

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 HEAT EXCHANGER 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

analytisch bestimmt. Der Vergleich der Temperaturprofile aus einer CFD Rechnung mit den Profilen aus der Einfarben- und der Zweifarbenmethode zeigt das Potential der Zweifarbenmethode Brechungsindexgradienten basierte Beugungseffekte zu kompensieren.

Einleitung

Zur Auslegung und Optimierung von Mikrowärmeübertragern werden neben integralen Korrelationen zum Druckabfall und Wärmeübergang auch zuverlässige Korrelationen zum lokalen Wärmeübergang oder zum Temperaturfeld benötigt. Im Gegensatz zum Wärmeübergang in makroskopischen Kanälen gibt es in der Literatur nur wenige experimentelle Arbeiten zum Wärmeübergang in Mikrokanälen. Aber diese experimentellen Daten zum Wärmeübergang in Mikrokanälen, die typischerweise auf integralen Messungen der Ein- und Austrittstemperatur des Fluids basieren, zeigen sich teils widersprüchlich, unvollständig und weisen größere Diskrepanzen im Vergleich zu makroskopischen Korrelationen und zu Ergebnissen aus CFD Rechnungen auf, siehe Sobhan and Garimella 2000. Ein ortsauflösendes Messverfahren könnte mit grundlegende Messungen in Mikrokanälen helfen, mehr Einblick in die beteiligten physikalischen Prozesse zu bekommen und helfen die Diskrepanzen zwischen den in der Literatur dargestellten Ergebnissen zu klären und die Unsicherheiten bezüglich des Wärmeübergangs in Mikrokanälen verringern.

Messtechnik

Bei einigen Fluoreszenzfarbstoffen besitzt die Fluoreszenzintensität einen eindeutigen Zusammenhang mit der Temperatur und kann somit als Maß für die Temperatur verwendet werden, wie z.B. Rhodamin B für makroskopische Anwendungen von Sakakibara & Adrian 1999 beschrieben. Der Zusammenhang zwischen der Fluoreszenzintensität I_F und der Intensität I_0 des anregenden Lichtes ist nach Rost 1995 und Walker 1985

$$I_F = I_0 c \Phi(T) \varepsilon . \quad (1)$$

c ist die Farbstoffkonzentration im Lösungsmittel. Die Quanteneffizienz Φ zeigt eine starke Temperaturabhängigkeit, während der Absorptionskoeffizient ε eine geringe Temperaturabhängigkeit aufweist. Andere Einflussfaktoren, wie der pH-Wert des Lösungsmittel, die Konzentration c oder auch die Dauer der Anregung, sind nicht relevant, da diese Parameter konstant gehalten werden können und so das Verhältnis zwischen Fluoreszenzintensität und Temperatur T nicht beeinflussen.

Versuchsaufbau: Das Ziel ist, das Temperaturfeld und den lokalen Wärmeübergang in den Kanälen eines Mikrowärmetauschers zu untersuchen. Aufgrund der Komplexität eines mehrkanaligen Mikrowärmetauschers wird ein einzelner Rechteckkanal mit einem Querschnitt von $200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ untersucht. Aus einer $200 \mu\text{m}$ dicken Kupferfolie wird ein Mikrokanal mit einer Länge von 18 mm und einer Breite von $200 \mu\text{m}$ gefräst und zwischen zwei Plexiglasplatten, die Deckel und Boden des Mikrokanals bilden, eingelegt. Plexiglas als Material erfüllt zum einen den Zweck, den Kanal nach oben und nach unten thermisch zu isolieren. Damit wird ein nahezu symmetrischer Wärmestrom von den Kupferwänden in das Fluid kreierte. Zum anderen ermöglicht das Plexiglas einen optischen Zugang zum Kanal für nicht invasive, optische Messtechniken.

Optischer Aufbau: Für Fluoreszenzintensität-Messungen zur Temperaturfeldbestimmung im Mikrokanal wird eine definierte Konzentration von 0,01 g/l Fluoreszenzfarbstoff (Rhodamin B, Sulforhodamin) in destilliertem Wasser gelöst. Bei Verfahren zur Messung makroskopischer Konzentrations- und Temperaturfelder kommen typischerweise Lichtschnittverfahren zur Anwendung, siehe Sakakibara & Adrian 1999. Ein Lichtschnittverfahren kann hier aufgrund begrenzter räumlicher Zugänglichkeit nicht zur Anwendung kommen. Stattdessen wird das

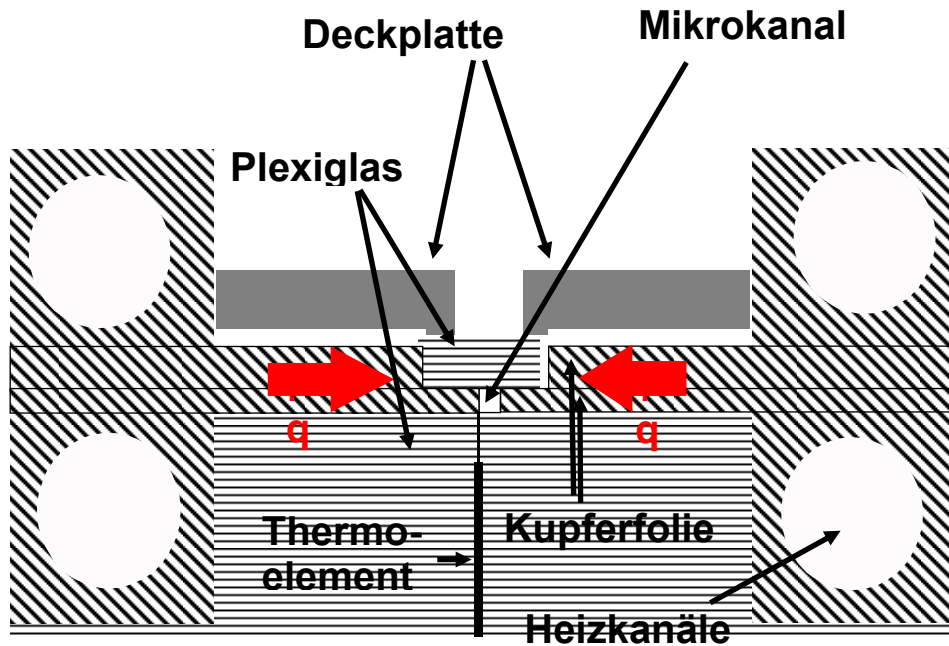


Abb. 1: Schematischer Querschnitt Mikrokanalmodul

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-

telungssymbol verzichtet. Zudem führen örtlich unterschiedliche Lichttransmission der optischen Elemente des Mikroskops und des Plexiglasdeckels und Unterschiede in der Sensitivität der einzelnen Pixel der CCD Kamera zu einer Aufnahmeverzerrung $\zeta(x, y)$. Die CCD Kamera registriert eine verzerrte Abbildung des Intensitätsfeldes: $I_{Reg} = \zeta(x, y)I_F$.

Im Fall einer räumlich inhomogenen, aber zeitlich konstanten Beleuchtung $I_0 = I_0(x, y)$ können die Abhängigkeit von der Beleuchtung $I_0(x, y)$ und die Aufnahmeverzerrung $\zeta(x, y)$ mit Hilfe einer Normierung mit einem Referenzintensitätsfeld $I_{Ref}(x, y)$ eliminiert werden:

$$I_{Korr1} = \frac{I(x, y) - I_{Ref}(x, y)}{I_{Ref}(x, y)} \quad (3)$$

Das Referenzintensitätsfeld $I_{Ref}(x, y)$ wird durch ein isothermes Temperaturfeld $T_{Ref}(x, y) = const.$, dessen Temperatur möglichst zwischen der maximal und der minimal auftretenden Temperatur liegt, generiert. Mit dieser Normierung wird für jeden Pixel eine Kalibrierung durchgeführt. Die Temperatur lässt sich über die prozentuale Abweichung vom Referenzwert mit Hilfe einer solchen Kalibrierung errechnen. Kommt es aber bei einem speziell zu vermessenden Temperaturfeld T_F im Fluid und im durchstrahlten Plexiglasdeckel aufgrund von Temperaturgradienten über die Änderung der Dichte zu Brechungsindexgradienten, können diese eine Strahlablenkung nach sich ziehen und die Beleuchtung hängt nicht mehr nur vom Ort ab: $I_0 = I_0(x, y, T_F)$. Dabei kommt es zu lokal höherer oder verminderter Beleuchtung, abhängig vom speziellen Temperaturfeld. Hier muss die aktuelle lokale Beleuchtungsintensität bestimmt oder eliminiert werden. Dies geschieht mit Hilfe eines zweiten Fluoreszenzfarbstoffes.

Sequenzielles Zweifarbenfluoreszenzverfahren: Diese neuartige Methode, auf induzierte Fluoreszenz basierend, wird hier erstmalig angewendet. Die zwei Farbstoffe dazu sollen möglichst gleiches Emissions- und Absorptionsspektrum, aber unterschiedliche Temperaturempfindlichkeit aufweisen. Der Mikrokanaleintritt wird alternierend mit zwei Tanks mit Rhodamin B (Absorptionsmaximum 560 nm Emissionsmaximum 585 nm) und Sulforhodamin 101 (Absorptionsmaximum 585 nm Emissionsmaximum 607 nm) Lösungen in Wasser verbunden. Die Strömung ist druckgetrieben mit Helium-Gas. In zwei sequentiellen Experimenten mit identischem Temperaturfeld (aufgrund identischer Bedingungen, wie gleicher Massestrom, gleichen Temperaturen an der Wand, am Eintritt und Austritt) werden Intensitätsbilder für die Sulforhodamin und Rhodamin B-Lösungen aufgenommen. Durch Division der entsprechenden Intensitätswerte für Rhodamin $I_R(x, y, T_f)$ and Sulforhodamine $I_S(x, y, T_f)$ kann die Abhängigkeit von der lokalen Beleuchtung $I_0 = I_0(x, y, T_F)$ eliminiert werden:

$$\frac{I_R}{I_S} = \frac{I_0 \Phi_R(T) c_R \varepsilon_R h}{I_0 \Phi_S(T) c_S \varepsilon_S h} \quad (4)$$

Die sequentielle Detektion der Fluoreszenzsignale von Rhodamin B und Sulforhodamine weist mehrere Vorteile gegenüber einer Fluoreszenzmethode, die von Sakakibara und Adrian 1999 für makroskopische Probleme entwickelt wurde. Sakakibara und Adrian haben zur Temperaturmessung eine Mischung zweier fluoreszierender Farbstoffe (Rhodamin B und Rhodamin 110) mit unterschiedlichen Temperaturempfindlichkeiten und unterschiedlichen Absorptions- und Emissionsspektren verwendet. Mit Hilfe eines Strahlteilers und angepasster Filter (Transmissionsbereich von $570 < \lambda$ für Rhodamin B und $495 < \lambda < 520$ für Rhodamin

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 Bildaufnahmeinheit 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

über 20 Bilder gemittelt. Die Kupferkanalwände werden mit Hilfe der Heizkanäle - die konstant auf $T_H = 34^\circ\text{C}$ gehalten werden - temperiert. Mit Hilfe der Kalibrierfunktionen, die bei isothermen Referenzmessungen gewonnen wurden, werden aus den Intensitätsfeldern Temperaturfelder berechnet. Aus den Temperaturfeldern werden durch Mittlung in x -Richtung Temperaturprofile senkrecht zur Kanalwand extrahiert. Die Resultate sind in Abbildung 2 und 3 dargestellt. Die Wandtemperaturen, die mit Thermoelementen ermittelt werden, sind mit größeren Symbolen entsprechend der Reynolds-Zahl an der Wandposition $y = 0$ mm dargestellt. Die experimentellen Daten, die für verschiedenen Reynolds-Zahlen an verschiedenen Kanalpositionen ermittelt wurden zeigen Konsistenz zueinander und zu den Kanalein- und austrittstemperaturen. Die thermische Grenzschicht entwickelt sich und beginnt ab Kanaleintritt zu wachsen. An der Position $x=1,8$ mm ist sie noch schmal. Die Temperaturen aller Reynolds-Zahlen, insbesondere die in der Kanalmitte ($y = 100 \mu\text{m}$) entsprechen deshalb der Eintrittstemperatur. Weil der Temperaturgradient an der Wand im Eintrittsbereich besonders hoch ist, kann auch hier die sequentielle Zweifarbenmethode die Lichtstrahlableitung aufgrund von Brechungsindexgradienten nicht vollständig kompensieren. Ein weiterer Grund für die Abweichung vom Temperaturverlauf, der aufgrund der durch die Thermoelemente ermittelten Wandtemperatur zu erwarten ist, ist das kleine Signal-zu-Rausch Verhältnis. Die Kanalbegrenzung schattet insbesondere für Farbstoffmoleküle in tieferen Kanalschichten direkt an der Wand den Belichtungskegel wie eine Blende ab. Gleichzeitig wirkt der Kanalrand für diese Farbstoffmoleküle bei der Bildgebung wie eine Feldblende (Eintrittspupille), die den Lichtkegel, der von einem Farbstoffmolekül im unteren Kanalbereich ausgeht, abschattet (optische Vignettierung). Stromabwärts an der Position $x = 10,5$ mm ist die Temperaturgrenzschicht schon bis zur Mitte gewachsen. Die Temperaturgradienten sind hier kleiner an der Wand. Die Daten der sequentiellen Zweifarbenmethode entsprechen hier in Wandnähe den Daten der Thermoelementmessung. Für höhere Reynolds-Zahlen ($Re = 1160$) entspricht der Verlauf des Temperaturprofils eher dem Verlauf bei Wärmeübergang bei einer turbulenten Strömung als bei einer laminaren. Trotz niedriger Reynolds-Zahl scheinen Effekte, wie instationäre Staupunktströmung im Auslaufrtrittsbereich und Ablösebereich vor dem Kanaleintritt hier die Strömung zu stören.

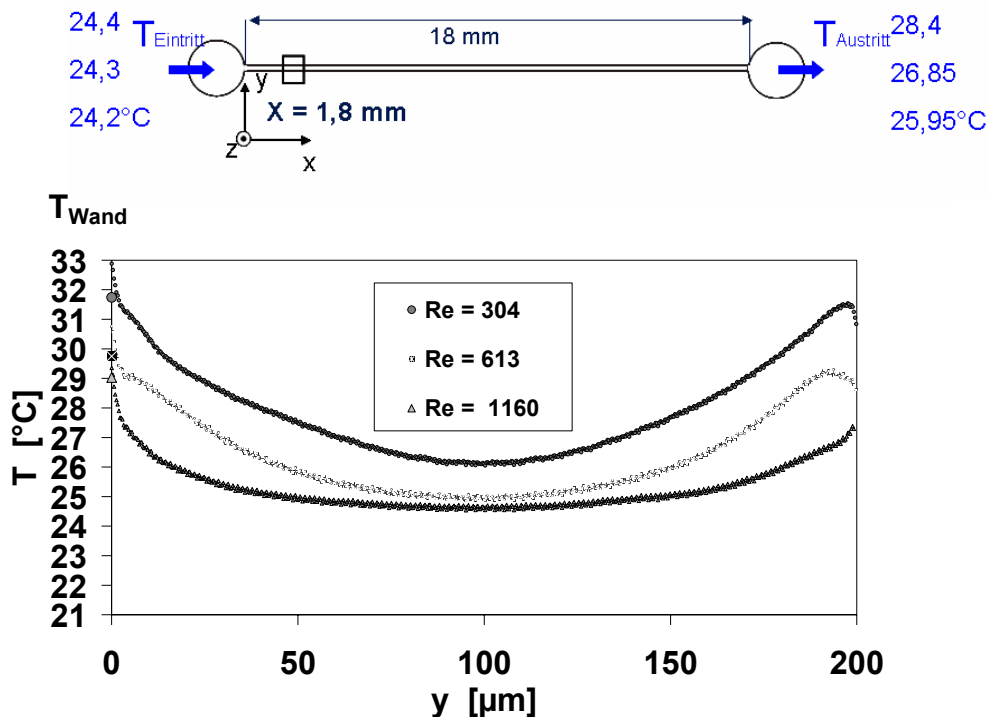


Abb. 2: Temperaturprofile an der Position $x = 1,8$ mm, kleine Symbole sequentielles Zweifarbenverfahren, große Symbole: Wandtemperatur ermittelt mit Thermoelementen

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-

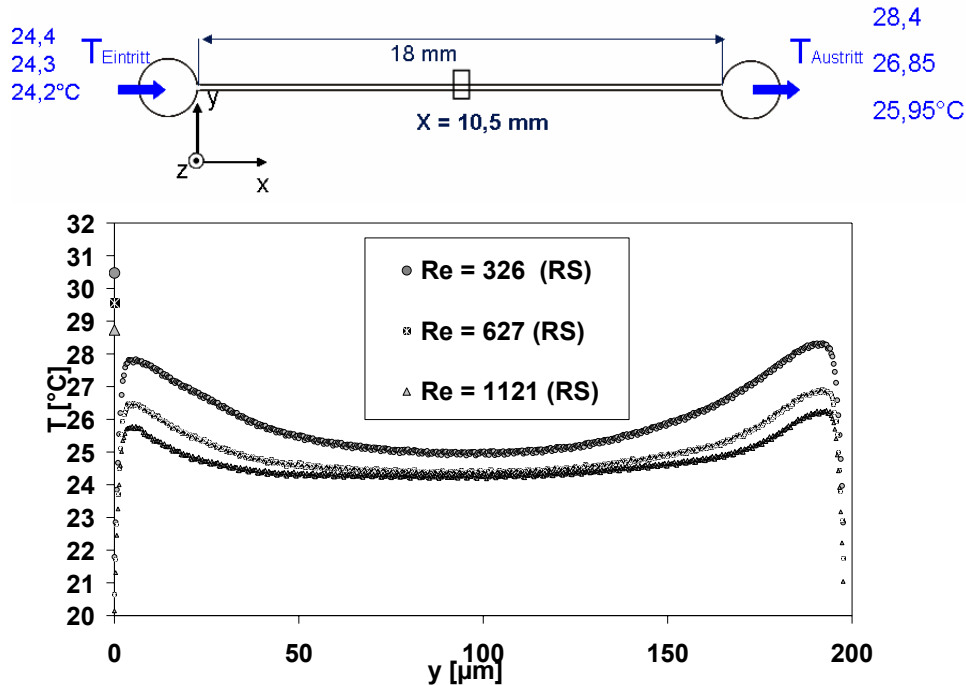


Abb. 3: Temperaturprofile an der Position $x = 10,5$ mm, kleine Symbole sequentielles Zweifarbenverfahren, große Symbole: Wandtemperatur ermittelt mit Thermoelementen

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.

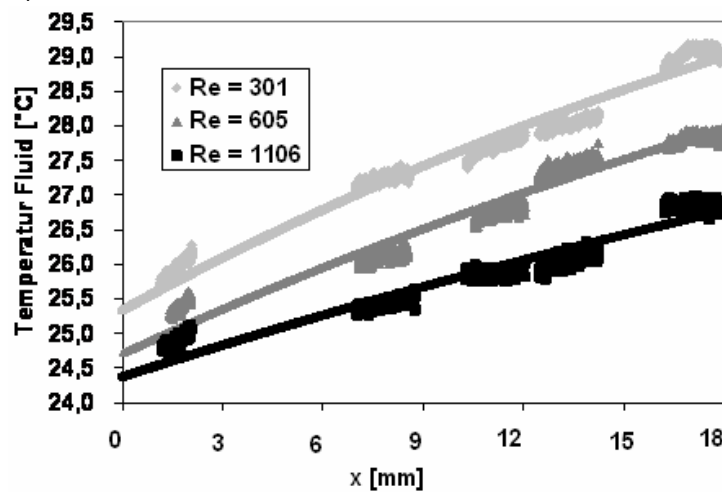


Abb. 4: Fluidtemperatur gemittelt über die Kanalbreite in Abhängigkeit von der Lauflänge, Messwerte: einzelne Symbole an fünf Kanalpositionen, durchgezogene Linie: Regressionsfunktion

Eindimensionales Modell für die Wärmeübertragung: Bei Klein 2008 wird ein eindimensionales Modell hergeleitet, das zu einer algebraischen Gleichung führt, die mit den experimentel-

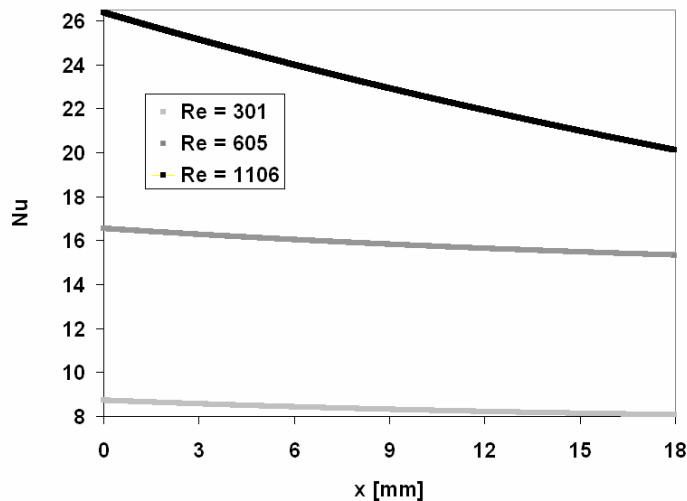


Abb. 5: Lokale Nußelt-Zahl in Abhängigkeit von der Lauflänge x

len Daten für die Fluid- und die Wandtemperatur gelöst werden kann. Beim eindimensionalen Modell werden alle Größen über den Querschnitt gemittelt betrachtet. Die relevanten Wärmeströme \dot{Q} in ein infinitesimales Volumenelement werden bilanziert. Eine Größenordnungsabschätzung der einzelnen Terme ergibt, dass der diffusive Term im Vergleich zum konvektiven Term vernachlässigt werden kann. Aus der vereinfachten Bilanzgleichung ergibt sich dann für den Wärmeübergangskoeffizienten:

$$\alpha = \frac{B}{2(T_w - T_F)} \rho c_p \left(u_m \frac{\partial T_F}{\partial x} \right), \quad (6)$$

wobei B die Kanalbreite, u_m die mittlere Geschwindigkeit, ρ die Dichte und c_p die Wärmekapazität ist. Mit dieser Gleichung kann die lokale Nußelt - Zahl $Nu = \frac{\alpha L}{\lambda}$ bestimmt werden, wobei λ die Wärmeleitfähigkeit ist und L eine charakteristische Länge, hier der hydraulische Durchmesser des Kanals. In Abb. 5 sind die so errechneten Nußelt - Zahlen gegen die Lauflänge aufgetragen. Die Nußelt - Zahlen sind konsistent zueinander, nehmen entlang des Kanals erwartungsgemäß ab. Bei höheren Reynolds-Zahlen sind die Werte größer.

Mit der neu entwickelten sequentiellen zwei Farbstoff – Fluoreszenz - Messtechnik kann das Temperaturfeld bis 5 μm nah an die Kanalwand detektieren und arbeitet mit einer Genauigkeit besser als 0,3 $^{\circ}\text{C}$. Der lokale Wärmeübergang von der Kanalwand ins Fluid kann analytisch mit einem vereinfachten eindimensionalen Modell aus den Messwerten bestimmt werden.

Literatur

- Sobhan, C. and Garimella, S. 2000: "A comparative analysis of studies on heat transfer and fluid flow in microchannels", In G. Celata (ed.), Proc. Heat Transfer and Transport Phenomena in Microscale. Banff, Canada: Begell House Publ., pp 80–92
- Sakakibara, J. and Adrian, R.J. 1999: "Whole field measurement of temperature in water using two-colour laser induced fluorescence", exp. Fluids, J., vol. 26, pp. 7-15
- Rost, F. W. 1995: "Quantitative fluorescence microscopy", Cambridge University Press, Cambridge
- Walker, D.A. 1985: "A fluorescence technique for measurement of concentration in mixing liquids", J. Phys. E: Sci. Instrum., Vol. 20, pp. 22-24
- Klein, CH. 2008, Entwicklung eines Messverfahrens zur Bestimmung des Temperaturfeldes in Mikro-wärmeübertragerkanälen, Doktorarbeit, Universität Karlsruhe Institut für Maschinenbau, Karlsruhe