

# 1 Motivation

Laser (engl. **l**ight **a**mplification by **s**timulated **e**mission of **r**adiation) zeichnen sich aufgrund der besonderen Eigenschaften des von ihnen ausgesandten Lichtes aus. Ihre Strahlung ist monochromatisch, zeitlich und räumlich kohärent und besitzt eine geringe Divergenz. Diese besonderen Eigenschaften haben dazu geführt, dass Laser seit der erstmaligen Realisierung 1960 durch Maiman [Mai60] inzwischen in zahlreichen verschiedenen Anwendungen, wie z. B. in der Datenspeicherung, Materialbearbeitung, Nachrichtentechnik, Meßtechnik oder der Fernerkundung, eingesetzt werden.

Diese Arbeit befasst sich mit der Entwicklung von Lasern für LIDAR-Systeme (Light Detection And Ranging), die für die Fernerkundung der Atmosphäre verwendet werden. LIDAR-Systeme arbeiten nach dem selben Prinzip wie die schon seit dem zweiten Weltkrieg bekannten Radarsysteme. Während letztere jedoch mit Radiowellen arbeiten, werden in LIDAR-Systemen optische Wellen mit Wellenlängen aus dem nahen UV- bis hin zum nahen Infrarot-Spektralbereich verwendet.

Im folgenden werden kurz einige wichtige LIDAR-Messverfahren vorgestellt, wobei besonders auf das Doppler-LIDAR-Verfahren eingegangen wird, da diese Arbeit Teil des von der Europäischen Union geförderten Projektes I-WAKE (Instrumentation systems for on-board WAKE vortex and other hazards detection, warning and avoidance) ist, in dessen Rahmen ein solches LIDAR-System entwickelt werden soll. Eine genauere Beschreibung des I-WAKE-Projektes und der im Rahmen des Projektes an die Laser gestellten Anforderungen erfolgt dann in Abschnitt 1.2. In Abschnitt 1.3 wird die Gliederung dieser Arbeit beschrieben.

## 1.1 LIDAR-Messverfahren

LIDAR-Messverfahren werden zur Fernerkundung der Atmosphäre eingesetzt, wobei kurze Laserpulse kollimiert in die Atmosphäre gesendet werden und zeitaufgelöst das rückgestreute Signal detektiert wird. Die Rückstreuung des Signals kann dabei an Staubteilchen, Aerosolen, Wasserdampf, Spurengasen oder sogar an Dichteschwankungen der Atmosphäre erfolgen. Über die Lichtgeschwindigkeit kann auf die räumliche Entfernung des Ortes der Photonenstreuung geschlossen werden. Typische Laserpulslängen reichen von einigen bis hin zu einigen Hundert Nanosekunden bei Wiederholraten von wenigen Hz bis zu einigen kHz. Die verwendete Pulsenergie der Systeme ist eng mit deren Reichweite verbunden. Es wurden schon Systeme mit weniger als einem mJ aber auch schon welche mit einigen Hundert mJ Pulsenergie realisiert. Abbildung 1.1 zeigt schematisch das LIDAR-Prinzip und die wichtigsten Komponenten eines Standard-LIDAR-Systems, bei dem ein Laserpuls direkt über das Teleskop ausgesandt wird. Manchmal werden Laser und Teleskop auch separat realisiert und dann parallel zueinander ausgerichtet aufgestellt. Von dem Laserlicht, das entlang seines Weges in alle Richtungen gestreut wird, erreicht nur derjenige Teil, der direkt zum LIDAR-System zurückgestreut wird, das Teleskop. Das Licht wird dann vom Teleskop fokussiert, wieder kollimiert und durch einen Strahlteiler, der es vom Laser trennt, auf den Detektor gelenkt.

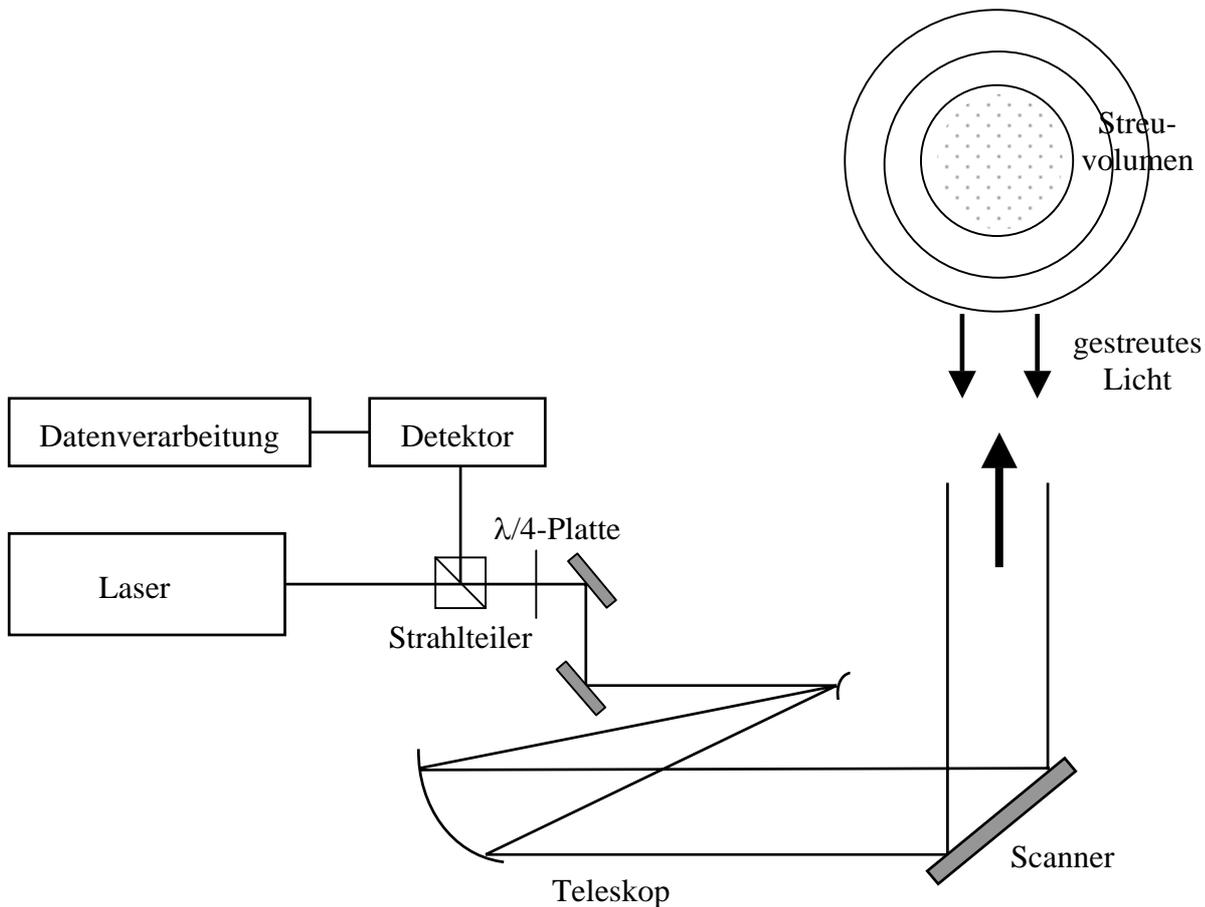


Abbildung 1.1: *Schematische Darstellung des LIDAR-Prinzips mit den wichtigsten Komponenten eines LIDAR-Systems*

Wird ein sogenanntes Heterodyn-Verfahren zur Auswertung verwendet, so wird noch ein Referenzsignal benötigt, das mit dem rückgestreuten Signal interferiert, bevor dieses detektiert wird. Es gibt jedoch auch noch wesentlich kompliziertere LIDAR-Systeme, bei denen z. B. mehrere verschiedene Laserwellenlängen verwendet werden oder mehrere Teleskope zur Signalaufnahme. Es lassen sich daher viele unterschiedliche Parameter der Atmosphäre mit den verschiedenen LIDAR-Systemen untersuchen. Hierzu gehören unter anderem die Konzentrationen und die optischen Eigenschaften der Aerosole, die Konzentration von Spurengasen, die Temperatur der Atmosphäre und die Windgeschwindigkeit am Ort des Streuzentrums. Zur Messung der Konzentration von Spurengasen werden DIAL-Systeme (engl. differential absorption lidar) verwendet, zur Detektion der Temperatur z. B. Rotations-Raman-LIDARs und zur Messung der Windgeschwindigkeit Doppler-LIDARs. Da das letztgenannte System im IWAKE-Projekt verwendet wird, wird darauf im Folgenden genauer eingegangen, eine genauere Beschreibung der beiden anderen Systeme findet sich in [Ert03] und [Beh00]. Zunächst werden jedoch zwei wichtige Aspekte, die bei allen Freistrah-Anwendungen bedacht werden müssen, diskutiert: Die Augensicherheit und die atmosphärische Transmission.

### Augensicherheit

Der Aspekt der Augensicherheit ist für Anwendungen von Lasern außerhalb des Labors generell wichtig, insbesondere bei der Meß- und Kommunikationstechnik.

UV-Licht und infrarotes Licht mit einer Wellenlänge  $> 2,5 \mu\text{m}$  wird bereits überwiegend auf der Hornhaut absorbiert. Das Licht, des für diese Arbeit interessanten Spektralbereichs von  $1,5 \mu\text{m}$  bis  $2,5 \mu\text{m}$  wird aufgrund seiner hohen Absorption in Wasser zum überwiegenden

Teil im Glaskörper des Auges absorbiert. Hierdurch tritt eine akute Schädigung des Auges im Vergleich zu anderen Spektralbereichen erst bei deutlich höheren Intensitäten auf. Dieser Wellenlängenbereich wird daher auch „augensicherer“ Spektralbereich genannt. Die vom Gesetzgeber erlaubten Pulsenergien für Freistrahlanwendungen liegen hier um einige Größenordnungen höher als beispielsweise bei einer Wellenlänge von  $1\ \mu\text{m}$ .

### Atmosphärische Transmission

Für die Fernerkundung in der Atmosphäre ist natürlich die atmosphärische Transmission von großer Bedeutung. In dem zuvor angesprochenen „augensicheren“ Spektralbereich wird diese überwiegend durch die Absorption von Kohlendioxid und Wasserdampf beeinflusst. Da insbesondere die Wasserdampfabsorptionslinien äußerst schmal sind, kann die Transmission innerhalb weniger Nanometer zwischen 0% und nahezu 100% schwanken. Dies wird auch an den in Abbildung 1.2 bzw. 1.3 dargestellten, aus der HITRAN-Datenbank berechneten, Transmissionsspektren der Atmosphäre im Wellenlängenbereich von  $1,5\ \mu\text{m}$  -  $1,6\ \mu\text{m}$  bzw.  $2,0\ \mu\text{m}$  -  $2,1\ \mu\text{m}$ , deutlich. Diese Wellenlängenbereiche werden dargestellt, da in dieser Arbeit Raman-Lasersysteme mit Emissionswellenlängen im Bereich um  $1,55\ \mu\text{m}$  und Thulium- bzw. Thulium-Holmium-Laser mit Emissionswellenlängen bei  $2,02\ \mu\text{m}$  bzw.  $2,1\ \mu\text{m}$  untersucht werden.

Der Vergleich der beiden Abbildungen macht deutlich, dass Systeme im Wellenlängenbereich um  $1,55\ \mu\text{m}$  zu bevorzugen sind, da hier die Transmissionsfenster sehr breit sind und zudem keine sehr ausgeprägten Absorptionslinien auftreten. Im Wellenlängenbereich des Thulium-Lasers bei  $2,02\ \mu\text{m}$  sind die Wasserdampfabsorptionslinien sehr ausgeprägt und die Transmissionsfenster nur sehr schmal. Die eingesetzten Laser müssen in diesem Bereich durchstimmbar sein und eine hohe Wellenlängenstabilität besitzen, um ein Transmissionsfenster genau treffen zu können. Bei längeren Wellenlängen im Bereich von  $2,1\ \mu\text{m}$  ist die Transmission wieder deutlich besser.

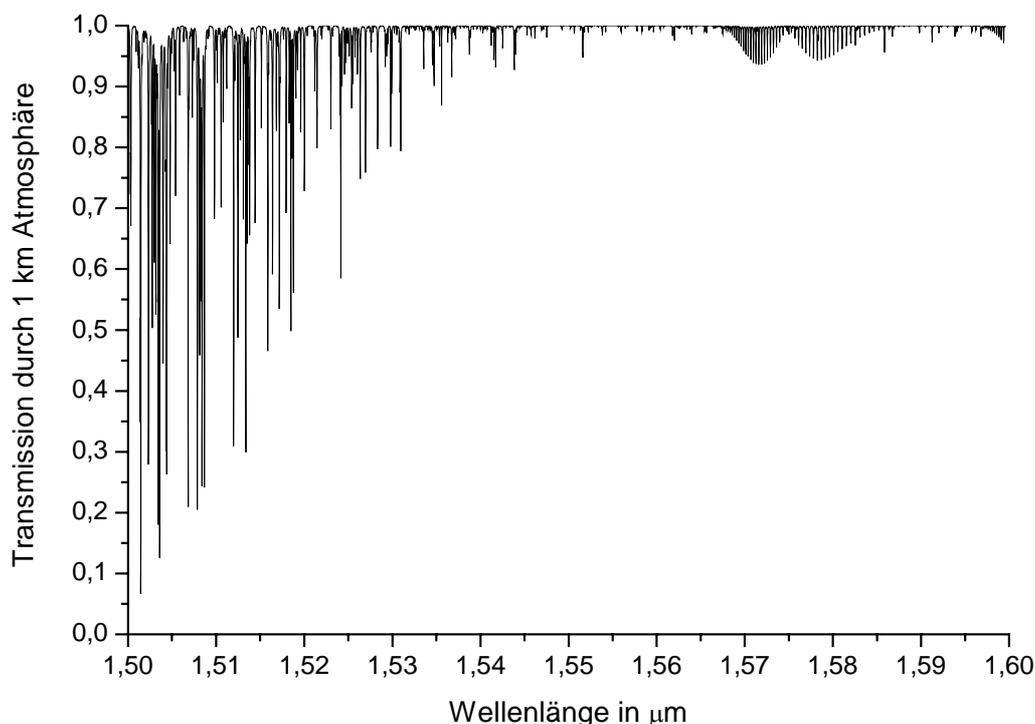


Abbildung 1.2: *Transmission der Atmosphäre in Bodennähe im Wellenlängenbereich von  $1,5\ \mu\text{m}$  bis  $1,6\ \mu\text{m}$  berechnet aus HITRAN-Datenbank [Hit04]*

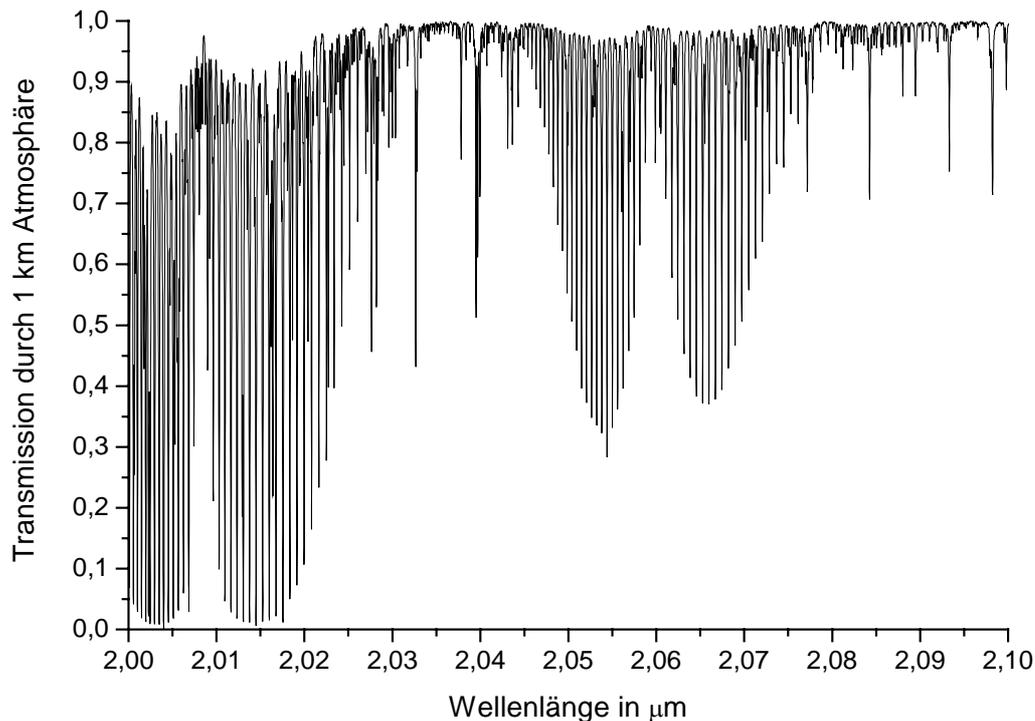


Abbildung 1.3: *Transmission der Atmosphäre in Bodennähe im Wellenlängenbereich von 2,0 μm bis 2,1 μm berechnet aus HITRAN-Datenbank [Hit04]*

## Doppler-LIDAR

Mit Hilfe des Dopplereffekts ist die Messung von Luftströmungen möglich. Ein vom Laser ausgesandter Puls wird z. B. an kleinen Staubteilchen in der Luft gestreut (Rayleigh-Streuung), die die gleiche Geschwindigkeit wie der sie umgebende Luftstrom besitzen. Aus dem rückgestreuten, dopplerverschobenen Signal kann also die Windgeschwindigkeit am Ort der Streuung ermittelt werden, wenn seine Frequenz mit der Originalfrequenz verglichen wird. Hierzu verwendet man das Heterodynverfahren, das aus der Anwendung beim Radioempfang bekannt ist. Der Frequenzunterschied wird dabei mittels Fourier-Transformation in eine Geschwindigkeitsinformation umgewandelt und der Informationsteil, welcher der Windgeschwindigkeit entspricht, wird mit einem Schwellwert verglichen.

Hat ein Objekt die Geschwindigkeitskomponente  $V_p$  parallel zum ausgesendeten Laserpuls der Frequenz  $\nu$  (Wellenlänge  $\lambda$ ), so erfährt das an ihm gestreute Signal gemäß des Dopplereffekts eine Frequenzverschiebung  $\Delta\nu_D$ :

$$\Delta\nu_D = 2 \frac{V_p}{c} \cdot \nu = 2 \frac{V_p}{\lambda} . \quad (1.1)$$

Soll bei einer Laserwellenlänge von 2,0 μm noch eine Auflösung von 1 m/s bei der Windgeschwindigkeit erreicht werden, so muß eine Frequenzverschiebung von nur 1 MHz noch erkannt werden. Da diese Frequenzverschiebung extrem klein im Vergleich zur Trägerfrequenz von 150 THz ist, wird zur Auswertung das Heterodynverfahren angewendet. Bei diesem Verfahren wird das Nutzsignal (dopplerverschobenes Rückstreusignal) auf einem Detektor mit dem eines schmalbandigen lokalen Oszillators (einfrequenter MO) überlagert. Zur weiteren Diskussion der Funktionsweise eines Doppler-LIDAR-System können diese beiden Signale näherungsweise wie folgt angesetzt werden:

$$E_{MO}(t) = A_{MO} \cdot \cos(\omega_0 t) , \quad (1.2)$$

$$E_{Sig}(t) = A_{Sig} \cdot \cos(\omega_0 t + \phi(t)). \quad (1.3)$$

Dabei ist  $\omega_0$  die Laserfrequenz,  $A_{MO}$  und  $A_{Sig}$  sind die Referenz- bzw. Signalamplitude und  $\phi(t)$  ist der Phasenunterschied zwischen den Signalen, der sich folgendermaßen ergibt:

$$\phi(t) = \omega_{MP} t + 2 \frac{V_p}{c} \omega_0 t - \Phi(t) - \Phi\left(t - \frac{2L}{c}\right). \quad (1.4)$$

$\Phi(t)$  ist eine willkürliche Anfangsphase zwischen Master- und Power-Laser und  $\omega_{MP}$  ist ein definierter Frequenzunterschied zwischen diesen beiden, der später bei der Signalauswertung eine Unterscheidung zwischen sich nähernden und sich entfernenden Objekten ermöglicht. Die Phasendifferenz  $\Phi(t-2L/c)$  beruht auf den verschiedenen zurückgelegten Wegen der Signale, es geht daher die Entfernung  $L$  zwischen Laser und Streuzentrum ein. Überlagern sich beide Signale auf dem Detektor, so kommt es zur Interferenz und man erhält für die detektierte Leistung:

$$\begin{aligned} P_{Det} &= [E_{MO}(t) + E_{Sig}(t)]^2 \\ &= A_{MO}^2 \cos^2(\omega_0 t) + A_{Sig}^2 \cos^2(\omega_0 t + \phi(t)) + 2A_{MO}A_{Sig} \cos(\omega_0 t) \cdot \cos(\omega_0 t + \phi(t)) \\ &= A_{MO}^2 \cos^2(\omega_0 t) + A_{Sig}^2 \cos^2(\omega_0 t + \phi(t)) + A_{MO}A_{Sig} \cos(2\omega_0 t + \phi(t)) + A_{MO}A_{Sig} \cos(\phi(t)). \end{aligned} \quad (1.5)$$

Da der Detektor der Frequenz des Laserlichtes nicht folgen kann, integriert er über die ersten drei Summanden. Diese lassen sich daher zu einer Konstanten zusammenfassen und man erhält

$$P_{Det} = const. + A_{MO}A_{Sig} \cos\left[\left(\omega_{MP} + 2 \frac{V_p}{c} \omega_0\right)t + \Phi\left(t - \frac{2L}{c}\right)\right]. \quad (1.6)$$

In der Auswertung werden über eine Fourier-Transformation in Echtzeit die Frequenzen aus dem Signal bestimmt, woraus sich das Geschwindigkeitsprofil entlang der Sichtlinie ergibt. Dieses Verfahren, das vergleichbar mit einer akustischen Schwebung ist, bietet die Möglichkeit, auch kleine Frequenzunterschiede zu messen. Außerdem ergibt sich durch das Heterodynverfahren eine Signalverstärkung um den Faktor  $A_{MO}/A_{Sig}$ . Die Intensität ist bei diesem Verfahren nämlich proportional zu  $A_{MO} \cdot A_{Sig}$  und nicht zu  $A_{Sig}^2$ , wie es der Fall wäre, wenn nur die Intensität des Meßsignals auf den Detektor treffen würde. Zusätzlich wird das Signal in einen Frequenzbereich verschoben, der konventionelle Signalverarbeitung erlaubt.

Von weiterem wichtigen Interesse ist das Signal-zu-Rausch-Verhältnis  $S/N$  in Abhängigkeit von der Entfernung des Streuzentrums, das sich für ein gepulstes LIDAR-System nach Sonnenschein und Horrigan wie folgt ergibt [Son71]:

$$\frac{S}{N} = \frac{\eta P_p \beta}{2 B_N h \nu_0} \cdot \frac{\pi r_a^2 \Delta L}{L^2 \cdot \left[1 + \left(\frac{\pi r_a^2}{\lambda L}\right)^2 \cdot \left(1 - \frac{L}{f}\right)^2\right]}. \quad (1.7)$$

Dabei ist  $\eta$  die Quanteneffizienz des Detektors,  $P_p$  die Spitzenleistung des Lasers,  $\beta$  der atmosphärische Rückstreuoeffizient,  $r_a$  der Radius der Empfängerapertur,  $B_N$  die maximale Bandbreite des Nutzsignals,  $\Delta L$  die Länge des pro Puls abgetasteten Atmosphärenabschnitts und  $f$  die Brennweite des Teleskops.

Die Reichweite eines LIDAR-Systems wird seitens des Lasers wesentlich durch die Spitzenleistung der Laserimpulse und somit bei festgelegter Impulsdauer durch die Impulsenergie bestimmt.

## 1.2 Das EU-Projekt I-WAKE

Wie am Anfang dieses Kapitels bereits erwähnt, wurde diese Arbeit im Rahmen des I-WAKE-Projektes der Europäischen Union (EU) durchgeführt. Ziel des I-WAKE-Projektes ist es, die Flugsicherheit zu erhöhen und die Start- und Landekapazitäten an Flughäfen zu optimieren. Dies soll unter anderem durch die Entwicklung eines „on-board“ LIDAR-Systems geschehen, dass Wirbelschleppen von Flugzeugen (engl. wake vortices) und andere atmosphärische Turbulenzen, wie z. B. Fallwinde oder CATs (engl. clear air turbulences) nachweisen kann [IWA01].

Wirbelschleppen werden von allen Flugzeugtypen erzeugt, da sie mit dem Auftrieb einhergehen, den jedes Flugzeug zum Fliegen braucht. Wie in Abbildung 1.4 zu sehen, entstehen die Wirbel an den Enden der beiden Tragflächen, so dass sich hinter einem Flugzeug zwei Bereiche mit starken Luftwirbeln bilden. Die Stärke dieser Wirbelschleppen hängt erheblich von dem Gewicht des Flugzeuges und von der Flugsituation ab (im Landeanflug sind die Wirbelschleppen z. B. besonders stark).

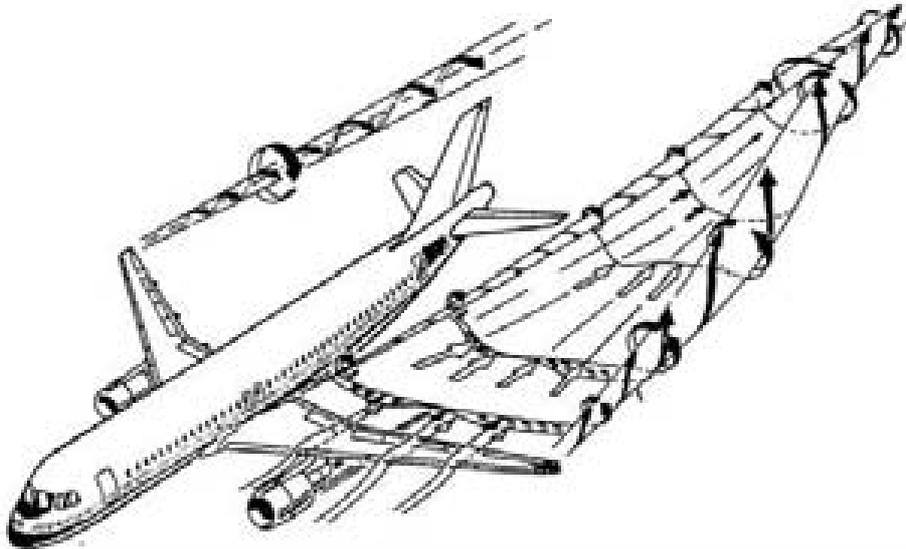


Abbildung 1.4: *Schematische Darstellung der Wirbelschleppenentstehung bei einem Flugzeug* [IWA01]

Um eine Gefahr für die Flugsicherheit durch Wirbelschleppen auszuschließen, müssen zur Zeit fest vorgeschriebene Abstände zwischen Flugzeugen bei Start und Landung eingehalten werden, die häufig bereits eine Begrenzung für die Kapazitäten von Flughäfen darstellen. Da diese Abstände eher großzügig bemessen sind und nur auf dem Gewicht der Flugzeuge beruhen, ohne die gerade herrschenden atmosphärischen Bedingungen zu berücksichtigen, dürften sie sich bei Verwendung eines Meßsystems oft deutlich reduzieren lassen.

Dass sich Wirbelschleppen mit einem Doppler-LIDAR-System, das im Wellenlängenbereich bei  $2\ \mu\text{m}$  arbeitet, nachweisen lassen, wurde bereits im Rahmen des MFLAME-Projektes (Multi Function Laser Atmospheric Measuring Equipment) bei einer Messung vom Boden aus demonstriert. Daher sind auch die Leistungsanforderungen, die an das Laser-System gestellt werden in etwa bekannt. Um ein gutes Signal-zu-Rausch-Verhältnis (siehe Gl. 1.7) bei einer Reichweite des Systems von einigen km zu erreichen, werden Pulsenergien von ca. 5 mJ bei einer Wiederholrate von etwa 1 kHz benötigt. Die Reichweite von einigen km ist nötig, um eine genügende Vorwarnzeit zu haben, so dass der Pilot noch reagieren kann.

Die Forderung nach einem Einfrequenzlaser mit einigen mJ Pulsenergie und einer Wiederholrate von 1 kHz lässt sich nur durch ein gekoppeltes Laser-System erfüllen. Man verwendet eine sogenannte MOPL (Master Oscillator – Power-Laser) Anordnung. Hierbei wird ein frequenzstabiler Einfrequenzlaser mit niedriger cw-Ausgangsleistung (engl. continuous wave) dazu benutzt, einen gepulsten Laser hoher Pulsenergie und Wiederholrate auf eine Frequenz zu stabilisieren. Hierzu wird die Technik des „Seedens“ (engl. to seed = säen) verwendet. Die Ausgangsstrahlung des Master Oszillators wird in Resonanz mit einer Resonatormode des Power-Lasers gebracht und injiziert damit genügend Photonen in dessen Resonator, um den Power-Laser zum Oszillieren auf dieser Frequenz zu bringen. In der Praxis wird hierzu zunächst der MO auf die gewünschte Frequenz stabilisiert und dann die Resonatorlänge des Power-Lasers auf die Resonanz stabilisiert.

Im Rahmen dieser Arbeit sollte als Beitrag zum I-WAKE-Projekt ein Master Oszillator bzw. Seed-Laser im Wellenlängenbereich um  $2\ \mu\text{m}$  auf Basis von diodengepumpten Festkörperlasern mit Tm- oder Ho-dotierten Laserkristallen realisiert werden. Ziel war die Entwicklung eines unter Laborbedingungen stabilen Aufbaus, der im Einfrequenz-Betrieb cw-Ausgangsleistungen zwischen 30 mW und 50 mW liefert.

Zusätzlich wurden erste Untersuchungen zu ECDLs (engl. external cavity diode lasers) bei  $2\ \mu\text{m}$  durchgeführt. ECDLs könnten zukünftig (im Vergleich zu Festkörperlasern) sehr kompakte, stabile und kostengünstige Seed-Laser ermöglichen

Eine weitere Aufgabenstellung im Arbeitspaket „Technics and Technologies“ des I-WAKE-Projektes war die Realisierung von Raman-Lasern im Wellenlängenbereich um  $1,5\ \mu\text{m}$ . Hier sollte die Eignung solcher Raman-Laser für zukünftige zu entwickelnde LIDAR-Lasersysteme untersucht werden. Der Wellenlängenbereich um  $1,5\ \mu\text{m}$  hat einige Vorteile im Vergleich zum Bereich um  $2\ \mu\text{m}$  auf die in Kapitel 5 noch eingegangen wird.

### 1.3 Gliederung der Arbeit

Diese Arbeit ist in insgesamt sechs Kapitel unterteilt. In Kapitel 2 erfolgt eine Darstellung der wichtigsten physikalischen Grundlagen von Lasern, wobei insbesondere auf die verschiedenen Prozesse in dotierten Festkörpern (2.3), die Beschreibung des Laserprozesses mittels Rategleichungen (2.4), die Realisierung von Einfrequenzlasern (2.5) und den gütegeschalteten Laserbetrieb (2.6) genauer eingegangen wird. In Kapitel 3 werden die für den Einsatz als Master Oszillator entwickelten Thulium- und Thulium-Holmium-Laser und deren Eigenschaften dargestellt (3.4) und es werden einige spektroskopische Ergebnisse der relativ neuen Lasermaterialien Tm:LuAG und Tm,Ho:LuAG beschrieben (3.3). Im darauffolgenden Kapitel werden dann Experimente mit Laserdioden mit externer Rückkopplung beschrieben, die die Eignung solcher Systeme als Master Oszillator für ein LIDAR-System überprüfen sollen. Kapitel 5 befasst sich mit möglichen LIDAR-Lasern im Wellenlängenbereich zwischen  $1,5\ \mu\text{m}$  und  $1,65\ \mu\text{m}$ . Nach einer kurzen Übersicht über den internationalen Stand werden in Abschnitt 5.2 Aufbau und Parameter des realisierten gütegeschalteten Nd:YAG-Lasers im Wellenlängenbereich um  $1,34\ \mu\text{m}$  diskutiert. Dieser Laser wird als Pumplaser für die Raman-Laserexperimente, deren Grundlagen und Resultate in den Abschnitten 5.3 und 5.4 beschrieben werden, eingesetzt. Mit der Zusammenfassung und dem Ausblick in Kapitel 6 schließt diese Arbeit ab.