

# Verwendungsnachweis: Sachbericht LANG

## Verbundprojekt

Multi-Ebenen gekoppelte Laserproduktionstechnologie mit KI-basierter Entscheidungsplattform

## Teilprojekt

Inhaltliche Konzeption und Umsetzung einer selbstlernenden Lösung basierend auf künstlicher Intelligenz in einer Laserbearbeitungsplattform

**Förderkennzeichen:** 02P20A053



## in der Fördermaßnahme

Pro-DL-A: Lernende Produktionstechnik - Einsatz künstlicher Intelligenz (KI) in der Produktion

## im Förderbereich

Lernende Produktionstechnik - Einsatz künstlicher Intelligenz (KI) in der Produktion (ProLern)

## Autoren

IS Predict GmbH, Britta Hilt, Richard Martens, Universität Campus Nord D5.1 Scheer Tower, 66123 Saarbrücken, [info@ispredict.com](mailto:info@ispredict.com)

**Projektlaufzeit:** 01.08.2022 – 30.11.2025

**Erstellungsdatum:** 18.12.2025 – V1.0

### Projektkonsortium

SQL Projekt AG, Dresden (Koordinator)	SQL	02P20A050
Gesellschaft für Bild- und Signalverarbeitung (GBS) mbH, Illmenau	GBS	02P20A051
Radiusmedia KG, Bremen: Während Laufzeit wegen Insolvenz aus Projekt ausgetreten.	RAD	02P20A052
Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH, Kaiserslautern	DFKI	02P20A054
Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS, Dresden	IWS	02P20A055
Erich Utsch AG, Siegen	UTSCH	02P20A056
Pulsar Photonics GmbH, Herzogenrath	PULS	02P20A057

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde durch das Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Forschung, Technologie  
und Raumfahrt

## Inhaltsverzeichnis

I.	Motivation und Aufgabenstellung .....	3
II.	Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens .....	3
III.	Planung und Ablauf des Vorhabens .....	4
III.1	Arbeitspaket 1: Industrielle Anforderungen und Spezifikation .....	6
III.2	Arbeitspaket 2: Cyberphysische Lasertechnologie .....	7
III.3	Arbeitspaket 3: Digitales KI-Expertensystem: Intro.....	7
III.3.1	Strukturperiode / Pulsstärke.....	8
III.3.2	Strukturperiode / Pulsstärke mit UKP-Audiodateien.....	11
III.3.3	Arbeitsposition .....	12
III.4	Arbeitspaket 6: Systemintegration, Validierung und Verwertung .....	15
III.5	Arbeitspaket 7: Öffentlichkeitsarbeit Verbundprojekt .....	16
IV.	Erzielte Ergebnisse .....	17
V.	Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen.....	17
VI.	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit der Ergebnisse..	18
VII.	Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb des Verbundprojektes .....	18
VIII.	Veröffentlichungen, Vorträge, Referate, etc.....	18
IX.	Abbildungsverzeichnis .....	20
X.	Literaturverzeichnis .....	20

## I. Motivation und Aufgabenstellung

Deutschland gilt international als einer der Vorreiter bei Produktionstechnologien und Produkten, besonders in der Photonik-basierten Industrie, mit über 1.000 Unternehmen, ca. 138.000 Beschäftigten und einem Umsatz von über 37 Mrd. Euro (2018) (SPECTARIS (2017 ff.), 2016).

Der Laser wird als etabliertes photonisches Werkzeug in der Industrie genutzt und treibt den Wandel zu laserbasierten Prozessen statt klassischer Fertigungsverfahren voran. Digitalisierung verknüpft Produktionstechnik mit Cyber-Physischen Systemen (CPS) und ermöglicht vernetzte, virtualisierte Prozesse. Ziel ist eine Produktivitätssteigerung sowie lückenlose Nachverfolgbarkeit einzelner Prozessschritte. Da es enorme Einstellmöglichkeiten gibt, ist die Identifikation prozessstabiler Parameter zentral. Die Auswertung nano/mikroskopischer Topographien ist jedoch zeitaufwendig und wenig automatisiert, insbesondere bei disruptiven, lasertechnologischen Ansätzen wie Direkte Laserinterferenzstrukturierung.

KI-basierte Ansätze ermöglichen vorausschauende Analysen zur frühzeitigen Erkennung von Minderqualitäten und Stillständen. Benötigt wird dazu jedoch optimaler Weise eine ganzheitliche, prozessintegrierte Datenerhebung, damit ein selbstlernendes Produktionssteuerungssystem adaptiv das Optimum erzielt.

KI-basierte Systeme versprechen Vorteile wie geringere Fehlerraten, höhere Arbeitsgeschwindigkeit und erleichterte Bediener-Schulung.

**Daher ist es die Aufgabe in diesem Teilprojekt, prototypisch eine KI-Expertenplattform zu entwickeln, die anhand von Geräuschen, die der Laserpuls erzeugt, erkennt, ob es Fehler in den Qualitäts-relevanten Einstellungen des Lasers gibt. Die Datenaufnahme und -analyse soll automatisiert erfolgen, um skalierbar einsetzbar zu sein.**

Im Gesamtprojekt vereint sich ein ambitioniertes Konsortium aus den Bereichen Lasertechnologie (Pulsar Photonics GmbH, Erich Utsch AG, Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS sowie Gesellschaft für Bild- und Signalverarbeitung (GBS) mbH), Mensch-Maschine Interaktion (Radiusmedia KG und Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH), Datenkommunikation (SQL Projekt AG) sowie Künstlicher Intelligenz (IS Predict GmbH) mit der Vision, eine disruptive Laserfertigungstechnologie basierend auf Direkter Laserinterferenz unterstützt durch Augmented Reality (AR) mit einer KI-basierten, lernenden Expertenplattform zu koppeln. Das Ziel ist die vollständige Steuerung von Laserprozesstechnik mit Hilfe von KI-basierten intuitiven Mensch-Maschine Schnittstellen im Kontext einer lernenden Produktionsplattform zur Funktionalisierung von Oberflächen.

IS Predict fokussiert sich seit vielen Jahren auf KI-Analysen im Produktionsumfeld mit dem Ziel der Qualitätsverbesserung („Predictive Quality“) und der verlässlichen Maschinennutzung („Predictive Maintenance“). Dazu wird die eigene KI-Software PREDICTIVE INTELLIGENCE mit ihrer Selbstlernalgorithmik stetig weiterentwickelt. PREDICTIVE INTELLIGENCE wurde auch in diesem Projekt als Basis eingesetzt.

## II. Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Trotz der starken Verbreitung des Einsatzes von Methoden aus dem Bereichen der künstlichen Intelligenz in fast allen Forschungsgebieten gehört die Mikromaterialbearbeitung zu einem Gebiet, in welchem es vergleichsweise wenig veröffentlichte Studien gibt. Dies liegt insbesondere an dem dafür nötigen hohen Expertenwissen für die Interpretation der Daten und dem hohen Aufwand zur Gewinnung der Daten. Mit zunehmender Leistungsfähigkeit der Mikromaterialbearbeitung gewinnt jedoch die Vorhersage der resultierenden Oberflächeneigenschaften immer mehr an Bedeutung, um die Entwicklungszeit dieser Funktionalitäten zu verkürzen. Fortschrittliche Ansätze zur Vorhersage der

Eigenschaften von laserbearbeiteten Oberflächen - die so genannte prädiktive Modellierung - sind erforderlich.

Bei konventionellen Bearbeitungsmethoden wie dem Fräsen wurden bereits erfolgreich KI-gestützte Vorhersagemodelle für die Qualität der resultierten Oberfläche genutzt. Dabei wurden die verschiedenen Ansätze von künstlichen neuronalen Netzen, multiple Regressions-Methoden und Bayes'sche Netze untersucht. Erste Ergebnisse wurden auch bereits für die Mikromaterialbearbeitung erzielt: So konnte das Vorhersagemodell für den Kontaktwinkel nach Wenzel (Multi-Sensor System for Real-Time Monitoring of Laser Micro-Structuring, Dez. 2019) mit Rauheitsparametern (insbesondere Sdr; ISO25178) als Maß für die durch den Laserprozess erzeugten Oberflächenveränderung mit dem resultierenden Benetzungsverhalten verknüpft werden. In Folge kann der resultierende Kontaktwinkel (zum Beispiel als Maß der Zelladhäsion oder des Selbstreinigungseffekts der Oberfläche) vorhergesagt und folglich ein einfaches Modell zur Vorhersage der Biokompatibilität für Bauteile erstellt werden.

Die Gewinnung der Daten für die Netze stellt dabei immer wieder eine Herausforderung dar.

Daher gab es in diesem Projekt nicht „nur“ die analytische Aufgabe, sondern auch die Automatisierungsaufgaben, nämlich einerseits die Daten automatisiert zu beschaffen, andererseits die Analysen automatisiert durchzuführen und schließlich die Analyseergebnisse zur Weiterverarbeitung ebenfalls wieder automatisiert bereitzustellen.

### III. Planung und Ablauf des Vorhabens

Im zahlenmäßigen Nachweis sind die Personalkosten die größte Position, zum größten Teil für die Data Scientist-Arbeiten, gefolgt von Qualitätsmanagement-Arbeiten und im geringen Teil für Projektmanagement. Es wurde ein Unterauftrag für Software Engineering-Dienstleistung vergeben. Es wurde exzessiv ein leistungsfähiger Server mit GPU zum Antrainieren und Nachtrainieren der Modelle genutzt.

Das Gesamtprojekt wurde in 7 fachlichen Arbeitspaketen (APs) durchgeführt:

- |  |                                |
|--|--------------------------------|
| • AP1: Industrielle Anforderungen und Spezifikation  | Mitarbeit                      |
| • AP2: Cyberphysische Lasertechnologie               | Mitarbeit                      |
| • AP3: Digitales KI-Expertensystem                   | Leitung und Fokus der Arbeiten |
| • AP4: Augmented Reality                             | keine Mitarbeit                |
| • AP5: Vorhersagen von Oberflächenfunktionen         | keine Mitarbeit                |
| • AP6: Systemintegration, Validierung und Verwertung | Mitarbeit                      |
| • AP7: Öffentlichkeitsarbeit Verbundprojekt          | Mitarbeit                      |
| • Sowie: AP8: Projektmanagement/Bericht              | Mitarbeit                      |

Der folgende Ablaufplan zeigt die Projektstrukturierung.

Dunkelgrün hervorgehoben sind die Veränderungen gegenüber der ursprünglichen Planung. Diese wurden notwendig, da sich das Erstellen der Daten für das Antrainieren der KI-Modelle verzögerte. Grund war der mehrfache Ausfall der Laseranlage der KI-Testbench des Fraunhofer IWS und Verzögerungen beim externen Dienstleister für die Reparatur der Anlage. Folglich kamen auch die KI-Datenanalysen deutlich in Verzug.

Nur durch die hier durchgeführten Arbeiten konnten die sehr guten Ergebnisse erzielt werden.

Die Arbeiten waren aufgrund der Komplexität der Aufgaben notwendig und auch angemessen.

# MEDIUS - Multi-Ebenen gekoppelte Laserproduktionstechnologie mit KI-basierter Entscheidungsplattform

## Forschungsprojekt

	Forschungsprojekt																																									
	Jahr 2022					Jahr 2023												Jahr 2024												Jahr 2025												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40		
Aug 22	Sep 22	OkT 22	Nov 22	Dec 22	Jan 23	Feb 23	März 23	Apr 23	Mai 23	Jun 23	Juli 23	Aug 23	Sep 23	OkT 23	Nov 23	Dec 23	Jan 24	Feb 24	März 24	Apr 24	Mai 24	Jun 24	Juli 24	Aug 24	Sep 24	OkT 24	Nov 24	Dec 24	Jan 25	Feb 25	März 25	Apr 25	Mai 25	Jun 25	Juli 25	Aug 25	Sep 25	OkT 25	Nov 25			
<b>AP 1</b>	<b>Industrielle Anforderungen und Spezifikation</b>																																									
Task 1.1																																										
Task 1.2																																										
Task 1.3																																										
<b>AP 2</b>	<b>Cyberphysische Lasertechnologie</b>																																									
Task 2.1																																										
Task 2.2																																										
Task 2.3																																										
Task 2.4																																										
Task 2.5																																										
<b>AP 3</b>	<b>Digitales KI-Expertensystem</b>																																									
Task 3.1																																										
Task 3.2																																										
Task 3.3																																										
Task 3.4																																										
<b>AP 4</b>	<b>Augmented Reality</b>																																									
Task 4.1																																										
Task 4.2																																										
Task 4.3																																										
Task 4.4																																										
Task 4.5																																										
<b>AP 5</b>	<b>Vorhersagen von Oberflächenfunktionen</b>																																									
Task 5.1																																										
Task 5.2																																										
Task 5.3																																										
<b>AP 6</b>	<b>Systemintegration, Validierung und Verwertung</b>																																									
Task 6.1																																										
Task 6.2																																										
Task 6.3																																										
Task 6.4																																										
<b>AP7</b>	<b>Öffentlichkeitsarbeit Verbundprojekt</b>																																									
Task 7.1																																										
Task 7.2																																										
<b>AP8</b>	<b>Projektmanagement/Bericht</b>																																									

Veränderung

Im Folgenden sind die wesentlichen Projektarbeiten dargestellt.

### III.1 Arbeitspaket 1: Industrielle Anforderungen und Spezifikation

In diesem Arbeitspaket wurde das Verständnis über Laserprozesse aufgebaut, sowie die Use Cases für die KI-Nutzung definiert und priorisiert, wobei die Anwenderseite (Pulsar, Utsch) hier stark die Diskussion beeinflusst hat. Auch wenn dieses AP laut Plan in den ersten sechs Monaten bearbeitet werden sollte, wurden im späteren Verlauf weitere detaillierte Anforderungsanalysen mit den Laserexperten durchgeführt. Dies war sinnvoll, da einerseits sehr gute Ergebnisse für die zu Beginn definierte analytische Fragestellung erzielt werden konnten und andererseits noch forschungsrelevante analytische Fragestellungen mit hohem Nutzungspotential offen waren.

In den KI-Analysen ging es darum, Audioaufnahmen von Laserpulsen auszuwerten. Es sollte herausgefunden werden, ob am Geräusch des Laserpulses erkannt werden kann, ob es einerseits fehlerhafte Konfigurationen oder andererseits Fehler in der Positionierung des zu bearbeitenden Material gibt. Die Geräusche entstehen, wenn der Laser die Oberfläche bearbeitet und dabei die erzeugte Hitze das zu bearbeitende Oberflächenmaterial vaporisiert.

Die folgende Grafik zeigt eine Laserbearbeitung, wobei zu beachten ist, dass ein Blick in den Laserstrahl für die Augen schädlich wäre. Daher wird nur mit Hilfe eines Schutzglases auf den Laserpuls geschaut. Dieses Schutzglas filtert den Laserstrahl aus. Was man jedoch sieht, ist die Reaktion auf der Oberfläche des Materials.

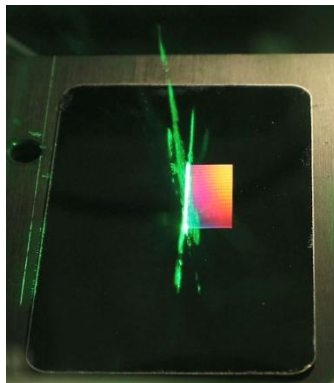


Abbildung 1: Lichtreflektion während der Oberflächenbearbeitung durch einen Laser.

Im Projekt wurden drei analytische Fragestellungen erforscht:

#### Analytische Fragestellungen



Können anhand des **Geräusches** des **Laserpuls**  
**Fehler in den Qualitäts-relevanten Einstellung** des  
Lasers **erkannt** werden?

1.

2.

a) Strukturperiode  
b) Pulsstärke

c) Arbeitsposition

www.ispredict.com | Copyright 2025

Abbildung 2: Drei analytische Fragestellungen wurden in dem Teilprojekt erforscht.

## III.2 Arbeitspaket 2: Cyberphysische Lasertechnologie

In diesem Arbeitspaket wurde hauptsächlich mit IWS und Pulsar (Rolle „Datenlieferant“) und mit SQL (Rolle „Daten- und Prozessintegrator“) zusammengearbeitet. Es fanden zwar auch Abstimmungen mit RadiusMedia und DFKI (Rolle „Nutzer der KI-Ergebnisse“) statt, jedoch war dies darauf reduziert, welche KI-Ergebnisse der Endnutzer wie fachlich benötigt. Die technische Umsetzung wurde mit SQL abgestimmt und umgesetzt.

Zur Datenbereitstellung, Datenanalyse und Ergebnisbereitstellung wurden daher folgende Automatismen umgesetzt: Eine Lasermaschine (von IWS oder Pulsar) strukturiert Material, die Lasereinstellungen werden in einer Datenbank (IWS) dokumentiert, die aufgenommenen Laserpulse werden ebenfalls als Audiodatei abgelegt und der jeweiligen Feldbearbeitung zugeordnet (ebenfalls IWS). Transconnect (SQL) – als Single Source of Truth - stößt daraufhin automatisiert die entsprechende KI-Analyse an. Die KI-Analyse wird automatisiert durchgeführt, das Ergebnis wird automatisiert referenziert und steht für weitere Bearbeitungen über Transconnect (bspw. in Augmented Reality-Lösungen von RadiusMedia) zur Verfügung.

Die folgende Abbildung zeigt eine Visualisierung der in der Datenbank zur Verfügung stehenden Laserdaten.

### Daten zu Laserprozess

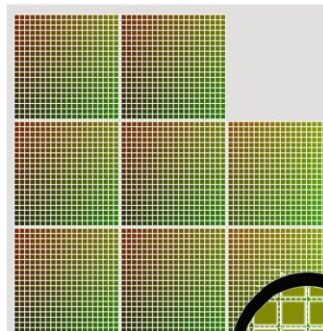


#### Laser Parameters

	name	value	unit
0	Power	26.0000	%
1	Markspeed	80.0000	mm/s
2	HatchDistance	0.0230	mm
3	Frequency	10.0000	kHz
4	Prisma	5.0000	mm
5	Timer_Wait_Distance	2.0000	mm

#### Batch Information

	value
user	fraunhofer
sample	0857327f-61d4-44f7-9c67-6907a9d3c7fb
experiment	{'project': '0ab05a73-6bbe-4cca-b20f-a2a962840c64', 'group': None, 'uid': 'f551d7a8-c4c8-49a3-b251-9656440f3d51', 'name': 'Audio'}
batch_type	{'id': 1, 'name': 'Matrix'}
uid	a039f62-37bd-4649-913f-45537dcd4815
name	M_Audio2_M550_05_P30_02_focus
start_time	2025-05-15T23:05:25.828000Z
end_time	2025-05-16T02:10:09.104000Z
x	7.0
y	7.0
length	44.2
width	44.2



#### Field Information

	Value
laser_batch	a039f62-37bd-4649-913f-45537dcd4815
laser_profile	{'id': 2, 'name': 'Edgewave SN3016', 'distribution_func': 'TestTets'}
preset	<NA>
uid	5428d49e-306c-4530-bad3-e5169b08305d
name	124
start_time	2025-05-15T23:36:55.631000Z
end_time	2025-05-15T23:37:25.325000Z
x	13.4
y	6.8
z	-60.6
length	2.0
width	2.0
layer	0
is_processed	True
x_image	20.4
y_image	13.8

www.ispredict.com | Copyright 2025

Abbildung 3: Daten der Laserstrukturierung stehen über „Single Point of Truth“ für KI-Analyse zur Verfügung

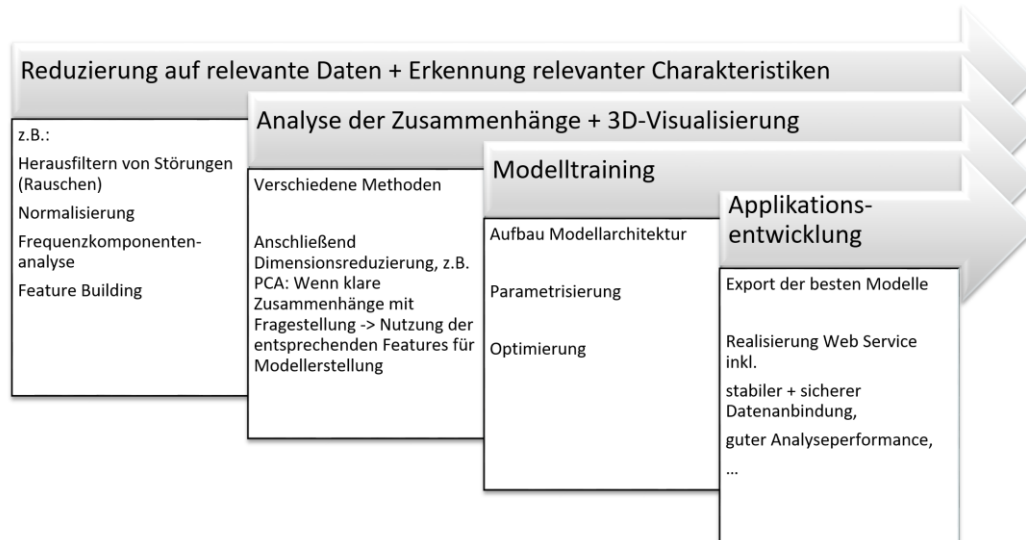
## III.3 Arbeitspaket 3: Digitales KI-Expertensystem: Intro

In diesem AP lag der Kern der Arbeiten: Der Aufbau von geeigneten KI-Modellen zur qualitätsrelevanten Analyse der Laserpulsgeräusche. Hier wurden daher einerseits die meisten Personalaufwände in den unterschiedlichen Rollen, hauptsächlich Data Scientist und Qualitätsmanager, investiert, sowie die Unterstützung durch den Unterauftrag realisiert. Außerdem wurde hier ein Server mit leistungsstarker GPU exzessiv genutzt.

In AP1 wurde das grundlegende Daten- und Prozessverständnis aufgebaut. Jedoch musste im AP 3 tiefer ins Detail gegangen werden, da abhängig von der analytischen Fragestellung unterschiedliches Laser-Expertenwissen notwendig war.

Für alle in diesem Projekt erforschten analytischen Fragestellungen wurde ein KI-Prototyp nach folgendem Schema realisiert:

## Entwicklungsprozess für KI-Prototyp



www.ispredict.com | Copyright 2025

Abbildung 4: Vorgehen für alle zu bearbeitenden analytischen Fragestellungen

### III.3.1 Strukturperiode / Pulsstärke

In diesem Abschnitt werden die geleisteten Projektarbeiten beschrieben, um die analytischen Fragestellungen zu beantworten, ob anhand des Geräusches des Laserpuls Fehler in den qualitätsrelevanten Einstellungen des Lasers erkannt werden können, nämlich der Strukturperiode oder der Pulsstärke.

In Kooperation mit dem Konsortiumspartner Fraunhofer IWS wurden Experimente für die Erkennung der Strukturperiode und der Laserstärke durchgeführt. Insgesamt wurden ca. 800 Experimente realisiert und dabei Audiodateien aufgenommen. Dabei hatte der Laser unterschiedliche Eigenschaften.

- Laserstärke mit 70% oder 80% oder 90% oder 100 %
- Laserstrukturperiode mit 4 oder 6 oder 8  $\mu\text{m}$

Ziel war es, mit Hilfe des Audiosignals die Laserstärke und die Strukturperiode zu erkennen.

Der Laser bearbeitet eine Oberfläche mit mehreren Pulsen.

- In der folgenden Grafik ist die bearbeitete Oberfläche links dargestellt.
- Oben rechts sieht man die Vergrößerung und kann die einzelnen Pulse daher gut erkennen.
- Unten sieht man das Audiosignal eines Pulses exemplarisch dargestellt.

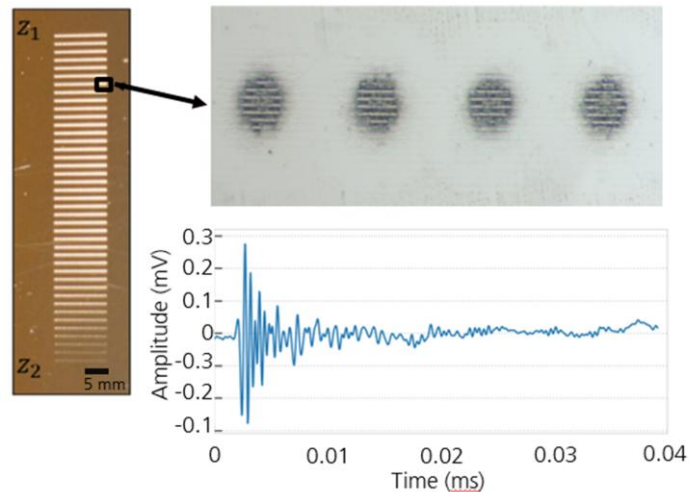


Abbildung 5: Laser bearbeitet Oberfläche in mehreren Pulsen und erzeugt dabei ein Audiosignal.

Danach wurde die Datenqualität mit Blick auf die analytische Aufgabe bewertet. Hierbei wurden die Daten einer Vorverarbeitung unterzogen, damit nicht relevante Daten / Störungen herausgefiltert werden können. So wurden bspw. die Audiosequenzen vor und nach dem Laserprozess herausgeschnitten und nur der linke Kanal der Audiodateien genutzt. Außerdem wurden 13 statistische Faktoren pro Audiodatei abgeleitet.

807 Audiodateien mit jeweils 13 Faktoren zu visualisieren ist aufgrund der Komplexität nicht möglich. Um trotzdem einen Eindruck zu vermitteln, wurde daher die sogenannte PCA-Methode angewendet. Die 13 Faktoren wurden auf 3 Faktoren reduziert. Dadurch wurde eine 3D-Grafik ermöglicht.

PCA steht für Principal Component Analysis; Siehe: (Wikipedia, Principal Component Analysis)

Die folgende Grafik zeigt die Gruppierungen der Audiodateien. Hierbei sieht man, dass selbst wenn zwei Eigenschaften gleich sind, also bspw. die Laserperiode 4  $\mu\text{m}$  hat und die Laserstärke 70% ist, die anderen Eigenschaften eine deutliche Varianz in dieser Punktwolke bilden.

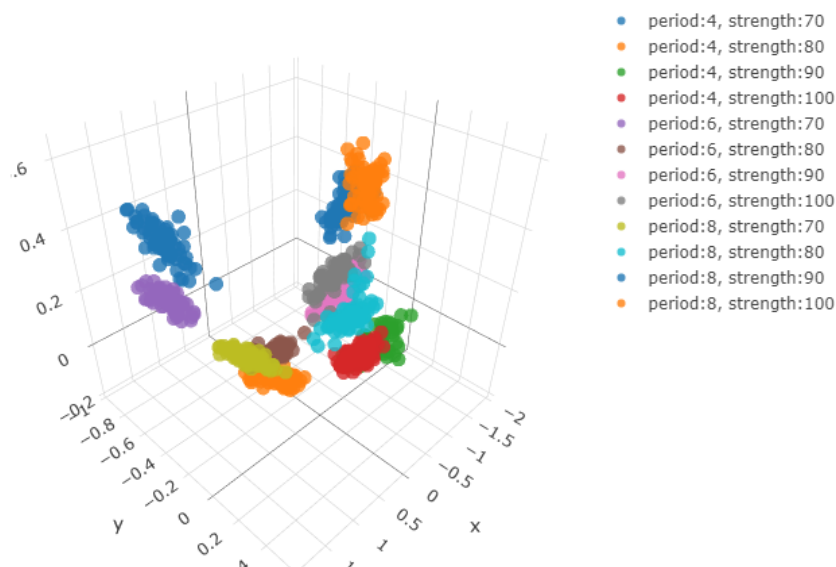
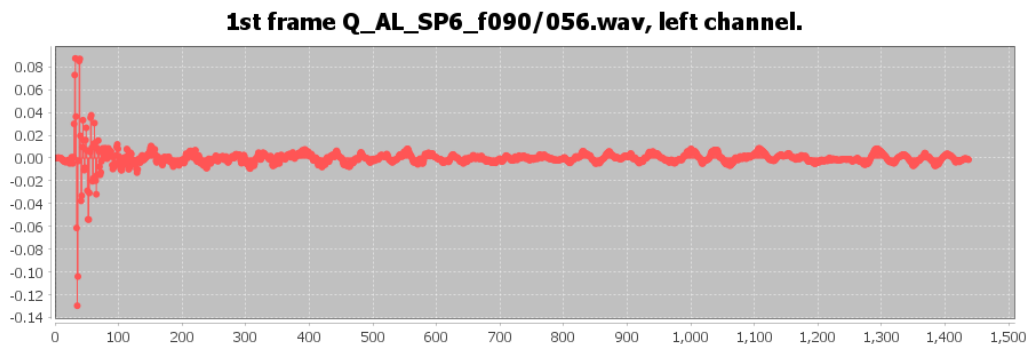


Abbildung 6: 3D-Punktwolke nach PCA-Analyse zur Visualisierung der Audiodateien

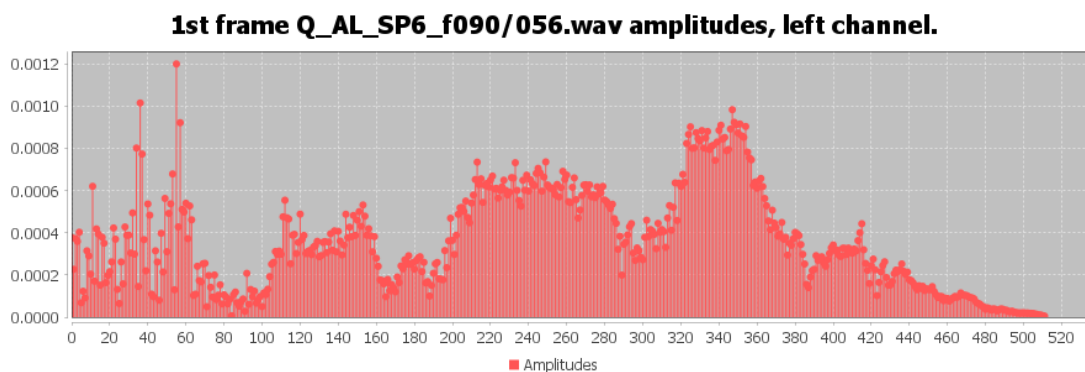
Die folgende Grafik zeigt eine typische Audiofrequenz nach Datenverarbeitungsverfahren als Vorbereitung für Machine Learning / KI.

In der Grafik wird eine Laserablation, also ein Laserpuls, in einer Dauer von 15 Millisekunden verarbeitet. (Jede aufgenommene Audiodatei besteht aus 52 – 65 Pulsen, wobei zur Vergleichbarkeit auf die ersten 52 Pulse reduziert wurde.)



*Abbildung 7: Audiosignal eines Laserpuls nach erster Vorverarbeitung*

Danach wurden Datentransformationen durchgeführt wie bspw. Fourier als Vorbereitung zur Anwendung von KI-Algorithmik. Die folgende Grafik zeigt eine entsprechende Audiosequenz:



*Abbildung 8: Audiosignal eines Laserpuls nach Fourier-Transformation*

Es wurden verschiedene Neuronale Netze angewendet. Jedoch stellte sich heraus, dass die Anzahl der Daten nicht ausreicht, um Netze erfolgreich anzutrainieren.

Daher wurden andere Machine Learning-Verfahren ausprobiert, die weniger Daten benötigen als Neuronale Netze. Diese Verfahren sind zwar nicht so flexibel wie Neuronale Netze, aber trotzdem für den konkreten Anwendungsfall sinnvoll. Sie sind nicht Modell-basiert, sondern gehen auf spezifische Algorithmen zurück, wie bspw. Klassifikationsverfahren. Die Verfahren „Random Forest Algorithms“ und „KNN Algorithmen“ (k-nearest neighbors) zeigten die besten Ergebnisse. Siehe Random Forest (Wikipedia, Random Forest) und KNN (Wikipedia, KNN).

Die Ergebnisse beider Algorithmen sind ähnlich, wobei KNN deutlich schneller die Ergebnisse liefert. Daher wurden die Arbeiten mit KNN fortgesetzt.

Hinweis:

Die Genauigkeit wird typischerweise in „Precision“ gemessen. Siehe (Wikipedia, Precision).

Die folgende Abbildung zeigt, dass sehr hohe Genauigkeiten erzielt wurden.

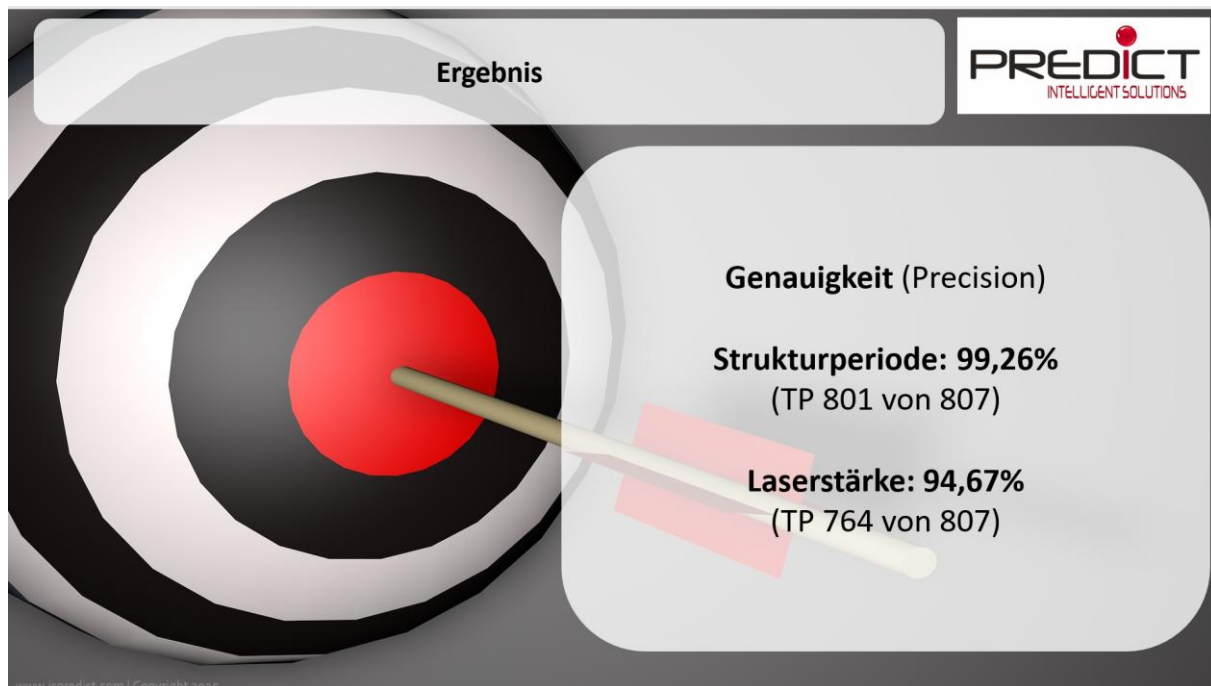


Abbildung 9: Ergebnis KI-Analyse zur Erkennung der Strukturperiode und der Laserstärke

Somit konnten die Arbeiten erfolgreich abgeschlossen werden.

### III.3.2 Strukturperiode / Pulsstärke mit UKP-Audiodateien

Fraunhofer IWS führte Experimente durch mit Ultra Kurz Pulsen (UKP). Die Lasergeräusche wurden ebenfalls aufgenommen und zur Analyse zur Verfügung gestellt mit dem Ziel, Strukturperiode und Laserstärke anhand der Audiodatei zu erkennen.

Diese Audiodateien sind – sehr – kurz. Die Pulsfrequenz beträgt 10 kHz.

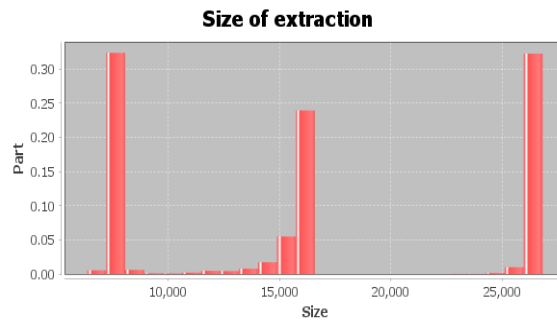
Auch hier wurden notwendige Vorverarbeitungen vorgenommen, um die nicht relevanten Daten zu erkennen und zu eliminieren, wie bspw. Reduzierung des Signals. Dadurch erhielt man pro Signal 4.000 – 28.000 Werte (=0,04 – 0,3 Sekunden).

Zum Vergleich:

Im 1. Datensatz waren es mit ca. 75.000 Werte pro Audiodatei deutlich mehr Werte (1.438 Werte \* 52 Intervalle = 74.778 Werte).

Die folgende Abbildung zeigt die – geringe – Anzahl der Werte pro Audiosignal:

- Ca. 1/3 der Daten < 8.000 Werte
- Ca. 1/3 der Daten zwischen 8.000 – 16.000 Werte
- Ca. 1/3 der Daten > 16.000 Werte



Nach gängigen Statistikregeln werden jedoch bei einer 10 kHz-Frequenz mindestens 20.000 Werte pro Sample benötigt. (Siehe hierzu „Nyquist-Shannon sampling theorem“:  $10 \text{ kHz} * 2$  (Wikipedia, Shannon Sampling Theorem)).

Entsprechend konnten nur ca. 1/3 der Daten für die Analyse herangezogen werden. Daher wurde mit den Konsortialpartnern besprochen, dass ein neuer Datensatz notwendig wäre mit mindestens der doppelten Frequenz, damit die analysierbare Datenmenge deutlich erhöht werden kann. Allerdings wurde aufgrund der sehr guten Ergebnisse mit dem 1. Datensatz (ca. 800 Audiodateien) entschieden, dass es sinnvoller wäre, eine anders gelagerte analytische Aufgabe zu erforschen.

### III.3.3 Arbeitsposition

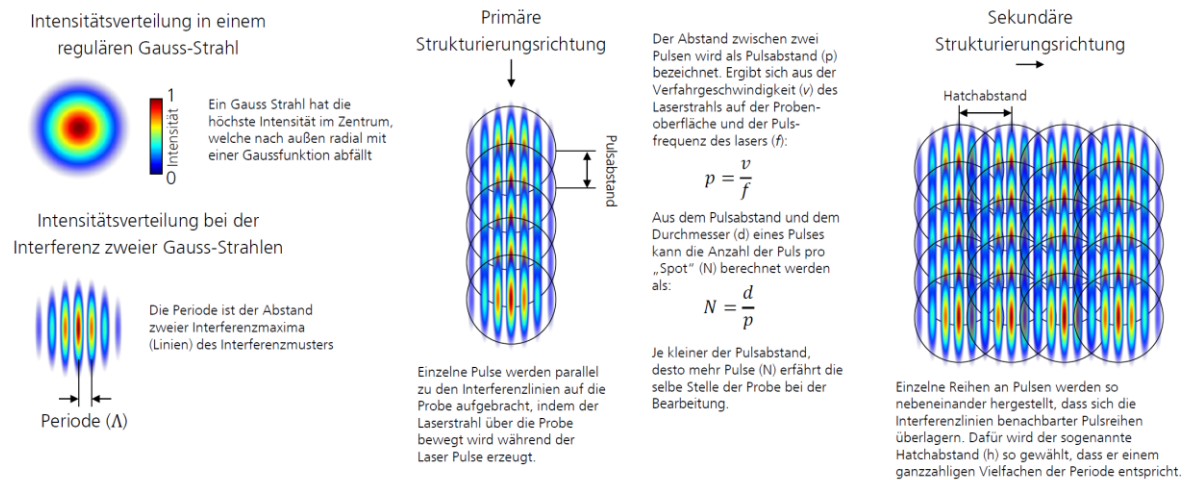
In diesem Abschnitt werden die geleisteten Projektarbeiten beschrieben, um die analytische Fragestellung zu beantworten, ob anhand des Geräusches des Laserpuls Fehler in der Position des zu bearbeitenden Materials erkannt werden können.

Die Arbeitsposition ist der Abstand zwischen der Laserlinse und dem zu bearbeitenden Material (Z-Richtung). Wenn die Arbeitsposition leicht verschoben ist, also bspw. 100  $\mu\text{m}$  vom Plan abweicht, dann ist der Laser nicht mehr richtig fokussiert. (Vergleichbar mit einem Foto, das nicht mehr im Fokus ist und daher verschwommen ist.) Entsprechend wird entweder zu viel oder zu wenig Material durch den Laser entfernt. Wenn die Arbeitsposition aus dem Fokus bewegt wird, wird der Laserprozess leiser. Jedoch können auch andere – gewollte – Gründe die Ursache dafür sein, dass der Laserpuls leiser wird; z.B., wenn in den Lasereigenschaften die Laserleistung reduziert wird, wenn Puls- oder Hatch-Abstand verändert werden, ...

Es ist leichter, die richtige Laserstärke oder Puls- / Hatchdistanz einzustellen als die korrekte Arbeitsposition. Der Grund ist, dass Laserleistung und Puls- oder Hatchabstand in den Einstellungen der Lasermaschine angezeigt werden. Die Arbeitsposition, also der Abstand des zu bearbeitenden Materials zur Laserlinse, wird nicht in der Lasermaschine angezeigt. Der Abstand kann unbemerkt minimal verändert sein (z.B. 100  $\mu\text{m}$ ), was bereits große Auswirkungen auf die Qualität hat.

Die folgende Grafik von Fraunhofer IWS erklärt u.a. Puls- und Hatchabstand:

## DLIP-Prinzip



Confidential

Fraunhofer  
IWS

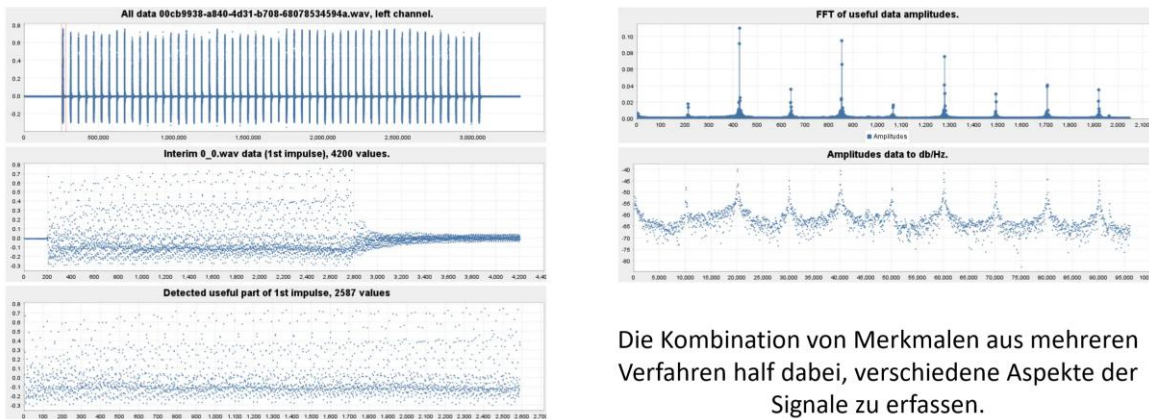
Abbildung 10: Erläuterungen relevanter Begriffe im Laserprozess

Fraunhofer IWS hat Experimente mit z.T. veränderter Arbeitsposition durchgeführt und die Audiodateien zur Verfügung gestellt. Es wurden > 4.000 Audiodateien bereit gestellt mit einer Gesamtgröße von >46 GB. Die Pulsanzahl variiert pro Audiodatei zwischen 55 – 2.000. Insgesamt standen 4,21 Millionen Pulse zur Verfügung mit einer Frequenz von 10 kHz. Die Arbeitsposition war – korrekt (= in Fokus) oder nicht korrekt (= entweder über oder unter Fokus).

Zuerst wurden auch hier die Daten zur Bereinigung und Reduzierung der Daten vorverarbeitet, wie bspw.

- Frequenzbereichsfunktionen wie Spitzenerkennung, Spektralstatistik (Schwerpunkt, Bandbreite), harmonische Analysen
- Zeit-Frequenz-Funktionen wie Short Time Fourier Transformation (STFT), Wavelet-Transformationen
- Dimensionsreduktion wie Hauptkomponentenanalyse (PCA), Verdichtung der Daten in drei synthetischen Dimensionen
- Erweiterte Verarbeitung wie Cepstralanalyse (z. B. Mel-Frequenz-Cepstralkoeffizienten), Statistik höherer Ordnung (z. B. Schiefe, Kurtosis des Spektrums)

# Reduzierung auf relevante Daten + Erkennung relevanter Charakteristiken



Die Kombination von Merkmalen aus mehreren Verfahren half dabei, verschiedene Aspekte der Signale zu erfassen.

www.ispredict.com | Copyright 2025

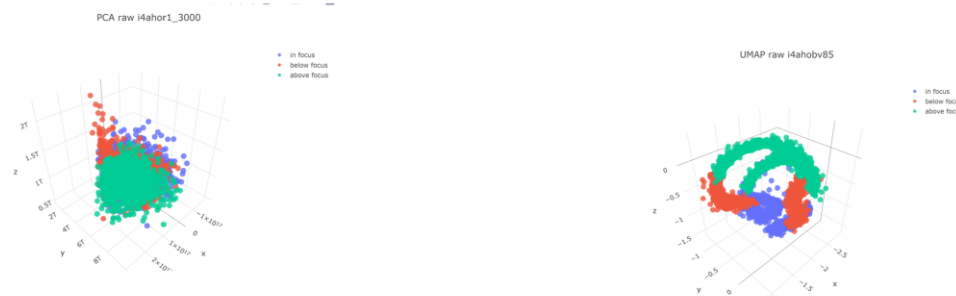
Abbildung 11: Vorverarbeitung der Audiodateien reduziert die Datenpunkte erheblich.

Die folgende 3D-Visualisierung zeigt, dass Zusammenhänge

- nicht erkannt (links) und
- gut erkannt (rechts)

werden konnten:

## Analyse der Zusammenhänge + 3D-Visualisierung



Keine guten Analyseergebnisse

- Visualisierung der Analyse zeigt starke Überlappung der 3 Kategorien (in / unter / über Fokus).  
→ Algorithmen erkennen Unterschiede nicht.
- Hohe Wahrscheinlichkeit, dass nahezu unmöglich, ein Modell mit diesen Charakteristiken (Features) sinnvoll anzutrainieren.

Guten Analyseergebnisse

- Visualisierung der Analyse zeigt klar 3 getrennte Kategorien (in / unter / über Fokus).  
→ Algorithmen erkennen die 3 Kategorien.
- Hohe Wahrscheinlichkeit, dass ein erfolgreiches Modell mit diesen Charakteristiken (Features) antrainiert werden kann.

www.ispredict.com | Copyright 2025

Abbildung 12: Die für die rechte Visualisierung angewendeten Verfahren zeigen deutlich, dass Zusammenhänge in den drei Kategorien „in Fokus“ / „über Fokus“ / „unter Fokus“ erkannt werden konnten.

Die folgende Abbildung zeigt, dass sehr hohe Genauigkeiten erzielt werden konnten.

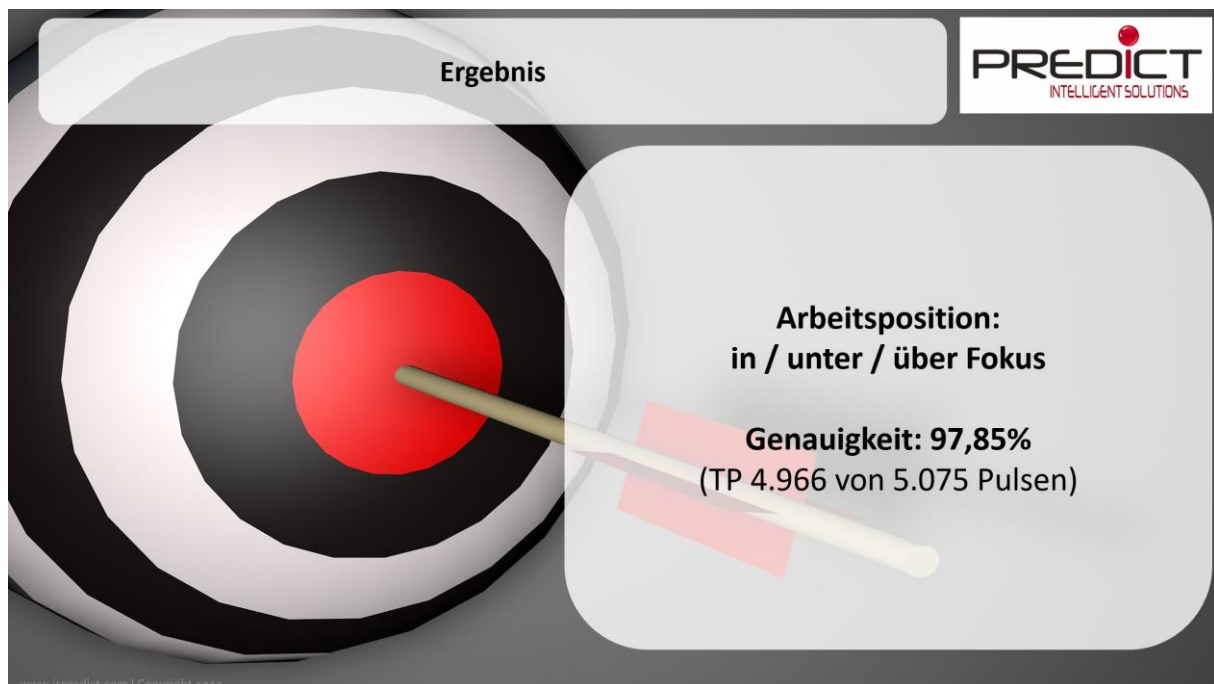


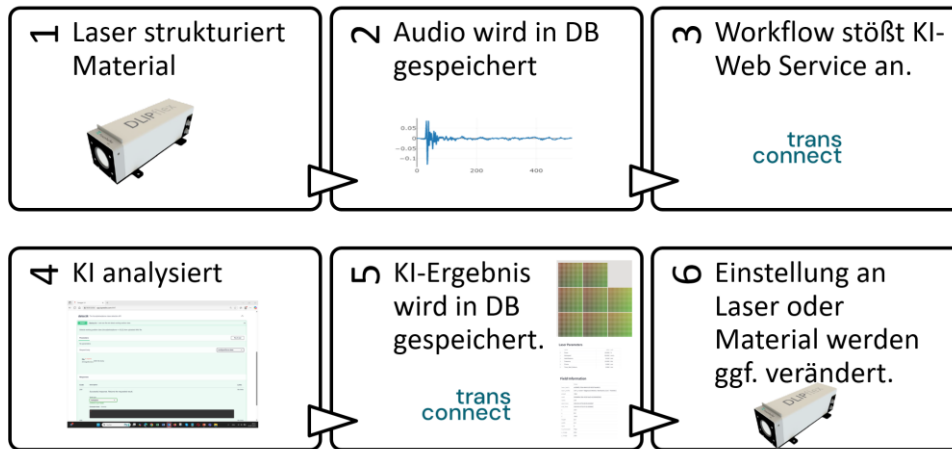
Abbildung 13: KI-Analyse-Ergebnisse mit sehr hoher Genauigkeit zur Erkennung der Arbeitsposition

Somit konnten die Arbeiten erfolgreich abgeschlossen werden.

### III.4 Arbeitspaket 6: Systemintegration, Validierung und Verwertung

Damit die KI-Modelle im Gesamtprozess demonstriert werden konnten, wurde ein parametrisierbarer Web Service entwickelt. So kann die KI-Analysefunktionalität für die unterschiedlichen Fragestellungen automatisiert aufgerufen werden, die entsprechenden Daten werden analysiert und die Ergebnisse stehen über die Single Point of Truth (Trans Connect) weiteren Anwendungen zur Verfügung, z.B. Bedienerhilfen mittels Augmented Reality.

Es wurde darauf geachtet, dass der Web Service stabil, sicher und performant funktioniert. Die folgende Abbildung zeigt schematisch den Gesamtprozess:



www.ispredict.com | Copyright 2025

Abbildung 14: Automatisierter Prozess: Lasern, Datenerhebung, KI-Analyse, Handlungsempfehlung für Anwender

Der KI-Web Service wurde in den gemeinsamen Demonstrator integriert. Dann wurde geprüft, ob der KI-Web Service ausreichend im Gesamtworkflow funktioniert, also bspw. mit einer großen Menge von Inputdaten. Auch die Performance wurde überprüft. Des Weiteren wurde die fachliche Richtigkeit geprüft. Der KI-Service wurde optimiert, damit er stabil unter den unterschiedlichen Beanspruchungen funktioniert.

Hier wurde auf die Unterstützung des Unterauftrags zurückgegriffen. Außerdem wurde auch hier der Server mit leistungsstarker GPU exzessiv genutzt.

### III.5 Arbeitspaket 7: Öffentlichkeitsarbeit Verbundprojekt

In diesem Arbeitspaket wurden die ersten Aktivitäten zur Verbreitung unternommen, z.B. Präsentationen in Kundenterminen. Außerdem wurde an dem Verwertungsplan gearbeitet.

## IV. Erzielte Ergebnisse

Die erzielten Ergebnisse lassen sich in die folgenden Aspekte untergliedern:

- **Konkrete KI-Analyseergebnisse**

Wie oben bereits erwähnt, wurden unterschiedliche qualitätsrelevante Fragestellungen bearbeitet, in dem die Geräusche des Laserpulses analysiert wurden.

Die Prognosegenauigkeit lag zwischen beeindruckenden 94,67% - 99,26%:

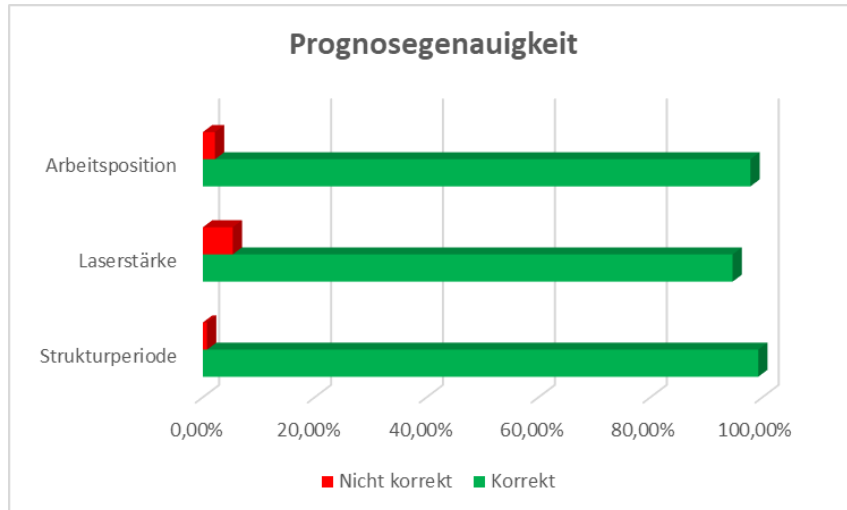


Abbildung 15: Hohe Trefferquote für Qualitäts-relevante Parameter-Bewertung durch automatisierte KI-Analyse des Laserpuls-Geräusches

- **Konkrete Automatisierung im Gesamtworkflow**

Der Gesamtprozess wurde aus Skalierbarkeitsgründen weitgehend automatisiert, also von der Datenbeschaffung, über die Datenanalyse bis hin zur Bereitstellung der Analyseergebnisse.

- **Adaptivität**

In den Laserprozessen wurden wichtige Parameter variiert. Die Selbstlernalgorithmik wurde erweitert, um mit diesen Prozessveränderungen umgehen zu können, so dass gute Ergebnisse stabil erzielt werden konnten.

- **Passende Architektur für Standardsoftware**

Die Standardsoftware PREDICTIVE INTELLIGENCE wurde als Basis eingesetzt. Die prototypischen Algorithmen wurden unter Berücksichtigung einer später notwendigen Integration erforscht. Daher ist davon auszugehen, dass die zur Produktreife weiterzuentwickelnden Algorithmen gut in die Standardsoftware integrierbar sein werden.

## V. Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Es sind keine neuartigen Entwicklungen bekannt geworden, die dem Verwertungspotenzial der Ergebnisse entgegenstehen würden.

## VI. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Ergebnisse bieten ein erhebliches Verwertungspotential, das die Produktionsqualität bei Verwendung von Lasern deutlich voranbringen kann. Die prototypisch entwickelte Anomalieerkennung und –bewertung von Laserpulsgeräuschen kann auch die Basis für Geräuschanalysen in anderen Produktionsprozessen sein, wie bspw. dem Punktschweißen in der Automobilindustrie.

Die Erkenntnisse aus den prototypisch erprobten KI-Algorithmen und Selbstlernalgorithmen werden zeitnah in die Standardsoftware PREDICTIVE INTELLIGENCE integriert. Ziel ist es, daraus innerhalb von 1,5 - 2 Jahren nach erfolgreichem Projektabschluss eine Erweiterung im Standardprodukt zu realisieren. Dazu müssen die Algorithmen um konfigurierbare Anpassungsmöglichkeiten ergänzt werden sowie Maßnahmen zur Leistungsverbesserung und Stabilisierung der Algorithmen implementiert werden.

## VII. Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb des Verbundprojektes

Wir haben in allen Kundengesprächen, in denen dieses Thema relevant sein könnte, auf die laufenden Forschungsaktivitäten hingewiesen und den aktuellen Stand der Ergebnisse dargestellt.

## VIII. Veröffentlichungen, Vorträge, Referate, etc.

Wir haben die Technologien und Forschungsergebnisse für Konferenzen und Messeauftritte aufbereitet, um sowohl die wissenschaftliche Relevanz als auch die praktische Anwendbarkeit hervorzuheben. Ein Fokus lag auf der Präsentation der Ergebnisse auf internationalen Plattformen:

Veranstaltung	Erläuterung	Ort Dauer
DIQ-Symposium	12. Jahresveranstaltung des Deutschen Institutes für Qualitätsförderung e.V.	Pforzheim 1 Tag
Hannovermesse Industrie	Laut eigenen Angaben die international wichtigste Plattform für alle Technologien rund um die industrielle Transformation: 3.500 Aussteller, 123.000 Besucher, 10.000 Produkte und Lösungen, 1.600 Sprecher.	Hannover 5 Tage
ICT Spring	Globale Technologiekonferenz, die zahlreiche internationale Fachleute zusammenbringt zu den Themen digitale Transformation, Innovationen in der Lieferkette, den Auswirkungen von Weltraumtechnologien, Fintech, u.v.m..	Luxemburg 2 Tage
International Car Supplier Fair (IZB)	Eine der größten europäischen Messen für die Automobilzuliefererindustrie mit bis über 10.000 Besucher pro Veranstaltungstag. Schwerpunkte: Karosserie- und Fahrzeugtechnik, Elektrik/Elektronik, Antriebstechnik, Kunststoff- und Leichtbau, Automatisierung, Digitalisierung.	Wolfsburg 3 Tage
L-DIH Talks	Veranstaltungsreihe von Luxemburgs Digitalisierungs- oder Innovationsinitiativen zu Themen: digitale Transformation, Industrie 4.0 und technologische Trends.	Luxemburg 1 Tag

<b>TDWI</b>	Veranstaltungsreihe zu den Themen Business Intelligence, Data Analytics, Data Science und Data Governance mit bis zu über 1.000 Fachbesuchern	München 3 Tage
<b>VivaTech</b>	Große europäische Technologie- und Start-up-Konferenz, die Gründer, Investoren, Unternehmen und Politik zusammenbringt. Schwerpunkte liegen auf Innovationen, Start-ups, KI, Mobilität, Nachhaltigkeit und digitalen Trends mit bis über 100.000 Besuchern.	Paris 4 Tage

## IX. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lichtreflektion während der Oberflächenbearbeitung durch einen Laser. .....	6
Abbildung 2: Drei analytische Fragestellungen wurden in dem Teilprojekt erforscht. .	6
Abbildung 3: Daten der Laserstrukturierung stehen über „Single Point of Truth“ für KI- Analyse zur Verfügung .....	7
Abbildung 4: Vorgehen für alle zu bearbeitenden analytischen Fragestellungen .....	8
Abbildung 5: Laser bearbeitet Oberfläche in mehreren Pulsen und erzeugt dabei ein Audiosignal.....	9
Abbildung 6: 3D-Punktwolke nach PCA-Analyse zur Visualisierung der Audiodateien .....	9
Abbildung 7: Audiosignal eines Laserpuls nach erster Vorverarbeitung .....	10
Abbildung 8: Audiosignal eines Laserpuls nach Fourier-Transformation.....	10
Abbildung 9: Ergebnis KI-Analyse zur Erkennung der Strukturperiode und der Laserstärke.....	11
Abbildung 10: Erläuterungen relevanter Begriffe im Laserprozess.....	13
Abbildung 11: Vorverarbeitung der Audiodateien reduziert die Datenpunkte erheblich. .....	14
Abbildung 12: Die für die rechte Visualisierung angewendeten Verfahren zeigen deutlich, dass Zusammenhänge in den drei Kategorien „in Fokus“ / „über Fokus“ / „unter Fokus“ erkannt werden konnten. ....	14
Abbildung 13: KI-Analyse-Ergebnisse mit sehr hoher Genauigkeit zur Erkennung der Arbeitsposition .....	15
Abbildung 14: Automatisierter Prozess: Lasern, Datenerhebung, KI-Analyse, Handlungsempfehlung für Anwender .....	16
Abbildung 15: Hohe Trefferquote für Qualitäts-relevante Parameter-Bewertung durch automatisierte KI-Analyse des Laserpuls-Geräusches .....	17

## X. Literaturverzeichnis

(Dez. 2019). *Multi-Sensor System for Real-Time Monitoring of Laser Micro-Structuring*. JLMN.

(2016). *SPECTARIS (2017 ff.)*. Consulting Optech.

Wikipedia. (kein Datum). *KNN*. <https://de.wikipedia.org/wiki/N%C3%A4chste-Nachbarn-Klassifikation>.

Wikipedia. (kein Datum). *Precision*. [https://en.wikipedia.org/wiki/Precision\\_and\\_recall](https://en.wikipedia.org/wiki/Precision_and_recall).

Wikipedia. (kein Datum). *Principal Component Analysis*. [https://en.wikipedia.org/wiki/Principal\\_component\\_analysis](https://en.wikipedia.org/wiki/Principal_component_analysis).

Wikipedia. (kein Datum). *Random Forest*.  
[https://de.wikipedia.org/wiki/Random\\_Forest](https://de.wikipedia.org/wiki/Random_Forest).

Wikipedia. (kein Datum). *Shannon Sampling Theorem*.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Nyquist%E2%80%93Shannon\\_sampling\\_theorem](https://en.wikipedia.org/wiki/Nyquist%E2%80%93Shannon_sampling_theorem)