

Nachweis zur Augensicherheit des Airborne Mobile Aerosol Lidar AMALi
A. Richter, R. Neuber
AWI-Potsdam

23. Februar 2006

Im Flugzeuglidar Amali wird ein Nd:YAG Laser der Firma Big Sky Laser, Montana, USA verwendet, mit den in Tabelle 1 wiedergegebenen Spezifikationen.

Laser		CFR 200
Max. altitude for safe operation (m)		3000
Beam Diameter (mm)		6
Repetition Frequency (Hz)		15
Pulse Energy (mJ)	nur 1064	46
	nur 532	94
	nur 355	25
Puls Duration (ns)	1064	12-13
	532	11,38
	355	10-11
Beam Divergence (mrad)	1064	2,6-3,6
Containing 86.5% energy	532	2,59
	355	1,5-2,5

Tabelle 1) Herstellerangaben zum Laser CFR200 Stable der Firma Big Sky Laser, vertrieben durch Quantel. Die Werte für Pulsdauer und Strahldivergenz wurden für 532 nm gemessen, für die anderen Wellenlängen daraus abgeschätzt.

Das Flugzeuglidar wird in zwei verschiedenen Konfigurationen, der Nadir- und der Zenith-Konfiguration im Flugzeug eingebaut und betrieben.

In der Nadir-Konfiguration mit zwei Wellenlängen (532 nm, 1064 nm) wurde für das Amali 2003 schon eine Unbedenklichkeitserklärung erstellt. Das Gerät wurde in dieser Konfiguration bereits an Bord der Polar 2 eingesetzt. Nun wird bei dem System eine Wellenlänge (1064 nm) gegen eine andere (355 nm) ausgetauscht.

Im Boden des Fliegers befindet sich eine Luke mit 15cm Durchmesser, durch welche der Laserstrahl in der Nadir-Konfiguration ungefähr senkrecht zum Boden ausgesendet wird. Die Messung soll in einer Flughöhe von 3000 m stattfinden, bei einer minimalen Flug-Geschwindigkeit von 130 kn (66 m/s). Um zugängliche Strahlung für die Flugzeuginsassen zu verhindern, wird das Lidar mit einem Schutzgehäuse auf dem Boden der Polar 2 befestigt.

In der neuen Zenith-Konfiguration wird das Amali umgedreht und misst vom Flugzeug aus nach oben. In der Decke befindet sich eine Durchführung mit 15cm Durchmesser, durch die der Laserstrahl senkrecht nach oben ausgesendet wird. Das Lidarsystem wird mit einer Halterung am Boden der Polar 2 befestigt. Das Gerät ist von einem Schutzgehäuse umgeben. Der ausgesendete Strahl verläuft in einem Strahlschutzrohr bis zur Deckendurchführung, so dass kein Laserlicht in die Kabine des Flugzeugs gelangen kann.

In der Zenith-Konfiguration besteht unter normalen Umständen keine Gefahr, dass ein Beobachter direkt in den Laserstrahl blickt.

In nachfolgenden Berechnungen soll geprüft werden, ob der Laser in der Nadir-Konfiguration für einen Beobachter auf der Erde bei direktem Blick in den Strahl den Anforderungen der Unfallverhütungsvorschriften genügt.

Im Folgenden werden die Berechnungen für die Nadir-Konfiguration mit zwei Wellenlängen, 532 nm und 355 nm, durchgeführt.

Den Berechnungen liegen die *Sicherheitstechnischen Festlegungen für Lasergeräte und Anlagen*, VDE-Verlag Beuth 1998, ISSN 0178-224X zu Grunde.

Bei einer Flughöhe von $X_{\max} = 3000$ m und einer Divergenz von 2,6 mrad fuer 532 nm ist der Laserstrahl am Erdboden auf 7,8 m Durchmesser aufgeweitet. Es ergibt sich für eine Flug-Geschwindigkeit von 66 m/s und einer Repetitionsrate des Lasers von 15 Hz, dass die Mittelpunkte zweier aufeinander folgender Laserpulse am Boden einen Abstand von 4,4 m haben. Zusammen mit dem Durchmesser eines einzelnen Pulses ergibt sich, dass ein ruhender Beobachter maximal 2 Laserpulsen ausgesetzt werden kann. Bei einer höheren Fluggeschwindigkeit oder einer niedrigeren Flughöhe reduziert sich diese Zahl.

Der restliche IR-Anteil des Lasers bei 1064 nm wird nicht ausgesendet und wird darum in den folgenden Abschätzungen nicht berücksichtigt.

Aufgrund der Entfernung und des Strahldurchmessers ist der Laser als Punktquelle anzusehen.

Bei den Wellenlängen 532 nm und 355 nm darf die Bestrahlung jeweils nicht größer als der Wert der Maximal zulässigen Bestrahlung (MZB-Wert) fürs Auge sein.

Der maximal zulässige Bestrahlungswert für wiederholt gepulste Laser der Wellenlänge 400 nm - 10^6 nm wird durch Anwendung derjenigen der nachfolgenden Forderungen a), b) und c) bestimmt, die die größte Einschränkung darstellt.

Für die Bestrahlung des Auges bei anderen Wellenlängen wird der MZB-Wert durch Anwendung derjenigen der nachfolgenden Forderungen a) und b) bestimmt, die die größte Einschränkung darstellt.

Forderungen zur Augensicherheit bei einem gepulsten Lasersystem

- a) Die Bestrahlung durch jeden Einzelimpuls einer Impulsfolge darf nicht den MZB-Wert für einen Einzelimpuls überschreiten,
- b) die mittlere Bestrahlungsstärke für eine Impulsfolge der Dauer T darf nicht den MZB-Wert für einen einzelnen Impuls der Dauer t übersteigen,
- c) die Bestrahlung durch jeden einzelnen Impuls in der Impulsfolge darf die MZB des Einzelimpulses multipliziert mit dem Korrekturfaktor C_5 nicht übersteigen.

$$C_5 = N^{-1/4}$$

N = Anzahl der Impulse während der Bestrahlung (in diesem Fall N=2)

Als Grenzblende zur Berechnung der MZB-Werte dient beim Auge im Sichtbaren eine Messblende mit 7 mm Durchmesser, im UV mit 1mm Durchmesser. Über deren Fläche wird die Bestrahlungsstärke oder Bestrahlung gemittelt.

Emissionsdauer in s	10^{-9} bis 10^{-7}
Wellenlänge in nm	
315 bis 400	$C_1 \text{ J/m}^2$
400 bis 550	$5 \times 10^{-3} C_6 \text{ J/m}^2$

Tabelle 2) Werte der **Maximal zulässigen Bestrahlung (MZB)** für direkte Einwirkung von Laserstrahlung auf die Hornhaut des Auges

Der Korrekturfaktor C_1 berechnet sich nach $C_1 = 5,6 \times 10^3 t^{0,25}$ (mit t = Emissionsdauer in s). Um den Grenzwert zu bestimmen, wird für t die minimale Emissionsdauer angenommen. Da es sich im gegebenen Fall um eine Punktquelle handelt, ist der Faktor $C_6 = 1$.

Zunächst wird die **Bestrahlungsstärke fürs Auge bei 532 nm** überprüft.

Berechnung des Kriteriums a)

Bei einem Durchmesser von 7,8 m beträgt die Fläche des Laserspots am Boden $47,78 \text{ m}^2$.

Die Pulsleistung bei 532 nm beträgt maximal 94 mJ.

Die Bestrahlung des Einzelimpulses errechnet sich für 532 nm zu $2,0 \times 10^{-3} \text{ J/m}^2$.

Wellenlänge nm	532
MZB	$5 \times 10^{-3} \text{ J/m}^2$
$H_{\text{Einzelimpuls}}$	$2,0 \times 10^{-3} \text{ J/m}^2$
Quotient	0,40

Tabelle 3) Werte entsprechend der Forderung a)

Der Quotient aus der Bestrahlung und dem zugehörigen MZB-Wert ist 0,4, und das Kriterium a) ist erfüllt.

Berechnung des Kriteriums b)

In der Zeit einer Impulsfolge T von $2/15 \text{ Hz} = 0,13 \text{ s}$ kann der Beobachter von 2 Pulsen getroffen werden. Der MZB-Wert aus Tabelle 2) berechnet sich wie beim Einzelpuls für die Wellenlänge 532nm zu $5 \times 10^{-3} \text{ J/m}^2$. Die gemittelte Bestrahlung für die Impulsfolge berechnet sich nach der Formel:

$H_{\text{Impulsfolge, gemittelt}} = (\text{Pulsenergie} \times \text{maximale Emissionsdauer } t \times \text{Anzahl der Pulse}) / (\text{Zeit der Impulsfolge } T \times \text{Strahlfläche})$

Wellenlänge nm	532
MZB	$5 \times 10^{-3} \text{ J/m}^2$
$H_{\text{Impulsfolge, gemittelt}}$	$3,50 \times 10^{-10} \text{ J/m}^2$
Quotient	$7,0 \times 10^{-8}$

Tabelle 4) Werte zur Forderung b)

Der Quotient aus b) ist viel kleiner als 1 und Kriterium b) somit erfüllt.

Berechnung des Kriterium c)

Der MZB-Wert für einen Einzelimpuls muß für eine Impulsfolge um den Faktor $C_5 = N^{-0,25}$ reduziert werden. Bei 2 Pulsen beträgt $C_5 = 0,84$ Daraus ergeben sich die Werte der Tabelle 5)

Wellenlänge nm	532
$MZB_{\text{Einzelimpuls}} \times C_5$	$4,2 \times 10^{-3} \text{ J/m}^2$
$H_{\text{Einzelimpuls}}$	$2,0 \times 10^{-3} \text{ J/m}^2$
Quotient	0,476

Tabelle 5) Werte zum Kriterium c)

Der Quotient kleiner 1 ist, wird auch Kriterium c) erfüllt.

Nun wird die **Bestrahlungsstärke fürs Auge bei 355 nm** überprüft.

Berechnung des Kriteriums a)

Bei einem Durchmesser von 4,5 m beträgt die Fläche des Laserspots am Boden $15,90 \text{ m}^2$.

Die Pulsleistung bei 355 nm beträgt maximal 25 mJ.

Die Bestrahlung des Einzelimpulses errechnet sich für 355 nm zu $1,57 \times 10^{-3} \text{ J/m}^2$.

Wellenlänge nm	355
MZB	$56,0 \text{ J/m}^2$
$H_{\text{Einzelimpuls}}$	$1,57 \times 10^{-3} \text{ J/m}^2$
Quotient	$2,8 \times 10^{-5}$

Tabelle 6) Werte entsprechend der Forderung a)

Der Quotient aus der Bestrahlung und dem zugehörigen MZB-Wert ist $2,8 \times 10^{-5}$, und das Kriterium a) ist erfüllt.

Berechnung des Kriteriums b)

In der Zeit einer Impulsfolge T von $2/15 \text{ Hz} = 0,13 \text{ s}$ kann der Beobachter von 2 Pulsen getroffen werden. Der MZB-Wert aus Tabelle 2) berechnet sich wie beim Einzelpuls für die Wellenlänge 355 nm zu $56,0 \text{ J/m}^2$. Die gemittelte Bestrahlung für die Impulsfolge berechnet sich nach der Formel:

$H_{\text{Impulsfolge, gemittelt}} = (\text{Pulsenergie} \times \text{maximale Emissionsdauer } t \times \text{Anzahl der Pulse}) / (\text{Zeit der Impulsfolge } T \times \text{Strahlfläche})$

Wellenlänge nm	355
MZB	56,0 J/m ²
H _{Impulsfolge,gemittelt}	2,66 x 10 ⁻¹⁰ J/m ²
Quotient	4,8 x 10 ⁻¹²

Tabelle 7) Werte zur Forderung b)

Der Quotient aus der Bestrahlung und dem zugehörigen MZB-Wert ist viel kleiner als 1 und Kriterium b) somit erfüllt.

Fazit: Für die Augensicherheit der Wellenlänge 532 nm ist der Grenzwert für den reduzierten Einzelimpuls nach c) von allen Kriterien das am meisten einschränkende. Der MZB-Wert für einen Einzelimpuls beträgt unter typischen Messbedingungen für 532 nm gleich $4.2 \times 10^{-3} \text{ J/m}^2$. Für die Augensicherheit der Wellenlänge 355 nm ist der Grenzwert für den Einzelimpuls nach a) entscheidend. Der mit dem Laser maximal erreichte Wert ist mehrere Größenordnungen kleiner als dieser Grenzwert. Der MZB-Wert für einen Einzelimpuls beträgt unter typischen Messbedingungen für 355 nm $56,0 \text{ J/m}^2$.

Aus diesen Angaben für eine Flughöhe von 3000 m lässt sich eine minimal zulässige Flughöhe für augensichere Messungen X_{\min} wie folgt ableiten. Da die Bestrahlungsintensität proportional zu $1/r^2$ ist, gilt:

$$X_{\min} = S_c^{1/2} X_{\max} = (0.476)^{1/2} \times 3000\text{m} = \mathbf{2070 \text{ m}}$$

S_c - die Summe der Quotienten für Kriterium c)

X_{\max} – maximale Flughöhe

Damit ergibt sich ein Höhenbereich von 2100 m – 3000 m über Grund für den sicheren Betrieb des Lidars AMALi.

Betriebsvorschriften:

- Der Laser darf erst eingeschaltet werden, wenn das Flugzeug die Minimalhöhe für augensicheren Laserbetrieb erreicht hat.
- Die ganze Messanordnung wird so durch ein Schutzgehäuse abgeschirmt, daß keine Strahlung in den Flugzeuginnenraum gelangen kann.