

Bau einer Kalibriervorrichtung für Absorptionsfilterkennlinien von Jodzellen für die Doppler Global Velocimetry

M. Seifert, J. Heinze, R. Schodl

DLR, Institut für Antriebstechnik, Linder Höhe, D-51170 Köln

1. Einleitung

Bei den neueren, auf dem Dopplereffekt basierenden Methoden der planaren Strömungsgeschwindigkeitsmessung wie z.B. der Doppler Global Velocimetry (DGV) spielen molekulare Absorptionsfilter eine wichtige Rolle bei der Detektion der Frequenzverschiebung des dopplerverschobenen Streulichts von Partikeln in der Strömung, die von einem frequenzstabilisierten Laser beleuchtet werden. Auf Geschwindigkeitsänderungen zurückzuführende Frequenzverschiebungen des Streulichts äußern sich in einer Änderung der Absorption in der Jodzelle. Eine wichtige Voraussetzung für eine genaue Geschwindigkeitsmessung ist die exakte Kenntnis der Absorptionskennlinie als Funktion der Frequenzverschiebung.

Sowohl numerische Simulationen wie auch experimentelle Methoden sind zur Bestimmung der Absorptionskennlinien bisher eingesetzt worden. Das bisher hauptsächlich verwendete experimentelle Verfahren, die Frequenz eines durchstimmbaren Lasers über die Schwebungsfrequenz mit einem zweiten baugleichen, aber frequenzstabilisierten Laser zu bestimmen, sowie das Verfahren der Frequenzkalibrierung über die Hyperfeinstruktur der Jodabsorptionslinie sind experimentell sehr aufwendig und insbesondere für die Anwendung bei gepulsten Lasern nicht geeignet.

Mit dieser Arbeit wird eine Kalibriervorrichtung für Absorptionsfilterkennlinien von Jodzellen vorgestellt, die universeller einsetzbar ist, und die experimentell bestimmten Kennlinien werden mit theoretischen Absorptionskennlinien verglichen.

2. Funktionsprinzip der Jodzellenkalibration

Die Kalibration der Jodzellen basiert auf der Transmissionsmessung mit einem durch den Dopplereffekt durchgestimmten Laser. Ein frequenzstabilisierter Laserstrahl wird von den sich auf den Strahl zu- oder von ihm wegbewegenden Spiegeln auf einem Spiegelrad reflektiert und dabei durch den Dopplereffekt um

$$\Delta f = 2f_0 \frac{v}{c}$$

in der Frequenz verschoben.

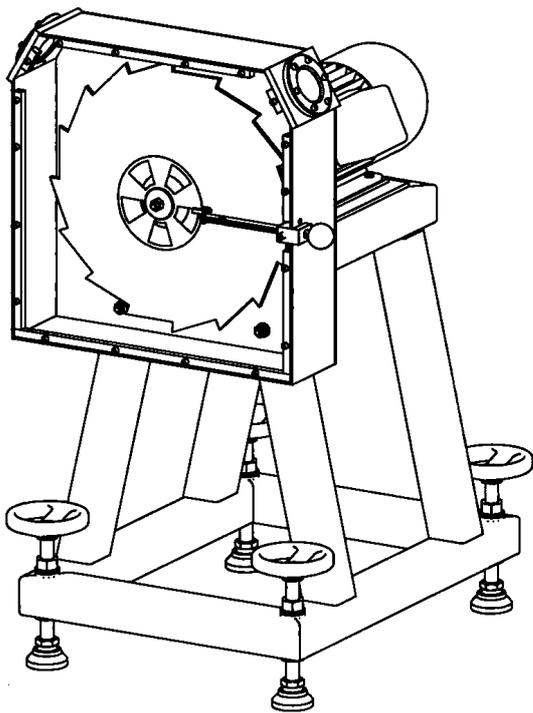


Abb. 1: Der Dopplerspiegel, Aufbau

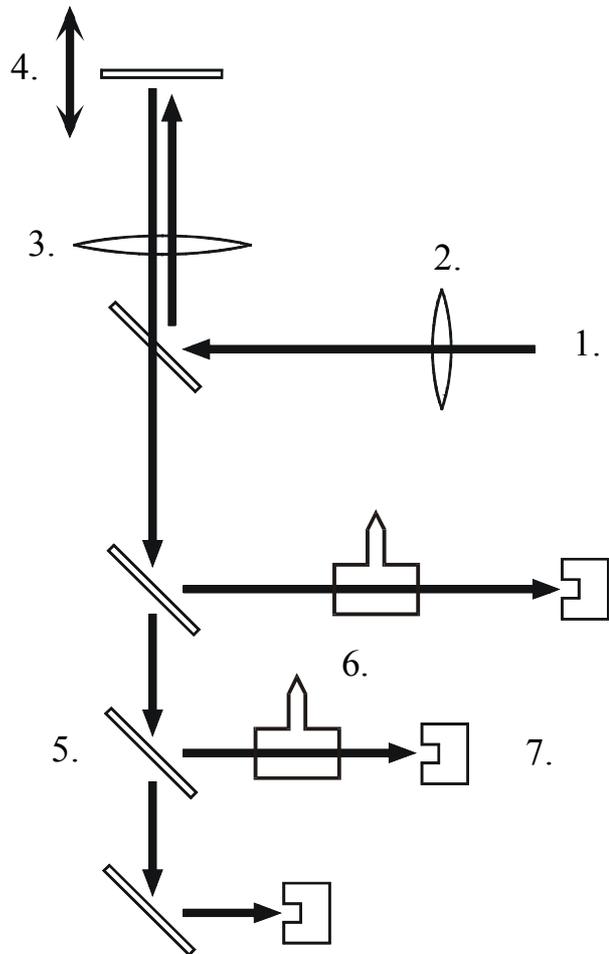


Abb. 2: Strahlengang

Die Frequenz des stabilisierten Lasers ist bekannt, die Rotationsgeschwindigkeit des Spiegelrades wird mit einer Schlitzscheibe und einer Lichtschranke gemessen. Das Spiegelrad besteht aus einer Zahnscheibe von 35cm Durchmesser, die von einem Motor gedreht wird. Eine Frequenzverschiebung von 680MHz entspricht dabei einer Drehzahl von etwa 10.000 1/min und einer Umfangsgeschwindigkeit von 175 m/s, was nicht nur hohe Anforderungen an die Festigkeit des Materials und an die Fertigung stellt, sondern auch an die Betriebssicherheit, was z.B. eine gepanzerte Kapselung der Scheibe notwendig macht. Der Motor arbeitet dabei mit 1,1 kW gegen den Luftwiderstand der Zahnscheibe an der Grenze seiner Leistungsfähigkeit. Nur noch mit aufwendiger Kühlung sowohl des Motors als auch der Zahnscheibe läßt sich der Dauerbetrieb erreichen. Die Zähne sind mit retroreflektierenden Spiegeln bestückt. Eine alternative Ausführung besteht aus einer zahnlosen runden Scheibe, die an der Außenkante mit retroreflektierender Folie beklebt ist, und die einen deutlich geringeren Luftwiderstand aufweist. Der Lichtstrahl wird durch das Glasfenster oben rechts (Abb. 1) auf den Spiegel (Abb.2, Pos. 4.), und auf dem selben Weg wieder zurück auf die Fotodetektoren (Abb. 2, Pos. 7.) geleitet. Vor den Detektoren können Jodzellen (Abb. 2,

Pos. 6.) in den Strahlengang gestellt werden. In diesem Aufbau können 2 Jodzellen gleichzeitig vermessen werden. Die zweite, die Referenzzelle wird bei jeder Messung mitgemessen, um jederzeit die Übereinstimmung der Frequenzachse garantieren zu können. Der dritte Detektor, ohne Jodzelle, wird für das Referenzsignal genutzt. Die Motorsteuerung, der Meßzyklus sowie die Meßwerterfassung sind automatisiert und werden nach anfänglichen Justagearbeiten dem Rechner überlassen.

3. Füllung von Jodzellen

Die Jodzellen sind Glasküvetten, die mit einer definierten Menge Joddampf gefüllt und zugeschweißt werden. Die Menge des darin vorhandenen Jods ist korreliert mit der Sättigungstemperatur, der Temperatur, bei der das in der Küvette vorhandene Jod vollständig verdampft ist. Oberhalb dieser Temperatur ist die Menge des Joddampfes in der Zelle konstant und damit auch die Absorption nahezu temperaturunabhängig, so daß der Betrieb der Zelle auch bei leichten Schwankungen der Betriebstemperatur ein nahezu konstantes Absorptionsverhalten garantiert. Da die Füllung von Zelle zu Zelle variiert, muß sie gemessen werden. Dazu wird die Transmission unter Variation der Temperatur bei einer konstanten Laserfrequenz gemessen. [Karpinski]

Sinnvollerweise geschieht das im Absorptionsmaximum, weil sich dort die größte Genauigkeit der Sättigungstemperaturbestimmung ergibt. Es folgt nämlich nach dem exponentiellen Anstieg des Absorptionskoeffizienten mit der Temperatur aufgrund der Zunahme des Jod-Dampfdrucks eine Abnahme der Absorption jenseits der Sättigungstemperatur aufgrund der Dopplerverbreiterung und dadurch ergibt sich ein möglichst scharfer Schnittpunkt beider Kurventeile, der die gewünschte Genauigkeit liefert. Abseits des Absorptionsmaximums nimmt die Schärfe dieses Schnittpunktes ab.

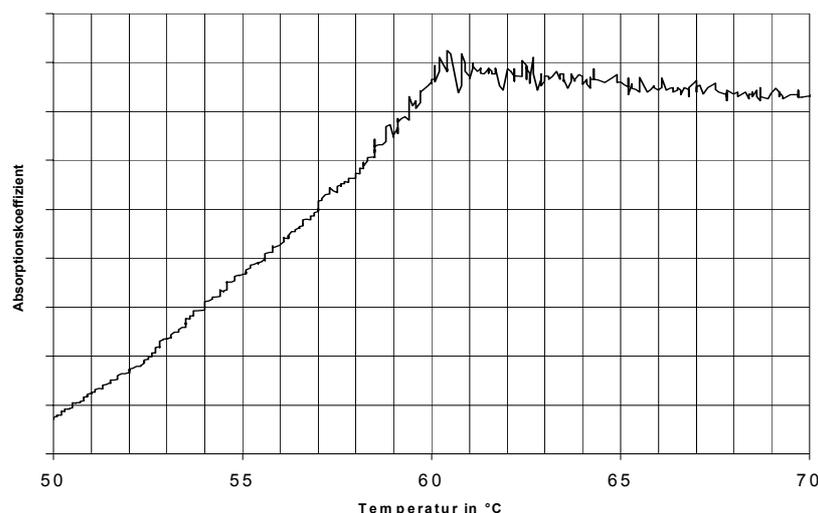


Abb. 3: Die Gemessene Absorption einer Zelle gegen ihre Temperatur

Da der Laser nur an einer Flanke stabilisiert werden kann, wird die Frequenz mit dem Spiegelrad genau zum Absorptionsmaximum hin verschoben. Abb. 3 zeigt den Verlauf der Absorption gegen die Zellentemperatur. Der Knickpunkt in der Kurve markiert die

Sättigungstemperatur unter der Annahme, daß in der Küvette überall die gleiche Temperatur herrscht oder der Temperaturfühler an der kältesten Stelle sitzt.

Um den Bereich hoher Absorption d.h. geringer Transmission noch sinnvoll messen zu können, darf die Resttransmission einen meßbaren endlichen Wert nicht unterschreiten, bei Sättigungstemperaturen größer als 65°C geht sie jedoch unter die Nachweisgrenze, so daß man dann auf Kosten der Genauigkeit die Transmissionsmessung bei Frequenzen außerhalb des Absorptionsmaximums durchführen muß.

4. Aufnahme der Transmissionskurve

Die Transmission der Jodzellen wurde mit einem Argon-Ionen-Laser mit einer Frequenz von $5,82482 \cdot 10^{14}$ Hz mit der Dopplerspiegelanlage gemessen. Der Laser ist auf die Frequenz abgestimmt, bei der die Transmission an einer Jodzelle von 5cm Länge und einer Sättigungstemperatur von 60°C den Wert 0,5 annimmt. Die Stabilisierung des Lasers erfolgt mittels ebendieser Zelle, und wird auf Konstanz der Transmission geregelt. [Röhle]

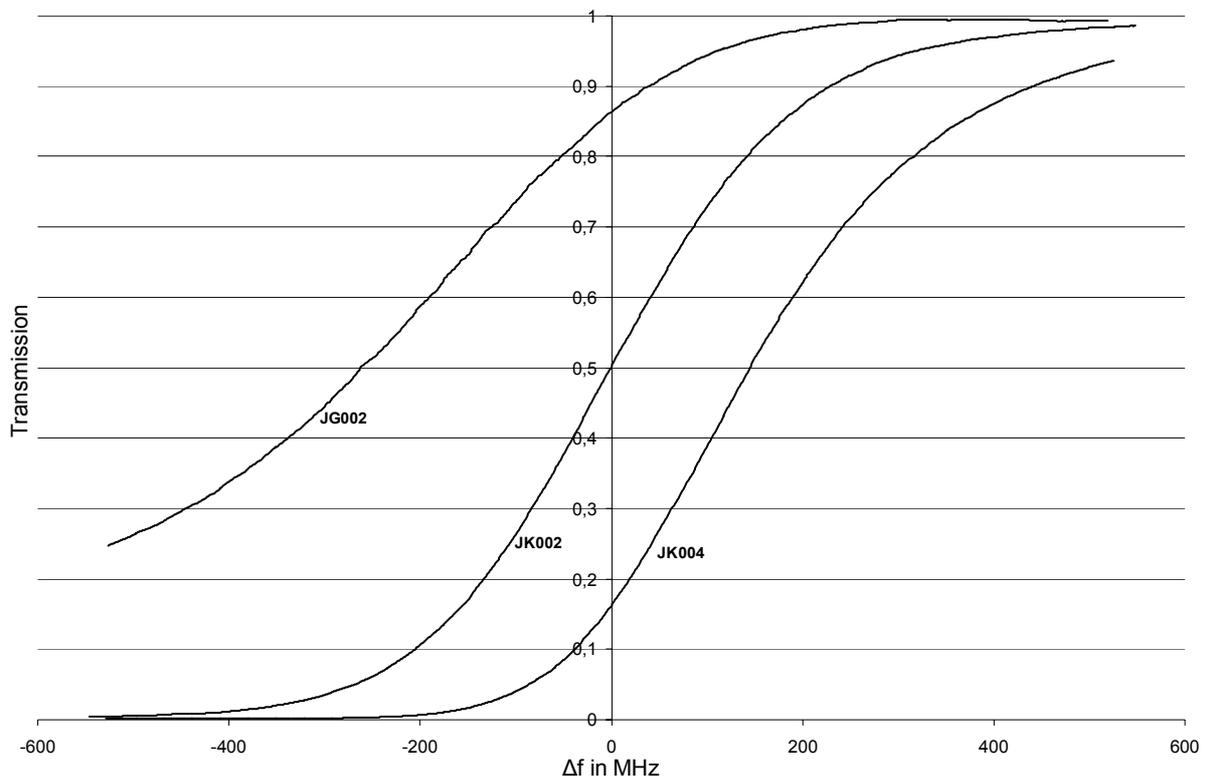


Abb. 4: Spektren von 3 ausgewählten Jodzellen

In Abb. 4 sind die Spektren von drei verschiedenen Zellen mit unterschiedlicher Befüllung dargestellt. Die zugehörigen Sättigungstemperaturen sind:

JG002	JK002	JK004
36°C	60°C	74°C

Es sind ebenso Messungen an der linken Flanke dieser Linie durchgeführt worden, Messungen in anderen Frequenzbereichen, die einem frequenzstabilisierten Nd-YAG-Laser zugänglich sind, sind geplant.

5. Vergleich mit theoretischer Simulation

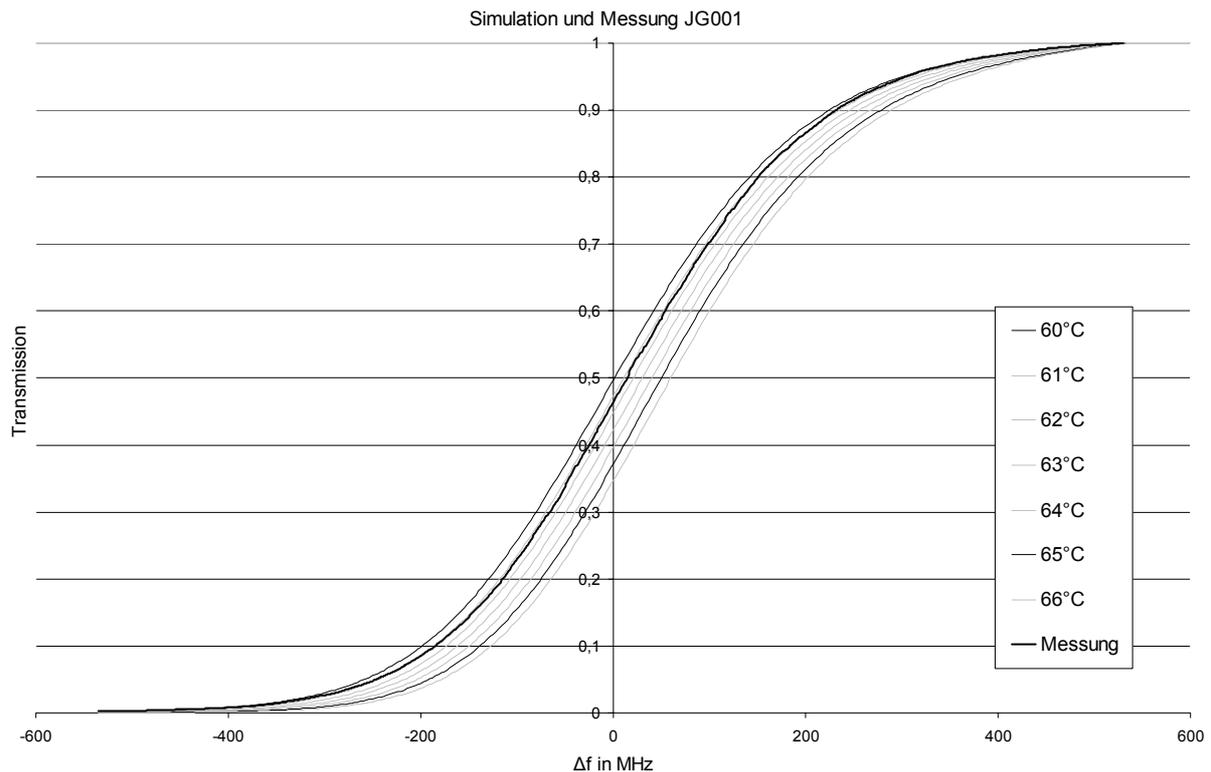


Abb. 5: Vergleich eines gemessenen Spektrums mit simulierten Spektren

Als theoretische Simulation wurde das Programm von Forkey [Forkey] zugrundegelegt, das mit einem Druckverbreiterungsmodell erweitert wurde. Der Vergleich der simulierten Spektren mit den experimentell bestimmten zeigt sehr gute Übereinstimmung unter der Voraussetzung, daß die experimentell bestimmte Sättigungstemperatur sorgfältig ermittelt worden ist. Die gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Theorie bestätigt die Zuverlässigkeit der Ergebnisse.

Die in Kapitel 3. erwähnte Bestimmung der Sättigungstemperatur ist dann problematisch, wenn nicht gewährleistet werden kann, daß in der Küvette überall die gleiche Temperatur herrscht, bzw. die Temperaturfühler nicht an der kältesten Stelle der Küvette sitzen und ferner mit erhöhtem Fehler behaftet, wenn die Sättigungstemperatur über 65°C liegt. (s.o.)

In diesem Fall bietet sich die Möglichkeit, die gemessene Transmissionsflanke an eine Schar für unterschiedliche Sättigungstemperatur berechnete simulierte Spektren

anzufitten. Abb. 5 zeigt die gemessene Transmissionsflanke einer Jodzelle zusammen mit für 7 verschiedene Sättigungstemperaturen mit einem Programm nach Forkey errechneten Flanken. Damit ist eine Zuordnung der vermessenen Jodzelle zu ihrer Sättigungstemperatur möglich. Abweichungen zwischen experimentell und theoretisch bestimmter Sättigungstemperatur, weisen auf ein fehlerhaftes Experiment hin.

6. Zusammenfassung

Es wurde eine Vorrichtung entwickelt, mit der die Kalibration der Jodabsorptionskennlinie unabhängig von der Art der verwendeten Lichtquelle durchgeführt werden kann. Als Lichtquelle ist ein frequenzstabilisierter Laser erforderlich, dessen Strahl an einer mit bekannter Geschwindigkeit rotierenden Scheibe reflektiert wird und somit aufgrund des Dopplereffektes auf bekannte Weise frequenzverschoben wird. Mit dieser Vorrichtung sind Frequenzverschiebungen von $\pm 680\text{MHz}$ mit einer Auflösung von $\sim 3\text{MHz}$ realisierbar.

Ein numerisches Simulationsverfahren wurde durch geeignete Druckverbreiterungsmodelle erweitert und zum Vergleich der experimentellen Absorptionskennlinien herangezogen. Dazu wurde der für die Simulation erforderliche jeweilige Füllungsgrad der Jodzellen durch die experimentelle Ermittlung der Sättigungstemperatur bestimmt.

Experimentelle und theoretische Absorptionskennlinien befinden sich in guter Übereinstimmung, so daß bei genau bekannter Sättigungstemperatur der Jodzelle auch die theoretischen Absorptionskennlinien für die Messung verwendet werden können.

7. Literatur

- [Forkey] Forkey, Joseph N.: *Development and demonstration of filtered Rayleigh scattering – a laser based flow diagnostic for planar measurement of velocity, temperature and pressure*; Final technical report for NASA graduate student researcher, fellowship grant #NGT-50826, 1996
- [Karpinski] Karpinski, Gabriele: *3-Komponenten-Doppler-L2F-Geschwindigkeitsmeßsystem für berührungslose Messung der Strömungsgeschwindigkeit an besonders schwer zugänglichen Stellen*; 2000, Kap. 5, S. 32
- [Röhle] Röhle, Ingo: *Laser-Doppler-Velocimetry auf der Basis frequenzselektiver Absorption*; 1999, Kap. 3.2, S. 27