

## **Schlussbericht zum Projekt**

„Entwicklung von UKP-Lasersystemen zur Hochgeschwindigkeitsbearbeitung von Batterien nächster Generation – 3DBat-EW“

im Rahmen des Verbundprojektes „Konzepte zum Aufbau von Elektrodenarchitekturen für Hochenergie- und Hochleistungsbatterien der nächsten Generation - Next-Gen-3DBat“

**FKZ:** WABC100355714

**Laufzeit des Projekts:** 01.02.2019 - 30.10.2022

### **Zuwendungsempfänger:**

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

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Aufgabenstellung und Ziele des Vorhabens</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Ausgangssituation</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Planung und Ablauf des Vorhabens</b>	<b>2</b>
<b>4</b>	<b>Stand der Wissenschaft und Technik</b>	<b>3</b>
<b>5</b>	<b>Zusammenarbeit mit anderen Stellen</b>	<b>3</b>
<b>6</b>	<b>Wissenschaftliche und technische Ergebnisse und Vergleich mit Zielen des Projektes</b>	<b>3</b>
6.1	Erläuterung des Laserkonzepts	3
6.2	Durchgeführte Arbeiten	3
6.3	Wissenschaftliche und technische Ergebnisse	5
<b>7</b>	<b>Verwertung der Projektergebnisse</b>	<b>16</b>
<b>8</b>	<b>Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen</b>	<b>16</b>
<b>9</b>	<b>Veröffentlichungen der Ergebnisse</b>	<b>16</b>
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>17</b>

# 1 Aufgabenstellung und Ziele des Vorhabens

Das vorliegende Projekt ist ein Teilprojekt des Gesamtverbundprojekts „Konzepte zum Aufbau von Elektrodenarchitekturen für Hochenergie- und Hochleistungsbatterien der nächsten Generation“. Ziel dieses Teilprojektes ist im Rahmen des Kooperationsprojektes, dass EdgeWave GmbH einen ps-Laserdemonstrator und einen fs-Laserdemonstrator aufbaut und Techniken zur räumlichen und zeitlichen Strahlformung entwickelt. Die Laserdemonstratoren werden den Projektpartnern für das Strukturieren mittels DLIP und mittels direkten Antragens beim Projektpartner zur Verfügung gestellt. Im Verlauf des Projektes werden unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Projektpartner die Parameter der Laser inkl. der Formungsoptiken angepasst und optimiert. Dabei sind die Prozessgeschwindigkeit und Prozessqualität maßgeblich.

Gemeinsam mit Projektpartnern werden die Ergebnisse analysiert und ps-Laser und fs-Laser mit bestmöglichen Spezifikationen identifiziert. Daraus wird EdgeWave ein Lasermodell für einen effizienz- und qualitätsoptimierten Prozessschritt ableiten.

## 1.1 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele, angestrebte Innovationen

Die Zielvorgaben des Teilprojektes von EdgeWave sind wie folgt:

- Parameterstudium zur Ermittlung von optimalen Strahleigenschaften wie Pulsdauer, Pulsennergie, zeitlichen und räumlichen Intensitätsprofilen
- Erstellung und Charakterisierung eines ps-Laserdemonstrators mit folgenden Grundspezifikationen:
  - Wellenlänge: 1064nm oder 532nm
  - Pulswiederholrate: 100kHz, frei triggerbar
  - Pulsdauer: 13ps
  - Kohärenzlänge: > 3mm
  - Pulsennergie: > 800μJ bei 1064nm und > 400μJ bei 532nm
  - Strahlqualität:  $M^2 < 1,3$
  - Strahlverteilung: zirkular Gaussian, oder Top-hat
- Bereitstellung des ps-Laserdemonstrators für den Verbundpartner IWS
- Erstellung und Charakterisierung eines fs-Laserdemonstrators mit folgenden Grundspezifikationen:
  - Wellenlänge: 1030nm
  - Pulswiederholrate: >2 MHz, frei triggerbar, bis 50MHz extern einstellbar
  - Pulsdauer: 600 fs
  - Pulsennergie: > 800μJ

- Max. Mittlere Leistung > 500W
- Strahlqualität:  $M^2 < 1,3$
- Intensitätsverteilung: zirkular Gaussian, elliptisch Gaussian, oder Multispots
- Bereitstellung des fs-Laserdemonstrators für den Verbundpartner KIT
- Auswertung der Bearbeitungsergebnisse und Ableitung der Laserparameter für eine optimale Bearbeitung von Batterien-Zellen.

## 2 Ausgangssituation

ps-Laser mit einer Pulsdauer um 10ps und einer mittleren Leistung von einigen 100W werden international von mehreren Herstellern wie EdgeWave und Amphos angeboten. Faser-basierte MOPA-Systeme von IPG liefern eine mittlere Leistung von einigen 10W bei einer Pulsdauer um 1ns. Dabei wird ein Diodenlaser als Seeder und diodengepumpte Faserlaser als Verstärker verwendet.

Für eine effektive Nutzung der Hochleistung von einigen 100W und der Pulsennergie von  $1000\mu J$  sind geeignete Strahlformungen unabdingbar. Es besteht der Bedarf, Strahlformungen zu entwickeln und zu untersuchen, die eine produktive Bearbeitung von Batteriekomponenten mit hoher Qualität ermöglichen.

## 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-Q1	2019-Q2	2019-Q3	2019-Q4	2020-Q1	2020-Q2	2020-Q3	2020-Q4	2021-Q1	2021-Q2	2021-Q3	2021-Q4	2022-Q1
1	Definition Laser-Parameter													
2	Elektrodenstrukturierung													
3	Hochgeschwindigkeitsstrukturierung von Stromableiterfolien													
4	Separatormaterialien und Strukturierung													
5.1	Anpassung und Aufbau eines fs-Lasers													
5.2	Entwicklung eines Strahlaufsteilers													
5.3	Entwicklung einer Modulationseinheit													
5.4	Integration, Erstellung und Bereitsstellung eines fs-Funktionsmusters													
5.5	Erstellung eines ps-Funktionsmusters													
5.6	Auswertung der Ergebnisse und Ableitung von Laserparametern													

## 4 Stand der Wissenschaft und Technik

Über das grundlegende Konzept des InnoSlab-Verstärkers verfügt das Fraunhofer Institut für Lasertechnik über das Patent mit den Nummern EP 1 181 754 B1 und US 6,654,163 B1. Die Fa. EdgeWave hat die Lizenz an diesem Patent erworben. Die Recherchenergebnisse zeigen, dass keine Patente von dritter Seite vorliegen, die befürchten ließen, dass die Verwertung der Ergebnisse des vorliegenden Projektes blockiert werden könnte.

Basierend auf dem endgepumpten Slablaser-Konzept hat die Fa. EdgeWave in zurückliegenden Jahren eine Reihe elektrooptisch gütegeschalteter InnoSlab Laser entwickelt und in den Markt eingeführt. Die Laser haben eine max. mittlere Leistung von über 600 W bei einer Strahlqualität von  $M^2 = 2$ . Aufgrund der geringen Resonatorlänge sind die Pulse kürzer als 10 ns, bei einer Wiederholrate von bis zu 150 kHz.

Basierend auf dem Slabverstärker-Konzept hat EdgeWave im Rahmen eines vom BMBF geförderten Verbundprojektes ein Pikosekunden MOPA-System erforscht und erfolgreich entwickelt und Demonstratoren mit einer mittleren Leistung bis zu 300W bei einer Pulslänge von 12ps aufgebaut. Durch Weiterentwicklung ist es EdgeWave gelungen, ps-Laser mit einer mittleren Leistung von über 300W bei einer Strahlqualität  $M^2 < 1.5$  kommerziell einzuführen.

## 5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Arbeiten des vorliegenden Projekts erfolgen in Zusammenarbeit mit den anderen Partnern des Verbundprojektes „Konzepte zum Aufbau von Elektrodenarchitekturen für Hochenergie- und Hochleistungsbatterien der nächsten Generation – Next-Gen-3DBat“. Dabei werden zuerst zusammen mit den Verbundpartnern die Zielspezifikationen zweier UKP-Funktionsmuster inkl. Strahlformung definiert. Die im Rahmen dieses Teilprojektes erstellten Demonstratoren werden den Projektpartnern für die Verfahrens- Anlagenentwicklung zur Verfügung gestellt. Während der Entwicklung werden die UKP-Funktionsmustern von EdgeWave's Projektmitarbeitern begleitet und betreut.

## 6 Wissenschaftliche und technische Ergebnisse und Vergleich mit Zielen des Projektes

### 6.1 Erläuterung des Laserkonzepts

Das Basiskonzept für dieses Vorhaben bildet die endgepumpte InnoSlab-Technologie. Dabei wurde Nd:YVO<sub>4</sub> Kristalle für die ps-Laser und Yb:YAG für die fs-Laser verwendet.

### 6.2 Durchgeführte Arbeiten

Folgende Arbeiten wurden im Rahmen dieses Teilvorhabens durchgeführt.

## AP5: Laserstrahlquellen und Strahlformung

AP5.1: Aufbau, Charakterisierung und Optimierung eines fs-Lasers mit einer mittleren Leistung höher als 500W und mit einer Pulswiederholrate größer als 2 MHz.

- Definieren der Laserparameter eines fs-Lasers nach Rücksprache mit Projektpartner
- Spezifische Auslegung des fs-Lasers
- Aufbau des fs-Lasers
- Charakterisierung und Optimierung des fs-Lasers

AP5.2: Entwicklung und Untersuchung von einem optischen Aufbau zur Aufteilung vom fs-Laserstrahl (EDGE). Dabei ist es von zentraler Bedeutung, dass die Aufteilung mit einer Effizienz von über 95% erfolgen wird.

- Konzeptionierung einer optischen Anordnung zur Erzeugung von 4 bis 8-Teilstrahlen mit hoher Effizienz. Dabei werden die Teilstrahlen entlang einer Linie angeordnet.
- Aufbauen, Untersuchung und Qualifikation der optischen Strahlaufteilungs-Anordnung

AP5.3: Entwicklung einer Modulationseinheit. Mit der Modulationseinheit soll die Leistung der Teilstrahlen individuell und an jeweiligen Prozesserfordernisse angepasst werden.

- Design einer Modulationseinheit, mit der die Leistung der Teilstrahlen individuell eingestellt werden kann.
- Aufbauen, Untersuchung und Qualifikation der Modulationseinheit

AP5.4: Erstellung eines fs-Funktionsmusters inkl. des Lasers, des Strahlteilers und der Modulationseinheit. Das Funktionsmuster wird dem Projektpartner KIT für die Prozessentwicklung zur Verfügung gestellt.

- Festlegung der optischen, elektronischen und mechanischen Schnittstellen
- Zusammenbau des Funktionsmusters
- Bereitstellung, Anpassung und Betreuung des Funktionsmusters

AP5.5: Erstellung eines ps-Funktionsmusters inkl. des Lasers und Top-hat-Strahlformers und Bereitstellung des Funktionsmusters beim Projektpartner IWS.

- Aufbau und Charakterisierung eines ps-Lasers mit einer Pulsergie von 1mJ bei 100kHz. Der ps-Laser sollte eine Kohärenzlänge > 3mm haben
- Aufbau einer Optik zu Erzeugung von Top-hat-Strahlprofil
- Bereitstellung, Anpassung und Betreuung des Funktionsmusters

AP5.6: Auswertung der Anwendungsergebnisse und Ableitung von Laserparametern und Strahlformung, die für industrielle Anwendung geeignet und erforderlich sind.

### 6.3 Wissenschaftliche und technische Ergebnisse

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

#### Zum AP 5.1: Aufbau, Charakterisierung und Optimierung eines fs-Lasers mit einer mittleren Leistung höher als 500 W und mit einer Pulswiederholrate größer als 2 MHz.

Für die Prozessentwicklung bei Projektpartner wurde ein Hochleistungslaser ausgelegt. Ein Laboraufbau wird erstellt. Experimentelle Untersuchungen zur Leistungsskalierung bei Pulswiederholfrequenz wurden durchgeführt. Abbildung 1 zeigt die erzielte Leistung in Abhängigkeit der Pulswiederholrate. Bei 2 MHz beträgt die Leistung 490 W. Die Pulsdauer beträgt 8 ps.

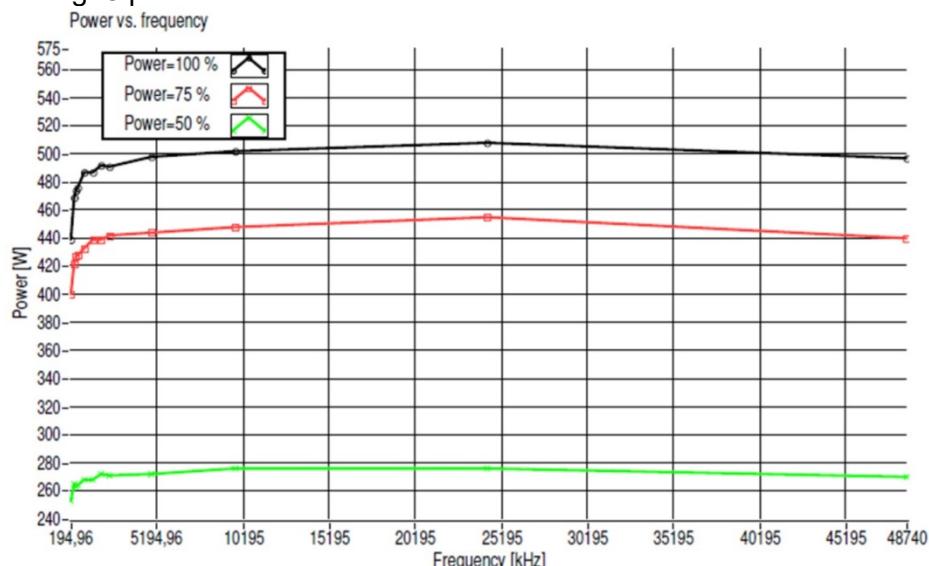


Abbildung 1: Leistung von dem Laseraufbauten in Abhängigkeit der Pulswiederholrate.

Zur Skalierung der Prozessgeschwindigkeit ist gemäß der ersten Überlegung ein Strahl mit einem länglichen Strahlquerschnitt und einer Flat-top-Intensitätsverteilung entlang der langen Kante von Vorteil. Versuche zur Erzeugung derartiger Strahlen wurden durchgeführt. In Abbildung 2 ist ein Beispiel für die Top-Hat Intensitätsverteilung dargestellt.

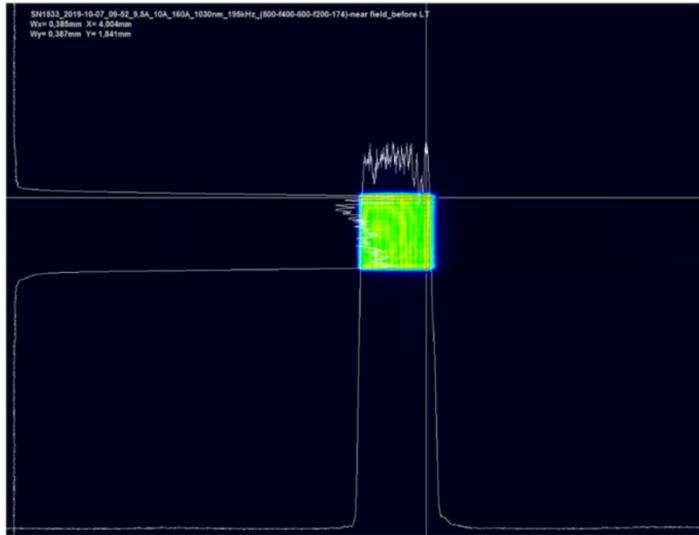


Abbildung 2: Beispiel einer Top-hat-Intensitätsverteilung.

### Zum AP 5.2: Entwicklung und Untersuchung eines optischen Aufbaus zur Aufteilung des fs-Laserstrahls

Eine Einheit zur vierfachen Aufteilung wurde ausgelegt. Sie basiert auf wiederholend Verwendung von Verzögerungsplatten und Polarisatoren. Durch die Drehung der Verzögerungsplatten können die Leistung/Pulsenergie der einzelnen Teilstrahlen an die Anwendungen eingestellt werden. Der schematische Aufbau ist in Abbildung 3 gezeigt.

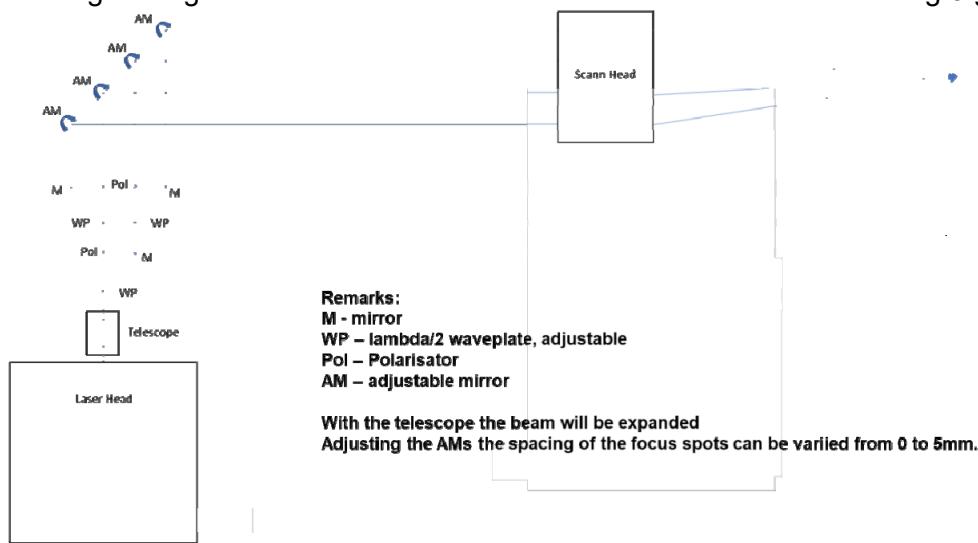


Abbildung 3: Schema einer Strahlaufteilungseinheit mit Verzögerungsplatten und Polarisatoren

Eine Einheit zur vierfachen Aufteilung wurde ausgelegt. Sie basiert auf wiederholend Verwendung von Verzögerungsplatten und Polarisatoren. Durch die Drehung der Verzögerungsplatten können die Leistung/Pulsenergie der einzelnen Teilstrahlen an die

Anwendungen eingestellt werden. Ein Aufbau zur Aufteilung von einem fs-Laserstrahl wurde ausgelegt, konstruiert und ausgebaut.

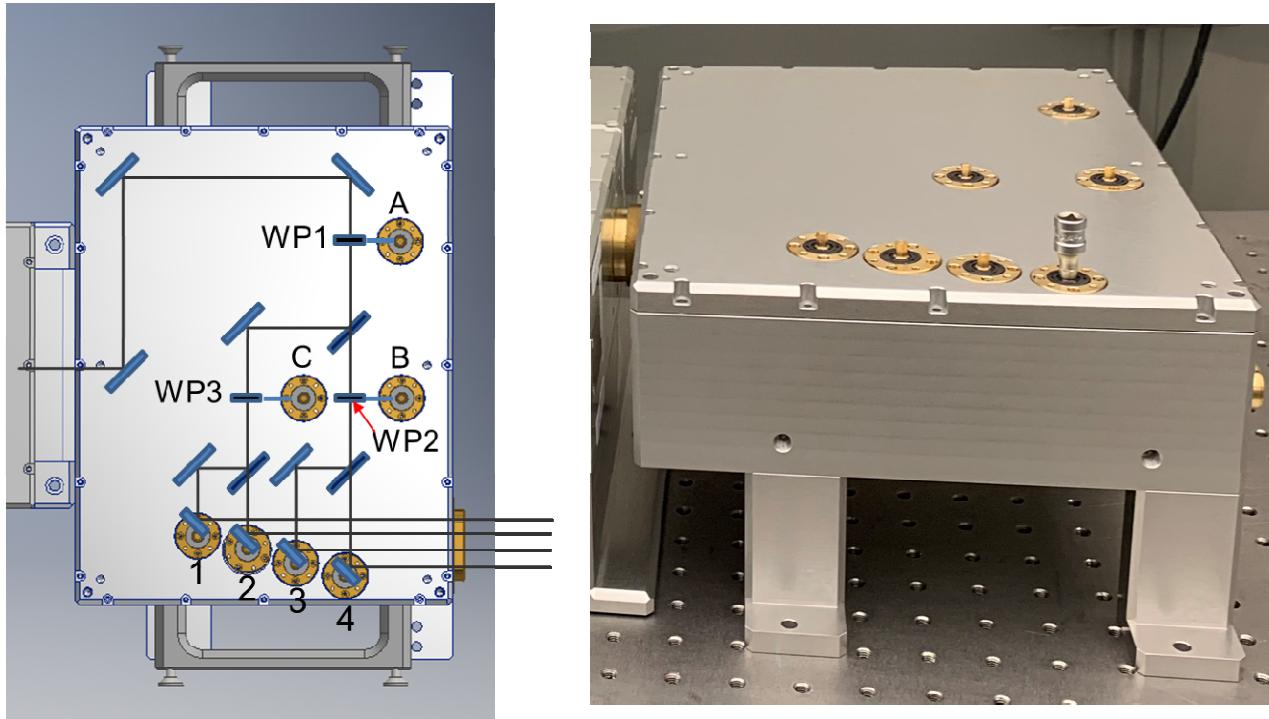


Abbildung 4: Schema (links) und Foto (rechts) der Strahlaufteilungseinheit mit Verzögerungsplatten und Polarisatoren.

Ein Aufbau zur Aufteilung von einem fs-Laserstrahl wurde ausgelegt, konstruiert und ausgebaut. Experimentell wurde die Funktionalität der Strahlaufteilungseinheit bestätigt.

### Zum AP 5.3: Entwicklung einer Modulationseinheit

Mit der Modulationseinheit soll die Leistung der Teilstrahlen individuell und an jeweiligen Prozesserfordernisse angepasst werden. Die Entwicklung einer Modulationseinheit wurde abgeschlossen und in die Demonstrator integriert.

### Zum AP 5.4: Erstellung eines fs-Funktionsmusters inkl. des Lasers, des Strahlteilers und der Modulationseinheit

Ein fs-Funktionsmuster wurde ausgelegt, aufgebaut, untersucht. Dabei war die Verkürzung der Pulsdauer als ein der wichtigsten Parameter erachtet. Nach Optimierung wurde eine Pulsdauer um 600fs erzielt. Abbildung 5 zeigt die Leistung in Abhängigkeit der

Pulswiederholrate. Bei 5MHz beträgt die Leistung 340W. Diese Leistung liegt unterhalb der Zielleistung von 500W.

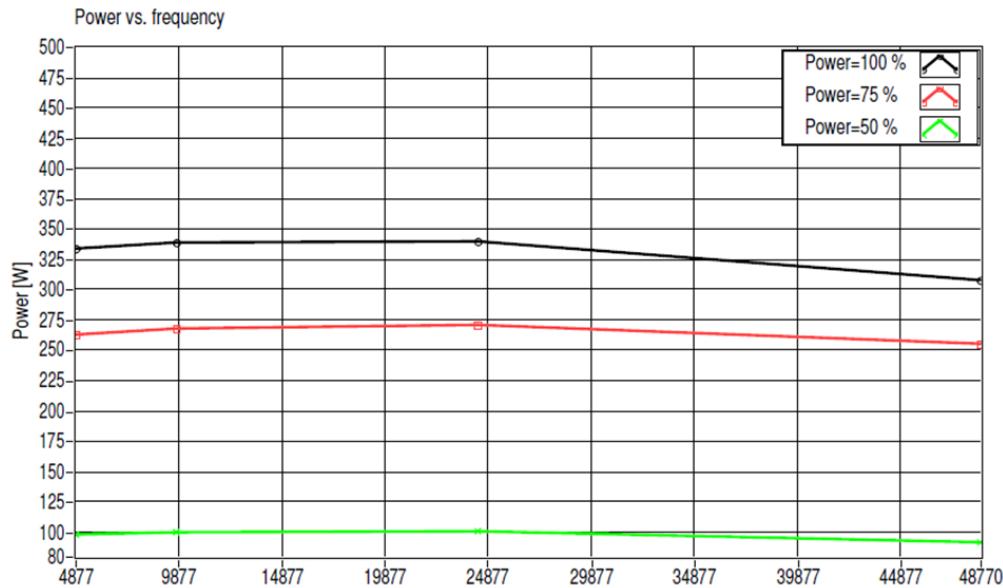


Abbildung 5: Leistung des Laseraufbaus in Abhängigkeit der Pulswiederholrate.

Abbildung 6 zeigt die Intensitätsverteilungen im Nah- und Fernfeld. Die ermittelte Strahlqualität beträgt auch hier in beiden Richtungen  $M^2 < 1.2$ . Dies hat die Zeilspezifikation von 1.3 übertroffen.

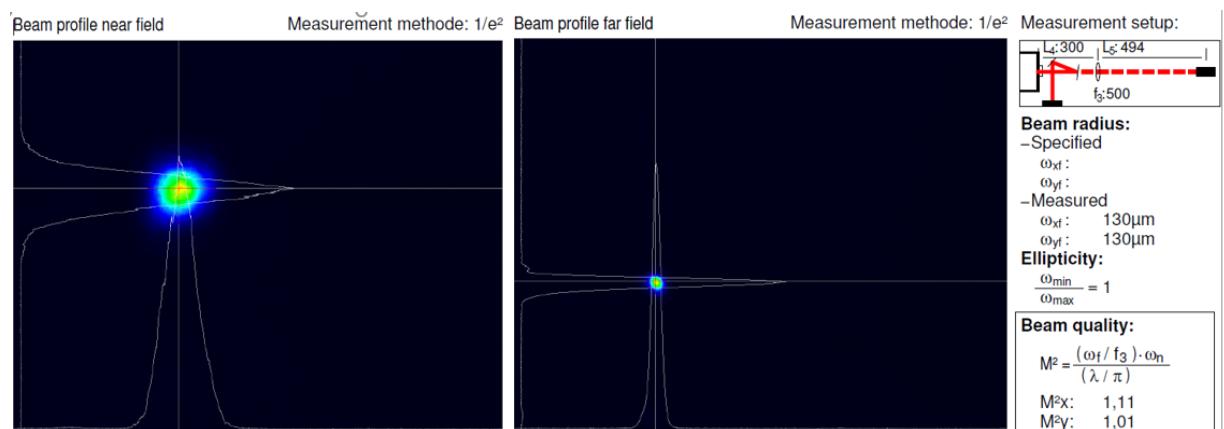


Abbildung 6: Intensitätsverteilungen im Nah- und Fern-Feld.

Das Funktionsmuster wurde dem Projektpartner KIT für die Prozessentwicklung zur Verfügung gestellt.

Um die bestgeeigneten Laserparameter für die Elektroden-Strukturierung zu ermitteln, hatten Kollegen von Projektpartner KIT EdgeWave aufgesucht. EdgeWave hat ps-Laser, fs-Laser

und GHz-Laser unterschiedlicher Wellenlängen (IR, Grün und UV) verbreitet und die Applikationsversuche unterstützt. Dabei wurde festgestellt, dass in Summe ein IR ps-Laser hoher Leistung eine optimierte Lösung für die Ablation ist.  
Anhand der Applikationsergebnisse hatten KIT und EdgeWave vereinbart, dass EdgeWave den fs-Laserdemonstrator durch einen IR ps-Laser mit einer Leistung über 400W ersetzt. Gemäß den Applikationsergebnissen hat EdgeWave einen IR ps-Laser aufgebaut. Er ist von einem einzelnen Puls bis zu 1MHz frei triggerbar. Abbildung 7 zeigt die Leistung in Abhängigkeit der Pulswiederholrate. Bei 1MHz beträgt die Leistung 425W.

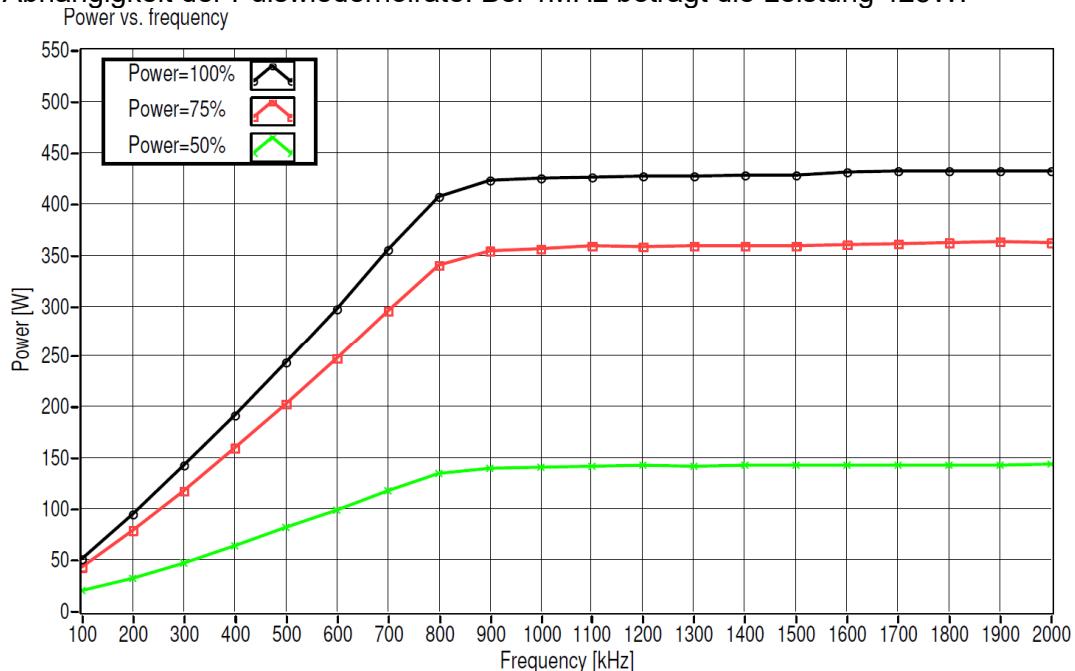


Abbildung 7: Leistung des Laseraufbaus in Abhängigkeit der Pulswiederholrate.  
Der ps Demonstrator kann auch bis zu 50MHz durch externe Einstellung betrieben werden.  
Abbildung 2 zeigt die Leistung in Abhängigkeit der Pulswiederholrate von 1MHz bis zu 50MHz.  
Bei 50MHz hat der Demonstrator über 450W mittlere Leistung.

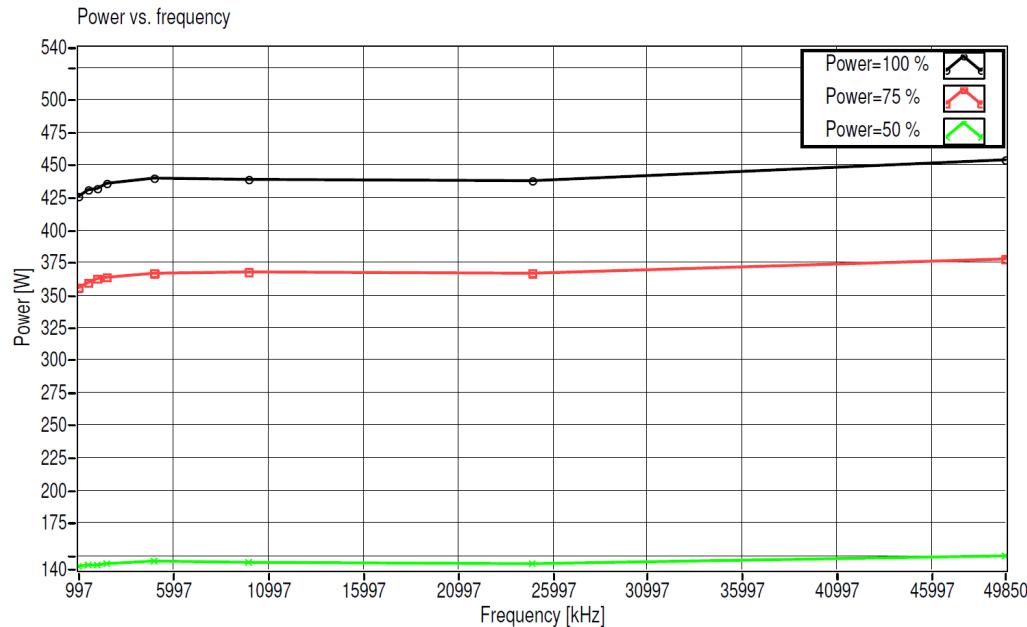


Abbildung 8: Leistung des Laseraufbaus in Abhängigkeit der Pulswiederholrate.

Abbildung 9 zeigt die Intensitätsverteilungen im Nah- und Fernfeld. Die ermittelte Strahlqualität beträgt auch hier in beiden Richtungen  $M^2 < 1.1$ . Dies hat die Zeilspezifikation von 1.3 übertroffen.

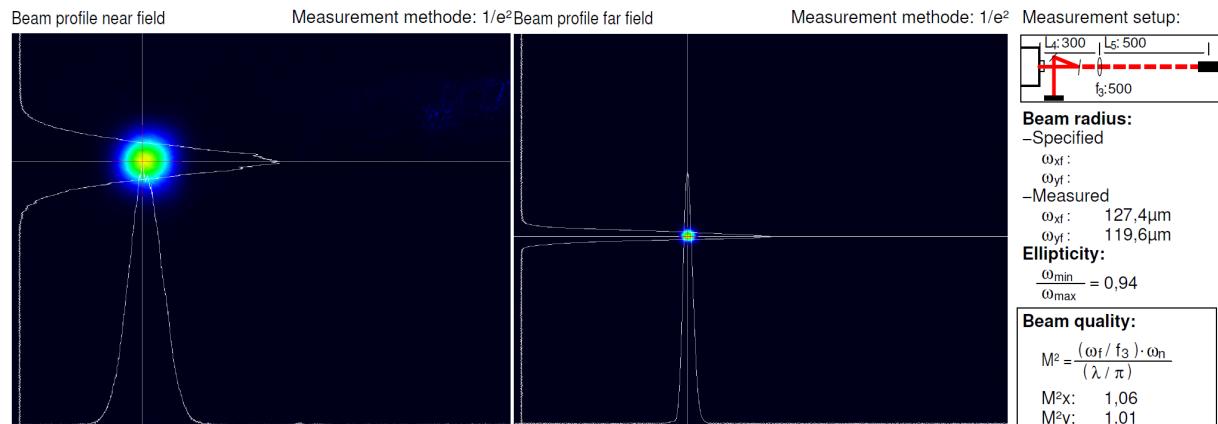


Abbildung 9: Intensitätsverteilungen im Nah- und Fern-Feld.

Der ps-Demonstrator wurde dem Projektpartner KIT für die Prozessentwicklung zur Verfügung gestellt.

**Zum AP 5.5: Erstellung eines ps-Funktionsmusters inkl. des Lasers und Top-Hat-Strahlformers und Bereitstellung des Funktionsmusters beim Projektpartner IWS**

Für die Prozessentwicklung sollte ein ps-Laser hoher Pulsennergie entwickelt werden und Demonstratoren aufgebaut und dem Projektpartner IWS zur Verfügung gestellt werden. Konkret soll er folgende Spezifikationen aufweisen:

- Wellenlänge: 1064 nm oder 532 nm
- Pulswiederholrate: 100 kHz, frei triggerbar
- Pulsdauer: 13 ps
- Kohärenzlänge: > 3 mm
- Pulsennergie: > 800 µJ bei 1064 nm und > 400 µJ bei 532 nm
- Strahlqualität:  $M^2 < 1,3$
- Strahlverteilung: circular Gaussian oder Top-Hat

Dafür wurde zuerst ein Laboraufbau erstellt. Die Leistung und Energie wurde untersucht und optimiert. Abbildung 10 zeigt die Leistung in Abhängigkeit der Pulswiederholrate. Bei 100 kHz beträgt die Leistung über 86 W. Diesem entspricht eine Pulsennergie von über 860 µJ. Dies bildet einen guten Ausgang für die Realisierung eines Demonstrators mit angestrebten Spezifikationen.

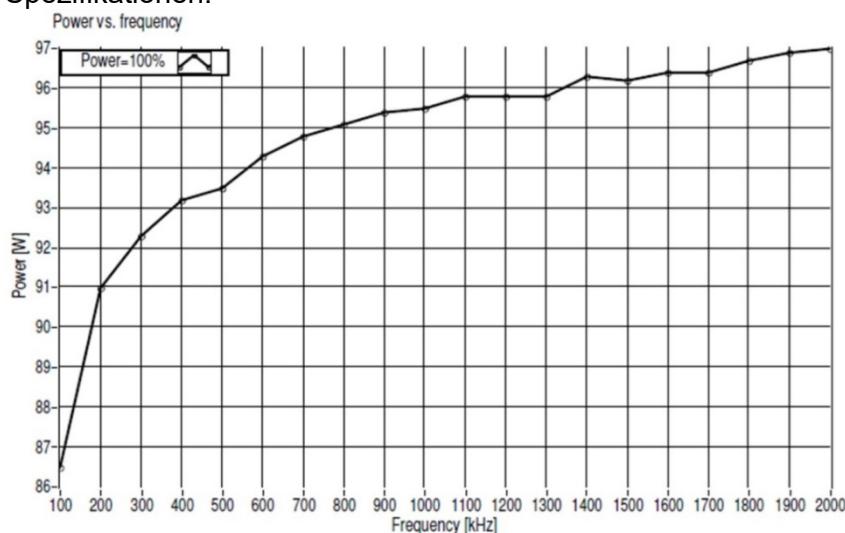


Abbildung 10: Leistung des Laseraufbaus in Abhängigkeit der Pulswiederholrate.

Abbildung 11 zeigt die Intensitätsverteilungen des Laserstrahls im Nah- und Fernfeld. Die ermittelte Strahlqualität beträgt auch hier in beiden Richtungen  $M^2 < 1.3$ .

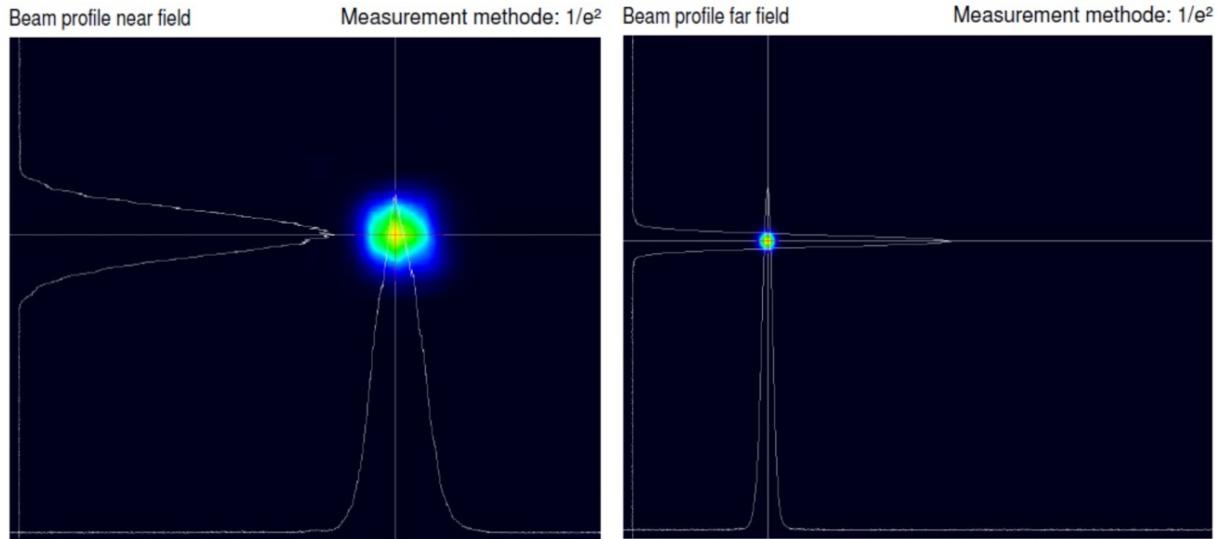


Abbildung 11: Intensitätsverteilungen im Nah- und Fern-Feld.

Für die Prozessentwicklung wurde ein ps-Laser hoher Pulsennergie entwickelt und ein Demonstrator aufgebaut und dem Projektpartner IWS zur Verfügung gestellt. Abbildung 12 zeigt die Leistung in Abhängigkeit der Pulswiederholrate. Bei 100kHz beträgt die Leistung über 90W. Dies entspricht einer Pulsennergie über 900 $\mu$ J. Die max. Leistung beträgt 220W bei 250kHz und übertrifft das Ziel erheblich.

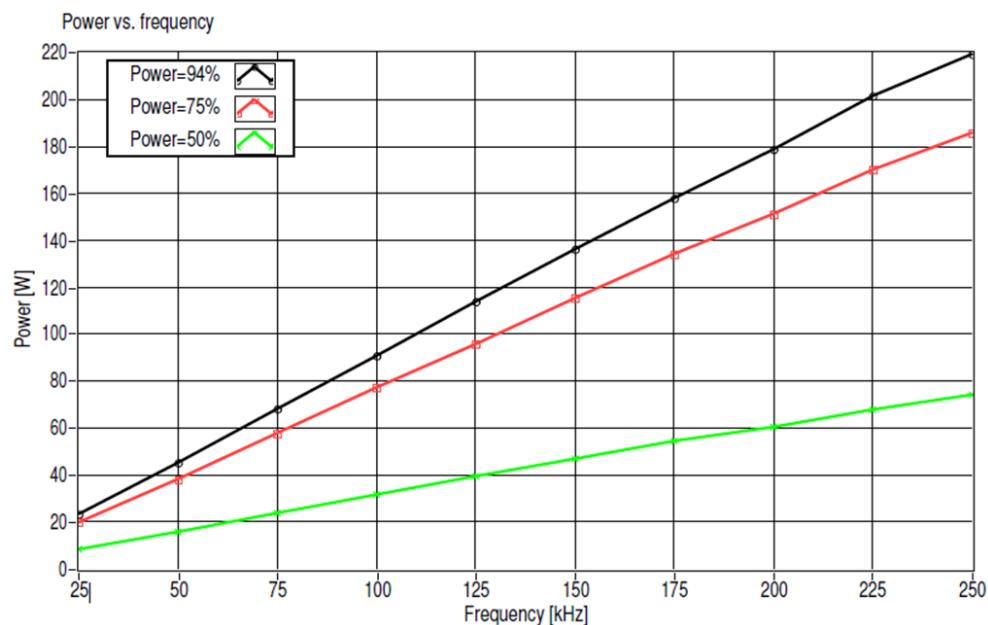


Abbildung 12: Leistung des Laseraufbaus in Abhängigkeit der Pulswiederholrate.

Abbildung 13 zeigt die Intensitätsverteilungen im Nah- und Fernfeld. Die ermittelte Strahlqualität beträgt auch hier in beiden Richtungen  $M^2 < 1.2$ .

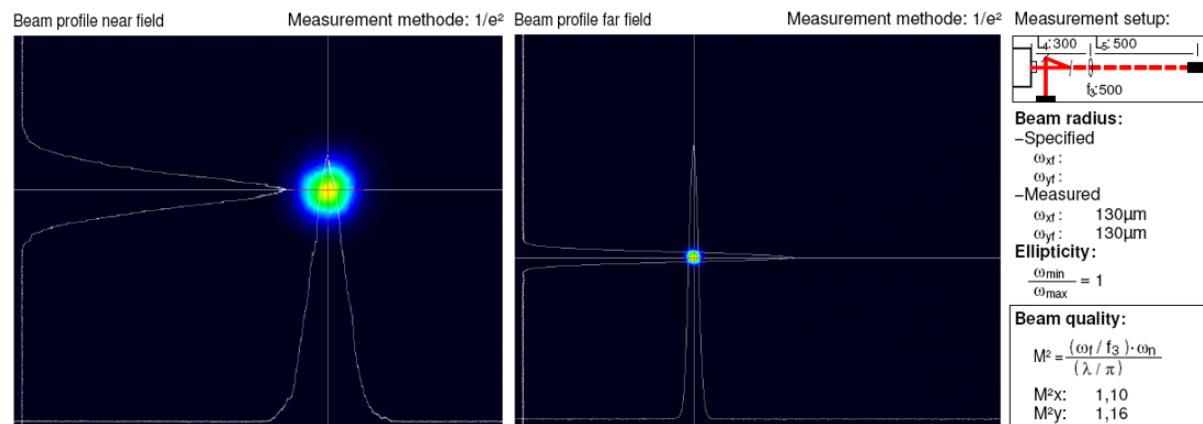


Abbildung 13: Intensitätsverteilungen im Nah- und Fern-Feld.

Abbildung 14 zeigt die Leistung in Abhängigkeit der Pulswiederholrate. Bei 100kHz beträgt die Leistung über 90W. Dies entspricht einer Pulsennergie über 900μJ. Die max. Leistung beträgt 220W bei 250kHz und übertrifft das Ziel erheblich.

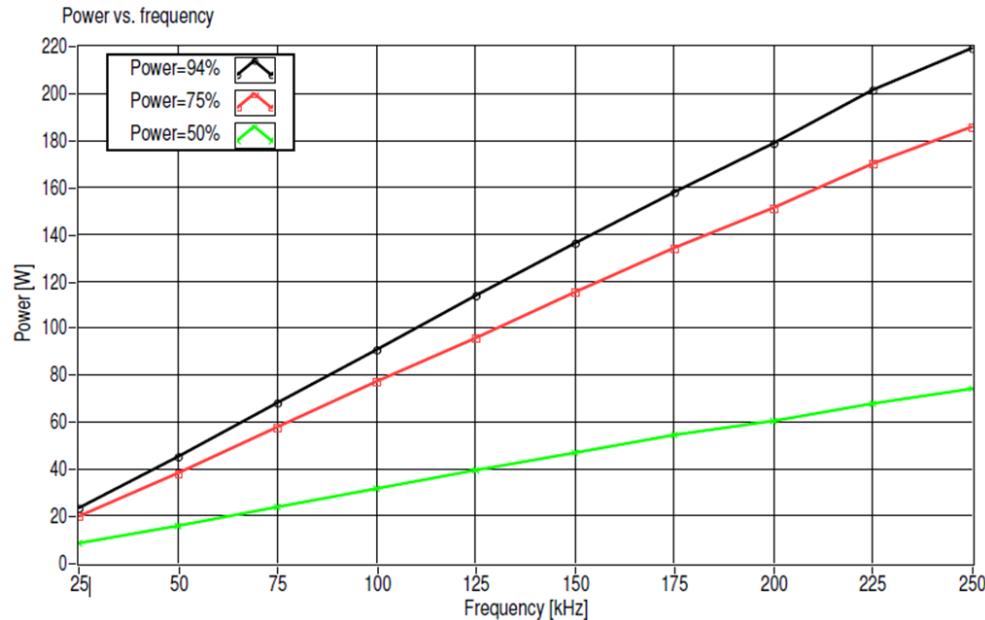


Abbildung 14: Leistung des Laseraufbaus in Abhängigkeit der Pulswiederholrate.

Abbildung 15 zeigt die Intensitätsverteilungen im Nah- und Fernfeld. Die ermittelte Strahlqualität beträgt auch hier in beiden Richtungen  $M^2 < 1.2$ .

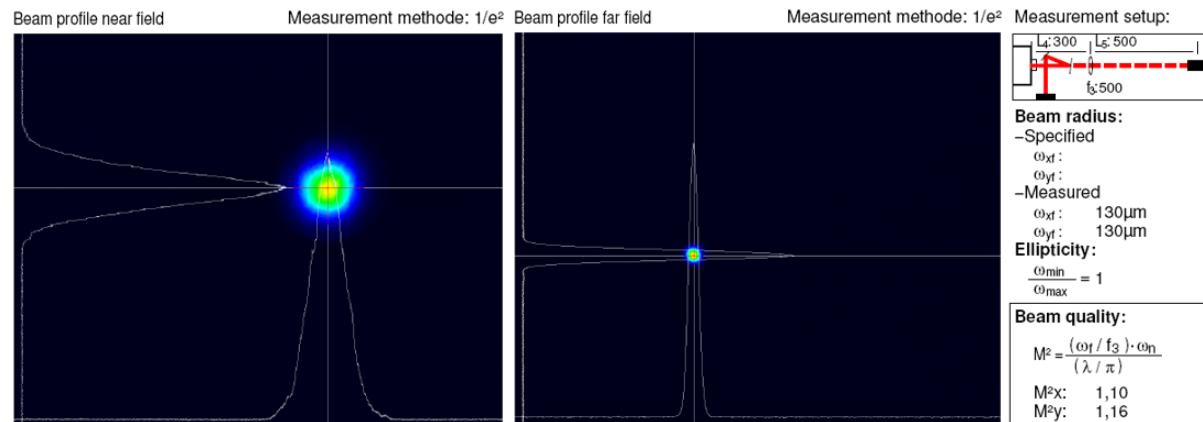


Abbildung 15: Intensitätsverteilungen im Nah- und Fern-Feld.

Abbildung 16 zeigt die 532nm Leistung in Abhängigkeit der Pulswiederholrate. Bei 100kHz beträgt die Leistung über 60W. Dies entspricht eine Pulsennergie über 600μJ. Die max. Leistung beträgt 150W bei 250kHz. Das ist zweifach wie die Zielspezifikation.

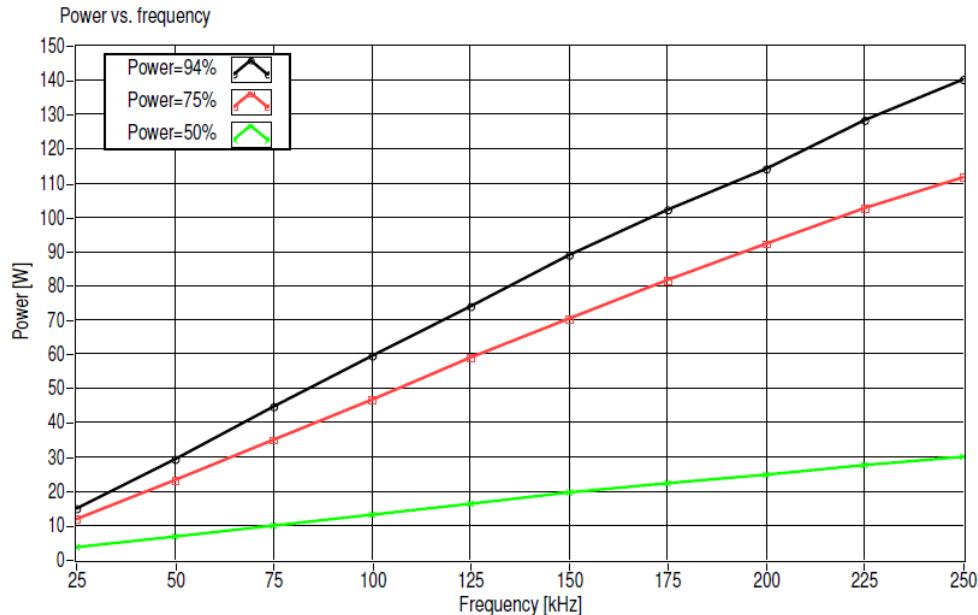


Abbildung 16: Leistung des Laseraufbaus in Abhängigkeit der Pulswiederholrate.

Abbildung 17 zeigt die Intensitätsverteilungen im Nah- und Fernfeld. Die ermittelte Strahlqualität beträgt auch hier in beiden Richtungen  $M^2 < 1.2$ .

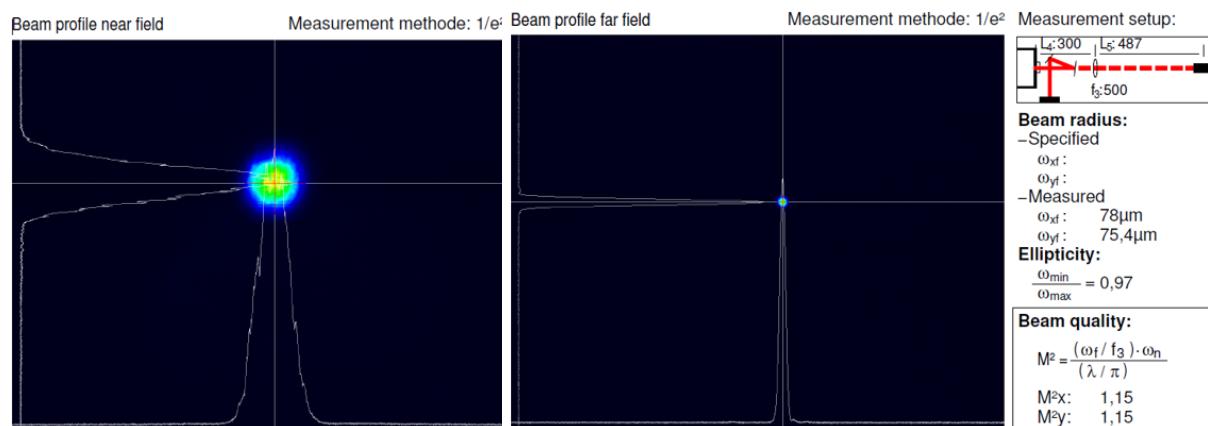


Abbildung 17: Intensitätsverteilungen im Nah- und Fern-Feld.

Das ps-Funktionsmuster wurde dem Projektpartner IWS für die Prozessentwicklung 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. EdgeWave erwartet u.a. folgende wirtschaftliche Verwertung der Projektergebnisse:

- Lieferung von UKP-Lasern mit Strahlformung. Die guten wirtschaftlichen Erfolgsaussichten in diesem Bereich wurden in der Verbundskizze diskutiert. EdgeWave erwartet einen Verkauf von etwa 5 UKP-Lasersystemen mit Strahlformung ab Ende 2023 zu einem durchschnittlichen Preis von 140.000EUR für die Batteriefertigung.
- EdgeWave erwartet auch, dass die im Rahmen des Verbundprojektes entwickelten UKP-Lasersysteme mit Strahlformung auch für andere großflächige Bearbeitungen verwendet werden. Dafür wird eine Verkaufszahl von 4 Systemen mit einem Durchschnittspreis von 180.000EUR pro Jahr erwartet.

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 SPIE Photonics West und ICALEO geplant.

## 10 Zusammenfassung

Im Verlauf des Projektes wurden ein ps-Laser hoher Pulsennergie für DLIP und ein Hochleistungs-fs-Laser für Strukturierung von Batterie-Schichten entwickelt. Basierend auf den Entwicklungsergebnissen wurden zwei Demonstratoren erstellt und charakterisiert.

Der ps-Laser-Demonstrator weist die folgenden Spezifikationen auf:

- Wellenlänge: 1064nm oder 532nm
- Pulswiederholrate: 200kHz, frei triggerbar
- Pulsdauer: 13ps
- Kohärenzlänge: > 3mm
- Pulsennergie: > 800μJ bei 1064nm und > 400μJ bei 532m
- Strahlqualität:  $M^2 < 1,3$
- Strahlverteilung: zirkular Gaussian, oder Top-hat

Dieser ps-Laserdemonstrator wurde dem Verbundpartner IWS für Prozessentwicklung zur Verfügung gestellt.

Der fs-Laserdemonstrator hat folgende Parameters:

- Wellenlänge: 1030nm
- Pulswiederholrate: 5MHz, frei triggerbar, bis 50MHz extern einstellbar
- Pulsdauer: 600fs
- Pulsennergie: 100μJ
- Max. Mittlere Leistung: 500W
- Strahlqualität:  $M^2 < 1,3$
- Intensitätsverteilung: zirkular Gaussian

Dieser fs-Laserdemonstrator wurde dem Verbundpartner KIT für Prozessentwicklung zur Verfügung gestellt.

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 UKP-Lasersystemen zur Hochgeschwindigkeitsbearbeitung von Batterien nächster Generation – 3DBat-EW“

im Rahmen des Verbundprojektes „Konzepte zum Aufbau von Elektrodenarchitekturen für Hochenergie- und Hochleistungsbatterien der nächsten Generation - Next-Gen-3DBat“

**FKZ:** WABC100355714

**Laufzeit des Projekts:** 01.02.2019 - 30.10.2022

**Zuwendungsempfänger:**

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

**Autor:**

Dr. Keming Du

**Beiträge von:**

Dr. Keming Du  
Dipl. Phys. Michael Schlösser  
M.A.S. Oliver Thom  
Dr. Jintang Huang

Das vorliegende Projekt ist ein Teilprojekt des Gesamtverbundprojekts „Konzepte zum Aufbau von Elektrodenarchitekturen für Hochenergie- und Hochleistungsbatterien der nächsten Generation“. Ziel dieses Teilprojektes ist im Rahmen des Kooperationsprojektes, dass EdgeWave GmbH einen ps-Laserdemonstrator und einen fs-Laserdemonstrator aufbaut und Techniken zur räumlichen und zeitlichen Strahlformung entwickelt. Die Laserdemonstratoren werden den Projektpartnern für das Strukturieren mittels DLIP und mittels direkten Antragens beim Projektpartner zur Verfügung gestellt. Im Verlauf des Projektes werden unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Projektpartner die Parameter der Laser inkl. der Formungsoptiken angepasst und optimiert. Dabei sind die Prozessgeschwindigkeit und Prozessqualität maßgeblich.

Gemeinsam mit Projektpartnern werden die Ergebnisse analysiert und ps-Laser und fs-Laser mit bestmöglichen Spezifikationen identifiziert. Daraus wird EdgeWave ein Lasermodell für einen effizienz- und qualitätsoptimierten Prozessschritt ableiten.

### **Entwicklungsergebnisse zum InnoSlab-Verstärker**

Für die Prozessentwicklung bei Projektpartner wurde ein Hochleistungslaser ausgelegt. Ein Laboraufbau wird erstellt. Experimentelle Untersuchungen zur Leistungsskalierung bei Pulswiederholfrequenz wurden durchgeführt. Abbildung 1 zeigt die erzielte Leistung in Abhängigkeit der Pulswiederholrate. Bei 2 MHz beträgt die Leistung 490 W. Die Pulsdauer beträgt 8 ps.

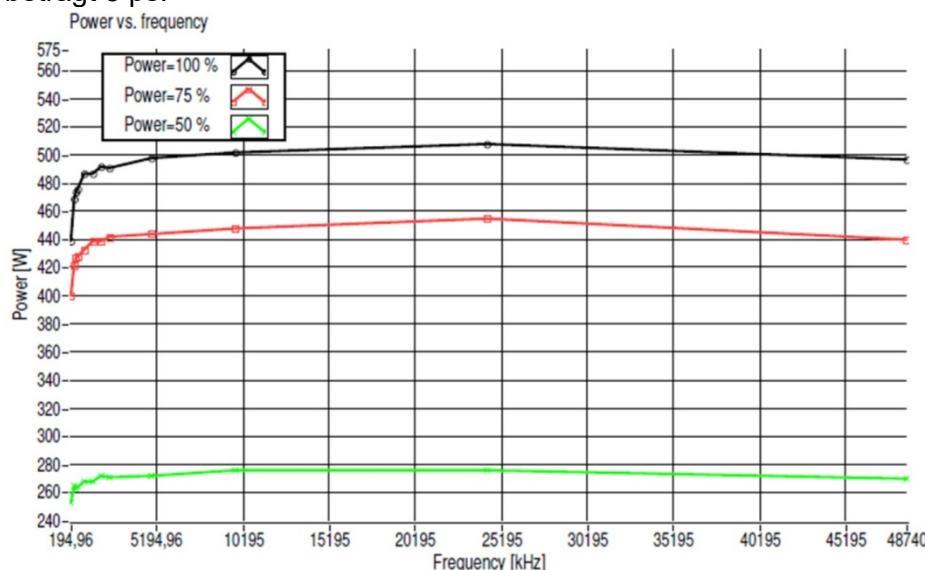


Abbildung 1: Leistung von dem Laseraufbauten in Abhängigkeit der Pulswiederholrate.

Zur Skalierung der Prozessgeschwindigkeit ist gemäß der ersten Überlegung ein Strahl mit einem länglichen Strahlquerschnitt und einer Flat-top-Intensitätsverteilung entlang der langen

Kante von Vorteil. Versuche zur Erzeugung derartiger Strahlen wurden durchgeführt. In Abbildung 2 ist ein Beispiel für die Top-Hat Intensitätsverteilung dargestellt.

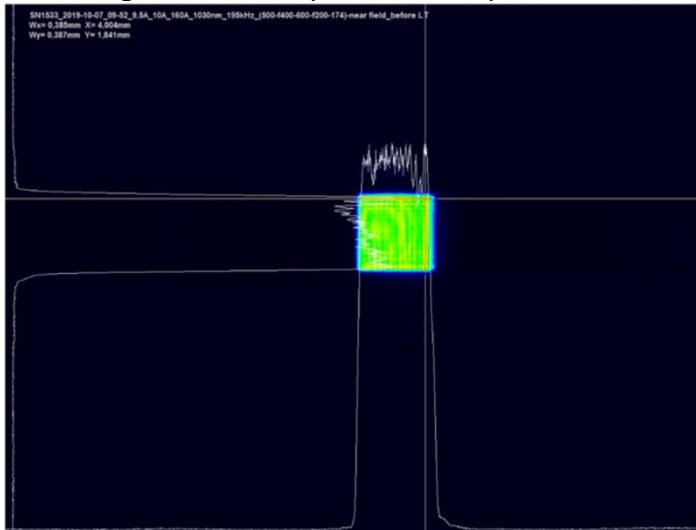


Abbildung 2: Beispiel einer Top-hat-Intensitätsverteilung.

### Zum AP 5.2: Entwicklung und Untersuchung eines optischen Aufbaus zur Aufteilung des fs-Laserstrahls

Eine Einheit zur vierfachen Aufteilung wurde ausgelegt. Sie basiert auf wiederholend Verwendung von Verzögerungsplatten und Polarisatoren. Durch die Drehung der Verzögerungsplatten können die Leistung/Pulsenergie der einzelnen Teilstrahlen an die Anwendungen eingestellt werden. Der schematische Aufbau ist in Abbildung 3 gezeigt.

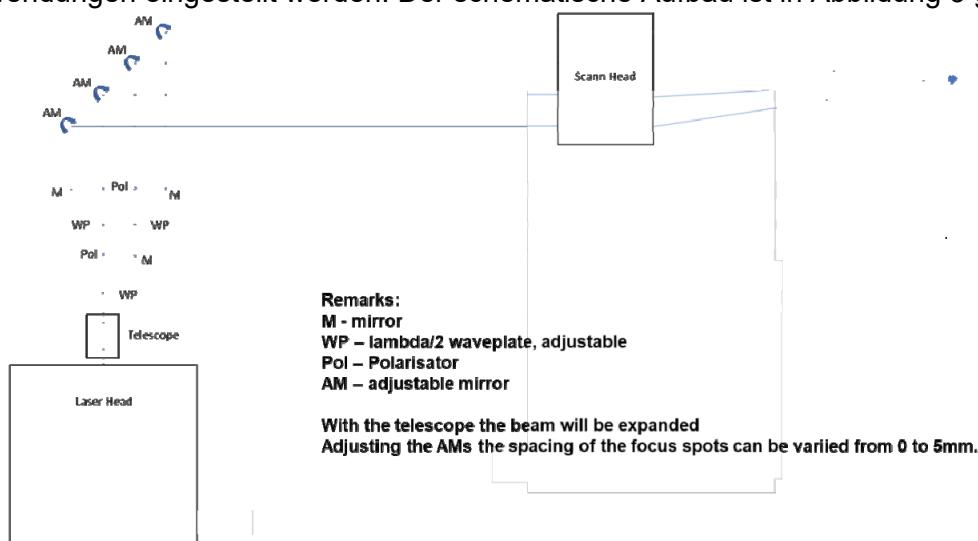


Abbildung 3: Schema einer Strahlaufteilungseinheit mit Verzögerungsplatten und Polarisatoren

Eine Einheit zur vierfachen Aufteilung wurde ausgelegt. Sie basiert auf wiederholend

Verwendung von Verzögerungsplatten und Polarisatoren. Durch die Drehung der Verzögerungsplatten können die Leistung/Pulsenergie der Einzelnen Teilstrahlen an die Anwendungen eingestellt werden. Ein Aufbau zur Aufteilung von einem fs-Laserstrahl wurde ausgelegt, konstruiert und ausgebaut.

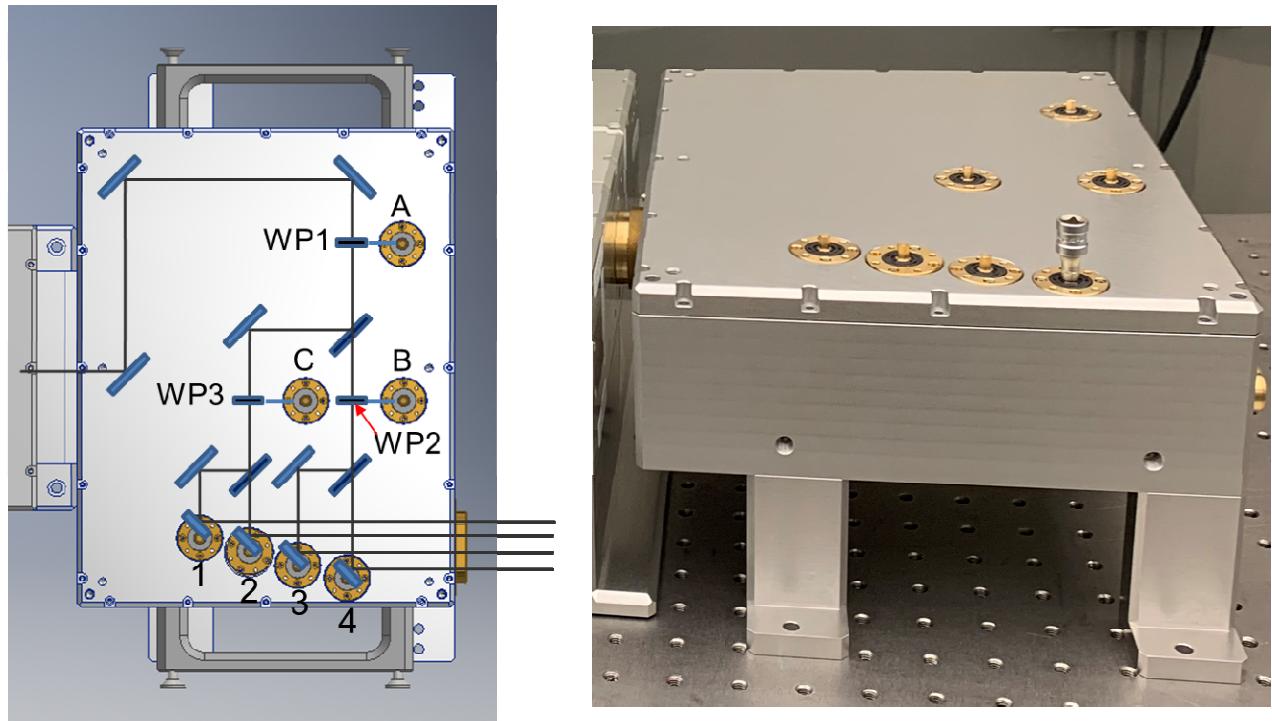


Abbildung 4: Schema (links) und Foto (rechts) der Strahlaufteilungseinheit mit Verzögerungsplatten und Polarisatoren.

Ein Aufbau zur Aufteilung von einem fs-Laserstrahl wurde ausgelegt, konstruiert und ausgebaut. Experimentell wurde die Funktionalität der Strahlaufteilungseinheit bestätigt.

Um die bestgeeigneten Laserparameter für die Elektroden-Strukturierung zu ermitteln, hatten Kollegen von Projektpartner KIT EdgeWave aufgesucht. EdgeWave hat ps-Laser, fs-Laser und GHz-Laser unterschiedlicher Wellenlängen (IR, Grün und UV) vorbereitet und die Applikationsversuche unterstützt. Dabei wurde festgestellt, dass in Summe ein IR ps-Laser hoher Leistung eine optimierte Lösung für die Ablation ist.

Anhand der Applikationsergebnisse hatten KIT und EdgeWave vereinbart, dass EdgeWave den fs-Laserdemonstrator durch einen IR ps-Laser mit einer Leistung über 400W ersetzt.

Gemäß den Applikationsergebnissen hat EdgeWave einen IR ps-Laser aufgebaut. Er ist von einem einzelnen Puls bis zu 1MHz frei triggerbar. Abbildung 5 zeigt die Leistung in Abhängigkeit der Pulswiederholrate. Bei 1MHz beträgt die Leistung 425W.

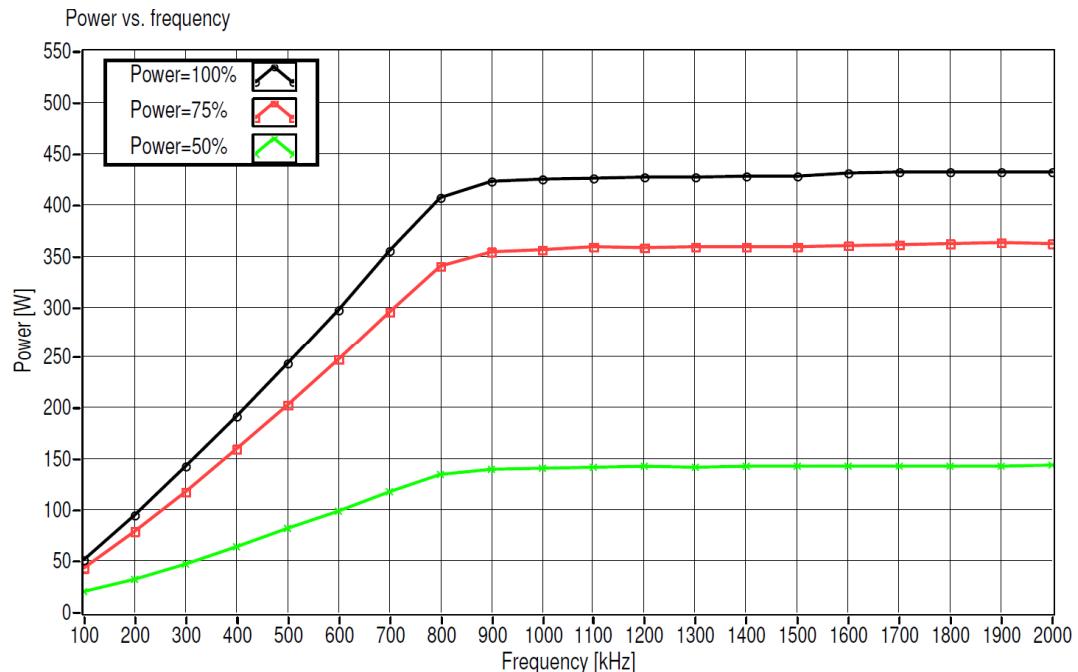


Abbildung 5: Leistung des Laseraufbaus in Abhängigkeit der Pulswiederholrate.

Der ps Demonstrator kann auch bis zu 50MHz durch externe Einstellung betrieben werden.

Abbildung 6 zeigt die Leistung in Abhängigkeit der Pulswiederholrate von 1MHz bis zu 50MHz. Bei 50MHz hat der Demonstrator über 450W mittlere Leistung.

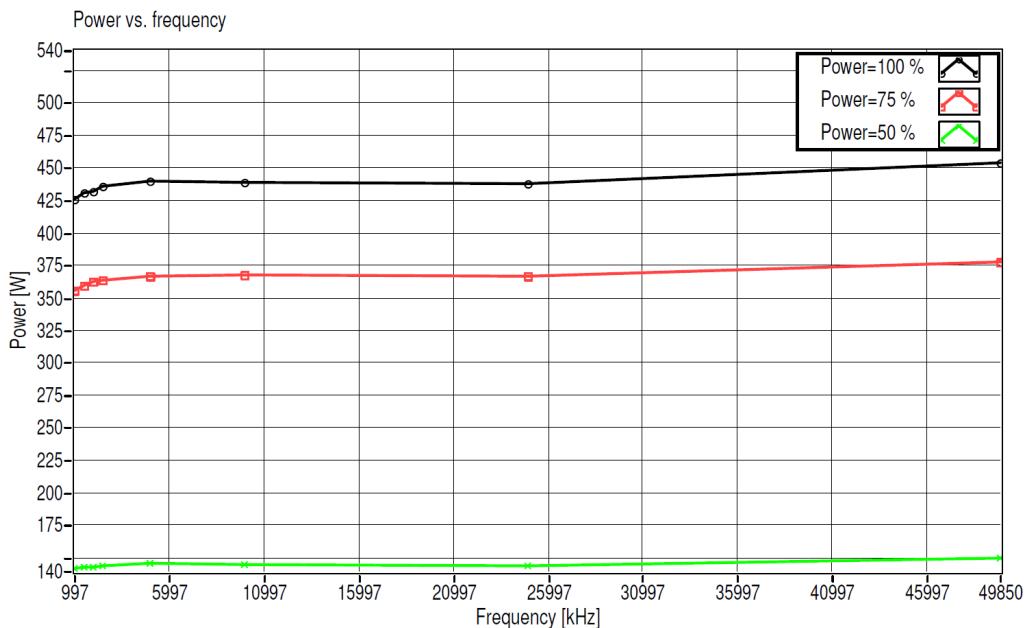


Abbildung 6: Leistung des Laseraufbaus in Abhängigkeit der Pulswiederholrate.

Abbildung 7 zeigt die Intensitätsverteilungen im Nah- und Fernfeld. Die ermittelte Strahlqualität

beträgt auch hier in beiden Richtungen  $M^2 < 1.1$ . Dies hat die Zeilspezifikation von 1.3 übertroffen.

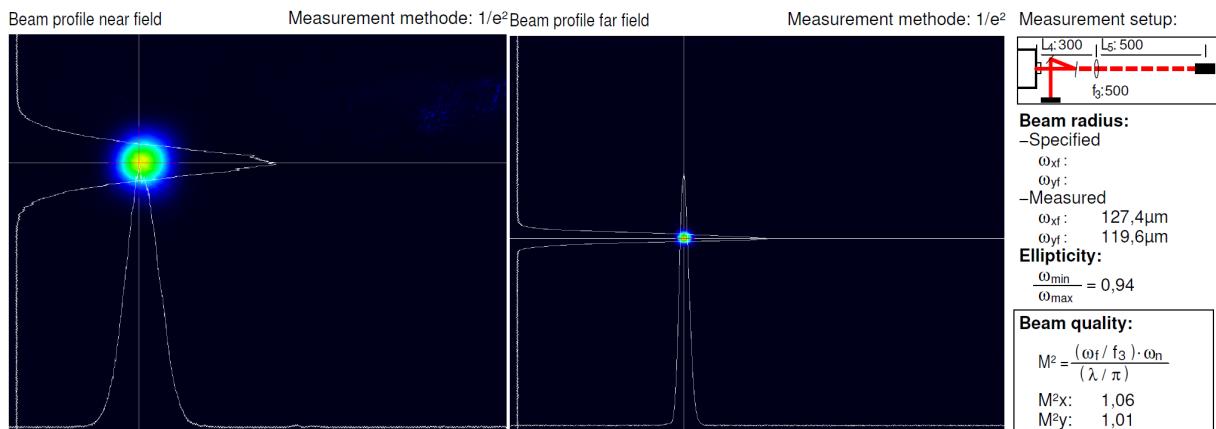


Abbildung 7: Intensitätsverteilungen im Nah- und Fern-Feld.

Der ps-Demonstrator wurde dem Projektpartner KIT für die Prozessentwicklung zur Verfügung gestellt.

Für die Prozessentwicklung wurde ein ps-Laser hoher Pulsennergie entwickelt und ein Demonstrator aufgebaut und dem Projektpartner IWS zur Verfügung gestellt. Abbildung 8 zeigt die Leistung in Abhängigkeit der Pulswiederholrate. Bei 100kHz beträgt die Leistung über 90W. Dies entspricht eine Pulsennergie über 900μJ. Die max. Leistung beträgt 220W bei 250kHz und übertrifft das Ziel erheblich.

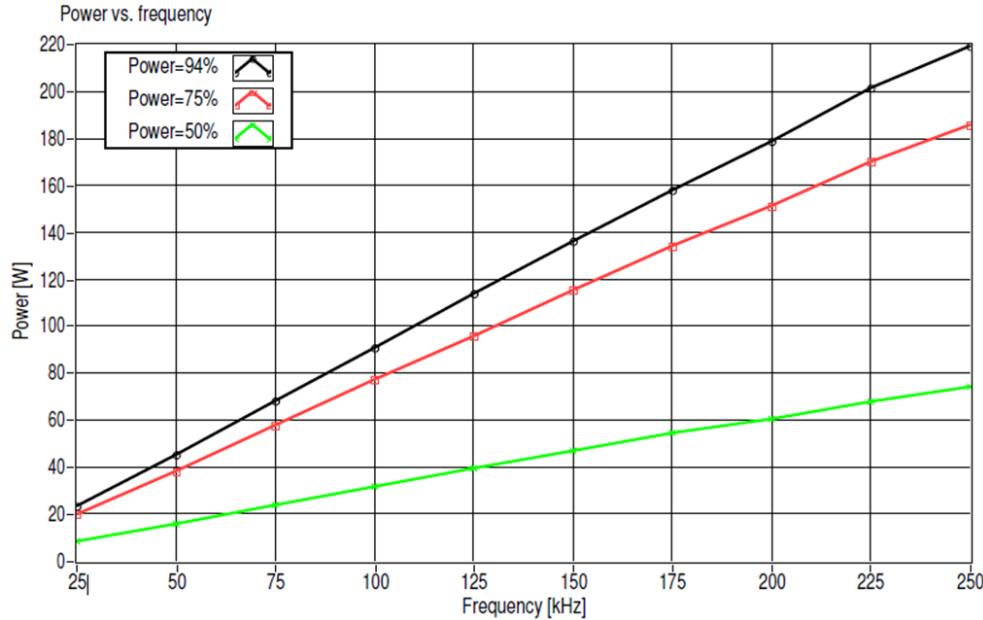


Abbildung 8: Leistung des Laseraufbaus in Abhängigkeit der Pulswiederholrate.

Abbildung 9 zeigt die Intensitätsverteilungen im Nah- und Fernfeld. Die ermittelte Strahlqualität beträgt auch hier in beiden Richtungen  $M^2 < 1.2$ .

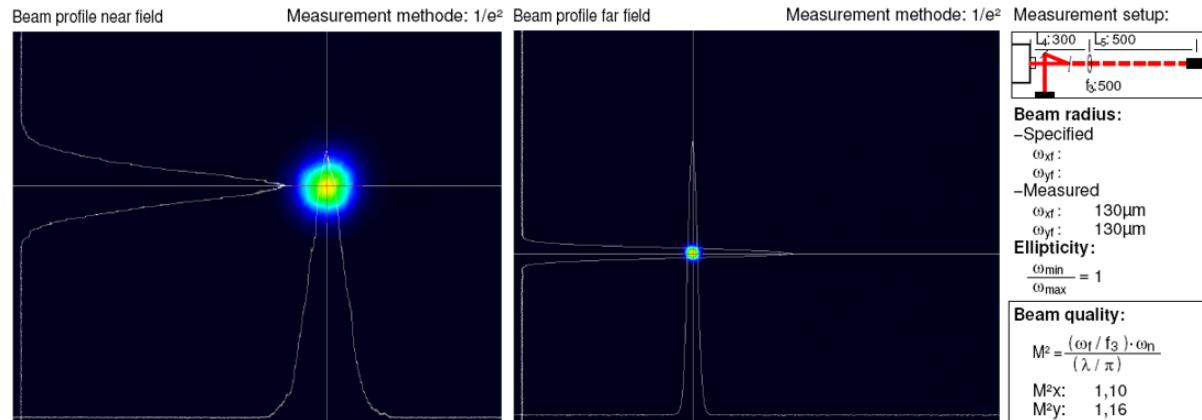


Abbildung 9: Intensitätsverteilungen im Nah- und Fern-Feld.

Abbildung 10 zeigt die Leistung in Abhängigkeit der Pulswiederholrate. Bei 100kHz beträgt die Leistung über 90W. Dies entspricht einer Pulsennergie über 900μJ. Die max. Leistung beträgt 220W bei 250kHz und übertrifft das Ziel erheblich.

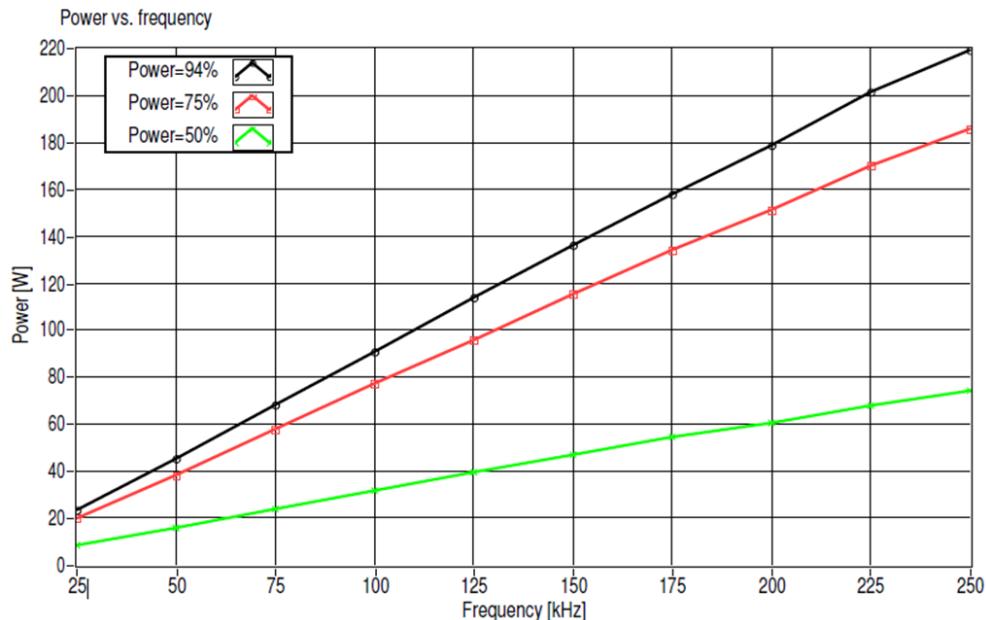


Abbildung 10: Leistung des Laseraufbaus in Abhängigkeit der Pulswiederholrate.

Abbildung 11 zeigt die Intensitätsverteilungen im Nah- und Fernfeld. Die ermittelte Strahlqualität beträgt auch hier in beiden Richtungen  $M^2 < 1.2$ .

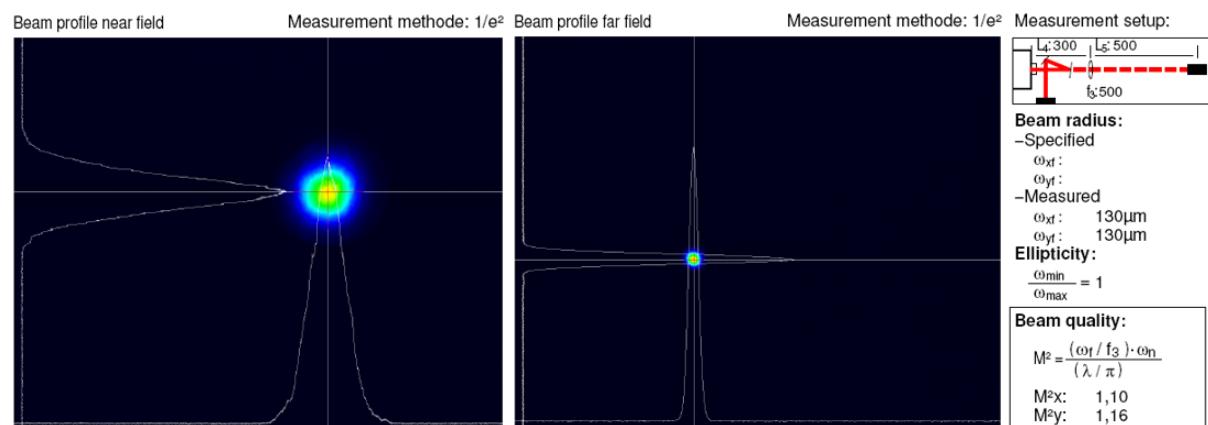


Abbildung 11: Intensitätsverteilungen im Nah- und Fern-Feld.

Abbildung 12 zeigt die 532nm Leistung in Abhängigkeit der Pulswiederholrate. Bei 100kHz beträgt die Leistung über 60W. Dies entspricht eine Pulsennergie über 600µJ. Die max. Leistung beträgt 150W bei 250kHz. Das ist zweifach wie die Zielspezifikation.

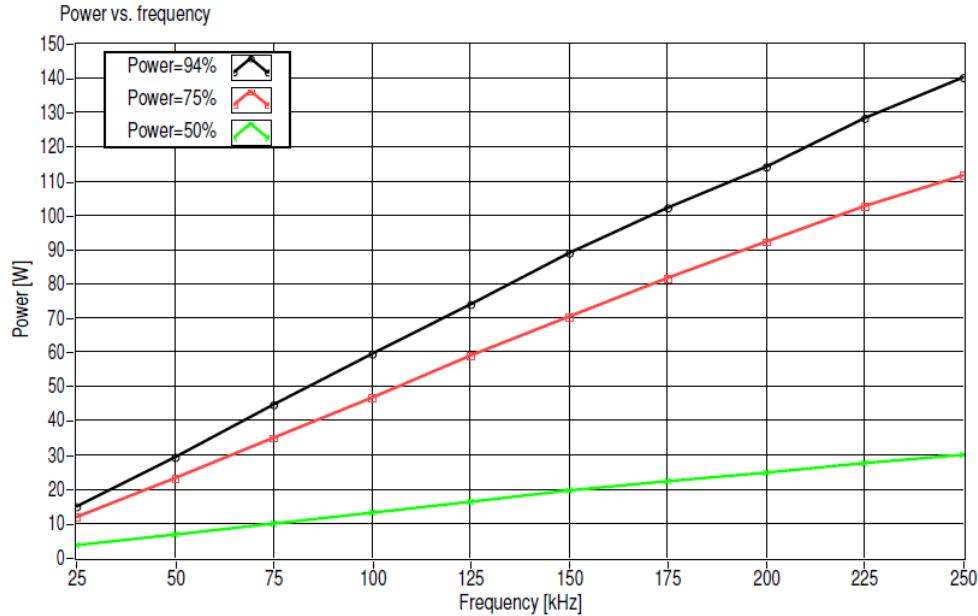


Abbildung 12: Leistung des Laseraufbaus in Abhängigkeit der Pulswiederholrate.

Abbildung 13 zeigt die Intensitätsverteilungen im Nah- und Fernfeld. Die ermittelte Strahlqualität beträgt auch hier in beiden Richtungen  $M^2 < 1.2$ .

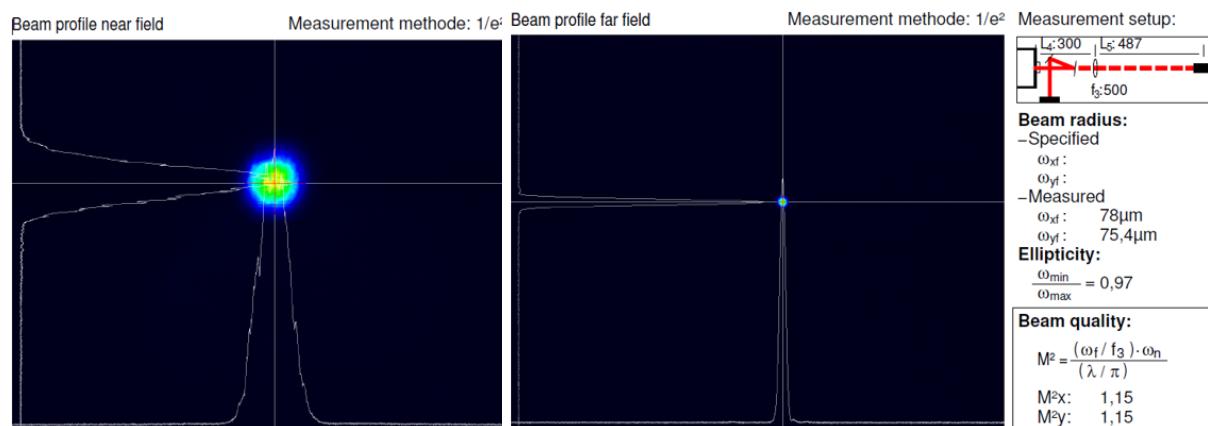


Abbildung 13: Intensitätsverteilungen im Nah- und Fern-Feld.

Das ps-Funktionsmuster wurde dem Projektpartner IWS für die Prozessentwicklung zur Verfügung gestellt.

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlußbericht
3. Titel Entwicklung von UKP-Lasersystemen zur Hochgeschwindigkeitsbearbeitung von Batterien nächster Generation – 3DBat-EW	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Dr. Keming Du Dipl. Phys. Michael Schlösser MA.S. Oliver Thom Dr. Jintang Huang	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 *) WABC100355714
	11. Seitenzahl 17
13. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz  11019 Berlin	12. Literaturangaben keine
	14. Tabellen keine
	15. Abbildungen 17
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
<p><b>18. Kurzfassung</b>          Basierend auf den Entwicklungsergebnissen wurden zwei Demonstratoren erstellt und charakterisiert.          Der ps-Laser-Demonstrator weist die folgenden Spezifikationen auf:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Wellenlänge: 1064nm oder 532nm</li> <li>- Pulswiederholrate: 200kHz, frei triggerbar</li> <li>- Pulsdauer: 13ps</li> <li>- Kohärenzlänge: &gt; 3mm</li> <li>- Pulsenegie: &gt; 800μJ bei 1064nm und &gt; 400μJ bei 532nm</li> <li>- Strahlqualität: <math>M^2 &lt; 1,3</math></li> <li>- Strahlverteilung: zirkular Gaussian, oder Top-hat</li> </ul> <p>Der fs-Laserdemonstrator hat folgende Parameters:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Wellenlänge: 1030nm</li> <li>- Pulswiederholrate: 5MHz, frei triggerbar, bis 50MHz extern einstellbar</li> <li>- Pulsdauer: 600fs</li> <li>- Pulsenegie: 100μJ</li> <li>- Max. Mittlere Leistung: 500W</li> <li>- Strahlqualität: <math>M^2 &lt; 1,3</math></li> <li>- Intensitätsverteilung: zirkular Gaussian</li> </ul> <p>Dieser ps-Laserdemonstrators wurde dem Verbundpartner KIT für Prozessentwicklung zur Verfügung gestellt.</p>	
19. Schlagwörter InnoSlab amplifier, ps-, fs-pulse, high rep rate, free trigger able, high UV average power	
20. Verlag	21. Preis

\*) Auf das Förderkennzeichen des BMBF soll auch in der Veröffentlichung hingewiesen werden.

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN geplant	2. type of document (e.g. report, publication) Schlußbericht	
3. title Development of USP laser systems for high-speed processing of next-generation batteries – 3DBat-EW		
4. author(s) (family name, first name(s)) Dr. Keming Du Dipl. Phys. Michael Schlösser MA.S. Oliver Thom Dr. Jintang Huang		5.end of project 31.08.2022
		6. publication date scheduled
		7. form of publication Paper in Journal
8. performing organization(s) (name, address) EdgeWave GmbH Innovative Laser Solutions Carlo-Schmid-Str. 19 D-52146 Würselen Tel.: 02405 4186 0		9. originator's report no.
		10. reference no. 03EE1008B
		11. no. of pages 17
13. sponsoring agency (name, address)  Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz  11019 Berlin		12. no. of references none
		14. no. of tables none
		15. no. of figures 17
16. supplementary notes		
17. presented at (title, place, date)		
18. abstract Based on the development results, two demonstrators were created and characterized. The ps laser demonstrator has the following specifications: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Wavelength: 1064nm or 532nm</li> <li>- Pulse repetition rate: 200kHz, freely triggerable</li> <li>- Pulse duration: 13ps - Coherence length: &gt; 3mm</li> <li>- Pulse energy: &gt; 800μJ at 1064nm and &gt; 400μJ at 532nm</li> <li>- Beam quality: M<sup>2</sup> &lt; 1.3</li> <li>- Beam distribution: circular Gaussian</li> </ul> The fs laser demonstrator has the following parameters: - Wavelength: 1030nm - Pulse repetition rate: 5MHz, freely triggerable, externally adjustable up to 50MHz - Pulse duration: 600fs - Pulse energy: 100μJ - Max. average power: 500W - Beam quality: M <sup>2</sup> < 1.3 - Intensity distribution: circular Gaussian This ps laser demonstrator was made available to the partner KIT for process development.		
19. keywords InnoSlab amplifier, ps-, fs-pulse, high rep rate, free trigger able, high UV average power		
20. publisher	21. price	