

KONZENTRATIONSBESTIMMUNG MIT DEM ZEITVERSCHIEBUNGSVERFAHREN (ZVV)

A. Kretschmer, H. Koroll und Prof. N. Damaschke

Institut für Allgemeine Elektrotechnik, Gruppe Optoelektronik und Photonische Systeme, Universität Rostock, Justus-von-Liebig-Weg 2, 18059 Rostock

Schlagworte:

Optische Punktmesstechnik, Konzentration, Einzeltropfen, Emulsion und Fluoreszenz

Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag behandelt die Möglichkeiten, mit dem Zeitverschiebungsverfahren (ZVV), (engl. time-shift technique TST), für Einzeltropfen gleichzeitig die Geschwindigkeit und Größe der Einzeltropfen sowie die Konzentration von optischen Inhomogenitäten innerhalb des Einzeltropfens zu messen. Diskutiert wird die Veränderung der ZV-Signale bei einer Emulsion (Milch-Wasser-Gemisch), wobei der Anteil der inneren Phase (Milch) erhöht wird. Anhand der Auswertestrategie wird der Zusammenhang zwischen ZV-Signalen und der Konzentration dargestellt. Der Einfluss des Streuprozesses auf verschiedene Eigenschaften des Lichts wird behandelt und es wird erläutert, inwiefern diese Veränderungen zur Konzentrationsbestimmung verwendet werden können.

1. Einleitung

Um Systemprozesse zu verstehen, spielt die Charakterisierung von Tropfen und Partikeln bei vielen industriellen Anwendungen eine entscheidende Rolle. Einspritzvorgänge in Diesel- oder Benzinmotoren, Beschichtungsvorgänge oder Sprühtrocknung von Waschpulvern sowie Lebensmitteln wie Milchpulvern oder Tütensuppen sind nur einige Beispiele bei denen eine exakte Parameterbestimmung eine Prozessoptimierung bewirkt.

Optische Punktmesstechniken wie die Phasen-Doppler-Technik [1] bieten bisher die Möglichkeit, transparente und sphärische Tropfen hinsichtlich Größe und Geschwindigkeit mit hoher Genauigkeit zu vermessen. Die Zeitverschiebungstechnik bietet, ausgehend von ersten grundlegenden Überlegungen [2, 3], ein alternatives Messsystem, das hinsichtlich der Tropfencharakterisierung analog zur Phasen-Doppler-Technik eingesetzt werden kann [4]. Ein Vorteil des Systems gegenüber der PD-Technik ist die Positionierung in Rückstreuung und damit verbunden die Reduzierung der optisch notwendigen Zugänge auf nur einen [5]. Ein weiterer Vorteil ist die Erweiterung des Typen-Spektrums von messbaren Partikeln. Neben transparenten sphärischen Tropfen erlaubt die Zeitverschiebungstechnik zusätzlich eine Größenabschätzung von irregulären Partikeln [6]. Irregulär bedeutet dabei beliebige Partikeleigenschaften, sowohl nicht-sphärische Formen, als auch Tropfen mit inhomogener Zusammensetzung. In diesem Beitrag wird die Untersuchung von inhomogenen Tropfen mit dem Zeitverschiebungsverfahren hinsichtlich der Konzentration der Inhomogenität innerhalb jedes einzelnen Tropfens an zwei Beispielen vorgestellt. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Untersuchung von Emulsionstropfen (Wasser-Milch-Gemisch). Weiterhin wird darauf eingegangen, inwieweit sich das Zeitverschiebungssystem zur Bestimmung von Fluoreszenztracer-Konzentrationen eignet.

2. Messprinzip

Die Konzentrationsbestimmung mit dem Zeitverschiebungsverfahren beruht auf der Veränderung der Signalstruktur in Abhängigkeit der Konzentration der Inhomogenitäten.

Abbildung 1 verdeutlicht den Effekt. Die durchgezogene Kurve zeigt ein ungestörtes Zeitverschiebungssignal eines Wassertropfens. Dies besteht erstens aus einem Peak der Brechung 2. Ordnung (äußerer Weg $N=3.2$) mit Anteilen der Oberflächenwelle (kurzer Weg), zweitens aus einem Peak der Brechung 2. Ordnung (innerer Weg $N=3.1$), drittens der Reflektion und viertens der Oberflächenwelle (langer Weg). Eine Beschreibung zur Entstehung der ZV-Signale findet sich in der Literatur [siehe 1, 4, 5]. Fügt man dem Wasser Milch hinzu, werden die Streulichtordnungen, die das Tropfeninnere durchqueren, gedämpft. Die gepunktete Linie in Abbildung 1 zeigt das gedämpfte Signal für einen Milchtropfen. Die drei größten Peaks verändern sich dabei in Abhängigkeit von der Konzentration unterschiedlich. Die Reflektion bleibt unverändert, da das Licht dieser Streulichtordnung das Tropfeninnere nicht erreicht und somit die Inhomogenität keinen Einfluss darauf hat. Der Peak der Brechung 2. Ordnung (innerer Weg), wird komplett von der Emulsion unterdrückt und ist kaum noch zu erkennen. Der Peak, der kombiniert aus Oberflächenwelle und Brechung 2. Ordnung $N=3.2$ besteht wird teilweise gedämpft. Während die Oberflächenwelle das Tropfeninnere nicht erreicht und teilweise ungestört bleibt, wird der Anteil der Brechung 2. Ordnung gedämpft. Die Flächen unter den Peaks stehen somit in Zusammenhang mit der Konzentration der optischen Inhomogenitäten innerhalb des Tropfens.

Ein weiterer wichtiger Punkt in diesem Zusammenhang ist der Anstieg der Untergrundstreuung in den Signalbereichen die nicht direkt einer Streulichtordnung zugeordnet werden können. Die Dämpfung der Peaks bedeutet eine Reduzierung des Laserlichts, das am Glanzpunkt den Tropfen verlässt. Dieses Licht wird nicht absorbiert, sondern durch die Inhomogenitäten (Fettaugen) des Milchanteils diffus gestreut. Das Ergebnis ist, dass der Tropfen nicht mehr nur an den Glanzpunkten der Streulichtordnungen Licht abstrahlt, sondern über die gesamte Tropfenoberfläche. Somit bietet das Verhältnis von diffuser Streuung zur Amplitude der Peaks der Streulichtordnungen eine weitere Möglichkeit die Konzentrationen zu bestimmen. Am besten eignet sich dabei der Reflektionspeak, da dieser durch die Milchanteile nicht beeinflusst wird.

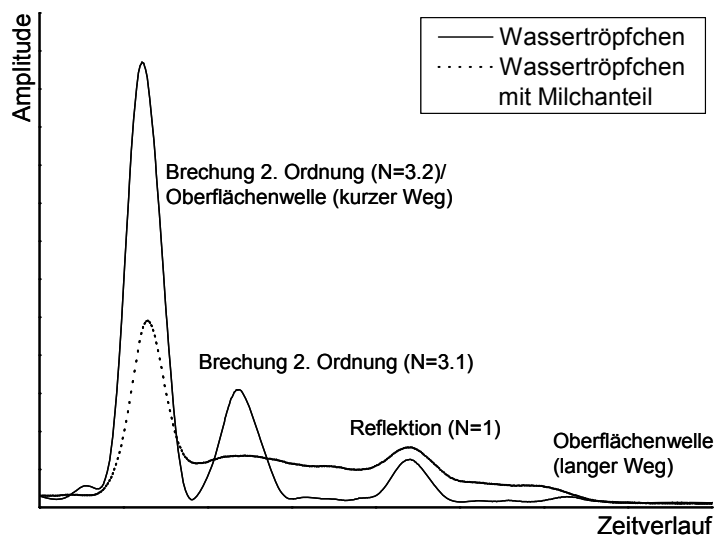


Abb.1 Veränderung der ZV-Signalstruktur von Wassertropfen zu Milch-Wasser-Mischtropfen.

Die Bestimmung der Konzentration ist mit dem Standard-Setup des Zeitverschiebungsaufbaus [4,5] realisierbar. Die Trennung des diffusen Streulichts und der einzelnen Streulichtordnungen ist bei überlappenden Streulichtordnungen für kleine Tropfen aber nicht mehr möglich.

Ein erweiterter ZV-Aufbau zur Trennung der Polarisationsrichtungen erweist sich in diesem Zusammenhang als vorteilhaft. Das einfallende Laserlicht ist linear polarisiert und die Lichtstreuung an Wassertropfen ist polarisationserhaltend. Für Tropfen mit Inhomogenitäten sind

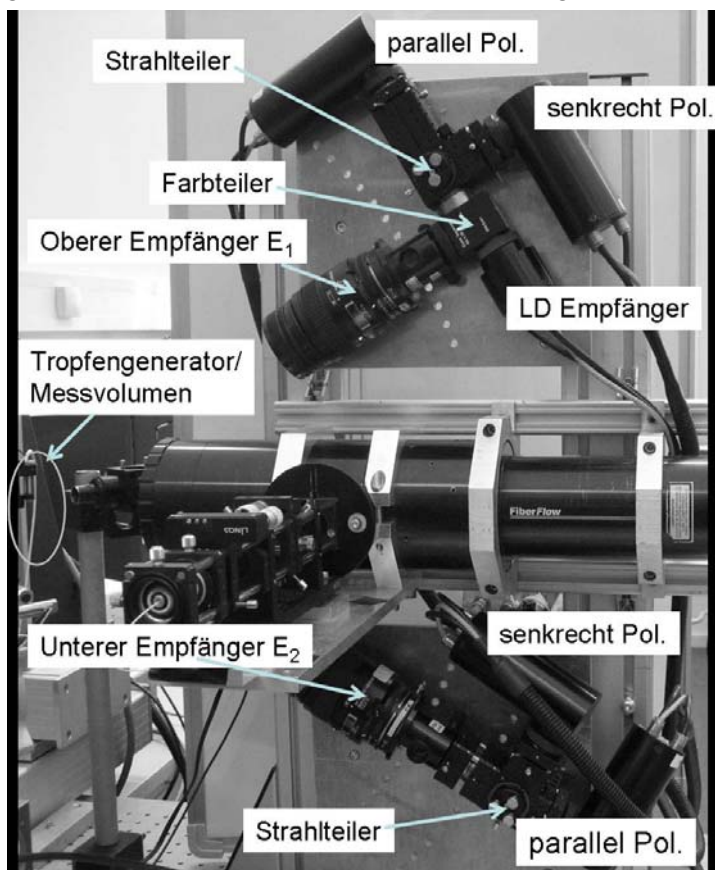
die Reflektion und die Oberflächenwellen weiterhin linear polarisiert, die Brechung 2. Ordnung wird aber teilweise diffus gestreut und ist damit nur noch teilpolarisiert. Detektiert man beide Polarisationsrichtungen separat, ist das Verhältnis aus beiden abhängig von der Konzentration der Inhomogenität im Tropfen. Liegen keine Streuteilchen vor enthält eine Polarisationsrichtung die ungestörten ZV-Signale, die dazu senkrechte Polarisationsrichtung generiert keine Signalanteile.

Mit steigender Konzentration sinkt die Amplitude der Peaks mit Anteilen der Brechung 2. Ordnung wie in Abbildung 1 gezeigt. Das diffuse Streulicht zwischen den Glanzpunkten nimmt auf beiden Empfängern gleichmäßig zu. Wenn die Konzentration einen bestimmten Wert erreicht wird nahezu gleich viel Licht mit den polarisationstrennenden Empfängern detektiert, da alles Licht diffus gestreut wird. Der Photodetektor der die ungestörten Zeitverschiebungssignale aufnimmt erhält dabei immer mehr Licht, als der Detektor für die zweite Polarisationskomponente. Ursache sind Reflektion und Oberflächenwellen, die weiterhin linear polarisiert sind.

Neben der Trennung der Polarisationsrichtungen bietet sich bei der Betrachtung von Fluoreszenztracern als Streuteilchen im Tropfen zusätzlich die Möglichkeit eine spektrale Trennung des diffusen Streulichts vorzunehmen. Die ursprüngliche Wellenlänge des ZV-Lasers beinhaltet dabei die Zeitverschiebungssignale wie im Standardfall. Erhöht man die Tracerkonzentration im Tropfen sinkt die Menge an Licht in diesem Spektralbereich und es steigt die Menge an Licht die durch die Fluoreszenz erzeugt wird. Das Verhältnis der beiden Intensitäten ist abhängig von der Konzentration der Tracer im Tropfen.

3. Experimenteller Aufbau

Abbildung 2 zeigt den erweiterten Aufbau des Zeitverschiebungssystems. Am linken Bildrand ist die Düse des monodispersen Tropfengenerators zu sehen. Die generierten Tropfen fallen durch das darunter liegende Messvolumen. Das gestreute Laserlicht wird mit den fokussierten Empfängermodulen E_1 und E_2 detektiert. Im Empfänger E_2 befindet sich hinter dem Objektiv ein blauer Farbfilter (488nm), der nur die Wellenlänge des ZV-Laserlichts passieren lässt. Nach dem Filter folgt ein Strahlteiler. Dieser teilt die Lichtintensität in Abhängigkeit von der Polarisationsrichtungen 50:50 bzw. 60:40. Die Polarisationsfilter vor den Photomultipliern (PM) sind passend zur Intensitätsaufteilung der Polarisierungen ausgerichtet. Das Empfängermodul E_1 ist wie E_2 aus zwei PMs zur getrennten Detektion von senkrechter und waagerechter Polarisation aufgebaut. Die



Die Polarisationsrichtungen sind dabei durch die Ebene definiert, die die Empfänger aufspannen. Parallele Polarisation ist die Schwingung des elektrischen Feldvektors in der Empfängerebene, senkrechte Polarisation die Schwingung senkrecht zur Empfängerebene und der Ausbreitungsrichtung des Lichts.

Der Empfänger E_1 ist hinsichtlich der ZV-Signal Detektion analog zum Empfänger E_2 aufgebaut besitzt jedoch einen weiteren zusätzlichen Photomultiplier um die Laser-Doppler-Signale zur Geschwindigkeitsmessung aufzunehmen. Um dies zu ermöglichen ist der Farbfilter des Empfängers E_2 durch einen Farbteiler im oberen Empfänger E_1 ersetzt. Dieser separiert die Wellenlängen der Zeitverschiebungssignale (blau $\lambda=488\text{nm}$) und

Abb. 1 Photo des Zeitverschiebungsaufbaus zur Konzentrationsbestimmung in Milchtropfen

der Laser-Doppler-Signale (grün $\lambda=514\text{nm}$).

Die Aufnahme, Speicherung und Analyse der Laser-Doppler-Signale erfolgt über einen 2D-LDA-Prozessor der Firma Dantec Dynamics A/S und die Betriebssoftware BSAFlow. Die ZV-Signale werden mit Hilfe des Speicheroszilloskops „InfiniiVision MSO7104A“ der Firma Agilent Technologies visualisiert und abgespeichert. Die Analyse der Signale erfolgt durch ein eigens erstelltes Auswertungsprogramm. Hierzu wurde die graphische Programmiersprache LabView genutzt.

4. Messungen

Die Messung von Wassertropfen mit unterschiedlichen Milchkonzentrationen ist der Schwerpunkt dieses Beitrages und wird ausführlich in Abschnitt 4.1 diskutiert. Die Anwendung der Zeitverschiebungstechnik auf Tropfen mit Fluoreszenztracern in Abschnitt 4.2 dient dazu, die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten der Technik zu belegen und die Realisierung der Farbtrennung von ZV-Signalen und diffusem Streulicht zu zeigen.

4.1 Milchkonzentrationen

Für jede gemessene Konzentration wurden monodisperse Tropfen erzeugt und vier Messreihen unter gleichen Randbedingungen mit jeweils 500 Einzelsignalen aufgenommen. Aus diesen 2000 Signalen wurde ein gemittelt Signal für jede Konzentration bestimmt um die prinzipielle Signalform darzustellen. Die in Abbildung 3 gezeigten Signale sind daher gemittelte Signale des Empfängers E_1 . In Abbildung 3A ist die parallele, in Abbildung 3B die senkrechte Polarisationsrichtung dargestellt. Die drei Konzentrationen sind 0%, 39% und 100% Milchanteil um zu zeigen wie sich die Signalstruktur für die verschiedenen Polarisationsrichtungen mit zunehmender Konzentration ändert. Zu beachten ist eine Referenztrigger-Positionsverschiebung hin zur Mitte für das 100% Signal. Die Prozentangaben des Milchanteiles beziehen sich auf eine Mischung aus destilliertem Wasser und Milch mit einem Fettanteil von 3.5%. Die Messreihe wurde mit elf verschiedenen Mischungsverhältnissen vorgenommen (siehe Tabelle Abbildung 4). Die Konzentrationen sind dabei in Schritten von ca. 10% erhöht worden. Die Dosierung weicht teilweise von den angestrebten 10%-Schritten ab, da die Dosierung mit Hilfe einer Spritze erfolgte, die genauen Wasser- und Milchanteile laut Tabelle in Abbildung 4 sind jedoch mit einer Präzisionswaage gemessen worden.

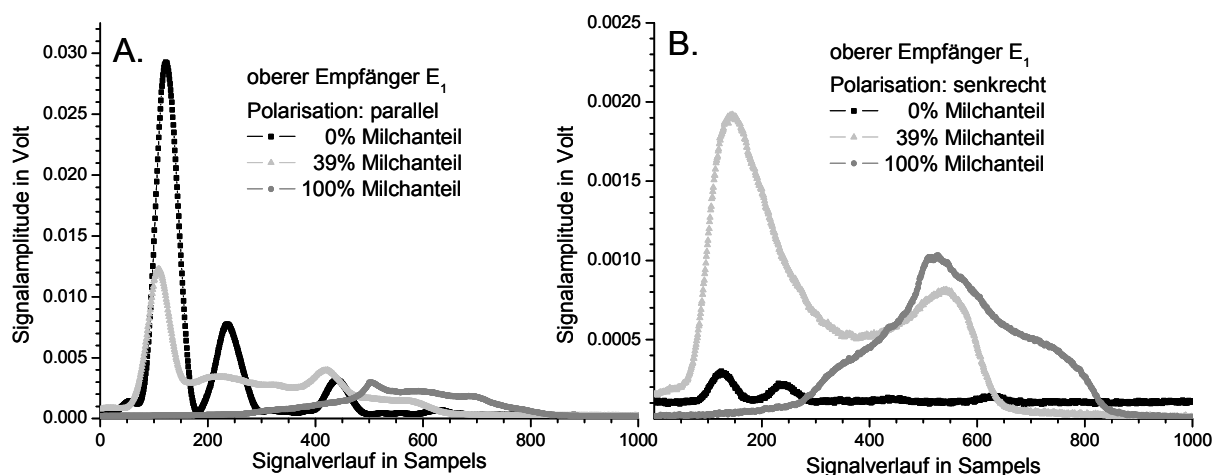


Abb. 2 Beispielhafte ZV-Signale für Konzentration von 0%, 39% und 100% Milch auf dem oberen Empfänger E_1 für **A.** parallele Polarisation und **B.** senkrechte Polarisation

Die Standardabweichung für jeden Samplepunkt des Signals wurde berechnet. Mit zunehmender Konzentration und bei lokalen Maxima steigt die Standardabweichung an, da lokale Dichteschwankungen mehr Einfluss haben. Die Signalstruktur ist durch die Standardabweichung aber bestätigt, da kein Samplepunkt große Abweichungen vom Mittelwert aufweist. In Abbildung 3B fällt auf, dass bei reinem Wasser auch ein senkrecht polarisierter Signalanteil zu erkennen ist. Im Vergleich der Signalamplituden von reinem Wasser auf den PMs für

parallele und senkrechte Polarisation ist zu sehen, dass das Signal in der senkrechten Polarisationsrichtung mit einer Amplitude von $250\mu\text{V}$ nur etwa 1% der Leistung aufweist die das Signal auf dem Empfänger für parallele Polarisation hat. Damit ist die Signalintensität dieses PMs für reines Wasser sehr gering im Vergleich zur Gesamtstreuung. Eine komplette Auslöschung der Signale auf dem PM für senkrechte Polarisation ist nur schwer realisierbar, da hierzu sowohl die Polarisationsrichtung des eingestrahlenen Laserlichtes als auch die Orientierung der Polarisationsfilter in Empfängern äußerst exakt eingestellt werden müsste. Hinzu kommt Streulicht in der Empfangsoptik. In den meisten Einzelsignalen scheint die Polarisationsunterdrückung sehr gut zu sein. Erst bei Mittelung aller Signale wird der kleine systematisch vorhandene Anteil sichtbar.

Weiterhin zeigt die Mischung mit 39% Milchanteil auf dem senkrechten PM eine größere Amplitude als das Signal für reine Milch. Dies entspricht ebenfalls nicht den Erwartungen bei konstanten Messbedingungen. Für jede Konzentration musste der Tropfengenerator neu einjustiert werden. Ein Austausch des Flüssigkeitsreservoirs ist ebenso notwendig, wie die Spülung der Zuleitungen zur Düse, um Tropfen mit der vorhergehenden Konzentration zu vermeiden. Bei diesen Vorgängen ändert sich die Position der Tropfen im Messvolumen des ZV-Systems. Die Intensität, die auf den Tropfen trifft ändert sich und damit auch die Signalhöhe. Um den Einfluss der eingestrahlenen Intensität zu kompensieren wird das Verhältnis von senkrechter und paralleler Polarisation gebildet, wodurch der Messwert unabhängig vom Wert der eingestrahlenen Intensität wird.

Verschiedene Signaleigenschaften wurden für die Verhältnisbildung zwischen den beiden Polarisationsrichtungen getestet. Die Flächen unter den gemittelten Signalen erwiesen sich dabei als geeignete Eigenschaft. Um den Einfluss des Untergrundrauschens zu minimieren wurde ein Triggerlevel eingeführt, das den Rauschteil von der Signalfäche trennt. Die Signalfäche oberhalb des Triggers wird dann zur Verhältnisbestimmung genutzt.

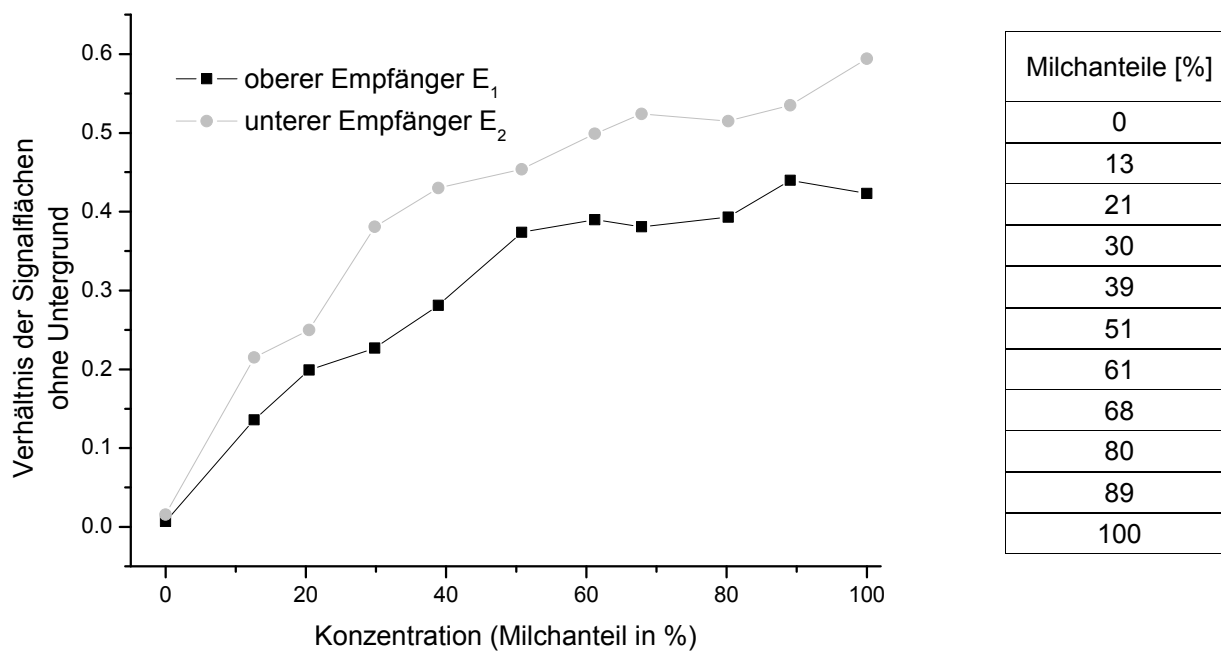


Abb. 3 Intensitätsverhältnis der Signale des senkrechten und des parallelen PMs in Abhängigkeit der Milchkonzentration. In hellgrau ist der Verlauf für den unteren Empfänger E_2 , in schwarz der Verlauf für den oberen Empfänger E_1 gezeigt. Im rechten Teil sind die Milchanteile an der Emulsion in Prozent gegeben.

Abbildung 4 zeigt das Verhältnis der Flächen unter den Signalen für die elf gemessenen Konzentrationen gemittelt über die jeweiligen 2000 Einzelsignale. Die Standardabweichungen im Signalfächenverhältnis sind unterhalb von 0.01, weshalb auf eine Darstellung in der Grafik verzichtet wurde. Der Verlauf der Verhältnisse für beide Empfängerpaare ist ähnlich und zeigt zwei unterschiedliche Bereiche. Zwischen 0% und 50% ist ein steiler Anstieg zu beobachten. Dieser ist darauf zurückzuführen, dass ein geringer Milchanteil genügt, um Sig-

nalanteile auf dem PM für senkrechte Polarisation zu generieren. Oberhalb von 50% ist die Anstieg wesentlich flacher. Ein möglicher Grund ist, dass in diesem Bereich bereits die Sättigung erreicht ist, bei der der Großteil des Laserlichtes diffus gestreut wird. Eine Änderung des Zusammenhangs zwischen Steigung und Konzentration ab einer bestimmten Konzentration ist ebenfalls denkbar. Mit den vorliegenden Daten ist dies nicht abschließend zu klären. Grundsätzlich ist ein monotoner Zusammenhang zwischen Konzentration und abgeleitetem Signalparameter zu erkennen, welcher eine Konzentrationsbestimmung mit einer Genauigkeit von ca. 10% Milchanteil erwarten lässt. Dies entspricht einer Bestimmung des Fettgehaltes auf ca. 0,3%, jedoch nur im unteren Konzentrationsbereich bis ca. 2% Fettgehalt. Die Schwankungen im Kurvenverlauf sind systematische Abweichungen, da, wie bereits erwähnt, die Standardabweichungen für jeden Konzentrationsanteil sehr gering sind. Für eine Verifizierung bieten sich hier umfangreiche Simulationen an, da kontinuierliche Tropfengrößen- und Konzentrationsvariationen experimentell äußerst schwierig und zweitaufwendig zu realisieren sind. Im Vergleich von Empfänger E_1 und E_2 fällt weiterhin auf, dass das Verhältnis auf dem oberen Empfänger stets kleiner ist als auf dem unteren Empfänger. Mögliche Gründe sind die Erweiterung für die Laser-Doppler Messungen am oberen Empfänger, ein unterschiedliches Verhältnis zwischen den Hochspannungsverstärkungen für die oberen und unteren PMs oder unterschiedliche Empfindlichkeiten der vier PMs. Diese Punkte stellen ebenfalls systematische Fehler dar. Für weiterführende Messungen ist eine Systemauslegung zu wählen, die diese Fehler reduziert oder behebt. Wie sich die Verhältnisse der Signalfächen bei Fettanteilen über 3.5% verhalten wurde im Rahmen der vorliegenden Messungen nicht weiter untersucht. Anhand der aufgenommenen Signale ist jedoch davon auszugehen dass nur wenig Licht in höheren Streulichtordnungen vorhanden ist und der Hauptteil diffus gestreut wird. Dies wird auch dadurch bestätigt, dass bereits 100 μ m große Milchtropfen augenscheinlich weiß und nicht mehr transparent wirken.

4.2 Fluoreszenztracer-Konzentration

Die Bestimmung von Fluoreszenztracer-Konzentrationen ist analog zu der beschriebenen Milchanteilbestimmung durchführbar. Das eingestrahlte Laserlicht ist parallel polarisiert. An den Fluoreszenztracern wird dieses diffus, unpolarisiert und inelastisch gestreut. Zusätzlich ändert sich damit der Spektralbereich des gestreuten Lichts.

Eine Unterscheidung von parallel polarisiertem Anteil der diffusen Streuung und den unbeeinflussten Streulichtordnungen (Reflektion und Oberflächenwellen), war bei den Milchtropfenmessungen nicht möglich. Durch die spektrale Verschiebung des Streulichts bei Fluoreszenz, ist eine Unterscheidung der beiden Anteile hier möglich. Dies behebt den systematischen Fehler auf, der für die parallele Polarisationsrichtung in Abbildung 4 enthalten ist.

Abbildung 5 zeigt den Einfluss von Fluoreszenztracern auf die Zeitverschiebungssignale für zwei Konzentrationen. Die Streulichtordnungen ändern sich analog zu Abbildung 1. Die Brechung 2. Ordnung wird gedämpft, während die Reflektion unbeeinflusst bleibt. Im Gegensatz zu Abbildung 1 steigt das Hintergrundlicht außerhalb der Glanzpunkte bei diesen Signalen nicht an. Der Grund für diesen Unterschied ist die spektrale Verschiebung des Streulichts. Die Trennung der Lichtanteile erfolgt bei diesem Experiment über einen dichroitischen Spiegel. Abbildung 5 zeigt die Veränderung der ZV-Signale für zwei unterschiedliche Tracerkonzentrationen, dabei liegt die Wellenlänge des ZV-Lasers unterhalb von 550nm (Trennlinie des dichroitischen Spiegels).

Das Fluoreszenzlicht liegt oberhalb dieser Wellenlänge und wird für die Signale in Abbildung 5 gefiltert. Ein zweiter PM wird eingesetzt um diesen Anteil zu detektieren. Eine systematische Messkampagne mit Tracern wurde nicht durchgeführt. Der kurze Einblick in die Veränderungen der ZV-Signale zeigt aber wie diese Kampagne anzulegen ist und welche Ergebnisse zu erwarten sind.

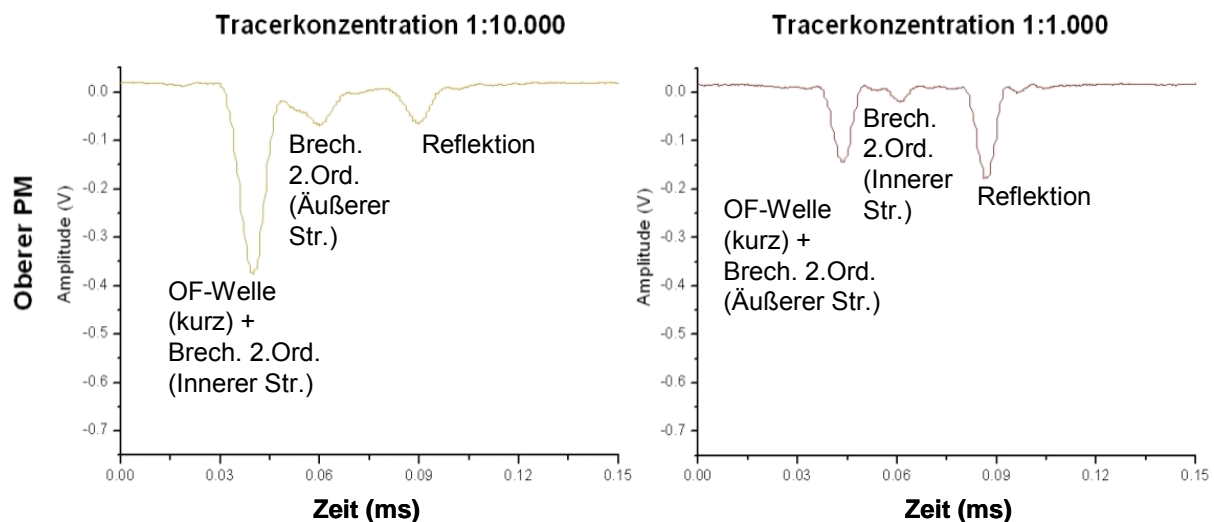


Abb. 4 Vergleich der Zeitverschiebungssignale hinter einem dichroitischen Spiegel für zwei Tracerkonzentrationen (Tracer: Rhodamin B).

5. Fazit und Ausblick

Die Zeitverschiebungstechnik bietet die Möglichkeit die Konzentration von Stoffen in Einzeltropfen über die Änderung der Signalstruktur zu bestimmen. Dies ist sowohl für diffuse Streuung an lokalen Inhomogenitäten, wie etwa die Fettanteile in einem Wasser-Milch-Gemisch, als auch für spektral beeinflussende Stoffe wie Fluoreszenztracer, möglich. Der erweiterte Zeitverschiebungsaufbau mit zwei Photomultipliern pro Empfänger, um die parallele und senkrechte Komponente des Streulichts separat zu detektieren, erweist sich als gutes Mittel um zusätzliche Parameter des Streulichts zur Tropfencharakterisierung heranzuziehen. Die durchgeführten Emulsionsmessungen an Milch-Wasser-Gemischen sind in zukünftigen Messkampagnen und Simulationen zu erweitern, um die Zusammenhänge für die Steigung der Intensitätsverhältnisse mit der Konzentration besser beurteilen zu können. Ziel ist in diesem Zusammenhang die Grenze der Konzentrationsbestimmung nachzuweisen. Dies ist die kritischen Dichte der Inhomogenitäten, ab der keine Information mehr zu erhalten sind, da nur noch diffuses Streulicht vorliegt.

Weiterhin bietet die Trennung der Polarisationsrichtungen die Möglichkeit, eine Unterscheidung von transparenten Tropfen/Blasen und irregulären Partikeln vorzunehmen. Im Rahmen des Projektes „KonKav“ soll ein erweiterter ZV-Aufbau eingesetzt werden. Ziel des Projekts ist es die Entstehung von Kavitation in Strömungskanälen in Abhängigkeit von Randparametern, zu verstehen. Als ein zentraler Parameter erweist sich dabei die Zahl der Keime im Wasser, die der Ausgangspunkt für die Kavitation sind. Als Keime kommen dabei Luftblasen in Frage, die beim Umlauf im Strömungskanal nicht im Wasser gelöst wurden, sowie irreguläre Partikel, wie Algen oder Schwebstoffe, die im Wasser enthalten sind. Die Zeitverschiebungstechnik ist in der Lage zwischen Blasen und irregulären Partikeln zu unterscheiden, da die Streuung an Blasen polarisationserhaltend ist, während irreguläre Partikel diffus und damit unpolarisiert streuen. Das Signal eines irregulären Partikels wird dadurch identifiziert, dass der PM für die senkrechte Polarisationskomponente zeitgleich zum PM für parallele Polarisation ein Signal aufweist. Die Größe der irregulären Partikel lässt sich wie in Referenz [6] gezeigt zusätzlich bestimmen.

Die Vielzahl an Eigenschaften von Tropfen und Partikeln, die mit dem Zeitverschiebungsverfahren mit einfachen Mitteln messbar sind, zeigt das große Anwendungspotenzial des Systems verglichen mit anderen optischen Messsystemen.

Referenzen

1. Albrecht, H.-E., et al., *Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques*. Experimental Fluid Mechanics, ed. R.J. Adrian, et al. 2003, Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag.
2. Albrecht, H.-E., M. Borys, and K. Hübner, *Generalized theory for the simultaneous measurement of particle size and velocity using laser Doppler and laser two-focus methods*. Particle & Particle Systems Characterization, 1993. **10**(3): p. 138-145.
3. Pavlovski, B. and N. Semidetnov, *Simultaneous measurement of velocity, size and concentrations for particles moving in two-phase flow (in Russian)*. Meas Techn (Ismeritel'naja Tekhnika), 1991. **9**: p. 40-42.
4. Kretschmer, A. and N. Damaschke, *Validation of and particle sizing with the time-shift technique (TST)*. Applied Optics, 2010. **in progress**.
5. Damaschke, N., et al., *Optical Particle Sizing in Backscatter*. Applied Optics, 2002. **41**(27): p. 5713-5727.
6. Kretschmer, *Measurement of irregular particles with the time-shift technique*. 15. Fachtagung 2007.