

## BRECHUNGSINDEXANPASSUNG FÜR GESCHWINDIGKEITSMESSUNGEN IN MIKRO-FLUIDISCHEN ZWEI- PHASEN-SYSTEMEN

**U. MIESSNER, R. LINDKEN, J. WESTERWEEL**

Laboratory for Aero- & Hydrodynamics  
Delft University of Technology  
Leeghwaterstraat 21  
2628 CA Delft  
Niederlande

Particle Image Velocimetry (PIV), Laser induzierte Fluoreszenz (LIF), Mehrphasenströmung, Brechungsindex

### **Abstract**

Eine optimale Brechungsindexanpassung in dispersen Flüssig/Flüssig-Zwei-Phasenströmungen erlaubt die gleichzeitige PIV-Messung der Geschwindigkeitsverteilungen beider Phasen. Durch Brechungsindexanpassung werden optische Verzerrungen vermieden, so dass es möglich ist, in einem dispergierten Tropfen durch die stark gekrümmte Phasengrenzfläche die interne Zirkulation zu bestimmen.

An der gekrümmten Phasengrenzfläche zweier Medien mit unterschiedlicher optischer Dichte wird ein Lichtstrahl zum optisch dichteren Medium hin gebrochen. Die Lichtbrechung verursacht eine verzerrte Abbildung der Partikel. Die Verzerrung nimmt mit steigender Abweichung der Brechungsindizes und größerem Einfallswinkel bzw. stärkerer Krümmung der Phasengrenzfläche zu. Die Krümmung der Grenzfläche wird gewöhnlich von den experimentellen Randbedingungen vorgegeben. Die Brechung der Lichtstrahlen an der Phasengrenzfläche kann daher nur durch die Anpassung des Brechungsindexes der zwei Phasen vermieden werden.

Für das Zwei-Phasensystem (Wasser/Glucose-Mischung in Öl/Öl-Mischung) wird ein Verfahren zur Anpassung des Brechungsindexes vorgestellt. Dieses Verfahren zeigt eine allgemein anwendbare Methode den Brechungsindex beliebiger Systeme unter Berücksichtigung weiterer physikalischer Einflussgrößen, wie Viskosität, Dichte, Oberflächenspannung oder elektrischer Leitfähigkeit, anzupassen.

Der Brechungsindex ist abhängig von der Zusammensetzung der jeweiligen Phase und ihrer Temperatur. Das Verhalten der optischen Dichte beider Materialien wird in Abhängigkeit der genannten Parameter dokumentiert und eine Vorgehensweise zur reproduzierbaren Brechungsindexanpassung vorgestellt.

Begleitend wird eine einfache Fehlerabschätzung präsentiert, die den Einfluss der Brechzahlenabweichung beider Phasen quantifiziert. Hierbei wird auf die Lage- sowie Längenabweichung einer Partikelbildverschiebung innerhalb einer dispergierten Phase eingegangen. Die Messfehler werden lageabhängig bestimmt und ausgewertet.

## Einleitung

Verfahrenstechnische Grundoperationen sind die Grundlage auf der mikrofluidische Chip Applikationen aufgebaut sind: Transport, Mischen, Reaktion. Detailliertes Wissen über vorherrschenden Gradienten (Wärme, Stoff und Impuls) ist notwendig, um gezielt Prozesse zu etablieren, zu kontrollieren und kommerziell anzuwenden. In den meisten Fällen wird in Mikro-Kanälen ein laminarer konvektiver Transport etabliert, um Edukte zusammenzubringen und Produkte abzutransportieren.

Eine effektive Methode des Transportes in Mikrokanälen mit geringer Dispersion (Taylor 1953 und Aris 1956) ist Zweiphasenströmung. Hier wird entweder die Flüssigphase von einer Gasblase getrennt (Günther et al. 2004) oder die Reaktionspartner werden in einem wässrigen Tropfen in einer kontinuierlichen Ölphase bewegt (Zheng et al. 2004). Interne Zirkulation in Pfropfenströmung kann zum Mischen genutzt werden (Günther et al. 2005).

Zur Messung von Geschwindigkeit, Temperatur oder Konzentration werden häufig berührungsfreie optische Messverfahren (Laser induzierte Fluoreszenz – LIF, Particle Image Velocimetry – PIV) eingesetzt. Eine grundlegende Voraussetzung für derartige Messverfahren ist die optische Zugänglichkeit. Nicht nur müssen die Bewandungen einer Versuchsstrecke in zumindest einer Dimension transparent sein, auch die optischen Eigenschaften (Brechungsindex, optische Dichte) der verwendeten Materialien sind wichtig (Zachos et al 1996): Nur ein ungestörter bzw. bekannter Strahlengang des Lichtes resultiert in einer maßstäblichen und quantitativ verwertbaren lokalen Messung.

Unterschiedliche Randbedingungen einzelner Versuche resultieren in grundsätzlich verschiedenen Oberflächengeometrien der Phasengrenzflächen. Aufgrund dieser variablen Geometrien ist eine Brechungsindexanpassung der verwendeten Phasen einfacher als die mathematische Modellierung der optischen Gegebenheiten. In dieser Studie wird daher eine Methode zur Brechungsindexanpassung unter Wahrung ausgewählter Eigenschaften (z.B. Viskosität) der verwendeten Flüssigkeiten vorgestellt. Weiterhin wird eine einfache Fehlerabschätzung präsentiert die den Orts- und Längenfehler durch nicht angepasste optische Dichte quantifiziert

## Theorie

Der Brechungsindex  $n$  eines Materials quantifiziert die Brechung einer elektromagnetischen Welle (Licht) beim Übergang aus einem Vakuum in ein optisch dichtes Medium. Er bezeichnet das Verhältnis der Ausbreitungsgeschwindigkeit einer monochromatischen Welle in Vakuum  $c_0$  in Bezug auf die Phasengeschwindigkeit im betrachteten Material  $c$ . Abhängig vom Einfallswinkel des Lichtes und der Brechzahlen zweier Medien  $n_1$  und  $n_2$  kann der Brechungswinkel durch das Snellius'sche Gesetz berechnet werden:

$$n_1 \cdot \sin(\alpha) = n_2 \cdot \sin(\beta) \quad \text{Gl. 1}$$

Das Verhältnis der optischen Dichten (der Brechungsindizes) zueinander, bestimmt ob das Licht zum Lot hin ( $n_1 < n_2$ ), bzw. vom Lot weg ( $n_1 > n_2$ ) gebrochen (siehe Abb. 1).

Beim Übergang von einem optisch dichteren in ein optisch dünneres Material ( $n_1 > n_2$ ) kann ein bestimmter Grenzwert für  $\beta$  nicht überschritten werden ( $\beta_{\max} = \pi/2$ ) und Totalreflexion tritt ein.

$$\sin(\alpha_G) = \frac{n_2}{n_1} \quad , \text{ wobei: } \sin(\beta_{\max} = \pi/2) = 1 \quad \text{Gl. 2}$$

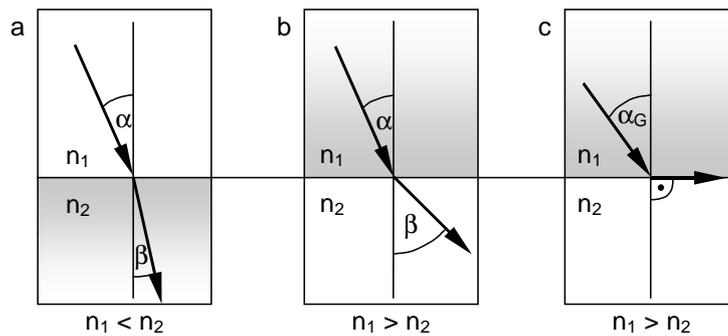


Abb. 1: a) Lichtbrechung zum Lot hin beim Übergang vom optisch dünnen zum optisch dichten Medium ( $n_1 < n_2$ ). b) Lichtbrechung vom Lot weg beim Übergang vom optisch dichten zum optisch dünnen Medium ( $n_1 > n_2$ ). c) Grenzwinkel  $\alpha_G$  zur Totalreflexion beim Übergang vom optisch dichten zum optisch dünnen Medium.

### Versuchaufbau

Die Methodik zur Brechungsindexanpassung unter Berücksichtigung weiterer physikalischer Eigenschaften wird für das System Öl/ Wasser mit Öl als disperser Phase vorgestellt. Beide Phasen werden als Mischung hergestellt: Die wässrige Phase besteht aus Wasser und Glukose, während die Ölphase aus zwei Ölen mit unterschiedlichen Eigenschaften hergestellt wird (Shell Macron, Shell Garia). Um die Brechungsindexanpassung kontrolliert durchzuführen, werden Proben mit unterschiedlichen Massenanteilen  $x_B = m_B / (m_A + m_B)$  für die wässrige Phase und die Ölphase vorbereitet. Bei der Referenztemperatur von  $T = 295\text{K}$  und weiteren Temperaturstufen wird der Brechungsindex der Proben mit einem temperierbaren Abbe-Refraktometer gemessen. Als Totalreflektometer beruht das Messprinzip auf der Tatsache, dass der Grenzwinkel  $\alpha_G$  der Totalreflexion an einer Grenzfläche von den Brechzahlen der beteiligten optischen Medien abhängt. Die Totalreflexion findet an der Grenzfläche des verwendeten Glases mit bekannter großer Brechzahl  $n'$  zur zu vermessenden optisch dünneren Flüssigkeit statt. Der Brechungsindex wird anhand einer Skala abgelesen.

Die Temperaturabhängigkeit der Viskosität derselben Proben wird in einem temperierbaren Viskosimeter (Mettler LS 40) vermessen. Das Messprinzip beruht auf der Messung des Drehmomentes, das durch eine Couette-Strömung in einem Spalt zwischen einem rotierendem und einem fixierten inneren Zylinder auf letzteren ausgeübt wird.

### Optische Verzerrungen

Nicht angepasste Brechzahlen haben bei Messungen in dispersen Flüssig/ Flüssig Systemen optische Verzerrungen zur Folge und verursachen somit Messfehler. Im folgenden wird eine vereinfachende Analyse präsentiert, die von PIV Messungen innerhalb eines Tropfens auf einfache geometrische und optische Zusammenhänge abstrahiert, um Lage- und Längfehler der Messungen abzuschätzen:

Das Geschwindigkeitsfeld in der Symmetrieebene eines in einem Fluid ( $n_1$ ) dispergierten sphärischen Tropfens ( $n_2$ ) sei durch Particle Image Velocimetry (PIV) vermessen. Ein Laserlichtpuls beleuchtet eine Ebene zweimal im zeitlichen Abstand  $\Delta t$  und die synchron getriggerte CCD-Kamera nimmt Bilder in der Bildebene des Linsensystems auf. Durch die Verwendung einer Apertur wird nur Licht abgebildet, welches den Tropfen parallel verlässt. Mittels Kreuzkorrelation werden aus den Partikelbildern die Partikelverschiebungen berechnet.

Die Projektion eines Vektors von der Mittellinie der Tropfenabbildung auf die Lichtschnittebene innerhalb des Tropfens zeigt die möglichen auftretenden Verzerrungen in Abhängigkeit der Brechungsindizes  $n_1$  und  $n_2$  (Abb. 2). Wird die Abbildung auf die Strahlen der Spitze und des Fußes des Vektors reduziert, so verlassen zwei parallele Strahlen das Linsensystem im

## 52.4

Abstand  $ds$ . Die Lichtbrechung an der Phasengrenzfläche erzeugt ein virtuelles Bild des Vektors in der Lichtschnittebene. Das virtuelle Vektorbild besitzt die Länge  $ds'$ .

Dasselbe Vektorbild kann unterschiedliche virtuelle Bilder im Tropfen erzeugen. Bei unbekanntem Brechungsindex ist das Ergebnis folglich mehrdeutig (Diaz 1998, Nogueira 2000). Je nach Verhältnis der optischen Dichten zueinander resultieren aus der Brechungsindexabweichung Lage- und Längenfehler für die vermessenen Geschwindigkeiten. Ein optisch dichter Tropfen ( $n_1 < n_2$ ) vergrößert den Partikelversatz  $ds$  (Abb. 2a), während ein optisch dünnerer Tropfen ( $n_1 > n_2$ ) die Partikelverschiebung kleiner erscheinen lässt (Abb. 2b). Werden die Brechzahlen ideal angepasst ( $n_1 = n_2$ ), so entsteht weder für die Position noch in der Länge der Vektoren eine Abweichung  $ds = ds'$ .

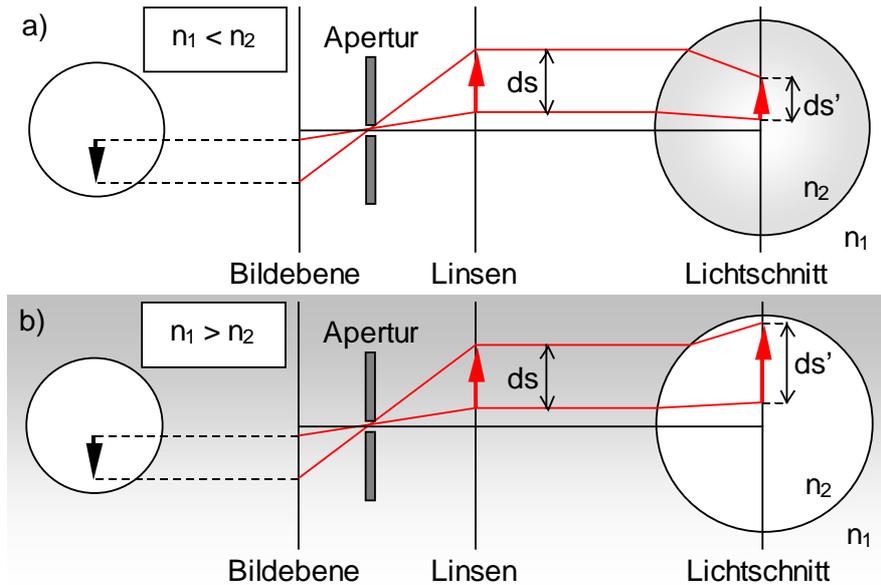


Abb. 2: Idealisierte Rekonstruktion einer gemessenen Partikelbildverschiebung: Aus der Bildebene werden die Endpunkte des Vektors durch das optische System (Linsen und Apertur) auf die Lichtschnittebene projiziert. Die parallelen Strahlen mit Abstand  $ds$  werden durch Lichtbrechung abgelenkt und zeigen die resultierende Lage- und Längenabweichungen  $ds'$  des Vektors für den Fall a) Tropfen optisch dichter als umgebende Flüssigkeit, b) kontinuierliche Phase optisch dichter als Tropfen.

Eine Quantifizierung derartiger Verzerrungen erfordert die Berechnung einer funktionellen Abhängigkeit der tatsächlichen Position und Länge Vektors  $ds'$  von der Position  $y$ , des Abstandes  $ds$  und der Tropfengeometrie  $R$ .

$$ds' = f(y, R, ds) \quad \text{mit} \quad -R < y < R \quad \text{Gl. 3}$$

Vereinfachend werden zwei parallele Strahlen des Abstandes  $ds$  betrachtet, die in den Tropfen eintreten und auf dessen Mittelachse den Vektor  $ds'$  abbilden (Abb. 3). Die Position der beiden Parallelen wird über die laufende Variable  $y_{\pm}(ds/2)$  verändert. Die Parallelen treffen an den Punkten A und B auf die Phasengrenze. Im folgenden wird der Index  $i$  respektive für A und B verwendet, da die Berechnung der Ablenkung  $dy$  für beide Punkte identisch ist.

Ausgehend vom Einfallswinkel der Parallelen auf die Phasengrenzfläche in A und B,

$$\alpha_i = f(y, R, ds) = \left\{ \begin{array}{l} \alpha_A = \arcsin\left(\frac{y + ds/2}{R}\right) \\ \alpha_B = \arcsin\left(\frac{y - ds/2}{R}\right) \end{array} \right\} \quad , \text{ wobei } i = A, B, \quad \text{Gl. 4}$$

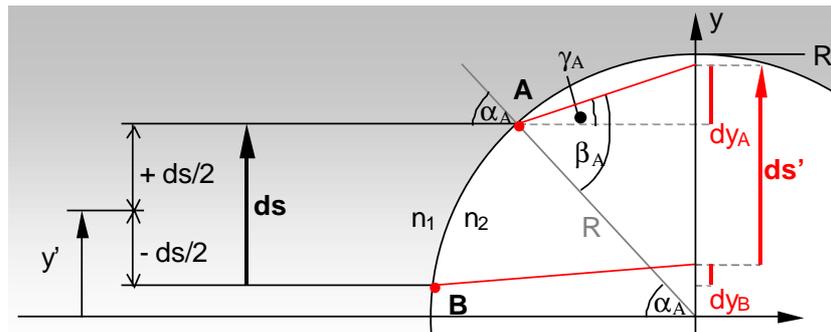


Abb. 3: Vereinfachte Darstellung (s.o.) der Abbildung eines Vektors  $ds$  auf die Mittelachse eines Tropfens  $ds'$ . Der Brechungsindex der kontinuierlichen Phase ist größer als der des Tropfens ( $n_1 < n_2$ ). Die Parallelen treffen an den Punkten A und B auf den kugelförmigen Tropfen. Beispielfhaft wird die Geometrie zur Berechnung der Ablenkung  $dy_A$  gezeigt. Unter Verwendung der geometrischen Beziehungen und des Snellius'schen Gesetzes kann die Ablenkung  $dy_A$  berechnet werden.

kann allgemein die Ablenkung  $dy_i$  berechnet werden zu:

$$dy_i = R \cdot \cos(\alpha_i) \cdot \tan\left(\arcsin\left(\frac{n_1}{n_2} \cdot \sin(\alpha_i)\right) - \alpha_i\right) \quad \text{Gl. 5}$$

Findet der Übergang aus einem optisch dichteren Medium heraus statt und ist der Grenzwinkel für Totalreflexion  $\alpha_G$  überschritten, bzw. überschreitet ein Ende von  $ds$  die Grenzen des Tropfens, so wird  $dy_i$  wie folgt berechnet:

$$\begin{aligned} dy_i &= -R \cdot \cos(\alpha_i) \cdot \tan(2\alpha_i) && \text{,wenn } |\alpha_i| > \alpha_G \text{ und } n_1 > n_2 \\ dy_i &= 0 && \text{,wenn } \left|y \pm \frac{ds}{2}\right| > R \end{aligned} \quad \text{Gl. 6}$$

Die Länge von  $ds$  ergibt sich dann aus

$$ds' = ds + dy_A - dy_B, \quad \text{Gl. 7}$$

während sich Position von  $ds'$  wie folgt berechnet:

$$y' = y + \left(\frac{dy_A + dy_B}{2}\right). \quad \text{Gl. 8}$$

### Brechungsindexanpassung

Aufgrund der physikalischen Gegebenheiten eines Flüssig/ Flüssig Systems bildet sich während eines Versuches eine spezifische Phasengrenzflächenform aus. Zur Vermeidung umständlicher Korrekturrechnungen ist es notwendig die Brechzahlen beider Phasen aneinander anzugleichen. Eine Manipulation der optischen Dichte kann durch unterschiedliche Methoden erreicht werden: Das lösen von Salzen oder Polymeren in einer der Phasen, die Mischung mit anderen löslichen Fluiden oder durch die Änderung der Temperatur.

Wird nur der Brechungsindex einer Phase angeglichen, so benötigt man einen Freiheitsgrad. Ein Mix aus Wasser und Glucose z.B. kann verwendet werden, um den Brechungsindex eines dispergierten Öltropfens zu treffen. Eine Übersicht über Anpassungsmethoden mit einem Freiheitsgrad wurde von (Miller 2006) veröffentlicht. Anwendungen von Brechungsindexanpassungen werden unter anderem in folgenden Artikeln erwähnt: (Budwig 1994, Cui 1997, Narrow 2000, Nguyen 2004, Miessner 2006). Durch die Änderung der Zusammensetzung einer Phase werden jedoch auch andere Eigenschaften dieser Phase beeinflusst (Dichte,

## 52.6

Viskosität, usw.). Wird außer einer Brechungsindexanpassung beispielsweise ein festes Viskositätsverhältnis der Phasen zueinander gefordert, so wird ein weiterer Freiheitsgrad benötigt. Die Verwendung z.B. einer Ölmischung als disperse Phase würde diesen zusätzlichen Freiheitsgrad eröffnen.

Brechungsindex und Viskosität einer Mischung aus zwei Flüssigkeiten sind abhängig vom Mischungsverhältnis und der Temperatur. Damit eine Brechungsindexanpassung vorgenommen werden kann, werden Mischungs- und Temperaturabhängigkeit beider Eigenschaften separat untersucht. Zunächst wird bei konstanter Temperatur die Abhängigkeit des Brechungsindex und der Viskosität vom Massenanteil  $x_B = m_B / (m_A + m_B)$  von Komponente A in Fluid B bestimmt. Innerhalb des Bereiches in dem beide Mischungen dieselbe Brechzahl annehmen können, wird mit bestimmten Mischungsverhältnissen  $x_B$  die Temperaturabhängigkeit von Brechungsindex und Viskosität ermittelt. Die Anpassung wird zunächst auf Basis der Massenanteile der Mischungskomponenten bei konstanter Temperatur durchgeführt. Daran anknüpfend werden die Daten der Temperaturabhängigkeit von Viskosität und Brechungsindex zur Interpolation und Bestimmung von Korrekturfaktoren verwendet.

Am Beispiel einer wässrigen Lösung (Wasser-Glucose) und der Mischung zweier Öle (Shell Macron / Shell Garia) wird im folgenden die Brechungsindexanpassung erläutert. Um den Bereich der Anpassungsmöglichkeiten des Brechungsindex bei einer bestimmten Temperatur zu bestimmen, wird der Massenanteil  $x_B$  der Komponenten beider Mischungen variiert und der Brechungsindex gemessen (siehe Abb. 4). Die Brechungsindexmessungen zeigen, dass sich die Wasser-Glucose Mischung im Bereich  $n = 1,33$  bis  $1,50$  variieren lässt, während die Ölmischung im Bereich von  $n = 1,44$  bis  $1,48$  variiert. Hieraus ergibt sich, dass der auf  $1,44$  bis  $1,48$  limitierte Wertebereich der Ölphase den Anpassungsbereich der Brechzahlen bestimmt ( $1,4431 < n < 1,4813$ ). Dadurch wird der Bereich der möglichen Massanteilvariation der wässrigen Phase auf den Intervall zwischen  $0,74 < x_{B,wässrig} < 0,93$  begrenzt.

Wird beispielsweise eine hohe Viskosität für die kontinuierliche Phase benötigt, so kann innerhalb des oben ermittelten Intervalls des Massenanteils  $x_B$  der wässrigen Phase eine passende Viskosität gewählt werden. In Abb. 5 ist die Viskosität der Wasser-Glucose Mixtur in Abhängigkeit des Massenanteils Glukose  $x_B$  aufgetragen. Entsprechend des Anpassungsbereiches ( $0,74 < x_{B,wässrig} < 0,93$ ) sind Viskositäten im Intervall  $67 \text{ mPas} < \eta_{wässrig} < 934 \text{ mPas}$  möglich. Sei z.B. die gewünschte Viskosität  $\eta_{wässrig}(x_B = 0,77) = 100 \text{ mPas}$ , so wird gemäß Abb. 5 der Massenanteil  $x_B = 0,77$  gewählt.

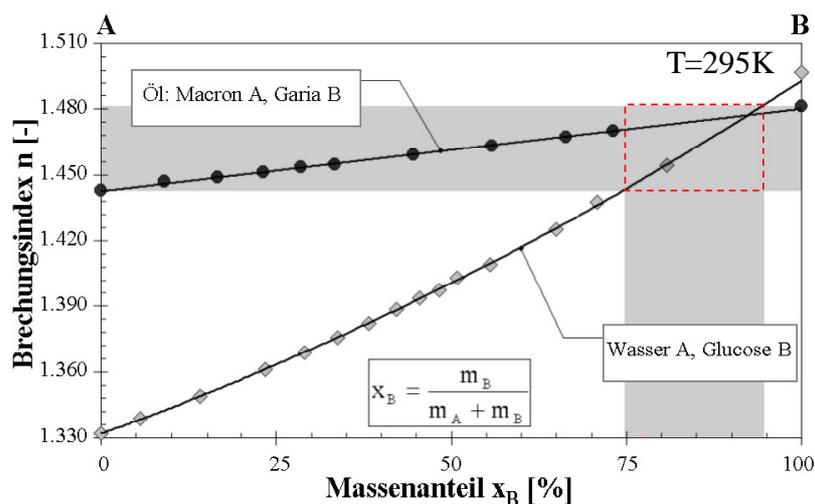


Abb. 4: Abhängigkeit der optischen Dichten zweier Flüssigkeitsmischungen vom Massenanteil  $x_B$  bei konstanter Temperatur  $T = 295 \text{ K}$ . Die Limitierung der Brechungsindexanpassung ist durch die Ölphase gegeben ( $n = 1,4431 - 1,4813$ ). Der Bereich der möglichen Massanteilvariation der wässrigen Phase wird somit auf den Intervall zwischen  $x_B(n=1,4431) = 0,74$  und  $x_B(n=1,4813) = 0,93$  begrenzt.

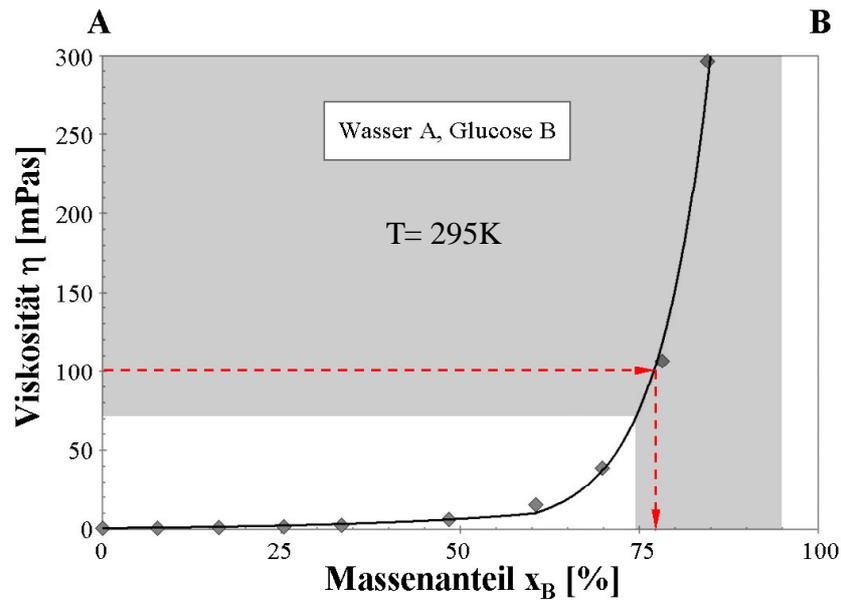


Abb. 5: Abhängigkeit der Viskosität der wässrigen Phase  $\eta_{\text{wässrig}}$  vom Massenanteil  $x_B$  der beigemengten Glukose. Innerhalb des Intervalls des Massenanteils  $0,74 < x_{B,\text{wässrig}} < 0,93$  kann die Viskosität gewählt werden:  $\eta_{\text{wässrig}}(x_{B,\text{wässrig}} = 0,77) = 100\text{mPas}$ .

Der zugehörige Brechungsindex gemäss Abb. 6 ist  $n(x_{B,\text{waessrig}}=0,77) = 1,4482$  (den Pfeilen folgend). Die Öl-Mischung muss daher einen Massenanteil  $x_{B,\text{öl}} = 0,15$  haben, um einen angepassten Brechungsindex zu produzieren. Bestimmt man die entsprechende Öl-Viskosität, dann lautet das Viskositätsverhältnis  $\eta_{\text{wässrig}} / \eta_{\text{öl}} \sim 33$ . Anstelle des in Abb. 5 gezeigten Parameters Viskosität können auch andere Eigenschaften, wie z.B. Dichte, Leitfähigkeit oder Oberflächenspannung, als sekundärer Parameter verwendet werden.

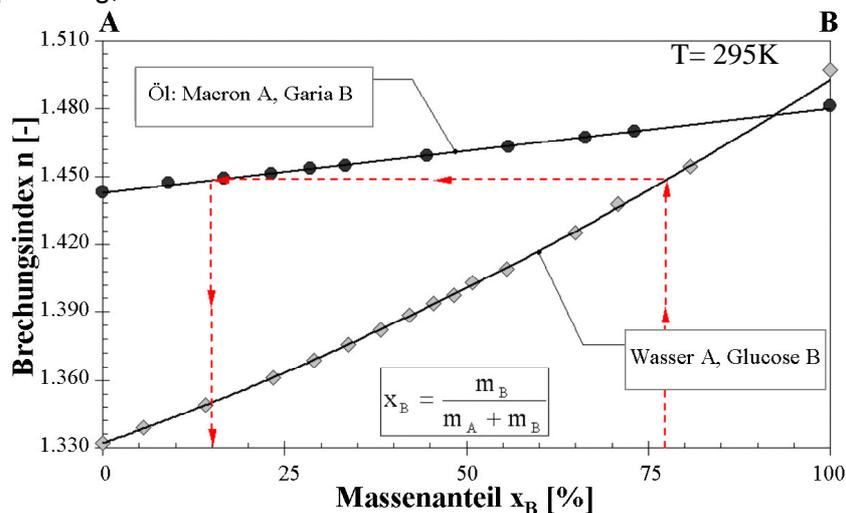


Abb. 6: Bestimmung der zur wässrigen Phase passenden Brechzahl der Ölphase. Durch die in Abb. 5 gewählte Viskosität  $\eta=100\text{mPas}$  der wässrigen Phase, wird ihr Massenanteil auf  $x_B=0,77$  gesetzt. Die optische Dichte des betrachteten Systems wird folglich auf  $n=1,4482$  festgelegt (den Pfeilen folgend). Der hierfür zu verwendende Massenteil der Ölphase liegt dann bei  $x_B=0,15$ .

Brechungsindex und Viskosität sind sensitiv gegenüber Temperaturveränderungen. Daraus leitet sich die Notwendigkeit ab, eine Berechnung und Kompensation der temperaturbedingten Eigenschaftsänderungen durchzuführen. Die Temperaturabhängigkeit von Brechungsindex und Viskosität wird für unterschiedliche Massenanteile  $x_B$  untersucht. Hierbei ergeben sich lineare Zusammenhänge zwischen der Temperaturabhängigkeit von Brechzahl und Viskosität gegenüber dem Massenanteil  $x_B$ . Eine Änderung des Massenanteils bewirkt eine Verschiebung der Werte in Ordinatenrichtung, nicht jedoch eine Änderung der Steigung des

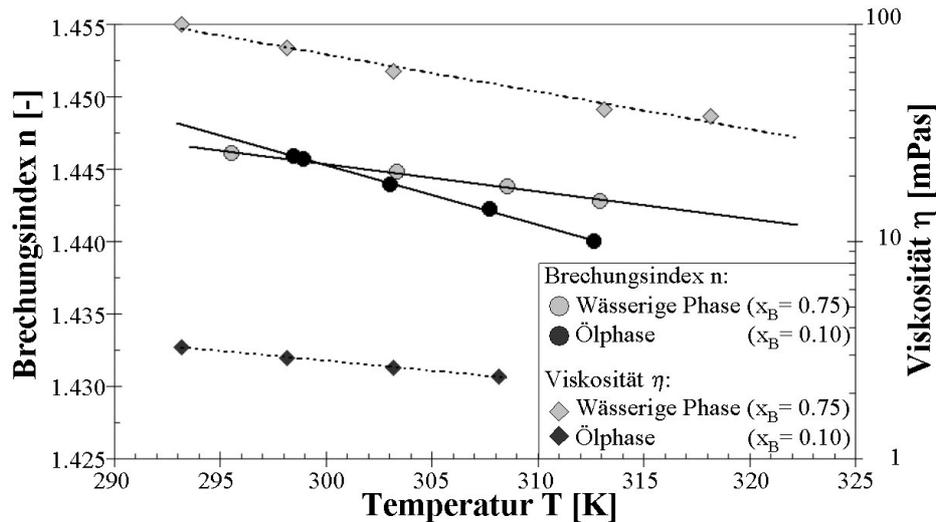


Abb. 7: Temperaturabhängigkeit von Brechungsindex und Viskosität: Eine Änderung des Massenanteils  $x_B$  bewirkt eine Verschiebung der Werte in Ordinatenrichtung, nicht jedoch eine Änderung der Steigung. Daher kann die gezeigte Temperaturabhängigkeit der Mischungen auf andere Mischungen mit anderen Massenanteilen  $x_B$  übertragen werden.

funktionalen Zusammenhanges. Somit kann die Temperaturänderung der optischen Dichte, sowie der Viskosität, durch die Temperatursensitivität einer bestimmten Mischung mit dem Massenanteil  $x_B$  allgemein modelliert werden. In Abb. 7 wird die Temperaturabhängigkeit einer wässrigen Phase  $x_{B,\text{wässrig}} = 0,75$  und einer Ölmischung  $x_{B,\text{öl}} = 0,10$  gezeigt.

Die Prozedur einer temperaturkompensierten Brechzahlanpassung läuft wie folgt ab: Basierend auf den gezeigten Abhängigkeiten wird anfangs die Viskosität der kontinuierlichen Phase bei einer gewünschten Temperatur festgelegt. Mit Abb. 7 wird die Viskositätsdifferenz zur Referenzmessung bei  $T=295\text{K}$  bestimmt. Die Referenzviskosität der wässrigen Phase bestimmt den zu verwendenden Massenanteil Glucose  $x_{B,\text{wässrig}}$  (Abb. 5). Dieser Massenanteil  $x_{B,\text{wässrig}}$  bestimmt den Brechungsindex bei Referenztemperatur (Abb. 4). Aus Abb. 7 kann die Abweichung des Brechungsindex der Ölphase durch Temperatur bestimmt werden und mittels Abb. 4 auf Referenztemperatur umgerechnet werden. Der Brechungsindex bei Referenztemperatur ergibt letztlich das Mischungsverhältnis der Ölphase.

## Ergebnisse und Diskussion

Die Methode der Brechungsindexanpassung mit zwei Freiheitsgraden zur Anpassung der optischen Dichte und der gleichzeitigen Einstellung einer weiteren Flüssigkeitseigenschaft (hier vorgestellt: Brechungsindex und Viskosität) funktioniert. Mit einer Genauigkeit des Brechungsindex von bis zu 0,5% können beide Parameter (Viskosität und Brechzahl) temperaturabhängig angepasst werden. Die Genauigkeit wird durch den Ablesefehler des Refraktometers bestimmt. Auch die vereinfachende Annahme der linearen Abhängigkeit der Temperaturabhängigkeit der Viskosität vom Massenanteil  $x_B$  liefert gute Ergebnisse (Abweichungen von bis zu 5%).

Die Fehlerabschätzung durch die optische Verzerrung wird für zwei Fälle durchgeführt: Das nicht angepasste System Octanol – Wasser mit Wasser als disperser Phase  $n_2$  besitzt eine Brechzahlabweichung von 6,6%. Weiterhin wird ein an Octanol angepasstes System mit einer Wasser-Glycerin Mischung als disperse Phase  $n_2$  untersucht. Letztere wird mit 0,5% Fehler als optisch dichter bzw. optisch dünner angenommen und der Effekt vermessen. In Abb. 8 wird  $ds'$  gemäß Gleichung 7 als Funktion der Position  $y/R$  dargestellt. Hierbei wurde ein für Mikrokanäle realistischer Wert für  $ds$  wie folgt angenommen: Typische Verschiebun-

gen von Partikelpaaren betragen 10 Pixel. Der Tropfen im Mikrokanal wird über 400 Pixel (~Kanalbreite) abgebildet. Daraus ergibt sich eine typische Partikelbildverschiebung  $ds=1/20R$ .

Wird  $ds'$  auf  $ds$  normiert so wird deutlich, dass um den Äquator der wässrigen Tropfens die Verzerrungen aufgrund des geringen Winkels die Verzerrungen am geringsten sind (Abb. 8). Mit steigendem Einfallswinkel steigt die Verzerrung und damit die Abweichung von Referenz- und Bildlänge. Zu den Polen des Tropfens hin treten die stärksten Verzerrungen auf. Der minimale Wert der Abweichungen ist proportional zu Differenz der Brechzahlen: ~7% bei

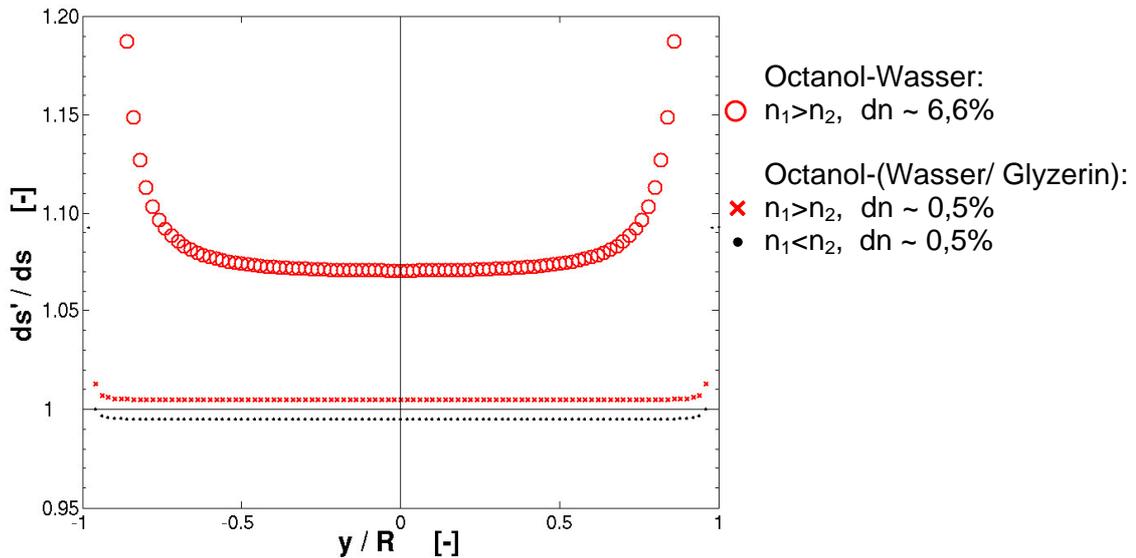


Abb. 8: Ortsabhängige Längenabweichung eines projizierten Vektors  $ds'$  normiert auf die Ausgangslänge  $ds$ . In der Mitte des Tropfens ist die Längenabweichung minimal. Bedingt durch den steigenden Einfallswinkel wachsen die Unterschiede zur Referenzlänge  $ds$  zu den äußeren Punkten des Tropfen an. Die Abweichung an der Mittelachse ist allein auf den Brechungsindexunterschied zurückzuführen. Die Minima der gezeigte Kurven verändern sich proportional zum zugrunde gelegten Brechungsindexunterschied. (Octanol-Wasser:  $(ds'/ds)_{\min} = 1,071$ ; Octanol-Wasser/Glycerin:  $(ds'/ds)_{\min} = 1 \pm 0,005$ ).

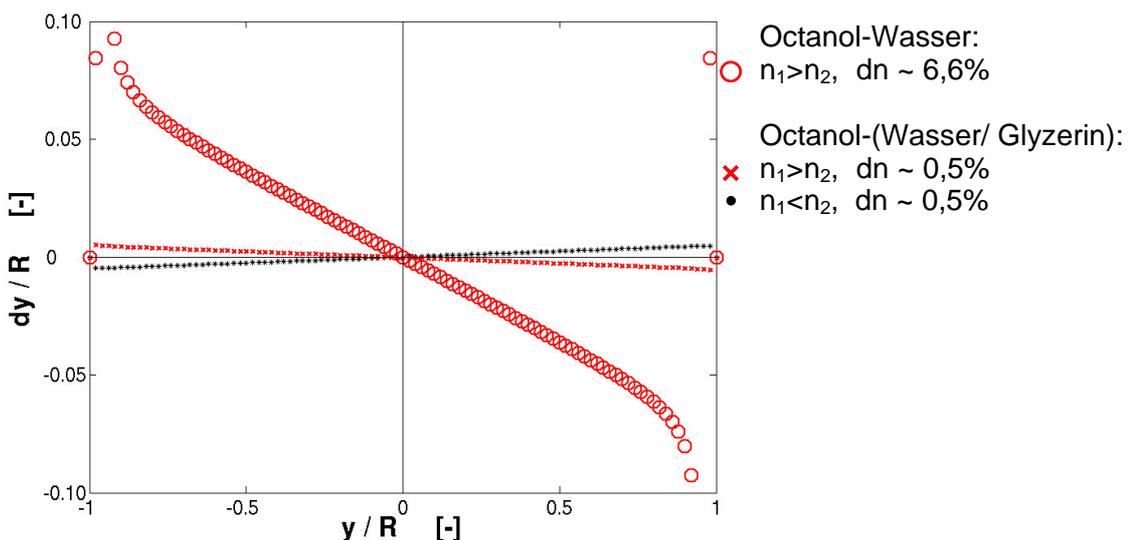


Abb. 9: Ortsabhängige Positionsabweichung  $dy$  eines projizierten Punktes normiert auf den Tropfenradius  $R$ . In der Mitte des Tropfens ist keine Positionsabweichung vorhanden, da der Einfallswinkel null ist. Bedingt durch den steigenden Einfallswinkel nimmt die Ortsabweichung  $dy$  in Richtung der äußeren Punkte des Tropfen zu. Die Steigung der gezeigte Kurven verändert sich proportional zum Brechungsindexunterschied.

Octanol-Wasser und 0,5% bei Octanol-Wasser/Glyzerin. Totalreflexion findet ab  $y/R=0,934$  für Octanol-Wasser und ab  $y/R=0,995$  für bis auf 0,05% brechzahlangepasste Fluide statt. Die Ortsabweichung  $dy$  der Position  $y$  des Vektorbildes  $ds'$  verhält sich in der Mitte des Tropfen annähernd linear (Abb. 9). Die Steigung ist proportional abhängig vom Brechzahlunterschied  $(n_2-n_1)/n_1$ . Die Verzerrungsänderung nimmt zu den Randpunkten des Tropfens zu. Der Vorzeichenwechsel resultiert aus dem Übergang der Laufgröße  $y$  vom einem Quadranten des Koordinatensystems in den nächsten, wobei der Brechungswinkel das Vorzeichen wechselt.

Der Positionsfehler und Längenabweichung bewegen sich, relativ zum Radius des Tropfens betrachtet, in derselben Größenordnung. Beide Fehler addieren sich und verfälschen das gemessene Ergebnis gleichermaßen. Der Fehler im Kernbereich des Tropfens ist geringer als in den Randbereichen. Eine Anpassung der optischen Dichte der Fluide kann folglich erheblich zur Verbesserung des Messresultates beitragen und bei einer Genauigkeit der Brechungsindexanpassung von 0,5% den Geschwindigkeitsmessfehler auf 0,5% und den Ortsmessfehler auf 0,5% begrenzen. Des weiteren sind 99,9% des Tropfens optisch zugänglich, da Totalreflexion erst bei  $y/R=\pm 0,995$  auftritt.

### Ausblick

Die Ausdehnung der Brechzahlenanpassung auf andere sekundäre Parameter wie Dichte, Oberflächenspannung oder elektrische Leitfähigkeit ermöglicht eine flexiblere Anpassung der physikalischen Eigenschaften an die experimentellen Bedingungen. Eine Übersicht der möglichen Materialkombinationen und der veränderbaren Materialeigenschaften ermöglicht eine einfachere, gezieltere Manipulation der gewählten sekundären Anpassungsparameter.

### Literatur

- Budwig, R., 1994: Refractive index matching methods for liquid flow investigations, *Exp Fluids*, 17, 350-355
- Cui, M.M., Adrian, R.J., 1997: Refractive index matching and marking methods for highly concentrated solid-liquid flows, *Exp Fluids*, 22, 261-264
- Dias, I., Riethmüller, M.L., 1998: PIV in Two-Phase Flows: Simultaneous Bubble Sizing and Liquid Velocity Measurements, *Selected Papers, 9th Int. Symp. Lisbon, Springer*, I.5, 71-85
- Günther, A., Jhunjhunwala, M., Thalmann, M., Schmidt, M.A., Jensen, K.F., 2005, *Micromixing of Miscible Liquids in Segmented Gas-Liquid Flow*, *Langmuir*, 21, 1547-1555
- Günther, A., Khan, S.A., Thalmann M., Trachsel F., Jensen K.F., 2004: Transport and reaction in microscale segmented gas-liquid flow, *Lab Chip*, 4, 278-286
- Miessner, U., Lindken, R., Delfos, R., Westerweel, J., 2006: Experimental investigation of an oil droplet colliding with an oil-water interface, 14. Fachtagung der GALA e.V., 34.1-34.8
- Miller, P., Danielson, K., Moody, G., Slifka, A., Drexler, E., Hertzberg, J., 2006: Matching index of refraction using a diethyl phthalate/ethanol solution for in vitro cardio-vascular models, *Exp Fluids*, 41, 375-381
- Narrow, T.L., Yoda, M., Abdel-Khalik, S.I., 2000: A simple model for the refractive index of sodium iodide aqueous solutions, *Exp Fluids*, 28, 282-283
- Nguyen, T.T., Biadillah, Y., Mongrain, R., Brunette, J., Tardif, J.C., Bertrand, O.F., 2004: A method for matching the refractive index and kinematic viscosity of a blood analog for flow visualization in hydraulic cardiovascular models, *J Biomech Eng*, 126, 529-535
- Nogueira, S., Dias, I., Pinto, A.M.F.R., Riethmüller, M.L., 2000: Liquid PIV measurements around a single gas slug rising through stagnant liquid in vertical pipes, *Selected Papers, 10th Int. Symp. Lisbon, Springer*, III.7., 289-303
- R. Aris, R., 1956: On the Dispersion of a Solute in a Fluid Flowing through a Tube, *Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 235, No. 1200, 67-77
- Taylor, G., 1953: Dispersion of Soluble Matter in Solvent Flowing Slowly through a Tube, *Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 219, No. 1137, 186-203
- Zachos, A., Kaiser, M., Merzkirch, W., 1996: PIV measurements in multiphase flow with nominally high concentration of the solid phase, *Exp Fluids*, 20, 229-231
- Zheng, B., Tice, J.D., Ismagilov, R.F., 2004: Formation of Droplets of Alternating Composition in Microfluidic Channels and Application to Indexing of Concentrations in Droplet-Based Assays, *Anal Chem*, 76, 4077-4982