

Interner Bericht

DLR-IB-AT-KP-2023-172

**Charakterisierung der
Genauigkeit der
Frequenzstabilisierung
verschiedener Laser-
Messsysteme bei 532 nm
anhand von
Transmissionsmessungen an
einer Iod-Zelle**

Till Ockenfels

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Institut für Antriebstechnik
Köln-Porz



DLR

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt

Dokumenteigenschaften

Titel Charakterisierung der Genauigkeit der Frequenzstabilisierung verschiedener Laser-Messsysteme bei 532 nm anhand von Transmissionsmessungen an einer Iod-Zelle

Betreff _____

Institut Institut für Antriebstechnik

Erstellt von Till Ockenfels

Beteiligte Eike Burow, Michael Fischer, Guido Stockhausen

Geprüft von -

Freigabe von -

Zugänglichkeit Stufe 1: Allgemein zugänglich (in elib ohne Zugangsbeschränkung)

Stufe 2: DLR intern zugänglich (in elib mit Beschränkung „nur DLR-intern zugänglich“)

Datum 21.12.2023

Version 1.0

Datei Info _____

Inhalt

1. Ausgangsituation:	5
2. Frequenzstabilisierung:	5
3. Messungen:	5
3.1. Schwankung der Leistungsmessung:	7
3.2. Schwankung der Transmissionsmessung bei T=100%:	7
3.3. Schwankung der Transmissionsmessung bei T=50%:	8
4. Ergebnis:	9
5. Einfluss der Autokalibration:	10
6. Einfluss der Autokalibration für längere Messdauer:	10
Literaturverzeichnis	11

1. Ausgangssituation:

Sowohl für Messungen mittels Filtered Rayleigh Scattering (FRS) [Doll, 2016] als auch mittels Doppler Global Velocimetry (DGV) [Röhle, 1999] wird ein Laser bei 532nm verwendet. In diesem Wellenlängenbereich bieten die Absorptionsspektren der verwendeten Iod-Zellen geeignete frequenzabhängige Filter, um Mie- und geometrische Streuung an Oberflächen suffizient zu unterdrücken. Erst damit kann in den von uns betrachteten experimentellen Bedingungen die namensgebende Rayleigh-Streuung beobachtet werden bzw. die durch den Doppler-Effekt hervorgerufene Frequenzverschiebung der gestreuten Signale in Form einer transmittierten Signalamplitude messbar gemacht werden.

Die Frequenz des Lasers muss für eine hohe Messgenauigkeit möglichst präzise auf die Sollfrequenz geregelt werden bzw. als Transmission durch eine Referenzzelle zum Messzeitpunkt ermittelt werden. Eine Ungenauigkeit in der ermittelten Transmission pflanzt sich hierbei entsprechend der Steigung des Spektrums der verwendeten Zelle als Frequenz- und damit Geschwindigkeitsfehler fort.

Daher soll unter kontrollierten Laborbedingungen ermittelt werden:

1. Wie stark schwankt die Frequenz der untersuchten Lasersysteme?
2. Kann eingegrenzt werden, wo die jeweilige Hauptursache für die Schwankungen liegt?
- 2.1 Welche Vor- bzw. Nachteile bringt die regelmäßige Autokalibrierung des Wavelengthmeters mit dem frequenzstabilisierten Helium-Neon-Laser (HeNe)?

2. Frequenzstabilisierung:

In den untersuchten Aufbauten wird der jeweilige Laser durch einen im Wavelengthmeter integrierten PID-Regler stabilisiert. Dazu wird die Laserfrequenz mit einer Datenrate von 20-50Hz im Wavelengthmeter gemessen (Ist-Frequenz). Über die DLR-eigene Labview-Software werden dem Wavelengthmeter eine Soll-Frequenz und systemabhängige Regler-Parameter vorgegeben. Entsprechend der Regelabweichung zwischen Soll- und Ist-Frequenz werden die Piezo-Kristalle im Laserresonator angesteuert, um die Ist- der Soll-Frequenz anzugleichen. Das Wavelengthmeter kann dabei in wählbaren Abständen auf das als frequenzstabil angenommene Licht eines HeNe-Lasers kalibriert werden (Autokalibrierung), um beispielsweise einen thermischen Drift der verbauten Interferometer auszugleichen.

3. Messungen:

Um die Genauigkeit dieser Stabilisierung zu charakterisieren, wurde, wie im Weiteren genauer ausgeführt, bei unterschiedlichen festgehaltenen Soll-Frequenzen die Transmission des Laserlichts durch eine temperaturstabilisierte Iod-Zelle gemessen (siehe Abbildung 1). Die relative Standardabweichung als Schwankungsbreite der ermittelten Transmission I/I_0 stellt ein Maß für die Frequenzstabilität dar. Eine beispielhafte Messung findet sich in Abbildung 2.

Die Schwankungsbreite der Transmission setzt sich aus mehreren möglichen Fehlerquellen zusammen:

1. **Strahllagenschwankung:** Bedingt durch die inhomogene Sensitivität und die nichtlinearen Randbereiche der Photodioden könnte ein Wandern des Laserstrahls bei einer kritischen Justage zu Schwankungen führen. Jedoch wurde sichergestellt, dass die Systeme so justiert sind, dass gewisse Bewegungen des Laserspots auf den Dioden die Detektionssensitivität nicht beeinflussen. Des Weiteren wurde stets auf eine ausreichende Warmlaufphase der Systeme und eine konstante Raumtemperatur geachtet.
2. **Leistungsrauschen:** Schwankungen in der Ausgangsleistung des Lasers werden sich auch in Schwankungen in den Diodensignalen niederschlagen. Diese werden in der Transmissionsmessung jedoch durch die Normierung mittels der I_0 -Messung eliminiert. Durch die schräge Justage der Fenster sollen Interferenzeffekte vermieden werden, durch die Verwendung von gegengespannten Photodioden mit einem weiten Linearitätsbereich werden Linearitätsfehler minimiert.

3. **Ausleserauschen:** Das Ausleserauschen kann sich aus diversen Fehlerquellen wie Schrotrauschen, Signalstörungen auf den Kabeln oder durch die Digitalisierung zusammensetzen. Es ist unabhängig von der eigestellten Laserfrequenz und wird dem entsprechend auch in Messungen im flachen Maximum der Transmissionskurve bei T=100% erkennbar sein.
4. **Frequenzrauschen:** Schwankungen in der Frequenz des Lasers, stammen sie nun aus durch mechanische und akustische Störungen des Resonatoraufbaus oder werden sie durch die Regelung erzeugt, schlagen sich im Bereich der größten Steigung der Transmissionskurve maximal in der Schwankungsbreite der gemessenen Transmission (bei T=50%) nieder.

Es werden folgende Systeme untersucht:

1. „Doppler-Verdi“:
 - a. Laser: Coherent Verdi-V5 (SN 510100390) [Coherent, 2007]; betrieben mit 1W
 - b. Wavelengthmeter: High Finesse WS-U 10 (SN 633) mit HeNe-Laser SIOS SL02/1 (SN 085450908)
 - c. Iodzelle: Sättigungstemperatur 60°C; stabilisiert auf 65°C
 - d. Photodioden: Thorlabs DET36A mit einem Signalpegel von ca. 6V auf der I-Diode (abgeschlossen mit 10k Ω) und ca. 2,5V auf der IO-Diode (abgeschlossen mit 5k Ω) bei 1W Soll-Leistung des Lasers
 - e. Software: Labview DLR_FRS_v1.8.7.2
 - f. Datenaufnahme: National Instruments BNC-2110 [National Instruments, 2007] (Digitalisierungsraster 1kHz; Dynamikbereich 10V für die I-Diode und 5V für die IO-Diode)
 - g.
2. „Doppler-neuer Azur“:
 - a. Laser: Azur Light Systems ALS-GR-532 (SN 085450908); betrieben mit 1W Soll-Leistung des Lasers
Sonst identisch zu „Doppler-Verdi“
3. „FRS-alter Azur“:
 - a. Laser: Azur Light Systems ALS-GR-532 (SN ALS GR 172) [Azurlight Systems, 2020; NKT Photonics A/S, 2016]; betrieben mit 1W
 - b. Wavelengthmeter: High Finesse WS-U (SN 881) mit HeNe-Laser SIOS SL03 (SN 181140110)
 - c. Iodzelle: Sättigungstemperatur 25°C, stabilisiert auf 35°C
 - d. Photodioden: Thorlabs DET36A mit einem Signalpegel von ca. 0,65V auf der I-Diode (abgeschlossen mit 50k Ω) und ca. 0,3V auf der IO-Diode (abgeschlossen mit 100k Ω) bei 1W Soll-Leistung des Lasers
 - e. Software: Labview DLR_FRS_v1.8.7.2
 - f. Datenaufnahme: National Instruments BNC-2090A [National Instruments, 2007] (Digitalisierungsraster 1kHz; Dynamikbereich 1V für die I-Diode und 0,5V für die IO-Diode)

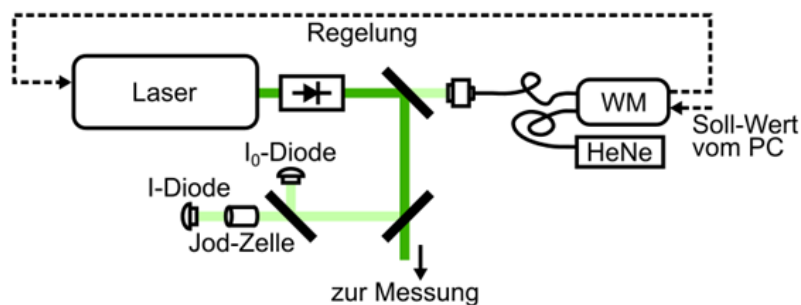


Abbildung 1: Schematische Darstellung der verwendeten Aufbauten. Ein Teil des Lichts des zu untersuchenden Lasers wird hinter der optischen Diode mit einer Faser ins Wavelengthmeter (WLM) geleitet. Das WLM ist des Weiteren mit dem PC (u.a. zur Soll-Wert-Übergabe zur Frequenzregelung) und einem Helium-Neon-Laser (HeNe) zur Autokalibration verbunden. Vom Hauptteil des Laserlichtstrahls wird wiederum ein Teil abgespalten. Dieser Teilstrahl wird nochmals geteilt: Ein Teil geht auf die I₀-Diode zur Leistungsnormierung und der andere Teil passiert die Iod-Zelle und das durch diese transmittierte Licht wird auf der I-Diode detektiert.

3.1. Schwankung der Leistungsmessung:

Um zu messen, wie stark die Leistung der Laser schwankt, wurden zunächst I₀-Messungen analysiert. Es wurde über 500 s mit einer Datenrate von 1 kHz aufgezeichnet. Für eine weitere Messung wurden die Parameter beibehalten und zusätzlich alle 60s eine Autokalibration des Wavelengthmeters (siehe Abschnitt 5) durchführt.

Tabelle 1:

System:	Doppler-Verdi	Doppler-neuer Azur	FRS-alter Azur
rel. Breite	0,001142	0,000927	0,017852
rel. Breite (inkl. Autokal.)	0,00122	0,000798	0,01774

Das FRS-System mit dem älteren Azur-Laser zeigt hier eine um mehr als eine Größenordnung höher Schwankungsbreite im Vergleich zum Dopplersystem. Bei diesem liegen die Schwankungsgrößen in derselben Größenordnung.

3.2. Schwankung der Transmissionsmessung bei T=100%:

Nun wurde die normierte Transmission I/I_0 im flachen Maximum des Transmissionsspektrums ($18790,046\text{cm}^{-1}$ für das Doppler- bzw. $18790,034\text{cm}^{-1}$ für das FRS-System¹) betrachtet, um zu sehen, wie gut die Leistungsnormierung funktioniert. Wieder wurde über 500s mit einer Datenrate von 1kHz aufgezeichnet.

Tabelle 2:

System:	Doppler-Verdi	Doppler-neuer Azur	FRS-alter Azur
rel. Breite	0,001212	0,00074	0,0077
rel. Breite (inkl. Autokal.)	0,001199	0,000782	0,007629

¹ Wie in Abb. 3 zu sehen hat die kältere Zelle im FRS-Aufbau ein deutlich breiteres Transmissionsmaximum. Um den Einfluss der Frequenzschwankung des Lasers weiter zu minimieren, wurde hier mit $18790,034\text{ cm}^{-1}$ der mittlere Punkt dieses Maximums gewählt.

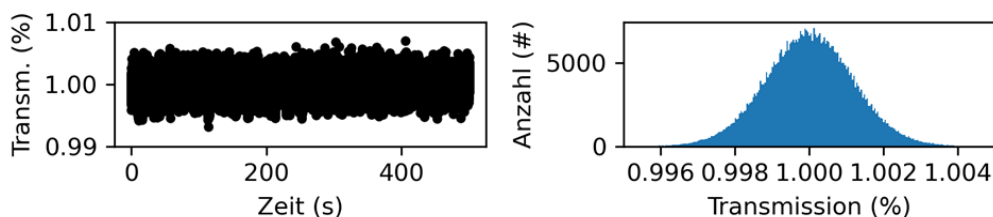


Abbildung 2: **links:** Die Transmission im System Doppler-Verdi gemessen mit einer Datenrate von 1kHz bei einer Wellenzahl von 18790,046cm⁻¹ über 500s. **rechts:** Ein Histogramm der gemessenen Transmissionswerte.

Man sieht, dass die Schwankungsbreiten im Dopplersystem in der normierten Messung der Transmission bei T=100% vergleichbar mit denen aus der Leistungsmessung sind. Im Gegensatz dazu verringert die Normierung die Schwankungsbreiten im FRS-System deutlich. Trotzdem ist Schwankungsbreiten im FRS-System eine Größenordnung größer im Vergleich zum Dopplersystem.

3.3. Schwankung der Transmissionsmessung bei T=50%:

Hierfür wurde die normierte Transmission I/I₀ im Bereich der maximalen Steigung des Transmissionsspektrums (18790,061cm⁻¹ für beide Systeme) betrachtet. Wieder wurde über 500s mit einer Datenrate von 1kHz aufgezeichnet.

Tabelle 3:

System:	Doppler-Verdi	Doppler-neuer Azur	FRS-alter Azur
rel. Breite	0,022952	0,016468	0,009326
rel. Breite (inkl. Autokal.)	0,022996	0,018322	0,009392

Da für die Messungen unterschiedliche Iod-Zellen verwendet wurden, muss diese Schwankungsbreite in der Transmissionsmessung anhand der Steigung des Transmissionsspektrums bei der eingestellten Laserfrequenz in eine Schwankungsbreite in der Frequenz umgerechnet werden. Dazu muss die Schwankungsbreite der Transmissionsmessung bei T=50% durch die Steigung einer Geraden, welche im Bereich um T=50% dem Transmissionsspektrum angepasst wurde, geteilt werden (siehe Abbildung 3).

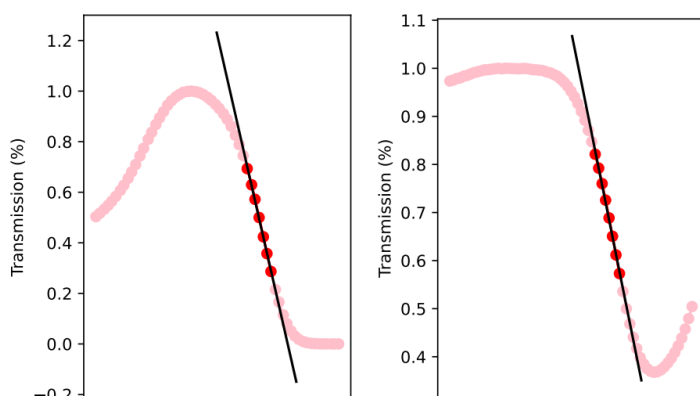


Abbildung 3: **links:** Transmissionsspektrum der 60°C-Zelle im Dopplersystem. Im Bereich der halben Transmission wurde eine Gerade mit der Steigung $m=-0,002301 \text{ \%}/\text{MHz}$ angepasst. **rechts:** Transmissionsspektrum der 25°C-Zelle im FRS-System. Im Bereich der halben Transmission wurde eine Gerade mit der Steigung $m=-0,001193 \text{ \%}/\text{MHz}$ angepasst.

Tabelle 4:

System:	Doppler-Verdi	Doppler-neuer Azur	FRS-alter Azur
Freq.-Breite [MHz]	4,9878	3,5787	3,9075
Freq.-Breite (inkl. Autokal.) [MHz]	4,9973	3,9816	3,9352

Im Kontrast zu den vorherigen Messungen liegen die gemessenen Schwankungsbreiten in allen untersuchten Systemen nahe beieinander wobei das Dopplersystem mit dem Verdi eine etwas größere Schwankungsbreite in der Frequenz aufweist.

4. Ergebnis:

Die untersuchten Systeme weisen eine ähnliche Frequenzbreite auf. Die ermittelte Frequenzbreite liegt in beiden Fällen in einer Größenordnung, welche für Messungen mit einer Genauigkeit im Bereich bis ca. 1,5m/s bis 2m/s geeignet ist.

Die Zusammensetzung weist jedoch Unterschiede auf:

Beim Dopplersystem mit beiden Lasern ist die relative Schwankungsbreite der Messungen bei einer Transmission bei T=100% nur ca. 10% der bei T=50%, was zu dem Eindruck führt, dass das Frequenzrauschen des Lasers hier einen Großteil der Breite ausmacht.

Beim FRS-System steigt die Schwankungsbreite dagegen von den Messungen bei T=100% nur um ca. 20% an, wenn mit den Messungen bei T=50% verglichen wird. Somit scheint das Frequenzrauschen hier nicht so dominant zu sein.

Zur Veranschaulichung der ermittelten Schwankungsbreiten können diese anhand der Steigung aus Abschnitt 3.3 umgerechnet werden. Damit ergeben sich für die Messungen bei T=100% (in denen die Frequenzschwankungen des Lasers keinen Einfluss haben sollten und dem entsprechend nur die Ungenauigkeit der Detektionseinheit zeigt):

Tabelle 5:

System:	Doppler-Verdi	Doppler-neuer Azur	FRS-alter Azur
Freq.-Breite (inkl. Autokal.; T=100%) [MHz]	0,26056	0,16994	3,19651

Geht man für eine Abschätzung der Größenordnung davon aus, dass sich die Gesamtschwankungsbreite als Summe der Quadrate der einzelnen Beiträge ergibt:

$$\Delta_{ges} = \sqrt{\Delta_{Laser-Freq.}^2 + \Delta_{Detektion}^2}$$

kann durch Umformung dieser Gleichung der Anteil der Schwankungsbreite errechnet werden, welcher nur aus dem Laser und der zugehörigen Regelung stammt:

Tabelle 6:

System:	Doppler-Verdi	Doppler-neuer Azur	FRS-alter Azur
Freq.-Breite (inkl. Autokal.; „nur Laser“) [MHz]	4,9905	3,97797	2,29524

Dies verdeutlicht die zuvor geäußerte Interpretation: In den Doppler-Systemen hat die Schwankung der ermittelten Laserfrequenz ihren hauptsächlichlichen Ursprung in den Frequenzschwankungen der Laser (inkl. Regelung). Im FRS-System scheint dieser Beitrag deutlich geringer zu sein. Hier ergibt sich dennoch eine vergleichbare Gesamtschwankungsbreite da andere bzw. weitere Unsicherheitsquellen im Bereich der Detektion maßgeblich beitragen. Eine mögliche Ursache sind die deutlich unterschiedlichen verwendeten Signalpegel.

5. Einfluss der Autokalibration:

Die Frequenzstabilisierung des Lasers wird durch den Vorgang der Autokalibration des Wavelengthmeters gestört. Während der Autokalibration setzt die Erfassung der Laserfrequenz als Ist-Wert (und dem entsprechend auch die Frequenz-Regelung des Lasers) aus. Auch nach der Autokalibration kann es etwas dauern, bis das Wavelengthmeter die Laserfrequenz wieder auf den Sollwert regelt. Daher werden die aufgezeichneten Messwerte während und kurz nach der Autokalibration in der Berechnung der Schwankungsbreite nicht berücksichtigt.

Vergleicht man für die erwähnten Messungen jeweils die angegebenen Schwankungsbreite mit und ohne Autokalibration, ist die Breite für Messungen mit Autokalibration in beinahe allen Messreihen leicht erhöht.

6. Einfluss der Autokalibration für längere Messdauer:

Bei der Betrachtung längerer Messreihen bei $T=50\%$ über 2000s wie in Abbildung 4 erkennt man einen leichten Anstieg der Transmission. In der Messung mit Autokalibration (alle 600s) springt die gemessene Transmission wieder zurück. Es scheint, dass die vom Wavelengthmeter stabilisierte Laserfrequenz über einen längeren Zeitraum (hier einige 100s) sichtbar driftet, dies jedoch durch die Autokalibration wieder eingefangen werden kann.

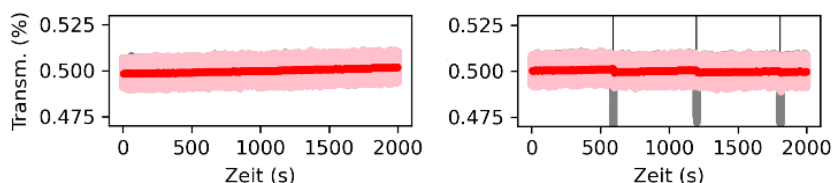


Abbildung 4: **links:** Messung der Transmission mit einer Datenrate von 1kHz im FRS-System bei einer Wellenzahl von $18790,061\text{cm}^{-1}$ über 2000s. Zur Verdeutlichung des zeitlichen Trends sind zusätzlich gebinnte Werte aufgetragen. **rechts:** Eine weitere Messreihe, bei der alle 600s (schwarz markiert) eine Autokalibration des Wavelengthmeters durchgeführt wurde. Die Transmissionsmessungen, welche durch die Autokalibration gestört wurden (grau), wurden für die Auswertung ausgeblendet.

Bei diesen längeren Messungen ist (im Gegensatz zu den vorherigen) die Schwankungsbreite mit Autokalibration geringer ist als ohne.

Insgesamt bestätigt sich die Notwendigkeit der Autokalibrierung in system- und umgebungsabhängigen Abständen. Einerseits durch Fehler in der Messung der Frequenz des HeNe's, andererseits aufgrund eines zwar nicht zu erwartenden, aber aus den vorliegenden Messungen weder bestätigten noch auszuschließenden Drift des HeNe's, ist die Autokalibrierung selbst fehlerbehaftet und führt so zu einem systematischen shift zwischen Daten vor und Daten nach der Autokalibrierung.

7. Ausblick/weiterführende Untersuchungen:

Der Vergleich der ermittelten Schwankungsbreiten in der Leistungsmessung und bei $T=100\%$ zwischen dem FRS-System und dem Dopplersystem wirft die Frage auf, wo die beobachteten Unterschiede ihren Ursprung haben. Wie in Abschnitt 4 gezeigt, kann sowohl das frequenzstabilisierte Lasersystem als auch die Transmissionsdetektion an der Jod-Zelle zur Schwankung beitragen.

Um die Ursache(n) der Schwankungsbreite einzugrenzen sollten die größten Unterschiede in den Systemen betrachtet werden:

- Unterschiedliche Laser bzw. der ältere Azur mit vielen Betriebsstunden
- Unterschiedliche Wavemeter
- Unterschiedliche Jod-Zellen mit unterschiedlich steilen Absorptionsflanken
- Unterschiedliche Signalpegel auf den Dioden der Referenzeinheit (zur Referenzzelle aus dem Hauptstrahl ausgekoppelte Leistung; ggf. Filter; Abschlusswiderstände; Dynamikbereich der Analog-Digital-Wandlung)

Für weiterführende Untersuchungen sollten (soweit umsetzbar) die Systeme in möglichst vielen Aspekten angeglichen werden oder einzelne Komponenten durch Austausch in ansonsten gleichen Systemen getestet werden.

Grundsätzlich bleibt das Ziel dieser und weiterführender Untersuchungen, die Quelle(n) der Schwankungsbreite zu identifizieren um im Anschluss das System gezielt zu optimieren um die Schwankungsbreite zu verringern. Dies würde eine präzisere Bestimmung der beobachteten Strömungsgeschwindigkeit ermöglichen.

8. Literaturverzeichnis

Azurlight Systems. (2020). *user manual ALS-BL/GR-488/5XX-XX-X-XX-SF*.

Coherent. (2007). *Operator's Manual Verdi Single FAP Diode-Pumped Laser*.

Doll, U. (2016). *Gefilterte Rayleigh-Streuung zur simultanen Bestimmung von Druck-, Temperatur- und Geschwindigkeitsfeldern in Gasströmungen*. TU Dresden.

National Instruments. (2007). *BNC-2090A User Manual*.

National Instruments. (2007). *Installation Guide BNC-2110*.

NKT Photonics A/S. (2016). *Koheras Adjustik Instruction Manual*.

Röhle, I. (1999). *Laser Doppler Velocimetry auf der Basis frequenzselektiver Absorption: Aufbau und Einsatz eines Doppler Global Velocimeters*. Ruhr-Universität Bochum.