

## Mehrfarben-Laserlichtschnitt-Tomographie (MLT) und räumliche Rekonstruktion der dreidimensionalen Strömungsstruktur

B. Ruck, B. Pavlovski und H. Neuschl

Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe, Kaiserstr. 12, 76128 Karlsruhe

### 1. Einführung

Laserlichtschnittverfahren zur Strömungssichtbarmachung basieren auf der physikalischen Gegebenheit, dass Tracerteilchen, die in der Strömung mittransportiert werden, das auf sie einfallende Laserlicht streuen. Wird ein Tracer in der Strömung mitverfrachtet, so ergeben sich aufgrund der variierenden Transportprozesse unterschiedliche Tracerkonzentrationen und -aufenthaltszeiten an unterschiedlichen Orten. Durch Beleuchtung mit einem Laserlichtschnitt ergeben sich hieraus verschiedene, detektierbare Streulichtintensitäten, die eine Diskretisierung des betrachteten Strömungsvorganges erlauben.

Unter die optischen räumlichen Strömungsmessverfahren fallen tomographische Verfahren, die dergestalt eingesetzt werden, dass die Lichtebene schnell über einen zu analysierenden Strömungsraum geführt wird. Bei diesen tomographischen Strömungsmessverfahren wird ein einfarbiger Lichtschnitt und damit eine Auswerteebene schnell über einen zu analysierenden Strömungsraum geführt. Hierbei werden an hintereinander liegenden Raumpositionen 2-D-Strömungssichtbarmachungen in den Lichtschnittebenen erhalten.

Die Rekonstruktion der Strömungsstruktur erfolgt aus mehreren in einem Scanning-Verfahren gewonnenen Bilder, die anschließend einzeln digital abgespeichert werden. Für eine weitere Auswertung und Umwandlung der aus den Versuchsreihen gewonnenen Schnittbildsequenzen, müssen diese in rechnerkonforme Datenformate übertragen werden. Ziel muss es dabei sein, aus den Einzelbildern der Bildsequenzen strömungsmechanische Informationen zu extrahieren und z.B. die räumliche qualitative Rekonstruktion eines dreidimensionalen Strömungsfeldes oder seiner Struktur zu vollziehen (klassische Laserlichtschnitt-Tomographie mit einfarbigen Lichtschnittebenen - LLT). [1,2]. Die prinzipielle Funktionsweise der LLT lässt sich anhand von Abb. 1 verdeutlichen.

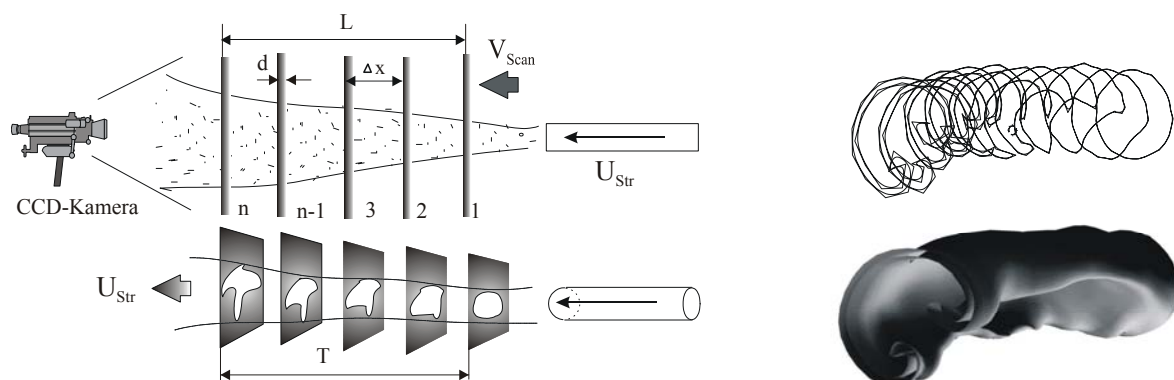


Abb. 1: Prinzipielle Funktionsweise der LLT

Man spricht bei diesen Verfahren von der qualitativen Visualisierung einer Strömung. Eine derartige einfache und schnelle dreidimensionale Sichtbarmachung kann als qualitative Ergänzung der dreidimensionalen Analyse von Strömungsräumen dienen.

Bei Untersuchungen von Strömungen mit der LLT ist zu beachten, dass die Aufzeichnungen der Tomogrammsequenzen (Anzahl der kompletten „Einfriervorgänge“) schneller als die Änderung der Strömungsstruktur durchgeführt werden muss, d.h. eine Strömungsstruktur muss möglichst schnell „eingefroren“ werden. Bei hoher zeitlicher Auflösung wird jedoch meist eine schlechte räumliche Auflösung angetroffen und umgekehrt. In beiden Fällen ergibt sich deshalb häufig eine mangelhafte Rekonstruktion der zu analysierenden Strömungsstruktur: Im einen Fall aufgrund der geringen Rauminformation, im zweiten wegen der zeitlichen Änderung der Struktur während der Aufnahme. Anders ausgedrückt bedeutet dies, dass bei der LLT die Erhöhung der räumliche Auflösung der Strömungsstruktur mit einer Erhöhung der Anzahl der Schnittbildern verbunden ist, was aber unter den gegebenen Umständen die zeitliche Auflösung verringert.

Eine Weiterentwicklung der Laserlichtschnitt-Tomographie basiert auf der Ausleuchtung des Strömungsraums mit farbigen Lichtschnitten (Mehrfarben-Laserlichtschnitt-Tomographie, MLT), indem eine Farbkodierung als zusätzliche Streulichtinformation verwendet wird, um dreidimensionale Strömungsstrukturen zu erhalten (s. Abb.1). Das Ziel hierbei ist, nicht jeden Lichtschnitt bei der Raumabtastung separat aufzunehmen und ihn dann auszuwerten, wie das bislang der Fall war, sondern die gesamte Rauminformation in nur einer Aufnahme zu detektieren. Die Belichtungszeit wird so groß gewählt wie die Dauer der gesamten Raumab-tastung. Ein solches Messprinzip kann sowohl in der qualitativen Strömungsanalyse bei höherer Partikelkonzentration (reine 3-D Sichtbarmachung), als auch in der quantitativen Auswertung des Strömungsfeldes bei geringer Partikelkonzentration (PIV - Auswertung) verwendet werden. Für die Aufzeichnung des farbigen Streulichtes des ausgedehnten Messvolumens ist eine einzige Farbkamera ausreichend.

Das neue MLT-Verfahren, das von der Idee her erstmals im Jahre 1998 [2] vorgestellt wurde, konnte in der Zwischenzeit durch eine Reihe von Weiterentwicklungen vorangebracht werden [3-5]. Eine Weiterentwicklung der MLT ist eine neue Entwicklung bei der Erzeugung der farbigen Lichtschnitte auf Basis des Weißlichtlasers und der Anwendung des scannende 3-D Ausleuchtungssystems. Ein solches System wurde erstmalig im Jahr 2000 von Heinen vorgestellt und wird als Scannende Mehrfarben-Laserlichtschnitt-Tomographie (SMLT) bezeichnet [3].

### **2. Farbige Lichtschnittgenerierung**

Die wichtigste Komponente der SMLT ist das Scanner-Farbmischmodul (Abb. 2). Ein Weißlichtlaserstrahl durchläuft eine Farbmischeinheit, die aus einer akustooptischen Zelle besteht, und die von einer PC-kontrollierten Steuereinheit definiert angesteuert werden kann. Auf diese Weise kann aus dem ankommenden Weißlichtstrahl, zeitlich einstellbar, nur eine bestimmte Farbe selektiert werden. Es besteht somit die Möglichkeit, zeitlich hintereinander die Farbe des aus der Farbmischeinheit austretenden Laserstrahls nach beliebiger Vorgabe schnell zu verändern. Der zeitlich hintereinander betrachtete verschiedenfarbige Strahl wird nun durch zwei Scaneinheiten für die Zeilenablenkung (rotierender Polygonscanner) und den Zeilenvorschub (elektronisch gesteuerter Spiegel) geführt, die die „Farbpakete“ jeweils zu

Lichtschnitt verschiedener Farbe an hintereinander liegenden Raumpositionen umformen. Die Farbfolge der Lichtschnitte ist frei wählbar. Hierzu musste eine Steuersoftware geschrieben werden, die Farbmischeinheit und Scaneinheiten kontrolliert und gleichzeitig die notwendige Synchronisation zwischen den Komponenten und der Bilderfassung bewerkstelligen kann.

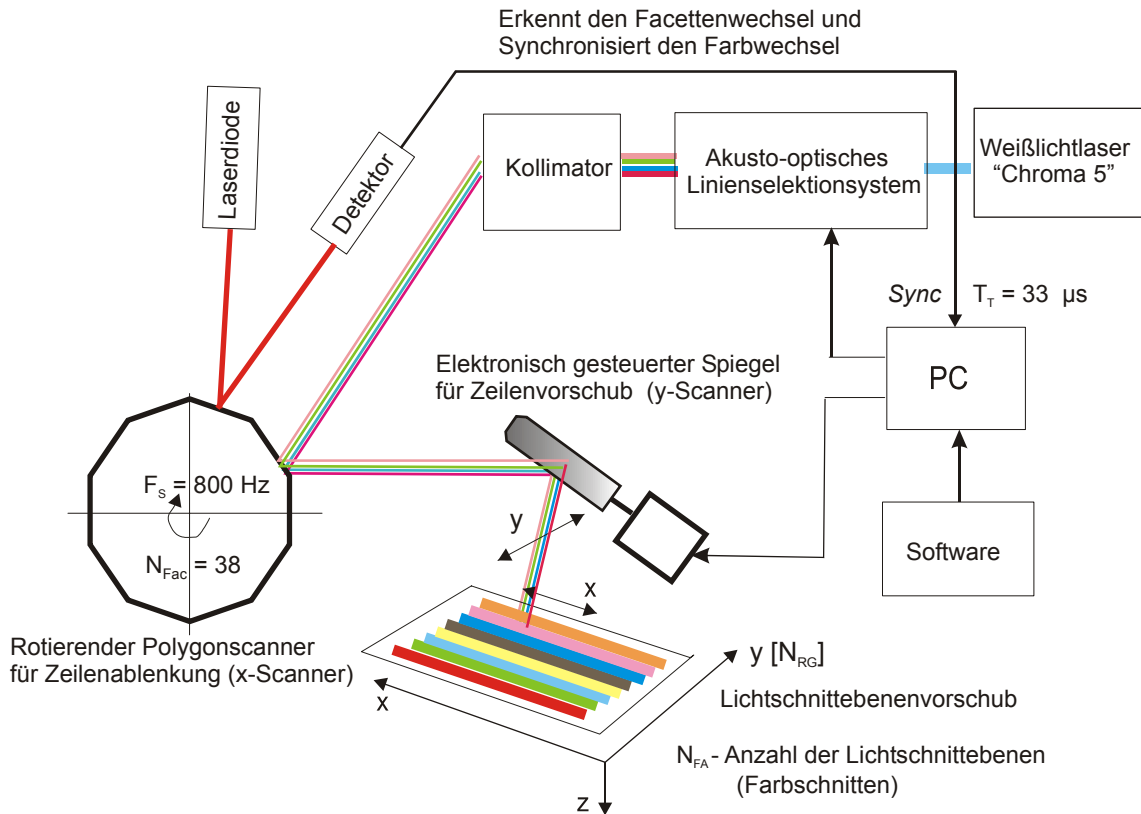


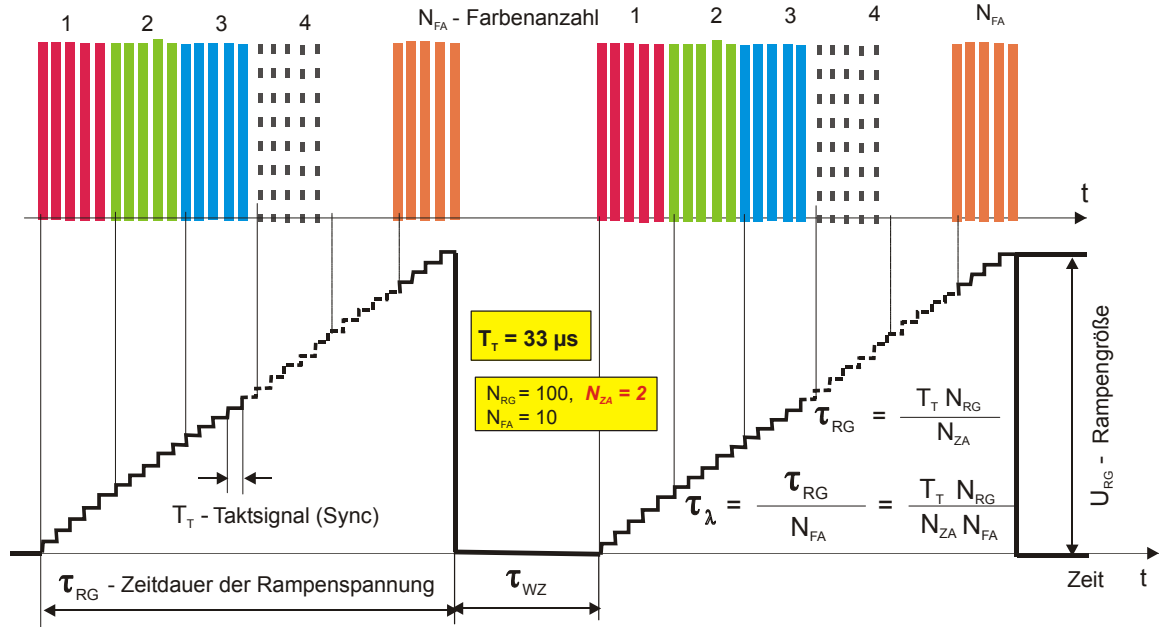
Abb. 2: Schematische Skizze der farbigen Lichtschnittgenerierung

### 3. Parameterisierung bei der farbigen Lichtschnittgenerierung

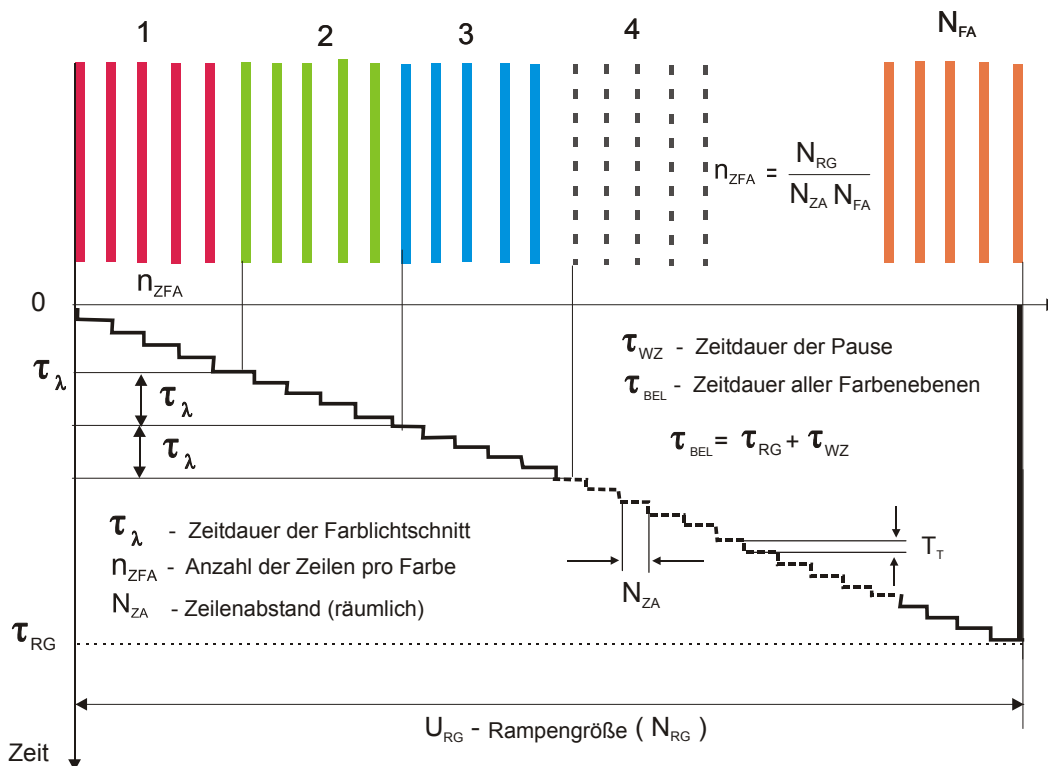
In Abb. 3 werden die wichtigsten zeitlichen und räumlichen Parameter der farbigen Lichtschnittgenerierung und ihre Zusammenhänge wiedergegeben. In Tabelle 1 werden die Ergebnisse ihrer Berechnung gezeigt. Wie man sieht, hängt die zeitliche Auflösung (minimale Belichtungszeit) bei konstanter Geschwindigkeit des Polygonscanners von der Zeilenanzahl pro Farblichtschnitt und von der räumlichen Auflösung der Lichtschnitteinheit ab. Die Erhöhung der zeitlichen Auflösung ist mit der Verkleinerung der Zeilenanzahl pro Farblichtschnitt verbunden, was beim Scannen großer Messvolumina zu Diskontinuität der Farblightschnitte führt. Entscheidend für die Schnelligkeit der Bilderfassung ist die Integralbildrate. Hatte man bisher bei der einfarbigen Tomographie noch 20-100 Einzelbilder aufzunehmen, um eine einzige Augenblicksaufnahme aus der Strömungsraum zu erhalten, so fordert SMLT nur noch eine einzige. D. h. die notwendige Bildrate liegt in Fall der SMLT wesentlich unter der für die vollständige Tomographie notwendigen Bildrate. Um aus den in den einzelnen Ebenen enthaltenen Informationen zusätzlich die Strömungsgeschwindigkeit auswerten zu kön-

# 34.4

nen, müssen die Teilchenbahnen in Ebenen- und Normalenrichtung bei Kenntnis der Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Streuteilchen im jeweiligen Farblichtschnitt gemessen werden.



## Zeitliche Auflösung



## Räumliche Auflösung

Abb. 3: Zeitliche und räumliche Auflösung bei der farbigen Lichtschnittgenerierung

Tabelle 1: Berechnete Parameter bei der Lichtschnittgenerierung

siehe Abb. (2-3)	$N_{RG}$ [Punkte]	$N_{ZA}$ [Punkte]	$N_{FA}$	$\tau_{WZ}$ [ms]	$\tau_{RG}$ [ms]	$n_{ZFA}$	$\tau_{\lambda}$ [ms]	min $\tau_{BEL}$ [ms]
Kleiner Lichtschnittvorschub (in Richtung Y) $d_{\lambda} = 0.2 \text{ mm}$	100 (60 mV)	1 (0.6 mV)	10	1	3.3	10	0.33	4.3
	100	2	10	1	1.65	5	0.165	2.65
	100	5	10	1	0.66	2	0.066	1.66
	100	1	50	1	3.3	2	0.066	4.3
Großer Lichtschnittvorschub (in Richtung Y) $d_{\lambda} = 5 \text{ mm}$	10000 (6 V)	1 (0.6 mV)	10	1	330	1000	33	330
	10000	10	10	1	33	100	3.3	33
	10000	40	10	1	8.25	25	0.8	8.25
	10000	80	10	1	4.1	12	0.4	4.1
	10000	1	50	1	330	200	6.6	330
	10000	10	50	1	33	20	0.66	33
	10000	40	50	1	8.25	5	0.16	8.25
10000	80	50	1	4.1	2.5	0.08	4.1	

Bei der qualitativen Anwendung der SMLT handelt es sich z.B. um eine dreidimensionale simultane Visualisierung räumlicher Wirbelkonturen in komplexen Strömungen. Hierbei ist das Messverfahren nur bei einer höheren Partikelkonzentration zu realisieren (Abb. 4, links) und die Farbtrennung ist nur im Falle eines größeren Farbebenenabstandes möglich (Abb. 4, rechts).

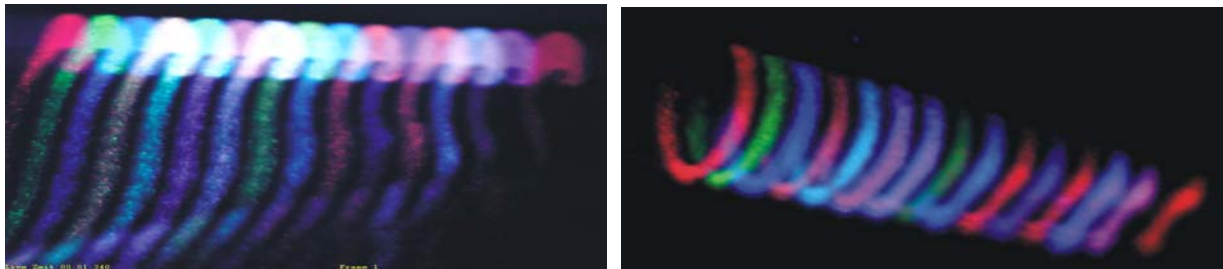


Abb. 4: Qualitative Anwendung der SMLT im Falle eng beieinander liegender Farblightschnitte mit Überdeckung einzelner Konturen (links) und eines größeren Farbebenenabstandes (rechts)

Bei der quantitativen Anwendung werden die Geschwindigkeitskomponenten der Streuteilchen gemessen. Bei der Abtastung des Strömungsvolumens mit farbigen Lichtschnitten können mehrere Modi realisiert werden. So können die bewegten Teilchen z.B. mehrfach vom Laserstrahl überstrichen werden. Die aufgenommenen Bilder zeigen die Teilchenbahnen dann in Form einer Mehrfachbelichtung (Abb. 5). Eine Veränderung des Rampenanstiegs ändert die Scannergeschwindigkeit. Bei Kenntnis des Abbildungsmaßstabes, der Belichtungszeiten, der Farblightschnitttdicken und der Farbkodierung lassen sich mit Hilfe von Tracking-Algorithmen sämtliche Partikelgeschwindigkeitskomponenten auswerten [5]. In Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit müssen die Parameter zur Steuerung der Mehrfachbelichtung durch den Scanners eingestellt werden. Ebenso muss die Kameraaufnahmezeit flexibel in die Veränderung der Betriebsdaten einbezogen werden (Abb. 6). So soll z.B.

die Zeit zwischen zwei Belichtungen kleiner als die Änderungszeit der zu erfassenden Strömungsstruktur sein (dreidimensionales „Einfrieren“).

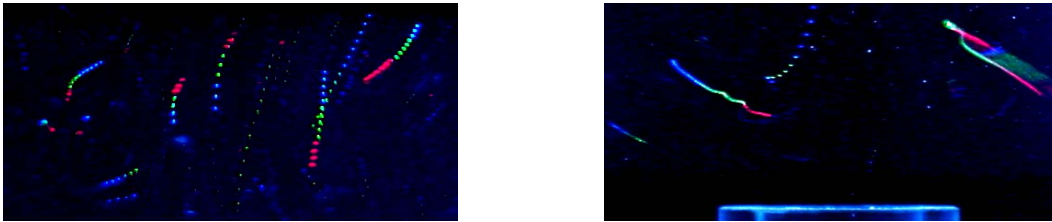


Abb. 5: Teilchenbahnen bei Mehrfachbelichtung bei langsamer (links) und schneller (rechts) Geschwindigkeit des Galvanometer-Scanners bei konstanter Kameraaufnahmezeit (s. Tabelle 1)

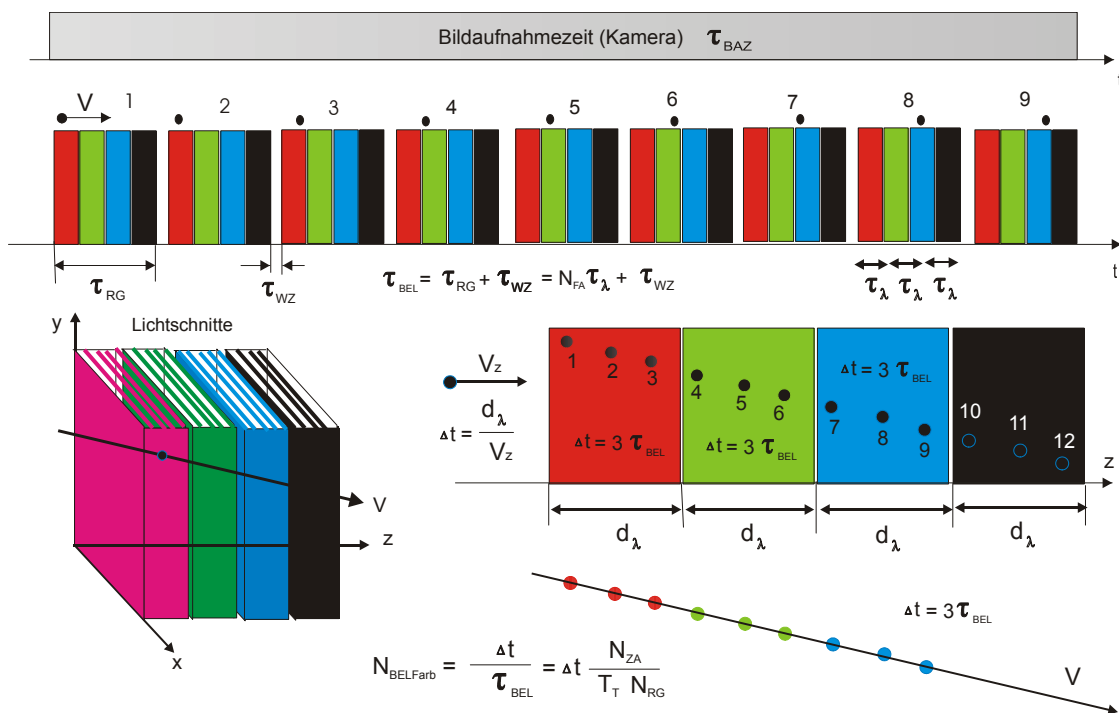


Abb. 6: Anpassung der Scannergeschwindigkeit an die Tracergeschwindigkeit bei der SMLT

#### 4. Räumliche Rekonstruktion der dreidimensionalen Strömungsstruktur

Die Farbkalibrierung (Farbtrennung) spielt bei der praktischen Realisierung der SMLT die entscheidende Rolle für die Genauigkeit des Strömungsmessvorganges unabhängig davon, welches Messprinzip damit letztlich realisiert wird: reine Sichtbarmachung (qualitativ) oder z.B. 3D-PIV (quantitativ). Die Untersuchung von Farbtendifferenzen erfordert metrische Farbsysteme, d.h. Farbsysteme, welche eine Ordnungsstruktur besitzen und eine Abstandsbestimmung erlauben. Da die auf die auf oben beschriebene Art und Weise erzeugten Farben nicht dem üblichen RGB-Farbraum, welcher sich auf den Farbraumumfang der Monitorphosphore bezieht, und daher geräteabhängig ist, beschränkt, empfiehlt sich die Verwendung eines perzeptionellen Farbsystems.

Es ist auch offensichtlich, dass für die Aufgabe der Farbtrennung die *Farbton-Sättigung-Intensität*-Farbsysteme am besten geeignet sind. Meist reicht zur Farbestimmung bei konstanten Sättigungs- und Intensitätsschwellwerten, die vernachlässigt werden, nur die Angabe der Farbton-Koordinate aus, was zu einer erheblichen Datenreduktion führt. Andererseits lassen sich die Sättigungs- und Intensitätskoordinaten benutzen, um Bildstörungen (Streu-licht, Reflexionen, Rauschen) zu eliminieren. Dies erspart in den meisten Anwendungsfällen eine Bild-Vorverarbeitung. Aus der Reihe möglicher „Kandidaten“ unter den *Farbton-Sättigung-Intensität*- Systemen wurde für einen ersten Entwurf das HSV-System ausgewählt. Es ist für Experimentatoren leicht „erlernbar“, denn seine Farbanordnung entspricht in etwa dem natürlichen Spektrum und es ist in vielen Softwareprogrammen der Bildverarbeitung und Datenvisualisierung verfügbar. Farbsysteme aus der CIE<sup>1</sup>-Reihe (CIE-L\*a\*b\* , CIE-L\*u\*v\* und Derivate) sind in Hinblick auf eine Verbesserung der Farbtrennung noch Gegenstand der Untersuchung. Aber noch ein anderer Aspekt macht diese Farbsysteme interessant: Der Farbton eines Farbschnitts des Farbschnittgenerators (wie oben beschrieben) lässt sich für das Normalfarbsystems (CIE 1931) aus der Wellenlänge der Spektralfarbe und der spezifischen Strahlungsleistung berechnen. Dieser Wert kann nun dem Farbtrennfilter als Eingangsparameter übergeben werden und manuelle Kalibrierungen werden somit überflüssig.

Das Farbtrennprogramm wurde in der Programmierumgebung von MATLAB implementiert. Das Programm besteht aus zwei Teilen, der Farbtrennfilter-Routine (FTF) und der Lesen-Speichern-Bilder-Routine (LSB). In der FTF-Routine findet die eigentliche Verarbeitung statt. Sie kann völlig getrennt von der LSB über die MATLAB Kommandozeile benutzt werden und auch leicht in andere, später folgende Programmsysteme eingebunden werden.

Durch die Zoom-Funktion der LSB lassen sich Farbkoordinaten einzelner Pixel anzeigen. Dies geschieht durch Mausklick auf die Bildfläche. Neben den HSV- und RGB-Koordinaten wird der Farbton auf einem HSV-Spektrum graphisch dargestellt, was die Farbzuordnung besonders bei Farben von geringer Intensität und/oder Sättigung erheblich erleichtert. Die Anzeigefenster der HSV-Koordinaten fungieren auch als Eingabefenster für die Parameter der Farbtrennung. Die Parameter der Farbtrennung können gespeichert werden. Das Ergebnis der Farbtrennung ist wieder ein Farbbild, welches aber für die Weiterverarbeitung in ein Grauwertbild konvertiert werden kann.

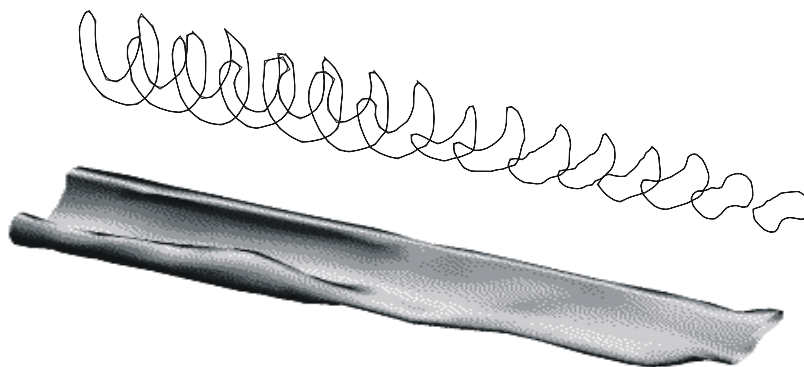
Die weitere computertechnische Rekonstruktion der Strömungsstrukturen erfolgte über eine lineare Interpolation über den Zwischenraum zweier aufeinanderfolgender Einzelbilder der Bildsequenz, wie für klassische einfarbige Tomographieverfahren (s. [1]). Die Graphische Wiedergabe der rekonstruierten Strömungsstruktur erfolgte sodann unter wählbarem Betrachtungswinkel über eine perspektivische Projektion, die einen dreidimensionalen Eindruck vermittelte (Abb. 7).

## Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, ein System zur Aufnahme und Rekonstruktion von Strömungsstrukturen zu entwickeln, um Strömungsvorgänge "einzufrieren" und augenblicklich sichtbar zu machen. Dazu wurde ein Lichtschnittsystem realisiert, bei dem der Multiline-Strahl eines Weißlichtlasers mit Hilfe von akustooptischen Komponenten so verändert wur-

<sup>1</sup> Commission d'illumination et Eclairage – Internationale Lichtkommission

de, dass extrem schnell hintereinander Laserstrahlen unterschiedlicher Farbe erzeugt werden können. Die Strahlen werden über Schwingsscanner und Polygonscanner zu Lichtschnittebenen unterschiedlicher Farbe umgeformt, die im Strömungsraum zeitlich und räumlich hintereinander angeordnet werden (Abtastvorgang). Eine Farbkamera detektiert zeitgleich ein „integrales“ Bild aus dem Strömungsraum. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der gerätetechnischen Weiterentwicklung der MLT-Technik, wobei insbesondere der Farb-trennung in der Gesamtaufnahme besonderes Augenmerk zukommt.



*Abb. 7: Räumliche Rekonstruktion der dreidimensionalen Strömungsstruktur bei der Visualisierung des Freistrahles*

### Dankesworte

Die Autoren möchten sich an dieser Stelle bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG/Bonn für die Förderung des Vorhabens Ru 345/27 bedanken.

### Literaturverzeichnis

- [1] Ruck, B. und Pavlovski, B.: Ein Laserlichtschnitt-Tomographiesystem zur Erfassung von Strömungsstrukturen. 6. Fachtagung GALA, Essen (1998), Verlag Shaker Aachen, S. 43.1- 43.8
- [2] Arndt, S., Heinen, C., Hübel, M., Reyman, K.: Multi-colour laser light sheet tomography (MLT) for recording and evaluation of three-dimensional turbulent flow structures. Optical Methods and Data Processing in Heat and Fluid Flow, ImechE Conf.Trans.,1998-2, City Univ., London, 1998, S. 451-489
- [3] Arndt, S., Heinen, C., Reyman, K., Ruck, B.: Einsatz eines neuartigen Mehrfarben-Laserlichtschnitt-Tomographieverfahrens zur Analyse räumlicher Strömungsfelder. 8. Fachtagung GALA, München (2000), Verlag Shaker Aachen, S. 55.1- 55.6
- [4] Ruck, B. und Heinen, Ch.: Neue farbkodierende Messverfahren zur dreidimensionalen instationären Analyse von Strömungsräumen. 9. Fachtagung GALA, Winterthur (2001), Verlag Shaker Aachen, S. 27.1-27.7
- [5] Heinen, C., Arndt, S., Reyman, K., Ruck, B.: Mehrfarben-Laserlichtschnitt-Tomographie zur dreidimensionalen instationären Analyse räumlicher Strömungsfelder. 9. Fachtagung GALA, Winterthur (2001), Verlag Shaker Aachen, S. 26.1-26.7
- [6] Ruck, B. und Pavlovski, B.: Entwicklung eines Laserlichtschnitt-Tomographiesystems zur Erfassung von Strömungsstrukturen. Laser- und Optoelektronik 30 (4), 1998, s. 61-70
- [7] Raffel, M., Kompenhans, J.: Anwendung der PIV in stark dreidimensionalen Strömungen. Lasermethoden in der Strömungsmess-technik. 4. Fachtagung GALA, Rostock (1995), Verlag Shaker Aachen, S. 38.1-38.3.