

BACHELORARBEIT

Untersuchung der Möglichkeiten zur Entwicklung einer allgemeingültigen Anordnungs-klassifikation von Lamellengraphit

Vorgelegt von:

Michael Kaip

Studiengang Ingenieurinformatik

Erstgutachter:

Prof. Dr.-Ing. Mohammad Abuosba

Zweitgutachter:

Dipl.-Mathematiker Ulrich Sonntag

Berlin, den XX. April 2021

Zusammenfassung

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	I
Tabellenverzeichnis	II
1 Einleitung	1
2 Grundlagen	3
2.1 Lamellengraphit	3
2.1.1 Mechanische Eigenschaften von Lamellengraphit	3
2.1.2 Metallographie und Analytik	3
2.1.3 Lichtmikrokopie für die Erstellung von Bildproben	3
2.1.4 Klassifikation und Analyse von Gusseisenwerkstoffen mit Lamellengraphit	3
2.2 Grundlagen der Bildverarbeitung	4
2.2.1 Bildrepräsentation und Farbräume	4
2.2.2 Bildskalierung und Interpolationsverfahren	4
2.3 Statistische Versuchsplanung	8
3 Ausgangssituation	11
3.1 Einsatz digitaler Bildverarbeitung zur Analyse der Mikrostruktur von Gusseisen (AMGuss)	11
3.1.1 Erstellung eines Anordnungsklassifikators für die Lamellengraphit-Auswertung	11
3.1.2 Durchführung einer Lamellengraphit-Auswertung mit AMGuss	12
3.1.3 Bewertungsergebnisse einer Lamellengraphit-Auswertung	13
3.2 Zur Verfügung stehendes Bildmaterial	13
3.3 Problemstellung	13
4 Konzept	15
4.1 Sollzustand/Anforderungen	15
4.2 Erzeugung von Bildern mit unterschiedlichen Ausgangskalibrierungen	15
4.3 Das Analysekonzept	16
4.3.1 Systemanalyse	16
4.3.2 Definition der Zielgrößen	17
4.3.3 Definition der Einflussgrößen	17
4.3.4 Modellbildung	17
4.3.5 Aufbau der Versuchsplanung	17
4.4 Versuchsdurchführung	17
4.4.1 Messung der Bilder mit AMGuss vor und nach der Skalierung	18
4.4.2 Anwendung <i>einstufiger</i> Skalierungen auf die erzeugten Bilder	18
4.4.3 Anwendung <i>mehrstufiger</i> Skalierungen auf die erzeugten Bilder	18
5 Umsetzung	19
5.1 Rahmenbedingungen	19
5.1.1 Technologie-Stack	19
5.2 Implementierung	19
5.2.1 Modellierung und algorithmische Beschreibung der Implementierung	19
5.3 Verwendung von Bildern mit verschiedenen Ausgangskalibrierungen	19
5.4 Skalierung der erzeugten Bilder (einstufig/mehrstufig)	19

5.4.1	Bilineare Interpolation	19
5.4.2	Bikubische Interpolation	19
5.4.3	Flächenbasierte Interpolation	19
5.4.4	Nearest-Neighbor-Interpolation	19
5.4.5	LANCZOS-Interpolation	19
6	Evaluierung	20
6.1	Vergleich angewendeten Interpolationsverfahren	20
6.1.1	Laufzeitkomplexität und Performance	20
6.1.2	Kennzahlenvergleich und Interpretation	20
7	Zusammenfassung und Auswertung	21
7.1	Zusammenfassung	21
7.2	Auswertung	21

Abbildungsverzeichnis

1.1	Typen von Gusseisen nach Form (I - VI) der Graphitpartikelausbildung [1, S.7]	1
2.1	Richtreihenbilder für die Graphitanordnung (Form I / Lamellengraphit) [1]	3
2.2	Darstellung der Notwendigkeit von Interpolationsverfahren bei der Bildskalierung	4
2.3	Lineare Interpolation (Beispiel)	5
2.4	Bildskalierung unter Anwendung bilinearer Interpolation	6
2.5	Nearest-Neighbor-Interpolation (Beispiel)	7
2.6	Bildskalierung unter Anwendung bilinearer Interpolation	8
2.7	Prozessmodell zur statistischen Versuchsplanung	9
2.8	Arten von Versuchsplänen	10
3.1	Erstellung eines Anordnungsklassifikators in AMGuss	12
3.2	Messfehler-Darstellung (visuell) nach Bildtransformation mit bikubischer Interpolation	13
3.3	Messfehler-Darstellung (Histogramm) nach Bildtransformation mit bikubischer Interpolation	14
4.1	Planungsmodell (1) zur Erzeugung von Versuchsbildern	15
4.2	Planungsmodell (2) zur Erzeugung von Versuchsbildern	16
4.3	Modell zur Darstellung der Ursache-/Wirkungsbeziehungen im Systemkontext	17
4.4	Schematische Darstellung des Modells zur Versuchsdurchführung	17

Tabellenverzeichnis

2.1	Versuchsplan mit 3 Einflussfaktoren und jeweils 2 Faktorstufenkombinationen	10
-----	---	----

Kapitel 1

Einleitung

Bei Gusseisen handelt es sich um eine Eisen-Kohlenstoff-Legierung die, verglichen mit Stahl, einen wesentlich höheren Kohlenstoffgehalt von mehr als 2 bis 3,8 % aufweist. Weitere Legierungsbestandteile sind Silicium und Mangan, womit durch sogenanntes Impfen oder der Veränderung der Abkühlgeschwindigkeit, die Werkstoffeigenschaften während des Herstellungsprozesses in großer Breite variiert werden können [2]. Aufgrund der hervorragenden gießtechnischen Eigenschaften des Werkstoffes (geringer Schmelzpunkt sowie dünnflüssige Schmelze) ergeben sich für den Konstrukteur außerdem hohe Freiheitsgrade in der Formgebung, wodurch eine besonders wirtschaftliche Fertigung ermöglicht wird. Der sich daraus ergebende immense Bedarf an Gusserzeugnissen wird besonders deutlich, wenn man sich die weltweite Gussproduktion anschaut, die sich beispielsweise im Jahr 2019 auf über 98 Millionen Tonnen belief. Der größte Produzent ist China mit 48,75 und Deutschland liegt mit 4,95 Millionen Tonnen auf Platz 5 [3].

Der bei Herstellung des Werkstoffes zugeführte Kohlenstoff führt zu Graphiteinlagerungen, deren Form- und Gefügebildung sich durch die Schmelz- und Abkühlungsbedingungen bei der Herstellung ganz wesentlich beeinflussen lassen. Demnach unterscheidet man grundsätzlich die in Abbildung 1.1 dargestellten Arten von Gusseisen:

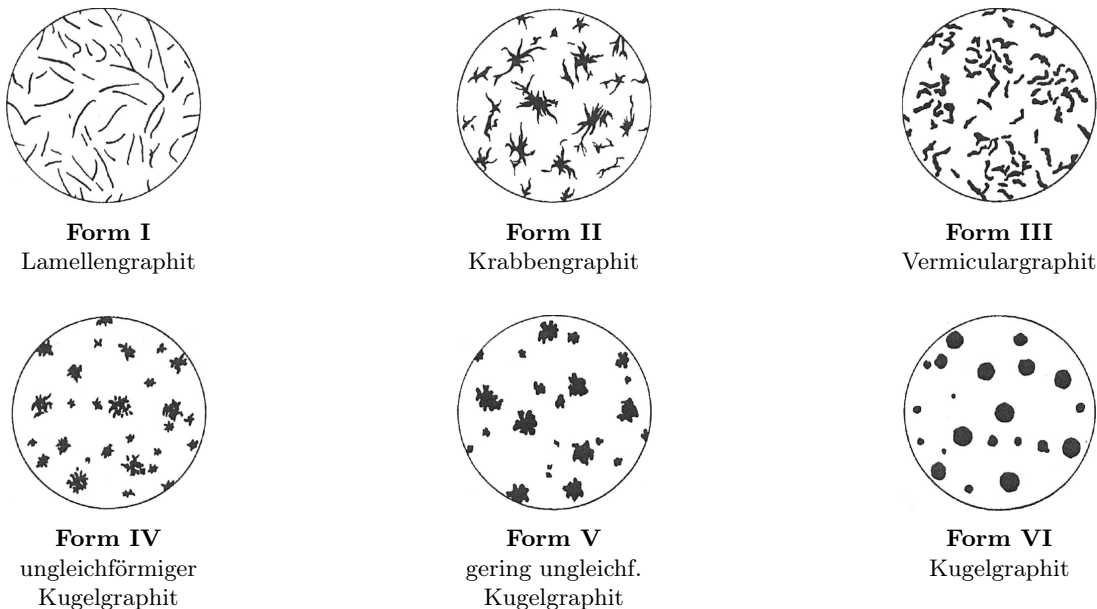


Abbildung 1.1: Typen von Gusseisen nach Form (I - VI) der Graphitpartikelausbildung [1, S.7]

Doch die Gusseisenwerkstoffe unterscheiden sich nicht nur hinsichtlich der Form und Struktur ihrer Graphiteinlagerungen, sondern vor allem auch in Bezug auf ihre damit unmittelbar in Zusammenhang stehenden mechanischen Eigenschaften, wie Zug- und Druckfestigkeit, dem Elastizitätsmodul, der Scherfestigkeit und weiterer Werkstoffkennwerten die, in Verbindung mit der Konstruktionsgeometrie die Qualität eines solchen Erzeugnisses ganz wesentlich beeinflussen. Das bedeutet, dass bei Kräfteeinwirkung je nach Art unterschiedliche Spannungskonzentrationen in

den Graphiteinschlüssen entstehen und sich Gusseisenwerkstoffe unterschiedlicher Formklassen daher mehr oder weniger für bestimmte Verwendungszwecke eignen können.

Die wichtigsten Abnehmer von Gusseisenwerkstoffen sind der Straßenfahrzeugbau mit fast 60 % sowie der Maschinenbau mit 25 bis 30 % der gesamten Gusslieferungen [4]. Die Qualitätsanforderungen in diesen Branchen sind allgemein sehr hoch, jedoch wird gleichzeitig der durch Substitution hervorgerufene Kostendruck auf die Hersteller stetig erhöht und zwingt diese zu Kostensenkungen im Bereich der Herstellkosten, bei gleichzeitiger Beibehaltung der Qualität. Ein weiterer Aspekt, der vor diesem Hintergrund für die Verwendung von Gusseisenwerkstoffen (vor allem Gusseisen mit Lamellengraphit) spricht, ist die Möglichkeit, diesen Zielkonflikt auf elegante Art und Weise zu lösen. Und zwar deshalb, weil der Kohlenstoffgehalt von 3 bis 4 Masseprozent im Gefüge zu wesentlichen Teilen als ausgeschiedener Graphit vorliegt und wegen der unterschiedlichen Dichte von Eisen und Graphit, 3,5 Masseprozent Kohlenstoff bis zu 11 Volumenprozent Graphit entsprechen können. Im Vergleich zu Stahl resultiert daraus eine immense Gewichts- und Kosteneinsparung, wobei die Unterschiede in den mechanischen Eigenschaften im Bedarfsfall durch entsprechende Werkstoffzugaben (Impfen) gewichtsneutral eliminiert werden können [2].

Die zur Beurteilung der Qualität von Gusseisenerzeugnissen maßgebliche Norm ist die DIN EN ISO 945-1. Genauso wie, je nach Art der Graphiteinlagerungen, eine grundsätzliche Einteilung in unterschiedliche Formklassen vorgenommen wird (siehe Abb. 1.1), werden Gusseisenwerkstoffe mit Lamellengraphit zusätzlich in unterschiedliche Anordnungsklassen eingeteilt (siehe dazu auch Kapitel 2.1.4 auf Seite 3).

Die Klassifizierung und Auswertung einer vorliegenden Werkstoffprobe erfolgt gemäß dieser Norm jedoch durch visuelle Auswertung, die von einer fachkundigen und entsprechend geschulten Fachkraft durchzuführen ist. Diese Vorgehensweise hat sich in der Praxis zwar über viele Jahre bewährt, ist aber dennoch fehleranfällig. Das ist sicherlich einer der Gründe dafür, weshalb moderne software-basierte Verfahren zur quantitativen Gefügeanalyse sich zu einem festen Bestandteil der heutigen metallographischen Praxis entwickelt hat, wenn auch diese Entwicklung noch lange nicht als abgeschlossen gelten kann [5].

Vor diesem Hintergrund ist auch die Software AMGuss entstanden, die von Gießereien zur schnellen und effizienten quantitativen Analyse der Mikrostruktur von Gusseisenwerkstoffen eingesetzt wird (vgl. dazu auch Kapitel 3.1). Die Software unterstützt damit den Metallographen bei der Umsetzung der in [1] spezifizierten Anforderungen zur Analyse der Mikrostruktur von Gusseisenwerkstoffen und leistet somit einen wertvollen Beitrag zur Qualitätssicherung in Eisengießereien. Während das Programm Funktionalitäten zur Auswertung aller Formklassen (siehe Abb. 1.1) anbietet, beschäftigt sich die vorliegende Arbeit ausschließlich mit Typ I, also der Analyse von Gusseisen mit Lamellengraphit oder GJL, wie der Werkstoff nach DIN EN 1561 auch bezeichnet wird.

Kapitel 2

Grundlagen

2.1 Lamellengraphit

2.1.1 Mechanische Eigenschaften von Lamellengraphit

2.1.2 Metallographie und Analytik

2.1.3 Lichtmikroskopie für die Erstellung von Bildproben

2.1.4 Klassifikation und Analyse von Gusseisenwerkstoffen mit Lamellengraphit

Werden Gusseisenwerkstoffe mit Lamellengraphit nach DIN EN ISO 945-1 untersucht, müssen die darin enthaltenen Graphitbestandteile nach dem Bezeichnungssystem für die Klassifizierung von Graphit in Gusseisen klassifiziert werden [1, Seite 6]. Dazu bietet die Norm dem Metallographen sogenannte Richtreihenbilder an, anhand derer eine solche Klassifizierung durch visuelle Beurteilung durchzuführen ist.

In der Formklasse Lamellengraphit (vgl. Abbildung 1.1 auf Seite 1) werden je nach Lage der Lamellen zueinander 5 verschiedene Anordnungsklassen (A - E) unterschiedenen, die in der folgenden Abbildung 2.1 dargestellt sind.

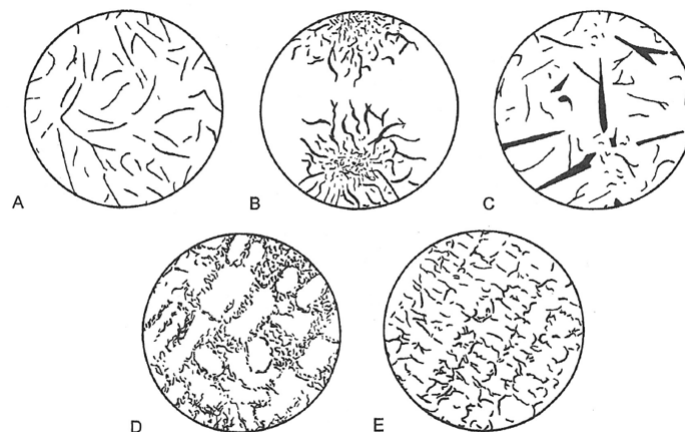


Abbildung 2.1: Richtreihenbilder für die Graphitanordnung
(Form I / Lamellengraphit) [1]

Diese Richtreihenbilder dienen also den entsprechenden Fachleuten in metallographischen Laboren dazu, die in einer Probe vorliegende morphologische Graphitstruktur durch visuellen Vergleich zu bestimmen. Somit ist das Ergebnis einer solchen Bestimmung niemals eindeutig, sondern hängt zwangsläufig von der subjektiven Einschätzung Metallographen ab [1].

Welche Probleme ergeben sich daraus???

2.2 Grundlagen der Bildverarbeitung

2.2.1 Bildrepräsentation und Farbräume

2.2.2 Bildskalierung und Interpolationsverfahren

Unter Bildskalierung versteht man die Vergrößerung bzw. Verkleinerung von Bildern. Es handelt sich dabei um ein Standardverfahren, welches sowohl im Grafik- und Fotobereich als auch in der digitalen Bildverarbeitung sehr häufig zum Einsatz kommt und von Bildverarbeitungsprogrammen standardmäßig angeboten wird. Da die algorithmische Funktionsweise einer Bildskalierung für das Verständnis der in dieser Arbeit zu lösenden Problemstellung (siehe auch Kapitel 3.3 auf Seite 13) von zentraler Bedeutung ist, wird diese nun hier genauer untersucht und beschrieben.

Das grundsätzliche Problem bei der Skalierung von Bildern, soll durch Abbildung 2.2 verdeutlicht werden. Zu sehen ist links ein Bild mit (4×4) Pixeln (orange) und rechts das durch Skalierung erzeugte Bild. Die neue Position eines beliebigen Originalpixels im neu erzeugten (skalierten) Bild ergibt sich durch Multiplikation der ursprünglichen Position mit dem Skalierungsfaktor (λ).

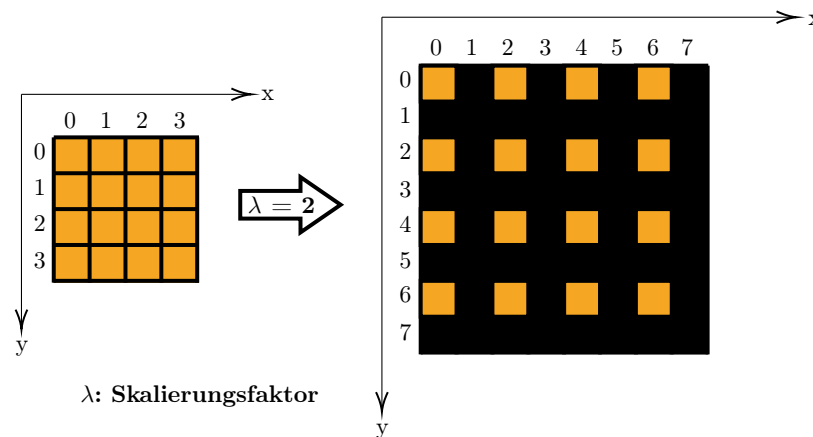


Abbildung 2.2: Darstellung der Notwendigkeit von Interpolationsverfahren bei der Bildskalierung

Genauer ausgedrückt handelt es sich bei den Lücken um undefinierte Pixel, da sich die Pixelmenge proportional zum Skalierungsfaktor ebenfalls verändert. Bei Skalierungsfaktoren kleiner 1 verhält es sich genau umgekehrt und die Anzahl der Pixel im Ergebnisbild verringert sich entsprechend.

Zur Lösung dieses Problems wurden verschiedene Interpolationsalgorithmen entwickelt. Diese verfolgen alle das Ziel, die sich ergebende Differenz der Pixelanzahl auszugleichen und die Bildqualität dadurch möglichst gut zu erhalten. Dabei werden also die Farbwerte der grauen (undefinierten) Pixel aus den Farbwerten der umliegenden Pixel auf jeweils unterschiedliche Art approximiert. Es liegt jedoch auf der Hand, dass ein solches Verfahren die Details eines gegebenen Originalbildes nie 100%-ig erhalten kann. So können zwar für viele praktische Anwendungsfälle im Grafik- oder Fotobereich sehr gute Ergebnisse erzielt werden, weil das menschliche Auge diese Abweichungen nicht erkennen kann. Allerdings erweist sich die Interpolation im Bereich der bildbasierten Materialstrukturanalyse als problematisch, da sich die zu analysierenden Strukturen durch die Interpolation verändern und somit die Messergebnisse verfälscht werden. Während diese Problematik in Kapitel 3.3 auf Seite 13 im Detail beschrieben wird konzentriert sich die nachfolgende Darstellung nun zunächst darauf darzustellen, wie die verschiedenen Algorithmen funktionieren und worin die Unterschiede liegen.

Bilineare Interpolation

Bei der bilinearen Interpolation handelt es sich um ein sehr einfaches Verfahren, bei dem zur Bestimmung unbestimmter Pixel nach der Skalierung, deren Farbwerte (RGB) durch lineare Interpolation in X- und Y-Richtung berechnet werden. Als Beispiel dient folgende Situation, die in Abbildung 2.3 dargestellt ist.

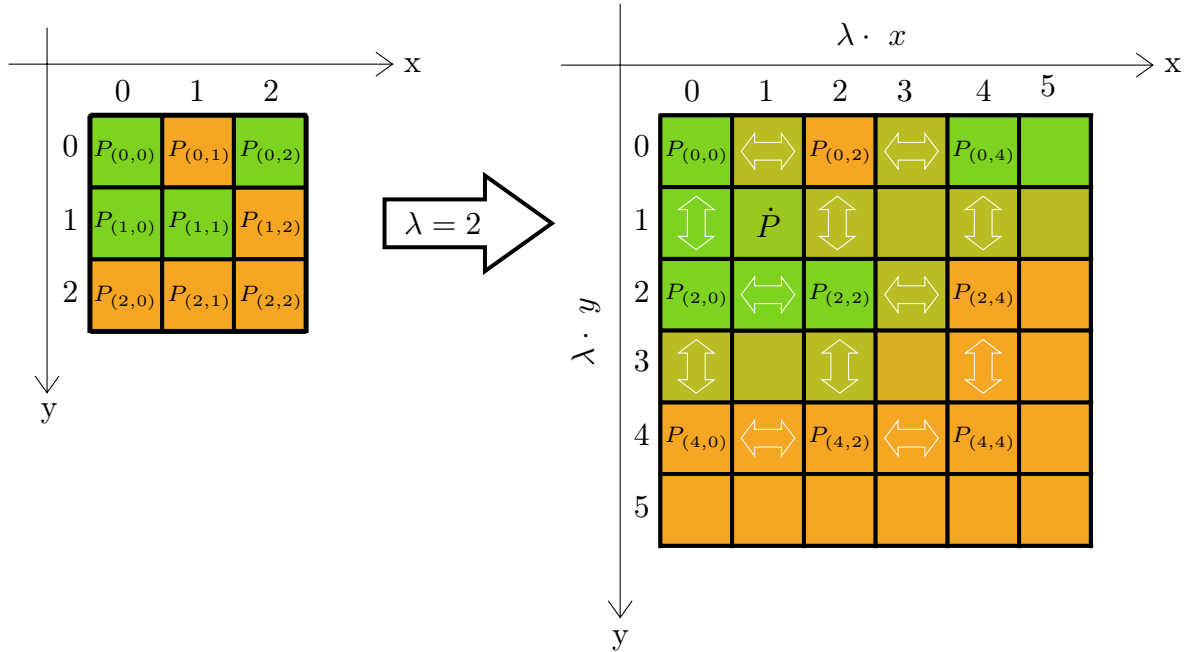


Abbildung 2.3: Lineare Interpolation (Beispiel)

Die hier im Bild (links) dargestellten RGB-Farbwerte betragen für die grünen $P_{ij} = (126, 211, 33)$ und für die orangenen Pixel $P_{ij} = (245, 166, 35)$. Das rechte Bild repräsentiert das Ergebnisbild nach Skalierung des Ausgangsbildes (links) um den Faktor 2. Die Farbwerte der Pixel aus dem Ausgangsbild wurden unverändert übernommen, jedoch veränderte sich deren Position in Abhängigkeit vom Skalierungsfaktor λ . Diese Pixel sind im Ergebnisbild an der Beschriftung $P_{(m,n)}$ zu erkennen. Die Farbwerte aller anderen Pixel müssen berechnet werden, wie im Bild rechts bereits geschehen (Pfeilrichtung = Interpolationsrichtung). Beispielsweise lässt sich der Farbwert des Pixels \dot{P} (oberer linker Quadrant) im Ergebnisbild wie folgt berechnen:

Zunächst werden die Farbwerte der Pixel P_1 und P_2 zwischen $P_{0,0}$ und $P_{0,2}$ bzw. $P_{2,0}$ und $P_{2,2}$ durch Interpolation in X-Richtung berechnet (2.1).

$$P_1 = \frac{1}{2} (P_{0,0} + P_{0,2}) = \frac{1}{2} \left[\begin{pmatrix} 126 \\ 211 \\ 33 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 245 \\ 166 \\ 35 \end{pmatrix} \right] = \begin{pmatrix} 185,5 \\ 188,5 \\ 34 \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

$$P_2 = \frac{1}{2} (P_{2,0} + P_{2,2}) = \begin{pmatrix} 126 \\ 211 \\ 33 \end{pmatrix}$$

Aus den Ergebnissen (2.1) kann dann die Farbwerte des Pixels \dot{P} auf analoge Art und Weise ebenfalls durch lineare Interpolation in Y-Richtung berechnet werden.

$$\dot{P} = \frac{1}{2} \cdot (P_1 + P_2) = \frac{1}{2} \cdot \left[\begin{pmatrix} 185,5 \\ 188,5 \\ 34 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 126 \\ 211 \\ 33 \end{pmatrix} \right] = \begin{pmatrix} 155,75 \\ 199,75 \\ 33,5 \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

Um zu zeigen, wie sich bilineare Interpolation bei Skalierung auf ein reales Bild auswirkt, wurde ein Ausgangsbild mit einer Größe von $640 \times 426 \text{ px}$ 20-fach ($\lambda = 20$) skaliert. Dabei wurde der Skalierungsfaktor absichtlich so groß gewählt, damit die Effekte für das menschliche Auge sichtbar und hier entsprechend dargestellt werden können (Abbildung 2.4).



(a) Mosaikbild (www.pixabay.com,
Fotograf: Michael Gaida)



(b) Mosaikbild bei 20-facher Vergrößerung

Abbildung 2.4: Bildskalierung unter Anwendung bilinearer Interpolation

Wie im Ergebnisbild (b) zu erkennen, führt die lineare Interpolation dazu, dass Kanten sehr unscharf und Strukturen verändert werden. Im Bereich der Materialstrukturanalyse, wie später in Kapitel 3.3 auf Seite 13 noch gezeigt wird, kann das (auch bei wesentlich kleineren Skalierungsfaktoren) zu sehr unerwünschten Einflüssen führen und Messergebnisse verfälschen.

Nearest-Neighbor-Interpolation

Bei diesem Interpolationsverfahren wird ein etwas anderer Ansatz als der zuvor betrachtete verfolgt. Hierbei wird jedem Pixel im skalierten Ergebnisbild der Farbwert zugewiesen, der seinem nächsten Nachbarn im Originalbild entspricht.

Wie auch bei der linearen Interpolation, wird zunächst den Pixeln im Ergebnisbild, deren Position der um den Skalierungsfaktor λ in X/Y-Richtung verschobenen Pixel im Originalbild entspricht, dessen Farbwert zugewiesen. In der nachstehenden Abbildung 2.5 wurden diese entsprechend markiert. Das Originalbild ist identisch mit dem in Abbildung 2.3 auf Seite 5 (links), wurde jedoch wegen der größeren Skalierung ($\lambda = 4$) aus Platzgründen hier nicht dargestellt.

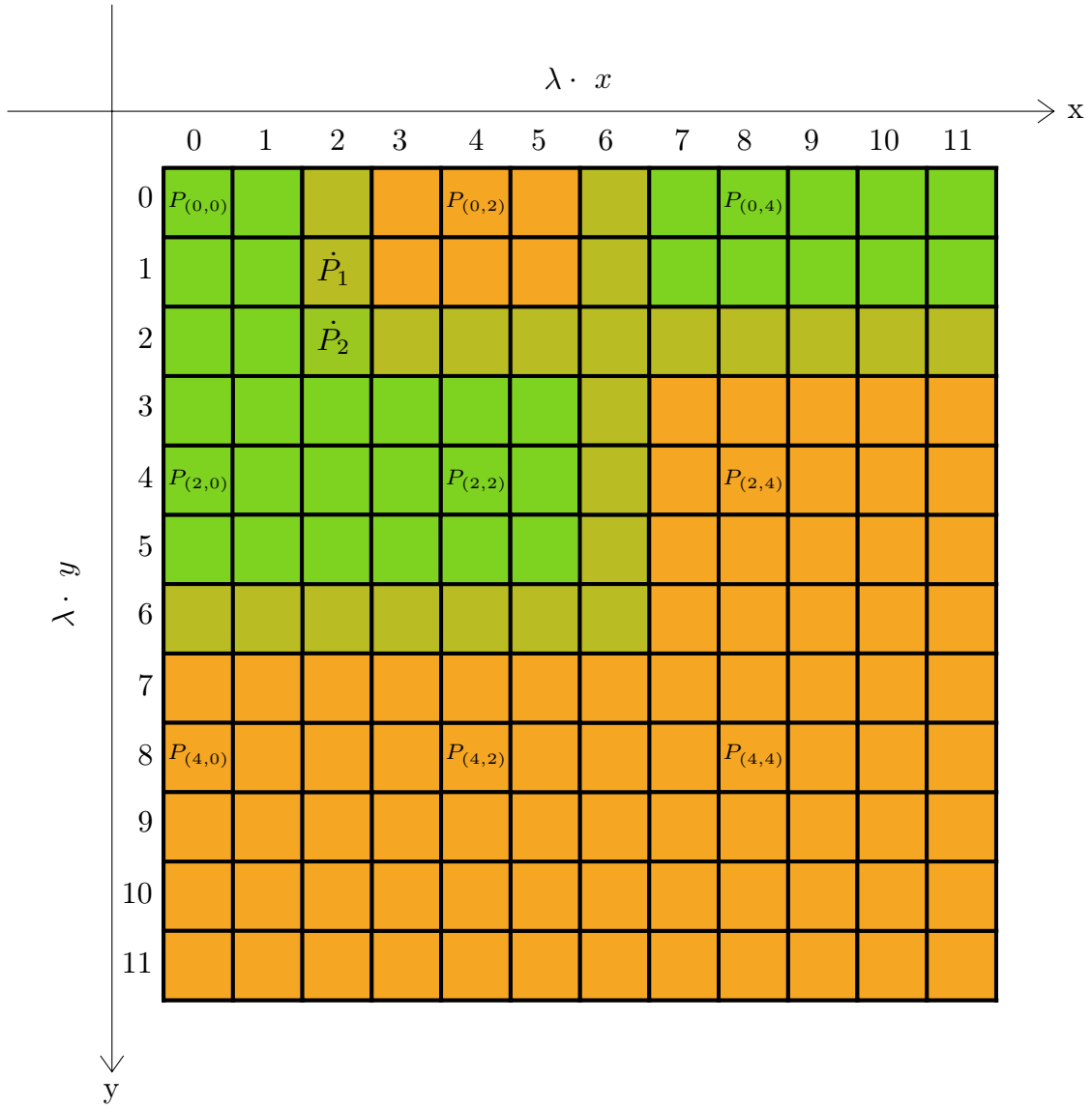


Abbildung 2.5: Nearest-Neighbor-Interpolation (Beispiel)

Jedem Pixel wurde der Farbwert zugewiesen, der dem Originalpixel mit der geringsten euklidischen Distanz zum betrachteten Pixel entspricht. Für den Pixel $P_{m,n} = (1,1)$ ergibt sich dann also derselbe Farbwert wie für $P_{i,j} = P_{m,n} = (0,0)$, da dieser der nächste Nachbar des Pixels ist.

Jedoch gibt es auch Pixel, bei denen der nächste Nachbar nicht eindeutig zugeordnet werden kann, wie bspw. für den Pixel \dot{P}_1 , da dieser dieselbe Distanz sowohl zu $P_{0,0} = (126, 211, 33)$ als auch zu $P_{0,2} = (245, 166, 35)$ aufweist, und diese beiden Punkte unterschiedliche Farbwerte besitzen. Der Farbwert ergibt sich dann einfach aus dem arithmetischen Mittel dieser beiden Punkte, also

$$\dot{P}_1 = \frac{1}{2} (P_{0,0} + P_{0,2}) = \frac{1}{2} \left[\begin{pmatrix} 126 \\ 211 \\ 33 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 245 \\ 166 \\ 35 \end{pmatrix} \right] = \begin{pmatrix} 185,5 \\ 188,5 \\ 34 \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

Für den Pixel \dot{P}_3 ergibt sich durch arithmetische Mittlung ein etwas anderer Farbwert, da dieser zu den Pixeln $P_{0,0}$, $P_{0,2}$, $P_{2,0}$ und $P_{2,2}$ jeweils den gleichen Abstand aufweist und drei dieser Punkte grün und nur einen orange ist. Somit ergibt sich also

$$\dot{P}_3 = \frac{3}{4} \begin{pmatrix} 126 \\ 211 \\ 33 \end{pmatrix} + \frac{1}{4} \begin{pmatrix} 245 \\ 166 \\ 35 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 155,75 \\ 169,75 \\ 35,5 \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

Abschließend veranschaulicht Abbildung 2.6 die Ergebnisse einer Bildskalierung mit Nearest-Neighbor-Interpolation an dem bereits bekannten Mosaik-Bild.



(a) Mosaikbild (www.pixabay.com,
Fotograf: Michael Gaida)



(b) Mosaikbild bei 20-facher Vergrößerung

Abbildung 2.6: Bildskalierung unter Anwendung bilinearer Interpolation

Bikubische Interpolation

Während bei der Linearen Interpolation (siehe Seite 4) nur jeweils 4 Pixel zur Berechnung eines beliebigen Pixels im Ausgangsbild ausreichen, ist es bei der bikubischen Interpolation nicht ganz so einfach. Der Grund dafür ist, dass auch die Farbkanalgradienten mit in die Berechnung einbezogen werden.

Flächenbasierte Interpolation

LANCZOS-Interpolation

2.3 Statistische Versuchsplanung

Statistische Versuchsplanung wird häufig in der Industrie eingesetzt, um Prozesse zu optimieren. Folgende Gründe können dafür ausschlaggebend sein [6]:

- Der Funktionsumfang der Produkte muss erhöht werden, um die Anforderungen der Kunden immer besser erfüllen zu können.
- Die Kosten müssen gesenkt werden, z.B. durch geringere Materialkosten oder höhere Ausbeute.
- Die Entwicklungszeit neuer Produkte und ihre Durchlaufzeit in der Fertigung müssen immer weiter verkürzt werden.

Diese Verbesserungen können nicht allein durch Analyse von Daten aus der Fertigung und kritisches Nachdenken erreicht werden. Dazu sind die Zusammenhänge in Entwicklung, Fertigung und Qualitätsmanagement zu kompliziert und vielschichtig. Um den Einfluss von Designänderungen auf die Eigenschaften eines neuen Produktes oder den Einfluss von Änderungen von Prozessparametern auf das Prozessergebnis zu bestimmen, sind gezielte Versuche notwendig [6].

Diese werden mit dem Ziel durchgeführt, die komplexen Ursache-/Wirkungszusammenhänge zwischen einer oder mehrerer Stör-/ Steuergrößen und verschiedener Zielgrößen untersuchen und verstehen zu können. Es geht also darum sichtbar zu machen, welche Auswirkungen die Veränderung der Einflussgrößen auf ein bestimmtes Ergebnis haben. Dadurch wird eine gezielte Ergebnisbeeinflussung ermöglicht. Das Verhältnis zwischen Eingabe und Ausgabe

(Ergebnis/Zielgröße) wird auch als Prozess bezeichnet. Zur Veranschaulichung dient die nachstehende Abbildung 2.7.

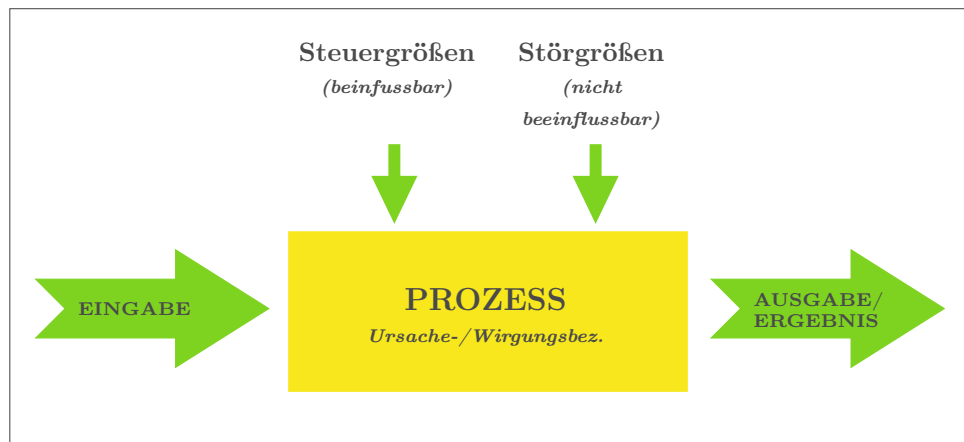


Abbildung 2.7: Prozessmodell zur statistischen Versuchsplanung

Wie in der Abbildung zu erkennen, wird die Eingabe innerhalb des Prozesses von verschiedenen Größen beeinflusst, was entsprechende Auswirkungen auf das Ergebnis hat. Außerdem zu erkennen ist eine Unterteilung der Einflussgrößen in Steuer- und Störgrößen. Das geschieht deshalb, weil es Einflussfaktoren geben kann, die während des Prozessverlaufs nicht beeinflusst werden können. Ein Beispiel dafür wäre etwa die Außentemperatur in einer Fabrikhalle, die negative Einflüsse auf die Präzisionsgenauigkeit eines Industrieroboters haben kann, da sich das Material, aus dem der Roboter gefertigt ist (meistens Stahl) bei hohen Temperaturen (also zur Sommerzeit) ausdehnt. Im Rahmen einer Systemanalyse ist dieser Faktor zwar von hoher Relevanz, kann aber in der Praxis oftmals, wenn überhaupt, nur sehr begrenzt beeinflusst werden. Steuergrößen wären hier dann z.B. die einzelnen Einstellparameter innerhalb der kinematischen Kette des Roboters, welche gezielt beeinflussbar sind und in direktem Zusammenhang mit der Präzisionsgenauigkeit stehen.

Um nun die richtigen Einstellungen in Abhängigkeit von der Außentemperatur zu finden wäre es natürlich denkbar und möglich, immer nur einen Parameter bei unterschiedlichen Temperaturen zu verändern und so die optimale Einstellung bezogen auf die Genauigkeit für jeden der einzelnen Parameter zu finden (**Ein-Faktoren-Experiment**). Diese Vorgehensweise führt aber deshalb oft nicht zum optimalen Ergebnis, da hierbei nur jeder einzelne Parameter in Abhängigkeit von der Temperatur untersucht wurde, aber nicht die Wechselbeziehungen zwischen den Steuer- und Störgrößen untereinander.

Was in diesem Modell also noch fehlt, um zu einer ganzheitlichen Analyse zu gelangen, ist die Einbeziehung dieser Wechselwirkungen in das Modell (**Gitterlinien-Experiment**). Denn nur durch die Betrachtung der Gesamtdynamik eines Systems ist es möglich, ein globales Optimum zu finden. Bezogen auf das o.g. Beispiel mit dem Industrieroboter können auf diese Weise Erkenntnisse darüber gewonnen werden, wie genau sich die Außentemperatur auf verschiedene Parameter der kinematischen Kette des Roboters (unter Einbeziehung der Wechselwirkungen zwischen den Steuergrößen untereinander) auswirkt und wie diese in Abhängigkeit von der Außentemperatur angepasst werden müssen, um das Ergebnis (hier: Präzisionsgenauigkeit) in die gewünschte Richtung zu beeinflussen. Im Rahmen einer statistischen Versuchsplanung wird genau dieses Ziel verfolgt.

Nach [7] kann zwischen den in nachstehender Abbildung xyz dargestellten Versuchsplänen unterschieden werden:



Abbildung 2.8: Arten von Versuchsplänen

Welcher Versuchsplan der Richtige ist, hängt von der jeweiligen Aufgabenstellung ab. Da in der vorliegenden Arbeit eine statistische Auswertung anhand eines **vollständig faktoriellen Versuchsplans** erfolgt, beschränken sich die weiteren Ausführungen in diesem Kapitel auf dessen detaillierter Beschreibung.

Von elementarer Bedeutung ist es zu wissen, wie viele **Einflussfaktoren (k)** im Rahmen einer Untersuchung vorliegen und im Modell entsprechend zu berücksichtigen sind und welche **Variationsstufen (n)** innerhalb eines Faktors möglich sind. Die Anzahl der durchzuführenden Versuche (z) kann dann allgemein wie folgt berechnet werden:

$$z = n^k \quad (2.5)$$

Hat das zu untersuchende System also 3 zu berücksichtigende Faktoren, die jeweils in 2 Stufen (+/-) variiert werden können, müssen bei einem vollständig faktoriellen Versuchsplan also $3^2 = 8$ Versuche durchgeführt werden. Der sich daraus ergebende Versuchsplan ist in folgender Tabelle xyz dargestellt.

Tabelle 2.1: Versuchsplan mit 3 Einflussfaktoren und jeweils 2 Faktorstufenkombinationen

Anzahl Versuche	Faktorstufen- kombinationen		
	A	B	C
1	-	-	-
2	-	-	+
3	-	+	-
4	-	+	+
5	+	-	-
6	+	-	+
7	+	+	-
8	+	+	+

Kapitel 3

Ausgangssituation

Ziel dieses Kapitels ist es die Ausgangssituation, also die mit dieser Arbeit verbundenen Rahmenbedingungen im Detail darzulegen, um damit die Grundlage für eine schlüssige Präsentation des Lösungskonzeptes im darauf folgenden Kapitel 4 zu schaffen.

Im Abschnitt 3.1 wird zunächst auf die Bedeutung des Einsatzes digitaler Bildverarbeitung zur Analyse von Gusseisen eingegangen und in diesem Zusammenhang die Software AMGuss vorgestellt. Dabei wird auf die Bedeutung eines Anordnungsklassifikators eingegangen und die Erstellung eines Solchen im Detail dargestellt (3.1.1), der vollständige Ablauf bei der Durchführung einer Messung beschrieben (3.1.2) und schließlich die durch eine Auswertung erzeugten Messergebnisse einer genaueren Betrachtung unterzogen (3.1.3).

Ergänzend dazu wird im Abschnitt 3.2 auf das zur Verfügung stehende Bildmaterial eingegangen und das Kapitel schließt mit einer ausführlichen Problembeschreibung in Abschnitt 3.3.

3.1 Einsatz digitaler Bildverarbeitung zur Analyse der Mikrostruktur von Gusseisen (AMGuss)

Wegen der mit rein visueller Qualitätskontrolle verbundenen Probleme, die bereits in Kapitel 2.1.4 auf Seite 3 dargelegt wurden, war ein automatisch ablaufendes Analyseverfahren zur Bestimmung der Mikrostruktur von Gusseisen, erweitert um Bilddokumentation und Bildarchivierung, ein großes Anliegen in den Laboren der Eisengießereien. Dadurch sollte eines der Grundanliegen des Qualitätsmanagements erfüllt werden, nämlich die quantitative Charakterisierung des Gussvorgangs durch Bereitstellung aussagekräftiger Messparameter und Objektivierung der Messergebnisse. Aus diesem Anliegen heraus entstand bei der GFaI e.V. bereits im Jahr 2005 ein Forschungsprojekt mit der Zielsetzung, die Grundlage zur Entwicklung eines marktreifen Software-Produktes zu schaffen, mit dem sich alle geforderten Normparameter der Mikrostruktur von Gusseisen automatisch (oder zumindest halbautomatisch) bestimmen lassen. [8].

Das Ergebnis dieses Forschungsprojektes ist die Software AMGuss (**A**nalyse der **M**ikrostruktur von **G**usseisen) die eine normgerechte (halb-)automatische Bestimmung der Mikrostruktur von Gusseisen ermöglicht. Da die vorliegende Arbeit nur der Weiterentwicklung einer Teilfunktionalität dieser Software gewidmet ist, nämlich der Lamellengraphit-Auswertung, beschränken sich die weiteren Ausführungen in diesem Abschnitt auf lediglich deren genauere Beschreibung.

3.1.1 Erstellung eines Anordnungsklassifikators für die Lamellengraphit-Auswertung

Aufgrund unterschiedlicher Laborbedingungen, können in der Praxis Probenbilder mit unterschiedlichen Kalibrierungen (Pixelgröße in $\mu\text{m}/\text{Pixel}$) zur Messung vorliegen. Allerdings ist das für die eindeutige, exakte Analyse und Zuordnung (siehe Abbildung 2.1 auf Seite 3) problematisch, da die Unterscheidungsmerkmale der Anordnungsklassen verschwimmen und somit nicht mehr eindeutig identifiziert und zugeordnet werden können. Deshalb ist für die Durchführung einer Lamellenguss-Auswertung mit der Software AMGuss, für jede Ausgangskalibrierung vorliegender Bilder ein eigener Anordnungsklassifikator manuell zu erstellen. Dabei werden in etwa 20-30 Probenbildern, die darin vorliegenden lamellaren Graphitstrukturen gemäß der Anordnungsklassen markiert und auf der Grundlage

dessen ein Klassifikator trainiert. Wichtig dabei ist zu beachten, dass alle hierfür verwendeten Bilder dieselbe Kalibrierung besitzen, in den Trainingsbildern auch alle Anordnungsklassen vertreten sind und diese richtig markiert werden.

Dafür stellt das Programm AMGuss dem Nutzer eine entsprechende Funktionalität bereit, wie in Abbildung 3.1 dargestellt.

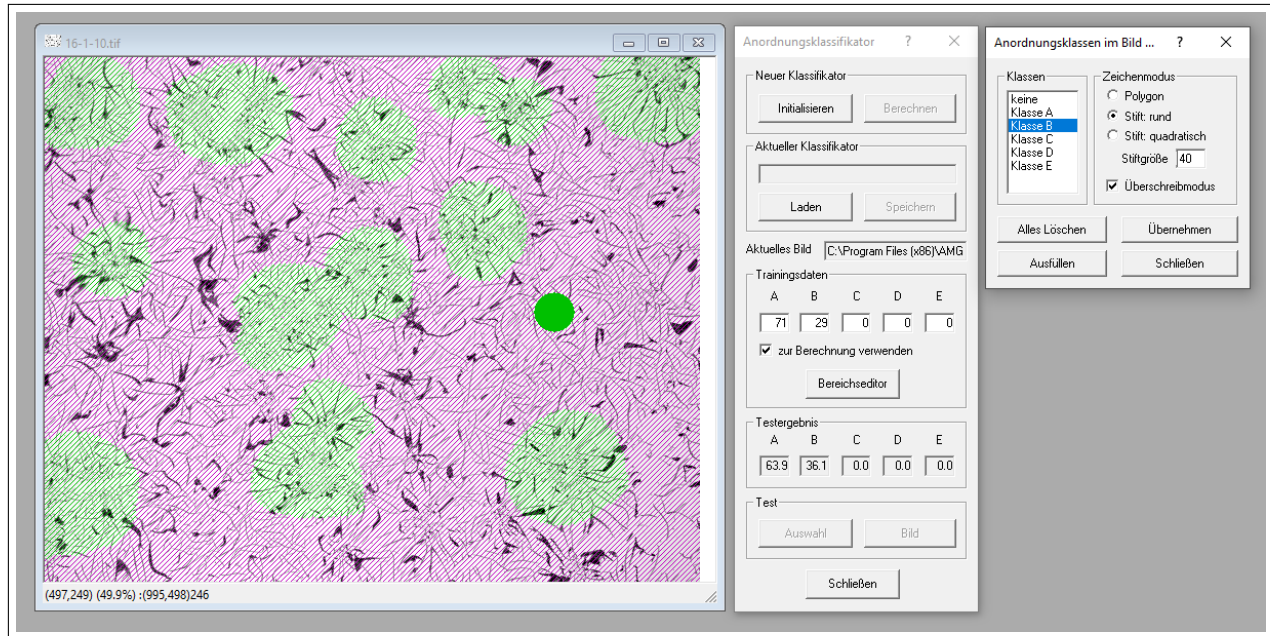


Abbildung 3.1: Erstellung eines Anordnungsklassifikators in AMGuss

Grundlage für die Erstellung eines Klassifikators ist eine bereits geladene Bildserie, die zuvor erstellt worden sein muss. Dabei ist anzugeben, mit welcher Kalibrierung die Bilder der Serie aufgenommen wurden. Diese ist, wie in Kapitel 2.1.3 bereits gezeigt wurde, abhängig von der Chipgröße der verwendeten Kamera (z.B. $\frac{1}{2}$ Zoll in der Diagonale) sowie der eingesetzten Optik bestehend aus Lichtweg, Objektiv und Zwischenadapter. Das in Abbildung 3.1 (links) dargestellte Bild einer Lamellenguss-Probe hat bspw. eine Kalibrierung von $1 \mu\text{m}/\text{Pixel}$.

Im kleinen Fenster (oben rechts) lässt sich dann eine Anordnungsklasse auswählen, der gewünschte Markierungsstil einstellen und die gemäß der gewählten Anordnungsklasse vorkommenden Strukturen im Bild entsprechend markieren. Im Bild links ist dies an den hellgrün markierten Strukturen zu erkennen. Hat der Nutzer dann (ggf. auch in mehreren Bildern) Markierungen für die Anordnungsklassen A bis E hinzugefügt, wird über die Funktion „Initialisieren“ (im mittleren Fenster oben) ein Anordnungsklassifikator erstellt. Dieser kann dann abgespeichert und für Vermessungen von Bildern verwendet werden, deren Kalibrierung dieselbe (\pm eines einstellbaren minimalen Abweichungsfaktors) ist wie die der Bilder, die zur Erstellung des Anordnungsklassifikators verwendet wurden.

→ Vllt. ein Beispiel eines Klassifikators in den Anhang???

3.1.2 Durchführung einer Lamellengraphit-Auswertung mit AMGuss

Dies ist zum weiteren Verständnis vor allem deshalb von Belang, weil für die Erfüllung der Zielsetzung dieser Arbeit eine umfangreiche statistische Analyse erforderlich sein wird. Um die Daten dafür zu generieren, müssen mit sehr vielen Bildern zahlreiche Messungen mit unterschiedlichen Parametern durchgeführt werden, weshalb der Prozess zur Durchführung einer Messung auch vollständig automatisiert werden soll.

3.1.3 Bewertungsergebnisse einer Lamellengraphit-Auswertung

3.2 Zur Verfügung stehendes Bildmaterial

3.3 Problemstellung

Die Forderung nach Allgemeingültigkeit bei einem Anordnungsklassifikator in diesem Kontext zu erfüllen bedeutet, einen Algorithmus zu implementieren, mit dem die Kalibrierung der für eine Messung vorliegenden Bilder an die mit dem ein im System hinterlegter Anordnungsklassifikator erstellt wurde, anzupassen. Das kann grundsätzlich durch Skalierung erreicht werden. Da sich die Kalibrierung umgekehrt Proportional zur Bildgröße verhält müsste zum Beispiel ein mit einer Ausgangskalibrierung von $1,0 \mu\text{m}/\text{Pixel}$ vorliegendes Bild also um den Faktor 2 hoch-skaliert (vergrößert) werden, um die Kalibrierung auf $0,5 \mu\text{m}/\text{Pixel}$ zu verändern. Analog dazu wäre es dann natürlich auch möglich, eine zu große Ausgangskalibrierung durch Verkleinerung des Bildes entsprechend anzupassen. Geht man weiter davon aus, das der im System hinterlegte Anordnungsklassifikator mit Bildern derselben Kalibrierung erstellt wurde, wäre nun eine korrekte Messung mit diesem Klassifikator möglich. Somit würde der Arbeitsschritt zur manuellen Erstellung und Verwaltung von Klassifikatoren für unterschiedliche Ausgangskalibrierungen wegfallen und die Forderung nach Allgemeingültigkeit wäre damit erfüllt und man würde mit nur einem einzigen Anordnungs-klassifikator auskommen.

Bei der Skalierung von Bildern ist jedoch zu beachten, das zur Erhaltung der Bildqualität verschiedene Interpolationsalgorithmen zum Einsatz kommen um die sich durch Vergrößerung/Verkleinerung ergebende Differenz der Pixelanzahl zwischen Eingangs- und Ausgangsbild auszugleichen. Im Falle der Vergrößerung ergibt sich, dass das Ausgangsbild entsprechend dem Vergrößerungsfaktor mehr Pixel besitzt als das Eingangsbild und die sich dadurch ergebenden Pixellücken durch Interpolation gefüllt werden müssen. Bei Verkleinerung verhält es sich genau umgekehrt, nur das in diesem Fall die Pixelmenge verkleinert wird. Es liegt auf der Hand, das eine solche Interpolation die Details des Originalbildes nie 100%-ig erhalten kann. So können zwar für viele praktischen Anwendungsfälle im Grafik- oder Fotobereich sehr gute Ergebnisse erzielt werden, weil das menschliche Auge diese Abweichungen nicht erkennen kann. Allerdings erweist sich die Interpolation im Bereich der bildbasierten Materialstrukturanalyse als problematisch, da sich die zu analysierenden Strukturen durch die Interpolation verändern und somit die Messergebnisse verfälscht werden. Welche unerwünschten Auswirkungen das im vorliegenden Fall hat, zeigen die folgenden Abbildungen 3.2 und 3.3.

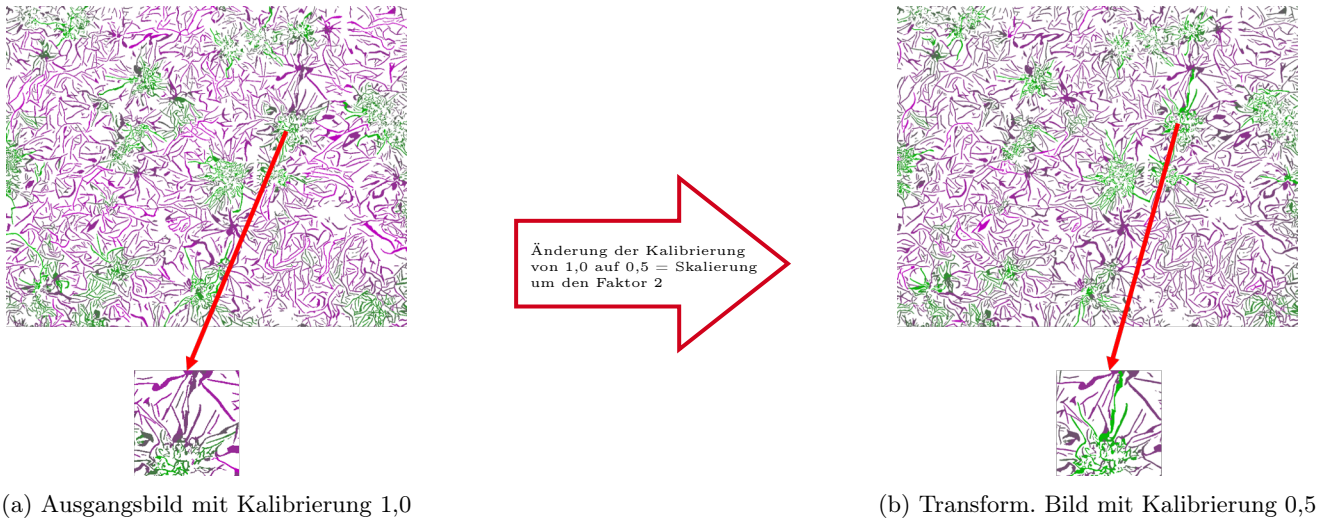
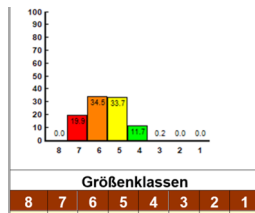
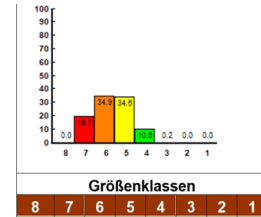
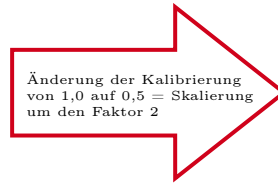


Abbildung 3.2: Messfehler-Darstellung (visuell) nach Bildtransformation mit bikubischer Interpolation



(a) Ausgangsbild mit Kalibrierung 1,0



(b) Transform. Bild mit Kalibrierung 0,5

Abbildung 3.3: Messfehler-Darstellung (Histogramm) nach Bildtransformation mit bikubischer Interpolation

Es wurde also ein Bild mit einer Ausgangskalibrierung von $1,0 \mu\text{m}/\text{Pixel}$ um den Faktor 2 mit dem Ziel skaliert, die Kalibrierung auf $0,5 \mu\text{m}/\text{Pixel}$ zu verändern. Die beiden Abbildungen zeigen nun unterschiedliche Sichtweisen auf ein und dasselbe Problem. Bereits in Bild 3.5 visuell erkennbare Klassifikationsfehler, tauchen auch in dem von AMGuss errechneten Analyseergebnis auf und sind an einer leichten Linksverschiebung der Histogrammdaten zu erkennen. Die Fehler sind zwar im hier betrachteten Fall sehr gering, im Bereich der Materialstrukturanalyse sehr unerwünscht, da sich aus der Lage, Größe und Verteilung (also der Gesamtstruktur) mechanische Materialeigenschaften (bspw. Druck und Zugfestigkeit, Bruchsicherheit, etc.) ableiten lassen und somit diese Abweichungen zu Fehleinschätzungen bei der qualitativen Bewertung des Materials führen können.

Kapitel 4

Konzept

4.1 Sollzustand/Anforderungen

Die Vorgehensweise zur Erstellung eines Anordnungsklassifikators in Kapitel 3.1.1 bereits beschrieben. Dies ist für den Nutzer mit einem nicht unerheblichen Aufwand verbunden. Hinzu kommt eine gewisse Fehleranfälligkeit, da für jede Messung der in Bezug auf die Bildkalibrierung richtige Klassifikator für die Messung ausgewählt werden muss.

Das Gütekriterium an einen solchen Klassifikator ist, die durch Skalierung (bzw. Interpolation) hervorgerufenen und in Kapitel 3.3 bereits näher beschriebenen Messfehler auf ein **tolerierbares** Maß hin zu minimieren. Allerdings gibt es jedoch, nach den aktuellen allgemein anerkannten Regeln der Technik (vgl. dazu [auf Norm verweisen](#)) keinen eindeutigen objektiven Maßstab, der zur Beurteilung angelegt werden könnte. Stattdessen beruht die Graphitklassifizierung auf einer visuellen Einschätzung der Spezialisten, welche die Beurteilung der Proben vornehmen. Die Norm DIN ISO 945-1 definiert dabei die Grundlagen, auf denen eine solche Beurteilung zu erfolgen hat. Was also als noch tolerierbar gilt, entscheidet der versierte Nutzer in gewissen Grenzen selbst und wie die Erfahrungen zeigen, existieren teils nicht unerhebliche Abweichungen bei der Einschätzung.

4.2 Erzeugung von Bildern mit unterschiedlichen Ausgangskalibrierungen

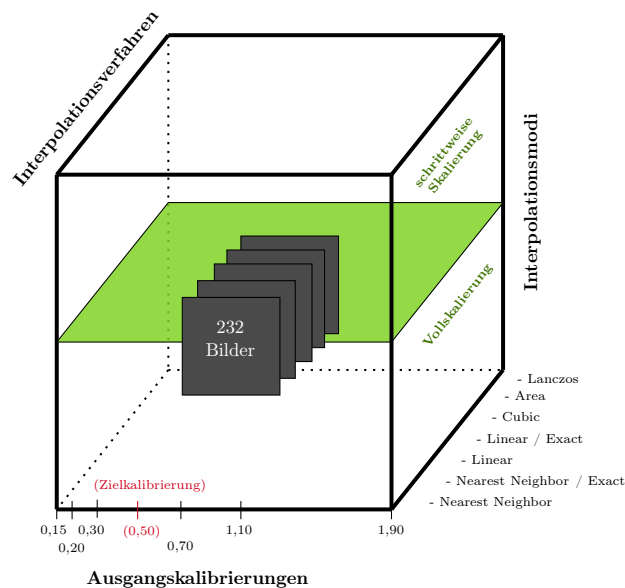


Abbildung 4.1: Planungsmodell (1) zur Erzeugung von Versuchsbildern

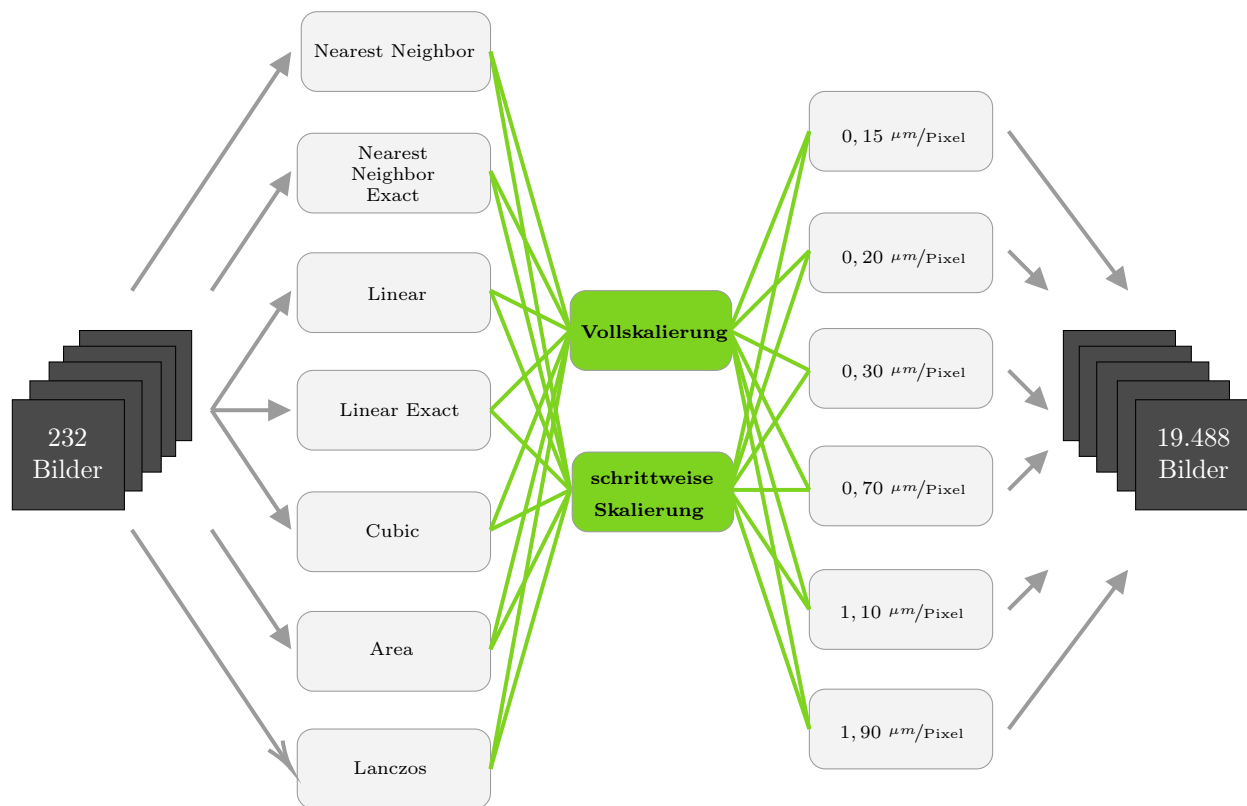


Abbildung 4.2: Planungsmodell (2) zur Erzeugung von Versuchsbildern

4.3 Das Analysekonzept

Wie in Kapitel 2.3 auf Seite 8 bereits umfänglich dargelegt, ist die statistische Versuchsplanung immer dann ein hervorragendes Werkzeug wenn es darum geht

4.3.1 Systemanalyse

Die Aufgabe, einen allgemeingültigen Anordnungsclassifikator zu entwickeln, der die beschriebenen Anforderungen erfüllt, ist im Grunde die Lösung eines Optimierungsproblems. Dabei ist es erforderlich zu untersuchen, welche Abhängigkeiten zwischen den **Einflussgrößen** und Zielgrößen zu bestehen, was zunächst vereinfacht in Abbildung dargestellt ist.

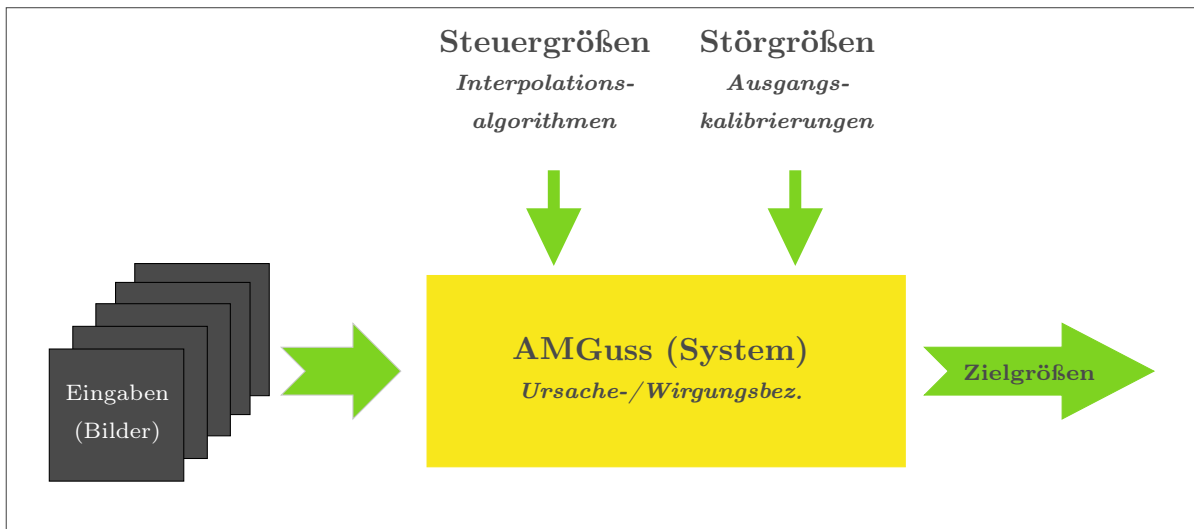


Abbildung 4.3: Modell zur Darstellung der Ursache-/Wirkungsbeziehungen im Systemkontext

4.3.2 Definition der Zielgrößen

Hinweis: Mehrgrößenoptimierungsproblem → Kombination der Einzelwerte zu einer gewichteten Summe...
xyxyxyxy

4.3.3 Definition der Einflussgrößen

4.3.4 Modellbildung

4.3.5 Aufbau der Versuchsplanung

4.4 Versuchsdurchführung

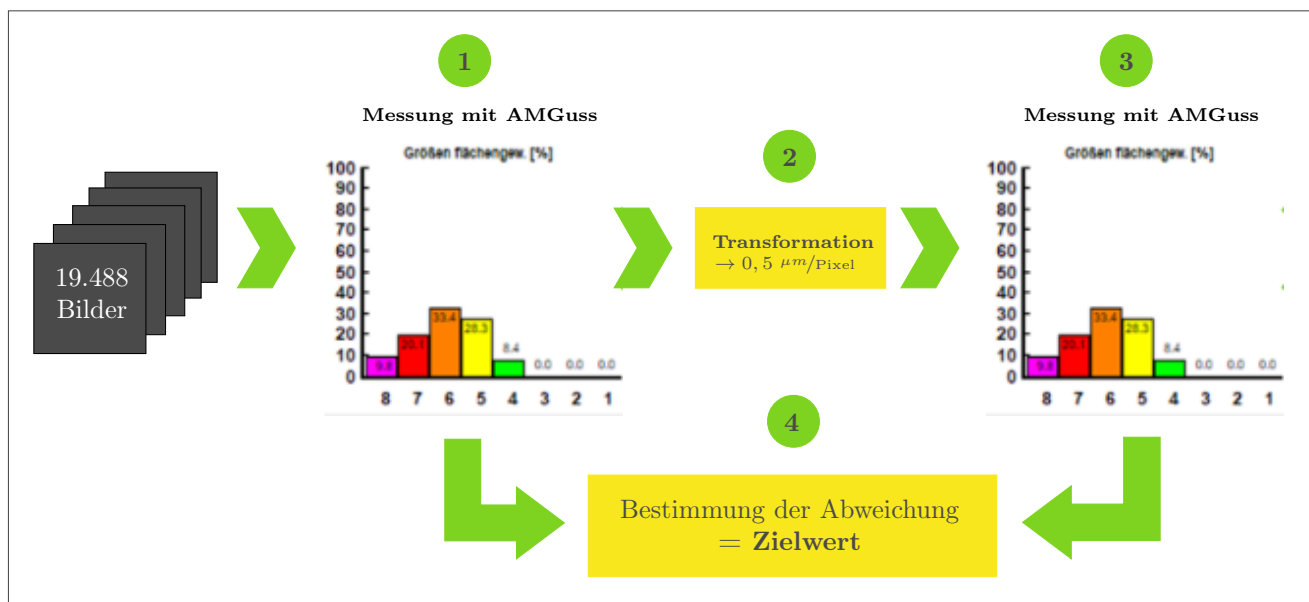


Abbildung 4.4: Schematische Darstellung des Modells zur Versuchsdurchführung

- 4.4.1 Messung der Bilder mit AMGuss vor und nach der Skalierung
- 4.4.2 Anwendung *einstufiger* Skalierungen auf die erzeugten Bilder
- 4.4.3 Anwendung *mehrstufiger* Skalierungen auf die erzeugten Bilder

Kapitel 5

Umsetzung

5.1 Rahmenbedingungen

5.1.1 Technologie-Stack

5.2 Implementierung

5.2.1 Modellierung und algorithmische Beschreibung der Implementierung

5.3 Verwendung von Bildern mit verschiedenen Ausgangskalibrierungen

5.4 Skalierung der erzeugten Bilder (einstufig/mehrstufig)

5.4.1 Bilineare Interpolation

5.4.2 Bikubische Interpolation

5.4.3 Flächenbasierte Interpolation

5.4.4 Nearest-Neighbor-Interpolation

5.4.5 LANCZOS-Interpolation

Kapitel 6

Evaluierung

6.1 Vergleich angewendeten Interpolationsverfahren

6.1.1 Laufzeitkomplexität und Performance

6.1.2 Kennzahlenvergleich und Interpretation

Kapitel 7

Zusammenfassung und Auswertung

7.1 Zusammenfassung

7.2 Auswertung

Literaturverzeichnis

- [1] *DIN EN ISO 945-1, Mikrostruktur von Gusseisen. Teil 1, Graphitklassifizierung durch visuelle Auswertung (EN ISO 945-1:2018)*. Frankfurt am Main: Beuth Verlag GmbH, 2018.
- [2] R. Deike, A. Engels, F. Hauptvogel, P. Henke, K. Röhrig, S. Wilfried, H. Werning, and D. Wolters, “Gusseisen mit Lamellengraphit, Herstellung - Eigenschaften - Anwendung,” Bundesverband der Deutschen Giesserei-Industrie e.V., Düsseldorf, 2013.
- [3] Gussproduktion der wichtigsten Länder im Jahr 2019. Statista GmbH. [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/237370/umfrage/giessereiindustrie-nach-produktion-weltweit/>
- [4] Einsatzgebiete und Märkte für Gusseisen. Bundesverband der Deutschen Giesserei-Industrie e.V. [Online]. Available: <https://www.bdguss.de/einsatzgebiete-maerkte/>
- [5] H. Schumann and H. Oettel, *Metallografie: Mit einer Einführung in die Keramografie*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2016.
- [6] W. Kleppmann, *Versuchsplanung*. München: Carl Hanser Verlag, 2020.
- [7] H. Shiefer and F. Schiefer, *Statistik für Ingenieure*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2018.
- [8] *Analyse der Mikrostruktur von Gusseisen mit Hilfe von Fuzzy-Techniken (AMGuss)*. Berlin: Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik e.V., 2007.