

UV-Laserphotonentechnologie

OPUS II

Abschlußbericht

Teilprojekt Lambda Physik AG

Inhaltsverzeichnis

1.	EA1: Erstellung der Konzeption	3
2.	EA2: Resonatorerprobung	3
2.1	Erstellung des Resonatorkonzepts	3
2.2	Untersuchung des Prismenkompressionsresonator	4
3.	EA 3: Erprobung von Meß- und Regelsystemen	8
3.1	Verbesserung des Langzeitbetriebs durch verbesserte Gasaktionen – Entwicklung eines Mikro- Halogeninjektionsalgorithmus	8
3.2	Beeinflussung der zeitlichen Pulsform eines XeCl Excimerlasers durch HCl Injektionen	13
3.3	Verbesserung der Temperaturregelung der Laserröhre	16
3.4	Bestrahlungsexperimente Diodenzeilen	17
3.4.1	Funktionsweise der Wellenlängen und Bandbreitendetektion	17
3.4.2	Dauerbestrahlung neuartiger Diodenzeilen	19
3.4.3	Untersuchung von Phosphoreszenzschichten (Quantenkonverter) zur Frequenzwandlung	20
3.4.4	Untersuchung einer räumlich hochauflösenden Kamera mit großem Dynamikbereich	22
3.5	Strahlage und Strahlrichtungsautojustiersystem	24
4.	EA 4: Gasentladungserforschung	26
4.1	Verbesserung der Energiestabilität der Laserpulse	26
4.2	Sonstige Ergebnisse EA4	29
5.	EA5 Anpassungsuntersuchungen im Industriellen Umfeld	30
5.1	Strahlrichtungsautojustiersystem	30
5.2	Shutterportkamera	31
5.3	Verbesserung der Lasereigenschaften im industriellen Einsatz	33
5.3.1	Optimierung der Gaslebensdauer	33
5.3.2	Verbesserung der Wellenlängenstabilität von spektral schmalbandigen Industrie ArF Lasern	35
5.4	Dauertest von Einzelkomponenten und dem Lasergesamtsystem	36
5.4.1	Test von optischen Einzelkomponenten	36
5.4.1.1	Bestrahlung von Auskoppelspiegeln der Fa. Jenoptik L.O.S.	36
5.4.1.2	Bestrahlung von Auskoppelspiegeln und Prismen der Laseroptik Garbsen	37
5.4.1.3	Lebensdauertest von MgF ₂ beschichteten Gitter im ArF Laser	38
5.4.1.4	Lebensdauertest von Polarisatoren der Fa. Laseroptik Garbsen	39
5.4.2	Erreichte Lebensdauern von Modulen und Komponenten unter realen Einsatzbedingungen in spektral schmalbandigen ArF Industrielasern	39
5.4.3	Dauertest von ArF Industrielasern als Gesamtsystem	40
6.	Optikkomponententests und Industrietauglichkeitstests	42
6.1	Arbeitspaket 1 Optikkomponententests	42
6.1.1	Lebensdauertest der Optikkomponenten	42
6.2	Arbeitspaket 2 Laser - Modul – Industrietauglichkeitstests	43
6.2.1	Test von Lasermodulen	44

7.	Zusammenfassung	45
8.	Veröffentlichungen, Patente	46

UV-Laserphotonentechnologie

OPUS II

Abschlußbericht

Zuwendungsempfänger: Lambda Physik Gesellschaft zur Herstellung von Lasern mbH	Förderkennzeichen: 13N7093/3
Verbundprojekt OPUS II - Voraussetzungen für anwendungsorientierte Optimierung von UV-Strahlquellen und -Schichtoptiken Teilvorhaben: Verbesserung von Excimerlaser-Strahleigenschaften und Langzeitstabilität	
Laufzeit des Vorhabens:	01.01.1997 bis 31.12.1999
Laufzeit der Projektverlängerung:	01.01.2000 bis 30.06.2000

1. EA1: Erstellung der Konzeption

Auf dem Kick-Off Meeting am 05.02.1997 wurden von den Verbundteilnehmern die jeweiligen Teilprojekte vorgestellt sowie Ziele erörtert. Bei diesem Meeting ist der Beitrag von Lambda Physik besprochen worden. Dieser entspricht in allen Teilen der Antragstellung. Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurde ein Untersuchungsprogramm erstellt, das in den nachfolgend beschriebenen Arbeitspaketen abgearbeitet wurde.

2. EA2: Resonatorerprobung

Zielstellung: In diesem Arbeitspaket sollten alternative Resonatorkonfigurationen analysiert und eine favorisierte Variante erprobt werden. Mit Hilfe dieser Resonatorvariante sollte ein Divergenzangleich für beide Achsen des Excimerlaserstrahlprofils erreicht werden. Die neue Resonatorkonfigurationen sollte mit konventionellen Konfigurationen verglichen werden.

2.1 Erstellung des Resonatorkonzepts

Aus entladungs- und strömungstechnischen Gründen sind die von Excimerlasern emittierten Strahlprofile nicht kreisförmig oder quadratisch, sondern rechteckig.

Die typischen Strahlparameter bei Industrieexcimerlasern betragen in der langen Strahlachse derzeit zwischen 12 mm und 30 mm und in der kurzen Achse zwischen 2 mm und 10 mm. Die Divergenzwerte für die lange und die kurze Strahlprofilachse unterscheiden sich dabei deutlich.

Für viele Laseranwendungen, insbesondere bei nachfolgenden abbildenden optischen Systemen, ist ein Divergenzverhältnis von etwa 1:1 erwünscht.

Im Rahmen des OPUS II Projektes wurden verschiedene Resonatorvarianten analysiert, die es ermöglichen, das Divergenzverhältnis der beiden Achsen entsprechend den Erfordernissen einzustellen. Als beste Variante stellte sich ein Prismenkompressionsresonator dar. Diese Variante ermöglichte es, die Divergenz der Laserstrahlung in einer Achse zu variieren und in der anderen Achse konstant zu halten. Somit war ein frei einstellbares Divergenzverhältnis möglich. Ein weiterer wesentlicher Vorteil dieser Variante war, daß die bislang bewährte Röhrentechnologie nicht geändert werden mußte.

Eine mögliche Anwendung für Excimerlaserstrahlung mit einem Divergenzverhältnis von 1/1 liegt in der Mikromaterialbearbeitung, bei der über abbildende Verfahren Strukturen im Mikrometerbereich erzeugt werden.

2.2 Untersuchung des Prismenkompressionsresonator

Um ein Divergenzverhältnis von 1:1 zu realisieren, wurde eine Prismenkompressionsresonators (PRO) detailliert untersucht. Die Untersuchungen am Prismenkompressionsresonator basierten auf dem von der Lambda Physik GmbH angemeldeten Patent mit dem Aktenzeichen DE 43 26 191 A 1, angemeldet am 4. 8. 1993

Durch die Kompression der langen Excimerlaserstrahlachse (hohe Divergenz) mittels einer Kombination aus zwei Prismen innerhalb des Laserresonators trifft ein hochdivergenter Laserstrahl auf den ebenen HR-Spiegel. Durch den HR-Spiegel werden nur die niederdivergenten Anteile in das Lasermedium zurückreflektiert, während die hochdivergenten Anteile den Laserresonator verlassen (Abb. 1).

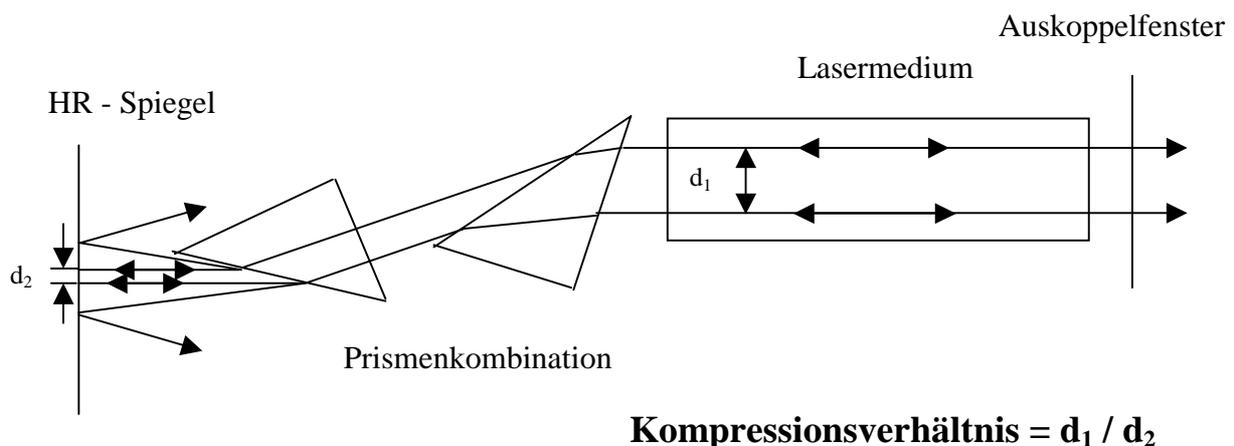


Abb. 1: Schematischer Aufbau des Prismenkompressionsresonators

Die Untersuchung des PRO erfolgte in einem NovaLine 100 Industrielaser bei einer Wellenlänge von 248 nm. Bei einer Repetitionsrate von 250 Hz wurden durchschnittliche Leistungen bis etwa 120 W erreicht (siehe auch Abb. 5).

In Abb. 2 sind die Divergenzen der beiden Strahlachsen für einen konventionellen Plan/Plan-Resonator (Standardresonator) und einen PRO-Resonator bei verschiedenen Hochspannungen dargestellt. Das Kompressionsverhältnis lag in diesem Fall bei einem Wert von 6. Wie man leicht erkennen kann, wurde die Divergenz der kurzen Strahlachse naturgemäß nicht beeinflusst, während sich die Divergenz der langen Achse auf 1/3 im Vergleich zum Plan/Plan-Resonator reduzieren ließ.

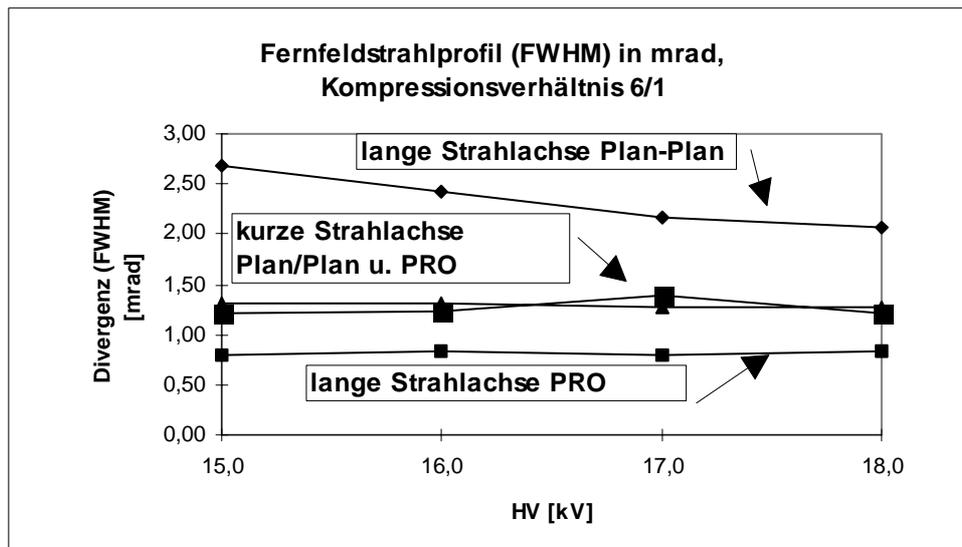


Abb. 2: Divergenz in beiden Strahlachsen für einen Plan/Plan- Resonator und einen PRO-Resonator in Abhängigkeit von der Entladungshochspannung

In Abb. 3 sind die Nahfeldstrahlprofile in 1m Entfernung der beiden Strahlachsen für einen Plan/Plan- und einen PRO-Resonator bei verschiedenen Hochspannungen dargestellt. Wie man leicht erkennen kann hat der PRO keinen großen Einfluß auf die Strahlgeometrie.

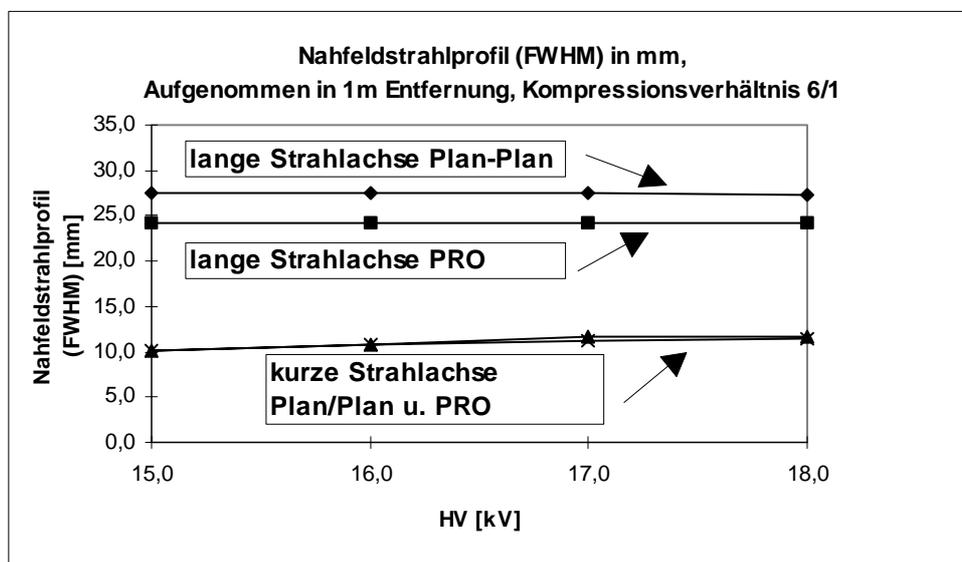


Abb. 3: Strahlprofilhalbwidthsweiten der beiden Strahlachsen für PRO und Plan/Plan Resonator in Abhängigkeit von der Hochspannung

Durch Einstellung eines Kompressionsverhältnisses von 4 konnte ein Divergenzverhältnis von nahezu 1 erreicht werden (Abb. 4).

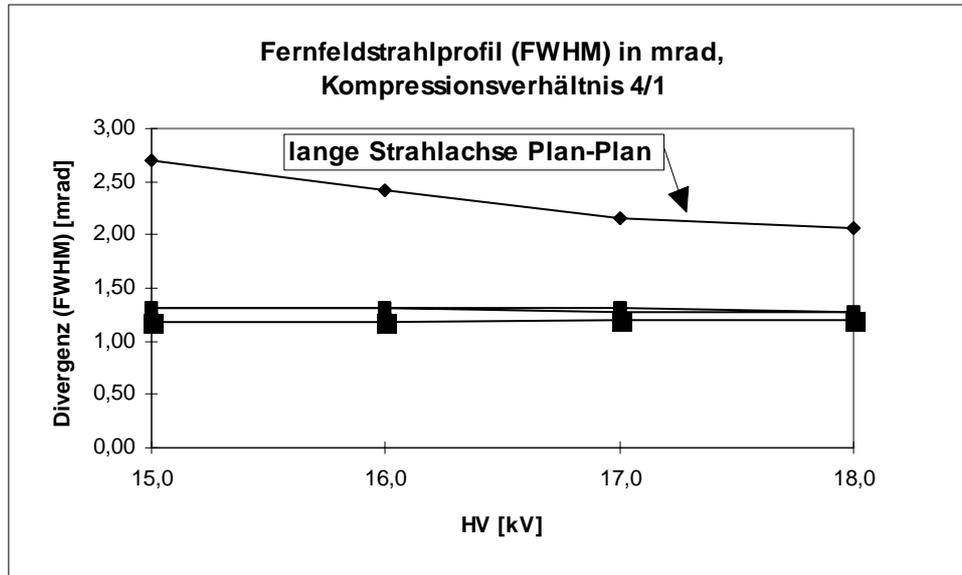


Abb. 4: Realisierung eines Divergenzverhältnisses von nahezu 1 durch Einstellung eines Kompressionsverhältnisses von 4

Abb. 5 zeigt die Abhängigkeit der maximalen Laserleistung für beide Resonatorkonfigurationen (PRO-Kompressionsverhältnis 6) von der Hochspannung. Die Effizienz des PRO ($=P_{\text{PRO}}/P_{\text{Plan/Plan}}$) liegt bei über 80%. Generell gilt, daß bei einer Erhöhung des Kompressionsverhältnisses die Effizienz verringert wird, da in immer stärkeren Maße höherdivergente Anteile unterdrückt werden.

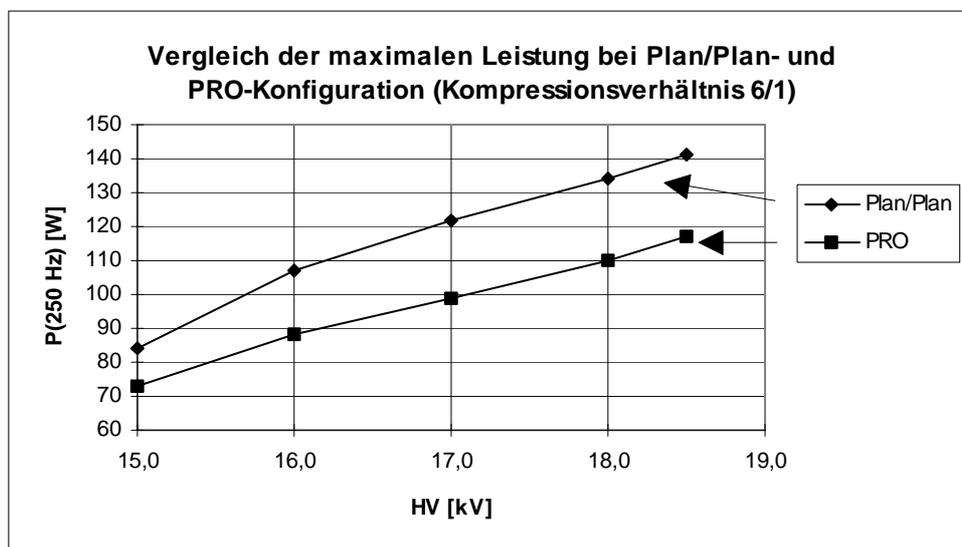


Abb. 5: Abhängigkeit der maximalen Laserleistung für PRO-Kompressionsverhältnis 6/1 und Plan/Plan Resonator in Abhängigkeit von der Hochspannung

Abb. 6 zeigt die Abhängigkeit der Leistung von der Repetitionsrate für die beiden Resonatorkonfigurationen zusammen mit der Effizienz. Wie man leicht erkennen kann, hängt die Effizienz nicht von der Repetitionsrate ab, folglich lassen sich bis zu Repetitionsraten von 250 Hz keine thermischen Effekte in den Prismen hinsichtlich der Effizienz feststellen.

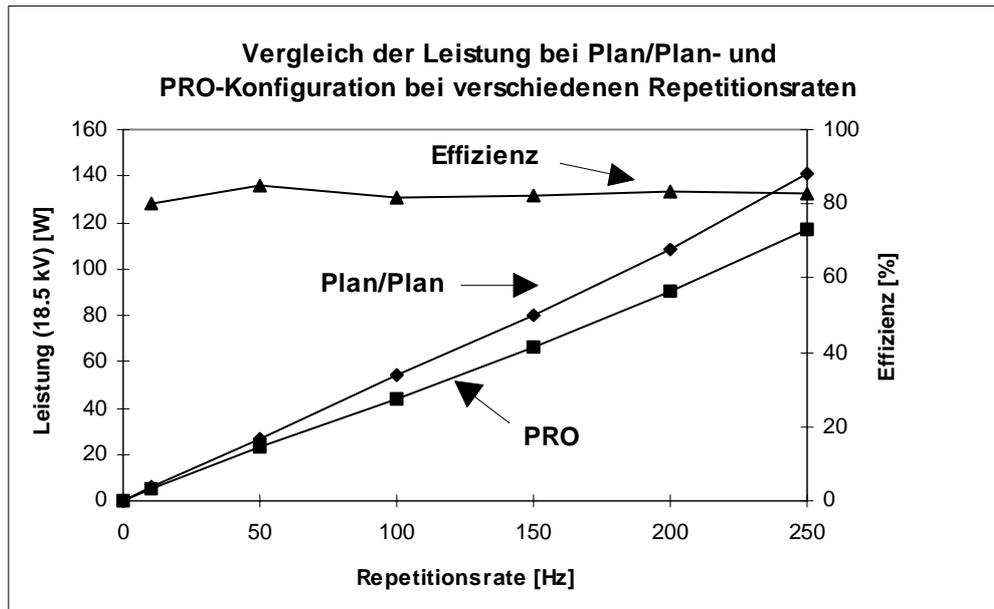


Abb. 6: Abhängigkeit der Leistung von der Repetitionsrate für PRO und Plan/Plan Resonator

Hinsichtlich der Bestrahlungsfestigkeit ergab sich, daß SiO₂-Prismen (Suprasil I mit AR 248-Beschichtung) Lebensdauern im Bereich von maximal 200-300 Millionen Pulsen zeigten (bei 300 mJ Pulsenergie, 250 Hz Pulsfolgefrequenz). Während der Bestrahlung nahm die Laserleistung im HV_{konstant}-Modus stetig ab und die Qualität des Strahlprofils (z.B. hinsichtlich der Symmetrie) verschlechterte sich. Die optische Inspektion der bestrahlten Prismen zeigte trübe Bereiche, die vermutlich durch Kompaktion gebildet wurden.

Unter gleichen Bedingungen (300 mJ, 250 Hz Pulsfolgefrequenz) wurden auch CaF₂-Prismen getestet. Es wurde eine maximale Lebensdauern von 220 Millionen Pulsen erreicht. Obwohl keine visuell sichtbaren Schäden zu beobachten waren, wurde auch hier eine Abnahme der Leistung festgestellt.

Wertung

Im Laufe des Projektes konnte eine Resonatorvariante entwickelt werden, die es ermöglicht, entsprechend den Erfordernissen des Anwenders das gewünschte Divergenzverhältnis für die beiden Laserstrahlprofilachsen einzustellen. Dieser Resonator wurde erfolgreich getestet. Die beschriebenen Untersuchungen zeigen ein hohes technologisches Anwendungspotential. Durch die Variation des Divergenzverhältnisses ist es möglich, im Bereich der

Mikromaterialbearbeitung reproduzierbar präzise Strukturen im Mikrometerbereich zu erzeugen.

3. EA 3: Erprobung von Meß- und Regelsystemen

Zielstellung: In diesem Abschnitt ist vorgesehen Meß- und Regelmechanismen zur Stabilisierung der Strahlparameter wie z.B. Pulsdauer, zeitliche Pulsform, Pulsenergie, Strahldimension, Wellenlänge, Bandbreite zu entwickeln. Dazu sollte z.B. ein neuer Energiemonitor entwickelt werden, sowie Meßtechnik zur Kontrolle anderer Laser- und Strahlparameter hinsichtlich Funktion und Zuverlässigkeit verbessert werden.

3.1 Verbesserung des Langzeitbetriebs durch verbesserte Gasaktionen – Entwicklung eines Mikro- Halogeninjektionsalgorithmus

Ein generelles Phänomen bei Excimerlasern ist Verbrauch von Halogen durch chemische Reaktionen (z.B. mit Metallen während der Vorionisierungsprozesses) während des Laserbetriebs. Dies führt bei konstanter Hochspannung zu einer Abnahme der Pulsenergie (Abb. 7).

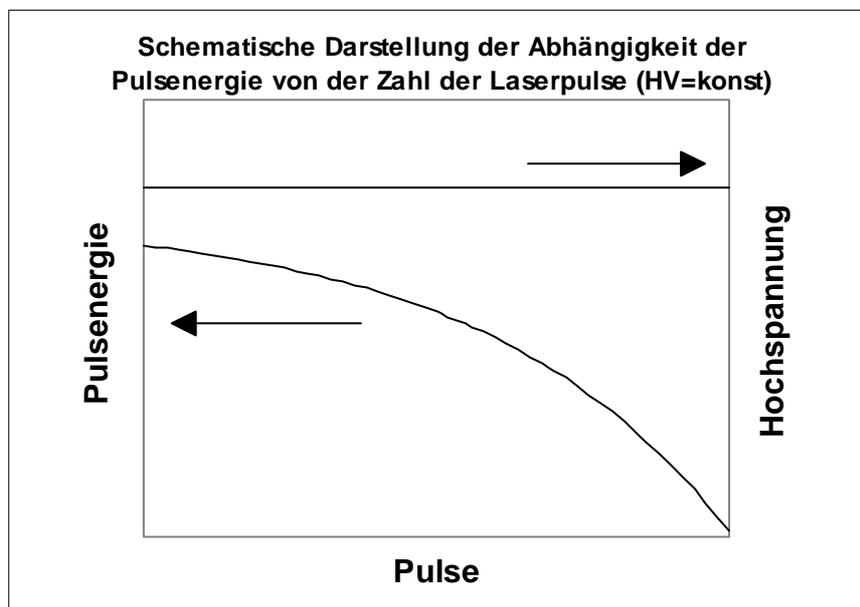


Abb. 7: Pulsenergie bei konstanter Hochspannung in Abhängigkeit von der Pulszahl

Um diesem Effekt entgegenzuwirken, wird im Energie=konstant-Modus die Hochspannung (HV) sukzessive erhöht (Abb. 8) und somit die Pulsenergie über mehr als 20 Millionen Laserpulse konstant gehalten.

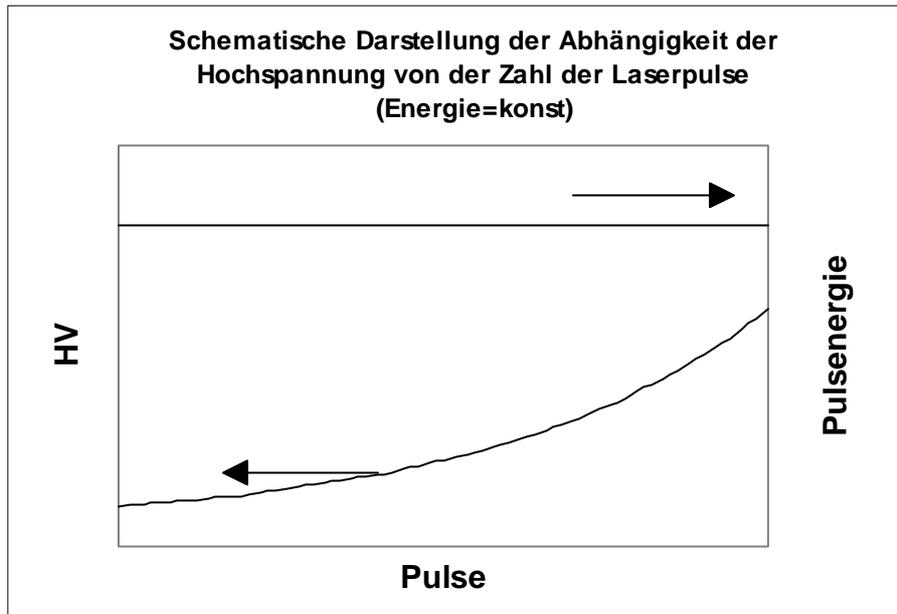


Abb. 8 Anpassung der Hochspannung zum Konstanthalten der Pulsenergie

Um die Lebensdauer einer Gasfüllung zu erhöhen, wird bei einem vorgegebenen Hochspannungsmaximalwert (HV_{repl}) eine definierte Menge an Halogen dem Laser zugeführt. Dadurch sinkt die Hochspannung wieder unter den vorgegebenen Maximalwert ab (Abb. 9).

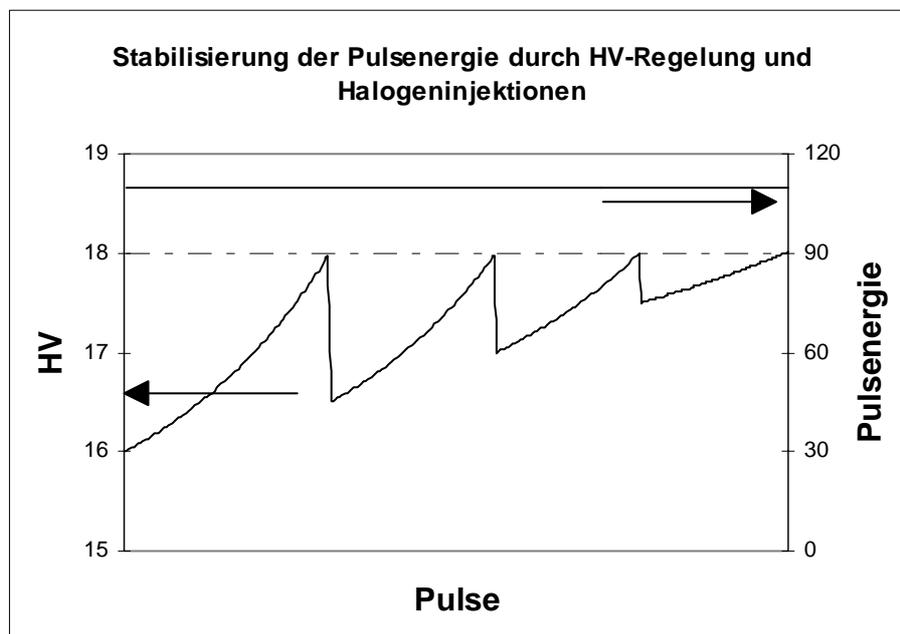


Abb. 9: Verlängerung der Gaslebensdauer durch Halogeninjektionen

Durch den konventionellen HI-Algorithmus werden in der Regel Halogenpartialdrücke von >10 mbar zugeführt. Hierdurch sinkt die HV um bis zu 2-3 kV ab. Wie man aber an den Abb. 10-12 sieht, sind Laserparameter wie z.B. Strahlprofil, Divergenz oder Energiestabilität mehr oder weniger stark abhängig von der Hochspannung.

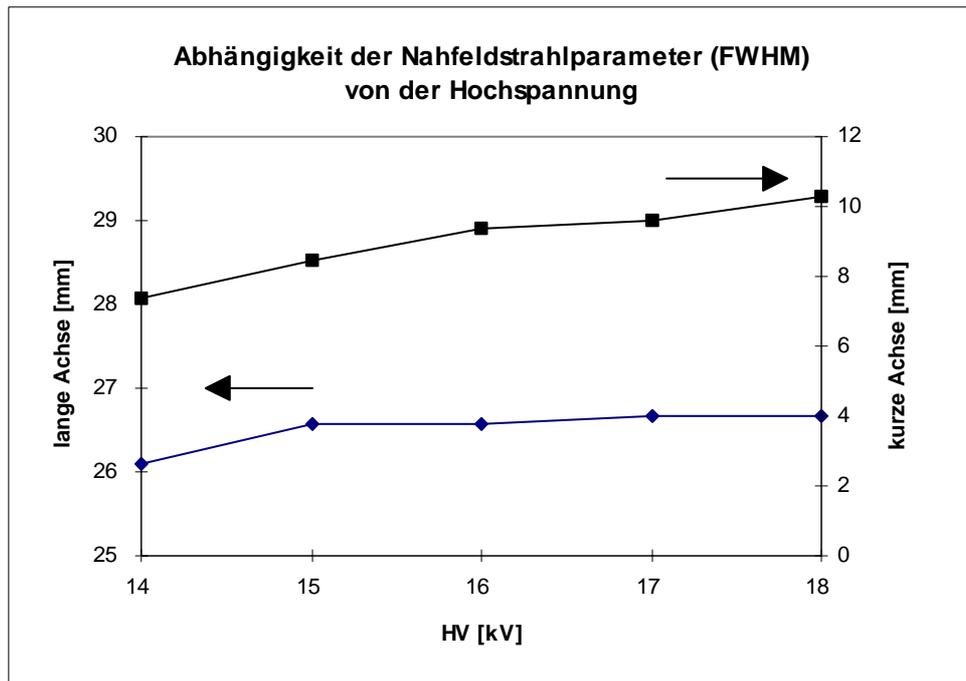


Abb. 10: Abhängigkeit der Halbwertsbreiten des Strahlprofils in der kurzen und langen Strahlprofilachse von der Hochspannung

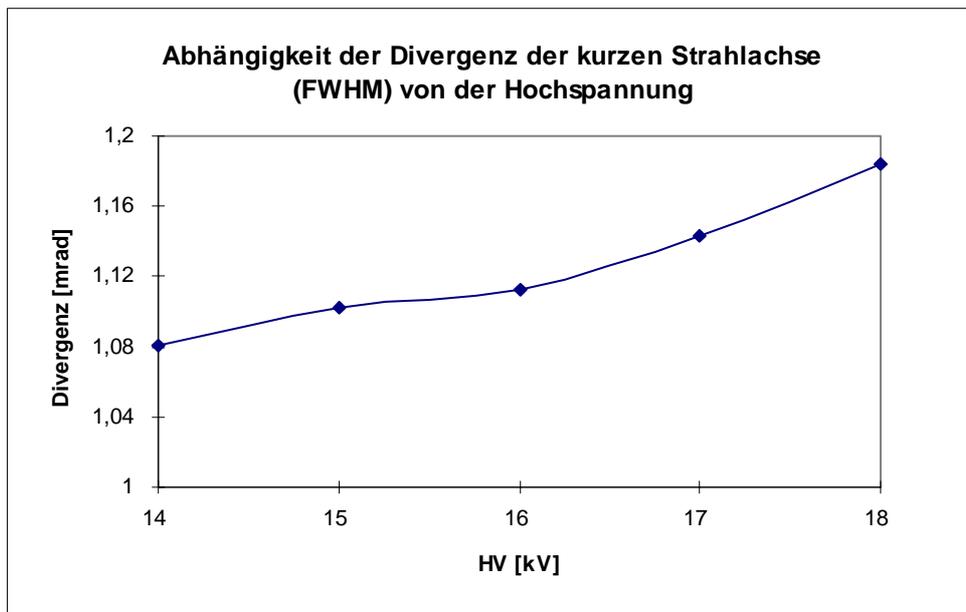


Abb. 11: Abhängigkeit der Divergenz in der kurzen Strahlprofilachse von der Hochspannung

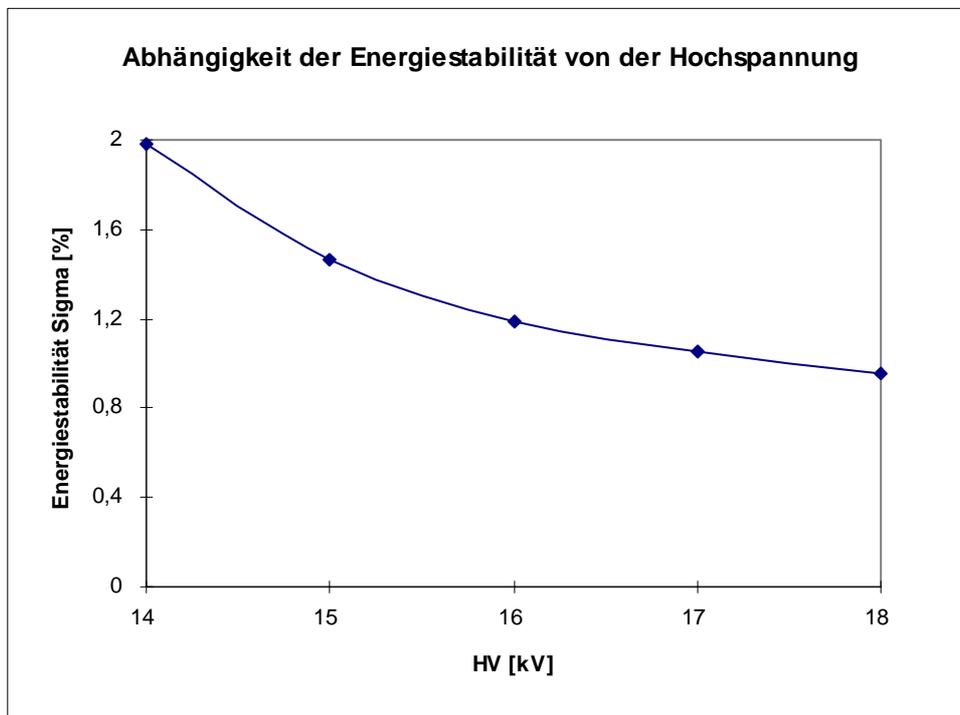


Abb. 12: Abhängigkeit der Energiestabilität von der Hochspannung

Durch den neuen Mikrohalogeninjektionsalgorithmus werden nur noch geringe Mengen an Halogen in der Größenordnung von 1 mbar zugeführt. Hierdurch wird es möglich, den Laser bei konstanter Energie innerhalb eines geringen HV-Regelbandes und somit mit konstanten Strahlparametern zu betreiben.

Ein typisches Beispiel ist in Abb. 13 dargestellt. Hier wurde ein Laser Lambda 4308 auf eine Pulsenergie von 667 mJ (entsprechend 200 W bei einer Repetitionsrate von 300 Hz) stabilisiert und mit einer Gasfüllung 25 Millionen Pulse betrieben.

Nach einer Anlaufphase variierte die HV nur noch um einige hundert Volt und die Strahlparameter konnten dementsprechend weitgehend konstant gehalten werden.

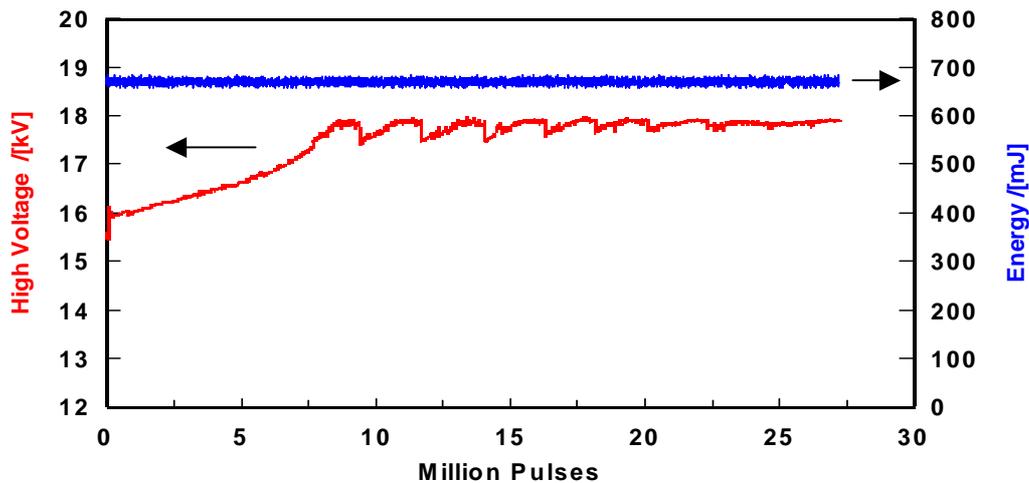


Abb. 13: Stabilisierung der Hochspannung bei konstanter Pulsenergie durch einen neuartigen Mikrohalogeninjektionsalgorithmus

Durch den Mikrohalogeninjektionsalgorithmus wird also über lange Zeit die Hochspannung stabil gehalten. Dadurch konnten auch andere Strahlparameter stabilisiert werden. In Abb. 14 sind die Variationen der Energiestabilität bei Verwendung sowohl des konventionellen Halogeninjektionsalgorithmus als auch des Mikro - Halogeninjektionsalgorithmus als Funktion der Pulszahl dargestellt. Wie man leicht erkennen kann, variiert beim Mikrohalogeninjektionsalgorithmus nach der Warmlaufphase die Energiestabilität nur noch zwischen 0,95% und 1,01%, während die entsprechende Schwankung beim konventionellen Algorithmus zwischen 0,95% und 1,1% liegt.

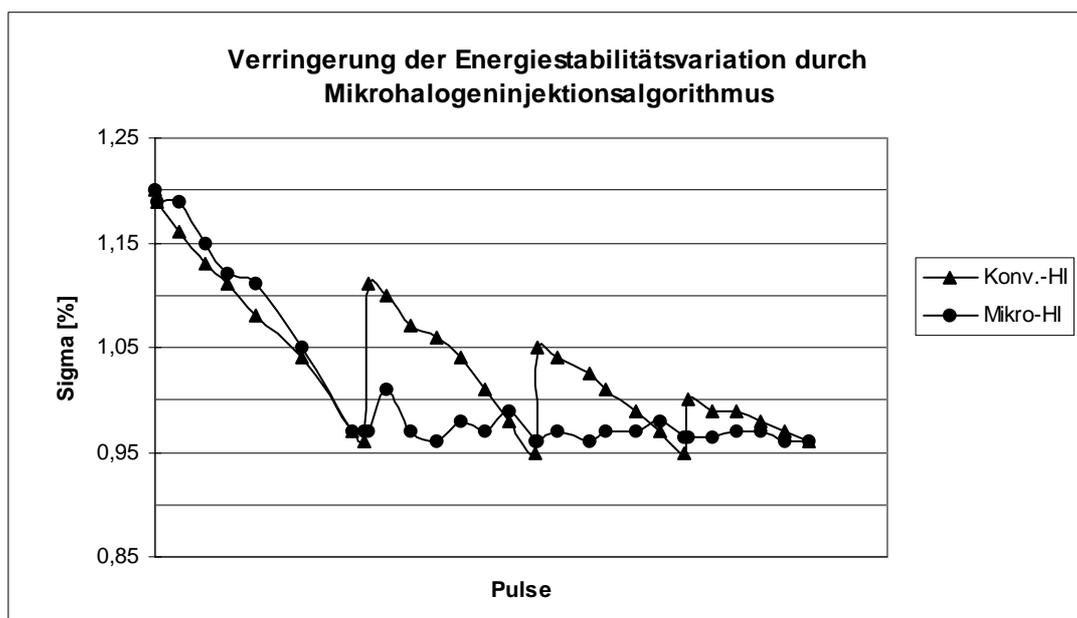


Abb. 14: Energiestabilität bei Verwendung des konventionellen Halogeninjektionsalgorithmus und des Mikro - Halogeninjektionsalgorithmus

Abb. 15 zeigt den Einfluß des Mikro-Halogeninjektionsalgorithmus auf die Divergenzvariation der kurzen Strahlachse.

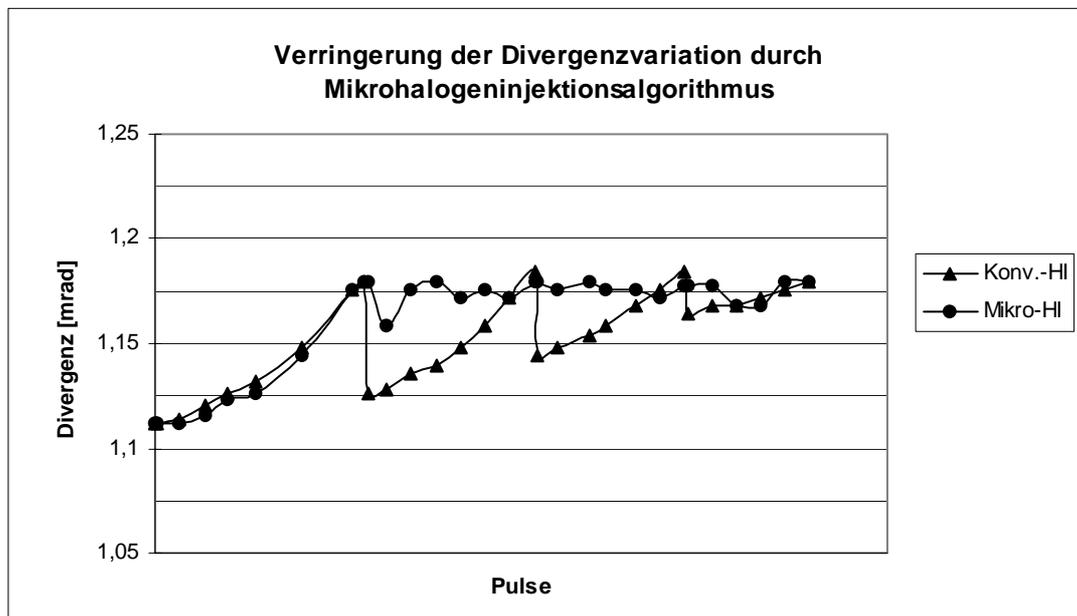


Abb. 15: Divergenzvariation der kurzen Strahlachse bei Verwendung des konventionellen Halogen-injektionsalgorithmus und des Mikro - Halogeninjektionsalgorithmus

Wertung

Die Entwicklung des Mikrohalogeninjektionsalgorithmus ermöglicht es, die Strahlparameter innerhalb geringer Variationsbreiten zu halten, was insbesondere für die Mikrostrukturierung von Oberflächen mit Hilfe abbildender Verfahren wie z.B. der Lithographie im Submikrometerbereich von entscheidender Bedeutung ist.

3.2 Beeinflussung der zeitlichen Pulsform eines XeCl Excimerlasers durch HCl Injektionen

Viele Laseranwendungen erfordern eine möglichst konstante zeitliche Pulsform. Die Veränderungen der Lasergaszusammensetzung und der Entladespannung zwischen den Elektroden (bei Regelung auf konstante Pulsenergie) während des Laserbetriebs haben unmittelbare Auswirkungen auf den zeitlichen Verlauf des Pumpprozesses und somit natürlich auch auf den zeitlichen Verlauf des Laserpulses.

Eine Veränderung der zeitlichen Pulsform während des Laserbetriebs bei einem XeCl-Excimerlaser ist in Abb. 16 dargestellt. Mit einer neuen Gasfüllung klingt der Laserpuls nach 50 ns vollständig ab. Durch die Abnahme an HCl während des Laserbetriebs wird die

Entladung des Schwingkreises zunehmend entdämpft, was das Auftreten eines weiteren Nebenmaximums des Laserpulses zur Folge hat und der Puls insgesamt erst nach 80 ns abgeklungen ist.

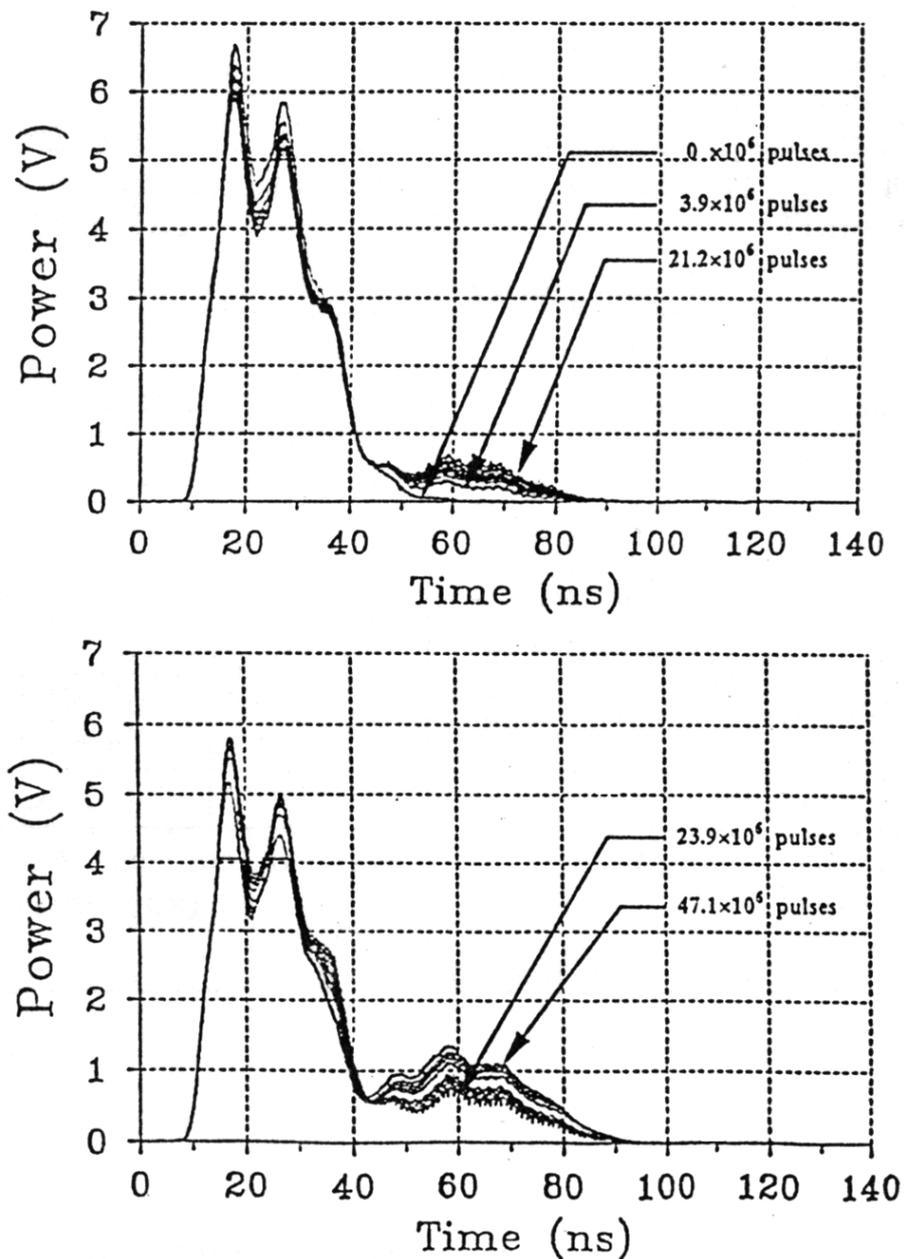


Abb. 16: Entwicklung des Laserpulses ohne HCl-Injektionen

Es wurde daraufhin ein Regelalgorithmus entwickelt, der dem Lasergasgemisch definierte Mengen an HCl (HCl-Injektionen) in Abhängigkeit von der Zeit, der Laserpulsanzahl sowie der angelegten Spannung hinzufügt. Hierdurch ist es möglich, bei einem XeCl-Excimerlaser die zeitliche Impulsform über 25 Millionen Laserpulse weitgehend konstant zu halten, wie man anhand der Abb. 17 erkennen kann:

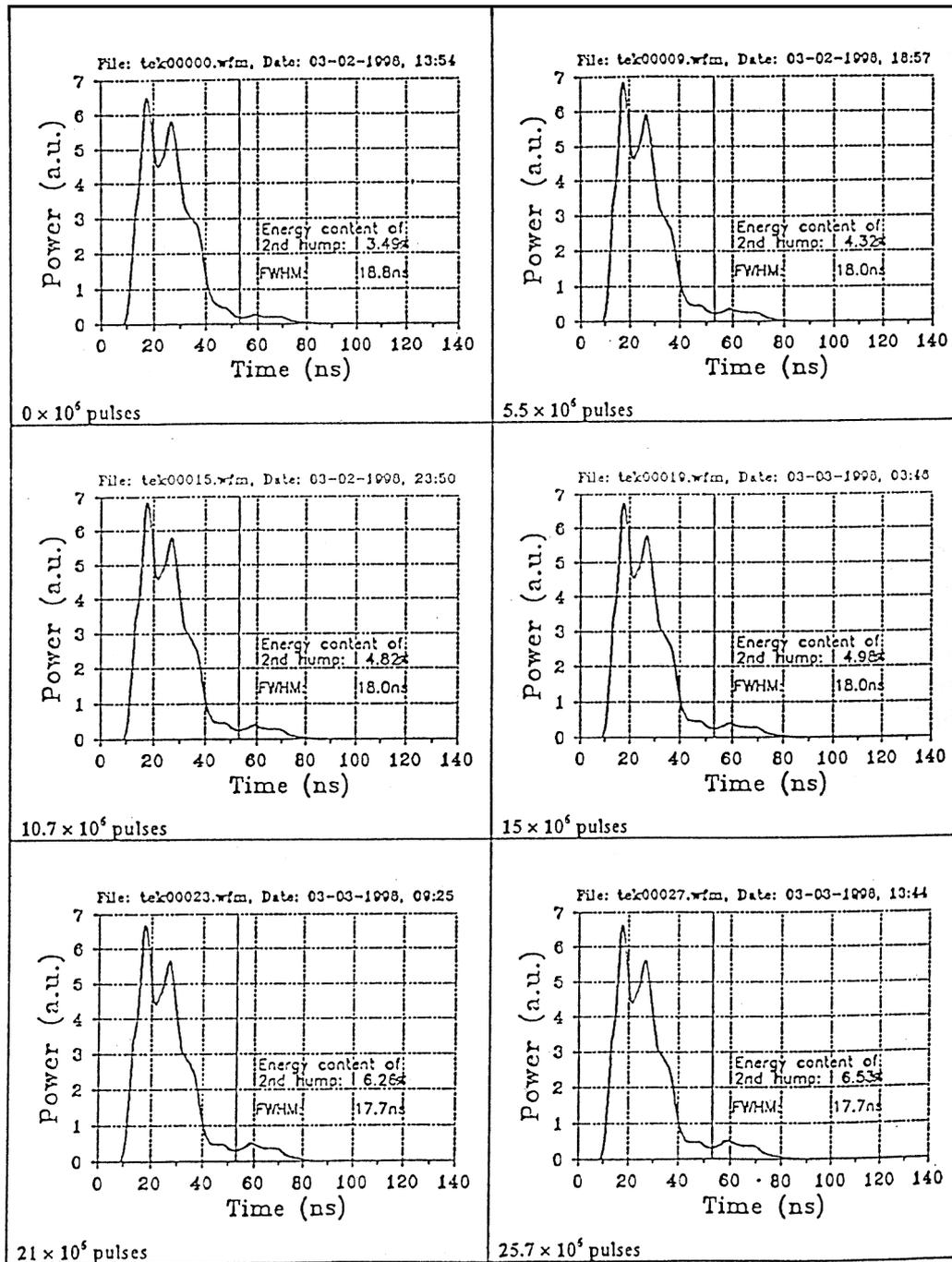


Abb. 17: Entwicklung des Laserpulses mit Regelalgorithmus

Wertung

Durch die Einführung dieses Regelalgorithmus ist es möglich, die zeitliche Impulsform über die gesamte Gaslebensdauer möglichst konstant zu halten. Diese Anwendung ist besonders bei Excimerlaseranwendungen von entscheidender Bedeutung, bei denen eine Veränderung

der zeitlichen Pulsform zur Beschädigung der strahlführenden bzw. abbildenden Optik führen kann.

3.3 Verbesserung der Temperaturregelung der Laserröhre

Da die Effizienz der Gasentladung wesentlich von der Gastemperatur abhängig ist und andere Laserstrahlparameter wie bereits gezeigt von der aktuellen Hochspannung abhängig sind, war es erforderlich die Temperaturregelung der Laserröhre deutlich zu verbessern, so daß keine größeren Schwankungen auch während größerer Gasaktionen wie der partielle Gasaustausch (PGR) oder Laseremissionspausen (z.B. beim Burstbetrieb) mehr auftreten. Durch Einführung eines neuen PID Reglers sowie Integration eines schnelleren Temperatursensors konnte die Röhrentemperatur deutlich stabilisiert werden. Der vor Beginn der Projektlaufzeit realisierte Temperaturregelung ist am Beispiel eines A1010 ArF Industrielasers in der oberen Kurve in Abb.18 und der verbesserte Zustand in der oberen Kurve in Abb.19 dargestellt.

Zur Verbesserung der allgemeinen Lasereigenschaften wurde zusätzlich die gesamte Rückoptik temperiert. Die Stabilisierung der Rückoptiktemperatur ist ebenfalls in den Abb.18 und 19 auf den jeweils unteren Kurven dargestellt.

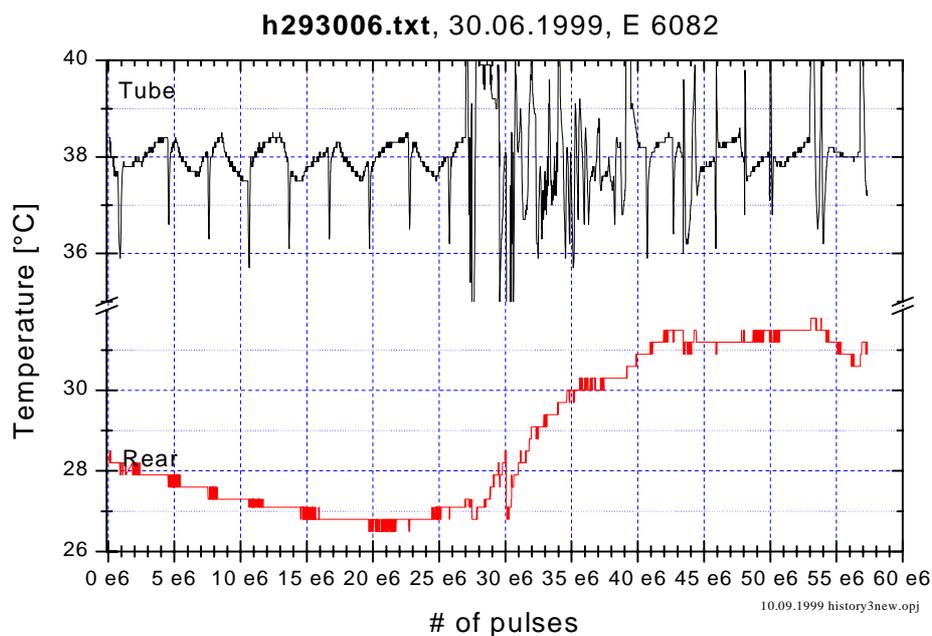


Abb. 18: Temperaturregelung von Laserröhre und Rückoptikmodul vor Projektbeginn in einem spektral schmalbandigen 1kHz A1010 ArF Industrielaser

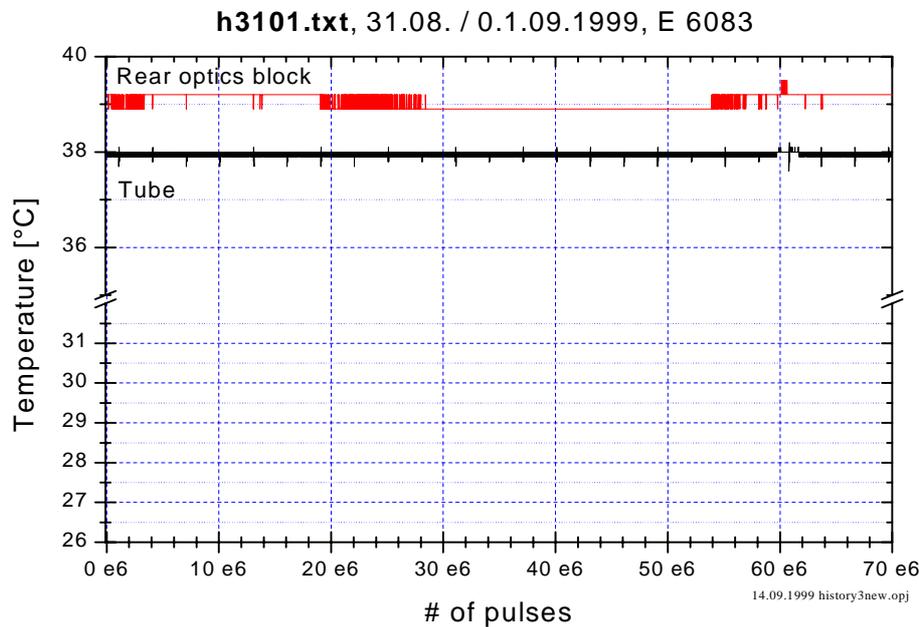


Abb. 19: Temperaturregelung von Laserröhre und Rückoptikmodul zu Projektende in einem spektral schmalbandigen 1kHz A1010 ArF Industrielaser

3.4 Bestrahlungsexperimente Diodenzeilen

3.4.1 Funktionsweise der Wellenlängen und Bandbreitendetektion

Schmalbandige Excimerlaser mit Bandbreiten von 0.6 pm (FWHM) werden zunehmend als Belichtungsquelle für die Herstellung von IC-Bauelementen mit hoher Speicherkapazität eingesetzt. Hierbei werden auf dem IC Strukturen in der Größenordnung von 130-180 nm erzeugt. Hierfür sind extrem hohe Anforderungen an die Lichtquelle und an das abbildende Objektivsystem erforderlich. So mußte neben der extrem geringen Bandbreite von < 0.6 pm eine absolute Wellenlängengenauigkeit von $< \pm 0.5$ pm und eine relative Wellenlängenstabilität von $< \pm 0.1$ pm gewährleistet werden.

Sowohl Bandbreite als auch Wellenlänge werden mit einem Etalonsystem überwacht bzw. geregelt, welches in Abb. 20 schematisch dargestellt ist:

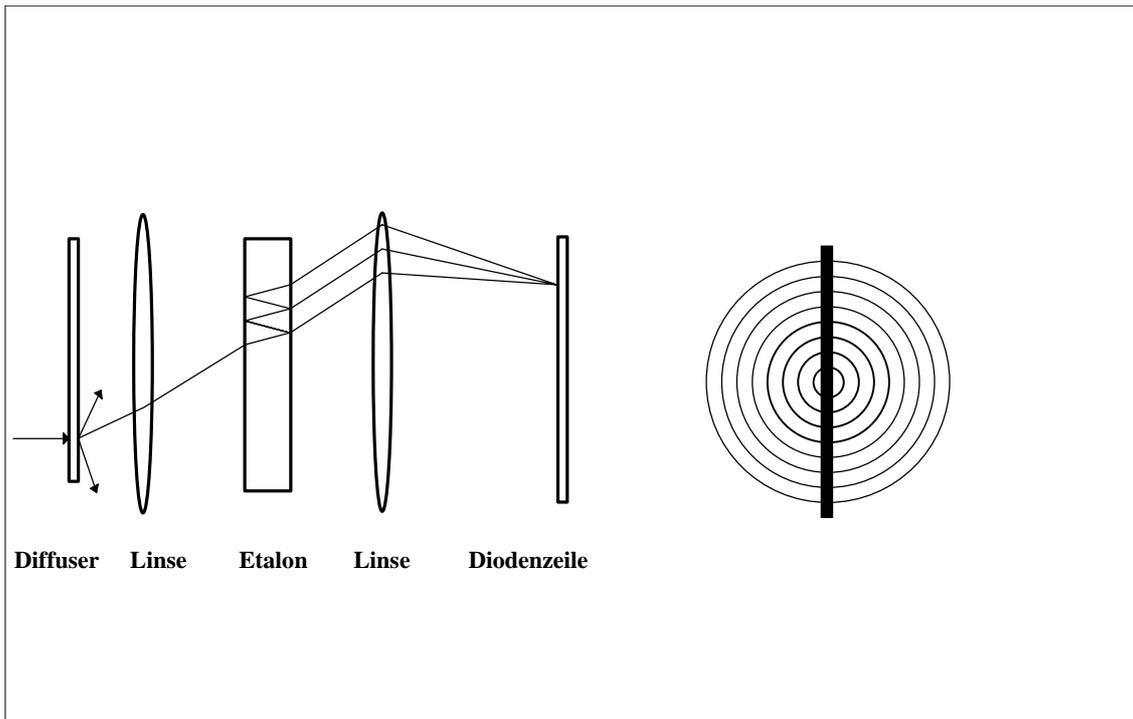


Abb. 20: Schematische Darstellung des Etalonsystems zur Stabilisierung der Laserwellenlänge und Messung der spektralen Bandbreite

Das durch das Etalonsystem erzeugte Ringmuster wird entlang der Längsachse mit einer Diodenzeile ausgelesen. Das entsprechende Intensitätsprofil zeigt Abb. 21.

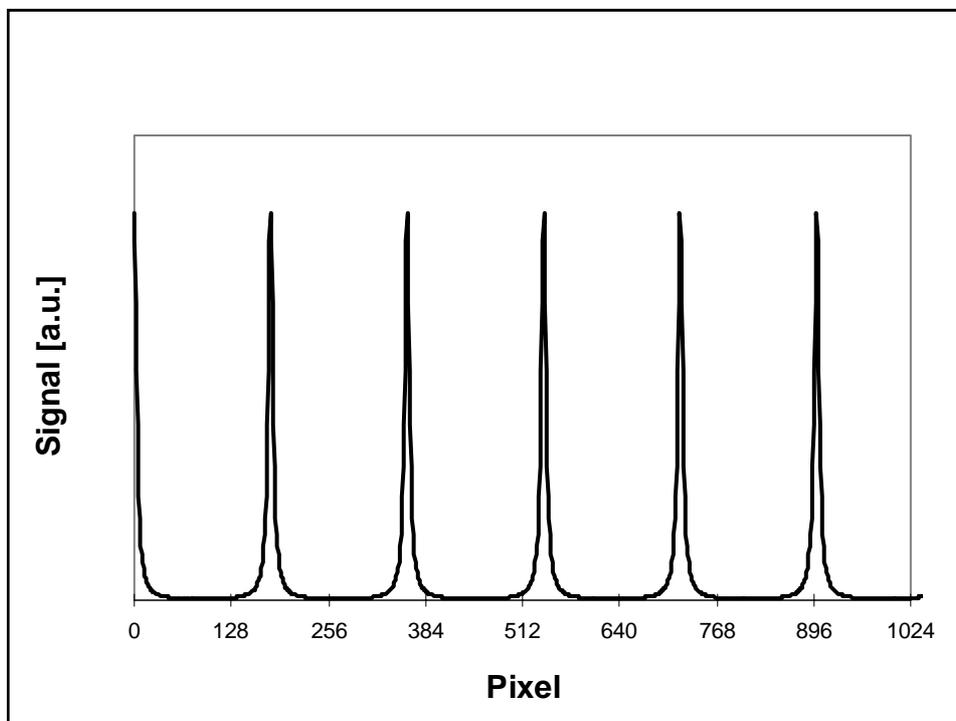


Abb. 21: Intensitätsverlauf eines Ringsystems

Die Regelung der Wellenlänge erfolgt über die Bestimmung der Signalmaxima, die Überwachung der Bandbreite über die Bestimmung der Halbwertsbreite der Ringe.

Beim Betrieb des Etalonsystems mit Laserstrahlung der Wellenlänge 193 nm (ArF-Excimerlaser), wobei die Diodenzeile Energiedichten in der Größenordnung von einigen nJ/cm^2 ausgesetzt war, wurde nach mehreren 10 Millionen Laserpulsen das Auftreten von Dunkelströmen beobachtet.

Diese Dunkelströme steigen sowohl mit der Energiedichte als auch mit der Zahl der Laserpulse an, wie man anhand der Abb. 22 erkennen kann. Durch die Dunkelströme wird der Intensitätsverlauf des Ringsystems verfälscht dargestellt. Dieses hat naturgemäß Probleme bei der Wellenlängenstabilisierung und der Bandbreitenbestimmung zur Folge.

Zur Behebung dieses Problems wurden zwei unterschiedliche Experimente durchgeführt:

1. Dauerbestrahlung neuartiger Diodenzeilen
2. Untersuchung von Phosphoreszenzschichten (Quantenkonverter) zur Frequenzwandlung

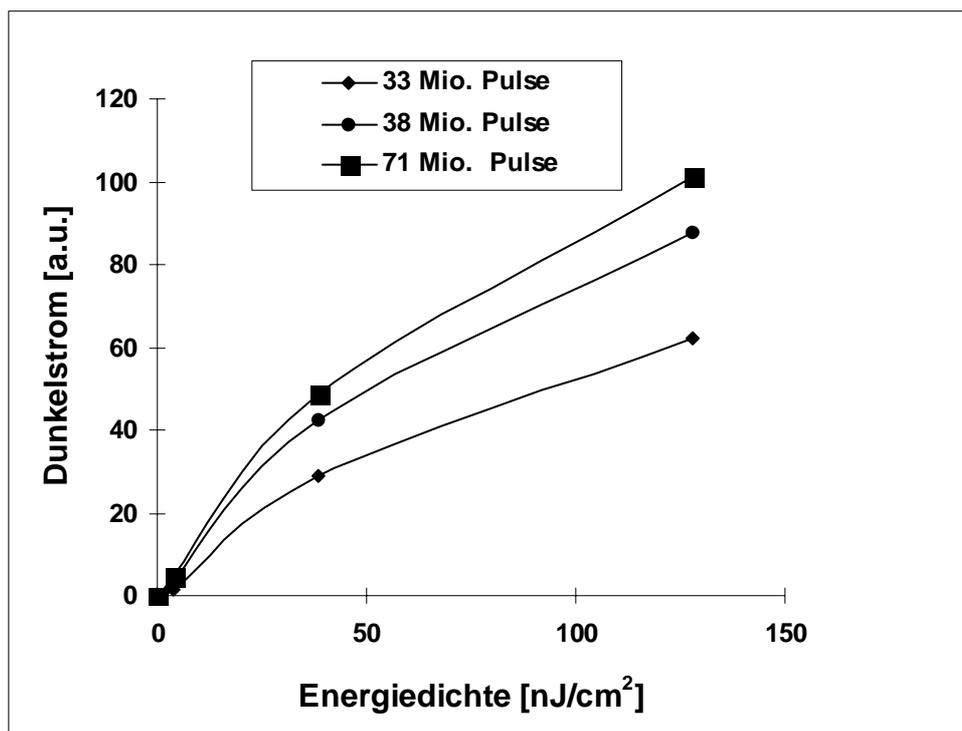


Abb. 22: Entwicklung des Dunkelstroms in Abhängigkeit von Energiedichte und Pulszahl

3.4.2 Dauerbestrahlung neuartiger Diodenzeilen

Es wurde eine neuartige Diodenzeile unter denselben Versuchsbedingungen bestrahlt wie die konventionelle Diodenzeile. Wie man an Abb. 23 erkennen kann, wurde bei Nichtbestrahlung (0 Laserpulse) ein Dunkelstrom von 50 registriert. Der Maximalwert des auslesbaren Signals der Diodenzeile liegt bei 4096. Nach Bestrahlung der Diodenzeile mit 660 Millionen

Laserpuls war der Dunkelstrom auf einen Wert von 66 angestiegen, was einem Anstieg des Dunkelstroms von etwa 5% pro 100 Millionen Laserpuls entspricht.

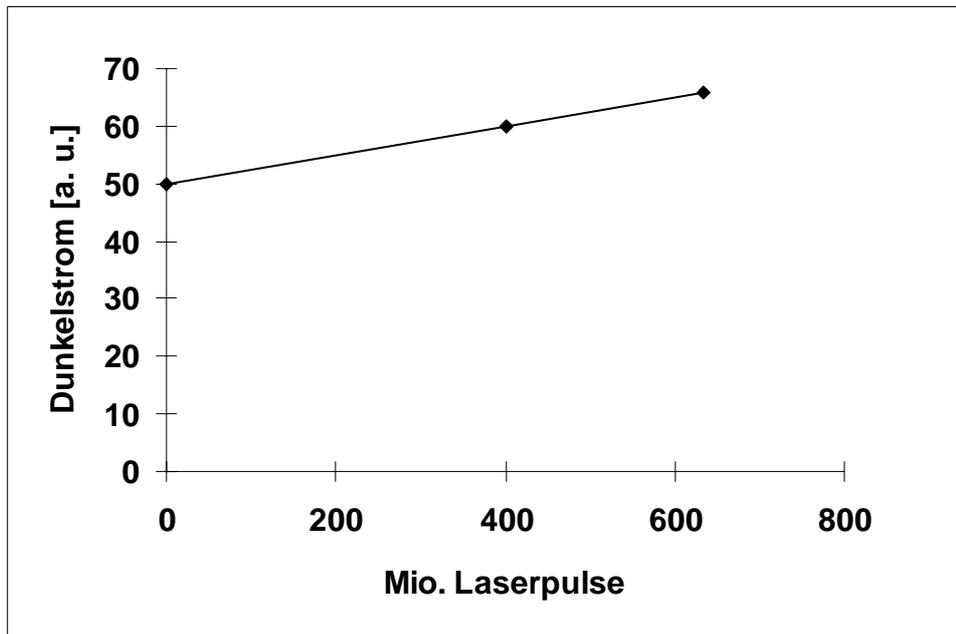


Abb. 23: Abhängigkeit des Dunkelstroms von der Laserpulszahl

Obwohl diese Diodenzeile eine deutliche Verbesserung im Vergleich zu herkömmlichen Zeile darstellt, ist ein Anstieg des Dunkelstroms von 5% je 100 Millionen Pulse vor dem Hintergrund geforderter Lebensdauern von >5 Milliarden Laserpulse immer noch ein ernstes Problem. Aus diesem Grund wurden Versuche mit Quantenkonvertern durchgeführt, die die Diodenzeile vor der zerstörenden 193 nm Strahlung schützen sollen.

3.4.3 Untersuchung von Phosphoreszenzschichten (Quantenkonverter) zur Frequenzwandlung

Die Funktionsweise des Quantenkonverters ist in Abb. 24 schematisch dargestellt:

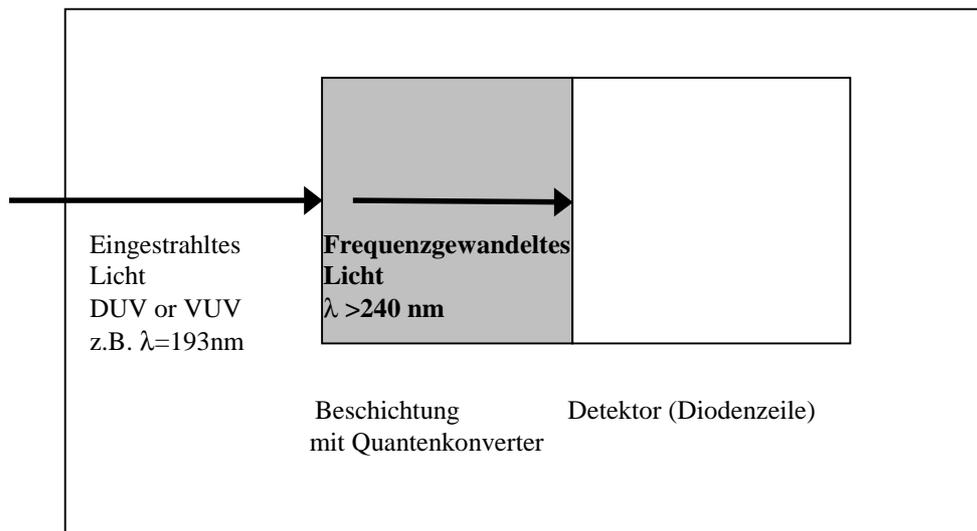
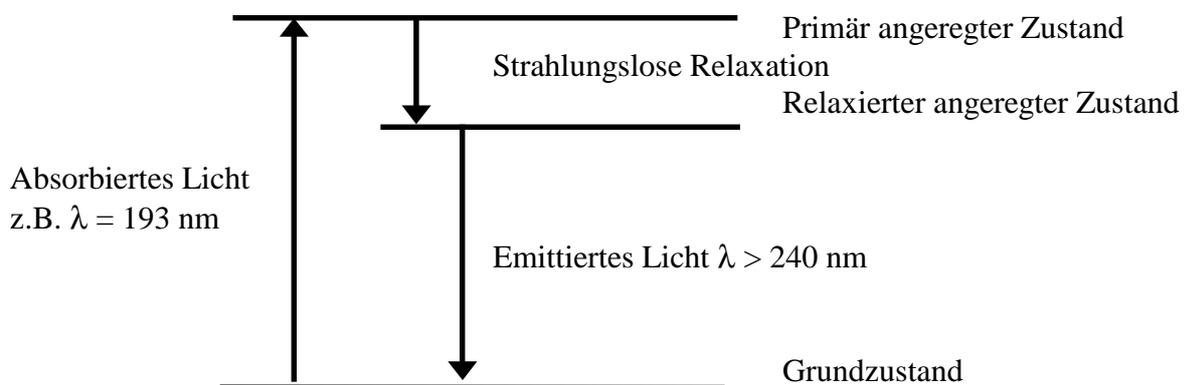


Abb. 24: Diodenzeile mit Quantenkonverterbeschichtung

Die herkömmliche Diodenzeile wird mit einer dünnen Schicht einer phosphoreszierenden Substanz belegt. Innerhalb dieser Schicht wird das vom Laser emittierte Licht der Wellenlänge 193 nm vollständig absorbiert, so daß die Diodenzeile überhaupt keiner kurzwelligeren Bestrahlung ausgesetzt wird. Nachdem die 193 nm-Strahlung von der Phosphoreszenzschicht absorbiert wurde, wird längerwelliges Licht (> 240 nm) ausgesendet, welches dann auf den Detektor trifft. Der photophysikalische Prozeß ist in Abb. 25 schematisch dargestellt.

**Abb. 25:** Photophysikalisches Energieschema des Quantenkonverters

Die Phosphoreszenzschicht absorbiert Licht der Wellenlänge 193 nm. Hierbei werden die absorbierenden Spezies vom elektronischen Grundzustand in einen primär angeregten Zustand angehoben. Der Primär angeregte Zustand ist relativ kurzlebig und geht strahlungslos in den längerlebigen relaxierten Zustand über. Die strahlungslose Relaxation ist mit einer Energieabnahme verbunden. Der relaxierte angeregte Zustand geht u.a. durch Emission wieder in den elektronischen Grundzustand über.

Bedingt durch die geringere Energie des relaxierten Zustands relativ zum primär angeregten ist die Emission längerwellig als 193 nm. Hierbei ist es wünschenswert, daß die Wellenlänge des emittierten Lichts mindestens 240 nm beträgt, weil bei Belichtung mit 248 nm Strahlung (KrF-Excimerlaser) keine vergleichbaren Dunkelströme beobachtet werden.

Derartig mit einem Q1 Phosphor (Entwicklung des Laser Laboratoriums Göttingen) beschichtete Diodenzeilen wurden langzeitgetestet. Dabei konnte auch nach 800 Mill. Laserpulsen kein nennenswerter Anstieg des Dunkelstroms registriert werden (Abb. 26)

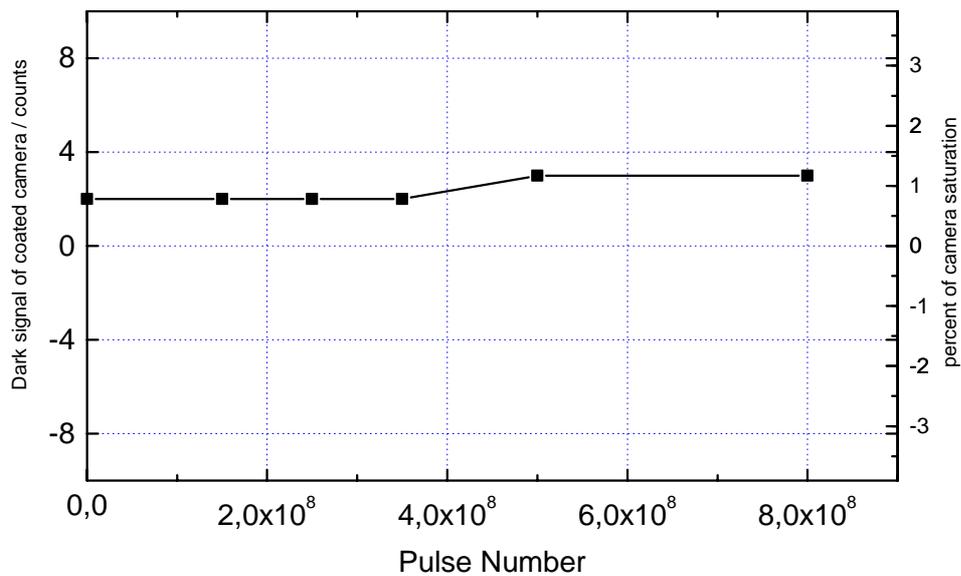


Abb. 26: Anstieg des Dunkelstroms einer beschichteten Diodenzeile in Abhängigkeit von der Pulszahl

Die beschichtete Diodenzeile zeigt also einen deutlich geringeren Anstieg des Dunkelsignals im Vergleich zu den unbeschichteten Zeilen sowohl des konventionellen als auch des neuartigen Typs (vgl. Abb. 22 und 23)

Die Beschichtung der Diodenzeile mit Quantenkonvertern ist beim US-Patent and Trademark Office patentiert.

Sowohl durch den Einsatz einer neuartigen Diodenzeile als auch durch Phosphoreszenzbeschichtung von konventionellen Diodenzeilen ist es möglich, das Auftreten von bestrahlungsinduzierten (193 nm) Dunkelströmen zu verhindern. Die letztgenannte Variante hat jedoch den Vorteil, daß sie keine Hardwaremodifikationen erfordert und somit leicht in schon bestehende Lasersysteme integriert werden kann. Der Nachteil der beschichteten Zeilenkameras ist die geringere Empfindlichkeit und eine deutliche Einschränkung der zeitlichen Auflösung der Kameras, da die alle für die Beschichtung in Frage kommenden Phosphore Abklingzeiten im Millisekundenbereich aufweisen.

3.4.4 Untersuchung einer räumlich hochauflösenden Kamera mit großem Dynamikbereich

Da die bisher getesteten Kamerachipvarianten nur 512 Pixel aufwiesen, im Laufe des Projektes die industriellen Forderungen an die räumliche Auflösung aber deutlich verschärft wurden, wurde im letzten Jahr der Projektlaufzeit eine völlig neu entwickelte Diodenzeile mit 2048 Pixeln und damit hoher räumlicher Auflösung getestet. Die Kamera hat einen Dynamikbereich von 10 bit (1024 counts) im Vergleich zu den 8 bit (256 counts) der zu

Beginn des Projektes getestet chips. Die Kamera wurde mit 193 nm Laserstrahlung mit fünfzigfacher Überlast im Vergleich zu den realen Einsatzbedingungen bestrahlt. Nach 200 Millionen Laserpulsen wurde ein Anstieg des Dunkelstroms registriert (Abb 27). Damit ergibt eine Lineare Extrapolation mit dem Überlastfaktor eine erwartete Lebensdauer der Kamera von 10 Mrd. Laserpulsen.

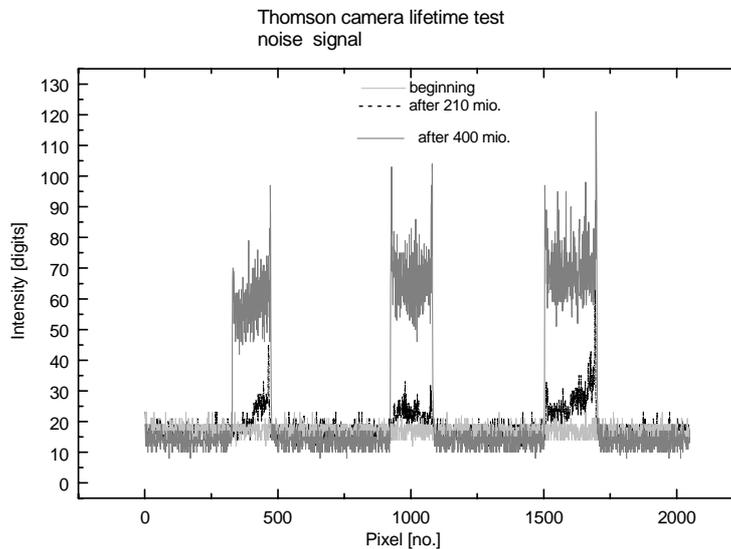


Abb. 27: Anstieg des Dunkelstroms der neuen Zeilenkamera in Abhängigkeit von der Pulszahl

Weitere Tests unter realen Betriebsbedingungen bestätigten, daß der Dunkelstrom über sehr lange Zeiten konstant bleibt. Leider stellte sich heraus, daß in den bestrahlten Regionen die Empfindlichkeit nachläßt. Dabei gibt es sehr große Qualitätsschwankungen bei den Chips. Während einige Kameras auch nach 1Mrd. Pulsen mit unveränderten Eigenschaften arbeiten, zeigten andere unter gleichen Bedingungen bereits nach einigen 100 Millionen Pulsen deutliche Empfindlichkeitseinbrüche an den bestrahlten Stellen. Dieses Qualitätsproblem muß noch gelöst werden, jedoch war dieses Resultat in der OPUS II Laufzeit nicht mehr erreichbar.

Wertung:

Im Rahmen des Projektes wurden verschiedene Möglichkeiten zur Verbesserung des Langzeitverhaltens von Diodenzeilen getestet. Dabei wurden deutliche Erfolge erzielt, die es ermöglichten, derartige Zeilen unter industriellen Bedingungen einzusetzen. Eine ultimative Lösung, die alle Anforderungen erfüllt, konnte jedoch bis jetzt noch nicht gefunden werden.

3.5 Strahlage und Strahlrichtungsautojustiersystem

Beim Wechsel einer Excimerlaserröhre oder optischer Komponenten des Resonators treten stets nach Optimierung des Strahlprofils und der Laserausgangsleistung Änderungen bei der Strahlage und der Strahlrichtung auf. Dies hat dann oftmals zur Folge, daß das dem Laser nachgeordnete Strahlführungssystem aufwendig nachjustiert werden muß.

Als eine Lösungsmöglichkeit für diese Problematik wurde vom Verbundpartner Laserlaboratorium Göttingen e.V. (LLG) ein Designvorschlag für ein Autojustagesystem vorgestellt. Der Vorteil dieses Systems besteht darin, daß nach der Optimierung von Laserleistung und Strahlprofil zwischen Laser und Strahlführungssystem On-line geregelt werden kann.

Das Prinzip der Autojustage ist folgendes (Abb.28):

Der vom Excimerlaser emittierte Strahl trifft auf eine Kombination von zwei beweglichen, hochreflektierenden Spiegeln. Hierbei wird durch die Regelung des von Spiegel 1 auf Spiegel 2 reflektierten Strahls die Strahlage definiert. Mit Hilfe von Spiegel 2 wird dann die Strahlrichtung nachgeregelt. Strahlage und -richtung werden mit Hilfe eines zweidimensional auflösenden Kamerasystems über das Nah- bzw. Fernfeld überwacht.

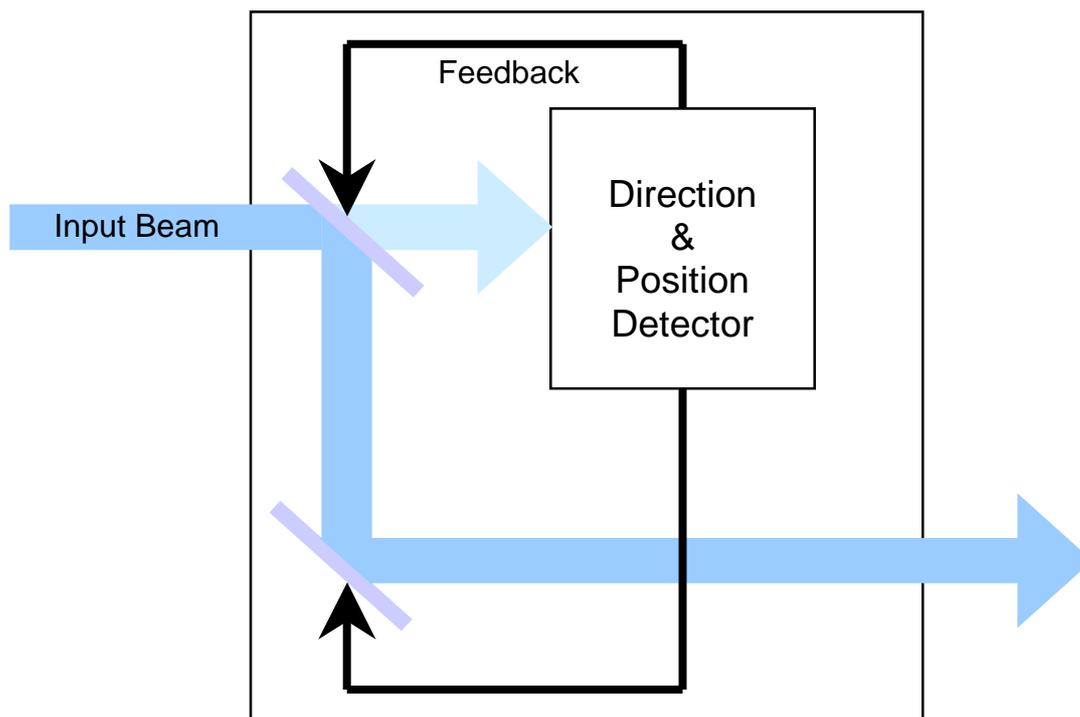


Abb. 28: Wirkungsprinzip des Strahlageautojustiersystems

Der experimentelle Aufbau des Strahlrichtungsautojustiersystems ist in Abb. 29 dargestellt.

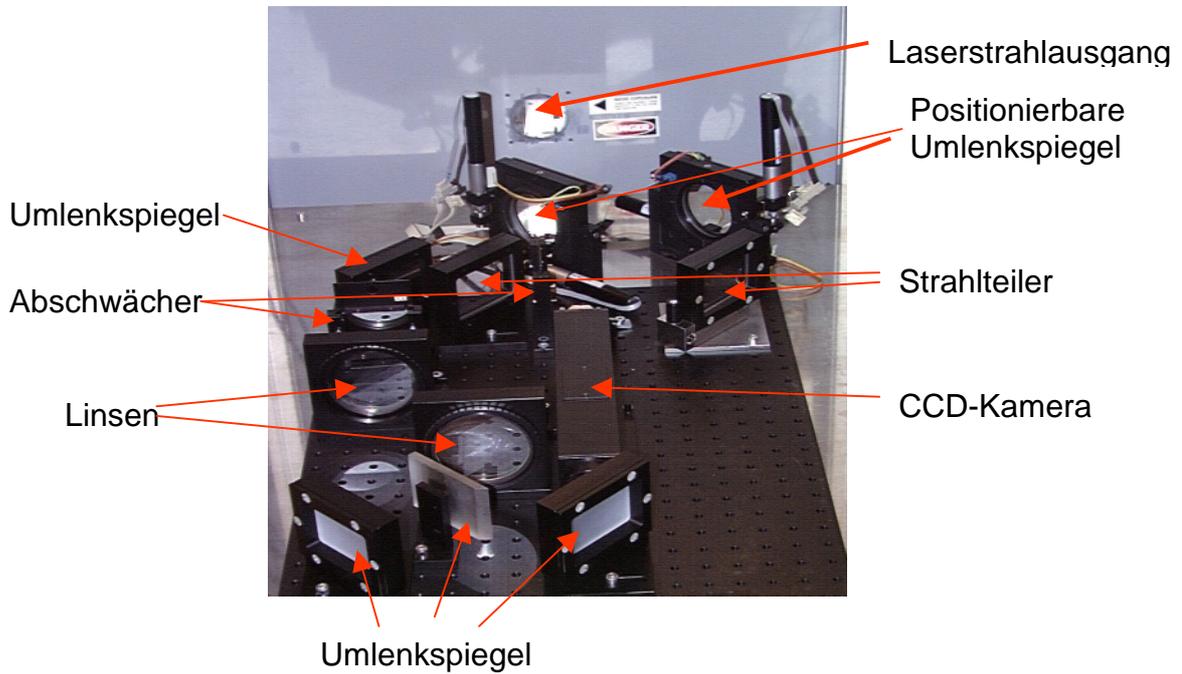
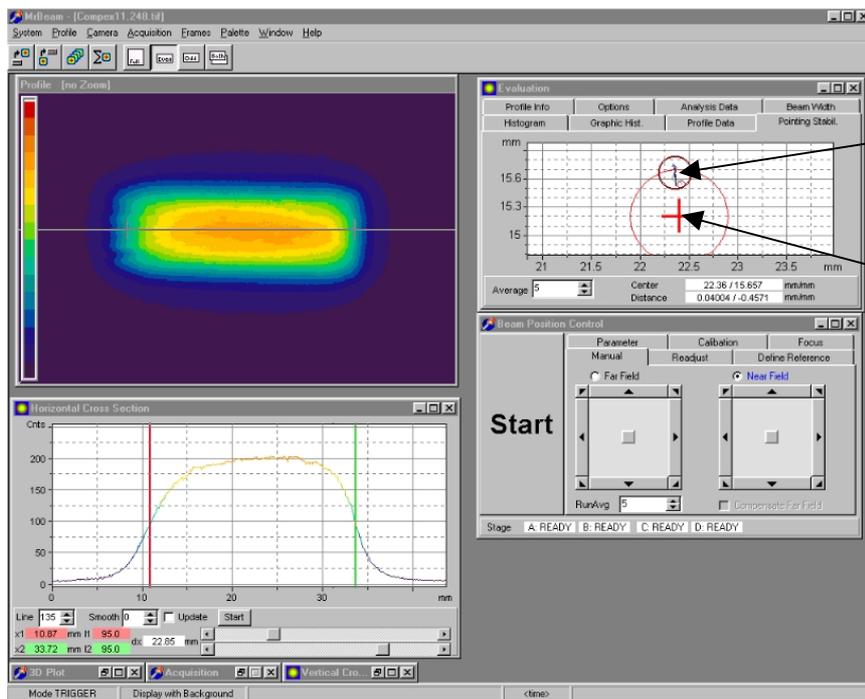


Abb. 29: Experimentelle Aufbau des Strahlrichtungsautojustiersystems

Das Strahlagestabilisierungssystem kann über eine komfortable Windowsoberfläche bedient werden (Abb.30).



Spur des aktuellen Strahlenschwerpunkts während des Autojustiervorgangs

Zielposition des Strahlprofilschwerpunktes

Abb. 30: Windowsbedienoberfläche des Strahlrichtungsautojustiersystems

Mit Hilfe dieser komfortablen Bedieneroberfläche ist es möglich, online die Strahlage und Richtung zu überwachen, die Justierspiegel zu steuern und am Bildschirm den Justiervorgang zu beobachten. Die Autojustage wird solange fortgesetzt, bis die aktuelle Strahlage mit der durch ein Fadenkreuz gekennzeichneten alten Strahlage vor der Serviceaktion wieder übereinstimmt.

Somit kann durch dieses Autojustiersystem auch nach aufwendigen Serviceaktionen vermieden werden, das die oft aufwendig zu justierende Nachfolgeoptik neu justiert werden muß.

4. EA 4: Gasentladungserforschung

Zielstellung: In diesem Abschnitt sollen Laserröhren mit unterschiedlichen Elektroden- und Vorionisierungskonzepten erforscht und im Excimerlaser erprobt werden und die Strahlparameter in Abhängigkeit von der Elektrodenform bzw. -breite bestimmt werden.

Im Verlauf der Lebensdauer einer Excimerlaserröhre (generell in der Größenordnung von ≥ 1 Milliarde Pulse) kommt es durch die Erosion der Elektordenoberflächen zu Veränderungen der Elektrodenprofile. Durch die damit verbundenen Veränderungen der Feldstärkeverteilungen werden naturgemäß auch die Strahlparameter, insbesondere die Strahlprofile beeinflusst.

Bei hohen Repetitionsraten im Kilohertzbereich ist ein schnellerer Gasaustausch innerhalb der Gasentladungszone erforderlich, was naturgemäß höhere Strömungsgeschwindigkeiten innerhalb der Laserröhre notwendig macht. Bedingt durch diese höheren Strömungsgeschwindigkeiten nehmen aber auch infolge größerer Turbulenzen die Pulsenergiefluktuationen sehr stark zu.

Fast alle industriellen Laseranwendungen (wie z.B. die der Herstellung von Flachbildschirmen mittels TFT-Annealing oder die Herstellung hochaufglöster Strukturen bei der Produktion von integrierten Schaltkreisen) erfordern eine möglichst geringe Schwankung der Pulsenergie σ .

4.1 Verbesserung der Energiestabilität der Laserpulse

Es wurden neuartige Elektrodenprofile getestet, mit dem Ziel, einerseits die Langzeitstrahlparameter konstant zu halten und andererseits die Energiestabilität bei höheren Repetitionsraten zu verbessern. Im Laufe der Projektlaufzeit erhöhten sich die maximalen Repetitionsraten von anfangs 600 Hz auf 2000 Hz zu Projektende. Das ging mit einer ständigen Entwicklung des Entladungsdesigns einher.

Durch Optimierung des Elektrodenabstands, der Elektrodenprofile sowie der Gasströmungsverhältnisse wurde einerseits die Pulsenergiestabilität σ als auch die sogenannte Peak-to-Peak-Stabilität beträchtlich verbessert. Hierbei ist die Pulsenergiestabilität definiert

als die relative Standardabweichung der Energiewerte E_i bezogen auf den Pulsenergiemittelwert:

$$\sigma = n \frac{\sqrt{\frac{n \sum_{i=1}^n E_i^2 - (\sum_{i=1}^n E_i)^2}{n(n-1)}}}{\sum_{i=1}^n E_i}$$

Die Peak-to-Peak-Stabilität (P2P) ist definiert als die Differenz aus dem größten und dem kleinsten Energiewert E_i bezogen auf den Pulsenergiemittelwert:

$$P2P = n \frac{(E_{\max} - E_{\min})}{\sum_{i=1}^n E_i}$$

Am Beispiel eines XeCl-Hochleistungslasers (308 nm) mit einer durchschnittlichen Leistung von 200 W und einer Pulsrepetitionsrate von 300 Hz wird in Abb. 31 der Fortschritt bei der Optimierung sowohl der Pulsenergiestabilitäten als auch der Peak-to-Peak-Stabilitäten veranschaulicht:

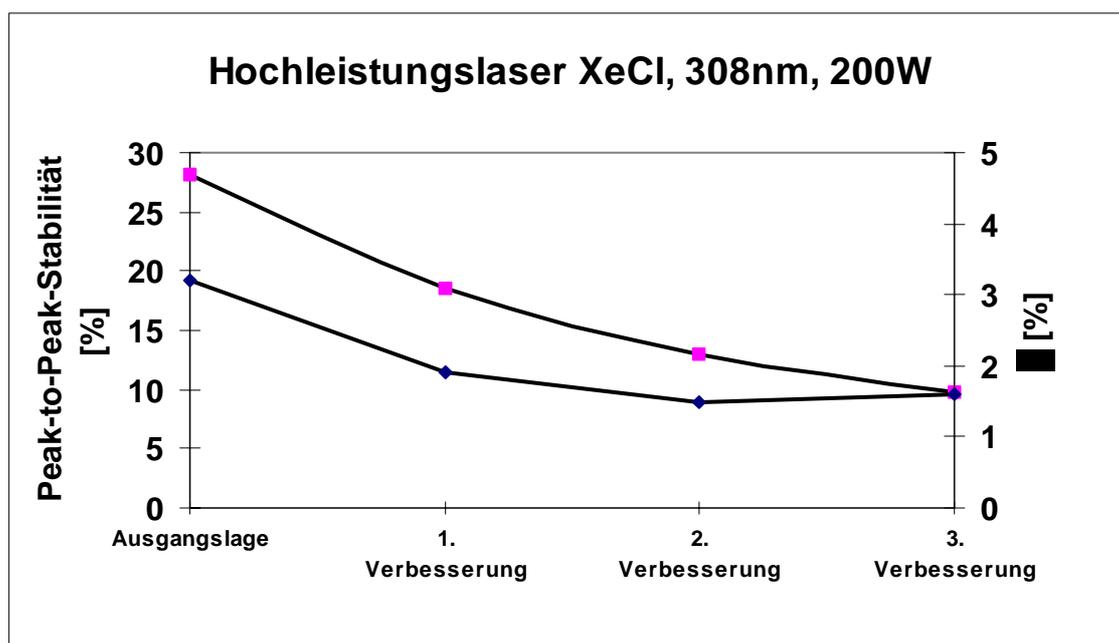
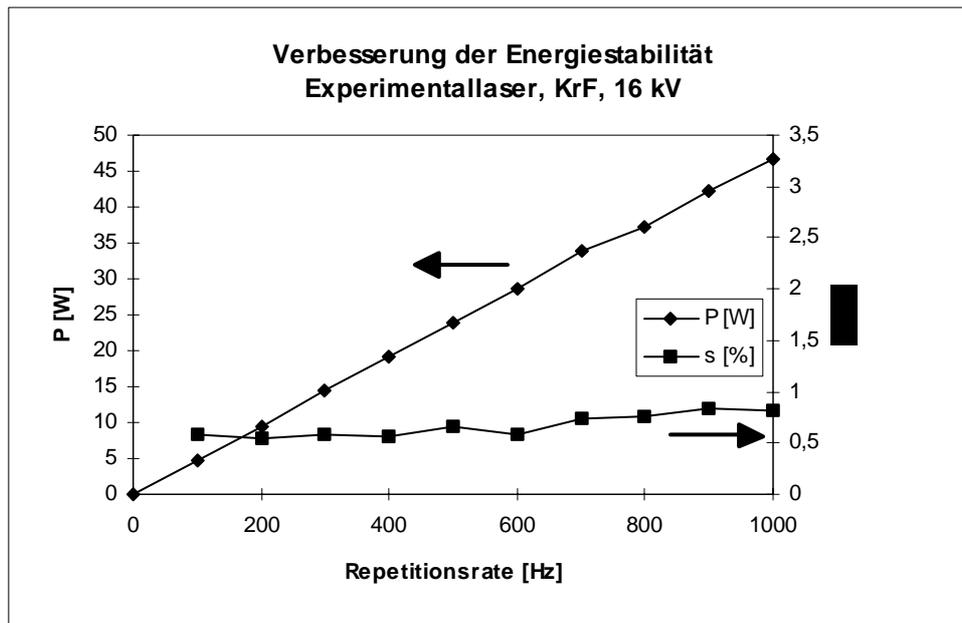


Abb. 31: Verlauf der Stabilitätsverbesserungen bei einem 200 W Hochleistungslaser

Mit dem konventionellen Röhrendesign wurden bei 200 W und 300 Hz Werte für σ von 3,2% und für P2P von 28,2% gemessen. Im Laufe der Optimierungen innerhalb der Laserröhre konnten die σ -Werte nach und nach auf 1,5% und die P2P-Werte auf 9,7% reduziert werden.

Im Bereich der Excimerlaser im mittleren Leistungsbereich, die mit Repetitionsraten bis in den Kilohertz-Bereich hinein betrieben werden, konnten σ -Werte von unter einem Prozent erreicht werden, wie in Abb. 32 für einen 50 W KrF-Excimerlaser dargestellt:

**Abb. 32:** Verlauf der Leistung und Pulsenergiestabilität eines 50 W KrF

Durch eine signifikante Verbesserung der Vorionisierung konnte eine starke Stabilitätsverbesserung des Hochleistungsindustrielasers L4000 erzielt werden. Während zu Projektbeginn ein Anstieg der Peak-to-Peak Schwankungen von anfänglich 16 % auf ca. 22 % zu Ende der Gaslebensdauer zu verzeichnen war (Abb. 33), ist nach Optimierung der Vorionisierung sogar ein leichter Abfall der Peak-to-Peak Schwankungen über die Gaslebensdauer von anfänglich 7% auf ca. 5 % zu beobachten (Abb. 34). Die Optimierung der Vorionisierung ist patentrechtlich geschützt.

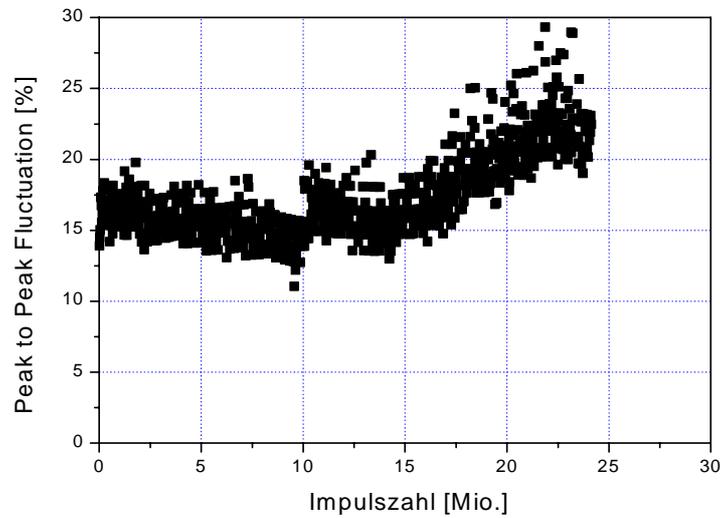


Abb. 33: Peak-to-Peak Stabilität des Industrielasers L4000 über eine Gaslebensdauer zu Projektbeginn

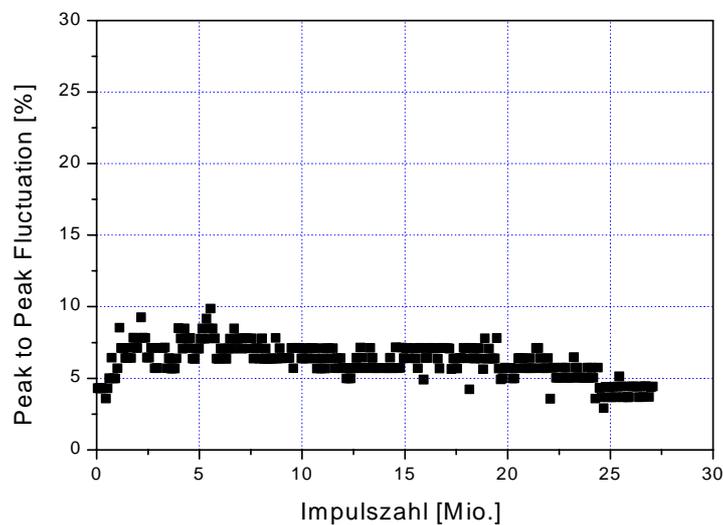


Abb. 34: Peak-to-Peak Stabilität des Industrielasers L4000 über eine Gaslebensdauer zu Projektende

4.2 Sonstige Ergebnisse EA4

Durch die kontinuierliche Entwicklung an den Excimerlaserröhren konnten auch andere wichtige Eigenschaften verbessert werden. So gelang es, die Gesamteffizienz von ArF Industrielasern von vorher 1.2 % auf 1.6 % zu erhöhen. Durch die Optimierung der

röhreninternen Staubabscheider sowie Verbesserung der Vorionisierung konnte die Standzeit von Laserröhrenfenster um 50% vergrößert werden. Durch Weiterentwicklung der Elektrodenprofile konnten die maximalen Folgefrequenzen bei Excimerlasern mit niedriger Pulsenergie bis auf 2 kHz vergrößert werden.

Wertung

Die Verbesserung der Pulsenergiestabilität ist von entscheidender Bedeutung für den Einsatz von Excimerlasern in der industriellen Fertigung. So erfordert z.B. die Herstellung von Flachbildschirmen mittels TFT-Annealing oder die Belichtung von einem mit Photoresist beschichteten Halbleiterwafer zur IC-Herstellung eine extrem geringe Variation der Pulsenergie.

5. EA5 Anpassungsuntersuchungen im Industriellen Umfeld

5.1 Strahlrichtungsautojustiersystem

Das in EA 3 entwickelte Strahlrichtungs - Autojustiersystem wurde unter industrienahen Bedingungen bei der Firma Microlas getestet und eingesetzt. Dabei wurde die Autojustiervorrichtung in ein Gesamtsystem bestehend aus L4000 Laser und einer Microlas Spezialoptik zur Erzeugung eines langgezogenen Linienfokusses integriert. Dieses System ist bestimmt zur Anwendung beim TFT Annealing zur Herstellung von Flachbildschirmen. Der prinzipielle Aufbau des Gesamtsystems ist in Abb.35 dargestellt.

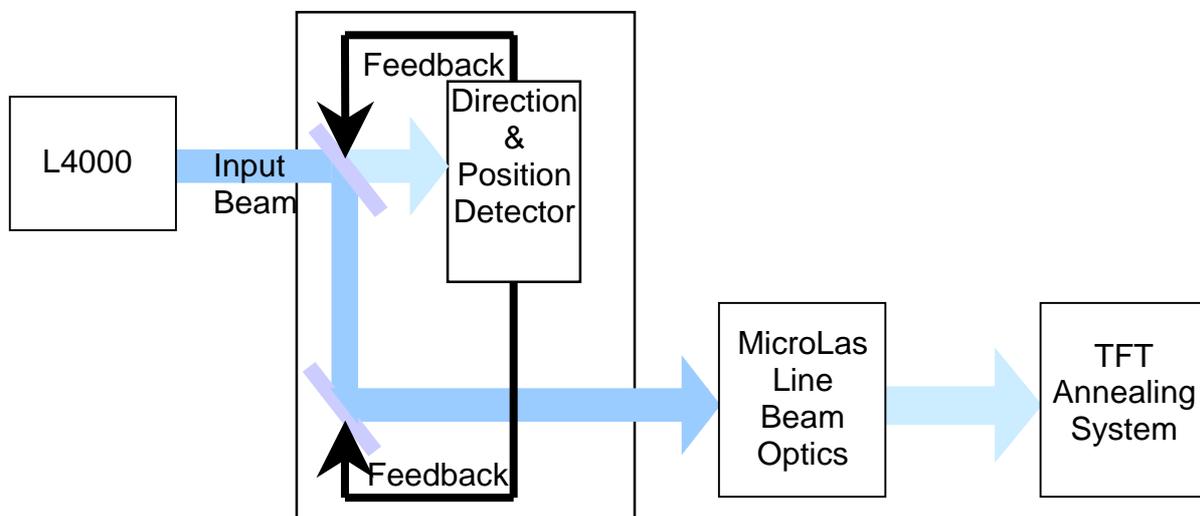


Abb. 35: Schematischer Aufbau des bei der Fa. Microlas realisierten TFT Annealing Systems mit integriertem Strahlrichtungs- Autojustiersystem.

Mit Hilfe des Systems gelang es, die anspruchsvollen Spezifikationen von $< 20\mu\text{m}$ Positioniergenauigkeit des Strahlschwerpunktes und $< 50 \mu\text{rad}$ Strahlrichtungsgenauigkeit zu

erfüllen. Das System ist einsatzfähig für Excimerlaser mit einer maximalen Strahlhöhe von 40 mm und einer maximalen Divergenz von 10 mrad.

Das Gesamtsystem wurde von Microlas mit Erfolg getestet. Die Entwicklung des Strahlrichtungsautojustiersystems wurde damit vollständig im Projektzeitraum mit Erfolg beendet.

5.2 Shutterportkamera

Beim industriellen Einsatz von Lasern ist es von außerordentlicher Bedeutung, Ausfallzeiten so gering wie möglich zu halten. Dafür ist es eine wichtige Voraussetzung, über einfach einsetzbare Diagnosewerkzeuge zu verfügen. Unter industriellen Einsatzbedingungen ist der gesamte Strahlkanal gekapselt und an eine justierte Nachfolgeoptik gekoppelt. Zur Analyse des Strahlprofils, das Hinweise auf Defekte optischer Komponenten liefern kann, steht nur der sogenannte Strahlshutterport zur Verfügung. Im Falle des geschlossenen Shutters wird der Laserstrahl mit Hilfe eines Klappspiegels in eine Strahlfalle umgelenkt. Bisher konnte die Strahlfalle optional durch ein Powermeter oder einen Anflanschstutzen mit integrierter Photodiode ersetzt werden. Im Rahmen des OPUS II Projektes wurde in Zusammenarbeit mit dem Laserlaboratorium Göttingen e.V. (LLG) eine Nahfeldkamera realisiert, die auch unter den äußerst beengten Platzverhältnissen im Laser an den Shutterport einfach mit Hilfe eines Bajonettverschlusses angeschlossen werden kann. Der prinzipielle Situation im Laser ist in Abb. 36 dargestellt. Die Nahfelddaten können dann auf einem Laptop vor Ort direkt mit Hilfe einer auf der Basis der Software des Strahlrichtungs – Autojustiersystems realisierten Windows Software ausgewertet werden (Abb. 37). Es können Daten wie Strahlprofildimensionen und Symmetrieverhältnisse im Laserstrahlprofil sofort gewonnen werden. Eventuelle Defekte optischer Komponenten können so schnell detektiert werden.

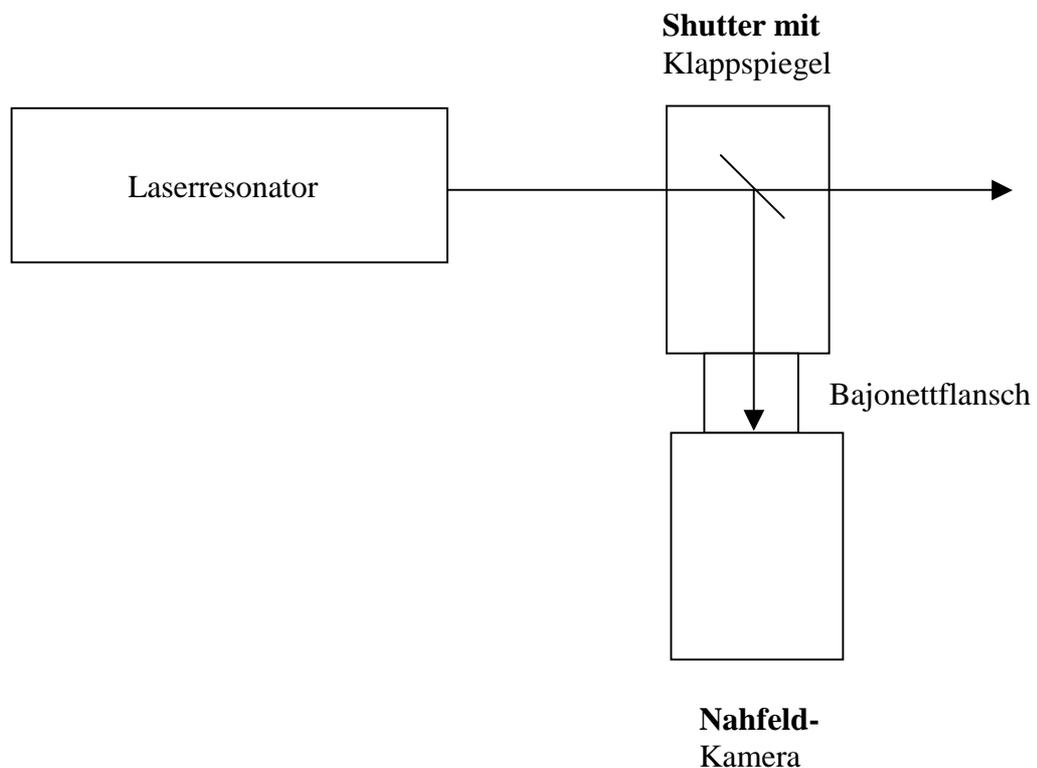


Abb. 36: Prinzipaufbau für die Ankopplung einer Nahfeldkamera in Industrie –
Excimerlasern

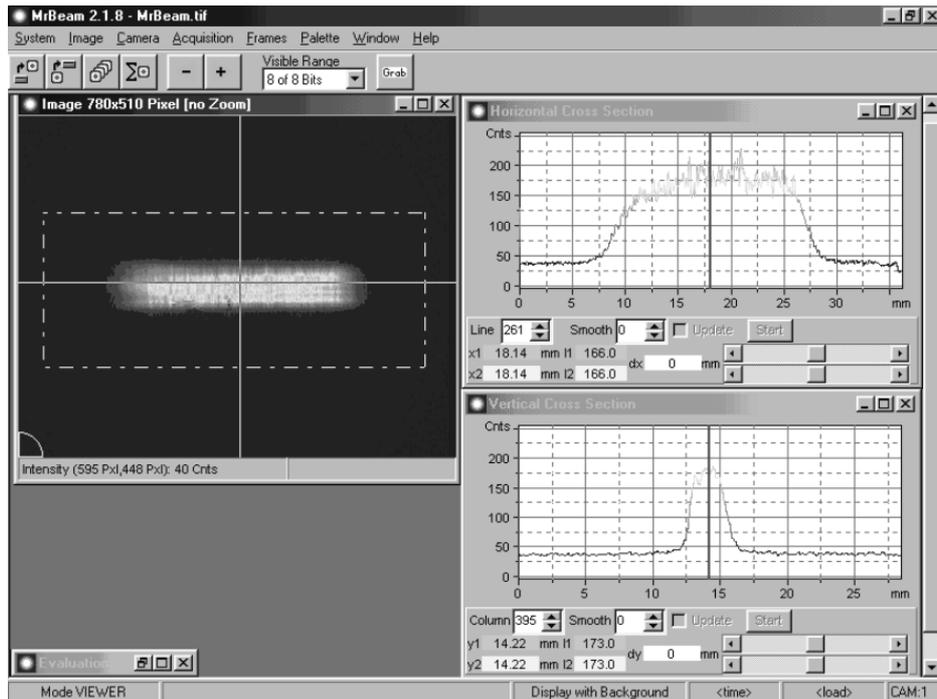


Abb. 37: Windowsoberfläche zur Auswertung der Meßdaten der Nahfeldkamera

Im Rahmen des Projektes wurden zwei Kameraprototypen aufgebaut. Auf der Basis gesammelter Erfahrungen wurde eine mechanisch überarbeitete Kamera konstruiert und aufgebaut. Abb. 38 zeigt die technische Realisierung der Shutterport – Nahfeldkamera. Die Kamera konnte während der Projektlaufzeit bereits mehrfach erfolgreich eingesetzt werden.

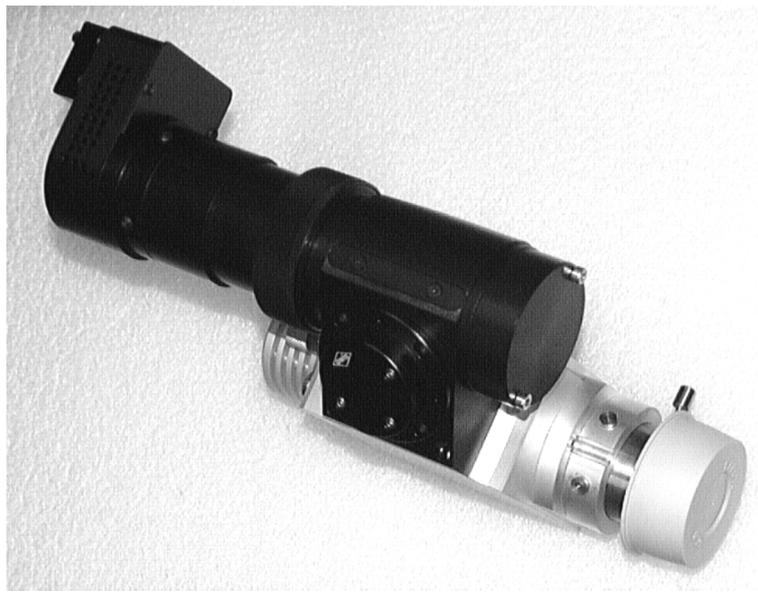


Abb. 38: Shutterport - Nahfeldkamera für den industriellen Einsatz

5.3 Verbesserung der Lasereigenschaften im industriellen Einsatz

5.3.1 Optimierung der Gaslebensdauer

Im Rahmen von EA5 wurden verschiedene Langzeittests an Industrie ArF Lasern durchgeführt. Dabei wurde zum einen Tests über die Lasereigenschaften innerhalb einer Gaslebensdauer sowie Langzeittests über einige Milliarden Laserpulse durchgeführt. Im Rahmen dieser Arbeiten wurden Modifikationen, die das bisher erreichte Langzeitverhalten noch weiter verbessern sollten.

Durch ständige Optimierung der Gaserneuerungsrouitinen konnte selbst im Fall von ArF lasern, die sich durch äußerste Empfindlichkeit gegenüber Gasveränderungen von KrF und XeCl unterscheiden, eine große Gaslebensdauer von typischerweise > 50 Millionen Laserpulsen erreicht werden. Dabei erhöht sich durch die optimierte Gaserneuerung die Hochspannung nicht wesentlich (Abb. 39). Der mögliche Hochspannungsbereich für diesen Lasertyp liegt zwischen 1.8 und 2.3 kV. Durch die entwickelten Energieregelalgorithmen kann auch über derartig lange Testläufe die Energie außerordentlich stabil gehalten werden (Abb. 40)

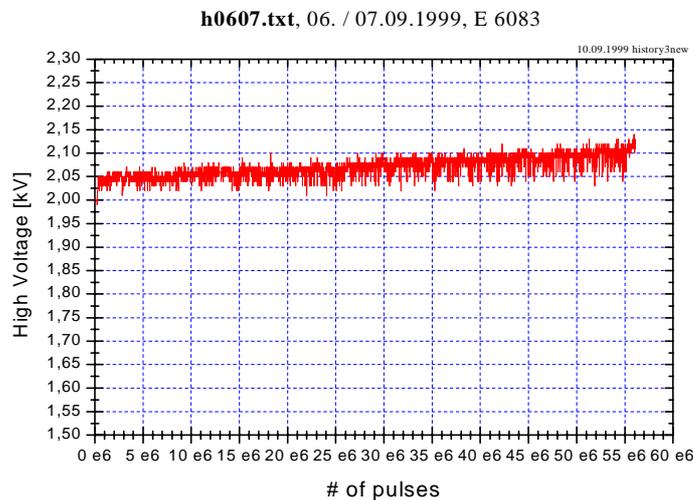


Abb. 39: Typischer Hochspannungsverlauf eines hinsichtlich Gaserneuerung optimierten ArF A2010 Industrielasers bei einem Testlauf über 55 Mio. Laserpulse im Burstmode

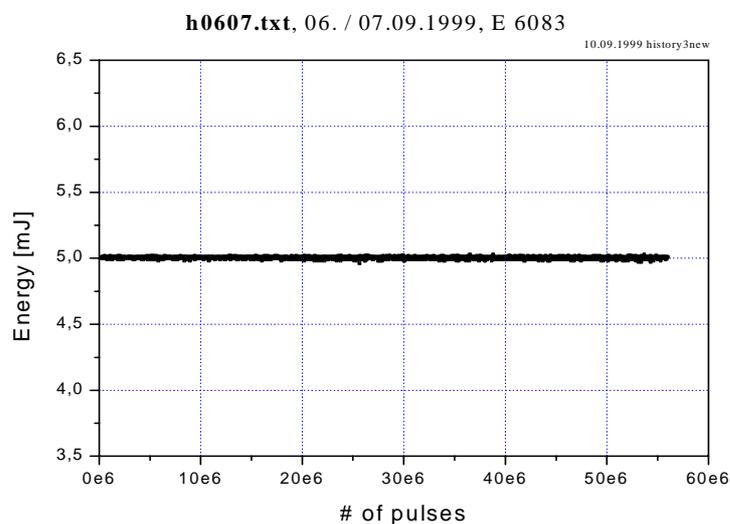


Abb. 40: Pulsenergie eines hinsichtlich Gaserneuerung optimierten ArF A2010 Industrielasers bei einem Testlauf über 55 Mio. Laserpulse im Burstmode

Da die Minimierung von Laserdowntime eines der wichtigsten Entwicklungsziele im Industrielaserbereich ist und mit jeder neuen Gasfüllung durch den Abpump- und Füllvorgang eine Downtime von ca. 15 min entsteht, ist die weitere Verlängerung der Gaslebensdauer von außerordentlicher Bedeutung. Im Rahmen der Langzeittests wurden deshalb weitere Dauertests durchgeführt, indem 2 größere Gaserneuerungen während des Tests durchgeführt wurden, von denen jedoch jede weniger als 1 min dauerte. Die Ergebnisse waren sehr vielversprechend und sind in den Abb. 41 und Abb. 42 dargestellt.

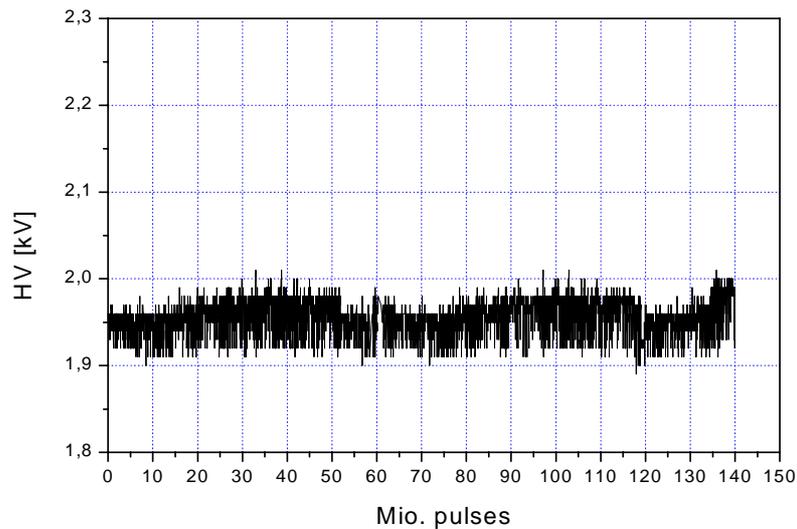


Abb. 41: Hochspannungsverlauf eines hinsichtlich Gaserneuerung optimierten ArF A2010 Industrielasers mit zwei zusätzlichen Gasaktionen über 140 Mio. Laserpulse im Burstmode

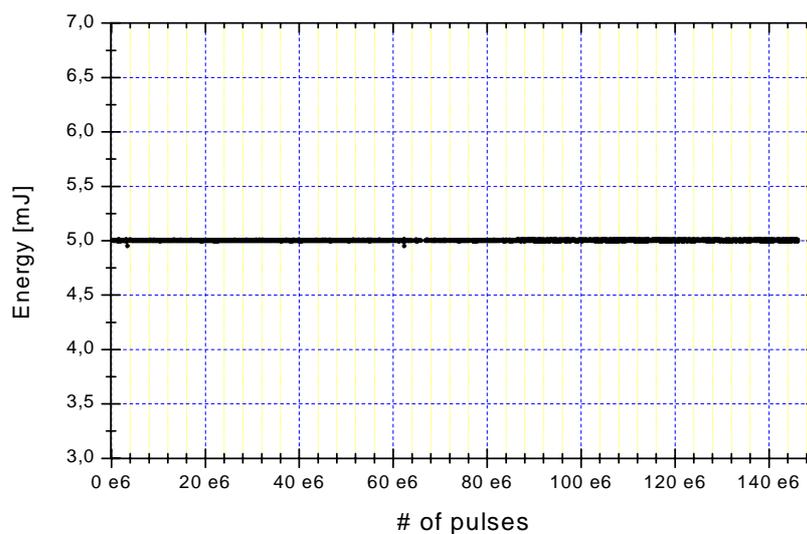


Abb. 42: Pulsenergie eines mit Zusatzgasaktionen optimierten ArF A2010 Industrielasers bei einem Testlauf über 140 Mio. Laserpulse im Burstmode

Eine wie in den Abb. 41 und 42 aufgezeigte Verlängerung der Gaslebensdauer würde eine erhebliche Reduzierung der Laserdowntime zur Folge haben. Aus diesem Grund werden die Arbeiten an diesen Gasaktionen auch nach Beendigung des OPUS II Projektes fortgesetzt.

5.3.2 Verbesserung der Wellenlängenstabilität von spektral schmalbandigen Industrie ArF Lasern

Insbesondere bei Excimerlaseranwendungen im Mikrostrukturierungsbereich ist die Konstanz der Wellenlänge unabdingbar für die Abbildungsschärfe der Mikrostrukturierungssysteme. Für die Konstanthaltung der Wellenlänge sind hochpräzise Nachweissysteme, wie in EA3 beschrieben, erforderlich. In diesem Arbeitspaket wurden die unter EA3 qualifizierten Diodenzeilen unter industrienahen Bedingungen getestet. Für die Dauerläufe kam insbesondere die zuletzt getestete Diodenzeile mit 2048 Pixeln und damit hoher räumlicher Auflösung zur Anwendung. Ein mit dieser Zeile Bestücktes Monitorsystem und 4 pm Fabry - Perot Etalon wurde in einem ArF Laser vom Typ A2010 getestet. Mit diesem Detektionssystem und einer optimierten Regelung gelang es auch über lange Zeit die Laserwellenlänge in einem Band von < 0.04 pm konstant zu halten (Abb. 43).

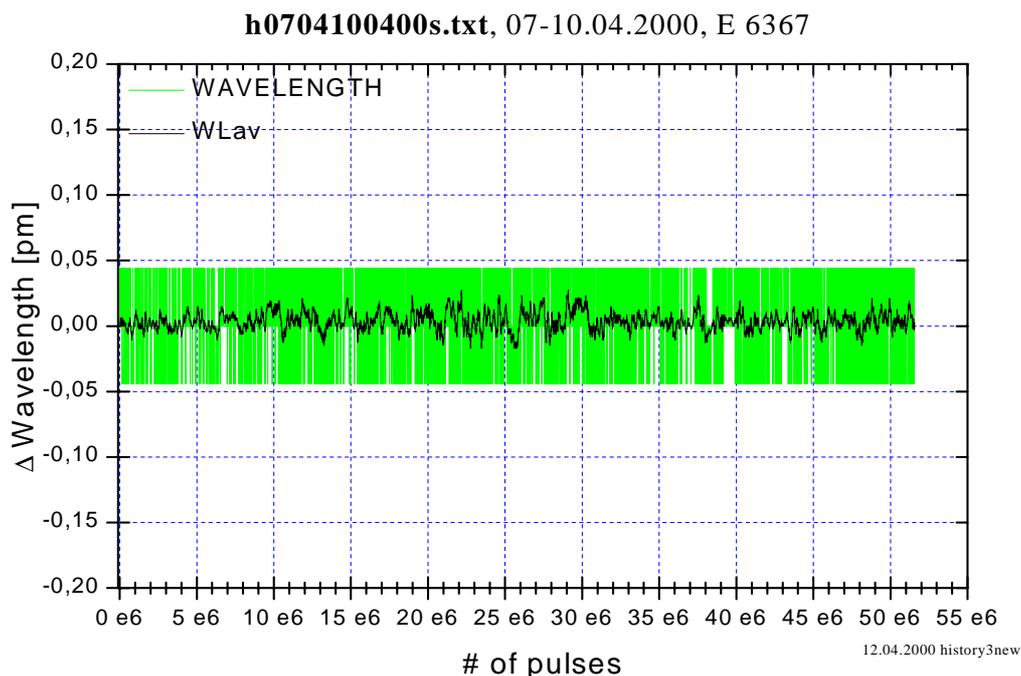


Abb. 43: Wellenlängenstabilität eines spektral schmalbandigen 2 kHz A2010 ArF Industrie Lasers bei einem Testlauf über mehr als 50 Millionen Laserpulse

Diese im Rahmen von OPUS II für 193 nm Laserstrahlung (ArF) entwickelte Technologie konnte bereits in mehrere Serienprodukte integriert werden.

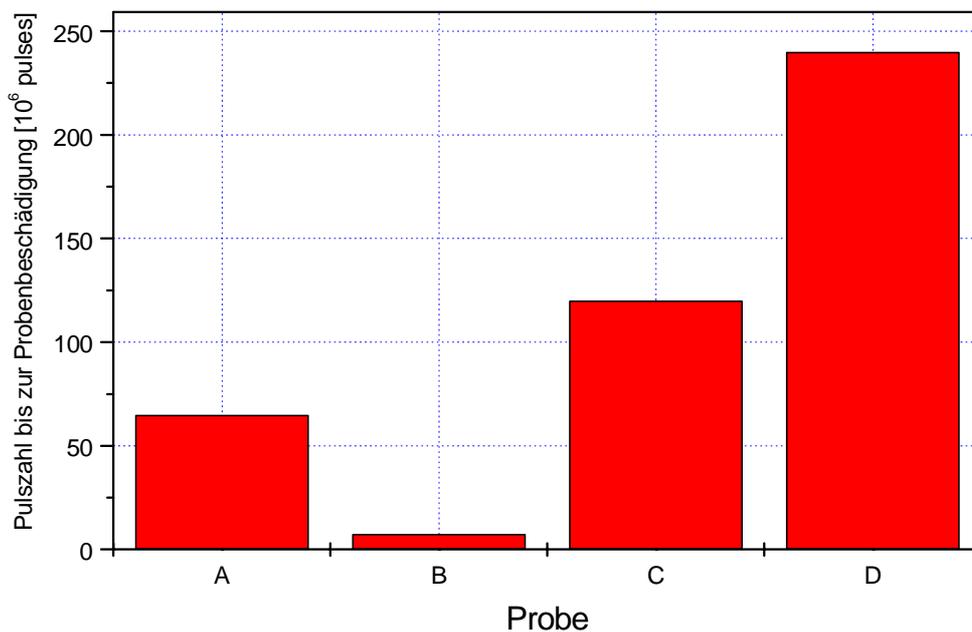
5.4 Dauertest von Einzelkomponenten und dem Lasergesamtsystem

Für den Industrieinsatz der Excimerlaser ist die Haltbarkeit von Komponenten von oberster Priorität. Aus diesem Grund wurden im OPUS II Projekt umfangreiche Einzelkomponenten – und Modultests sowie Dauertests mit dem Gesamtlasersystem durchgeführt. Dabei wurden insbesondere optische Komponenten, die hauptsächlich von den Projektpartnern bereitgestellt wurden dauergetestet und für den industriellen Einsatz qualifiziert.

5.4.1 Test von optischen Einzelkomponenten

5.4.1.1 Bestrahlung von Auskoppelspiegeln der Fa. Jenoptik L.O.S.

Es wurden verschiedene Beschichtungen von 193 nm Auskoppelspiegeln mit einer Reflektivität von 22.5% bestrahlt und die Reflektivität und Transmission der Spiegel nach der Bestrahlung getestet (Abb. 43). Die Bestrahlung erfolgte mit einer Pulsenergieichte von 25 mJ / cm² mit einer Repetitionsrate von 1 kHz. Mit Ausnahme von Beschichtungstyp B konnte eine kontinuierliche Verbesserung der Schichtsysteme nachgewiesen werden. Während die Proben A, B, C nach den in Abb. 44 aufgezeigten Pulszahlen zerstört waren die Proben vom



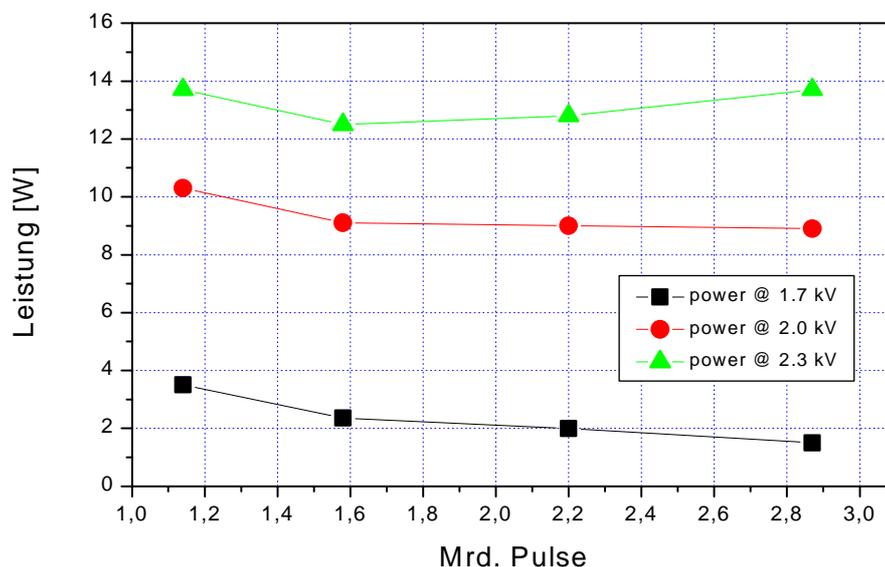
Typ D auch nach 250 Mio. Laserpulsen noch völlig intakt.

Abb. 44: Bestrahlungsergebnisse von 4 verschiedenen 193 nm Schichtsystemen (R=22.5%) der Fa. Jenoptik L.O.S.

Die Spiegel vom Typ D wurden für den industriellen Einsatz qualifiziert und werden in mehreren Serienprodukten von Industrieexcimerlasern mit Erfolg eingesetzt.

5.4.1.2 Bestrahlung von Auskoppelspiegeln und Prismen der Laseroptik Garbsen

des weiteren wurden Auskoppelspiegel für 193 nm mit einer Reflektivität von 25 % und einer rückseitigen AR Beschichtung sowie AR Beschichtungen von Prismen für Einfallswinkel von 2° und 68° unter realistischen Bedingungen getestet. Als Testlaser diente ein A2010 ArF 2 kHz Laser mit einer nominalen Pulsenergie von 5 mJ und einem Strahlprofil am Auskoppelspiegel von 14 mm x 2.5 mm. Als Kriterium für die Funktionsfähigkeit der Schichten diente die Laserleistung bei unterschiedlichen Hochspannungen in Abhängigkeit von der Pulszahl, d.h. die Schichten wurden direkt im Laserresonator und nicht in einem externen Bestrahlungsexperiment getestet. Die Belastung für den Auskoppelspiegel war bei den Tests $1 \text{ MW} / \text{cm}^2$ und die Belastung der Prismen lag bei ca. $0.25 \text{ MW} / \text{cm}^2$. Der



Dauertest wurde über 2.8 Milliarden Laserpulse durchgeführt (Abb. 45).

Abb. 45: Dauertest von Prismen AR Beschichtungen und von Auskoppelspiegeln

Auch nach mehr als 2.8 Milliarden Laserpulsen war keine Degradation der getesteten Optiken erkennbar. Das trifft auf alle drei Messungen bei unterschiedlichen Hochspannungen zu. Die beobachteten Leistungsveränderungen hängen nicht mit den getesteten Optiken zusammen, sondern sind bedingt durch die Veränderung anderer Komponenten wie z.B. die Laserröhre.

Die optischen Schichten konnten mit diesen Experimenten für den industriellen Einsatz qualifiziert werden und werden in mehreren Serienprodukten verwendet.

5.4.1.3 Lebensdauertest von MgF₂ beschichteten Gitter im ArF Laser

Die Notwendigkeit dieser Untersuchungen ergab sich, da die bislang verwendeten Gitter ohne MgF₂ Schutzschicht häufig bereits nach 200 Millionen Laserpulsen so stark degradierten, daß sie ersetzt werden mußten. Derartige Gitter waren für den industriellen Einsatz völlig untauglich und mußten durch Gitter, die mit einer neuen Technologie gefertigt werden, ersetzt werden. Diese neuen Gitter wurden im Rahmen des OPUS II Projektes intensiven Tests unterzogen.

Die Lebensdauertests solcher Gitter sind problematisch, da allein Reflektivitätsmessungen der entsprechenden Beugungsordnung kein hinreichendes Kriterium für ihre Funktionsfähigkeit darstellen. In der Vergangenheit sind häufig Gitter ausgefallen, obwohl keinerlei Reflektivitätsveränderungen festgestellt werden konnten. Die wahrscheinliche Fehlerursache waren Mikrorisse und Oberflächenveränderungen die zu Wellenfrontverzerrungen führen. Derartige Effekte lassen sich nicht bei einfachen Reflektivitätsmessungen nachweisen. Die einzige Möglichkeit ist folglich der Test unter den realen Einsatzbedingungen im Schmalband ArF Laser. Die Testergebnisse werden dabei überdeckt durch Veränderungen anderer Komponenten wie z.B. der Laserröhrenfenster oder der Röhre selbst sowie vom Austausch anderer Komponenten. Abb. 46 zeigt die Entwicklung der Hochspannung zur Emission von 5 mJ Laserpulsen über einen Bereich von ca. 1.8 Milliarden Laserpulsen.

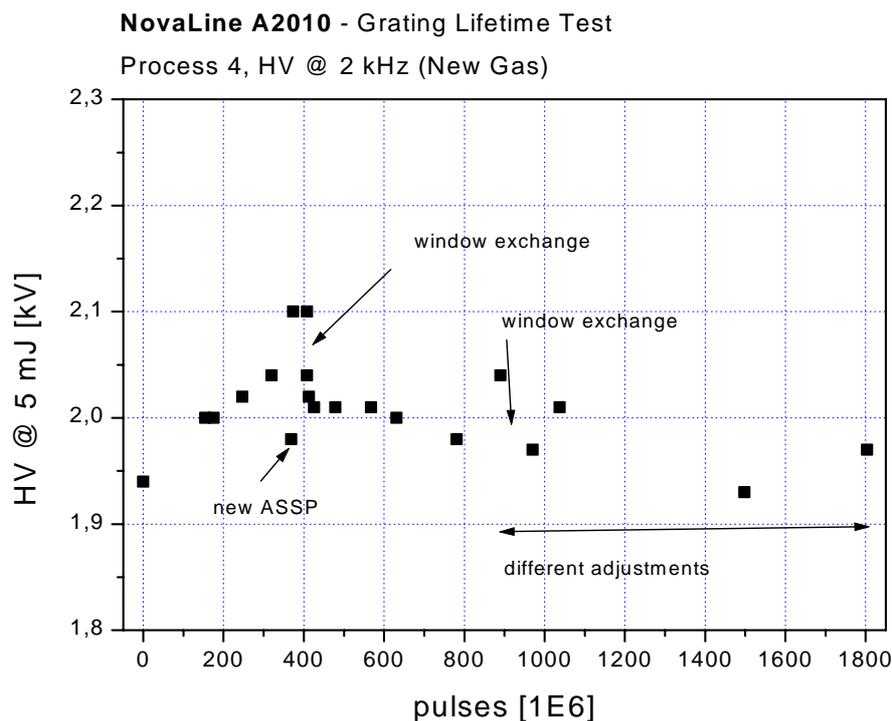


Abb. 46: Entwicklung der Hochspannung zur Emission von 5 mJ Laserpulsen über einen Bereich von ca. 1.8 Milliarden Laserpulsen

Da sich die 5mJ Hochspannung über den gesamten Testbereich kaum veränderte, kann davon ausgegangen werden, daß die Funktionsfähigkeit des Gitters auch nach 1.8 Milliarden Laserpulsen noch voll gegeben ist. Durch den Einsatz dieser speziell beschichteten Gitter konnten frühere Lebensdauerprobleme derartiger Gitter während der Projektlaufzeit vollständig gelöst werden. Dieser Typ von Gittern wird jetzt in schmalbandigen ArF Lasern standardmäßig eingesetzt.

5.4.1.4 Lebensdauertest von Polarisatoren der Fa. Laseroptik Garbsen

Es wurden Lebensdauertests an spektral breitbandigen Dünnschichtpolarisatoren der Fa. Laseroptik Garbsen durchgeführt. Die Polarisatoren wurden mit 36 Mio. Laserpulsen bei einem Überlastfaktor von 1000 gegenüber den realen Einsatzbedingungen getestet. Im Laufe der Bestrahlung verbesserten sich die Eigenschaften der Polarisatoren sogar etwas wahrscheinlich durch laserinduzierte Reinigungseffekte der Oberflächen. Die Polarisatoren zeigten keinerlei Beschädigung nach den Tests. Die auf die realen Einsatzverhältnisse umgerechnete Bestrahlungszeit betrug 2.3 Jahre. Die Polarisatoren wurden somit für den Einsatz in Seriengeräten qualifiziert und werden zur Zeit auch schon für Seriengeräte eingesetzt.

	Vor Bestrahlung	Nach Bestrahlung
Eintrittsleistung:	10.3 W	10.1 W
Transmittierte Leistung:	9.5 W	9.79 W
Transmission:	92.2%	96.9 %
Unterdrückungsfaktor der s- Komponente:	4.2	4.2

5.4.2 Erreichte Lebensdauer von Modulen und Komponenten unter realen Einsatzbedingungen in spektral schmalbandigen ArF Industrielasern

Zusammenfassend konnten folgende erreichten Lebensdauerdaten von Komponenten während der Projektlaufzeit ermittelt werden. Die Datenerfassung von Lebensdauern von Komponenten und Modulen wird auch nach Projektende fortgesetzt.

Komponente	während der Projektlaufzeit erreichte Lebensdauer
Monitoretalon	> 2.0 Mrd. Pulse
PR Spiegel 25% LO Garbsen	> 3.0 Mrd. Pulse
Gitter	> 2.5 Mrd. Pulse
Prismen ohne AR Beschichtung	> 2.0 Mrd. Pulse
AR beschichtete Prismen (LO Garbsen)	> 2.5Mrd. Pulse
Module	
Frontoptikmodul	> 3 Mrd. Pulse
Rückoptikmodul	> 2.5 Mrd. Pulse
Monitormodul	> 2.0 Mrd. Pulse

5.4.3 Dauertest von ArF Industrielasern als Gesamtsystem

Während des OPUS II Projektes wurden unter EA5 Dauertests des Gesamtlasers unter Überwachung der Einhaltung sämtlicher Spezifikationen durchgeführt. Zu diesem Zweck wurde ein umfassender Testaufbau vor einen Laser montiert und die Laserdaten über den gesamten Dauerlauf täglich einmal ausgewertet. Das Prinzipschema des Testaufbaus ist in Abb. 47 dargestellt.

Die Laserstrahlung wurde sowohl mit einem Etalonspektrometer als auch einem Gitterspektrometer hinsichtlich seiner spektralen Eigenschaften überwacht. Die Nahfeld des Laserstrahls wurde über Strahlengang 1 auf die Kamera abgebildet, das Fernfeld über Strahlengang 2. Somit konnten über den gesamten Dauerlauf sowohl Divergenzwerte als auch Werte über die Strahldimension registriert werden. Die energetischen Eigenschaften sowie die Stabilität der Pulsenergie wurden mit dem laserinternen Energiemonitor sowie mit einem nicht in Abb. 47 dargestellten externen Powermeter überwacht.

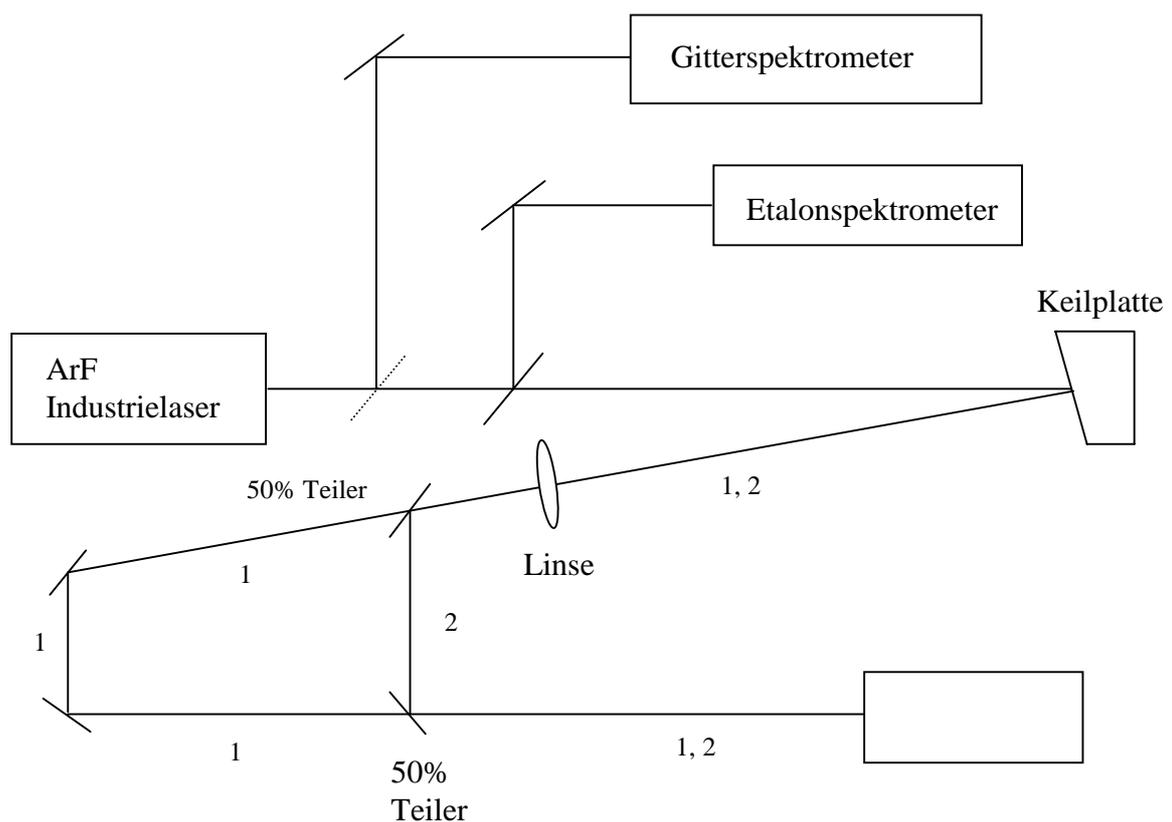


Abb. 47: Schematische Darstellung des Dauertestaufbaus für einen schmalbandigen ArF Industrielaser

Neben der Überwachung aller Einzelspezifikationen ist die Dokumentation der 5 mJ Hochspannung ein wesentliches Kriterium für die Funktionsfähigkeit des Lasers. Die Entwicklung der 5 mJ Hochspannung über die Pulszahl ist in Abb. 48 dargestellt.

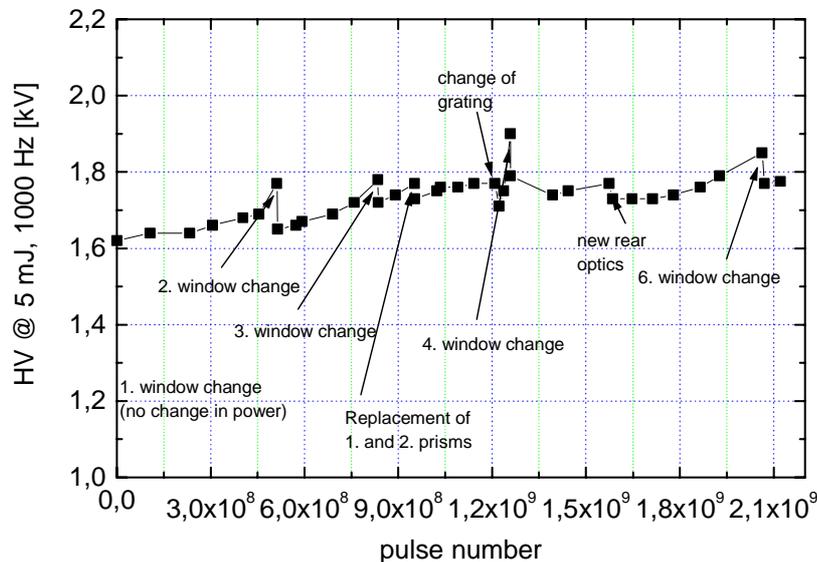


Abb. 48: Entwicklung der 5 mJ Hochspannung des Testlasers über die Pulszahl

Während des Dauertests waren teilweise Komponenten mit begrenzter Lebensdauer unter Verwendung, da haltbarere Komponenten wie z.B. die unter 5.4.1.3 beschriebenen Gitter erst gegen Ende der Projektlaufzeit qualifiziert werden konnten bzw. überhaupt erst zur Verfügung standen.

6. Optikkomponententests und Industrietauglichkeitstests

6.1 Arbeitspaket 1 Optikkomponententests

Zielstellung

In diesem Arbeitspaket sollen in unmittelbarem Anschluß an die zuvor im Verbundprojekt erfolgten Untersuchungen optische Komponenten im Einsatz in 193 nm Lasern bei Folgefrequenzen bis zu 2 kHz hinsichtlich ihrer Stabilität und Lebensdauern getestet werden. Ziel war es, für Schlüsselkomponenten Lebensdauern von 5 Milliarden Laserpulsen nachzuweisen. Ein Großteil der zu testenden Komponenten sollte von den Projektpartnern zur Verfügung gestellt werden.

6.1.1 Lebensdauertest der Optikkomponenten

Zur Realisierung des Komponententests wurde eine komplett gedichtete und stickstoffgespülte Testkammer aufgebaut. Der schematische Aufbau ist in Abb. 49 dargestellt. In diese Kammer wurden alle zu testenden Komponenten (siehe Tabelle 1) zur Dauerbestrahlung integriert. Die meisten Proben wurden von den Verbundpartnern bereitgestellt und entsprachen dem zu Ende des OPUS II erreichten Stand der Beschichtungstechnologie. Die in Tab. 1 angegebenen Transmissionswerte sind sowohl die Start als auch die Endwerte nach der Bestrahlung, d.h. während des Dauertests wurden keinerlei Veränderungen registriert.

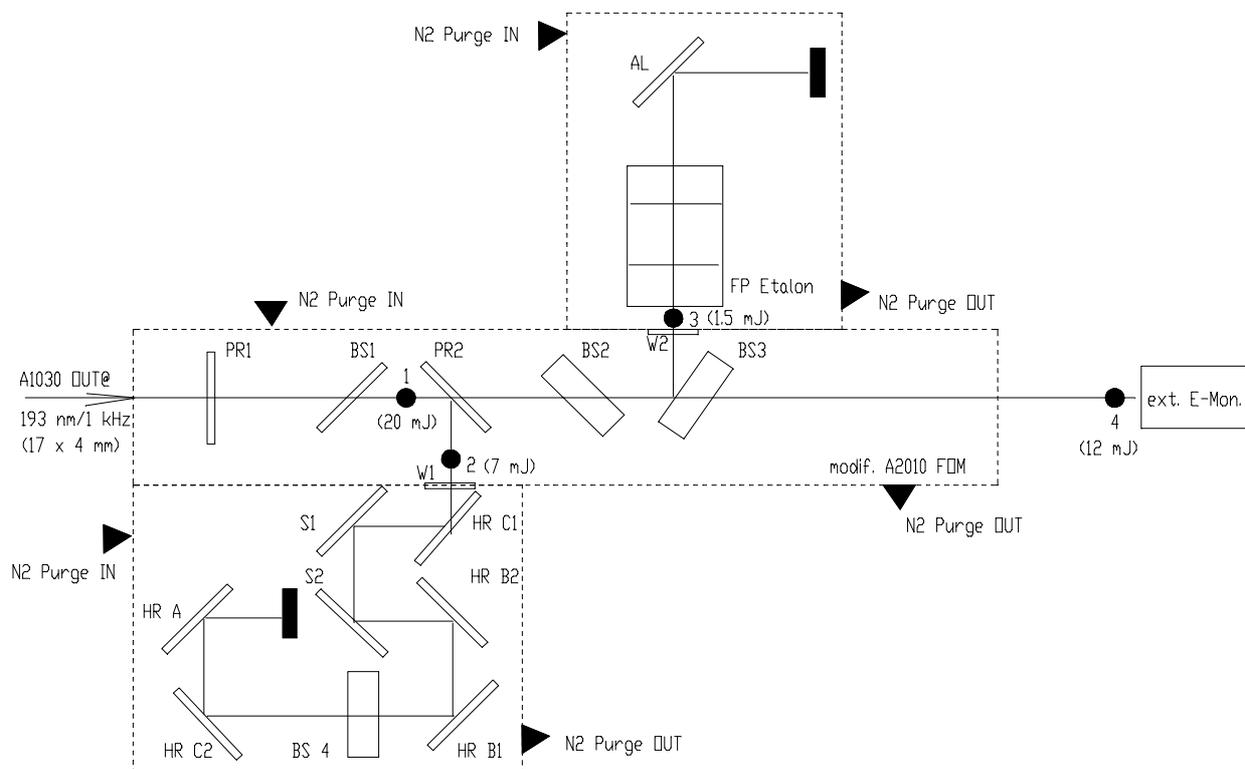


Abb. 49: Experimentelle Anordnung für den Optikkomponententest

Einige Proben wurden einen beschleunigten Test bei hoher Überlast unterzogen wie z.B. die Proben FP und AI. Diese Überlast läßt eine Extrapolation auf das Verhalten der Proben bei Normallast zu. Die Abschätzung für die Proben AI und FP ergibt eine erwartete Lebensdauer von mehr als 10 Mrd. Laserimpulsen.

Die Proben wurden mit einer Pulszahl entsprechend Tabelle 1 bestrahlt. Alle bestrahlten Proben überstanden die Bestrahlung ohne Beschädigung und ohne Veränderung ihrer Spezifikationen. Einige Proben wurden aufgrund späterer Anlieferung mit weniger als 1 Mrd. Laserpulsen bestrahlt. Aber auch alle diese Proben wiesen nach der erfolgten Bestrahlung keinerlei Beschädigung oder Änderung ihrer Nominalwerte auf. Da die Proben W1, HR C1, S1, S2, HR B2, HR B1, BS4, HR C2, HR A nahezu unter Nominaleinsatzbedingungen bestrahlt wurden, ist für diese Proben eine direkte Extrapolation auf höhere Pulszahlen zwar nicht direkt möglich, jedoch aufgrund der Tatsache, daß während des gesamten Tests keinerlei meßbare oder sichtbare Veränderungen auftraten, kann davon ausgegangen werden, daß alle bestrahlten Proben die Kapazität haben, den angestrebten 5 Mrd. Laserpulsen standzuhalten.

Aus den durchgeführten Tests und aus den inzwischen gemachten Felderfahrungen an Seriengeräten kann geschlußfolgert werden, das zu Ende des OPUS II Projektes Schichtsysteme zur Verfügung stehen, die den gegenwärtigen industriellen Anforderungen genügen.

Bez.	Typ	Hersteller	Charge Nr:	Pulszahl*)	T[%]	Bem.
PR1	R=25%/AR/0°/CaF2	Layertec	1008/1009	1000 Mio.	75	OK
BS1	#953014/CaF2 3 mm	Berliner Glas		1000 Mio.	91	OK
PR2	R=25%/AR/0°/CaF2	Layertec	1008/1009	1000 Mio.	73	OK
BS2	#953012/CaF2 10 mm	Optovac		1000 Mio.	88	OK
BS3	#953011 CaF2 10mm	Optovac		1000 Mio.	89	OK
FP	Mon FP #95293801	Melles Griot	Ser.No. 00/20/082	1000 Mio.		OK
AI	AI Mir	Berliner Glas		1000 Mio.		OK
HR C1	HR/45°/SQ1 #333	Jenoptik	APS 1750+B2 3629	700 Mio.	2.5	OK
S1	HR/45°/Std.Shutter alt FS	Laser Optik		1000 Mio.	2.4	OK
S2	HR/42.1°/Shutter Neu FS	Laser Optik		900 Mio.	2.5	OK
HR B2	HR/45°/SQ1 #335	Jenoptik	B2 3636+B2 3641	700 Mio.	2.5	OK
HR B1	HR/45°/SQ1 #328	Jenoptik	B2 3636+B2 3640	700 Mio.	2	OK
BS4	AR/45°/CaF2 10 mm	Laser Optik		900 Mio.	88	OK
HR C2	HR/45°/CaF2	Jenoptik	APS1749+B2 3630	700 Mio.	2.5	OK
HR A	HR/45°/SQ1 #327	Jenoptik	B2 3638	700 Mio.	2.5	OK
W1	#952951 AR/AR/CaF2	Layertec		1000 Mio.	98	OK
W2	#952951 AR/AR/CaF2	Layertec		1000 Mio.	98.5	OK

Tabelle 1: Verzeichnis der bestrahlten Proben und Testergebnis

6.2 Arbeitspaket 2 Laser - Modul – Industrietauglichkeitstests

Zielstellung

In diesem Arbeitspaket sollten alle Lasermodule der 193 nm Excimerlaser inklusive der Optikmodule, Stabilisierungsmodule (Energistabilisierung, Bandbreite- und Wellenlängenstabilisierung) sowie der Laserröhre bei entsprechend hoher Repetitionsrate im ArF Excimerlaser getestet werden. Für die Module sollte ein Lebensdauernachweis von 5 Milliarden Laserpulsen bei Repetitionsraten bis 2 kHz erbracht werden.

6.2.1 Test von Lasermodulen

Da im Laufe des letzten halben Jahres sich die industriellen Anforderungen an die 193 nm Excimerlaser stark verschärft haben, mußten einige Lasermodule technologisch deutlich verbessert werden. Das betrifft insbesondere das Monitorsystem zur Stabilisierung der Laserwellenlänge und zur Detektion der spektralen Bandbreite. Durch Veränderung der optischen Komponenten konnte eine Verbesserung der Wellenlängenauflösung von 0.045 pm auf 0.01 pm erreicht werden. Mit diesem Auflösungsvermögen können derzeit alle industriellen Anforderungen erfüllt werden. Das modifizierte Monitorsystem wurde erfolgreich im Laser getestet.

Neben dem Monitorsystem mußte auch das Rückoptikmodul modifiziert werden, da sich die industriellen Anforderungen an die spektrale Bandbreite der ArF Laser deutlich verschärft haben. War Ende 1999 noch eine Bandbreite < 0.6 pm gefordert, so wurde für Mitte 2000 eine Bandbreite < 0.35 pm gefordert.

Unter Verwendung eines neuen Gitters jedoch gleicher Technologie wie während der regulären OPUS II Laufzeit getestet, gelang es, diese anspruchsvollen Zielwerte zu erreichen. Es wurden Vorbereitungen für einen Dauertest dieser Module getroffen.

Während des Projekts wurden Optikmodullebensdauern von > 2.5 Mrd. Laserimpulsen direkt nachgewiesen. Aus den Optikkomponententests kann geschlußfolgert werden, daß die angestrebten 5 Mrd. Laserpulse für Optikmodule eine nicht unrealistische Größenordnung darstellen. Die Dauertests werden bei Lambda Physik auch nach Projektende fortgesetzt, weitergehende Ergebnisse stehen jedoch zum BerichtszeitpunktInfolge noch nicht zur Verfügung.

7. Zusammenfassung

Im Projektverlauf konnten alle wesentlichen Projektziele erreicht oder deutlich übertroffen werden. Dem Anspruch des Projektes, die Excimerlasertechnologie zur Industriereife zu bringen, konnte voll gerecht geworden werden. Bei Hochenergiebreitbandlasern ist Lambda Physik der unangefochtene Marktführer.

Die entwickelten bzw. weiterentwickelten Excimerlaser wurden wesentlich in ihrer Langzeitstabilität verbessert. Die Lebensdauer des Lasergases konnte stark gesteigert werden und die Energiestabilität der Laser wurde deutlich verbessert. Im Laufe des Projektes wurden sowohl onboard Meßsysteme (Entwicklung eines Wellenlängen- und Bandbreitenmeß – und Stabilisierungssystems) entwickelt, die den industriellen Einsatz überhaupt erst ermöglichen sowie Meßsysteme, wie das Strahlrichtungsautojustiersystem und die Shutterport – Nahfeldkamera realisiert, die Servicearbeiten im industriellen Umfeld vereinfachen und mit höherer Präzision und Geschwindigkeit durchführbar machen.

Bei spektral breitbandigen Hochenergielasern konnte während der Projektlaufzeit die Stabilität deutlich gesteigert werden. Es konnten Sigmawerte für die Energieschwankung von $< 1\%$ sowie Peak-to-Peak Schwankungen von $< 7\%$ erreicht werden. Diese Industrielaser sind ein Spitzenprodukt auf dem Weltmarkt.

Die spektral schmalbandigen Excimerlaser konnten während des Projektes so stark verbessert werden, daß der Anschluß an die internationale Konkurrenz geschafft werden konnte und mit wettbewerbsfähigen Industrielasern der Weltmarktanteil von Lambda Physik in diesem Sektor deutlich ausbaut werden konnte.

Es konnten im Rahmen des Projektes wesentliche Erkenntnisse über das Langzeitverhalten optischer Komponenten und Module gewonnen werden. Bei einem Teil der Komponenten konnte eine Lebensdauer größer als die angestrebten 5 Milliarden Laserpulse nachgewiesen werden, bei anderen Komponenten können aus den Tests Schlußfolgerungen auf das Verhalten nach 5 Milliarden Laserpulsen gezogen werden. Im Laufe des Projektes wurden somit optische Komponenten qualifiziert, die den äußerst anspruchsvollen industriellen Anforderungen gerecht werden

Während des Projektes wurden 2 Patente angemeldet. Das eine Patent beinhaltet das Strahlrichtungsautojustiersystem, das andere Patent betrifft zur höheren UV Beständigkeit mit Quantenkonvertern beschichtete Diodenzeilen.

8. Veröffentlichungen, Patente

Es wurden 2 Patente eingereicht:

1. Beschichtung der Diodenzeilen mit Quantenkonvertern
2. Autojustierung

Weiterhin ergaben sich im Berichtszeitraum 2 Veröffentlichungen:

1. J. Heber; R. Thielsch; H. Blaschke; N. Kaiser; K. Mann; E. Eva; U. Leinhos; A. Görtler, Stability of optical interference coatings exposed to low-fluence 193nm ArF radiation. Präsentiert beim SPIE's 23rd International Symposium on Microlithography, 22.-27. März 1998, Santa Clara, Ca., USA
2. J. Heber; R. Thielsch; H. Blaschke; N. Kaiser; U. Leinhos; A. Görtler, Changes in optical interference coatings exposed to 193nm excimer laser radiation. Präsentiert beim XXX Boulder Damage Symposium, 28. September - 1. Oktober 1998, Boulder, Co., USA.