

BORDGESTÜTZTES WIRBELSCHLEPPEN-ERKENNUNGSSYSTEM (BoWES)

Th. Halldórsson, V. Ziegler
EADS-Corporate Research Centre, Germany
D-81663 München

R. Schneider
DaimlerChrysler Forschung und Technologie, Postfach 2360
D-89013 Ulm

ÜBERSICHT

Starke Wirbelschleppen im Nachlauf von Verkehrsflugzeugen stellen eine Gefahr für nachfolgende Flugzeuge dar und begrenzen die Kapazität großer Flughäfen. Die Aufgabe dieser Durchführbarkeitsstudie - im Rahmen des LuFoIII/IHK Vorhabens - ist die Ausarbeitung eines Sensorkonzeptes für vorausschauende Detektion von Wirbelschleppen im Luftraum vor dem Flugzeug, das ermöglichen soll den Piloten rechtzeitig zu warnen bzw. durch einen Eingriff in die Flugregelung ihren Einfluss auszuregeln. Ausgehend von dem physikalischen Erscheinungsbild der Wirbelschleppen werden hierfür verschiedene Messmethoden betrachtet, ihre Leistungsfähigkeit abgeschätzt und daraus ein bevorzugtes Sensorkonzept abgeleitet.

1. WIRBELSCHLEPPENERKENNUNG

1.1 Stand der Technik

Der wachsende Bedarf für ein Wirbelschleppenerkennungssystem, sowohl an größeren Flughäfen als auch im Flugzeug ist unbestritten. Doppler Wetterradars an Flughäfen und in Flugzeugen setzen das Vorhandensein von Hydrometeoren (Nebel, Wolken, Regen und Schnee) als Zielgröße voraus und sind wegen ihrer begrenzten Ortsauflösung und großen Reichweiten nicht geeignet um lokale Turbulenzen im Nahfeld des Flughafens oder unmittelbar vor dem Flugzeug zu detektieren. Für trübes Wetter und Nahbereich wird deshalb ein neues angepasstes Doppler-Radar gebraucht.

Scherwinde und Turbulenzen im klaren Wetter können mit Doppler-IR-Lidars mit Hilfe der Rückstreuung von Staubpartikeln der Luft, den Aerosolen, im Nahfeld detektiert werden. Das bekannteste ist das 2 µm Lidar der Fa. CTI [1] auf dem Hong Kong Flughafen. Verschiedene derartige Lidar-Systeme sind auch in Flugzeugen versuchsweise eingesetzt worden (durch NASA, Fa. CTI und Honeywell in USA sowie DLR und ONERA in Europa). Die Lidartechnik ist jedoch für die Wirbelschleppenerkennung vom Flughafen und im Flugzeug zur Zeit noch zu ungenau, kompliziert und teuer und erfordert eine weitere Entwicklung damit sie für den breiten Einsatz geeignet ist.

Wegen des hohen Forschungsbedarfs zur Entstehung, Detektion und Beherrschung des Einflusses von Wirbel-

schleppen sind sie in den folgenden EU Projekten behandelt worden:

Im 4. Rahmenprogramm:

- Entstehung und Entwicklung von Wirbelschleppen aus physikalischer Sicht in EUROWAKE, WAVENC, EUROPIV
- Bordgestützte Wirbelschleppendetektion in FLAME, MFLAME
- Thematisches Network in WAKE-NET

Im 5. Rahmenprogramm (1998-2002):

- C-WAKE (Einfluss der Wirbelschleppen auf Flügeldesign)
- S-WAKE (Einfluss der Wirbelschleppen auf die Flugregelung und Sicherheit)
- ATC-WAKE (Definition der Anforderungen am Boden)
- I-WAKE (Definition von bordgestützten Wirbelschleppen Sensoren wie MFLAME) (2002-2005)

Im 6. Rahmenprogramm:

- FIDELIO (Fiber laser Development for nExt generation Lidar Onboard detection System (2004-2007)

In den Projekten FLAME, MFLAME, I-WAKE und FIDELIO lag das Hauptgewicht auf der Klarwettererkennung von Wirbelschleppen mit einem IR-Doppler Lidar.

Einige Firmen arbeiten heute in Forschung und Entwicklung an verschiedenen bodengebundenen und bordgestützten Lidar-Wirbelerkennungssystemen, CTI und Ophir in USA, Mitsubishi in Japan, Thales in Frankreich und Kayser-Threde und EADS in Deutschland.

1.2 Einsatzbereiche

Die Unfallhäufigkeit durch Wirbelschleppen ist in Bodennähe, d.h. bei Start und Landung am höchsten, da die Begegnung mit Wirbelschleppen hier am wahrscheinlichsten ist und zu nicht mehr korrigierbaren Abdrift- oder Rollbewegungen des nachfliegenden Flugzeugs führen kann. Bei weiterer Zunahme von Flugbewegungen an Flughäfen werden Flugzeuge in Warteschleifen dichter

fliegen, und damit wächst auch im Luftraum über Flughäfen die Häufigkeit der Begegnung mit Wirbelschleppen an.

Nach der Ansicht der Fachleute ist die verbesserte Voraussage und Vermessung der Wirbelschleppen vom Boden aus mit entsprechender Anweisung des Piloten nur eine Hilfslösung, die auch aus Kostengründen auf einige größere Flughäfen beschränkt bleibt. Eine zukünftige Lockerung der ICAO Vorschrift über Mindestabstände von Flugzeugen beim Abheben und Landung auf Grund von Wirbelschleppen ist deshalb erst nach der Entwicklung und Markteinführung einer geeigneten bordgestützten Wirbelschleppen-Sensorik zu erwarten.

In Übereinstimmung mit der Forderung der Pilotenvereinigung IALPA nach einem geeigneten Warngerät für Piloten sollte dies das erste Entwicklungsziel sein. Dieses sollte aber durch stufenweise Weiterentwicklung zu einem zusätzlichen Pilotenassistenzsystem, das in die Flugregelung eingreift - ähnlich wie Fahrerassistenzsystem im Fahrzeug – ausgebaut werden können.

1.3 Allgemeine Anforderungen an zukünftiges Messverfahren

Ein zuverlässiges bordgetragenes Wirbelschleppen Erkennungssystem (BoWES) muss entsprechend den variablen Wetterverhältnissen für den Flugbetrieb nach CAT I-III bei trübem und bei klarem Wetter, d.h. sowohl für Instrumenten- als auch für Sichtflug, einsetzbar sein. Um diesen unterschiedlichen Wetterverhältnissen gerecht zu werden, muss BoWES zwangsweise eine Kombination zweier unterschiedlicher Messverfahren beinhalten. Es muss in kleineren Flugzeugen integrierbar sein - denn diese sind am meisten gefährdet - was dann auch ein möglichst kompaktes und billiges Gerät verlangt.

Wirbelschleppen sind isolierte und symmetrische 3 D Geschwindigkeitsfelder der Luft, die von einem BoWES mit einer ausreichenden räumlichen und zeitlichen Messauflösung rechtzeitig erkannt, geortet und in ihrer Struktur aufgezeichnet werden müssen. Dies bedeutet, dass die gesuchten Messverfahren bildgebend sein müssen, d.h. sie müssen in der Lage sein, einen bestimmten Bildwinkel und eine bestimmte Messtiefe entweder abzuscannen oder abzubilden und zusätzlich die Relativbewegung des messenden Flugzeugs gegenüber dem Wirbelkörper auch anzusehen.

Weil Abstand und Kurs des Flugzeugs in Richtung zu dem Wirbelfeld eines voraus fliegenden Flugzeugs sich ständig ändern, ist eine entfernungsaufgelöste Geschwindigkeitsmessung mit einer Wiederholfrequenz notwendig, die der zeitlichen Veränderung der Messverhältnisse angepasst ist.

Für eine Fernmessung wird ein Messobjekt innerhalb der Wirbel gebraucht, das von der Luftbewegung mitgetragen wird. Die Luftmoleküle selbst wären hier das ideale

Objekt, aber beigemischte Gasmoleküle, Aerosole, Hydrometeore bzw. Temperatur- und Brechungsindex-Inhomogenitäten sind weitere Bestandteile der Wirbel, die ihrem Bewegungsablauf folgen und deshalb auch als Bewegungsindikatoren in Frage kommen.

Zur Aufzeichnung der Geschwindigkeitsvektoren der Luftströmung können grundsätzlich entweder passive oder aktive Verfahren eingesetzt werden, d. h. eine Messung der Eigenstrahlung der Wirbel oder der Rückstreuung von ausgesendeten Schall-, Radio- oder Laserwellen an ihren Bestandteilen.

Passive Verfahren mit Radiometern oder Thermokameras, die ihre thermische Ausstrahlung erfassen, sind in dem EU-Programm INTAS in dem Projekt „*Development of vortex visualization/detection methods via radiation and scattering fields sensing*“ untersucht worden. Prinzipieller Nachteil dieser Verfahren ist, dass sie keine entfernungsaufgelöste Abbildung der Wirbelstruktur gestatten, da sie keine Laufzeitaufzeichnung beinhalten. In den weiterführenden EU-Projekten FLAME, MFLAME und I-Wake hat man sich deshalb auf die aktiven Verfahren konzentriert. Diese werden deshalb im Nachfolgenden ausschließlich betrachtet.

Das nahe liegende aktive Messprinzip ist die Dopplermessung mit einem *Sonar*, *Radar* oder *Lidar*. Ihnen ist gemeinsam, dass sie eine oder mehrere der oben aufgezählten Bestandteile der Luftströmung, wie die Luftmoleküle, Aerosole oder Dichte- und Temperaturschwankungen als Messobjekte eines ausgesandten Strahlungspulses verwenden, seine Rückstreuung erfassen und dass sie ein Gebiet längs und quer zur Flugrichtung abtasten.

Sonare, obwohl geeignet für Langzeitmessungen von Luftströmungen an Flughäfen sind als bordgestütztes System, wegen ihrer zu großen, offenen Antennenstrukturen von mehreren Meter Durchmesser, ihrer leichten Störbarkeit durch Fahrtwind und Lärm - nicht zuletzt wegen der geringen Schallgeschwindigkeit, die ihre Messfrequenz und Ortsauflösung begrenzt - weitgehend ungeeignet.

Wetter-Radare werden dagegen seit mehreren Jahrzehnten zur Vermessung von Luftströmungen in Wolken, Regen und Schnee aus dem Flugzeug eingesetzt. Sie setzen jedoch eine hohe Konzentration von Hydrometeoren voraus.

Doppler-Lidare mit einer um den Faktor 1000 kürzeren Wellenlänge sind dagegen nur bei klarem Wetter, d. h. ausreichender Sichtweite einsetzbar. Mit einer Betriebswellenlänge im infraroten Bereich verwenden sie Aerosolrückstreuung; im Ultravioletten können sie zusätzlich die Rückstreuung der Luftmoleküle aufnehmen und messen.

Außer den Dopplerverfahren zur Geschwindigkeitsbestimmung in Luftströmungen kommen grundsätzlich auch *Particle Imaging Velocimetry (PIV)* oder *Speckle Imaging Velocimetry (SIV)* in Frage. Mit der ersten Methode wird die Querbewegung von Aerosolen zur optischen Achse, und mit der zweiten die zeitliche Änderung der Dichteverteilung der Luftmoleküle, abgebildet. Beide wurden jedoch bisher nur im Nahfeld, d.h. über kurze Distanzen, z.B. im Windkanal, eingesetzt.

1.4 Messgeometrie

Je nach dem ob BoWES zur Gefahrenanzeige und Warnung an den Piloten, oder zur Regelung ausgelegt werden soll, ergeben sich folgende unterschiedliche Anforderungen an seine Messleistung:

1. Detektion des Wirbels (d.h. Entfernung Abmessung, Richtung ohne genaue Abbildung seiner Struktur mit einer Vorwarnzeit, Messwiderholfrequenz und Positionsgenauigkeit, die es dem Piloten ermöglicht, den Wirbel als Ganzes zu umfliegen. Hier wäre eine Reichweite von 1,2 nm notwendig um festzustellen, ob sich eine Wirbelschleppen auf dem Flugweg befindet wobei ihre Position auf dem Navigationsdisplay angezeigt wird.
2. Zusätzlich zu 1. eine grobe bildhafte Darstellung des Wirbels, z.B. Lage und Entfernung seiner Wirbelzentren, die es dem Piloten ermöglicht sich auf das Zusammentreffen mit dem Wirbel rechtzeitig vorzubereiten. Hier wäre eine Reichweite bis 0,6 nm notwendig.
3. Zusätzlich zu 2. eine quantitative Darstellung der Einflussparameter des Wirbelfeldes auf die Flugzeugbewegung, d.h. Abstand des Symmetriezentrums und Achsen des Wirbelpaares von der Flugachse, Wirbelstärke, Kerndurchmesser für elektronische Regelung zur Unterstützung der manuellen Ausregelung, bzw. vollautomatischer Regelung. Der Messabstand für eine aktive Regelung wird im Bereich zwischen 0,01 nm und 0,1 nm je nach Regelgeschwindigkeit liegen

Danach ergeben sich, wie in Abb. 1 schematisch dargestellt, unterschiedliche Blickwinkel des Wirbelpaares aus der Sicht des Sensors. Hier entsteht sofort die Frage, ob der Sensor mit einem festen oder variierbaren Entfernungsbereich und Blickwinkel ausgestattet werden muss oder nicht.

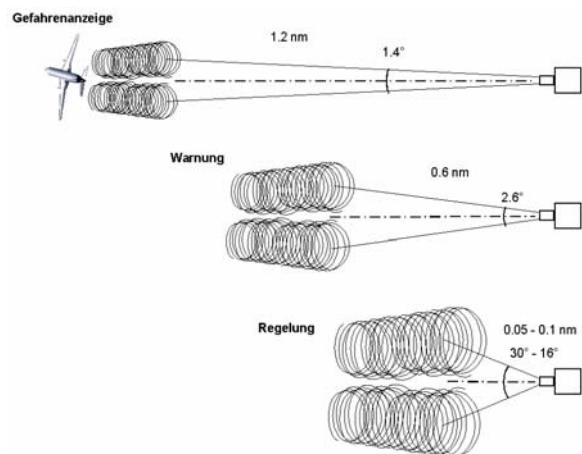


Abb. 1 Begegnungsszenario mit Wirbelschleppen in unterschiedlichen Gefahrenbereichen mit typischer Entfernung und Bildwinkel zur Erfassung des gesamten Wirbelpaares durch ein BoWES

Andererseits ist die Sichtachse des Sensors zu dem Wirbelpaar je nach Ablauf der Begegnung sehr unterschiedlich, wie in Abb. 2 für einen Fall dargestellt ist. Folglich wäre ein Sensor mit möglichst großem festen Blickwinkel aber variierbarer Messentfernung vorzuziehen.

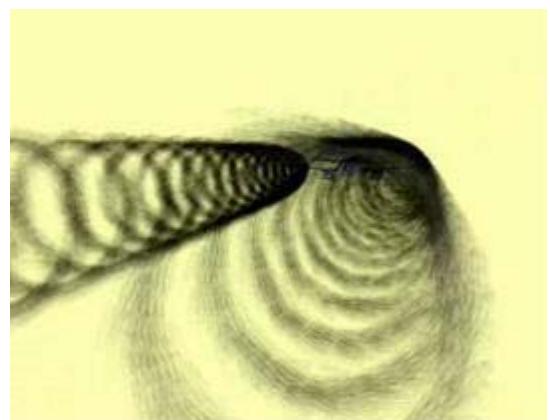


Abb. 2 Beispielhafte Begegnung mit einer Wirbelschleppen

1.5 Zusammenfassung der Anforderungen

Aus den Darlegungen in Kapitel 1.2. bis 1.4 abgeleitet können die allgemeinen Anforderungen im Folgenden zusammengefasst werden:

- Das BoWES zugrunde liegende Messverfahren muss nahezu bildgebend mit Hilfe eines dichten Scans oder durch Abbildung auf ein Detektor-Array ausgelegt werden

- Der Einfluss der Messtiefe muss entweder durch das Messprinzip selbst eingeschränkt sein oder in der Messauswertung korrigierbar sein. Um Fehler durch Überlagerung von Geschwindigkeitskomponenten aus unterschiedlichen Tiefen der Wirbel ausreichend gering zu halten ist eine Tiefeauflösung besser als 1/10 des Wirbeldurchmesser von etwa 50 m erforderlich (<5 m)
- Die Anzahl der Bildpixel im Pixel-Array N x M muss ausreichend sein, um die charakteristischen Wirbelparameter in den verschiedenen Entfernung- und Winkelbereichen mit ausreichender Genauigkeit zu erfassen. Für eine Regelung muss die Auflösung unter 1/10 der Wirbelausdehnung betragen um ihre wesentlichen Merkmale zu erfassen (<5 m)
- Der Bildaufnahmewinkel (FOV) des BoWES muss für die Aufnahme der Wirbel in den unterschiedlichen Entfernung- und Winkelbereichen ausgelegt werden oder dynamisch angepasst werden.
- Die empfangene Signalstärke aus den unterschiedlichen Messentfernungen, die unter anderem von Sendeleistung und Größe der Empfangsapertur abhängt, muss für eine ausreichende Messgenauigkeit ausgelegt werden
- Die Geschwindigkeitsauflösung in der Ebene der Wirbel muss deutlich unter 1m/s betragen damit z. B. Abdrift und Wirbelstärke mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden können.
- Die Bildwiederholfrequenz muss ausreichend hoch sein um die zeitliche Änderung der Messparameter durch die Eigenbewegung des Flugzeugs mit ausreichender Genauigkeit erfassen zu können (10 Hz, bei typischer Landegeschwindigkeit von 100 m/s)
- Der Anstell- und Schiebewinkel des Flugzeugs im Koordinatensystem der Wirbel soll ableitbar sein.
- Die verwendeten BoWES Messprinzipien müssen alle Wetterbedingungen, die beim Abflug und Anflug auf Flughäfen vorkommen, abdecken.

Es soll hier nachfolgend betrachtet werden wie diese Anforderungen von Doppler-Radar, Doppler-Lidar und Particle/Speckle Imaging Lidar bzw. ihrer Kombination erfüllt werden können.

2. DOPPLER-RADAR

2.1 Übersicht

Ein Vorteil von Radarmessungen ist, dass die Rückstreuung sowohl kontinuierlich entlang der Messstrecke als auch unter einem Winkel zu der Bewegungsrichtung des Flugzeugs aufgezeichnet werden kann. Außerdem kann, aufgrund der hohen Kohärenz des Radars, die Doppler-Messung der Geschwindigkeit und des Ortes über eine hohe Anzahl von Messungen in Beziehung gebracht werden, was eine gleichzeitige Bestimmung von Geschwindigkeit und Ort mit hoher Genauigkeit ermöglicht.

Bordgestützte Wetterradare arbeiten fast ausschließlich im X-Band (8,2 – 12,4 GHz) und ermöglichen eine Wetteranalyse bis zu einer Entfernung von 320 nm, eine Turbulenzanalyse im Bereich bis 40 nm und eine Scherwinderkennung bis 5 nm. Wegen ihrer langen Reichweite und Größe mit einem Anntennendurchmesser von 60 cm, die dazu mechanisch bewegt werden muss, sind auch sie nicht für die hier gestellte Messaufgabe geeignet. Um die Antennengröße eines Radars bei konstanter Auflösung zu verkleinern, muss seine Frequenz erhöht werden.

Der Einsatz eines Radars bei höheren Frequenzen (24 GHz, 35 GHz, 60 GHz oder 77 GHz), d.h. eines Millimeterwellen-Radars für BoWES bringt kurz zusammengefasst folgende Vorteile:

- erhöhte Reflektivität an Hydrometeoren auch bei geringer Hydrometeorendichte
- geringere Antennenabmessungen bei hoher Auflösung
- geringere gegenseitige Beeinflussung benachbarter Systeme auf Grund der höheren atmosphärischen Dämpfung
- möglicher Einsatz von strukturintegrierten Antennen
- eventuell dualer Einsatz des BoWES-Radars für ein Anti-Kollisions-Radar für Flugzeuge am Boden

Miniaturisierte und kostengünstige Doppler-Radars mit einer Frequenz von 77- GHz werden bereits in Kraftfahrzeugen zur Abstandswarnung eingesetzt und haben hier die internationale Funkfrequenzzuweisung bekommen. Des Weiteren wurde in den wichtigsten Märkten eine Zulassung im Frequenzbereich von 24 GHz erreicht. Langfristig ist zusätzlich ein breitbandiger Frequenzbereich um 79 GHz für solche Applikation vorgesehen. Dies wäre auch eine instrumentelle Voraussetzung für den Ausbau dieser Technik auf eine Flugzeuganwendung.

2.2 Millimeterwellen-Radar

Doppler-Radare in Automobilen mit einer Sendefrequenz von 24 - GHz und 77 - GHz sind in der Lage, bei widrigen Witterungsbedingungen Objekte auch außerhalb der Sichtweite des Fahrers zu erkennen. Dies beruht auf der geringeren Dämpfung der Radarstrahlung durch Dunst gegenüber sichtbarem Licht. Die Atmosphäre ist jedoch auch bei diesen Frequenzen keineswegs vollkommen transparent und verursacht darüber hinaus auch Reflexionen an den in ihr befindlichen Hydrometeoren. Dazu zählen sowohl Regentropfen, als auch Hagelkörner, Schneeflocken und Nebeltröpfchen. Insbesondere von den größeren Hydrometeoren wird ein deutliches Signal empfangen, das in den automobilen Sensor-Anwendungen ausgeblendet wird. Dieses Hintergrundsignal der Atmosphäre wäre aber grundsätzlich geeignet, um die Wirbelbewegung der Luft anhand der mitbewegten Hydrometeore zu detektieren und abzubilden. Sie wären somit für die Radar-Entdeckung und -Abtastung von Wirbelschleppen aus dem Flugzeug in trübem Wetter geeignet.

Der primäre Effekt der Dämpfung und der Rückstreuung einer elektromagnetischen Welle im Frequenzbereich zwischen 1 und 100 GHz in der Atmosphäre, ist die Reflexion bzw. Streuung der Welle an den Hydrometeoren. Mit zunehmender Frequenz nimmt sowohl die Rückstreuung als auch die Dämpfung zu [2].

Da bei einer festen Frequenz, z.B. 77 GHz die Rückstreuung gleichzeitig mit der Dämpfung mit erhöhtem Niederschlag zunimmt, werden bei Regen die Empfangssignale von festen Gegenständen in einer bestimmten Entfernung mit zunehmender Regenrate zwar schwächer, jedoch die von hydrometeor-erfüllten Raumsegmenten in gleicher Entfernung eher stärker, wie in Abb. 3 durch Simulation verdeutlicht wird.

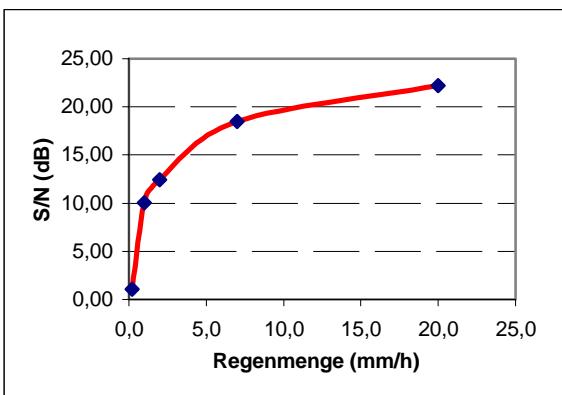


Abb. 3 S/N-Verhältnis eines 77 GHz Doppler-Radars, welches die Anforderungen aus Kap. 1.5 erfüllt.
Weitere Parameter: Messentfernung: 50 m, Messebene: 60 m x 6 0m, Antennenseitenlänge: 0,1 m, Sendeleistung: 30mW, Empfängerrauschzahl: 14 dB

Deutlich ist zu erkennen, dass auf dieser relativ kurzen Messstrecke die Zunahme der Reflektion über die Zunahme der Dämpfung überwiegt und somit das Signal-zu-Rauschverhältnis mit steigender Regenmenge immer besser wird. Für das hier gewählte Beispiel wird ab einer Regenmenge von 1 mm/h (Nieselregen) ein akzeptables S/N-Verhältnis von 10 dB erreicht.

Um dies nachzuweisen wurden parallel zu dieser Durchführbarkeitsstudie Messungen der Ausbreitung und Rückstreuung der Radarstrahlung eines Instrumentationsradars bei 77-GHz durch Sprühregen untersucht. Abb. 4 zeigt die Anbringung des Radar-Sensors am Fahrzeug.



Abb. 4 DaimlerChrysler-Fahrzeug-Radar-Front-End im Versuch an der Fahrzeug-Stoßstange montiert

Bei dem Instrumentationsradar auf Basis des Puls-Doppler-Prinzips handelt es sich um eine prototypische Weiterentwicklung heute verfügbarer Kfz-Radarsensoren mit erweitertem Winkelerfassungsbereich, gesteigerter Empfindlichkeit und höherer Auflösung sowohl in Entfernung wie in Azimut [3]. Bei einer festen Sendefrequenz von 76,5GHz lassen sich die übrigen Parameter der Radarerfassung in weiten Grenzen variieren und somit unterschiedlichste Systeme nachbilden. Für die hier durchgeföhrten Regenmessungen waren folgende Werte gewählt:

- Pulswiederholfrequenz von 400 kHz
- Entfernungsreich: 7 m – 150 m
- Entfernungsauflösung fester Ziele von 1 m
- Geschwindigkeitsauflösung < 0,2 m/s
- Horizontaler Erfassungsbereich (Azimut) 24°
- Auflösung in Azimut (3 dB-Strahlweite): 1,2°
- Strahlweite in Elevation: 4,5°
- Bildwiederholfrequenz

Die vom System gelieferten Daten entsprechen einer zweidimensionalen Abbildung in Entfernung über Azimut, wobei für jedes Pixel eines solchen Radarbildes Information über Rückstreuintensität und Geschwindig-

keit vorliegt. Zur Visualisierung bietet sich eine Falschfarb-Kodierung an, bei der die Helligkeit der Intensität und die Farbe der Geschwindigkeit entsprechen.

Abb. 5 zeigt die solchermaßen dargestellte Radarmessung einer künstlich erzeugten Regenwand mit folgender Farbkodierung: Rot für Dopplerverschiebung zu tieferen und Grün bis Blau zu höheren Frequenzen. Es sind verschiedene Segmente mit unterschiedlicher Radialgeschwindigkeit der Regentropfen erkennbar. Gleichzeitig werden feste Ziele hinter der Regenwand bei der Messung detektiert.

Entsprechend der Winkelauflösung in Azimut teilt sich der Erfassungsbereich in 20 einzelne Messrichtungen auf, die zur besseren Visualisierung in Abb. 5 interpoliert wurden.

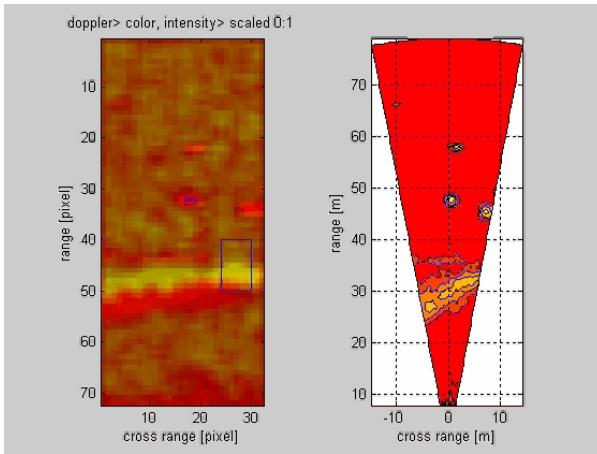


Abb. 5 Radarbild einer Regenmessung in den Koordinaten Entfernung über Azimut (linkes Bild) und in kartesischer Transformation mit echten Distanzmassen und einem Intensitätsschwelwert oberhalb des Systemrauschens (rechtes Bild). Die Messebene ist 0,5 m Höhe parallel zum Boden. Deutlich sind in der Farbkodierung die unterschiedlichen Dopplergeschwindigkeiten in der Regenwand in den Rohdaten sichtbar. Zwei markante Punkte in 47 m und 58 m Entfernung sind Radar-Reflektoren, die als Referenz für die Messung dienen.

Bis auf den Winkelbereich kommen diese Daten eines bildgebenden Fahrzeug-Radars insgesamt den Anforderungen für BoWES sehr nahe. Derartige Systeme werden in naher Zukunft verfügbar und – kompakt sowie kostengünstig sein.

Für ihren Ausbau zu einem BoWES-Radar für Flugzeuge bzw. zur Flugregelung müssten die Luftbewegungen zweidimensional, d.h. sowohl horizontal als auch vertikal mit einem zweiachsigen Scanner senkrecht zur Flugrichtung abgebildet werden. Dies wäre heute mit phasensteuerten Antennen-Arrays, die für diese Anwendung zu entwickeln wären, möglich. Ansätze mit digitaler Strahlformung im Basisband („digital beam forming“, DBF),

wie gegenwärtig bereits in Entwicklung sind, erscheinen ebenfalls attraktiv.

Um die notwendige Reichweite für die Wirbelwarnung zu erzielen wären weitere Systemmodifikationen nötig. Ein entscheidender Vorteil ist aber die bereits erteilte Funkzulassung für den Bodenverkehr, die wahrscheinlich mit geringem Aufwand für den Flugverkehr ausgeweitet werden könnte. Des Weiteren könnte ein solches System in einem dualen Ansatz als BoWES-Radar und als Anti-Kollisionsradar für Flugzeuge am Boden eingesetzt werden.

3. DOPPLER-LIDAR

Doppler-Radare sind nur beim trüben Wetter, d.h. einer geeigneten Konzentration von Hydrometeoren für BoWES geeignet. Für klares Wetter müsste deshalb ein zweites Messsystem im optischen Bereich des Spektrum, d.h. ein Lidar, im BoWES integriert sein.

Es gibt grundsätzlich zwei unterschiedliche Wege zur Dopplermessung mit einem Lidar, den Überlagerungsempfang und den Direktempfang. Beim Überlagerungsempfang wird mit einem IR-Sendelaser, die Zwischenfrequenz zwischen dem Doppler-verschobenen Rückstreu-signal von den Staubpartikeln der klaren Luft und eines lokalen Oszillators (LO) im Radiobereich – analog wie beim Radar – verarbeitet. Dies setzt aber eine exakte Überlagerung der Referenz- und der Empfangswellenfront voraus.

Beim Scannen des Strahles muss deshalb eine hohe Stabilität der Spiegeloberfläche in der Größenordnung 1/10 der Wellenlänge von 2 μm gewährleist sein, die dazu führt, dass die Spiegel recht massiv gebaut werden müssen. Dies limitiert dann andererseits die erreichbare Bildfrequenz, die bei MFLAME-Projekt z.B. bei 0,2 Hz lag. Im I-FLAME Projekt konnte durch eine Leichtspiegelbauweise die Bildfrequenz bis 1 Hz erhöht werden, was vorerst als die Grenze der Bildfrequenz mit dieser Scan - Technologie bedeutet.

Mit der niedrigen Bildfrequenz und einer typischen Landgeschwindigkeit eines Flugzeugs von 100 m/s entsteht während des Bildscans eine erhebliche zeitliche Bildverzerrung die zur einen ungenauen Wiedergabe des Geschwindigkeitsfeldes der Wirbelschleppen führen würde.

Ein zweites Problem des Überlagerungsempfangs im IR-Bereich liegt in der kurzen Kohärenzzeit der Messung, die auf die Dauer nur eines Laserpulses begrenzt ist - im Gegensatz zum Radar wo sie über eine hohe Anzahl von Pulsen besteht. Die Kohärenzzeit begrenzt aber das Produkt der Orts- und Geschwindigkeitsgenauigkeit das mit einer Dopplermessung erreicht werden kann (Fourier-Limit, Unschärferelation). Mit der Wellenlänge von 2 μm , und einer angestrebten Geschwindigkeitsauflösung von 1 m/s ist die Ortsauflösung nicht besser als 100 – 200 m,

was dann wieder keine genaue Abbildung der Details der Wirbelschleppen ermöglicht.

Eine Kürzung der Laser-Wellenlänge von 2 μm auf 1,5 μm wie in dem EU Projekt FIDELIO geplant ist ermöglicht zwar eine leichte Verbesserung der Ortsauflösung, die Probleme der niedrigen Scanfrequenz bleiben aber weiterhin bestehen.

Der Direktempfang im UV Bereich verwendet eine spektrale Vermessung der Doppler-Verschiebung sowohl des von Staubpartikeln als auch von Luftmolekülen gestreuten Empfangssignals. Dies wird mit einem hochauflösenden Interferometer und einer Kameraaufnahme der gewonnenen Interferogramme durchgeführt.

Bei der kürzeren Wellenlänge der UV-Lidars bedarf es zum Erreichen einer guten Geschwindigkeitsauflösung mit dem Doppler-Effekt (z.B. 1 m/s) für jeden Puls einer wesentlich kürzeren Messzeit als bei dem langwelligeren IR-Lidar (Fourier-Beziehung), die dann auch eine deutlich verbesserte Tiefenauflösung ermöglicht. Es bestehen jedoch hier die gleichen Schwierigkeiten der Bildverzerrung durch die niedrige Scanfrequenz, die dann auch die Orts- und Tiefenauflösung letztlich begrenzt.

4. SPECKLE-IMAGING-LIDAR

4.1 Übersicht

Die oben geschilderten Probleme der Doppler-Lidartechnik für ein BoWES - die wohl in nächster Zeit nicht gelöst werden können - führen im Rahmen der Studie zur Suche nach alternativen Lidar – Messverfahren für die Klarwetterbedingungen.

Die *Particle Imaging Velocimetry* (PIV) ist ein weit verbreitetes Laser-Messverfahren in der Strömungsmechanik. Hier wird die Strömung zur Aufzeichnung mit sehr kleinen Partikeln geimpft (10-50 μm), die als Streukeime für einfallendes Licht dienen. In der Strömung wird eine dünne Lichtwand des verwendeten gepulsten Laserstrahles aufgespannt

Durch eine Doppelbelichtung der Strömung in der Wand kann dann die zeitliche Verschiebung der Partikel und damit die Strömungsbewegung entlang der Lichtwand abgeleitet werden. Durch die Bewegung der Wand (Drehung oder Verschiebung) durch die Strömung von einer Aufnahme zu anderen kann dann ihr dreidimensionales Geschwindigkeitsfeld dargestellt werden.

Eine Variante dieses Verfahrens ist die Speckle Imaging Velocimetry (SIV) [4], bei der anstatt der Zumischung von Partikeln ein Laserstrahl nach Durchgang durch eine Streuscheibe in statistisch verteilte Laserspeckle aufgebrochen wird, die wiederum als Messsonden für die Strömungsbewegung durch Doppelaufnahmen verwendet werden. Beide Verfahren bedürfen ähnlicher elektronischer Auswertung der Doppelbilder durch Rechner-

Korrelationen, die auch mit gleichen Algorithmen durchgeführt werden können.

Das Aufbrechen eines Laserstrahles mit einem über seinen Querschnitt ursprünglich homogenen Intensitätsverlauf in ein gekörntes Fleckenmuster, Granulationen oder Speckle ist eine Folge der unterschiedlich langen, optischen Weglängen der Teilstrahlen, bzw. Elementarwellen des Laserstrahles durch Regionen der Luft mit unterschiedlichem Brechungsindex. Wegen der Kohärenz der primären Strahlung sind auch diese an den Luftbestandteilen gestreuten Elementarwellen untereinander kohärent. Von einem Ort zum anderen innerhalb des Strahles variieren dann Amplitude und Phase der Elementarwellen gegeneinander. Sie überlagern sich schließlich im Raum zu einem komplizierten Interferenzfeld mit räumlich verteilter, unregelmäßiger Intensität. Bei Luftbewegungen wie Wirbeln und damit verbundenen Änderungen der Brechungsindexstruktur, wird das Interferenzmuster, - d.h. die Speckles - auch räumlich und zeitlich moduliert.

Bei einer Geschwindigkeitsmessung mit dem Doppler-Effekt, der nur die axiale Frequenz- bzw. Wellenlängenverschiebung des rückgestreuten Laserlichtes anzeigt, wird die transversale Geschwindigkeitskomponente der Luftbewegung erst als axiale Projektion durch den Scawinkel abgeleitet. Da in einem BoWES durch die Eigenbewegung des Flugzeugs gegenüber der Luftmasse eine starke Dopplerverschiebung entsteht, muss sie von dem Messsignal jedes Mal rechnerisch abgezogen werden.

Beim SIV wird die zeitliche Änderung des Speckle-Bildes zwischen zwei Aufnahmen durch die Modulation des Brechungsindexes der Luft in Richtung transversal zu der Achse des ausgesandten Laserstrahl hervorgerufen, d.h. sie ist ein direktes Maß von der transversalen Luftbewegung und ist von der axialen Änderungen der Luft und Vorwärtsbewegung eines bildaufnehmenden Flugzeugs weitgehend unabhängig, was für ein BoWES von großem Vorteil ist.

Die Brechungsindexvariationen der Luft werden vorwiegend durch Temperaturunterschiede hervorgerufen. In Wirbelschleppen hinter Flugzeugen entstehen auf Grund der Luftbewegung und des Wirbelzerfalls Druck-, und Temperaturgradienten. Zusätzlich entstehen in Bodennähe durch Erwärmung der Erdoberfläche am Tage und Abkühlung in der Nacht Temperaturgradienten in der Luft, die von startenden oder landenden Flugzeugen durchgewirbelt werden. Weiterhin werden heiße Abgase von Triebwerken - vor allem Wasserdampf und Kohlendioxid - der verwirbelten Luft beigemischt. Es entsteht insgesamt in der Wirbelschleife hinter einem Flugzeug beim Start oder Landung ein strukturiertes Temperaturfeld, was gleichzeitig zu einer inhomogenen fein strukturierten Verteilung des Brechungsindexes der Luft führt.

PIV und SIV wurden bisher nur für Strömungen im Nahfeld, d.h. bei Laboraufbauten oder Windkanälen eingesetzt und kamen bisher für Fernfeldmessungen, wie sie

hier bei BoWES verlangt, nicht zum Einsatz. Das PIV ist auf Grund der Schwierigkeiten kleine Teilchen über größere Distanzen abzubilden, für Fernmessungen nicht geeignet. Die Speckles sind aber wesentlich größer und wachsen in ihrem Durchmesser mit der Entfernung an, so dass SIV so umgestaltet und ausgelegt werden kann, dass es sich in einem Lidar-Aufbau für Messungen von Wirbelschleppen im Fernfeld eignen könnte.

In der BoWES Durchführbarkeitsstudie und in einigen Parallelprojekten, wurde die Möglichkeit der Verwendung von SIV in der Lidartechnik untersucht.

4.2 Konzept eines Speckle-Imaging-Lidars

Ein Lidar-System zur Bestimmung eines Geschwindigkeitsfeldes im Fernfeld aus Speckle-Bildern muss zwei Messvorgänge schnell hintereinander ausführen: 1. Zu einer bestimmten Zeit t das Specklebild aus einer bestimmten Entfernung aufnehmen und daraus den transversalen Verlauf der örtlichen Brechungsindexinhomogenitäten vermessen. 2. Zu einer zweiten Zeit t' kurz nach t mit einem Zeitunterschied bei dem die transversale Luftbewegung bemerkbar wird (1-5 ms) und noch innerhalb der Kohärenzzeit der Speckle wieder den Verlauf des Brechungsindexes am gleichen Ort zum zweiten Mal messen. Aus der Kreuzkorrelation beider Messungen kann dann das Geschwindigkeitsfeld gewonnen werden [5].

Da die Speckle kumulativ entlang des ganzen Weges des gepulsten Laserstrahles entstehen, aber nur der Einfluss der örtlich begrenzten Wirbelschleppen auf das Specklebild, d.h. in einer bestimmten Messentfernung mit einer bestimmten Messtiefe interessiert, muss das Lidar-System mit zwei Kameras ausgerüstet sein, die synchron mit dem ausgesandten Puls das Echo aus unterschiedlichen Entfernung, zwischen denen das interessierende Gebiet liegt, zwei getrennte Specklebilder aufnehmen. Der Einfluss der Wirbel auf das Specklebild kann dann durch Kreuzkorrelation der beiden Bilder dieser zwei Kameras gewonnen werden

Abb. 6 zeigt schematisch den Aufbau des vorgeschlagenen Speckle-Imaging-Lidars. Der Sendestrahl eines gepulsten UV-Laser wird koaxial zum Empfangsstrahl aufgeweitet, um eine größere Fläche des Messvolumens in der anvisierten Messentfernung auszuleuchten.

Durch die Inhomogenitäten der Atmosphäre bricht der aufgeweitete Laserstrahl entlang der ganzen Wegstrecke kumulativ in viele einzelne Intensitätsinseln, objektive Speckles auf. Für einen Betrachter, der seitlich neben dem Laserstrahl steht und ihm entgegen schaut, erscheinen diese Intensitätsinseln des Querschnitts als lange schmale Leuchtpuren (Filamente) innerhalb des ganzen Strahles. Wenn der ganze Strahl auf eine Leinwand fallen würde, dann würden die Speckles als ein Granulationsfeld innerhalb des Querschnitts des Laserstrahles erscheinen, des-

sen zeitliche Änderungen einer transversalen Luftbewegung folgen würden.

Da aber für die Messung keine Leinwand aufgestellt werden kann, muss die Atmosphäre selbst als eine Leinwand dienen, d.h. es wird die Rückstreuung aus einer Luftscheibe definierter Dicke verwendet. Mit einer sehr kurzen Verschlusszeit der Kameras wird der Bewegungsablauf der Speckles nur in Momentaufnahmen festgehalten.

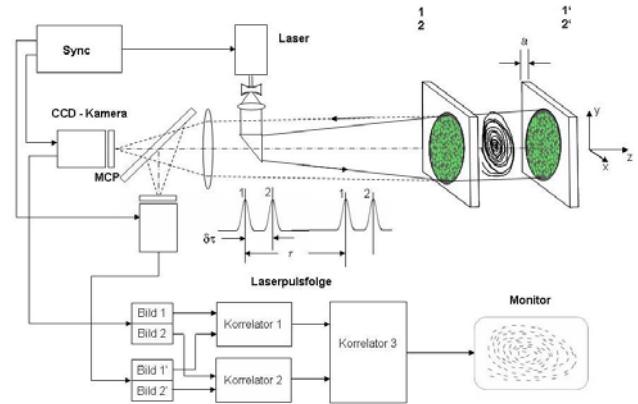


Abb. 6 Vorgeschlagener Aufbau eines Speckle-Imaging-Lidars zur Aufnahme der transversalen Luftbewegung in einem Wirbel zwischen zwei Luftsichten mit zwei Kameras als Bild 1 und Bild 1' des ersten Pulses 1 und Bild 2 und Bild 2' des zweiten Pulses 2 und mit anschließender räumlicher und zeitlicher Kreuzkorrelation der so gewonnen Specklebilder, die dann als Ergebnis das Geschwindigkeitsbild des Wirbels senkrecht zur optischen Achse in der Zwischenschicht ergibt.

Eine Bildverstärkerplatte MCP (Micro-Channel-Plate) dient als schneller Zeitverschluss jeder der Kameras, der dazu verwendet wird, um die „Atmosphären-Leinwand“ einer bestimmten Dicke $\delta z = c \delta t$ mit δt als Dauer der Belichtung und c die Lichtgeschwindigkeit, die in einer eingestellten Entfernung z als eine „Licht-Echo-Wand“ der Speckle (siehe Abb. 6) festzulegen. Nach einer gewissen Laufzeit des Pulses, der dem zweimaligen Lichtabstand zu der Wand entspricht, wird der Kameraverschluss geöffnet und kurz darauf geschlossen, wobei das Belichtungsintervall dann der Dicke der Reflexionswand entspricht.

Dieses Verfahren der Entfernungseinstellung durch Pulslaufzeitmessung aus der Lidartechnik ermöglicht hier die zeitlich begrenzte Bildaufzeichnung des Musters (gated viewing), d.h. die Bildaufnahme der Rückstreuung (Echo) aus einer Luftscheibe mit definiertem Durchmesser und Dicke entlang der optischen Achse aus einer über die Pulslaufzeit einstellbaren festen Entfernung.

Was aber tatsächlich abgebildet wird, ist für jeden Puls das momentane Abbild der Intensität der Speckle, nicht nur derer auf dem Hinweg zur Reflexionswand, sondern weiterer Speckle auch auf dem Rückweg von der Wand

zum Empfänger, die der empfangenen Lichtwelle aufgeprägt werden. Zusätzlich entstehen durch die Lichtbeugung und Abbildung des optischen Empfangssystems vor der Kamera an ihrer Aufnahmepupille sogenannte subjektive Speckles, die den objektiven Speckles im Bild der Kamera überlagert sind. Ein Einzelbild aus einer festen Entfernung zeigt somit die Specklebildung durch die Luftunruhe und Abbildung über die gesamte Messentfernung.

Erst wenn zwei Bilder 1 und 1' mit zwei Kameras mit der gleichen Sichtachse und gleicher Abbildungsoptik aber mit unterschiedlich eingestellter Messentfernung $z = c t$ und $z' = c t'$ mit der Wegdifferenz $\Delta z = c \Delta t$ mit dem Zeitabstand Δt zwischen Aufnahme 1 und 1', synchron nach jedem ausgesandten Puls aufgenommen werden, beinhaltet das zweite Bild die zusätzliche Information über die Luftunruhe in der Zwischenschicht beider Aufnahmen.

Damit nur die Information über zusätzliche Brechungsindexvariationen in der Zwischenschicht entsteht, werden nun beide Bilder 1 und 1' kreuzkorreliert. Dieses Prinzip der Aufhebung aller anderen Einflüsse auf dem Lichtweg ist aus der industriellen Anwendung der „Speckle Photographic“ wohlbekannt, und wurde in [6] zuerst beschrieben.

Aus der Kreuzkorrelation wird die Änderungen des Brechungsindexes quer über das Volumen zwischen beiden Messschichten als $\Delta n / \Delta r (x,y)$ sichtbar, wobei durch Änderungen der Gate-Zeiten der Schaltelektronik (Sync.), die Messentfernungen z und z' , die Wegedifferenz Δz sowie die Dicke der atmosphärischen Leinwand δz beliebig variiert werden kann.

Die Messung mit nur einem Laserpuls in Abb. 6 zeigt ausschließlich die momentane räumliche Verteilung des Brechungsindexes, da hier nur Specklebilder räumlich miteinander korreliert werden. Um eine zeitliche Variation zu erfassen, müssen zusätzlich zwei räumliche Brechungsindex-Variationen über die Zeit miteinander korreliert werden. Dies geschieht in dem Speckle-Imaging-Lidar nach Abb. 6 durch Verwendung von Doppelpulsen 1 und 2 mit einem Zeitabstand. Hierbei sendet der Doppelpulslaser zwei Pulse 1 und 2 mit variierbarem Zeitabstand $\delta \tau$ (z.B. 0,1 – 10 ms) in einer Pulsfolge mit einer festen Wiederholfrequenz (z.B. 10–30 Hz) mit dem Zeitabstand τ aus.

Solche Doppelpulslaser (synchron Q-geschaltete Nd:YAG-Laser) sind speziell für PIV entwickelt worden, ebenso Doppelaufnahmekameras mit schnellem Zwischenspeicher, die auch in der Lage sind die Lichtstreuung solcher Doppelpulse aufzunehmen. Damit trotz der Eigenbewegung des Flugzeugs im gleichen Gebiet nacheinander gemessen wird müsste die Kamerasychronisation entsprechend angepasst werden.

Aus den so gewonnenen Doppelbildern der Turbulenzbewegung zu unterschiedlichen Zeiten können nun, nach einer dritten Korrelation der Speckleverschiebung in der Zwischenschicht Δz , die Geschwindigkeiten in dem Luftwirbel quer zur optischen Achse dargestellt werden [5,7].

4.3 Theoretische und experimentelle Ergebnisse

Die theoretische Modellierung der Wellenfrontausbreitung und Simulation, die in Zusammenarbeit mit dem „Institute of Atmospheric Optics“ in Tomsk unter Voraussetzung realistischer atmosphärischer Bedingungen durchgeführt wurden, bestätigen grundsätzlich die Annahmen dieses Konzeptes [7].

Für die erste experimentell Prüfung wurden einige erste grundsätzlichen Versuche mit dem aufgeweiteten Nd:YAG-Laserstrahls auf 1 m Durchmesser über Distanzen bis 100 m mit einer Pulsenergie von 3 mJ, einem Empfangsteleskop von 20 cm Durchmesser und einer CCD-kamera mit vorgesetztem MCP- Image - Intensifier in dem Aufbau in Abb. 7 durchgeführt.

Zunächst ging es um den Beweis, dass es möglich ist eine Luftscheibe in klarer Luft als Leinwand für Speckle-Abbildung in hundert Meter Entfernung zu verwenden, was hier bestätigt wurde.



Abb. 7 Experimenteller Aufbau eines Speckle-Imaging-Lidars mit Sende- und Empfangsteleskop, MCP-CCD Kamera und gepulstem, frequenzverdoppeltem Nd:YAG-Laser ($0,532 \mu\text{m}$) zur Vermessung von Luftspeckles mit Einzelpulsen und einer Kamera .

Die Ergebnisse zeigen weiterhin, dass trotz lokaler Variationen durch Photonenrauschen, die Intensitätsverteilung in der Luftscheibe – über die Zeit von einem Laserpuls zu anderem betrachtet werden kann – es wird die Ausbildung von Speckle über die gesamte Messstrecke in klarer Luft und ihre Variationen wiedergegeben. Ein Einzelbild aus solchen Zeitsequenzen zeigt Abb. 8.

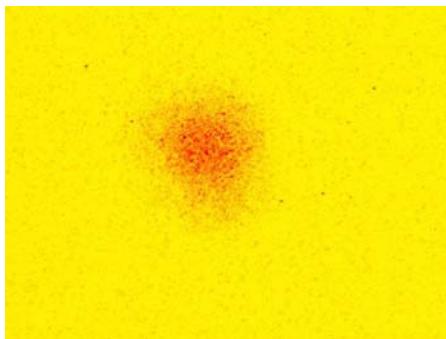


Abb. 8 Einzelnes Speckle-Rückstrebild mit 1 m Durchmesser aus klarer Luft über eine Distance von 100 m aus einer Zeitreihe von dynamischen Speckles mit 30 Hz Wiederholfrequenz, mit einer Pulsennergie von 3 mJ.

In einem BoWES mit einem Speckle-Imaging-Lidar wäre die Ausleuchtung und Abbildung einer sehr großen Wirbelfläche notwendig. Dies braucht nicht mit einem einzelnen aufgeweiteten Sendestrahl durchgeführt zu werden, sondern genügt es die Wirbel mit einer Vielzahl von diskreten Einzelstrahlen auszuleuchten um ausreichend dichte Information über sie zu gewinnen. Eine solche Strahlaufspaltung kann mit einem holographischen Strahlteiler mit sehr hoher Effizienz durchgeführt werden und würde die notwendige Pulsennergie erheblich reduzieren.

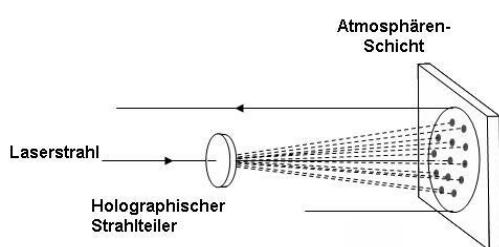


Abb. 9 Aufspaltung des Messstrahles in ein Strahlenbündel mit einem holographischen Strahlteiler.

Die Vorteile des Speckle-Imaging-Lidar gegenüber einem Doppler-Lidars für BoWES wären vielseitig: gute Orts- und Tiefenauflösung, hohe Messfrequenz, Messentfernung, Messtiefe und Messfrequenz elektronisch einstellbar, direkte Anzeige der transversalen Geschwindigkeitskomponenten, keine bewegten Teile, hohe optische Transmission und Verwendung von marktgängigen Komponenten.

Wegen der Neuartigkeit dieses Konzeptes wären aber ausführliche Untersuchung über seine Leistungsfähigkeit für BoWES notwendig.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Wirbelschleppen stellen komplexe dynamische Objekt dar, deren Vermessung eine gute Ortsauflösung in allen Raumrichtungen (<5 m) und eine hohe Messfrequenz (10

Hz) für die Stufen Erkennung, Warnung und den Übergang zur Regelung verlangt. Entscheidend ist, dass BoWES dies bei allen Wetterbedingungen erfüllt.

Die bisher verfolgte Lösung eines BoWES mit einem 2 µm IR-Doppler-Lidar ist nur für Gutwetterbedingungen einsetzbar und erfüllt auch dort wegen geringen Orts- und Tiefenauflösung und der niedrigen Bildfrequenzen bisher nicht die gestellten messtechnischen Anforderungen. Eine Weiterentwicklung des IR-Doppler-Lidars mit Hilfe von Glasfaser-Lasern zu der kürzeren 1,5 µm Wellenlänge würde zu einem technisch vereinfachten Gerät führen, nicht aber die grundlegenden messtechnischen Probleme lösen.

Aus diesen Gründen wurde die Kombination eines Millimeter-Wellen-Doppler-Radars für Schlechtwetterbedingungen und eines bildgebenden Speckle-Imaging-Lidar für klares Wetter untersucht und ihre messtechnischen Leistungen mit den BoWES Anforderungen verglichen. Die positiven Ergebnisse lassen eine Weiterentwicklung in diese neue Richtung als sehr empfehlenswert erscheinen.

LITERATUR

- [1] <http://www.ctilidar.com>
- [2] G.P. Kulemin, "Millimeter-wave radar – targets and clutter, Chapter 5", Artech House 2003, ISBN: 1-58053-540-2
- [3] Schneider, R, Meis, U., „Bildgebendes Kfz-Radar-Systemkonzept und Applikationen“, VDI Berichte Nr. 1829, 2004
- [4] Fomin, N.A., „Speckle Photography for Fluid Mechanics Measurements“, Springer Verlag 1998.
- [5] Halldorsson, Th., „Verfahren zur Vermessung von Luftturbulenzen in klarer Luft mit einem abbildenden Lidar-System“, Erfindungsanmeldung Deutsches Patentamt, Juli 2005
- [6] Debrus, S., Francon, M, Koulev, P., « Extraction De La Difference Entre Deux Images », Nouv. Rev. Optique, n°3, pp 153-168, 1974
- [7] V. Banakh, A. Falits, Th. Halldorsson, "Simulation of Retrieval of Wind Velocity in a Turbulent Atmosphere by Speckle Photgraphy", 13th Coherent Laser Radar Conference, Kamakura, 16.-21. October 2005