

**Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.**

**DLR – IB – 325 – 13 – 08**

**Vorbereitung, Durchführung und Analyse eines  
instationären DGV-Prinzipversuches  
in einem Glockeneinlauf**

**Interner Bericht**

**G. Stockhausen, M. Beversdorff**

Institutsleiter:  
**Prof. Dr.-Ing. R. Mönig**

Bearbeiter:  
**Dr.rer.nat. G. Stockhausen**

**Köln-Porz, November 2008**

# INHALT

<b>1. Einleitung</b>	<b>S. 3</b>
<b>2. Konstruktion und Bau eines Adaptionmoduls für eine seitliche Beobachtungsrichtung</b>	<b>S. 4-6</b>
<b>3. Durchführung und Analyse eines instationären Prinzipversuchs</b>	<b>S. 7-13</b>
<b>4. Folgerungen</b>	<b>S. 14-16</b>

## 1. Einleitung

Ausgehend von einer Kooperationsvereinbarung Anfang der Neunziger Jahre zwischen MB/EP-CFW Sindelfingen und DASA-MT635 Ottobrunn wurde die Doppler Global Velocity (DGV) Messtechnik in Zusammenarbeit mit dem DLR-Institut für Antriebstechnik hinsichtlich der industriellen Verwendbarkeit für Strömungsmessungen in Triebwerks-Einlaufrohren und der PKW-Aerodynamik im Windkanal untersucht und weiterentwickelt.

Die mit der Phase IV „Durchführung von Versuchen zur aerodynamischen Vermessung der A.I.P. in einem vorhandenen Einlaufmodell“ erzielten Ergebnisse (IB-325-14-06) für stationäre Messungen ermutigten eine weitergehende Untersuchung, inwieweit sich die DGV-Messtechnik auch für instationäre Messungen der Triebwerks-Einlaufparameter eignet (Phase 6).

Zur Untersuchung dieser Fragestellung wurde 2007 am Institut für Antriebstechnik eine Diplomarbeit (IB-325-08-07) angefertigt. Diese zeigte, dass sich im Laborversuch an einer Freistahlströmung Belichtungszeiten von unter  $250\mu\text{s}$  erreichen lassen, was einer Frequenzauflösung von 4 kHz entspricht. Durch den Einsatz größerer Seedingtröpfchen konnte dabei das Signal um den Faktor 100 gesteigert werden. Um eine Aussage unter realistischen Prüfstandsbedingungen (Windkanal) treffen zu können, ist ein Prinzipversuch mit dem Windkanal tauglichen Rauchgenerator VI Count zwingend notwendig.

Für eine instationäre Messung mit dem DGV-Verfahren ist es erforderlich, die Messfläche (A.I.P.) gleichzeitig aus mindestens 3 unterschiedlichen Richtungen zu betrachten. Aufgrund der Strömungsbeeinflussung durch den Stemadapters kommen nur Beobachtungsrichtungen stromab der A.I.P. in Frage. Daher ist es naheliegend, für eine instationäre 3-komponentige DGV-Messanordnung mehrere (3-4) Kamerastems wandnah (seitlich) und stromab der A.I.P. zu positionieren.

In diesem Bericht sollen die experimentellen Modifikationen (Adaption des Kamerastems für eine seitliche Beobachtungsrichtung), die Durchführung eines Prinzipversuches in einem Glockeneinlauf, die Ergebnisse und die daraus abgeleitete Folgerungen gezeigt werden. Die vorgestellten Arbeiten beziehen sich auf die Aufträge 3370210/21 („Konstruktion und Bau eines Adaptionsmoduls“) sowie 3370234/1 („Anwendbarkeit der Phase 6“).

## 2. Konstruktion und Bau eines Adaptionmoduls für eine seitliche Beobachtungsrichtung

Um das bereits vorhandene Bildleitermodul der DGV-2-Messzelle und den dazugehörigen Kamerastem für einen instationären Prinzipversuch verwenden zu können, musste ein mechanischer Adapter konstruiert und gebaut werden. Dieser ermöglicht es, das Beobachtungsmodul so nah an die Wand des Bildleitermoduls herauszuziehen, dass mit einem Neigungswinkel von  $8^\circ$  die gesamte A.I.P. durch die Verengung der vorgebauten Venturidüse beobachtet werden kann. Damit ist die Voraussetzung für einen realistischen Prinzipversuch geschaffen.

Abb.1 zeigt den seitlich eingebauten Stem in der Absaugstrecke mit installiertem Bildleitermodul:

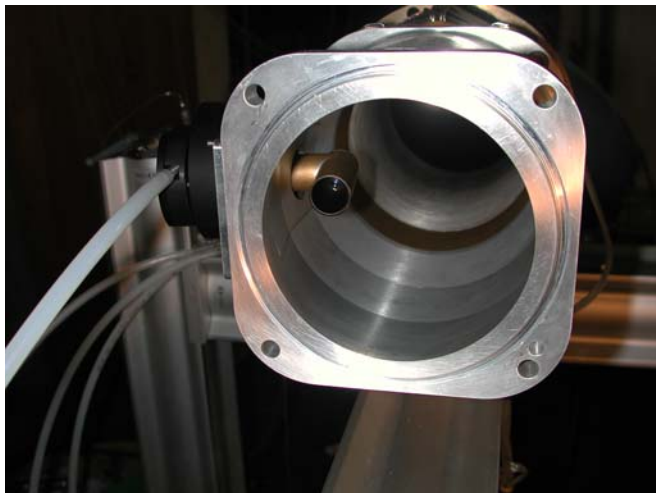


Abb.1: Seitlich eingebauter Stem im Bildleitermodul

Abb.2 stellt einen Schnitt durch die DGV-2-Messzelle mit eingebautem Stem in seitlicher Beobachtungsposition dar, welche durch das Adapterstück realisiert wird. Abb.3. zeigt die Details der Konstruktion, nach denen der Adapter in der Zentralwerkstatt des DLR gefertigt wurde.

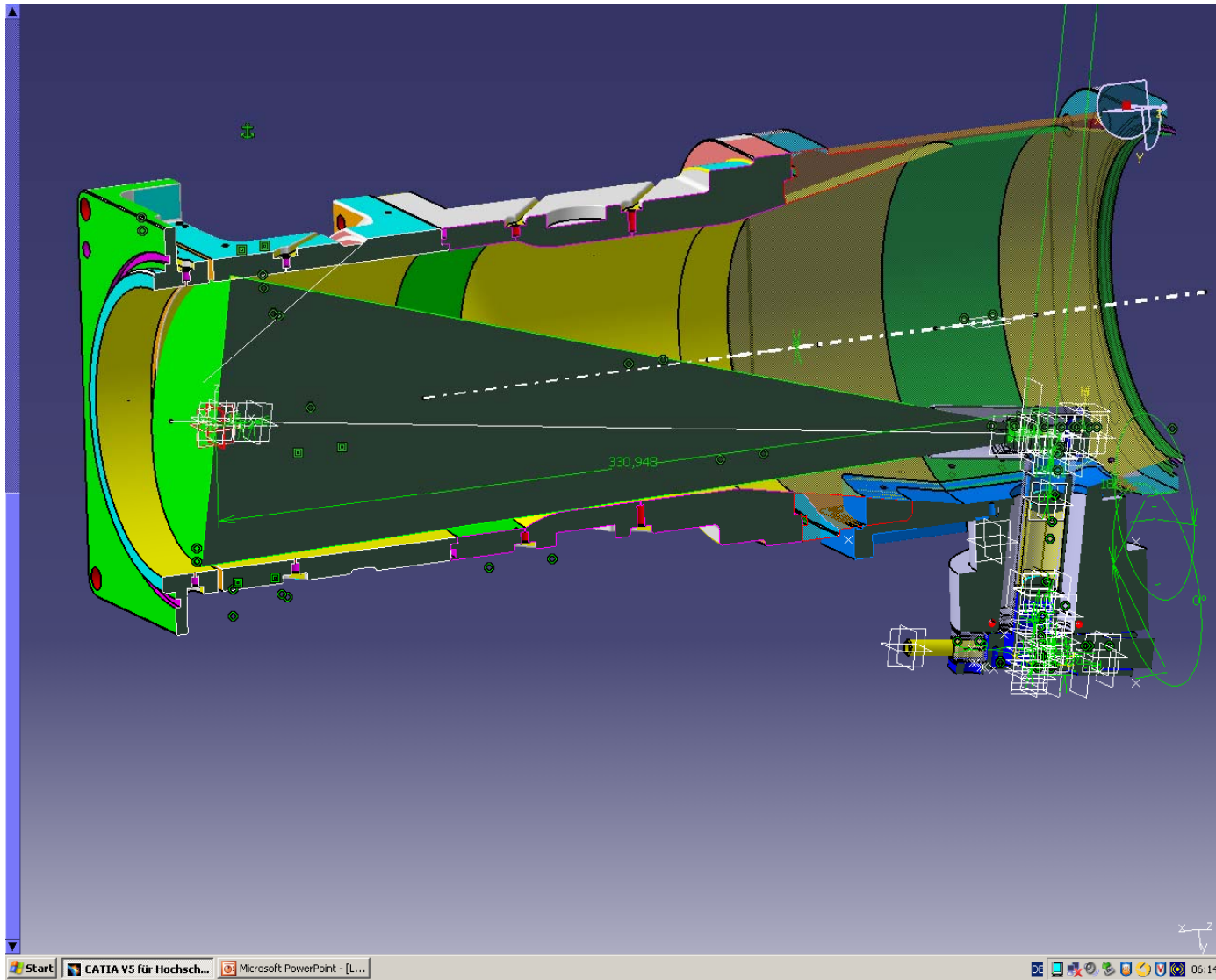


Abb.2: Schnitt durch die DGV-Messzelle mit seitlicher Beobachtungsrichtung

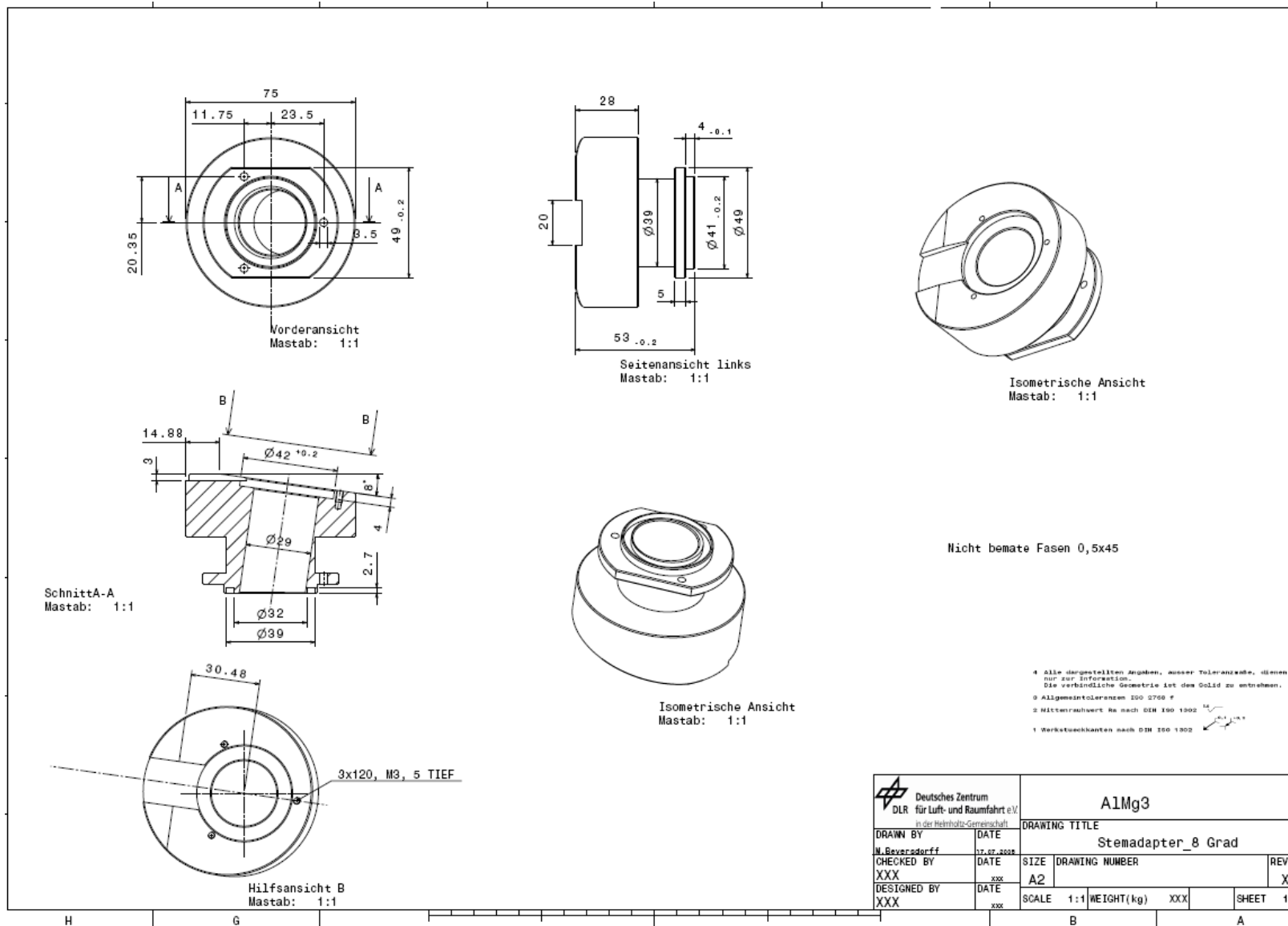


Abb.3: Konstruktionszeichnung für den Stemadapter

### 3. Durchführung und Analyse eines instationären Prinzipversuches

Nach Fertigstellung des Stemadapters wurde am 17.09.2008 der Prinzipversuch zum instationären DGV an der Einlauf-Rohrstrecke durchgeführt. Folgende Parameter wurden konstant gehalten:

- 1 Beobachtungsrichtung und ein dazu senkrechter Lichtschnitt (Orientierung irrelevant, da Beobachtungswinkel immer ungefähr  $90^\circ \pm 8^\circ$  ist)
- Leistung im Lichtschnitt = 200mW (linear zur Signalstärke)
- Stabilisierung der Starttransmission auf 15,8%
- Massenstrom = 1.0 kg/s, konstant, kritische Durchströmung der Drossel
- Pixelbinning 4x4

Während des Versuches wurden folgende Parameter variiert:

- Seedingvordrucks und Seedingdauer (entspricht Variation der Seedingmenge)
- Belichtungszeit
- Spülluftmenge (Lichtschnitt und Stem)

Die DGV-Signale wurden dann nach folgenden Kriterien ausgewertet und analysiert:

- Signalstärke
- Transmission (Frequenz)
- Verschmutzung

Die Zielstellung war es, einen optimalen Betriebszustand hinsichtlich maximaler Signalintensität, ausreichender Messgenauigkeit und minimaler Verschmutzung zu finden. Die so erreichte Signalintensität kann dann auf ein optimiertes System (leistungsstärkerer Laser, Einsatz von intensivierten CCD-Kameras) hochgerechnet werden, um eine Abschätzung für die erreichbare minimale Messzeit des instationären DGV-Verfahren zu erhalten.

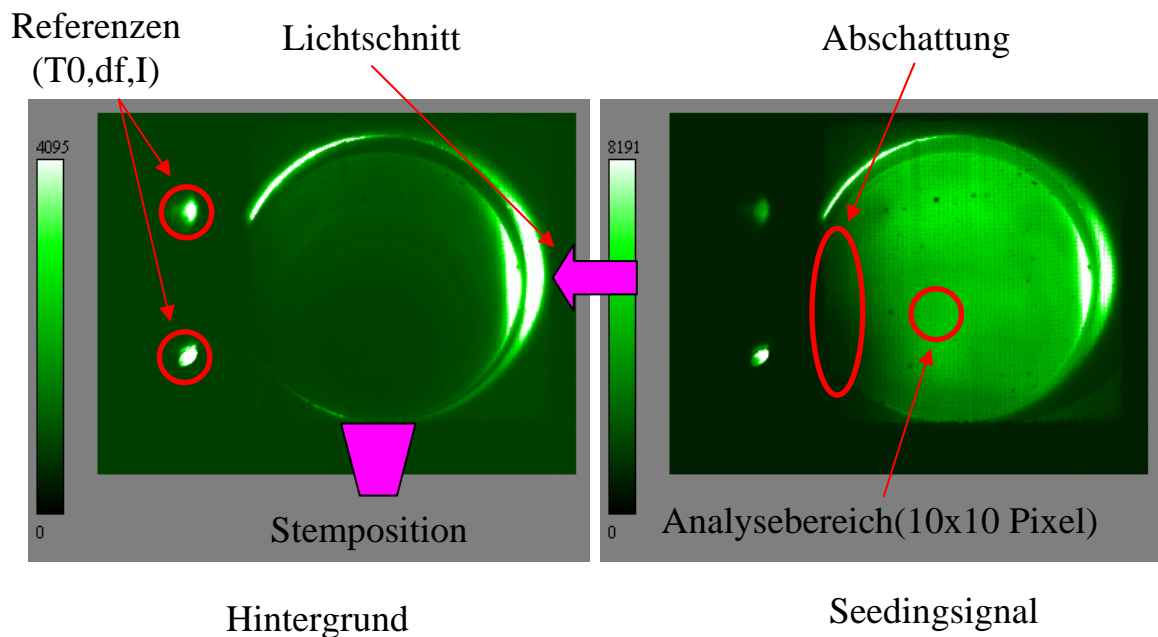


Abb.4: Typische Aufnahmen während des Prinzipversuches (Referenzkamera)

In Abb.4 sind 2 typische DGV-Aufnahmen gezeigt. Neben den beiden hellen Punkten auf der linken Bildseite (Referenzsignale für Transmission und Laserintensität) erkennt man den Umriss der A.I.P. als hellen Ring (Lasereflektionen) sowie die Einlaufinnenseite als Hintergrund. Im rechten Bild wurden Partikel der Strömung hinzugegeben (Seeding) und das Streusignal aufgenommen. Zur Auswertung wurde ein Bereich nahe der Mitte gewählt, wo der Hintergrund klein und die Signalintensität fast maximal ist. Des Weiteren erkennt man am linken Rand der A.I.P. eine dunkle Zone, die von einer Abschattung des Bildes durch die Einkopplung der Referenzsignale entsteht. Diese kann durch sorgfältige Justage der Einkopplung zum Verschwinden gebracht werden und beeinflusst den instationären Prinzipversuch nicht.

Insgesamt wurden 6 Messungen mit verschiedenen Einstellungen durchgeführt. Tabelle 1 zeigt die charakteristischen Einstellungen für jeden Messpunkt sowie die beobachtete Verschmutzung an den einzelnen Komponenten. Dabei bedeuten  $T_s$  = Seedingdauer,  $T_b$  = Belichtungszeit,  $m$  = Spülluftmassenstrom.



MP	p(bar)	Ts(s)	Tb(s)	m(LS/Stem)(g/s)	Verschmutzung
10	1.2	30	1.0	2.5/2.5	Alles sauber
11	1.5	60	1.0	2.5/2.5	LS zur Hälfte, Stem o.k.
12	1.5	kont.	1.0	2.5/2.5	LS zur Hälfte, Stem o.k.
13	2.5	kont.	0.5	5.0/5.0	LS 2/3, Stem leicht
14	2.5	kont.	0.5	5.0/5.0	LS 2/3, Stem leicht
15	5.0	kont.	0.5	5.0/5.0	LS ganz, Stem leicht

Tab.1: Einstellungen und Verschmutzungseffekte während des Prinzipversuches

Die Einstellungen der Messpunkte 10 und 11 entsprechen den Bedingungen der stationären Einlaufmessungen. Abgesehen von einer Undichtigkeit im Lichtschnitt, die in der oberen Hälfte Streifen verursacht, bleiben die untere Lichtschnitthälfte und der Kamerastem sauber. Eine Steigerung der Partikeldichte durch Vergrößerung des Vordrucks am Seedinggenerator bewirkt eine Steigerung der Signalintensität, wie man in Abb.5 im Vergleich der Messpunkte 11 und 13 erkennen kann. Allerdings nimmt die Verschmutzung trotz verdoppelter Spülluftmenge im Lichtschnitt (dunkle Streifen in unterer Hälfte) zu. Die Verschmutzung auf dem Stem ist nicht besonders stark ausgeprägt, da die Streifen im Lichtschnitt noch scharf zu erkennen sind. Der Messpunkt 14 wurde ca. 5Minuten nach Messpunkt 13 bei gleichbleibenden Einstellungen aufgenommen. Die Seedingdichte in der Messhalle war dann so groß, dass die Sichtweite unter 1m betrug. Zusätzlich ist eine Zunahme der Lichtschnittverschmutzung bei andauernder Seedingzugabe zu beobachten. Eine weitere Erhöhung des Vordrucks (Messpunkt 15) ergab zwar nochmals eine Steigerung der Seedingdichte, führte aber nicht zu einer weiteren Signalsteigerung, da die Verschmutzung im Lichtschnitt gleichzeitig die nutzbare Laserintensität verringerte.

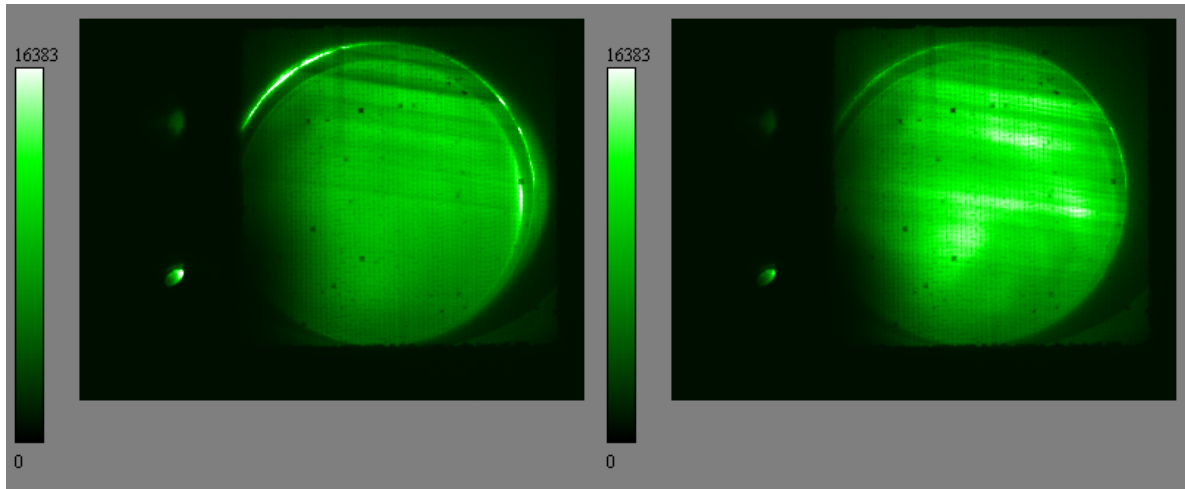


Abb.5: a,b Signalbilder der Messpunkte 11 und 13  
a: MP 11 ( $T=1.0s$ ,  $p=1.5bar$  für 60s) , Bedingung für stationäres DGV  
b: MP 13 ( $T=0.5s$ ,  $p=2.5bar$  kont.) , Bedingung für instationäres DGV

MP	$I_{max}(Cts/s)$
10	5600
11	10300
12	18400
13	29000
14	21200
15	18200

Tab.2: Gemessene Signalintensität pro Sekunde

Tabelle 2 zeigt die gemessenen Signalintensitäten pro Sekunde der verschiedenen Messpunkte des instationären Prinzipversuchs. Die Versuchsbedingungen der Messpunkte 14 und 15 sind aufgrund der genannten Verschmutzungseffekte, die auch die Modelloberfläche erreichen, für einen Windkanalbetrieb nicht tolerierbar. Daher wurde als optimistische Abschätzung der maximalen Signalintensität der Messpunkt 13 gewählt.

Ein wesentliches Ergebnis ist die Steigerung der Signalintensität durch eine Erhöhung der Seedingmenge nur um den Faktor 5 im Gegensatz zum Laborversuch, welcher einen Faktor 100 erreichte, was auf den erheblich größeren Tröpfchendurchmesser zurückzuführen ist.

Ein weiterer Untersuchungspunkt war die Konstanz des gemessenen Frequenzshifts (und damit der Geschwindigkeitskomponente) im ausgewählten Messbereich über die Variation der Einstellungen.

MP	ILas(Cts/s)	T0(%)	dT(%)
10	8257	15.8	42.4
11	8075	15.8	42.5
12	8148	15.9	42.1
13	8298	15.6	40.6
14	7790	15.9	37.3
15	8362	15.9	38.8

Tab.3: Verlauf der Laserintensität, des Stabilisierungspunktes (T0) und der Transmissionsänderung (dT) während des Prinzipversuches.

Wie in Tabelle 3 zu erkennen ist, verringert sich die gemessene Transmissionsänderung, die der Frequenzverschiebung entspricht, ab dem Messpunkt 13 signifikant. Die Ursache für dieses Verhalten liegt wahrscheinlich in der bekannten Tatsache, dass ab einer kritischen Seedingdichte der Effekt der Mehrfachstreuung eintritt. Als Konsequenz muss für das instationäre DGV-Verfahren die Seedingdichte gegenüber den Einstellungen von Messpunkt 13 reduziert werden. Dies bedeutet aber eine weitere Absenkung der Signaleintensität, wodurch sich die erreichbare minimale Belichtungszeit wieder erhöht. Da aber bei Messpunkt 13 schon deutliche Verschmutzungen im Lichtschnitt erkennbar sind, wird für die folgende Abschätzung der möglichen Frequenzauflösung trotzdem eine Signalintensität von 30000Cts/s gewählt, die sich aus der Interpolation von Messpunkt 12 und der (zu niedrig gemessenen) Intensität von Messpunkt 13 ergibt (s. Tab.2).

## **Abschätzung der erreichbaren Zeitauflösung:**

Laserleistung = 10W (Scheibenlaser)

Kameraempfindlichkeit x 10 (2 intensivierte Kameras)

Prinzipversuch: Laserleistung = 200mW, Signal=30000Cts/s (MP12-13)

DGV-Anforderung mindestens 10000Cts.:

$$\text{Erreichbare minimale Belichtungszeit} = \frac{10000\text{Cts} \cdot 0.2\text{W}}{30000\text{Cts/s} \cdot 10\text{W} \cdot 10} = 670\mu\text{s}$$

Erreichbare Frequenzauflösung = 1.5 kHz

Diese Abschätzung beinhaltet allerdings zwei zu optimistische Prognosen. Zum einen ist die Leistung des Lasers, die zerstörungsfrei in eine Faser eingekoppelt werden kann, auf ca. 5W beschränkt. Zum anderen ist die Transmission durch einen Lichtwellenleiter verlustbehaftet, d.h., es werden nur etwa 70% der eingekoppelten Leistung übertragen. Daher ist eine realistischere Frequenzauflösung von ca. 500Hz zu erwarten, die um den Faktor 8 kleiner ist als die notwendige (4kHz).

Die Ursache in der deutlich geringeren Zeitauflösung trotz leistungsstärkerem Laser und dem Einsatz von intensivierten Kameras gegenüber dem Laborversuch der Diplomarbeit liegt in mehreren Faktoren begründet. Wie in Tabelle 4 gezeigt, profitiert der Laborversuch neben den größeren Seedingtröpfchen auch von der höheren Gesamt-Empfindlichkeit, die eine Funktion von Beobachtungswinkel und Beobachtungsoptik ist. Auch die geringere Lichtschritthöhe und die Vermeidung von Faserverlusten tragen dazu bei. Insgesamt ergibt sich eine höhere Empfindlichkeit um den Faktor 60, der sich aus den Anteilen Beobachtungswinkel (Faktor 5), Beobachtungsoptik (Faktor 4), Fasertransmission (Faktor 1.5) und Lichtschritthöhe (Faktor 2) zusammensetzt. Mit dem Seedingvorteil von 100:5=20 ergibt sich insgesamt eine 1200-fach höhere Signalintensität, die durch die prognostizierte Hardware-Verbesserung (Laserleistung und intensivierte Kameras) nicht aufgefangen werden kann.

Parameter	Laborversuch	Einlaufversuch
Laserleistung	1W	10W (Prognose)
Kameraempfindlichkeit	1	10 (Prognose)
Lichtschritthöhe	50mm	107mm
Fasertransmission	100%	65%
Beobachtungswinkel	45°	90° (+/-17°)
Seedingzugabe	Lokal (nur Düsenluftstrom)	Global (gesamte Umgebung)
Tröpfchengröße	1-2µm	0.3-0.5µm
Beobachtungsoptik	25/50mm	12,5mm

Tab.4: Vergleich der relevanten Größen zwischen Laborversuch und Einlaufversuch

Als Ausweg bieten sich 2 Lösungsmöglichkeiten an, die im nächsten Abschnitt näher diskutiert werden:

- 1.) Signalsteigerung durch Pixel-Binning
- 2.) Signalsteigerung durch Einsatz von Laserlinien anstelle eines planaren Lichtschnittes

Beide Ansätze steigern die Signalintensität auf Kosten der räumlichen Auflösung. Da aber der zum Vergleich herangezogene stationäre Messrechner nur 40 Messpunkte hat, ist für eine Ermittlung der relevanten Triebwerkeinlaufparameter eine Reduzierung der DGV-Messpunkte durchaus möglich.

## 4. Folgerungen

Für den Einsatz eines planaren Lichtschnitts analog des stationären DGV ergeben sich folgende Schlüsse:

- Nach erfolgreicher Durchführung der Phase 4 und den vielversprechenden Ergebnissen der Diplomarbeit sind die Erfolgsaussichten für Phase 6 viel zu optimistisch beurteilt worden. Erfahrungen aus dem Verlauf der Phase 5 und Ergebnisse des Prinzipversuchs haben diese Einschätzung widerlegt. Es gibt noch einen erheblichen Entwicklungsbedarf.
- Es existiert eine erhebliche Diskrepanz zwischen geforderter und realistisch erreichbarer Frequenzauflösung ( $4\text{kHz} = 8 \cdot 500\text{Hz}$ ).
- Das notwendige sehr dichte Seeding wird erhebliche Verschmutzungen im Windkanal und am Modell verursachen. Der Einsatz einer geringeren Anzahl größerer Tröpfchen vergrößert nach unserer Erfahrung (EWA/PIV) das Problem und verschlechtert das Folgeverhalten.
- Um einer instationären DGV-Messtechnik in einem Triebwerkseinlauf realistische Erfolgsaussichten geben zu können muss die Seedingdichte reduziert werden können (gegenüber Messpunkt 13) und gleichzeitig die Signalstärke um eine Größenordnung erhöht werden!

Um den letzten Punkt zu erfüllen, bieten sich 2 Lösungen (Pixel-Binning und Linienlichtschnitt) an, die nun diskutiert werden sollen.

#### a) Erhöhung des Pixel-Binnings

Die vorhandene DGV-Kamera (PCO Sencicam QE) hat 1376x1040 Einzelpixel auf dem Chip (1 Megapixel). Das bereits verwendete 4x4 Binning ergibt 344x260 Pixel auf gesamten Chip. Da die A.I.P. eine Kreisfläche ist, besteht die nutzbare Messfläche maximal aus 260x260 Pixel. Durch 4 simultane Beobachtungsrichtungen ergeben sich 130x130 Pixel pro Quadranten. Damit lässt sich eine räumliche Auflösung von ca. 1mm/Pixel erreichen bei einer Gesamtzahl von 16900 Messpunkten in der A.I.P.

Durch ein weiteres Binning von 10x10 – entspricht einer Signalsteigerung von 100 – stehen pro Quadranten etwa 13x13 Messpunkte zur Verfügung. Diese Anzahl ist zwar deutlich größer als die des instationären Messrechens, beinhaltet jedoch eine grobe räumliche Mittelung, da einem solchen zusammengefassten „Hyper“-Pixel eine Fläche von ca. 1cmx1cm in der A.I.P. entspricht. Die Ausdehnung der Drucksonden ist dagegen mit Öffnungen von ca. 1,0mm bzw. 1,6mm deutlich kleiner. Dies bedeutet, dass die gemessenen instationären Druckwerte des DGV-Verfahren über eine 100-fach größere Fläche gemittelt werden als die der Drucksonden. Ein quantitativer Vergleich zwischen den beiden Verfahren ist somit nicht möglich. Die gemessenen Geschwindigkeitsgradienten würden erheblich kleiner sein als die des stationären DGV. Für die instationären Werte bleibt dieses Mittelungsproblem ebenfalls bestehen.

Mit dem vorhandenen DGV-Equipment ist mit dieser Technik eine minimale Zeitauflösung von etwa 1ms (entspricht 1kHz) zu erwarten. Der Einsatz von intensivierten CCD-Kameras würde dann die erforderliche Zeitauflösung von ca. 200µs (ATV-Zeitintervall des instationären Messrechens) unterschreiten. Die Kosten pro intensivierter Kamera belaufen sich zurzeit auf ca. 60.000€

Ein zusätzlicher Nachteil dieser Technik besteht in der Inkaufnahme eines zusätzlichen Messfehlers in der Geschwindigkeit, da der Beobachtungsvektor für einen Hyperpixel konstant ist, während für die Einzelpixel die Beobachtungsvektoren sich um so stärker unterscheiden je größer die Binningfläche ist.

## b) Einsatz eines Laserlinien-Lichtschnitts

Einen möglicherweise besseren Ansatz bietet die Gestaltung eines Laserlinien-Lichtschnitts. Der Unterschied zu einem planaren Lichtschnitt, bei dem das Laserlicht durch entsprechende Linsen gleichmäßig in der Messfläche verteilt wird, besteht in der deutlich höheren Lichtintensität pro Linie.

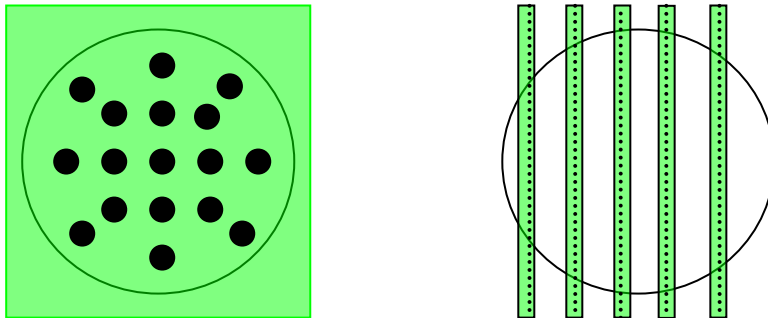


Abb.6: Gegenüberstellung der Varianten Binning und Laserlinien-Lichtschnitt

Die räumliche Auflösung wird beim Laserlinien-Lichtschnitt nur in einer Richtung (senkrecht zur Linienrichtung) verringert und ist abhängig von der Anzahl der erzeugten Linien. Im Vergleich zu einem gleichmäßigen Lichtschnitt (ca. 100mm Durchmesser) ist die Intensität bei einer Linie (ca. 0.5mm Durchmesser) um den Faktor 200 höher. Außerdem ist es nun möglich, einen leistungsstärkeren Laser voll auszunutzen, indem die Verteilung der Gesamtleistung vor Einkopplung in die Lichtleitfasern vorgenommen wird. D.h., Faserzerstörung und Brillouinstreuung können somit umgangen werden. Die Messgenauigkeit ist ebenfalls besser bei der Verwendung des Linien-Lichtschnitts, da jeder Punkt auf der Linie mit dem korrekten Beobachtungsvektor ausgewertet werden kann.

Aufgrund dieser Überlegungen ist die Variante Laserlinien-Lichtschnitt für das instationäre DGV-Verfahren zur Messung von Triebwerkseinlauf-Parametern der Variante Pixel-Binning vorzuziehen.