

1 Teramobile

Der Name „Teramobile“ steht im Zentrum dieser Arbeit. Er bezeichnet sowohl das weltweit erste mobile Terawatt-Lasersystem als auch das deutsch-französische Forschungsprojekt, in dessen Rahmen dieses mobile Labor entwickelt wurde. Wie schon in der Einleitung beschrieben, geht die Idee zum Teramobile auf Versuche zurück, die in Zusammenarbeit der Gruppen von Prof. Wöste (FU Berlin) und Prof. Sauerbrey (FSU Jena) mit dem am Institut für Optik und Quantenelektronik (IOQ) in Jena vorhandenem Terawatt-Laser begonnen wurden [Wöste et al., 1997; Rodriguez, 1998; Rairoux et al., 2000]. Später stießen Prof. Jean-Pierre Wolf von der Universität Lyon, Laboratoire de Spectrométrie Ionique et Moléculaire (LASIM), und Prof. André Mysyrowicz von der ENSTA-École Polytechnique, Laboratoire d'Optique Appliquée (LOA), hinzu. Mit der Bewilligung von Fördermitteln durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) und das Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) begann im Sommer 1999 das deutsch-französische Forschungsprojekt Teramobile. Im Frühjahr 2001 wurde das mobile Labor fertiggestellt und in Betrieb genommen.

In diesem Kapitel werden Konzeption und technische Eigenschaften des Teramobile-Containers und der in ihm integrierten Komponenten beschrieben. Schwerpunkte sind dabei die Erzeugung und Aussendung der ultrakurzen, hochintensiven Terawatt-Laserpulse, die Betriebs- und Transporteigenschaften des mobilen Labors sowie die Detektionseinheit für Lidar und andere Messungen. Zum Teil sind diese systembeschreibenden Punkte – in Verbindung mit einem Bericht zum Stand des Projekts ein Jahr nach Inbetriebnahme des Teramobile-Containers – bereits veröffentlicht worden [Wille et al., 2002].

1.1 Das Terawatt-Lasersystem

Um an die Erfahrungen, die mit dem Lasersystem am IOQ gemacht wurden, anzuknüpfen und die geplanten Forschungsvorhaben umsetzen zu können, wurde als Vorgabe festgelegt, dass der Teramobile-Laser Pulse mit mindestens 4 TW ($4 \cdot 10^{12}$ W) Leistung und eine kürzeste Pulslänge von maximal 100 fs liefern müsse. Diese Werte entsprechen einer Puls-

energie von 400 mJ. Diese Spezifikationen lagen zur Zeit der Vorarbeiten zum Teramobile-Projekt im oberen Bereich des Spektrums der vorhandenen Laborsysteme, die nach dem üblichen Verfahren der *Chirped Pulse Amplification* (CPA, siehe Abschnitt 1.1.1) arbeiten. Zusätzlich sollte das System eine Fläche von nicht mehr als etwa fünf Quadratmetern einnehmen, um in einen Standard-Frachtcontainer eingebaut werden zu können und dort noch bedienbar zu sein. Die Tatsache, dass die vorhandenen Laborsysteme üblicherweise einen weit größeren Raum einnehmen, ist damit zu erklären, dass sie zumeist in weitgehender Eigenentwicklung der Forschungseinrichtungen über Jahre gewachsen sind. Die Erfahrungen, die bei dieser Entwicklungsarbeit, zum Beispiel am IOQ, gemacht wurden, ermöglichten die Herstellung eines Lasersystems, das die Anforderungen unseres Projekts erfüllt.

Vor der Beschreibung des Teramobile-Lasers folgt hier zunächst eine kurze Darstellung des Verfahrens, mit dem es möglich ist, sehr kurze Laserpulse auf Spitzenleistungen von über 10^{12} Watt zu verstärken.

1.1.1 Die Erzeugung hochintensiver Femtosekundenpulse (CPA)

Mitte der achtziger Jahre veröffentlichten Strickland und Mourou ihre Erfindung des Verfahrens, das man heute unter dem Begriff *Chirped Pulse Amplification* (CPA) kennt [Strickland und Mourou, 1985]. Sie sprechen dort von der prinzipiellen Möglichkeit, Sub-Pikosekunden-Pulse mit Energien im Joule-Bereich zu erzeugen. Dies wird heute in der Tat von einigen Systemen erreicht.

Am Anfang der CPA steht ein Laser, der mit sehr hoher Wiederholrate (typischerweise ca. 80 MHz) sehr kurze Pulse abgibt, ein sogenannter **Oszillator**. Strickland und Mourou benutzten einen cw-gepumpten, modengekoppelten Nd:YAG-Laser. Später setzte sich mit Titan dotierter Saphir (Ti:Sa) als Lasermedium durch, da dieses Material einen besonders breiten spektralen Emissionsbereich (Zentralwellenlänge bei ca. 800 nm) aufweist und kurze Pulse grundsätzlich eine große Bandbreite haben. Ein weiterer Vorteil des Ti:Sa ist, dass die maximale Anregungseffizienz im grünen Spektralbereich liegt. Daher können die gängigen frequenzverdoppelten Nd-Festkörperlaser als Pumpquellen verwendet werden.

Bei der Modenkopplung wird ausgenutzt, dass die axialen Moden in einer Laserkavität konstruktiv oder destruktiv überlagern. Wenn man erreicht, dass alle Moden in Phase schwingen, kann ein einzelner intensiver Puls entstehen, der zwischen den Endspiegeln hin- und herläuft. So gibt die räumliche Dimension des Lasers den zeitlichen Abstand der Pulse vor. Die Pulsdauer wird durch die Anzahl der koppelnden Moden bestimmt (mit der Kavitätslänge L und der Lichtgeschwindigkeit c):

$$N = \Delta f \cdot \frac{2L}{c} \quad (1-1)$$

Bei Lasermedien mit einer großen Linienbreite Δf können über hunderttausend Moden koppeln und somit Femtosekundenpulse erzeugt werden. Eine gängige Methode, die gekoppelten Moden zu verstärken und die ungekoppelten zu unterdrücken, ist die Ausnutzung des Kerr-Linseneffekts. Dazu muss ein Material mit nichtlinearem, intensitätsabhängigem Brechungsindex $n = n_0 + n_2 I$ (siehe Abschnitt 3.1.2) in den Strahlengang gebracht werden (dies kann das Lasermedium selbst sein). Durch seine hohe Intensität I erfährt der aus gekoppelten Moden entstandene Puls Selbstfokussierung, wodurch sich seine transversale Ausdehnung verkleinert. Zum einen kann nun die Überlappung der Strahlengänge des umlaufenden Pulses und des cw-Pumplasers im Lasermedium optimiert werden, zum anderen wird eine Blende eingesetzt, um die ungekoppelten und daher nicht selbstfokussierten Moden zu unterdrücken. Durch Verfeinerung dieser Technik ist es der Arbeitsgruppe von F. Krausz in Wien gelungen, einen Ti:Sa-Femtosekundenlaser (siehe Bild 1-1) zu entwickeln, der mit einer Pulsdauer von 8 fs fast die Bandbreitenbegrenzung erreicht [Stingl et al., 1995]. Um noch kürzere Pulse zu erhalten, geht man zu höheren Laserfrequenzen.

Kommerzielle Femtosekundenoszillatoren liefern typischerweise Pulslängen im Bereich von 20 bis 80 fs. Die Pulsenergien dieser Laser liegen bei einigen Nanojoule. Will man die Pulse nun um etliche Größenordnungen verstärken, ist es notwendig sie zunächst zeitlich zu strecken, da sonst die Intensität die Belastbarkeit der optischen Elemente des Verstärkersystems übersteigen würde. Dies geschieht, indem der Puls einen sogenannten *chirp*

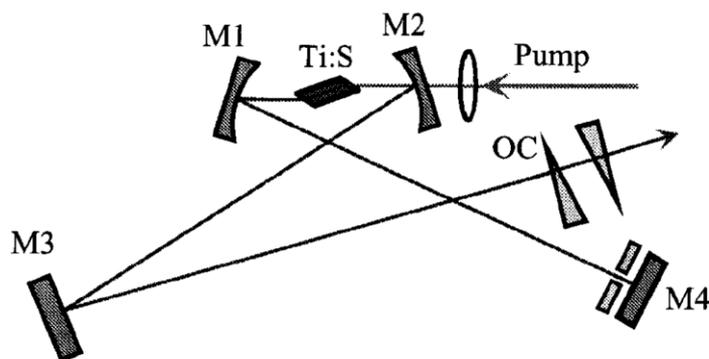


Bild 1-1. Abbildung aus [Xu et al., 1997]. Schematische Darstellung eines Ti:Sa-Femtosekundenoszillators. Die Blende vor dem Endspiegel M4 gehört zur Kerr-Linsen-Modenkopplung. Der Auskoppelspiegel (OC) ist auf ein keilförmiges Substrat aufgebracht, ein weiterer Keil dahinter kompensiert die Dispersion.

(engl. Zirpen, Zwitschern) erhält. Die spektralen Anteile des breitbandigen Pulses werden zeitlich auseinander gezogen. Es ergibt sich eine Zeitabhängigkeit der Frequenz der Form

$$\omega(t) = \omega_0 + 2\gamma t \quad , \quad (1-2)$$

wobei $2\gamma = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\phi}{dt^2}$ (ϕ ist die zeitabhängige Phasendifferenz) der Chirpparameter ist, der den linearen Chirp angibt. Treten bei der Taylor-Entwicklung von $\omega(t)$ auch höhere Terme auf, spricht man vom quadratischen bzw. kubischen Chirp.

Strickland und Mourou benutzten zur Erzeugung des Chirps zunächst eine 1,4 km lange Faser, in der der Puls aufgrund von Gruppengeschwindigkeitsdispersion (GVD) und Selbstphasenmodulation (SPM) auf mehrere hundert Pikosekunden gestreckt wird. Üblicherweise werden heutzutage **Pulsstrecke** (*stretcher*) eingesetzt, bei denen durch ein Gitter unterschiedliche Weglängen für die verschiedenen spektralen Anteile des Pulses entstehen (siehe Bild 1-2). Der dabei erzeugte Chirp ist prinzipiell vollständig reversibel, so dass die Kürze der Oszillatorpulse nicht „verloren geht“.

Der gestreckte Puls wird unter Verwendung von Polarisatoren und einem Faraday-Rotator optisch isoliert, um den Oszillator vor Rückreflexen aus den folgenden Verstärkerstufen zu schützen. Eine Pockelszelle und ein Polarisator dienen zur Auswahl einzelner Pulse (*pulse picker*), um die Wiederholrate von den ca. 80 MHz des Oszillators auf den gewünschten Wert zu verringern (typischerweise zwischen ca. 10 Hz bei sehr hoher Energieverstärkung und 1 kHz). Häufig ist die Pulsauswahl in eine erste Verstärkerstufe, einen **regenerativen Verstärker**, integriert (in Bild 1-2 nicht enthalten).

Um nun sehr hochenergetische Pulse mit der reduzierten Wiederholrate zu erhalten, werden ein oder mehrere **Multipass-Verstärker** angeschlossen. Sie enthalten das Lasermedium (Ti:Sa-Kristall), in das durch starke, gepulste Laser Energie gepumpt wird, die dann die Pikosekundenpulsen in mehreren Durchläufen verstärkt.

Schließlich werden die spektralen Anteile des Pulses in einem **Gitter-Kompressor** wieder „zusammengeschoben“. Es gibt Kompressoren mit vier Gittern in spiegelsymmetrischer Anordnung oder mit zwei Gittern und einem Reflektor (siehe Bild 1-2). Da die nach dem Pulsstrecke durchlaufenen Optiken das Spektrum und die Phase des Pulses verändert haben, ist es in der Regel nicht möglich die ursprüngliche Pulslänge wieder zu erhalten. Typisch ist etwa eine Verdopplung der Pulslänge im Vergleich zum Oszillatorpuls. Kommerzielle voll integrierte CPA-Systeme (z.B. mit regenerativem, aber ohne Multipass-Verstärker) liefern üblicherweise Pulsenergien von einigen hundert Mikrojoule. Größere

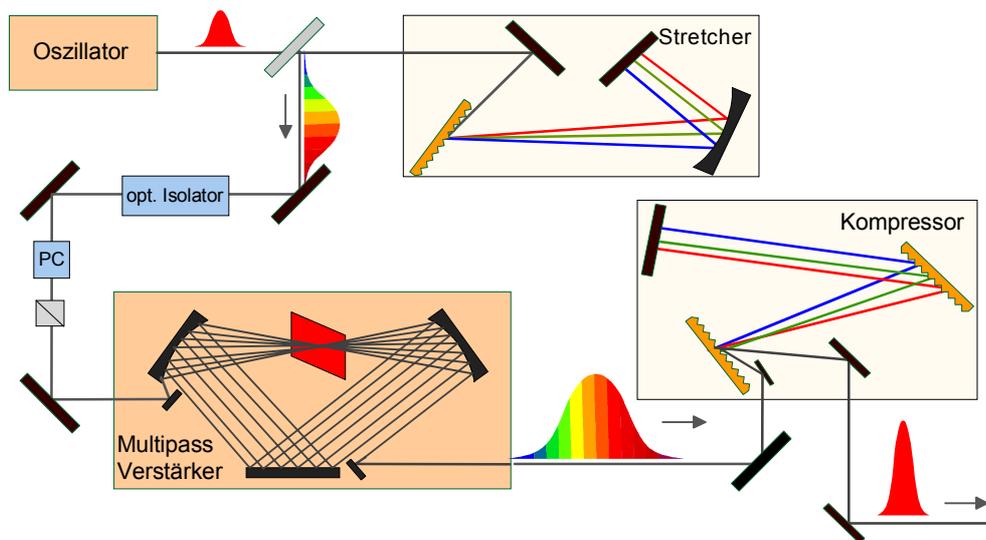


Bild 1-2. Schematische Darstellung eines Kurzpuls-Verstärkersystems.

Laborsystem erreichen Energien von einigen Millijoule (bei bis zu 1 kHz Repetitionsrate) oder mehreren hundert Millijoule, also Spitzenleistungen im Terawattbereich. Um ein solches Terawattsystem handelt es sich beim Teramobile-Laser.

Ausführliche Informationen zur CPA finden sich in Übersichtsartikeln mit Schwerpunkten bei der Erzeugung extrem hoher Leistungen [Backus et al., 1998] und extrem kurzer Pulse [Brabec und Krausz, 2000].

1.1.2 Eigenschaften des Teramobile-Lasers

Der Laser für das Teramobile-Projekt wurde in Zusammenarbeit mit der Firma Thales Laser (früher B.M.Industries, Orsay, Frankreich) entwickelt. Am Anfang der CPA-Kette steht ein Ti:Sa-Oszillator Femtosource Compact Pro von Femtolasers (Wien). Die Pulsverstärkung passiert in einem regenerativen und zwei Multipass-Verstärkern. Letztere, ein Vor- und ein Hauptverstärker, haben jeweils vier Durchgänge. Der Ti:Sa-Kristall des Hauptverstärkers wird pro Puls mit maximal 2 J bei 532 nm gepumpt. Danach hat der Piko-sekundenpuls eine Energie von bis zu 800 mJ. Am Ende durchläuft der Puls einen Zwei-Gitter-Kompressor. Um die Optiken, vor allem die Gitter, zu schonen, wird der Strahl auf einen Durchmesser von etwa 30 mm aufgeweitet. Der Kompressor (siehe Bild 1-4) hat eine Transmission von etwas unter 50 %. In Bild 1-3 ist der Aufbau des gesamten Systems dargestellt. Zur einfacheren Übersicht zeigt die rechte Abbildung schematisch die Anordnung

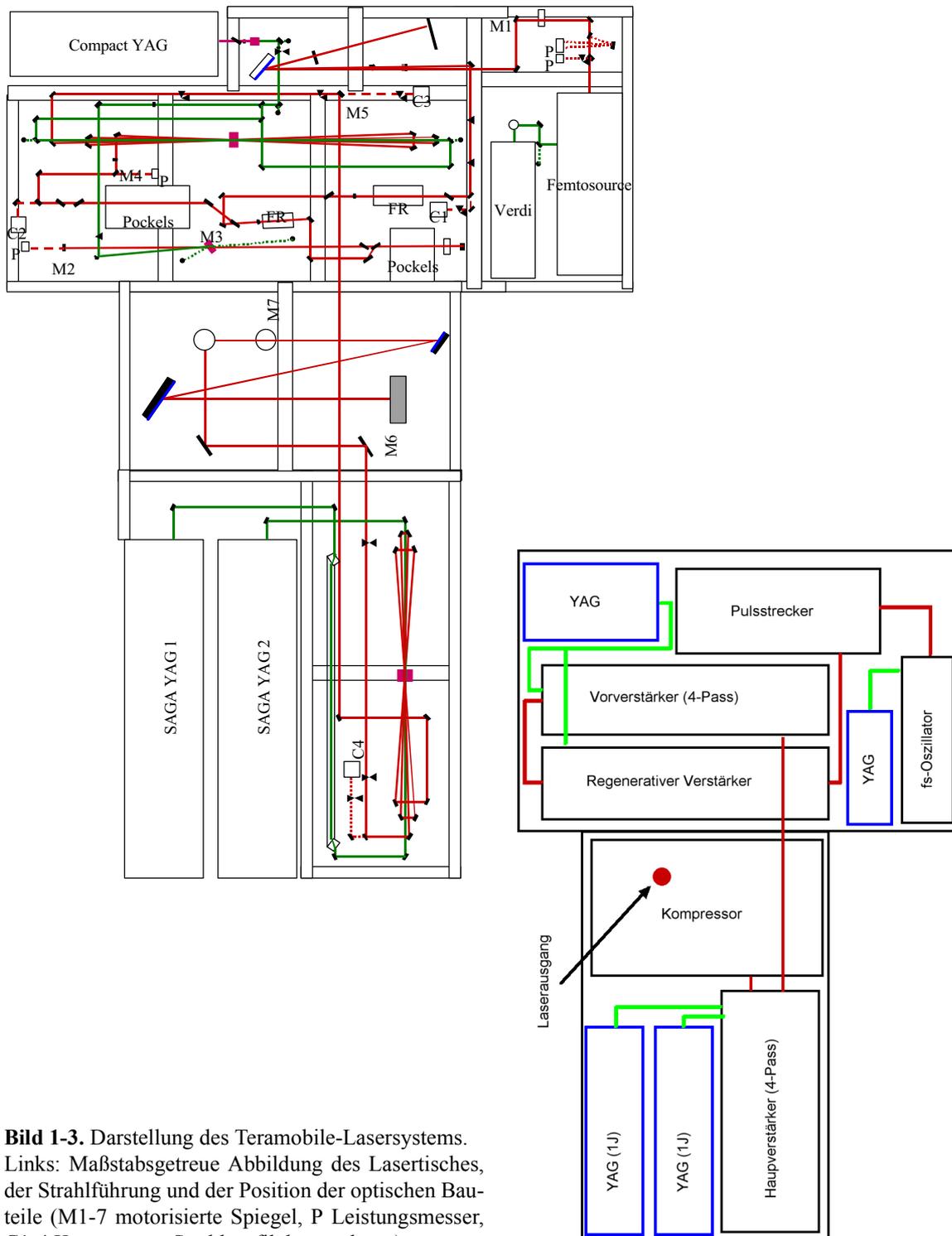


Bild 1-3. Darstellung des Teramobile-Lasersystems.
 Links: Maßstabsgetreue Abbildung des Lasertisches, der Strahlführung und der Position der optischen Bauteile (M1-7 motorisierte Spiegel, P Leistungsmesser, C1-4 Kameras zur Strahlprofilüberwachung).
 Rechts: Schematische Übersicht über die Anordnung der CPA-Komponenten.
 Grüne Linien: Pumpstrahle. Rote Linien: Strahlengang des verstärkten Ti:Sa-Pulses. Blaue Linien: Gitteroberflächen. Blaue Umrandung: Pumplaser.

der Komponenten des CPA-Systems, deren Funktionen im vorherigen Abschnitt erklärt wurden. Die wichtigsten Charakteristika des Lasers sind in Tabelle 1-1 zusammengefasst. Die T-Form des Lasertisches, bestehend aus einem $1\text{ m} \times 2\text{ m}$ großen und einem $1,2\text{ m} \times 1,9\text{ m}$ großen Element, wurde gewählt, um bei dem begrenzten Innenraum des Laborcontainers (ca. $2,2\text{ m} \times 3,2\text{ m}$ für den Laserbereich) eine optimale Kombination aus Kompaktheit und Bedienbarkeit zu erreichen. (Siehe auch Abschnitt 1.2 und Bild 1-7.)

Tabelle 1-1. Spezifikationen des Teramobile-Lasers.

Zentrale Wellenlänge	793 nm
Bandbreite	20 nm HWB
Pulsenergie	350 mJ
Pulsdauer	70 fs sech ²
Spitzenleistung	5 TW
Wiederholrate	10 Hz
Strahldurchmesser	30 mm
Pulsdauer mit variablem Chirp	70 fs bis 2 ps
Energiestabilität	2.5% QMW über 400 Schüsse
Tischfläche	2,9 m \times 2,0 m (T-Form)

1.1.3 Einstellbare Parameter des ausgesandten Laserstrahls

Der in Tabelle 1-1 angegebene Betrag der **Pulsenergie** ist ein typischer Maximalwert. Normalerweise wird der Teramobile-Laser im Bereich der höchstmöglichen Energie eingesetzt. Jedoch kann, z.B. wenn in einem Experiment die Energieabhängigkeit gemessen werden soll, die Energie auf jeden beliebigen Wert verringert werden, indem eine der kritischen Verzögerungszeiten innerhalb der CPA-Kette aus der optimalen Einstellung verfahren wird. Diese Form der Energiebeeinflussung bietet eine gute Reversibilität und Reproduzierbarkeit, eine Veränderung der Pulsenergie der Pumplaser ist weniger geeignet.

Für die meisten Experimente mit dem Teramobile ist die Wahl der **Pulslänge** und des **Chirp** von großer Bedeutung. Um diese verändern zu können, wurde der Kompressor speziell so konstruiert, dass eines der beiden Gitter (das obere in Bild 1-4) entlang ihrer gemeinsamen Normalen verschoben werden kann. Die ferngesteuerte, motorisierte Verfahrestrecke ist 40 mm lang. In der Position, die dem kürzesten Puls entspricht, wird die

Wirkung des Pulsstreckers bestmöglich rückgängig gemacht. Dort hat der Puls keinen Chirp. In der einen Richtung von dieser Position wird die vorherige Pulsstreckung nicht vollständig kompensiert, in der anderen überkompensiert, das heißt, die Richtung des Chirp dreht sich um. In beiden Richtungen verlängert sich der Puls annähernd linear um einen Wert, der variiert, aber bei etwa 50 fs pro mm Fahrstrecke liegt. Auf diese Weise hängen Chirp und Pulslänge direkt voneinander ab. Um begrifflich die beiden Chirprichtungen (Vorzeichen von γ in Gleichung 1-2) unterscheiden zu können, nennen wir den Chirp, den ein Puls auch bei der Propagation durch ein normal dispersives Medium (z.B. Luft) aufgrund der GVD erhält, positiv, den entgegengesetzten negativ. Mit dem größten negativen Chirp, der im Teramobile-Kompressor erzeugt werden kann, wird die GVD auf bis zu 1,5 km Luftweg vorkompensiert, das heißt, der Puls verkürzt sich auf dem Weg bis zu der entsprechenden Distanz (siehe dazu Abschnitt 3.3, Bild 3-11). Zur Messung der Pulslänge in Abhängigkeit der Gitterposition im Kompressor wird ein Autokorrelator zweiter, gelegentlich dritter (bei Wartungen durch die Firma Amplitude) Ordnung verwendet.

Ein **Sendeteleskop** aus zwei sphärischen Spiegeln, deren Abstand veränderbar ist (Bild 1-5), ermöglicht es, den Strahl auf eine Brennweite von ca. 10 m bis zu einer leichten Divergenz einzustellen. Um die Pulseigenschaften nicht zu verändern, ist das Teleskop rein reflektierend mit dielektrisch beschichteten Spiegeln aufgebaut. Dadurch bedingte *off-axis*-Fehler wurden durch einen kleinen Winkel von 6° zwischen den Strahlengängen minimiert und spielen keine Rolle. Die Länge von über zwei Metern ist hierfür eine Voraussetzung. Aus Platzgründen ist das Teleskop in ein Gestell über dem Lasertisch eingebaut (siehe Bild 1-7). Die spezielle Z-Form des Strahlengangs um die bewegliche Einheit zweier Spiegel

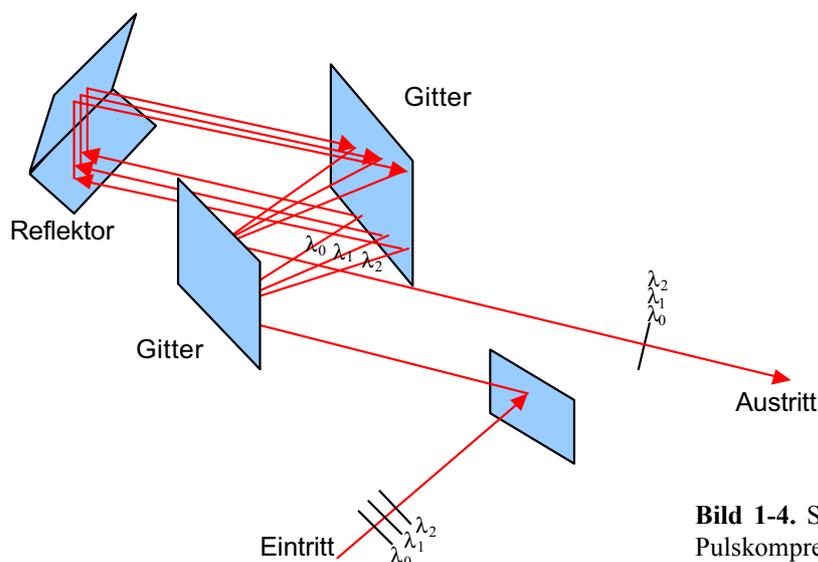


Bild 1-4. Schematische Darstellung des Pulskompressors im Teramobile-System.

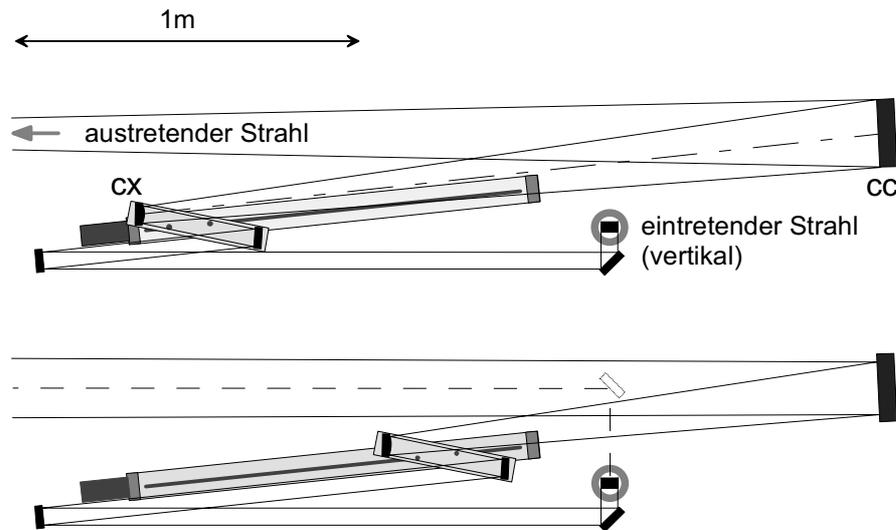


Bild 1-5. Variables *off-axis*-Sendeteleskop mit Schrittorschiene. Oben: Einstellung für stärkste Fokussierung ($f < 10$ m). Unten: Einstellung für leichten Zerstreueffekt. CX: konvexer Spiegel (\varnothing 75 mm). CC: konkaver Spiegel (\varnothing 200 mm). — - — zeigt den Strahlengang zwischen den sphärischen Spiegeln an und ist gleichzeitig die Verfahrstrecke des konvexen Spiegels. - - - zeigt die Option der direkten Aussendung des Strahls durch Überbrückung des Teleskops.

(plan und konvex) ermöglicht die Verwendung von nur einer motorisierten Lineareinheit, deren Genauigkeit nicht kritisch ist. Es entfallen zusätzliche Präzisionsdrehtische, somit Kosten und eine komplizierte Steuerung. Für die Lineareinheit erwies sich, auch angesichts der benötigten Verfahrstrecke von mehr als einem Meter, ein kostengünstiges Industrieprodukt (isel automation) mit $12,5 \mu\text{m}$ Schrittweite als ideal geeignet. Die Richtungsstabilität des Sendestrahls ist mit einer Schwankung von maximal $0,3 \text{ mrad}$ sehr gut.

Durch die Möglichkeit der (sanften) Fokussierung kann der Prozess der Selbstfokussierung verstärkt werden. Die Wählbarkeit des Ortes, wo die Filamentierung des Stahls beginnt, ist für einige Experimente sehr wichtig, ebenso wie die durch aktive Fokussierung bedingte starke Bündelung der Filamente. Die gleichzeitige Aufweitung des Strahldurchmessers um das dreifache schon die nachfolgende Optik (z.B. die optionalen Quarzfenster in den Austrittsöffnungen des Containers) und kann sich als Vorteil erweisen, wenn zu frühe Selbstfokussierung unerwünscht ist. Eine Einstellbarkeit des Strahldurchmessers als unabhängigen Parameter wäre vorteilhaft, jedoch technisch aufwendig.

1.2 Das mobile Labor

Die komplette Entwicklung eines mobilen Labors für das Teramobile-Projekt stellte eine große Herausforderung dar, beginnend mit der Festlegung der gewünschten, notwendigen bzw. verlangten Spezifikationen. Die Projektmitglieder an der FU Berlin haben dies in Zusammenarbeit mit dem Ingenieurbüro impres GmbH (Bremen) geleistet. Gebaut wurde der Laborcontainer von der Firma TSU in Bremerhaven.

Im Vergleich zu „klassischen“ mobilen Lidar-Laboren, in deren Entwicklung impres Erfahrungen hatte, stellte der Terawattlaser in zweierlei Hinsicht besondere Anforderungen. Erstens ist ein solches Lasersystem weit komplexer als beispielsweise ein kommerzieller Nd:YAG-Laser und man musste davon ausgehen, dass es viel empfindlicher auf Erschütterungen, thermische Schwankungen etc. reagieren würde. Zweitens hat der Laser in der Summe der Komponenten einen erheblich größeren Energieverbrauch und eine hohe Wärmeabgabe. Diese Tatsachen verlangten nach einem besonders anspruchsvollen System der Strom- und Kühlwasserversorgung sowie der Wärmeabfuhr und Klimatisierung.

Das Labor basiert auf einem ISO 20-Fuß-Standardcontainer mit den Außenmaßen $6,1 \text{ m} \times 2,4 \text{ m} \times 2,6 \text{ m}$ (L \times B \times H). Die Innenmaße des speziell wärmeisolierten und mit einer Klimadruckdecke ausgestatteten Containers betragen $5,70 \text{ m} \times 2,15 \text{ m} \times 2,20 \text{ m}$ (Mindestwerte). Das voll ausgestattete Labor hat ein Gewicht von etwa 10 t. Der Innenraum ist aufgeteilt in einen ca. 3,2 m langen Laserraum und einen ca. 1,5 m langen Kontroll- und



Bild 1-6. Der Teramobile-Container. Links: Innenansicht des Laserraums vor dem Einbau des Lasertisches. Im Hintergrund Trennwand zum Kontrollraum mit den zwei Durchgangstüren (schmalere rechte geschlossen). Rechts: der fertiggestellte Labor-Container.

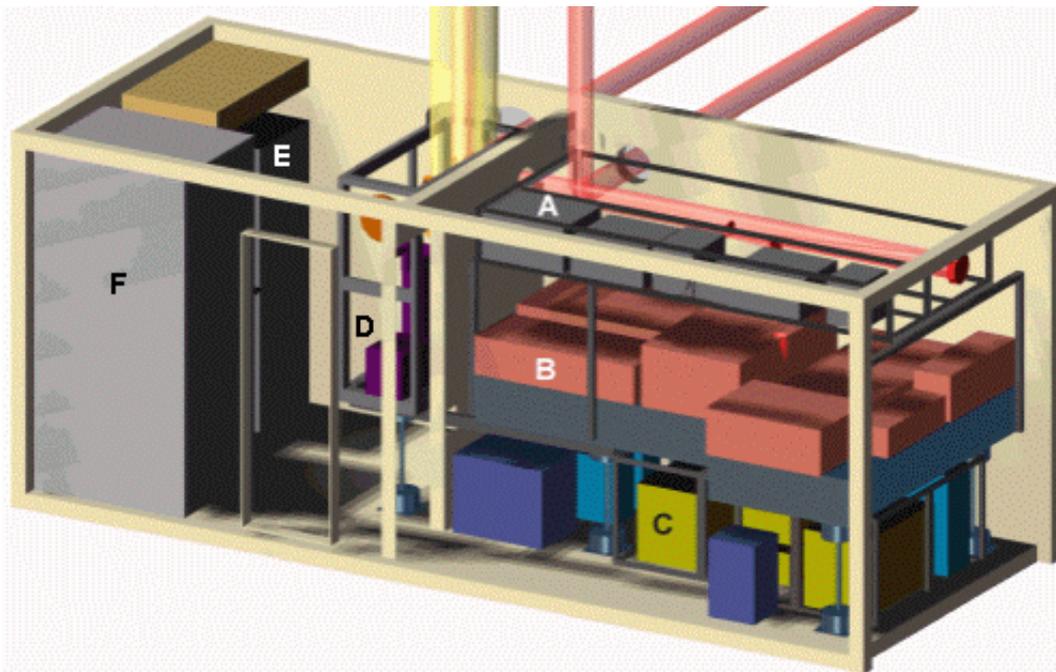


Bild 1-7. Raumaufteilung und Ausstattung des Teramobile-Containers (Grafik basierend auf exaktem 3D-Konstruktionsplan). Laserraum: Steuer- und Kontrollgeräte, Sendeteleskop (A), Lasersystem (B, vergleiche Bild 1-3), Lasernetzgeräte in geschlossener Box mit Wärmetauscher (C). Kontroll- und Detektionsraum: Detektionsbox (D, vergleiche Bild 1-9), Schrank mit Computer und Messelektronik (E), Arbeitsfläche (verdeckt), Schaltschrank und Klimaanlage (F).

Detektionsraum (siehe Bild 1-7). Zum Aussenden des Laserstrahls gibt es im Laserraum zwei Luken mit 25 cm Durchmesser, eine im Dach für vertikales Senden und eine in der Seitenwand, durch die der Strahl horizontal etwa zwei Meter über dem Außenboden austritt. Zusätzlich kann der Laser durch die Trennwand in den Kontroll- und Detektionsraum geleitet werden, um dort durch eine der Luken (ebenfalls in Decke und Wand), die mit einem Durchmesser von 50 cm für die Detektion vorgesehen sind, gesendet zu werden. Diese Option wird zum Beispiel bei Lidar-Messungen im sogenannten *on-axis*-Modus benötigt.

Betreten wird der Container durch die kleine Seitentür, die zum Kontrollraum führt. Um einen gewissen Wärme- und Schmutzschleuseneffekt zu erzielen, sollen die Türen zum Laserraum bei offener Außentür immer geschlossen sein. Die große Portaltür am Ende des Laserraums wird nur zum Installieren und Entfernen von Sicherungsvorkehrungen vor und nach einem Transport geöffnet.

1.2.1 Betriebs- und Versorgungsfunktionen

Bei der Entwicklung des Containers wurde spezifiziert, dass der Betrieb des Teramobile-Systems bei Außentemperaturen zwischen -20°C und 35°C sowie bei beliebiger Luftfeuchte (0 bis 100%) möglich sein müsse. Dabei soll die **Temperatur im Laserraum** auf $\pm 1^{\circ}$ stabil gehalten werden können. Im Kontrollraum ist die Anforderung geringer, das heißt, es genügt ein einfaches Klimagerät, um eine akzeptable Arbeitstemperatur zu gewährleisten. Da im Laserraum eine große **Abwärme** anfällt, wurde ein dreiteiliges System zur Wärmeregulierung entwickelt. Ein Teil der Lasernetzgeräte und -kühlgruppen geben Wärme direkt an einen Kühlwasserkreislauf ab. Da einige Geräte aber über Gebläse Wärme an die Umluft abgeben, wurden diese in eine geschlossene Kühlbox unter einem Teil des Lasertisches verstaut. Eine Ableitung dieser Wärme über die Klimaanlage des relativ kleinen Raums hätte zu sehr starkem Luftzug und einer ungleichmäßigen Temperaturverteilung im Raum geführt. Neben unangenehmen Arbeitsbedingungen würde dies trotz umfangreicher Abdeckung der Laseraufbauten Störungen verursachen. Ein weiterer Vorteil der **geschlossenen Kühlbox** ist, dass darin die Temperatur niedrig ($<15^{\circ}\text{C}$) sein kann, um die Wärme effektiv ableiten zu können. Dies funktioniert mittels eines Kühlgeräts mit starkem Gebläse und einem Wärmetauscher, der wiederum an den Kühlwasserkreislauf angeschlossen ist. Schließlich regelt eine **Klimaanlage** die Raumtemperatur. Über Zuluftventile, die über die gesamte Decke des Laserraums verteilt sind, wird mit gefilterter Luft ein leichter Überdruck erzeugt, wodurch der Staubeintrag in den Raum reduziert wird. Dies ist, auch aus thermischer Sicht, wichtig, wenn der Laserstrahl durch eine offene Luke nach draußen gesendet wird. Für die Zeit außerhalb des Laserbetriebs bei geringen Außentemperaturen ist der Container mit Heizlüftern ausgestattet. Dem Kühlwasser kann Frostschutzmittel zugegeben werden (je nach Menge Schutz bis -20°C).

Das Wasser für den **Kühlkreislauf** wird von einem externen Kühlaggregat in den Container gepumpt. Das Teramobile benötigt also am Betriebsort keine Kühlwasseranschlüsse, der Tank des Aggregats wird am Ort einmalig mit 160 Litern Leitungswasser gefüllt. Da für eine ausreichende Leistung der Kühlbox im Laserraum das zugeführte Wasser eine Temperatur von ca. 12°C haben muss, diese aber für die direkte Kühlung der Lasergeräte zu niedrig ist, existiert ein zweiter interner Kreislauf, dem bei Bedarf über ein Thermostatventil kaltes Wasser zugemischt wird.

Zur **Stromversorgung** benötigt das Teramobile-System einen 380V-Dreiphasen-Drehstromanschluss. Die elektrische Leistungsaufnahme des Containers liegt im Vollbetrieb bei etwa 10 bis 12 kW. Eine 32A-Leitung ist für den Betrieb ausreichend. Das Kühlwasseraggregat hat zusätzlich eine wetterabhängige Durchschnittsleistung von ca. 3 kW. Wegen

kurzzeitig hoher Spitzenströme kann das Gerät jedoch nicht mit einer 16A-Leitung betrieben werden. Somit benötigt das gesamte Teramobile-System entweder zwei 32A-Leitungen oder eine 63A-Leitung. Dies stellte an den Orten der bisherigen Messkampagnen kein Problem dar. Das System ist allerdings auch für den Betrieb mit einem Generator spezifiziert.

1.2.2 Transporteigenschaften

Äußerlich ist das Teramobile ein Standardcontainer, der entsprechend mit Kran oder Gabelstapler gehoben und mit LKW, Zug oder Schiff transportiert werden kann. Er ist versiegelbar und besitzt alle nötigen Zertifikate für den internationalen Frachtverkehr.

Da es vor dem Teramobile noch keinen mobilen Terawattlaser gegeben hat, war vorab nicht völlig klar, ob ein solches System überhaupt in einer Weise transportierbar ist, dass weder Schäden entstehen noch der Aufwand bei der Wiederinbetriebnahme zu groß wird. Dass in dieser Hinsicht keinerlei Probleme aufgetreten sind, ist ein glücklicher Umstand oder ein großer Erfolg, der aus einer sorgfältigen Planung und Konstruktion der Lagerung und Transportsicherung des Lasertisches resultiert. Wie sich allerdings ein Fall des Containers, wenn auch nur aus wenigen Zentimetern Höhe, auswirken würde, ist nicht bekannt. Mit 40t-Kränen ist ein sanftes Absetzen keine Schwierigkeit. Die Erfahrung hat gezeigt, dass thermische Schwankungen, z.B. das Auskühlen bei einem längeren Transport im Winter, die Wiederinbetriebnahme des Lasers eher erschweren kann als mechanische Einflüsse.



Bild 1-8. Abladen des Teramobile-Containers auf dem Gelände der Universität Lyon 1.

Der Lasertisch ist auf vier Füßen gelagert, die jeweils aus zwei Naturgummi-Hutelementen (Willbrandt) und einer M30-Stahlgewindestange bestehen. Die Hutelemente sind fest mit dem Containerboden bzw. der Unterseite des Lasertisches und untereinander über die Gewindestange verbunden. Mit einer annähernd linearen Ausdehnung bei Druck- und Zugkraft sind sie für eine bestimmte Last ausgelegt, um Stöße abzufedern und hochfrequente Schwingungen zu dämpfen. Außerdem kann durch leichte Variation der Länge der unbelasteten Füße die ungleichmäßige Gewichtsverteilung des Lasersystems ausgeglichen werden. Ursprünglich waren für den Betrieb luftgefederte Laserfüße vorgesehen. Die Transportfüße erwiesen sich jedoch als für den Laserbetrieb geeignet, was eine aufwendige Prozedur der Umlagerung des Tisches vor und nach den Transporten erspart.

Die hantelförmigen Füße reagieren relativ weich auf seitliche Scherkräfte. Daher werden der Tisch und das daran befestigte Gestell für den Transport über weitere Gummielemente und Druckkissen mit speziell verstärkten Streben in der Containerwand bzw. -decke verbunden. Diese Verbindungen bleiben zum Teil auch für den Betrieb bestehen, um ein langsames horizontales Schwingen des Tisches zu verhindern.

1.3 Das Detektionssystem

An erster Stelle ist das Teramobile für die Durchführung von Femtosekunden-Lidar-Experimenten entwickelt worden (siehe Abschnitt 4.1.1 zu den Grundlagen der Lidar-Technik). Die dafür benötigten Optiken und Detektoren sind in einer Box eingebaut, die sich im Kontroll- und Detektionsraum des Teramobil-Containers befindet. In Bild 1-9 ist der Aufbau der Box dargestellt. Die Bildunterschrift enthält Informationen zu den einzelnen Komponenten.

In der Detektionsbox befindet sich ein typisches **Lidar-Teleskop**, genau unter der 50 cm breiten Dachluke des Containers. Beim Hauptspiegel des Teleskops handelt es sich um ein Paraboloid mit einem Durchmesser von 40 cm und einer Brennweite von 120 cm. Er ist mit Aluminium und Quarz beschichtet und besitzt somit eine hohe Reflektivität im gesamten Spektralbereich vom nahen UV bis ins Infrarot. Ein Sekundärspiegel lenkt das empfangene Licht so um, dass der Fokuspunkt außerhalb des Teleskops liegt. Dort kann das Licht in optische Fasern eingekoppelt und direkt in eine Einkanal-detektion oder in ein Spektrometer geleitet werden. Mittels eines Strahlteilers können zwei dieser Wege gleichzeitig genutzt werden.

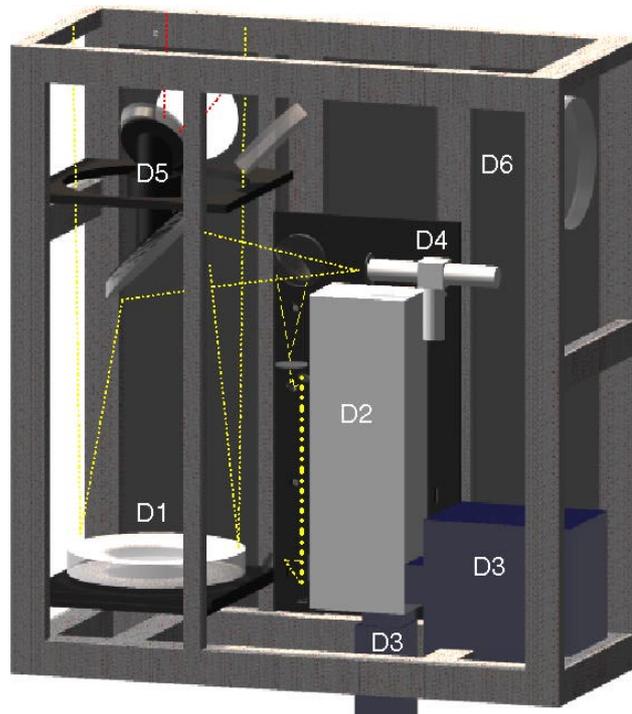


Bild 1-9. Die Teramobile-Detektionsbox. **D1:** vertikales Teleskop (40 cm, $f/3$) für Lidar. **D2:** abbildendes Spektrometer (Chromex, $f=0.5$ m), drei Gitter (UV-IR) mit unterschiedlichen Auflösungen, zwei Ausgänge für Spektrographen- bzw. Monochromatormodus. **D3:** verschiedene wechselbare Einkanal-detektoren für Wellenlängen von UV bis $1,7\ \mu\text{m}$ (Photomultiplier/Hamamatsu, Lawinenphotodiode/Licel) sowie eine ICCD-Kamera (Princeton Instr.) für den Bereich $180 - 930$ nm, triggerbare Belichtungszeiten > 5 ns. **D4:** direkter Lidar-Kanal, verschiedene Einkanal-detektoren anschließbar, Polarisationsmessung möglich. **D5:** Laser-Sendespiegel für *on-axis*-Messungen. **D6:** Teleskop für horizontale Rückstreuungsmessungen.

In dem direkten Detektionskanal kann das Licht z.B. grob spektral gefiltert oder polarisationsselektiv gemessen werden. Der **Spektrograph** dient in erster Linie der Messung hochaufgelöster Spektren des aus der Atmosphäre zurückgestreuten Weißlichts mit Hilfe eines Vielkanal-detektors (intensivierte CCD-Kamera). Zusätzlich kann der Monochromatormodus mit Einpunktdetektoren benutzt werden, z.B. bei Messungen in Spektralbereichen, in denen die Kamera unempfindlich ist.

Die Verwendung von Fasern kann die Handhabung und Justage eines Aufbaus vereinfachen. Bei manchen Messungen, z.B. wenn die Polarisation des Lichts eine Rolle spielt, kann man sie jedoch nicht benutzen. Für spektrographische Anwendungen stehen Faserbündel zur Verfügung, die trotz gewisser Verluste in der Transmission eine bessere Signalausnutzung bieten können, da sie ein Rundprofil (Durchmesser 1 mm), das im Fokus des Teleskops plaziert wird, in eine Linie ($50\ \mu\text{m} \times 12\ \text{mm}$) übertragen. Dadurch werden Verluste am Spektrometerspalt vermieden und die volle Fläche der CCD genutzt.

Die **Wahl des Detektionskanals** hängt vom Gegenstand der jeweiligen Messung ab. Möchte man die Absorption von Atmosphärgasen anhand schmaler Absorptionslinien in einem langwelligen Spektralbereich, wie sie für molekulare Schwingungs- und Rotationsbanden typisch sind, oder die Fluoreszenz anhand schmaler Emissionslinien messen, benötigt man eine hohe **spektrale Auflösung**. Diese bietet das Spektrometer in Verbindung mit der ICCD-Kamera. Die bei Lidar übliche Entfernungsinformation über die Laufzeit des Lichts ist auch hierbei zugänglich, da die Kamera mit Verzögerungs- und Öffnungszeiten in Einheiten von Nanosekunden betrieben werden kann. Jedoch lässt sich pro Laserpuls nur ein Zeit- bzw. Entfernungsfenster setzen, so dass je nach der Breite des Fensters ein Großteil des Rückstreulichts verloren geht. Die gesamte **Entfernungsinformation** in hoher Auflösung erhält man, wenn man in für Lidar typischer Weise das Signal eines in Echtzeit auslesbaren Detektors (Photomultiplier oder Photodiode) mit einem schnellen Oszilloskop oder einem Transientenrekorder aufzeichnet. Die Messung solcher Signale für sehr viele Punkte im Spektrum mittels Durchfahren des Monochromators ist aber sehr zeitaufwendig, wobei durch Veränderung der atmosphärischen Bedingungen das Ergebnis verfälscht werden kann. Zuweilen genügt jedoch eine geringe spektrale Auflösung. Zum Beispiel ist diese Methode für die Messung der breitbandigen Absorption von Gasen im UV gut geeignet. (Näheres zu den Messmethoden der Atmosphärenforschung findet sich in Kapitel 4.)

Der Laserstrahl kann vom Laserraum durch die Trennwand in die Detektionsbox geleitet werden, um von dort aus durch eine der Luken gesendet zu werden. Der Sendespiegel befindet sich in Achse mit dem Empfangsteleskop. Bei Lidar-Messungen, wo in der Regel der Laserstrahl parallel zur Teleskopachse justiert wird, erreicht man mit dieser *on-axis*-Variante, dass der Strahl früher in das Sichtfeld des Teleskops eintritt als im *off-axis*-Fall. Unabhängig davon, ob sich der Sendespiegel in der Detektionsbox oder über dem Lasertisch befindet, muss sichergestellt sein, dass sich der Laserstrahl und das Teleskop samt Detektion nicht gegeneinander bewegen. Daher ist die Detektionsbox über zwei starke Aluminiumprofile durch Aussparungen in der Trennwand fest mit dem Lasertisch verbunden und auf zwei weiteren Füßen der Art des Lasertisches gelagert.

Die Trennwand zwischen Laser- und Detektionsraum besitzt eine geschlossene leitende Oberfläche. Auf diese Weise wird der Einfluss elektromagnetischer Störungen, die vor allem von den Pockelszellen des Lasers stammen, auf die Detektion reduziert. Eine vollständige Abschirmung ist allerdings nicht möglich, wie man an Signalstörungen der besonders empfindlichen Photomultiplier sehen kann. Ein begrenztes, schnell abklingendes Störsignal ist aber oft als Referenz für den Zeitpunkt des Laserschusses willkommen.