



# ERWEITERUNG EINES KI-GESTÜTZTEN ASSISTENZSYSTEMS ZUR OPTIMIERUNG VON LASERSCHNEIDPARAMETERN FÜR EDELSTAHLBLECHE

## Projektarbeit T2000

des Studienganges Elektrotechnik  
Fachrichtung Automation  
an der Dualen Hochschule Baden-Württemberg  
Standort Stuttgart

**Tudor Lupsa**

08.09.2025

<b>Bearbeitungszeitraum</b>	02.06.25 - 08.09.25
<b>Matrikelnummer, Kurs</b>	1491114, TEL23GR3
<b>Dualer Partner</b>	TRUMPF SE+Co.KG, Ditzingen
<b>Betreuer des Dualen Partners</b>	Manuel Geiger

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>II</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>III</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>IV</b>
<b>1 Einführung</b>	<b>1</b>
1.1 Zielsetzung . . . . .	1
1.2 Vorgehensweise . . . . .	1
<b>2 Grundlagen</b>	<b>3</b>
<b>3 Stand der Technik</b>	<b>4</b>
<b>4 Versuchsplanung zur Identifikation von Schnittabrissgrenzen für Ededlstaibleche</b>	<b>5</b>
<b>5 Überschrift auf Ebene 0 (chapter)</b>	<b>7</b>
5.1 Überschrift auf Ebene 1 (section) . . . . .	7
5.1.1 Überschrift auf Ebene 2 (subsection) . . . . .	7
5.2 Listen . . . . .	8
5.2.1 Beispiel einer Liste (itemize) . . . . .	8
5.2.2 Beispiel einer Liste (enumerate) . . . . .	9
5.2.3 Beispiel einer Liste (description) . . . . .	9
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>11</b>

# Abkürzungsverzeichnis

Ein Abkürzungsverzeichnis ist optional. Das Paket `acronym` kann weit mehr, als hier gezeigt.<sup>1</sup> Beachten Sie allerdings, dass Sie die Einträge selbst in sortierter Reihenfolge angeben müssen.

<b>CRM</b>	Customer Relationship Management
<b>DHBW</b>	Duale Hochschule Baden-Württemberg
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>ITIL</b>	IT Infrastructure Library
<b>RoI</b>	Return-On-Invest
<b>UCS</b>	Universal Character Set
<b>UTF-8</b>	8-Bit UCS Transformation Format

**Ergänzende Bemerkung:** Eine im Text verwendete Abkürzung sollte bei ihrer ersten Verwendung erklärt werden. Falls Sie sich nicht selbst darum kümmern möchten, kann das das Paket `acronym` übernehmen und auch automatisch Links zum Abkürzungsverzeichnis hinzufügen. Dazu ist an allen Stellen, an denen die Abkürzung vorkommt, `\ac{ITIL}` zu schreiben.

Das Ergebnis sieht wie folgt aus:

- erstmalige Verwendung von `\ac{ITIL}` ergibt: IT Infrastructure Library (ITIL),
- weitere Verwendung von `\ac{ITIL}` ergibt: ITIL

Wo benötigt, kann man mit dem Befehl `\acl{ITIL}` wieder die Langfassung ausgeben lassen: IT Infrastructure Library.

Falls man die Abkürzungen durchgängig so handhabt, kann man durch Paket-Optionen (in `_dhbw_preamble.tex`) erreichen, dass im Abkürzungsverzeichnis nur die tatsächlich verwendeten Quellen aufgeführt werden (Option: `printonlyused`) und zu jedem Eintrag die Seite der ersten Verwendung angegeben wird (Option: `withpage`).

Durch die aktivierte Paket-Option `nohyperlinks` wird verhindert, dass die Einträge im Abkürzungsverzeichnis mit Links zu der Stelle hinterlegt werden, wo der Begriff zum ersten Mal verwendet wird.

---

<sup>1</sup>siehe <http://ctan.org/pkg/acronym>

# Abbildungsverzeichnis

# Tabellenverzeichnis

# 1 Einführung

## 1.1 Zielsetzung

Das Ziel dieser Projektarbeit ist es, ein bestehendes KI-gestütztes Assistenzsystem zu erweitern, das aktuell die Qualität beim Laserschneiden von Baustahlblechen vorhersagt und optimiert. Konkret soll die Leistungsfähigkeit dieses Modells auf Edelstahlbleche übertragen werden. Das aktuelle KI-Modell weist in Bezug auf Edelstahl Defizite auf, da es bisher nur mit Datensätzen von Baustahl trainiert wurde und die spezifischen Eigenschaften von Edelstahl unzureichend berücksichtigt. Um diese Lücke zu schließen, sollen neue, speziell auf Edelstahl zugeschnittene Trainingsdaten generiert und in das bestehende Modell integriert werden. Diese Daten erfassen insbesondere typische Eigenschaften wie Schneidgratbildung und Oberflächenrauheit. Zusätzlich werden bestehende optische Messmethoden geprüft und gegebenenfalls angepasst, um ihre Eignung für Edelstahl sicherzustellen. Das Ziel ist ein robustes und zuverlässiges KI-Modell, das die Qualität von Edelstahlschnitten ebenso präzise vorhersagen kann wie bereits für Baustahl.

## 1.2 Vorgehensweise

Zunächst wird ein systematischer Testplan erstellt, um wichtige Schneidparameter, insbesondere Laserleistung, Schnittgeschwindigkeit und Gasdruck, für verschiedene Edelstahldicken und -güten zu untersuchen. Ziel dieses Testplans ist es, Parameterbereiche zu identifizieren, die zu sogenannten Schnittabrissen führen. Ein Schnittabriss entsteht, wenn durch ungünstige Schneidparameter das Werkstück nicht vollständig getrennt wird, da die Schnittkante verschweißt.

Nachdem kritische Parameterbereiche, welche zu schlechten Schneidergebnissen führen, ermittelt wurden, werden detaillierte Versuchspläne („Experimentalplans“) entwickelt. Diese umfassen systematische Schneidversuche für Edelstahlbleche mit Dicken bis zu 20 mm. Hierbei werden bewusst sowohl qualitativ hochwertige als auch minderwertige Schneidergebnisse erzeugt. Dies dient dazu, eine umfassende Datengrundlage für die Weiterentwicklung des KI-Modells bereitzustellen.

Die generierten Schneidproben werden anschließend in einer Messzelle vermessen, um die resultierenden Schnittkanten in die KI-Datenbank aufzunehmen. Da die Messmethoden ursprünglich für Baustahl entwickelt wurden, müssen sie für Edelstahl angepasst werden. Dies betrifft insbesondere die Kalibrierung und Einrichtung des Handscanner-Setups, welches Bilder der Schnittkanten für die Qualitätsschätzung aufnimmt. Ebenso muss die Vektorberechnung des eingesetzten 3D-Punktwolkenscanners optimiert werden. Da Edelstahlschnittkanten typischerweise ausgeprägtere Schneidgrate aufweisen als die von Baustahlblechen, muss die Umrechnung der 3D-Punktwolke

in einen 2D-Vektor entsprechend angepasst werden, um die tatsächlichen Merkmale der Schnittkanten präzise abzubilden. Neben der quantitativen Messung des Schneidgrats wird auch die Oberflächenrauheit qualitativ bewertet. Hierzu werden bestehende Algorithmen zur Bildverarbeitung und Analyse geprüft und entsprechend den spezifischen Anforderungen von Edelstahl optimiert. Die aufbereiteten Messdaten fließen anschließend in die Erweiterung und das Training des bestehenden KI-Modells ein. Ziel ist, dass dieses Modell anschließend die Qualität der Laserschneidkanten bei Edelstahlblechen zuverlässig vorhersagen kann. Nach erfolgreicher Implementierung erfolgen Validierungstests sowie weitere gezielte Optimierungen, um die Vorhersagequalität kontinuierlich zu verbessern und sicherzustellen, dass das gewählte Parameterset bereits vor dem Schneidprozess zuverlässig bewertet werden kann.

## 2 Grundlagen



### 3 Stand der Technik

## 4 Versuchsplanung zur Identifikation von Schnittabrissgrenzen für Ededstahlbleche

Ziel der Versuchsplanung ist die systematische Abgrenzung des prozesssicheren Arbeitsbereichs (Prozessfensters) beim Laserschneiden von Edelstahlblechen sowie die präzise Identifikation der Parameterbereiche, in denen Schnittabrisse auftreten. Unter einem Schnittabritt wird im Folgenden ein Zustand verstanden, in dem das Werkstück infolge ungeeigneter Parameterkombinationen nicht vollständig getrennt wird, weil der Schnittspalt lokal verschweißt oder die Schmelzaustragung unzureichend ist. Die so gewonnenen Grenzwerte bilden die Grundlage für die spätere Qualitätsmodellierung und dienen der Ableitung belastbarer Empfehlungen für robuste Parametersätze. Zugleich dient die hier beschriebene Vorgehensweise der Ableitung strukturierter Versuchspläne („Experimentalplans“) für die zentrale Versuchsdatenbank.

Die Experimente sind als zweidimensionale Rasterstudien ausgelegt, bei denen jeweils zwei der drei wesentlichen Prozessparameter – Laserleistung, Schnittgeschwindigkeit und Assistgasdruck – variiert werden, während der dritte Parameter konstant gehalten wird. Für jede untersuchte Parameterpaarung wird ein  $3 \times 3$ -Feld gefertigt, in dem eine Größe entlang der horizontalen und die andere entlang der vertikalen Richtung schrittweise verändert wird. Formal seien die Stufen der beiden variierten Parameter  $x \in \{x_1, x_2, x_3\}$  und  $y \in \{y_1, y_2, y_3\}$ ; der jeweils dritte Parameter  $z$  wird auf einem wohldefinierten Referenzniveau  $z_0$  fixiert. Die Studie wird sequenziell für alle drei Kombinationen wiederholt (Leistung–Geschwindigkeit bei konstantem Gasdruck, Leistung–Gasdruck bei konstanter Geschwindigkeit sowie Geschwindigkeit–Gasdruck bei konstanter Leistung), sodass das Prozessfenster in den relevanten Teilräumen konsistent erfasst wird.

Die Wahl der Stufen  $x_i$  und  $y_j$  erfolgt material- und dickenspezifisch. Für jede untersuchte Blechdicke wird zunächst ein plausibler Arbeitsbereich aus praxisüblichen Startwerten und internen Erfahrungswerten abgeleitet und anschließend durch kurze Vorversuche verifiziert. Um Grenzbereiche mit ausreichender Auflösung zu erfassen, wird bei Bedarf adaptiv verfeinert (z. B. durch Intervallhalbierung zwischen zwei Stufen). Die Reihenfolge der Schnitte innerhalb eines Feldes wird randomisiert, um systematische Einflüsse durch fortschreitende Erwärmung, Düsenverschleiß oder driftende Maschinenzustände zu minimieren; die zentrale Kombination  $(x_2, y_2)$  wird zusätzlich repliziert, um Prozess- und Messstreuungen abschätzen zu können.

Die praktische Durchführung jeder  $3 \times 3$ -Matrix beginnt mit einer Funktionskontrolle der Anlage (Fokuslage, Düsenabstand, Strahlqualität, Gaszufuhr). Für jede Parameterkombination wird eine definierte Probegeometrie geschnitten. Ein Schnitt gilt als erfolgreich, wenn der Trennschnitt vollständig ist, wenn weder Durchhang noch Wiederaufschmelzen im Schnittspalt beobachtet wird und der Schmelzaustrag kontinuierlich erfolgt. Ein Schnittabritt liegt vor, wenn die Kontur nicht vollständig getrennt ist, der Schnittspalt lokal verschweißt oder ein charakteristischer Abbruch des Materialaustrags auftritt. Die Beurteilung erfolgt unmittelbar an der Maschine sowie nachgelagert in der Messzelle durch optische Inspektion und Dokumentation der Schnittkante.

Die Kriterien werden vorab festgelegt und über alle Versuche konsistent angewendet, um Vergleichbarkeit sicherzustellen.

Sobald ein erster Grenzbereich identifiziert ist, wird das umliegende Parametergebiet gezielt erkundet. Hierzu werden die Stufen in Richtung des beobachteten Grenzverlaufs schrittweise angepasst, bis ein stabiler Übergang zwischen den Zuständen „Schnitt möglich“ und „Schnittabriss“ reproduzierbar nachgewiesen ist. Die so gewonnenen Grenzpunkte werden im jeweiligen Parameterraum verortet und bilden eine empirische Approximation des Prozessfensters. Für jede Kombination aus Blechdicke und Werkstoffgüte entsteht so eine Kontur, die den Bereich prozesssicherer Parameterkombinationen von instabilen Trennbedingungen trennt. Auf Basis dieser Voruntersuchungen werden anschließend detaillierte Versuchspläne („Experimentalplans“) ausgearbeitet. Diese beinhalten systematische Schneidversuche für Edelstahlbleche mit Dicken bis zu 20 mm; dabei werden bewusst sowohl qualitativ hochwertige als auch minderwertige Schneidergebnisse erzeugt. Ziel ist der Aufbau einer umfassenden, kuratierten Datengrundlage für die Weiterentwicklung des KI-Modells.

Die beschriebene Vorgehensweise verfolgt zwei Ziele: Erstens erlaubt sie die belastbare Identifikation von Schnittabrissgrenzen und damit die sichere Festlegung eines prozessstabilen Arbeitsbereichs für Edelstahl. Zweitens liefert sie eine qualitativ wie quantitativ aussagekräftige Datenbasis, um das Zusammenspiel der Laserparameter zu verstehen und die Qualität von Schnittkante und Schnittfläche prädiktiv zu bewerten. Damit entsteht ein experimentell abgesichertes Fundament, das sowohl die spätere KI-Modellierung als auch eine reproduzierbare, datengetriebene Parametrierung in der Praxis unterstützt.

## 5 Überschrift auf Ebene 0 (chapter)

Dies hier ist ein Blindtext zum Testen von Textausgaben. Wer diesen Text liest, ist selbst schuld. Der Text gibt lediglich den Grauwert der Schrift an. Ist das wirklich so? Ist es gleichgültig, ob ich schreibe: „Dies ist ein Blindtext“ oder „Huardest gefburn“? Kjift – mitnichten! Ein Blindtext bietet mir wichtige Informationen. An ihm messe ich die Lesbarkeit einer Schrift, ihre Anmutung, wie harmonisch die Figuren zueinander stehen und prüfe, wie breit oder schmal sie läuft. Ein Blindtext sollte möglichst viele verschiedene Buchstaben enthalten und in der Originalsprache gesetzt sein. Er muss keinen Sinn ergeben, sollte aber lesbar sein. Fremdsprachige Texte wie „Lorem ipsum“ dienen nicht dem eigentlichen Zweck, da sie eine falsche Anmutung vermitteln.

### 5.1 Überschrift auf Ebene 1 (section)

Dies hier ist ein Blindtext zum Testen von Textausgaben. Wer diesen Text liest, ist selbst schuld. Der Text gibt lediglich den Grauwert der Schrift an. Ist das wirklich so? Ist es gleichgültig, ob ich schreibe: „Dies ist ein Blindtext“ oder „Huardest gefburn“? Kjift – mitnichten! Ein Blindtext bietet mir wichtige Informationen. An ihm messe ich die Lesbarkeit einer Schrift, ihre Anmutung, wie harmonisch die Figuren zueinander stehen und prüfe, wie breit oder schmal sie läuft. Ein Blindtext sollte möglichst viele verschiedene Buchstaben enthalten und in der Originalsprache gesetzt sein. Er muss keinen Sinn ergeben, sollte aber lesbar sein. Fremdsprachige Texte wie „Lorem ipsum“ dienen nicht dem eigentlichen Zweck, da sie eine falsche Anmutung vermitteln.

#### 5.1.1 Überschrift auf Ebene 2 (subsection)

Dies hier ist ein Blindtext zum Testen von Textausgaben. Wer diesen Text liest, ist selbst schuld. Der Text gibt lediglich den Grauwert der Schrift an. Ist das wirklich so? Ist es gleichgültig, ob ich schreibe: „Dies ist ein Blindtext“ oder „Huardest gefburn“? Kjift – mitnichten! Ein Blindtext bietet mir wichtige Informationen. An ihm messe ich die Lesbarkeit einer Schrift, ihre Anmutung, wie harmonisch die Figuren zueinander stehen und prüfe, wie breit oder schmal sie läuft. Ein Blindtext sollte möglichst viele verschiedene Buchstaben enthalten und in der Originalsprache gesetzt sein. Er muss keinen Sinn ergeben, sollte aber lesbar sein. Fremdsprachige Texte wie „Lorem ipsum“ dienen nicht dem eigentlichen Zweck, da sie eine falsche Anmutung vermitteln.

#### Überschrift auf Ebene 3 (subsubsection)

Dies hier ist ein Blindtext zum Testen von Textausgaben. Wer diesen Text liest, ist selbst schuld. Der Text gibt lediglich den Grauwert der Schrift an. Ist das wirklich so? Ist es gleichgültig, ob ich schreibe: „Dies ist ein Blindtext“ oder „Huardest gefburn“? Kjift – mitnichten! Ein Blindtext

bietet mir wichtige Informationen. An ihm messe ich die Lesbarkeit einer Schrift, ihre Anmutung, wie harmonisch die Figuren zueinander stehen und prüfe, wie breit oder schmal sie läuft. Ein Blindtext sollte möglichst viele verschiedene Buchstaben enthalten und in der Originalsprache gesetzt sein. Er muss keinen Sinn ergeben, sollte aber lesbar sein. Fremdsprachige Texte wie „Lorem ipsum“ dienen nicht dem eigentlichen Zweck, da sie eine falsche Anmutung vermitteln.

**Überschrift auf Ebene 4 (paragraph)** Dies hier ist ein Blindtext zum Testen von Textausgaben. Wer diesen Text liest, ist selbst schuld. Der Text gibt lediglich den Grauwert der Schrift an. Ist das wirklich so? Ist es gleichgültig, ob ich schreibe: „Dies ist ein Blindtext“ oder „Huardest gefburn“? Kjift – mitnichten! Ein Blindtext bietet mir wichtige Informationen. An ihm messe ich die Lesbarkeit einer Schrift, ihre Anmutung, wie harmonisch die Figuren zueinander stehen und prüfe, wie breit oder schmal sie läuft. Ein Blindtext sollte möglichst viele verschiedene Buchstaben enthalten und in der Originalsprache gesetzt sein. Er muss keinen Sinn ergeben, sollte aber lesbar sein. Fremdsprachige Texte wie „Lorem ipsum“ dienen nicht dem eigentlichen Zweck, da sie eine falsche Anmutung vermitteln.

## 5.2 Listen

### 5.2.1 Beispiel einer Liste (itemize)

- Erster Listenpunkt, Stufe 1
- Zweiter Listenpunkt, Stufe 1
- Dritter Listenpunkt, Stufe 1
- Vierter Listenpunkt, Stufe 1
- Fünfter Listenpunkt, Stufe 1

#### Beispiel einer Liste (4\*itemize)

- Erster Listenpunkt, Stufe 1
  - Erster Listenpunkt, Stufe 2
    - \* Erster Listenpunkt, Stufe 3
      - Erster Listenpunkt, Stufe 4
      - Zweiter Listenpunkt, Stufe 4
    - \* Zweiter Listenpunkt, Stufe 3

- Zweiter Listenpunkt, Stufe 2
- Zweiter Listenpunkt, Stufe 1

### 5.2.2 Beispiel einer Liste (enumerate)

1. Erster Listenpunkt, Stufe 1
2. Zweiter Listenpunkt, Stufe 1
3. Dritter Listenpunkt, Stufe 1
4. Vierter Listenpunkt, Stufe 1
5. Fünfter Listenpunkt, Stufe 1

### Beispiel einer Liste (4\*enumerate)

1. Erster Listenpunkt, Stufe 1
  - a) Erster Listenpunkt, Stufe 2
    - i. Erster Listenpunkt, Stufe 3
      - A. Erster Listenpunkt, Stufe 4
      - B. Zweiter Listenpunkt, Stufe 4
    - ii. Zweiter Listenpunkt, Stufe 3
  - b) Zweiter Listenpunkt, Stufe 2
2. Zweiter Listenpunkt, Stufe 1

### 5.2.3 Beispiel einer Liste (description)

- Erster** Listenpunkt, Stufe 1
- Zweiter** Listenpunkt, Stufe 1
- Dritter** Listenpunkt, Stufe 1
- Vierter** Listenpunkt, Stufe 1
- Fünfter** Listenpunkt, Stufe 1

**Beispiel einer Liste (4\*description)**

**Erster** Listenpunkt, Stufe 1

**Erster** Listenpunkt, Stufe 2

**Erster** Listenpunkt, Stufe 3

**Erster** Listenpunkt, Stufe 4

**Zweiter** Listenpunkt, Stufe 4

**Zweiter** Listenpunkt, Stufe 3

**Zweiter** Listenpunkt, Stufe 2

**Zweiter** Listenpunkt, Stufe 1

# Erklärung zur Verwendung generativer KI-Systeme

Bei der Erstellung der eingereichten Arbeit habe ich auf künstlicher Intelligenz (KI) basierte Systeme benutzt:

☒ ja

☐ nein<sup>2</sup>

Falls ja: Die nachfolgend aufgeführten auf künstlicher Intelligenz (KI) basierten Systeme habe ich bei der Erstellung der eingereichten Arbeit benutzt:

- 1.
- 2.
3. ...

Ich erkläre, dass ich

- mich aktiv über die Leistungsfähigkeit und Beschränkungen der oben genannten KI-Systeme informiert habe,<sup>3</sup>
- die aus den oben angegebenen KI-Systemen direkt oder sinngemäß übernommenen Passagen gekennzeichnet habe,
- überprüft habe, dass die mithilfe der oben genannten KI-Systeme generierten und von mir übernommenen Inhalte faktisch richtig sind,
- mir bewusst bin, dass ich als Autorin bzw. Autor dieser Arbeit die Verantwortung für die in ihr gemachten Angaben und Aussagen trage.

Die oben genannten KI-Systeme habe ich wie im Folgenden dargestellt eingesetzt:

Arbeitsschritt in der wissenschaftlichen Arbeit	Eingesetzte(s) KI-System(e)	Beschreibung der Verwendungsweise

---

<sup>2</sup>Die Erklärung ist in jedem Fall zu unterzeichnen, auch wenn Sie keine KI-Systeme genutzt haben und Ihr Kreuz bei „nein“ gesetzt haben.

<sup>3</sup>U.a. gilt es hierbei zu beachten, dass an KI weitergegebene Inhalte ggf. als Trainingsdaten genutzt und wiederverwendet werden. Dies ist insb. für betriebliche Aspekte als kritisch einzustufen.



(Ort, Datum)

(Unterschrift)

# Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit mit dem Thema: *Mein Titel* selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Ich versichere zudem, dass die eingereichte elektronische Fassung mit der gedruckten Fassung übereinstimmt.

(Ort, Datum)

(Unterschrift)