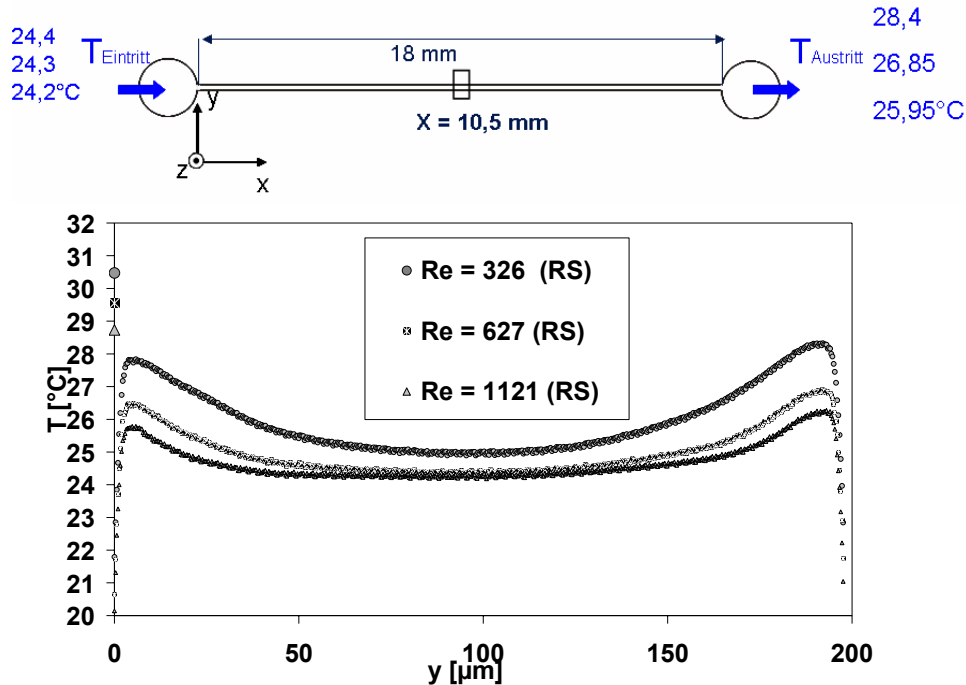


Abb. 3: Temperaturprofile an der Position $x = 10,5$ mm, kleine Symbole sequentielles Zweifarbenverfahren, große Symbole: Wandtemperatur ermittelt mit Thermoelementen

breite Temperatur-Profile in x-Richtung extrahiert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4 dargestellt. Messwerte sind nur für bestimmte Positionen im Kanal im Bereich des Mikroskopsehfeldes ermittelbar. Eine Funktion für die Fluidtemperatur ist durch Regressionsanalyse in Form einer Exponentialfunktion $T_F(x) = T_W(x) - (ce^{-dx})$ durch Ausgleichsrechnung (Gauß-Markow-Modell) ermittelbar. c und d sind Koeffizienten.

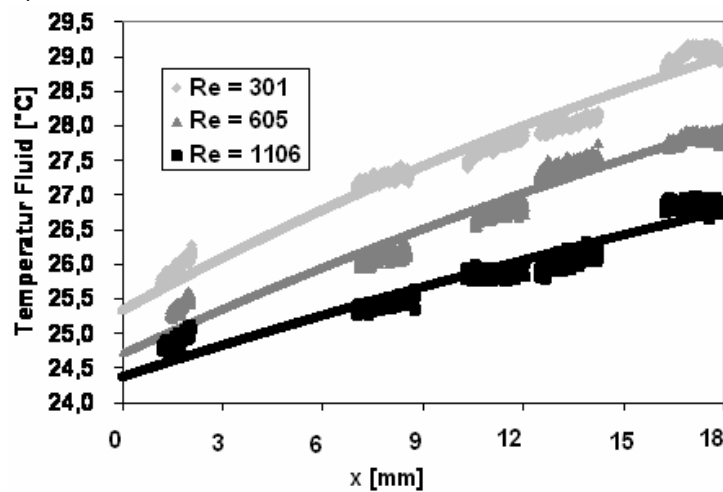


Abb. 4: Fluidtemperatur gemittelt über die Kanalbreite in Abhängigkeit von der Lauflänge, Messwerte: einzelne Symbole an fünf Kanalpositionen, durchgezogene Linie: Regressionsfunktion

