

Schlussbericht zum Projekt

„Entwicklung von frei-triggerbaren ps-InnoSlab Laser zur Hochgeschwindigkeitsstrukturierung von Si-Solarzellen“

im Rahmen des Verbundprojektes „Produktionstechnologie für die Laserbearbeitung kristalliner Siliziumsolarzellen der nächsten Generation“

FKZ: 03EE1008B

Laufzeit des Projekts: 01.05.2019 – 31.08.2022

Zuwendungsempfänger:

EdgeWave GmbH
Carlo-Schmid-Str. 19
D-52146 Würselen
Tel.: +49 2405 4186 0
email: info@edge-wave.de

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klima unter dem Förderkennzeichen 03EE1008B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhalt

1	Aufgabenstellung und Ziele des Vorhabens	1
2	Ausgangssituation	2
3	Planung und Ablauf des Vorhabens	3
4	Stand der Wissenschaft und Technik	4
5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	4
6	Wissenschaftliche und technische Ergebnisse und Vergleich mit Zielen des Projektes	5
6.1	Erläuterung des Laserkonzepts	5
6.2	Durchgeführte Arbeiten	6
6.3	Wissenschaftliche und technische Ergebnisse	8
7	Verwertung der Projektergebnisse	17
8	Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	18
9	Veröffentlichungen der Ergebnisse	18
10	Zusammenfassung	19

1 Aufgabenstellung und Ziele des Vorhabens

Das vorliegende Projekt ist ein Teilprojekt des Gesamtverbundprojekts „Produktionstechnologie für die Laserbearbeitung kristalliner Siliziumsolarzellen der nächsten Generation“. Ziel dieses Teilvorhabens ist die Untersuchung und Entwicklung flexibler ps-Laser, deren Pulse oder Pulszüge extern gemäß Prozessvorgaben mit einem geringen Zeitjitter abgerufen werden können. Dies ermöglicht eine hohe laterale Auflösung der zu erzeugenden Strukturen beim Hochgeschwindigkeitsscannen. Um die Prozess- und Anlagenentwicklung beim Projektpartner ISE zur ermöglichen, wird basierend auf den Entwicklungsergebnissen ein Demonstrator aufgebaut und dem ISE zur Verfügung gestellt. Darüber hinaus wird EdgeWave die Entwicklungsarbeit unterstützen und notwendige Modifikationen und Anpassungen der Laserparameter durchführen.

1.1 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele, angestrebte Innovationen

Die folgenden technischen und wissenschaftlichen Detailziele sollen im vorliegenden Teilprojekt erreicht werden:

- 1) Untersuchung und Entwicklung einer Freitriggerungstechnik für einen hochrepetierenden ps-Laser, mit der die Pulse bzw. Pulszüge von dem Laser extern gemäß Vorgabe eines Strukturierungsprozesses mit einer Pulswiederholrate von über 10 MHz und einer zeitlichen Auflösung von <20 ns getriggert werden können.
- 2) Basierend auf der Freitriggerungstechnik wird ein ps-Laser entwickelt. Durch die Entwicklung sollen folgende Spezifikationen erzielt werden:
 - Wellenlänge: 1064 nm
 - Seederfrequenz: 50 MHz
 - Pulswiederholrate: von einzelner Puls bis >10 MHz, frei triggerbar
 - Zeitliche Auflösung: besser als 20 ns
 - Pulsenergie von einzelner Puls bis zu 10 MHz: >15 µJ
 - Mittlere Leistung bei 10 MHz: >150 W
 - Strahlqualität: $M^2 < 1,3$
 - Pulsenergiestabilität: < 2% rms
- 3) Darüber hinaus wird ein Frequenzverdreifungsmodul zur Erzeugung von 355 nm untersucht. Mit dem Modul sollen folgende Spezifikationen erreicht werden:
 - Wellenlänge: 355 nm
 - Pulswiederholrate: von einzelner Puls bis >10 MHz, frei triggerbar
 - Zeitliche Auflösung: besser als 20 ns
 - Pulsenergie von einzelner Puls bis zu 10 MHz: > 5 µJ

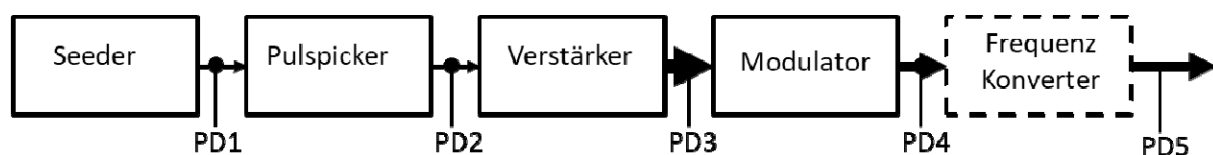
- Mittlere Leistung bei 10 MHz: > 50 W
 - Strahlqualität: $M^2 < 1,3$
 - Pulsenergiestabilität: < 3% rms
- 4) Ausgehend von den Entwicklungsergebnissen wird ein Demonstrator mit den oben angegebenen Spezifikationen aufgebaut, untersucht und optimiert. Der Demonstrator wird dem Projektpartner ISE zur Prozess- und Anlagenentwicklung zur Verfügung gestellt. EdgeWave wird die Entwicklungsarbeit am ISE unterstützen und notwendige Modifikationen und Anpassungen vornehmen.

2 Ausgangssituation

ps-Laser mit einer Pulsdauer um 10 ps und einer mittleren Leistung über 100 W werden international von mehreren Herstellern wie EdgeWave, Trumpf und Coherent angeboten. Die gemeinsame und grundlegende Architektur eines ps-Lasers besteht im Master-Oszillator-Leistungsverstärker (auch MOPA genannt).

Der typische Aufbau eines Hochleistungs-ps-Lasers ist in Abb. 1 dargestellt. Er besteht aus einem Seeder, einem Pulspicker, einem Verstärker, einem Modulator und eventuell einer Frequenzkonversionseinheit. Der modegelockte Seeder hat eine Pulswiederholrate von einigen 10MHz. Die Aufgabe des Pulspickers ist es, die Pulswiederholrate von einigen 10 MHz auf einige 100 kHz zu reduzieren. Die kontinuierliche Pulsfolge nach dem Pulspicker mit einer konstanten Wiederholrate von einigen 100 kHz läuft durch den nachgeschalteten Verstärker. Danach erhält man eine kontinuierliche Pulsfolge mit erhöhter Pulsenergie bei einer reduzierten Pulswiederholrate. Dabei ist es wichtig, dass die Pulsfolge kontinuierlich ist und eine konstante Wiederholrate hat, damit das Verstärkungsmedium zeitlich und räumlich konstant gesättigt wird und die Pulse weiterhin eine stabile Pulsenergie und einen konstanten Propagationsparameter haben. Für manche Anwendungen wird noch ein Modulator nachgeschaltet, um die Pulse bei Bedarf in der Wirkungszone freizuschalten bzw. aus der Wirkungszone fernzuhalten.

Die Laseranordnung verhält sich zeitlich gesehen wie ein Master, läuft mit einer Pulswiederholrate durch und die Pulse können nicht extern getriggert werden. Dies steht im Widerspruch zu vielen Anwendungen, wo die Pulse durch Prozessgegebenheiten/Prozessereignisse getriggert werden müssen. Dabei sollen die Laserparameter wie Pulsenergie, Pulsbreite und Strahlausbreitungsparameter konstant bleiben. Strahlausbreitungsparameter sind u. a. die Ausbreitungsrichtung, die Divergenz und die Strahltaillenposition.



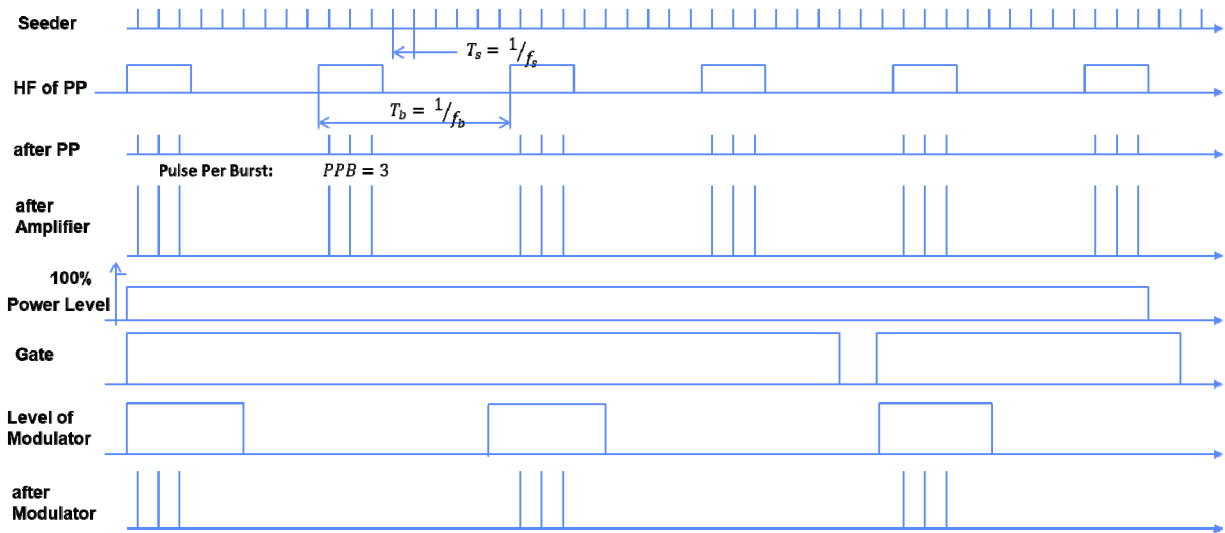


Abbildung 1: Schema eines konventionellen ps-Lasersystems

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Der nachfolgende Balkenplan gibt einen Überblick über die geplanten Arbeiten und zeigt deren zeitliche Abfolge und die Abhängigkeiten.

AP	Arbeitspunkt	2019-Q2	2019-Q3	2019-Q4	2020-Q1	2020-Q2	2020-Q3	2020-Q4	2021-Q1	2021-Q2	2021-Q3	2021-Q4	2022-Q1	2022-Q2
4.2.1	Konzeptuntersuchung zur Freitriggerung	█												
4.2.2	Erprobung Freitriggerung an einem ps-Laser		█											
4.2.3	Untersuchung der Frequenzkonversion		█											
4.2.4	Erstellung eines ps-Funktionsmusters			█										
4.2.5	Aufbau eines Frequenzverdreifachungsmoduls				█									
4.2.6	Bereitstellung und Betreuung des Funktionsmusters						█							
4.2.7	Auswertung der Ergebnisse	█												
4.3	Integration des Funktionsmusters mit einem Polygonsscanner						█							

4 Stand der Wissenschaft und Technik

Über das grundlegende Konzept des InnoSlab-Verstärkers verfügt das Fraunhofer Institut für Lasertechnik über die Patente mit den Nummern EP 1 181 754 B1 und US 6,654,163 B1.

Das grundlegende Konzept der Laseranordnung mit Frei-Triggerung wird durch das Patent DE10 2014 017 568 B4 von EdgeWave geschützt.

Basierend auf der neuartigen Verstärker-Anordnung mit Frei-Triggerung und in Verbindung mit dem InnoSlab-Verstärker hat die Fa. EdgeWave in zurückliegenden Jahren eine Reihe von ps InnoSlab-Lasersystemen entwickelt und in den Markt eingeführt. Die max. mittlere Leistung beträgt über 100 W in IR. Die max. Pulswiederholrate bei Frei-Triggerung beträgt 2MHz.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Arbeiten des vorliegenden Projekts erfolgten in Zusammenarbeit mit den anderen Partnern des Verbundprojektes „Produktionstechnologie für die Laserbearbeitung kristalliner Siliziumsolarzellen der nächsten Generation“. Dabei wurden zuerst zusammen mit den Verbundpartnern die Zielspezifikationen des Lasersystems definiert. Der im Rahmen dieses Teilprojektes erstellte Demonstrator wurde dem Projektpartner ISE für die Verfahren-Anlagenentwicklung zur Verfügung gestellt. Während der Entwicklung wurden die

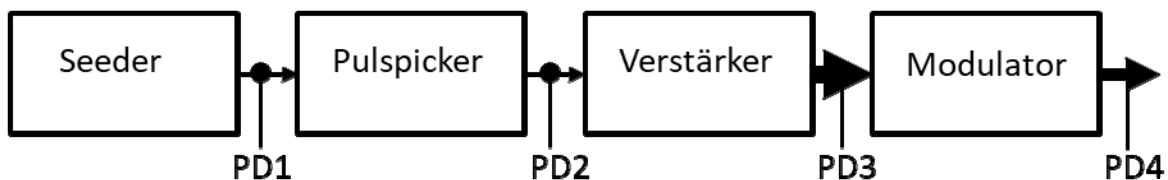
Demonstratoren von EdgeWave's Projektmitarbeitern an die Prozess- und Anlagenentwicklung angepasst, begleitet und betreut.

6 Wissenschaftliche und technische Ergebnisse und Vergleich mit Zielen des Projektes

6.1 Erläuterung des Laserkonzepts

Das in diesem Vorhaben verfolgten Konzept besteht darin, eine neue Laseranordnung zu untersuchen, mit der konstante Laserparameter auch bei einer beliebigen zeitlichen Abfolge von Pulsen oder Pulszügen erzielt werden können. Damit kann eine Laseranordnung mit einer Frei-Triggerung-Option realisiert werden.

Wie in Abbildung 2 besteht diese Laseranordnung aus einer Modulations-Anordnung, die aus einem Pulspicker, der hinter dem Seeder angeordnet wird und einem Modulator, der hinter einer Verstärker-Anordnung angeordnet wird und die Pulse gemäß einer Vorgabe sortiert. Der Pulspicker besteht aus einer Modulator-Anordnung mit entsprechenden Treibern, die mindestens 3 Modulations-Niveaus (V_0 , V_1 , V_2 in Abb. 2c) für Erzeugung von 3 Sorten Pulsen wie Nullpulse mit Amplitude Null, Konditionierungspulse (p_1 , p_2 ... in Abb. 2d) mit einer niedrigen Amplitude gemäß Vorgabe und Nutzpulse (P_1 , P_2 ... in Abb. 2d) mit möglichst hoher Amplitude aufweist.



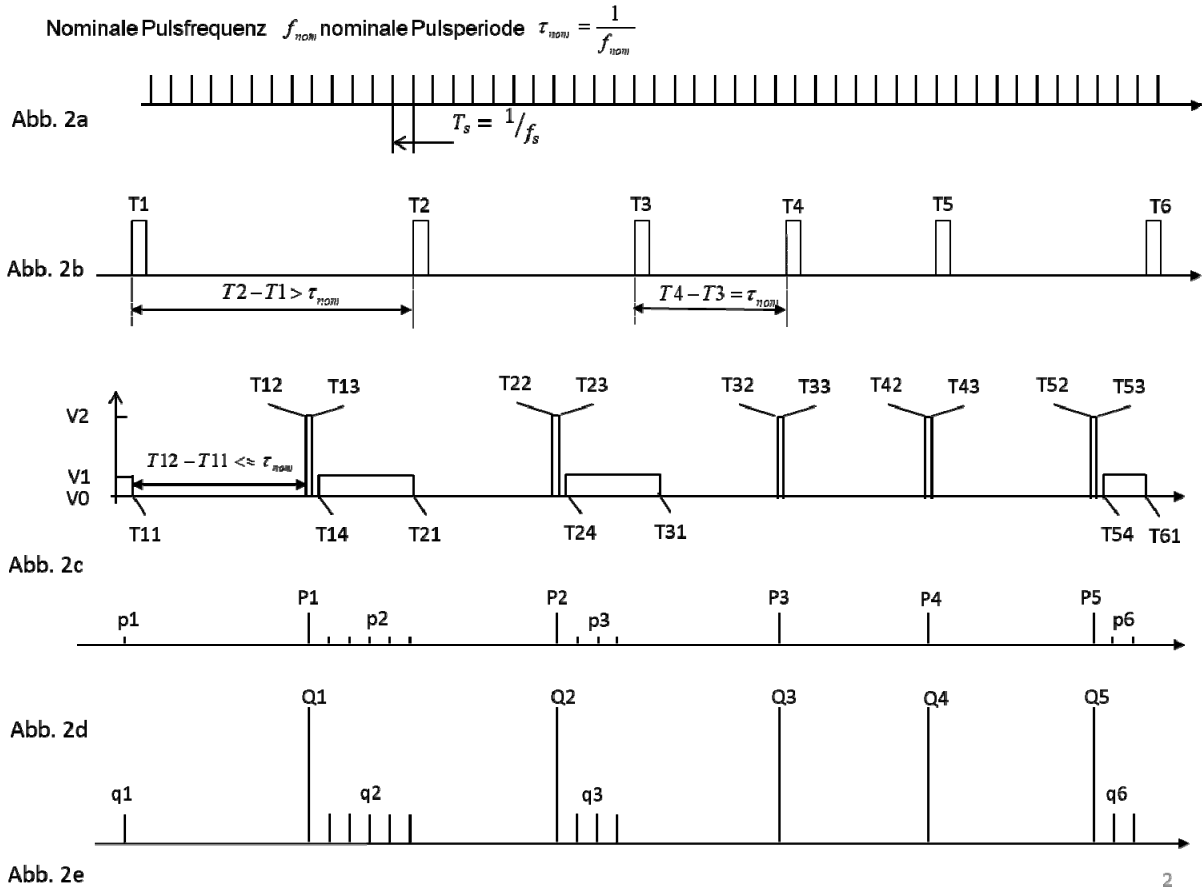


Abbildung 2: Schema einer neuartigen ps-Lasersystems mit Frei-Triggerung

6.2 Durchgeführte Arbeiten

Folgende Arbeiten sind im Rahmen dieses Teilvorhabens geplant.

AP 4.2.1 Untersuchung und Entwicklung von einer Freitriggerungstechnik für einen hochrepetierenden ps-Laser, mit der die Pulse bzw. Pulszüge von dem Laser extern gemäß Vorgabe eines Strukturierungsprozesses mit einer Pulswiederholrate von über 10 MHz und einer zeitlichen Auflösung von <20 ns getriggert werden können.

AP4.2.2 Basierend auf der Freitriggerungstechnik wird ein ps-Laser weiterentwickelt. Durch die Weiterentwicklung sollen folgende Spezifikationen erzielt werden:

- Wellenlänge: 1064 nm
- Seederfrequenz: 50 MHz
- Pulswiederholrate: von einzelner Puls bis >10 MHz, frei triggerbar

- Zeitliche Auflösung: besser als 20 ns
- Pulsenergie von einzelner Puls bis zu 10 MHz: > 15 μ J
- Mittlere Leistung bei 10 MHz: > 150 W
- Strahlqualität: $M^2 < 1,3$
- Pulsenergiestabilität: < 2% rms

AP4.2.3 Untersuchung Frequenzverdreifung zur Erzeugung von 355 nm. Die Zielspezifikationen sind:

- Wellenlänge: 355 nm
- Pulswiederholrate: von einzelner Puls bis >10 MHz, frei triggerbar
- Zeitliche Auflösung: besser als 20 ns
- Pulsenergie von einzelner Puls bis zu 10 MHz: > 5 μ J
- Mittlere Leistung bei 10 MHz: > 50 W
- Strahlqualität: $M^2 < 1,3$
- Pulsenergiestabilität: < 3% rms

AP4.2.4 Aufbau und Optimierung eines ps-Lasers als Demonstrator mit folgenden Spezifikationen:

- Wellenlänge: 1064 nm
- Seederfrequenz: 50 MHz
- Pulswiederholrate: von einzelner Puls bis >10 MHz, frei triggerbar
- Zeitliche Auflösung: besser als 20 ns
- Pulsenergie von einzelner Puls bis zu 10MHz: > 15 μ J
- Mittlere Leistung bei 10 MHz: > 150 W
- Strahlqualität: $M^2 < 1,3$
- Pulsenergiestabilität: < 2% rms

AP4.2.5 Aufbau und Optimierung eines Frequenzverdreifungsmodul zur Erzeugung von 355 nm. Mit dem obigen ps-Laser Demonstrator sind die Spezifikationen wie folgt:

- Wellenlänge: 355 nm
- Pulswiederholrate: von einzelner Puls bis >10 MHz, frei triggerbar
- Zeitliche Auflösung: besser als 20 ns
- Pulsenergie von einzelner Puls bis zu 10 MHz: > 5 μ J
- Mittlere Leistung bei 10 MHz: > 50 W
- Strahlqualität: $M^2 < 1,3$

- Pulsenergiestabilität: < 3% rms

AP4.2.6 Bereitstellung des Demonstrators inkl. Frequenzverdreifachungsmodul an den Projektpartner ISE zur Prozess- und Anlagenentwicklung

AP4.2.7 Auswertung der Ergebnisse von Prozess- und Anlagenentwicklung und Ableitung von erforderlicher Laserparameters für die Zielanwendungen

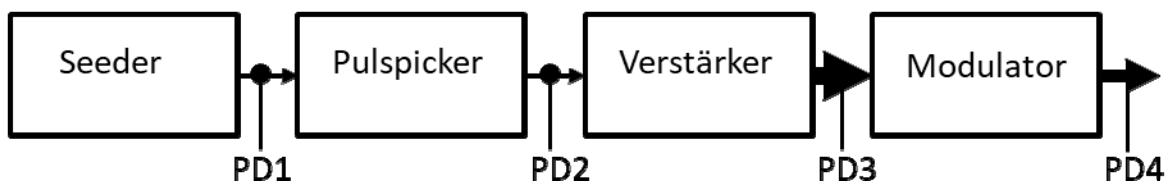
AP4.3.1 Integration des Demonstrators mit einem Polygonscanner in Zusammenarbeit mit Projektpartner MOEWE und ISE

6.3 Wissenschaftliche und technische Ergebnisse

Basierend auf dem endgepumpten und frei-triggerbaren Slablaser-Konzept wurden im Rahmen des Projektes folgende Ergebnisse erreicht:

Zum AP 4.2.1 Untersuchung und Entwicklung von einer Freitriggerungstechnik

Zuerst wurde Untersuchungen zu Freitriggerung von Laserpulsen untersucht. Es ist dabei wichtig, dass die Pulsenergie bei unabhängig von Triggerfrequenz konstant bleibt und die zeitliche Jitter klein gehalten wird. Darüber hinaus dürfen sich die Strahlparameter wie Ausbreitungsrichtung und Divergenz nicht ändern. Um dies zu erreichen, wurde eine Laseroszillator-Verstärker-Anordnung untersucht. Wie es in Abbildung 3 dargestellt ist, besteht diese Laseranordnung aus einer Modulations-Anordnung, die aus einem Pulspicker, der hinter dem Seeder angeordnet wird und einem Modulator, der hinter einer Verstärker-Anordnung angeordnet wird und die Pulse gemäß einer Vorgabe sortiert. Der Pulspicker besteht aus einer Modulator-Anordnung mit entsprechenden Treibern, die mindestens 3 Modulations-Niveaus (V0, V1, V2 in Abb. 1c) für Erzeugung von 3 Sorten Pulsen wie Nullpulse mit Amplitude Null, Konditionierungspulse (p1, p2... in Abb. 1d) mit einer niedrigen Amplitude gemäß Vorgabe und Nutzpulse (P1, P2... in Abb. 1d) mit möglichst hoher Amplitude aufweist.



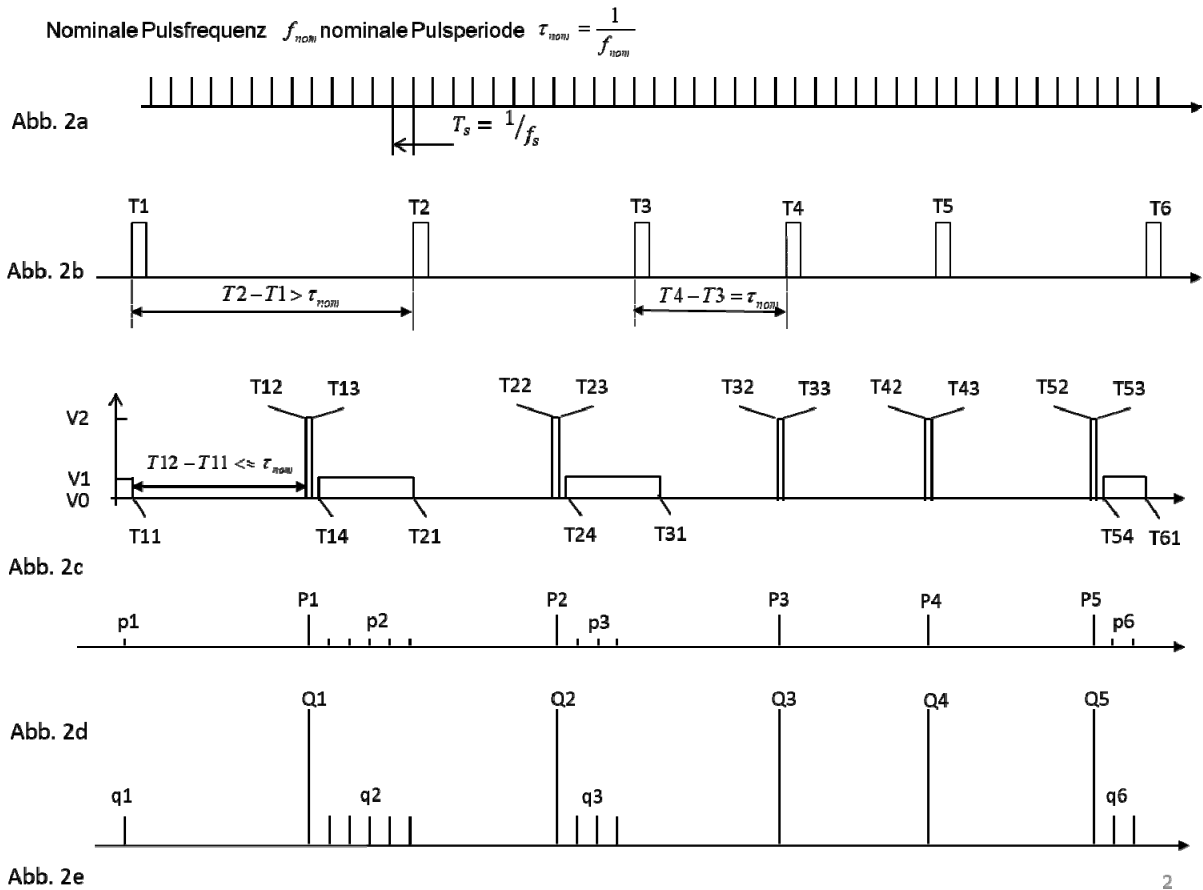


Abbildung 3: Schema einer neuartigen ps-Lasersystems mit Frei-Triggerung

Zum AP 4.2.2 Untersuchung der Freitriggerung mit einem Laborlaser und Weiterentwicklung

Basiert auf der oben beschriebenen Technik wurde ein Laborlaser erstellt. Er hat einen ps-Seeder mit einer Pulswiederholrate von 50MHz und mittleren Leistung von 2W. Abbildung 4 zeigt die erzielte Leistung in Abhängigkeit der Pulswiederholrate. Es ist ersichtlich, dass die Pulsenergie bis zu 1,8MHz eine Konstante ist, so dass die mittlere Leistung linear mit der Pulswiederholrate steigt. Bei 2MHz beträgt die Leistung 75W. Wie erwartet, lag das zeitliche Jitter bei $< 20\text{ns} = (1/50\text{MHz})$.

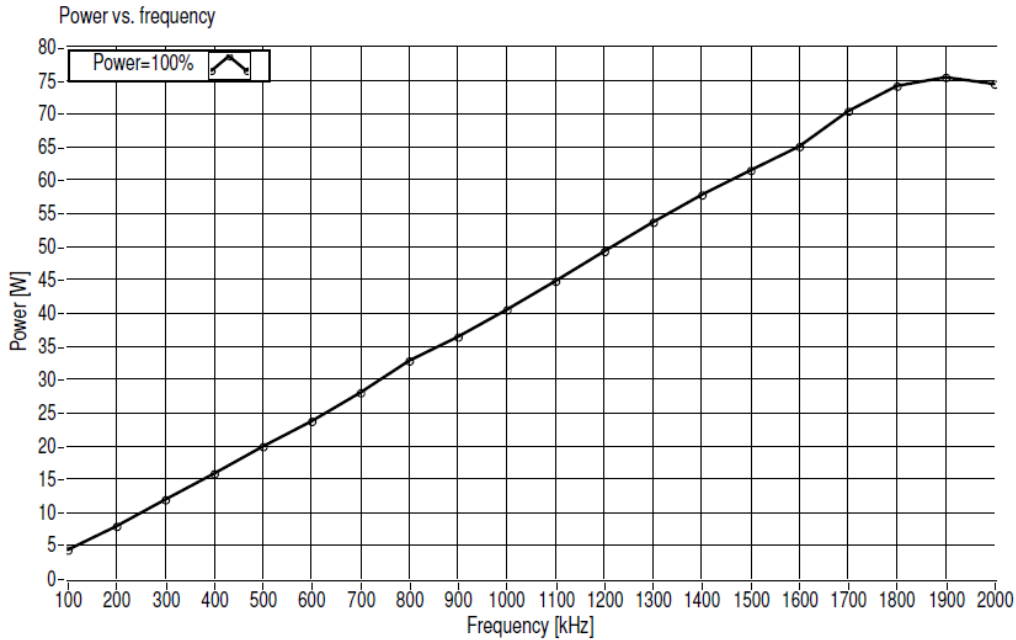


Abbildung 4: Leistung von dem Laseraufbauten in Abhängigkeit der Puls wiederholrate

In Abbildung 5 sind die Intensitätsverteilungen im Nah- und Fernfeld dargestellt. Die Strahlqualität ist in beiden Richtungen $M^2 < 1.2$.

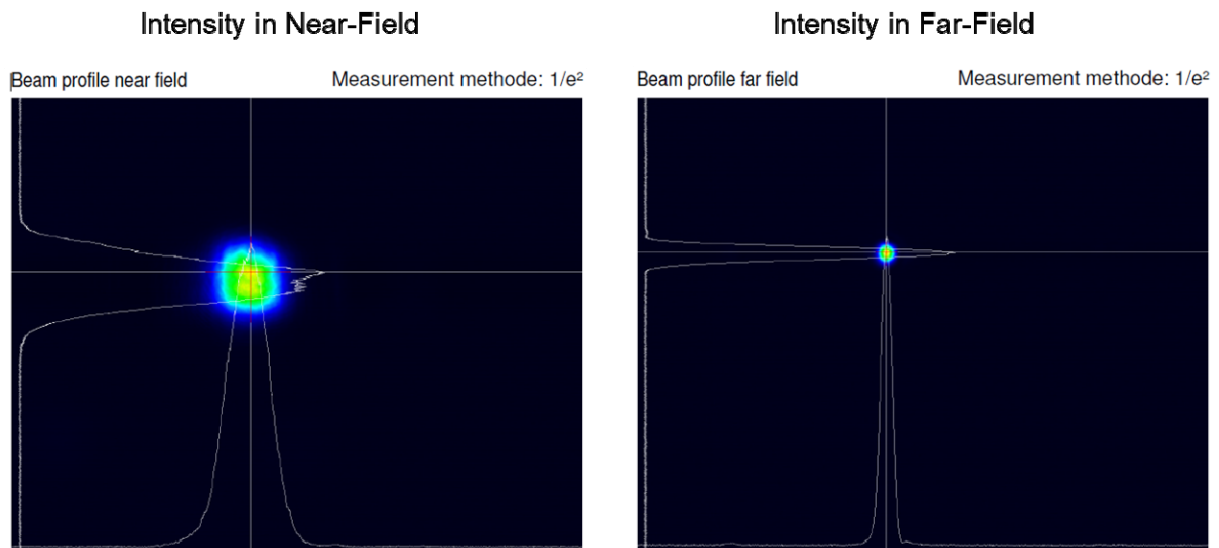


Abbildung 5: Intensitätsverteilungen im Nah- und Fern-Feld.

Um eine freie Triggerung bis zu 10MHz zu erreichen, wurde einen neuen Puls-Picker dimensioniert. Mit dem schnelleres Pulspicker möglich wird. Dazu wird die Optik für den Pulspicker angepasst.

Darüber hinaus wird ein neuer akkustooptischer Modulator und ausgelegt, der eine höhere Dynamik hat, um die freie Triggerung bei bis zu 10MHz zu ermöglichen. Dazu wird die Formungsoptik vor und nach dem Modulator angepasst.

Für den Pulspicker bei extrem hohen Pulswiederholraten wurde ein akkustooptischer Modulator mit einer höheren Hochfrequenz ausgewählt. Für den Modulator hinter dem Verstärker wurde ebenfalls ein akkustooptischer Modulator gewählt. Um eine mögliche hohe Modulationsgeschwindigkeit zu erreichen, hat der Treiber des Modulators eine Frequenz von 80MHz.

Nach Erhalt des Pulspickers und des Modulators wurden Sie mit einem Laboraufbau untersucht. Durch Optimierung der Formungsoptik um den Pulspicker ist es gelungen, eine Schaltzeit von 7ns zu erreichen. Damit ist das Puls-Picking von Seeder mit einer Pulswiederholrate von bis zu 100MHz möglich.

Durch Optimierung der Formungsoptik um den Modulator ist es gelungen, Laserpulse mit einer Frequenz von bis zu 5MHz zu modulieren. Bei einer Pulsfrequenz über 5MHz werden die Pulsenergiestabilität schlecht. Dies lag daran, dass mit dem HF-Treiber die HF-Leistung nicht mit den Laserpulsen synchronisiert werden konnte. Um das Problem zu lösen, wurde die Entwicklung eines HF-Treibers gestartet, mit dem die Synchronisation möglich wird, somit die Pulsenergiestabilität mit einer Pulswiederholrate von über 5MHz erhöht wird.

Zum AP4.2.3 Untersuchung Frequenzverdreifachung zur Erzeugung von 355nm

Für die Untersuchung der Frequenzverdreifachung wurde ein ps-Laser aufgebaut. Er hat folgende

- Wellenlänge: 1064 nm
- Seederfrequenz: 50MHz
- Pulswiederholrate: 10MHz
- Mittlere Leistung bei 10 MHz: 140 W
- Strahlqualität: $M^2 = 1,2$
- Pulsenergiestabilität: 0.8%rms

Mit dem Laser wurde die Frequenzverdreifachung experimentell untersucht und optimiert. Abbildung 6 zeigt die erzielte Leistung in Abhängigkeit der Pulswiederholrate bei 3 unterschiedlichen HF-Leistungen des AOM. Es ist ersichtlich, dass bei 10MHz die max. mittlere Leistung über 50W beträgt. Damit wird die Zielspezifikation von 45W bei 10MHz (Pulsenergie 4,5µJ bei 10MHz) erreicht.

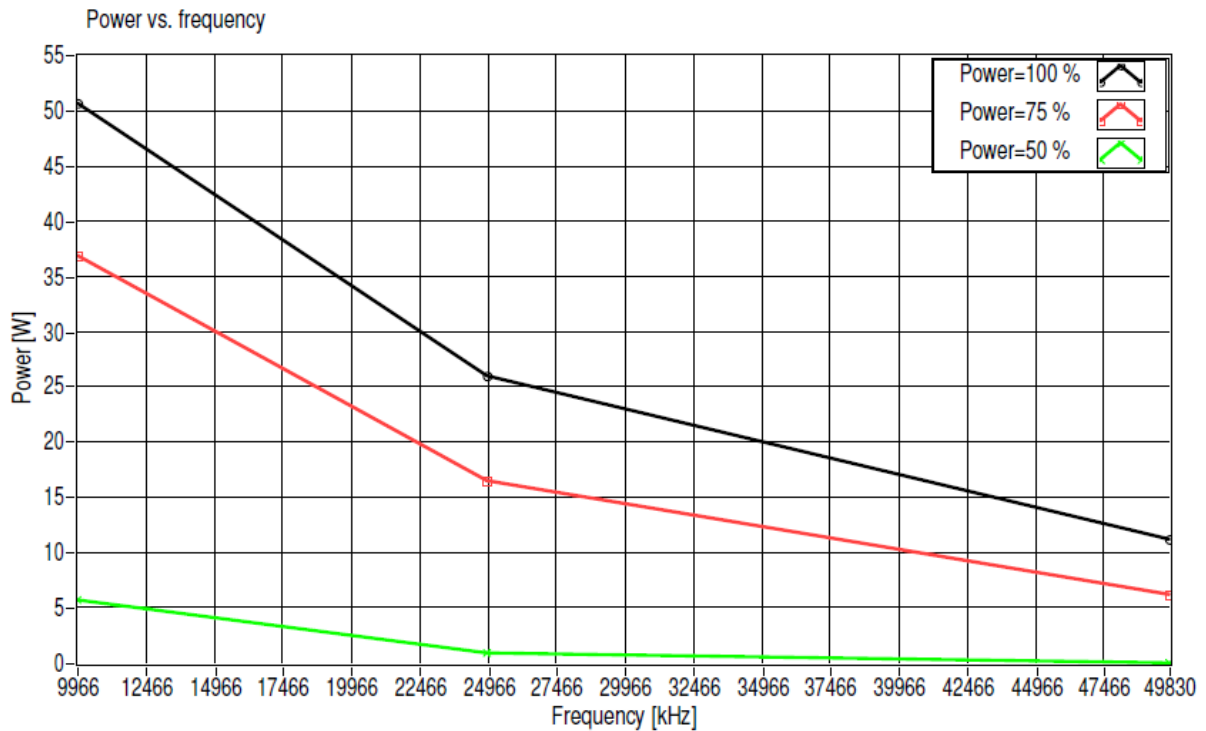


Abbildung 6: Leistung von dem Laseraufbauten in Abhängigkeit der Puls wiederholrate

In Abbildung 7 sind die Intensitätsverteilungen im Nah- und Fernfeld dargestellt. Die Strahlqualität ist in beiden Richtungen $M^2 < 1.15$.

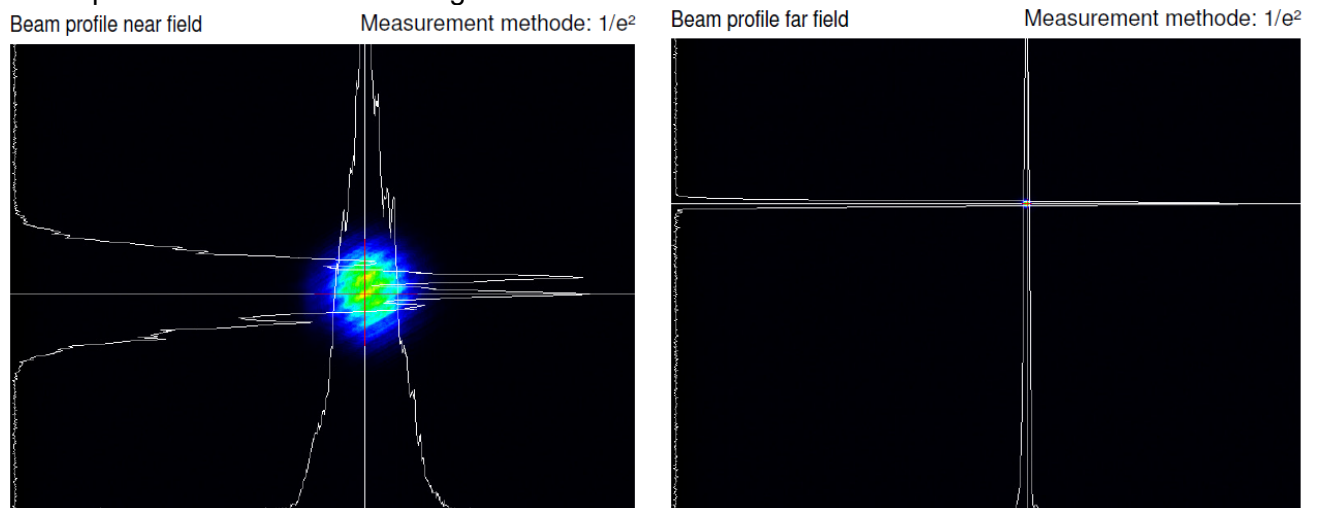


Abbildung 7: Intensitätsverteilungen im Nah- und Fern-Feld.

Zum AP4.2.4 Aufbau und Optimierung eines ps-Lasers als Demonstrator

Nach mehrfachen Diskussionen und sorgfältigen Abwägungen mit Projektpartner wurden die Spezifikationen des Demonstrators geändert. Die Wesentlichen sind: Er wird ein fs-Laser mit Yb:YAG Kristallen. Die IR-Spezifikationen sind wie folgt:

- Wellenlänge: 1030 nm
- Seederfrequenz: 50 MHz
- Pulswiederholrate: von einzeltem Puls bis >10 MHz, frei triggerbar
- Zeitliche Auflösung: besser als 20 ns
- Pulslänge: 1200fs
- Pulsenergie von einzeltem Puls bis zu 10MHz: > 15 μ J
- Mittlere Leistung bei 10 MHz: > 150 W
- Strahlqualität: $M^2 < 1,3$
- Pulsenergiestabilität: < 2% rms

Die UV-Spezifikationen sind:

- Wellenlänge: 343 nm
- Pulswiederholrate: von einzeltem Puls bis >10 MHz, frei triggerbar
- Zeitliche Auflösung: besser als 20 ns
- Pulslänge: 1200fs
- Pulsenergie von einzeltem Puls bis zu 10 MHz: > 5 μ J
- Mittlere Leistung bei 10 MHz: > 50 W
- Strahlqualität: $M^2 < 1,3$

Im Verlauf des Projektes wurde ein ps-Demonstrators, der auf einen InnoSlab-Laser mit Yb:YAG basiert, aufgebaut, untersucht und optimiert. Die Leistungskennlinie des Demonstrators zeigt Abbildung 8. Bei 10MHz beträgt die mittlere Leistung über 150W. Die Leistungskennlinie ist linear bis zu 8MHz. Das bedeutet, dass der Laser triggerbar bis zu 8MHz mit einer konstanten Pulsenergie ist. Die Abweichung der Linearität von 8MHz bis 10MHz beträgt 15%.

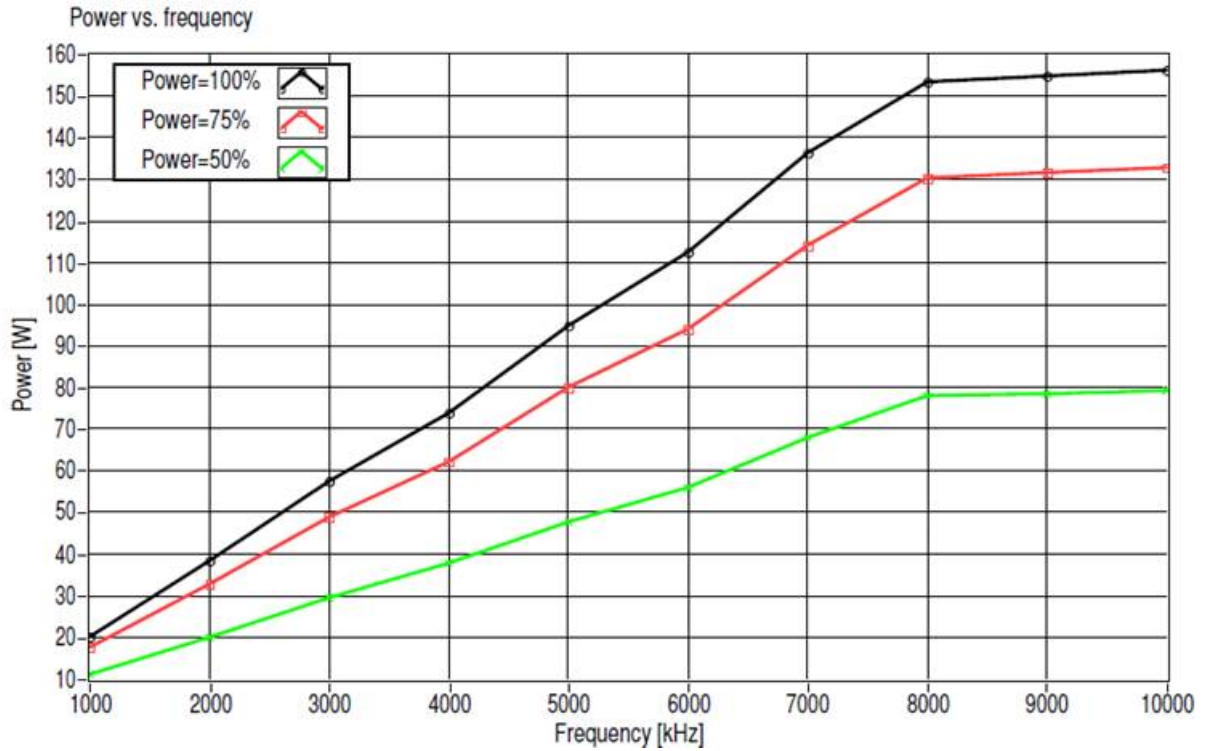


Abbildung 8: Leistung des ps-Demonstrators in Abhängigkeit der Pulswiederholrate

In Abbildung 9 sind die Intensitätsverteilungen im Nah- und Fernfeld dargestellt. Die Strahlqualität ist in beiden Richtungen $M^2 < 1.15$.

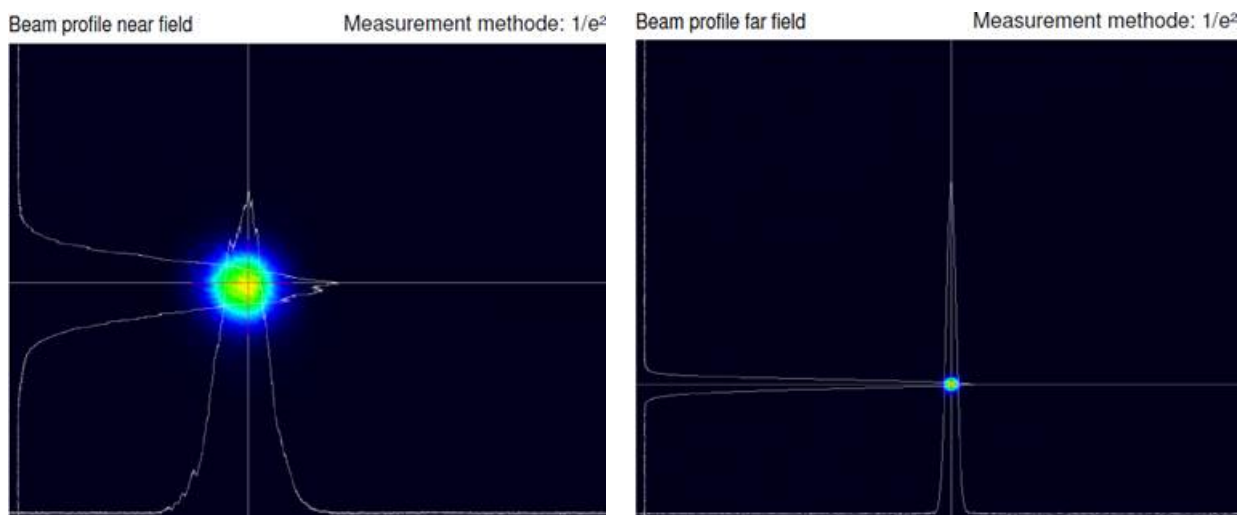


Abbildung 9: Intensitätsverteilungen im Nah- und Fern-Feld.

Zusammenfassend hat der Demonstrator bei IR folgende Parameters:

- Wellenlänge: 1030nm
- Seederfrequenz: 50MHz
- Pulswiederholrate: von einzelner Puls bis >10MHz, frei triggerbar
- Zeitliche Auflösung: 20ns
- Pulslänge: 3ps
- Pulsenergie von einzelner Puls bis zu 10MHz: > 15µJ
- Mittlere Leistung bei 10MHz: > 150W
- Strahlqualität: $M^2 < 1,15$
- Pulsenergiestabilität: < 2%rms

Damit sind die vereinbarten Zielspezifikationen bei IR im vollen Umfang erfüllt.

Zum AP4.2.5 Aufbau und Optimierung eines Frequenzverdreifachungsmodul zur Erzeugung von 355nm

Mit dem in AP4.2.4 aufgebauten Demonstrator wurde Untersuchungen zur Frequenzverdreifachung durchgeführt. Die UV-Leistungskennlinie des Demonstrators zeigt Abbildung 10. Bei 10MHz beträgt die mittlere Leistung über 50W. Die Leistungskennlinie ist linear bis zu 8MHz. Das bedeutet, dass der Laser triggerbar bis zu 8MHz mit einer konstanten Pulsenergie ist.

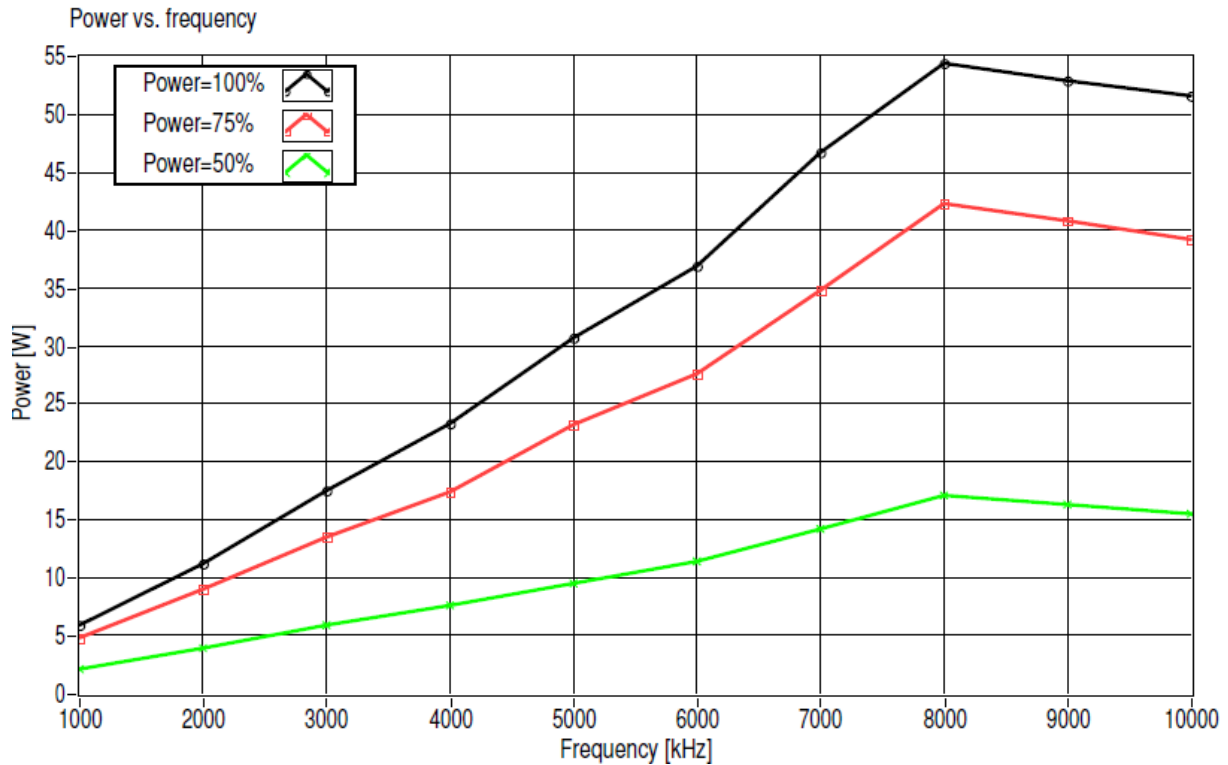


Abbildung 10: UV-Leistung des ps-Demonstrators in Abhängigkeit der Pulswiederholrate

In Abbildung 11 sind die Intensitätsverteilungen im Nah- und Fernfeld dargestellt. Die Strahlqualität ist in beiden Richtungen $M^2 < 1.12$.

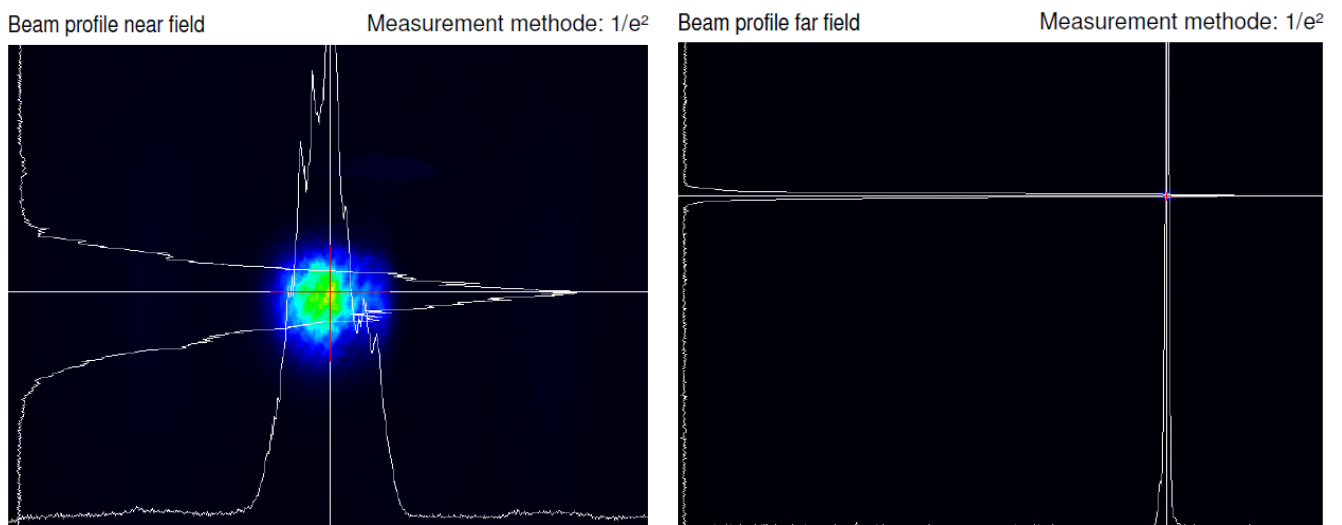


Abbildung 11: Intensitätsverteilungen im Nah- und Fern-Feld.

Zusammenfassend hat der Demonstrator bei UV folgende Parameters:

- Wellenlänge: 343nm
- Seederfrequenz: 50MHz
- Pulswiederholrate: von einzeltem Puls bis > 8MHz, frei triggerbar
- Zeitliche Auflösung: 20ns
- Pulslänge: 3ps
- Pulsenergie von einzeltem Puls bis zu 10MHz: > 5µJ
- Mittlere Leistung bei 10MHz: > 50W
- Strahlqualität: $M^2 < 1,12$
- Pulsenergiestabilität: < 2%rms

Damit sind die vereinbarten Zielspezifikationen bei UV auch im vollen Umfang erfüllt.

Zum AP4.2.6 Bereitstellung des Demonstrators inkl. Frequenzverdreifachungsmodul an den Projektpartner ISE zur Prozess- und Anlagenentwicklung

Der Demonstrator inkl. Optionen IR und UV mit oben angegebenen Parametern wurde fertig gestellt, vermessen und dem Projektpartner ISE für Applikationsuntersuchungen zur Verfügung gestellt.

7 Verwertung der Projektergebnisse

Nach Abschluss des Projektes hat EdgeWave begonnen, die im Rahmen des Projektes gewonnenen Ergebnisse hinsichtlich der Anforderungen an Laserstrahlquellen zu analysieren und auszuwerten, um die erfolgversprechendsten Laserparameter abzuleiten. Daraus wurde ein fs-Laser-Konzept mit einer UV Ausgangsleistung über 40 W und mit einer bis zu 5MHz freitriggerbaren Funktion abgeleitet. Die abgeleiteten Parameter dienen als die Ausgangsbasis für die Weiterentwicklung von Hochleistungs-fs-Lasern für kommerzielle Anwendungen. Die Produktentwicklung wird auf 1 bis 2 Jahre geschätzt. Nach einer erfolgreichen Produktentwicklung erwartet EdgeWave einen Verkauf von ca. 5 bis 10 Hochleistungs-ps-Lasern pro Jahr. Der erwartete Umsatz liegt bei 0,7 bis 1,3 Mio Euro pro Jahr.

Die Hauptanwendungen der Laser sind: Hochgeschwindigkeitsstrukturierung zur Generierung funktionalen Oberflächen, etc.

8 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Keiner bekannt.

9 Veröffentlichungen der Ergebnisse

Eine Veröffentlichung der Projektergebnisse in Laser Technik Journal ist geplant.

10 Zusammenfassung

Im Verlauf des Projektes wurde die Pulswiederholrate der Freitriggerung auf 8MHz skaliert. Basierend auf den Entwicklungsergebnissen wurden zwei Demonstratoren erstellt und charakterisiert. Der erste Demonstrator weist die folgenden Spezifikationen auf:

- Wellenlänge: 343nm
- Seederfrequenz: 50MHz
- Pulswiederholrate: von einzeltem Puls bis > 8MHz, frei triggerbar
- Zeitliche Auflösung: 20ns
- Pulslänge: 3ps
- Pulsenergie von einzeltem Puls bis zu 10MHz: > 5µJ
- Mittlere Leistung bei 10MHz: > 50W
- Strahlqualität: $M^2 < 1,12$
- Pulsenergiestabilität: < 2%rms

Damit wurden alle mit Projektpartner vereinbarten Zielspezifikationen erfüllt. Der Demonstrator inkl. Optionen IR und UV mit oben angegebenen Parametern wurde fertig gestellt, vermessen und dem Projektpartner ISE für Applikationsuntersuchungen zur Verfügung gestellt.

Kurzfassung des Berichts zum Projekt

„Entwicklung von frei-triggerbaren ps-InnoSlab Laser zur Hochgeschwindigkeitsstrukturierung von Si-Solarzellen“

im Rahmen des Verbundprojektes „Produktionstechnologie für die Laserbearbeitung kristalliner Siliziumsolarzellen der nächsten Generation“

FKZ: 03EE1008B

Laufzeit des Projekts: 01.05.2019 – 31.08.2022

Zuwendungsempfänger:

EdgeWave GmbH
Carlo-Schmid-Str. 19
D-52146 Würselen
Tel.: 02405 4186 0
email: info@edge-wave.de

Autor:

Dr. Keming Du

Beiträge von:

Dr. Keming Du
Dr. Daijun Li
Dipl. Ing. Sven Probst

Das vorliegende Projekt ist ein Teilprojekt des Gesamtverbundprojekts „Produktionstechnologie für die Laserbearbeitung kristalliner Siliziumsolarzellen der nächsten Generation“. Ziel dieses Teilvorhabens ist die Untersuchung und Entwicklung flexibler ps-Laser, deren Pulse oder Pulszüge extern gemäß Prozessvorgaben mit einem geringen Zeitjitter abgerufen werden können. Dies ermöglicht eine hohe laterale Auflösung der zu erzeugenden Strukturen beim Hochgeschwindigkeitsscannen. Um die Prozess- und Anlagenentwicklung beim Projektpartner ISE zu ermöglichen, wird basierend auf den Entwicklungsergebnissen ein Demonstrator aufgebaut und dem ISE zur Verfügung gestellt. Darüber hinaus wird EdgeWave die Entwicklungsarbeit unterstützen und notwendige Modifikationen und Anpassungen der Laserparameter durchführen.

Entwicklungsergebnisse zum InnoSlab-Verstärker

Um eine freie Triggerung bis zu 10MHz zu erreichen, wurde einen neuen Puls-Picker dimensioniert. Mit dem schnelleren Pulspicker möglich wird. Dazu wird die Optik für den Pulspicker angepasst.

Darüber hinaus wird ein neuer akkustooptischer Modulator und ausgelegt, der eine höhere Dynamik hat, um die freie Triggerung bei bis zu 10MHz zu ermöglichen. Dazu wird die Formungsoptik vor und nach dem Modulator angepasst.

Für den Pulspicker bei extrem hohen Pulswiederholraten wurde ein akkustooptischer Modulator mit einer höheren Hochfrequenz ausgewählt. Für den Modulator hinter dem Verstärker wurde ebenfalls ein akkustooptischer Modulator gewählt. Um eine mögliche hohe Modulationsgeschwindigkeit zu erreichen, hat der Treiber des Modulators eine Frequenz von 80MHz.

Nach Erhalt des Pulspickers und des Modulators wurden Sie mit einem Laboraufbau untersucht. Durch Optimierung der Formungsoptik um den Pulspicker ist es gelungen, eine Schaltzeit von 7ns zu erreichen. Damit ist das Puls-Picking von Seeder mit einer Pulswiederholrate von bis zu 100MHz möglich.

Durch Optimierung der Formungsoptik um den Modulator ist es gelungen, Laserpulse mit einer Frequenz von bis zu 8MHz zu modulieren. Bei einer Pulsfrequenz über 8MHz werden die Pulsenergiestabilität schlecht. Dies lag daran, dass mit dem HF-Treiber die HF-Leistung nicht mit den Laserpulsen synchronisiert werden konnte. Um das Problem zu lösen, wurde die Entwicklung eines HF-Treibers gestartet, mit dem die Synchronisation möglich wird, somit die Pulsenergiestabilität mit einer Pulswiederholrate von über 8MHz erhöht wird.

Nach mehrfachen Diskussionen und sorgfältigen Abwägungen mit Projektpartner wurden die Spezifikationen des Demonstrators geändert. Die Wesentlichen sind: Er wird ein fs-Laser mit Yb:YAG Kristallen. Die IR-Spezifikationen sind wie folgt:

- Wellenlänge: 1030 nm
- Seederfrequenz: 50 MHz
- Pulswiederholrate: von einzelner Puls bis >10 MHz, frei triggerbar
- Zeitliche Auflösung: besser als 20 ns
- Pulslänge: 1200fs
- Pulsenergie von einzelner Puls bis zu 10MHz: > 15 μ J
- Mittlere Leistung bei 10 MHz: > 150 W
- Strahlqualität: $M^2 < 1,3$
- Pulsenergiestabilität: < 2% rms

Die UV-Spezifikationen sind:

- Wellenlänge: 343 nm
- Pulswiederholrate: von einzelner Puls bis >10 MHz, frei triggerbar
- Zeitliche Auflösung: besser als 20 ns
- Pulslänge: 1200fs
- Pulsenergie von einzelner Puls bis zu 10 MHz: > 5 μ J
- Mittlere Leistung bei 10 MHz: > 50 W
- Strahlqualität: $M^2 < 1,3$

Im Verlauf des Projektes wurde ein ps-Demonstrators, der auf einen InnoSlab-Laser mit Yb:YAG basiert, aufgebaut, untersucht und optimiert. Die Leistungskennlinie des Demonstrators zeigt Abbildung 1. Bei 10MHz beträgt die mittlere Leistung über 150W. Die Leistungskennlinie ist linear bis zu 8MHz. Das bedeutet, dass der Laser triggerbar bis zu 8MHz mit einer konstanten Pulsenergie ist. Die Abweichung der Linearität von 8MHz bis 10MHz beträgt 15%.

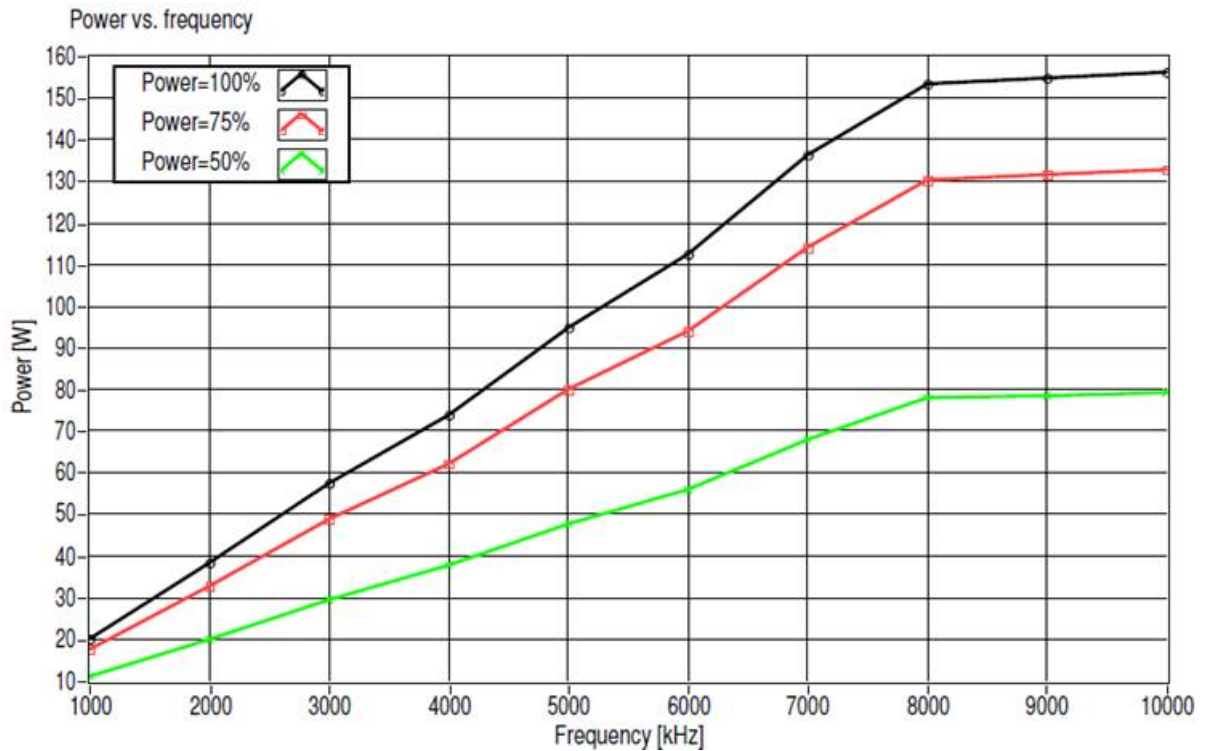


Abbildung 1: Leistung des ps-Demonstrators in Abhängigkeit der Pulswiederholrate

In Abbildung 2 sind die Intensitätsverteilungen im Nah- und Fernfeld dargestellt. Die Strahlqualität ist in beiden Richtungen $M^2 < 1.15$.

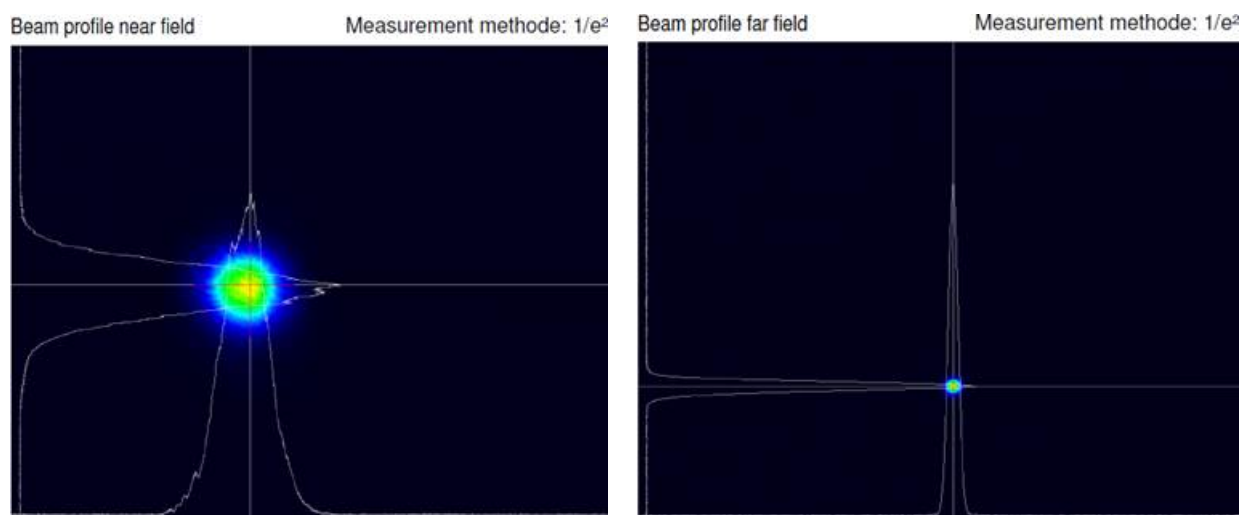


Abbildung 2: Intensitätsverteilungen im Nah- und Fern-Feld.

Zusammenfassend hat der Demonstrator bei IR folgende Parameters:

- Wellenlänge: 1030nm
- Seederfrequenz: 50MHz
- Pulswiederholrate: von einzelner Puls bis >10MHz, frei triggerbar
- Zeitliche Auflösung: 20ns
- Pulslänge: 3ps
- Pulsenergie von einzelner Puls bis zu 10MHz: > 15µJ
- Mittlere Leistung bei 10MHz: > 150W
- Strahlqualität: $M^2 < 1,15$
- Pulsenergiestabilität: < 2%rms

Damit sind die vereinbarten Zielspezifikationen bei IR im vollen Umfang erfüllt.

Mit dem in AP4.2.4 aufgebauten Demonstrator wurde Untersuchungen zur Frequenzverdreifung durchgeführt. Die UV-Leistungskennlinie des Demonstrators zeigt Abbildung 3. Bei 10MHz beträgt die mittlere Leistung über 50W. Die Leistungskennlinie ist linear bis zu 8MHz. Das bedeutet, dass der Laser triggerbar bis zu 8MHz mit einer konstanten Pulsenergie ist.

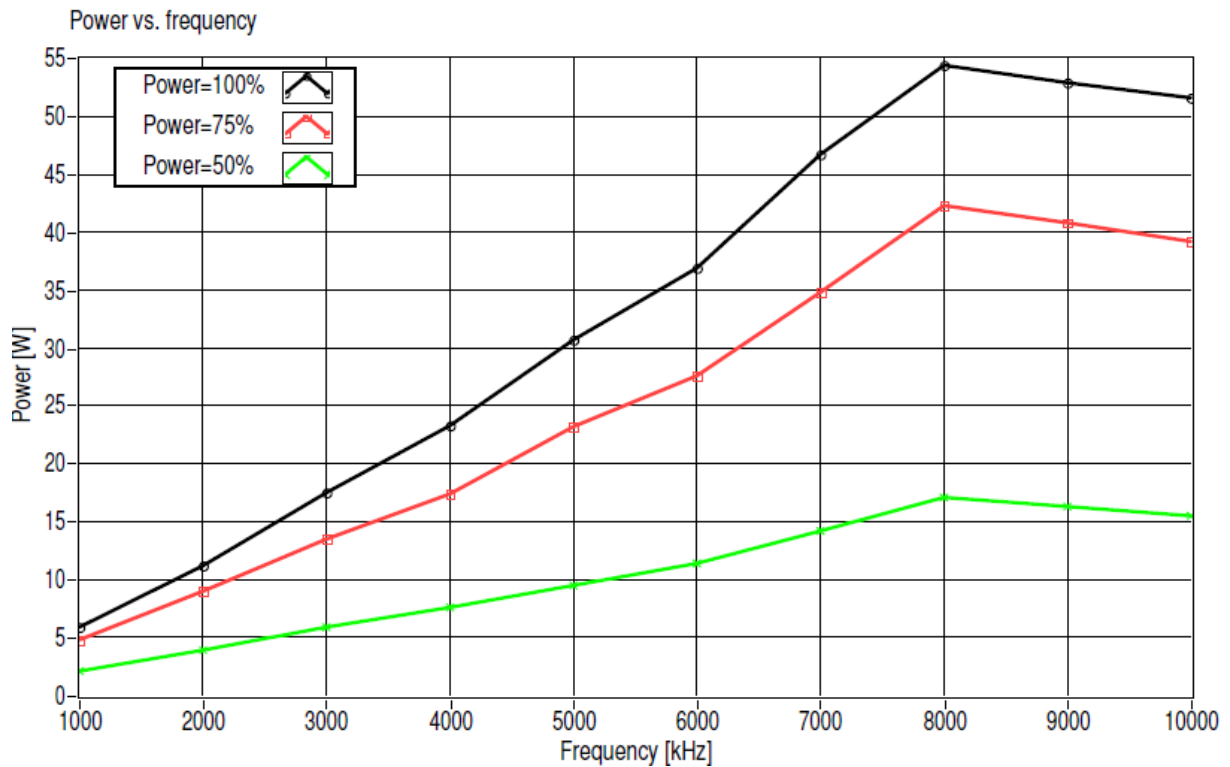


Abbildung 3: UV-Leistung des ps-Demonstrators in Abhängigkeit der Pulswiederholrate

In Abbildung 4 sind die Intensitätsverteilungen im Nah- und Fernfeld dargestellt. Die Strahlqualität ist in beiden Richtungen $M^2 < 1.12$.

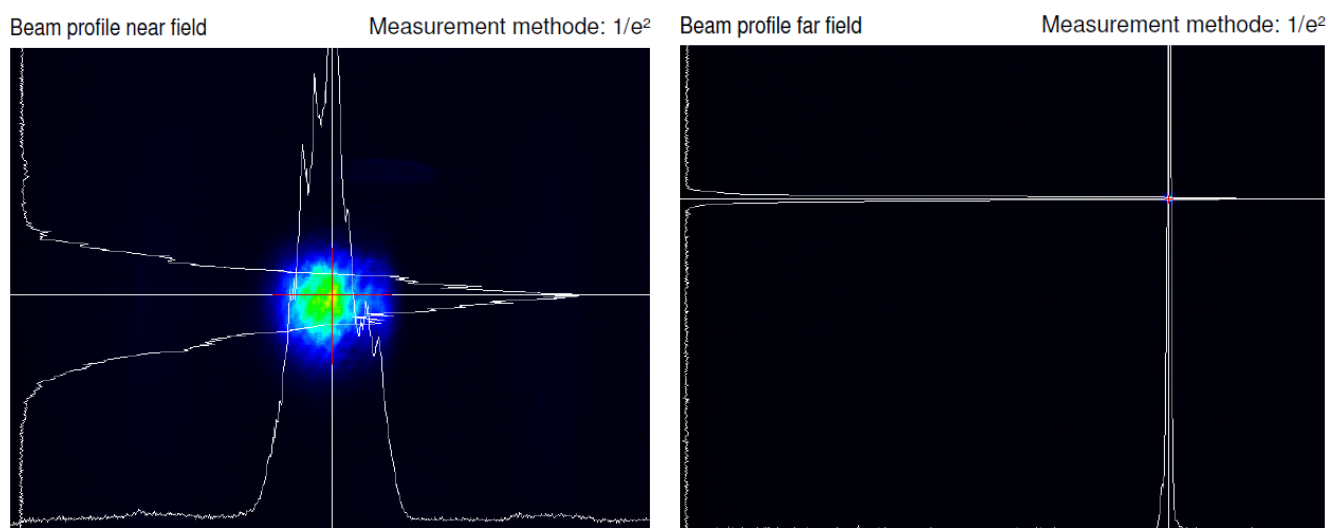


Abbildung 4: Intensitätsverteilungen im Nah- und Fern-Feld.

Zusammenfassend hat der Demonstrator bei UV folgende Parameters:

- Wellenlänge: 343nm
- Seederfrequenz: 50MHz
- Pulswiederholrate: von einzelner Puls bis > 8MHz, frei triggerbar
- Zeitliche Auflösung: 20ns
- Pulslänge: 3ps
- Pulsenergie von einzelner Puls bis zu 10MHz: > 5µJ
- Mittlere Leistung bei 10MHz: > 50W
- Strahlqualität: $M^2 < 1,12$
- Pulsenergiestabilität: < 2%rms

Damit sind die vereinbarten Zielspezifikationen bei UV auch im vollen Umfang erfüllt.

Der Demonstrator inkl. Optionen IR und UV mit oben angegebenen Parametern wurde fertig gestellt, vermessen und dem Projektpartner ISE für Applikationsuntersuchungen zur Verfügung gestellt.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Entwicklung von frei-triggerbaren ps-InnoSlab Laser zur Hochgeschwindigkeitsstrukturierung von Si-Solarzellen	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Dr. Keming Du Dr. Daijun Li Dipl. Ing. Sven Probst	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.08.2022
	6. Veröffentlichungsdatum geplant
	7. Form der Publikation Artikel in Zeitschrift
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) EdgeWave GmbH Carlo-Schmid-Str. 19 D-52146 Würselen Tel.: 02405 4186 0	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 03EE1008B
	11. Seitenzahl 19
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn	13. Literaturangaben keine
	14. Tabellen keine
	15. Abbildungen 11
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Im Verlauf des Projektes wurde die Pulswiederholrate der Freitriggerung auf 8MHz skaliert. Basierend auf den Entwicklungsergebnissen wurden zwei Demonstratoren erstellt und charakterisiert. Der erste Demonstrator weist die folgenden Spezifikationen auf: <ul style="list-style-type: none"> - Wellenlänge: 343nm - Seederfrequenz: 50MHz - Pulswiederholrate: von einzeltem Puls bis > 8MHz, frei triggerbar - Zeitliche Auflösung: 20ns - Pulslänge: 3ps - Pulsenergie von einzeltem Puls bis zu 10MHz: > 5µJ - Mittlere Leistung bei 10MHz: > 50W - Strahlqualität: $M^2 < 1,12$ - Pulsenergiestabilität: < 2%rms Damit wurden alle mit Projektpartner vereinbarten Zielspezifikationen erfüllt Der Demonstrator inkl. Optionen IR und UV mit oben angegebenen Parametern wurde fertig gestellt, vermessen und dem Projektpartner ISE für Applikationsuntersuchungen zur Verfügung gestellt.	
19. Schlagwörter InnoSlab amplifier, ps-, fs-pulse, high rep rate, free trigger able, high UV average power	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN geplant	2. type of document (e.g. report, publication) Schlussbericht
3. title Development of freely triggerable ps-InnoSlab lasers for high-speed structuring of Si solar cells	
4. author(s) (family name, first name(s)) Dr. Keming Du Dr. Daijun Li Dipl. Ing. Sven Probst	5. end of project 31.08.2022
	6. publication date geplant
	7. form of publication Paper in Journal
8. performing organization(s) (name, address)	9. originator's report no.
	10. reference no. 03EE1008B
	11. no. of pages 19
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn	13. no. of references none
	14. no. of tables none
	15. no. of figures 11
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract In the course of the project, the pulse repetition rate of the free triggering was scaled to 8MHz. Based on the development results, two demonstrators were created and characterized. The first demonstrator has the following specifications: <ul style="list-style-type: none"> - Wavelength: 343nm - Seeder frequency: 50MHz - Pulse repetition rate: from a single pulse to > 8MHz, freely triggerable - Temporal resolution: 20ns - Pulse length: 3ps - Pulse energy of single pulse up to 10MHz: > 5µJ - Average power at 10MHz: > 50W - Beam quality: $M^2 < 1.12$ - Pulse energy stability: < 2%rms This means that all the target specifications agreed with the project partner have been met. The demonstrator including IR and UV options with the parameters specified above has been completed, measured and made available to the project partner ISE for application tests.	
19. keywords InnoSlab amplifier, ps-, fs-pulse, high rep rate, free trigger able, high UV average power	
20. publisher	21. price