

Bachelorarbeit

Charakterisierung von Baustahlpulver zur additiven Fertigung mittels Kaltgasspritzen

Vorgelegt von:	Lars Niklas Fleck
Matrikel-Nummer:	894855
Institut:	Lehrstuhl für Stahlbau und Stahlwasserbau
Erstgutachter:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Max Gündel
Zweitgutachter:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sylvia Keßler
Betreuer:	Jiangnan Chen, M.Sc.

Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Semester-/Bachelor-/Masterarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die im Literaturverzeichnis angegebenen Quellen benutzt habe. Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder noch nicht veröffentlichten Quellen entnommen sind, sind als solche kenntlich gemacht. Die Zeichnungen oder Abbildungen in dieser Arbeit sind von mir selbst erstellt worden oder mit einem entsprechenden Quellennachweis versehen. Diese Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch bei keiner anderen Prüfungsbehörde eingereicht worden.

Hamburg, 12.12.2023

Lars Niklas Fleck

Inhaltsverzeichnis

0	Kurzfassung	3
1	Einleitung und Motivation	4
2	Grundlagen und Stand der Technik.....	6
	2.1 Kaltgasspritzverfahren	6
	2.2 Verfestigungsmechanismen und Wärmebehandlung	9
	2.2.1 Gitteraufbau und plastische Verformung von Metallen	9
	2.2.2 Festigkeitsmechanismen	12
	2.2.3 Wärmebehandlung	14
	2.3 Partikelkompression	16
3	Experimentelles Vorgehen	18
	3.1 Material	18
	3.2 Versuchsaufbau	19
	3.3 Partikelkompression	20
4	Auswertung	28
5	Diskussion.....	38
	5.1 Festigkeit und Wärmebehandlung	38
	5.2 Einfluss auf die Schichtqualität	39
6	Zusammenfassung und Ausblick	40
7	Literaturverzeichnis	42
	Abbildungsverzeichnis	44
	Tabellenverzeichnis	45

0 Kurzfassung

Diese wissenschaftliche Arbeit konzentriert sich auf die präzise Bestimmung der Partikelfestigkeiten von Stahlpulvern, insbesondere des Materials S235 und S355, vor und nach gezielten Wärmebehandlungen. Ein Hauptaugenmerk liegt dabei auf dem Laborversuch und dem Aufbau der Untersuchungen. Das Ziel dieser Forschung ist die Beurteilung der Eignung der untersuchten Stahlpulver für das additive Fertigungsverfahren mittels Kaltgas-spritzen.

Ein beträchtlicher Teil der Arbeit ist der systematischen Analyse der Pulvereigenschaften gewidmet, wobei insbesondere auf die Auswirkungen gezielter Wärmebehandlungen auf die Partikelfestigkeiten eingegangen wird. Dabei liegt ein besonderer Fokus darauf, festzustellen, inwieweit die Festigkeitsminderung Einfluss auf die Eta-Werte in der KSS-Simulation hat. Die Herausforderung besteht darin, die Veränderungen in den Partikelfestigkeiten zu quantifizieren und zu verstehen, um die Anwendbarkeit der Stahlpulver im additiven Fertigungsprozess zu bewerten.

Die KSS-Simulation spielt eine entscheidende Rolle, da sie eine theoretische Grundlage für die Einschätzung bietet, ob die behandelten Stahlpulver unter den simulierten Bedingungen effektiv gespritzt werden können. Hierbei wird besonders darauf geachtet, wie sich die Festigkeitsminderung auf die Spritzbarkeit der Pulver auswirkt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind von großer Bedeutung für die Optimierung des Kaltgasspritzverfahrens und könnten einen Beitrag zur Weiterentwicklung von Materialien für die additive Fertigung leisten.

1 Einleitung und Motivation

Die Bauindustrie steht vor einem Wandel. In der heutigen Wirtschaft wird immer vermehrt auf Reduzierung der CO₂-Emissionen und Verringerung des Ressourcenverbrauchs geachtet. Der Bausektor ist für fast 40% der energie- und prozessbedingten CO₂-Emissionen weltweit verantwortlich [1]. Gerade in der deutschen Politik ist Nachhaltigkeit und Umweltschutz ein zentrales Thema. Durch die Einführung strengerer Umweltauflagen und Anreize für umweltfreundliche Bauprojekte soll die Bauindustrie nachhaltiger gestaltet werden. Um dies zu realisieren, muss die Bauindustrie ihren Blick für alternative Fertigungsverfahren öffnen. Die Einführung von Normen und Standards für die additive Fertigung im Bauwesen ist ein wichtiger Schritt, um die Qualität und Sicherheit der hergestellten Bauteile zu gewährleisten. Die deutsche Politik unterstützt die Erarbeitung solcher Richtlinien, um die Integration der Technologie im Bauwesen zu erleichtern. Jedoch werden im Stahlbau komplexe und massive Konstruktionsdetails häufig noch durch Gießen oder Schmieden realisiert, wie z.B. Rohrknoten im Stahlbrückenbau. Aufgrund dieser manuellen Fertigungsverfahren sind die Erzeugnisse durch Gießen und Schmieden kostenintensiv, materialintensiv und die Werkstoffqualität streut stark [2]. Die Alternative ist auf additive Fertigung zurückzugreifen. Vorteile der additiven Fertigung sind die Wirtschaftlichkeit und Ressourceneffizienz. Bei der additiven Fertigung wird nur dort Material aufgetragen, wo dieses wirklich benötigt wird. Durch Simulationen und digitaler Berechnungsmodelle kann der Materialverbrauch optimiert werden. Dadurch können komplexere Formen energieeffizienter hergestellt werden.

An dem Lehrstuhl für Stahlbau und Stahlwasserbau der Helmut-Schmidt-Universität wird derzeit untersucht, wie Baustahl in dem additiven Fertigungsverfahren mittels Kaltgasspritzen umgesetzt werden kann. Die speziellen Verfahrensvorteile äußern sich vor allem durch eine höhere Auftragsrate (bis zu 14 kg/h) bei angemessenem Energieverbrauch und die geringe Einschränkung für die Bauteilgröße [3]. Hierbei wird das Metallpulver mit einem hochtemperaturkomprimierten Gas (bis zu 1100°C und 60 bar) auf eine Überschallgeschwindigkeit beschleunigt (bis zu 1000 m/s). Aufgrund der hohen Temperaturen und Geschwindigkeit des Partikels entsteht beim Auftreffen auf das Substrat große plastische Deformation, die wiederum in Wärme umgesetzt wird, wodurch eine mechanische und metallurgische Bindung erzeugt werden kann [4].

Vor diesem Hintergrund ist es ersichtlich, dass die Festigkeit des Partikels eine signifikante Rolle bei dem Prozess spielt. Eine geringere Festigkeit begünstigt beim Auftreffen die plastische Verformung und die dadurch verbundene Wärmeerzeugung. Folglich ist die Bindung zwischen dem Partikel und dem Substrat und zwischen Partikel und Partikel, die Schichtqualität. Diese Arbeit setzt den Fokus auf die Ermittlung der Festigkeit der verschiedenen Baustahlpulver und die Untersuchung des Einflusses von Wärmebehandlung bei unterschiedlichen Temperaturen auf die Festigkeit. Darauf folgt die KSS-Simulation. Hiermit werden die Schichtqualität und die kritische Geschwindigkeit des Pulvers während des Prozesses ermittelt. Schließlich werden die verschiedenen Festigkeiten des Pulvers unter Berücksichtigung der Schichtqualität und der kritischen Geschwindigkeit diskutiert.

2 Grundlagen und Stand der Technik

In diesem Kapitel werden die wissenschaftlichen Grundlagen zu dieser Arbeit erläutert. Zunächst wird auf das Kaltgasspritzverfahren und dessen Herkunft eingegangen. Anschließend werden die Themen Verfestigungsmechanismen und Wärmebehandlung und deren Bezug zu dieser Arbeit erklärt. Zuletzt werden die Grundlagen der Partikelkompression erläutert.

2.1 Kaltgasspritzverfahren

Die additive Fertigung hat ihre Anfänge schon im Jahr 1860, in welchem François Willème ein 3D-Selbstbildnis von sich erzeugte, in dem er sich aus 24 Blickwinkeln gleichzeitig fotografierte und aus Ausschnitten seine Konturen konstruierte. Diese Methodik verfeinerte sich bis heute zu dem, was unter additiver Fertigung bzw. auch als 3D-Druck verstanden wird. Das Prinzip der additiven Fertigung ist das sukzessive Aufbringen von Schichten, um eine gewünschte Form zu realisieren. Dazu muss der Körper oder die zu realisierende Form in geeignete Sichten und Segmente unterteilt werden. Dies geschieht heutzutage mit Programmen, die ein Computer-Aided Design in 2D-Flächen zerlegen. Aus den Informationen kann dann ein Code für die jeweilige Fertigungsmaschine entwickelt und zur Fertigung genutzt werden, so auch beim Kaltgasspritzen.[5]

Das Kaltgasspritzverfahren (englisch: Cold Spray) bezeichnet eine Beschichtungstechnologie, die im Jahre 1986 in der Russischen Akademie der Wissenschaften in Nowosibirsk entdeckt wurde. Dieses Verfahren ermöglicht eine hochwertige Beschichtung auf einer Vielzahl von Substraten, wobei die Schichtbildung unterhalb der Schmelztemperatur erfolgt. Dies stellt einen der Vorteile dar, den das Kaltgasspritzen, gegenüber den herkömmlichen thermischen Spritzverfahren besitzt. Durch die geringen thermischen Einflüsse beim Kaltgasspritzen, verändert sich die Mikrostruktur von dem verwendeten Ausgangsmaterial kaum bis gar nicht. Des Weiteren kommt es durch das Prozessgas, welches häufig ein Inertgas ist, auch zu keinen Oxidationsvorgängen. Ein weiterer Vorteil des Kaltgasspritzens ist die hohe Auftragsrate gegenüber anderen Verfahren wie z.B. dem MSG-Verfahren, die eine wesentlich geringere Auftragsrate vorweisen von nur bis zu 10 kg/h [2,4].

Aufbau einer Kaltgasspritzanlage

Eine Kaltgasspritzanlage besteht aus einem Pulverförderer, mit dem entsprechendem gewünschten Pulver enthalten und aus einer Gasheizung, in der das Prozessgas erhitzt wird. Des Weiteren besteht der vordere Teil aus einer Vorkammer, in der das erhitzte Prozessgas mit dem Trägergas und dem enthaltenen Pulver, vermischt und durch die davorliegende Laval-Düse beschleunigt wird (siehe **Abbildung 2.1**).

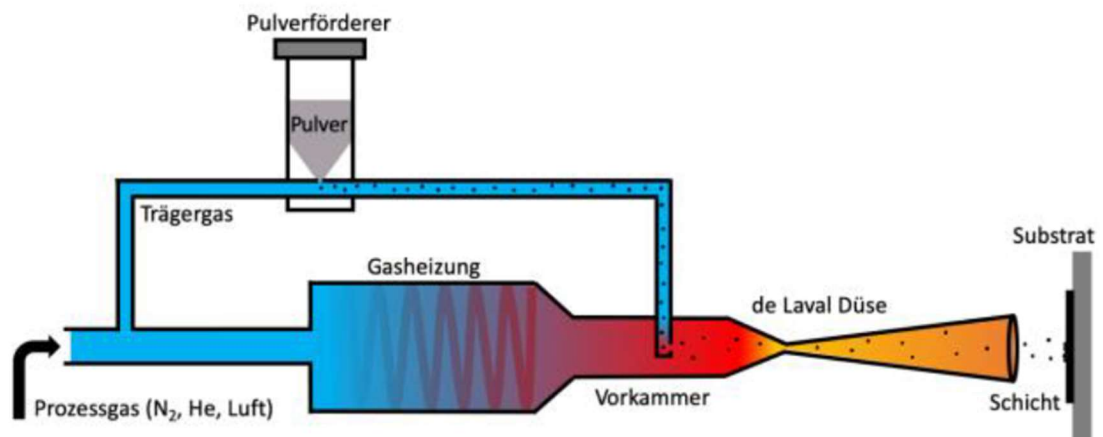


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung einer Kaltgasspritzanlage [6]

Als Prozessgas wird meist Helium oder Stickstoff verwendet, welches unter einem gewissen Druck steht. In der Vorkammer wird das Gas-Pulver-Gemisch auf Temperaturen von bis zu 1100°C erhitzt. Dabei ist zu beachten, dass Gastemperatur und Gasdruck erhebliche Einflüsse auf die zu erreichende Geschwindigkeit haben und somit auch auf die kinetische Energie der Partikel beim Aufprall [7].

Bindungsmechanismen

Das Verfahren bedient sich der Bindungsmechanismen duktiler Metalle. Die Pulverpartikel werden auf sehr hohe Geschwindigkeit beschleunigt. Somit treffen die Partikel mit einer hohen kinetischen Energie auf das Substrat. Um nun eine Schichtenstehung zu realisieren, müssen die Partikel über eine materialabhängige kritische Geschwindigkeit v_{crit} beschleunigt werden. Wie in **Abbildung 2.2**, bei den Substraten mit den Nummern eins, zwei und vier zu sehen. Die kritische Geschwindigkeit v_{crit} ist definiert als die Geschwindigkeit, bei

der mehr als 50% der Partikel auf dem Substrat haften bleiben. Wenn die kritische Geschwindigkeit unterschritten wird, kommt es zum Abrieb auf dem Substrat, da keine Partikel anhaften. Dadurch wird eine Ermüdung des Bauteils hervorgerufen, die sich durch Rissbildung äußern kann. Auch durch eine zu hohe Geschwindigkeit, der Erosionsgeschwindigkeit, wird nicht der gewünschte Effekt einer Schichtbildung erzeugt. Wie in **Abbildung 2.2** bei dem Substrat mit der Nummer drei zu sehen. Die Partikel verhalten sich hier ähnlich wie Sand beim Sandstrahlen. So ergibt sich ein Bereich zwischen dem Überschreiten der kritischen Geschwindigkeit bis zum Erreichen der Erosionsgeschwindigkeit, in dem eine Schichtbildung realisiert werden kann. Daraus ergibt sich das so genannte Spritzfenster [4].

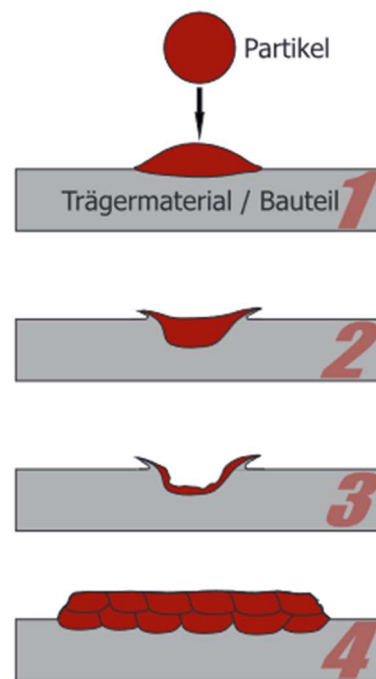


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung der Partikelgeschwindigkeit als Maß für Schichtqualität und Effizienz [8]

Um eine Aussage über die Effizienz der eingestellten Anlagenparameter zu erhalten, wird ein Weiterer eingeführt. Der Schichtqualitätsparameter η stellt einen Zusammenhang zwischen der Partikelaufrallgeschwindigkeit v_p und der kritischen Geschwindigkeit v_{crit} in der **(Gl.2.1)** her.

$$\text{Schichtqualitätsparameter } \eta = \frac{\text{Partikelaufrallgeschwindigkeit } v_p}{\text{kritisch Geschwindigkeit } v_{crit}} \quad \text{(Gl. 2.1) [4]}$$

Für $\eta=1$ sind die Aufprallgeschwindigkeit und die kritische Geschwindigkeit gleich groß. Die Schlussfolgerung daraus ist: Der Auftragswirkungsgrad beträgt 50%. Der erosive Bereich fängt bei $\eta=2$ an, somit müssen die Parameter so gewählt werden, dass $1 < \eta < 2$ erfüllt wird [4].

KSS-Software

Der Schichtqualitätsparameter kann mithilfe der Software „Kinetic Spray Solutions“ aus Buchholz, Deutschland ermittelt werden. Des Weiteren können durch die Simulation Aussagen über optimale Spritzfenster und Pulverförderungsdaten getroffen werden. In der Software können verschiedene Anlagenkonfigurationen simuliert werden, um die optimale Anlageneinstellung für das jeweilige Pulver ermitteln zu können. Aussagekräftig sind hier meist der oben genannte Schichtqualitätsparameter und der Auftragswirkungsgrad. Des Weiteren kann das Spritzfenster dargestellt werden, was ebenfalls maßgeblich zur Beurteilung des Auftrags beiträgt.

2.2 Verfestigungsmechanismen und Wärmebehandlung

Die Werkstoffwissenschaften beschäftigen sich mit der physikalischen und chemischen Zusammensetzung von Werkstoffen und der Verfahren zur Veränderung dieser Eigenschaften, um sie für den Menschen nutzbar zu machen und sie für das jeweilige Anwendungsgebiet zu optimieren. Einer der wichtigsten Werkstoffe neben Beton im Bauingenieurwesen ist Stahl. Um die Nutzbarkeit dieses Werkstoffes zu untersuchen, muss das Themengebiet der Verfestigungsmechanismen verstanden werden. Des Weiteren spielt dabei auch die Wärmebehandlung eine Rolle, um die Verfestigungsmechanismen zu beeinflussen.

2.2.1 Gitteraufbau und plastische Verformung von Metallen

Gitteraufbau

Metalle gehen atomare Bindungen ein, indem sie alle ihre Außenelektronen abgeben. Es entstehen positiv geladene Ionen. Die abgegebenen freien Elektronen heißen Valenzelektronen und bilden bei Metallen ein so genanntes Elektronengas. Durch diese freien Elektronen resultieren auch die physikalischen Eigenschaften, gute elektrische und thermische Leitfähigkeit, der Metalle [9].

Die Gitterstruktur von Metallen kann in kleinste Einheiten runter gebrochen werden, die sogenannten Elementarzellen, wie in **Abbildung 2.3** schematisch dargestellt. Diese Elementarzelle wiederholt sich in regelmäßigen Abständen und bildet so das Metallgitter. Je nach Metall oder dessen Zustand gibt es verschiedene Elementarzellen. Die einfachste ist das primitive kubische Gitter, welches nicht so häufig vorkommt. Ein Stoff, bei dem es vorkommt, ist z.B. Polonium. Häufiger kommen Variationen dieser Elementarzelle vor, wie das kubisch raumzentrierte Gitter (krz), kubisch flächenzentrierte Gitter (kfz) und das hexagonal dichtest gepackte Gitter (hpd) [10].

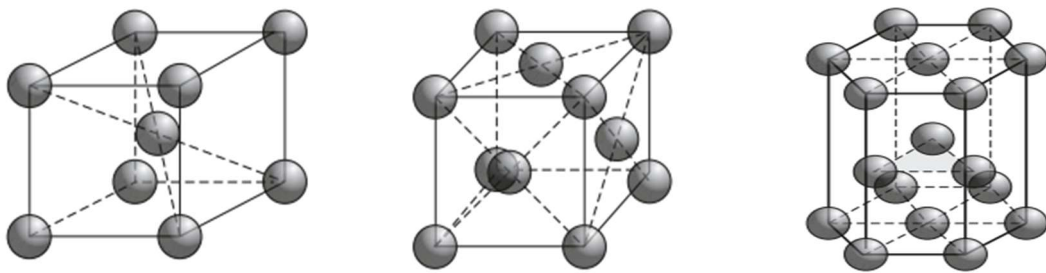


Abbildung 2.3: Schematische Darstellungen der Elementarzellen krz, kfz, hpd, in Reihenfolge von links beginnend [10 S.4]

Metalle weisen je nach Gittertyp unterschiedliche Eigenschaften auf, besonders hinsichtlich der Verformbarkeit. In dieser Arbeit wird sich auf Elementarzellen des kubisch raumzentrierten und kubisch flächenzentrierten Gitters beschränkt, da diese relevant für Stahl und deren Verfestigungsmechanismen sind. Um nun nochmal auf die Verformbarkeit von Metallen zurückzukommen, muss verstanden werden, wie sich das Gesamtgitter dabei verhält. Bei einer Verformung gleiten einzelne Gitterebenen aneinander ab. Diese werden auch Gleitebenen genannt. In **Abbildung 2.4** ist die Entstehung einer Versetzungsbewegung an solch einer Gleitebenen schematisch dargestellt.

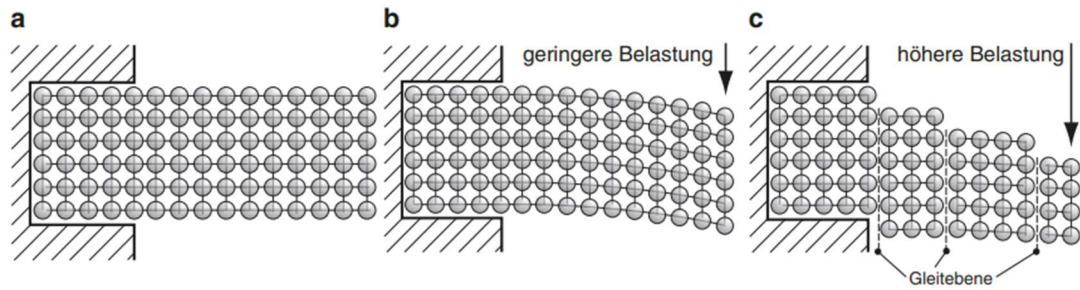


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung von Entstehung einer Versetzungsbewegung entlang einer Gleitebenen bei einem eingespannten Biegebalken [10 S.19]

Plastische Verformung

Ein Metall ist gut verformbar, wenn es viele Gleitebenen mit möglichst vielen Gleitrichtungen gibt. Umso mehr Gleitmöglichkeiten des Gesamtgitters, desto besser die Verformbarkeit. Die höchste Anzahl an Gleitsystemen, der drei oben genannten Elementarzellen, weist das kubisch-flächenzentrierte Gitter auf. Das kubisch-raumzentrierte Gitter weist weniger auf und ist somit auch schlechter verformbar [9,10,11].

Diese Bewegungen entlang der Gleitebenen werden Versetzungsbewegungen genannt. Diese können linear und auch schraubenmäßig auftreten. Diese Versetzungsbewegungen benötigen eine gewisse Spannung τ_0 um sich entlang der jeweiligen Gleitmöglichkeit zu bewegen. Eine schematische Versetzungsbewegung ist in der **Abbildung 2.5** dargestellt. Hier kann dem Verlauf von der Gitterunregelmäßigkeit (a) bis zu der vollendeten Versetzungsbewegung (e) gefolgt werden.

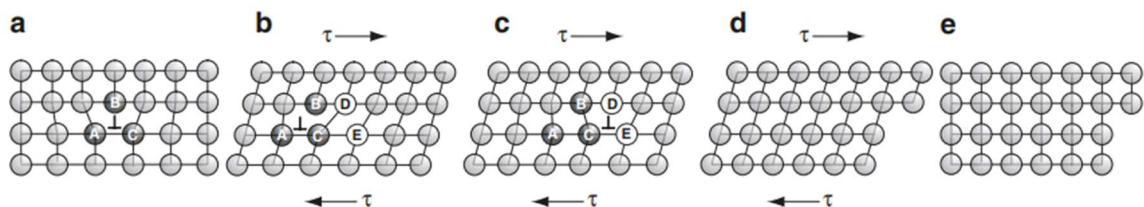


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung einer Versetzungsbewegung unter Spannung τ [10 S.20]

2.2.2 Festigkeitsmechanismen

Unter Festigkeit wird die Spannung, bei der das plastische Fließen am Bauteil auftritt, verstanden [12]. Wie bereits erläutert, basiert die plastische Verformung des Metalls auf den Versetzungsbewegungen des Atomgitters. Daher bewirkt jeder Gitterfehler ein Hindernis gegenüber der Mobilität und der freibeweglichen Länge der Versetzungen, somit steigt die Festigkeit [9,10,11]. Die Druckfließgrenze bzw. Zugdehngrenze von Stahl setzt sich aus folgender Gleichung zusammen.

$$\sigma_{yc} = \sigma_0 + \Delta\sigma_{MK} + \Delta\sigma_V + \Delta\sigma_P + \Delta\sigma_{KG} + \Delta\sigma_{Verbund} \quad \text{(GI 2.2) [12]}$$

σ_{yc}	Druckfließ- bzw. Zugdehngrenze
σ_0	Dehngrenze des reinen Eisens (Ferrit)
$\Delta\sigma_{MK}$	Festigkeitssteigerung durch Mischkristallhärtung
$\Delta\sigma_V$	Festigkeitssteigerung durch Versetzungen
$\Delta\sigma_P$	Festigkeitssteigerung durch Ausscheidungen bzw. Teilchen
$\Delta\sigma_{KG}$	Festigkeitssteigerung durch Korngrenzen
$\Delta\sigma_{Verbund}$	Festigkeitssteigerung durch Verbundwirkung (z.B. Primärkarbide)

Die Mechanismen zur Steigerung der Festigkeit, die für diese Arbeit relevant sind, werden im Folgenden beschrieben.

Kaltverfestigung

Die Kaltverfestigung, auch als Kaltverformung bekannt, ist ein Prozess, bei dem Metalle bei niedrigen Temperaturen (kleiner als 0,4 Schmelztemperatur T_s) verformt werden. Dieser Prozess hat wichtige Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften von Metallen und kann in Bezug auf die atomaren Elementarzellen erklärt werden. Die Grundlage hierfür liegt in den so genannten Versetzungen, welche Linear- oder Schraubenversetzung sind. Also Fehler in der Gitterstruktur. Während der Kaltverformung werden diese Versetzungen durch

äußere Kräfte aktiviert. Die Anwendung von Zugspannung oder Druckspannung bewirkt, dass die Versetzungen sich entlang der Gitterebenen bewegen und dabei die Atome überwinden, was zu einer plastischen Verformung des Metalls führt. Dieser Prozess führt zu einer Anhäufung von Versetzungen in Bereichen hoher Spannung, was wiederum zu einer erhöhten Festigkeit und Härte des Materials führt [9].

Mischkristallhärtung

Bei der Mischkristallhärtung werden Fremdatome in ein vorhandenes Metallgitter eingebaut. Als Fremdatome werden meist Atome von anderen Metallen verwendet. Wodurch ein sogenannter Mischkristall entsteht. Es gibt zwei Arten der Mischkristallhärtung: Zum einen die Substitutionsmischkristallhärtung, wobei Fremdatome ähnlicher Größe der Ursprungsatome genutzt werden und einzelne Atome in der Gitterstruktur ersetzen. Zum Anderen gibt es noch die Einlagerungsmischkristallhärtung, bei der die Fremdatome in die Zwischengitterplätze oder Leerstellen im Gitter eingelagert werden. Beide Arten führen zu einer Veränderung im Metallgitter, was wiederum die Bewegung der Versetzungen erschwert und dadurch eine Erhöhung der Festigkeit erzielt [10].

Ausscheidungshärtung

Die Ausscheidungshärtung ist ein Prozess, bei der durch Wärmebehandlungen gezielt Teilchen ausgeschieden werden und sich im Metallgitter festsetzen. Die Ausscheidungen wirken wie Hindernisse für die Verschiebung von Kristallgitterebenen, was zu einer erhöhten Härte und Festigkeit führt. Dieser Prozess ist besonders wichtig bei Legierungen, bei denen verschiedene Metalle miteinander kombiniert werden. Es gibt kohärente Ausscheidungen und inkohärente Ausscheidungen. Der Unterschied liegt darin, dass kohärente Ausscheidungen durch eine Versetzung geschnitten werden können und inkohärente nur umgangen [9].

Kornverfeinerung

Die Kornverfeinerung von Metallen ist ein Prozess, der darauf abzielt, die Korngröße in der metallischen Struktur zu reduzieren. Die Körner in einem metallischen Material sind kristalline Strukturen, die aus einer Anordnung von Atomen bestehen. Jeder Kristall, begrenzt durch die Korngrenzen, hat eine andere Gleitsystemorientierung, wodurch die Versetzungen an der Korngrenze behindert werden [9]. Die Größe dieser Körner beeinflusst somit die

mechanischen Eigenschaften des Metalls, wie Festigkeit, Härte und Duktilität. Die Korngröße kann beeinflusst werden durch, Wärmebehandlungs-, Umformung- und Erstarrungsprozesse [10].

2.2.3 Wärmebehandlung

Stähle werden Wärmebehandlungen unterzogen, um ihre Eigenschaften hinsichtlich Festigkeit und Duktilität zu ändern. Bei einer solchen Behandlung wird dies meist durch eine Gefügeumwandlung bewirkt. Stahl kann aufgrund einer Erwärmung Änderungen in der Gitterstruktur erfahren. Hier kann die Elementarzelle von kubisch-raumzentriert zu kubisch-flächenzentriert wechseln, dieser Prozess wird bei Abkühlung wieder umgekehrt. Einflussfaktoren bei einer Wärmebehandlung sind Erwärmungs-, Haltezeit und die jeweilige Abkühlgeschwindigkeit. Um die Temperaturen für die verschiedenen Wärmebehandlungen zu ermitteln, existiert das Eisen-Kohlenstoff-Diagramm, welches in **Abbildung 2.6** zu sehen ist [11].

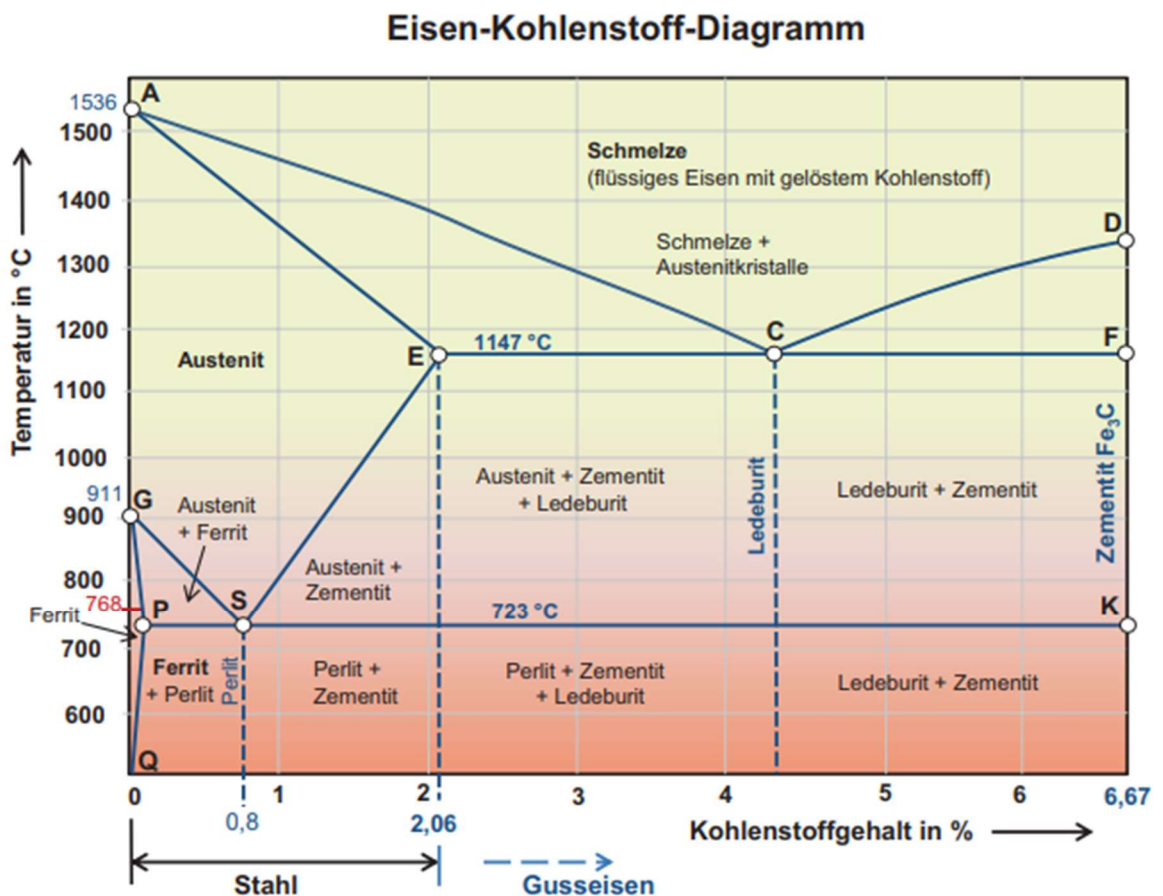


Abbildung 2.6: Eisen-Kohlenstoff-Diagramm [11 S.14]

Dieses Diagramm ist ein Zweiphasen-Diagramm, in der die masseprozentuale Lösung von Kohlenstoff, abhängig von der Temperatur, in Eisen und deren einzelnen Phasen aufgetragen ist. Die Soliduslinie (AECF) bildet den Übergang von dem festen zum flüssigen Aggregatzustand. Unterhalb dieser Linie befinden sich die Legierungen im Festzustand. Ein Teil dieser Linie wird auch als Eutektikale Linie (ECF) bezeichnet, über dieser Linie existieren feste und flüssige Phasen nebeneinander. Unterhalb der Eutektiden Linie (PSK) ist keine Austenit-Mischkristall Phase mehr vorhanden, dort unterhalb 723°C sind diese vollständig zerfallen [9]. Um zu verstehen, warum die Masseprozentuale Löslichkeit von Kohlenstoff in Eisen von der Temperatur abhängt, werden die einzelnen Phasen des reinen Eisens beim Erhitzen betrachtet. Reines Eisen durchläuft drei Phasenumwandlungen nach Unterschreiten der Schmelztemperatur. Unter 1536°C kristallisiert das Eisen zu Delta-Eisen. Dieses liegt als kubisch-raumzentrierte Elementarzelle vor. Wird die Temperatur unter 1392°C gesenkt, wandelt sich das Eisen in eine kubisch-flächenzentrierte Zelle um. Diese Phase wird Austenit genannt und auch als Gamma-Eisen bezeichnet. Unterhalb von 906°C erfährt das Eisen eine erneute Gitterstrukturumwandlung und liegt nun wieder als kubisch-raumzentrierte Zelle vor. In dieser Phase wird es als Alpha-Eisen bezeichnet, auch bekannt als Ferrit. Die massenprozentuale Lösung hängt also von der Gitterstruktur der Atome ab, da das kubisch-flächenzentrierte Gitter mehr Kohlenstoff aufnehmen kann als das kubisch-raumzentrierte Gitter [10]. Die verwendeten Werkstoffe in dieser Arbeit haben einen Kohlenstoffgehalt unter 0,2% [13,14].

Abschrecken

Das Härten von Stählen bedient sich einer langen historischen Geschichte, wobei schon in der vorchristlichen Zeit nach gehärteten Werkzeugen, mit einer längeren Haltezeit, gefragt wurde. Das damalige Ablöschen von dem glühenden Eisen in Wasser wird heute als Abschrecken bezeichnet [11]. Abschrecken ist also ein Wärmebehandlungsschritt mit schneller Temperatursenkung. Dabei findet eine rasche Änderung des Gefüges statt. Es entsteht Martensit und die Abkühlung verläuft so schnell, dass Diffusionsvorgänge nicht mehr abgeschlossen werden können. Es kommt zu einem Umklappen des Gamma-Gitters in ein tetragonales verzerres Alpha-Gitter, welches Martensit genannt wird. Das Prinzip, welches hinter der Martensithärte steht, ist die Mischkristallhärtung, entstehend durch die Übersättigung des Kohlenstoffes, in dieser Phase. Durch die unterbundenen Diffusionsvorgänge der Atome, kommt es zusätzlich zu einer hohen Gitterfehlerdichte und inneren Verspannungen, welche ebenfalls zur Härte beitragen [9]. Diffusion, sind Platzwechselforgänge von Atomen oder Ionen, die temperaturabhängig sind bzw. von der freien Energie im System abhängen [10].

Weichglühen

Eine Wärmebehandlung, um die Härte von Stahl herabzusetzen, ist das Weichglühen. Hierbei wird die Temperatur knapp unterhalb der Eutektoiden Linie für untereutektoide Stähle und um die Eutektoide Linie pendelnd für übereutektoide Stähle gehalten. Untereutektoide Stähle sind Stähle, deren Kohlenstoffgehalt unterhalb des Eutektoidpunkts liegt. Der Eutektoidpunkt ist der Punkt in einem Phasendiagramm für Eisen-Kohlenstoff-Legierungen, bei dem austenitischer Stahl bei einer bestimmten Temperatur zu einer Mischung aus Ferrit und Zementit umgewandelt wird. Übereutektoide Stähle sind Stähle, deren Kohlenstoffgehalt oberhalb des Eutektoidpunkts liegt. Nach dem Erreichen der jeweiligen Temperatur ist eine lange Haltezeit gefordert und ein langsames Abkühlen an der Luft. Nach dem Weichglühen weist das Gefüge rundliche Karbide auf und ist somit gut formbar [9].

Rekristallisationsglühen

Eine weitere Wärmebehandlung ist das Rekristallisationsglühen. Dieses erfolgt in der Regel bei Stahlwerkstoffen bei Temperaturen von 550°C bis 700°C. Bei dieser Behandlung soll keine Phasenumwandlung stattfinden. Hier ist das Ziel, den Stahl nach Kaltumformung wie Walzen oder Ziehen, wieder zäh und gut umformbar zu machen. Das Prinzip besteht in der Kornneubildung und dem Abbau von Gitterfehlern, um die Festigkeit herabzusetzen. In den meisten Fällen ist hierbei ein feinkörniges Gefüge gewünscht [9].

2.3 Partikelkompression

Um die Festigkeit einzelner Partikel zu bestimmen, wird das Verfahren Partikelkompression verwendet. Bei diesem Verfahren werden einzelne Partikel platziert, die Abmaße vermessen und anschließend mit einer Härteprüfmaschine geprüft. Hierbei werden die Partikel auf etwas mehr als 50% der ursprünglichen Größe komprimiert. Die verwendete Härteprüfmaschine benutzt dazu einen speziellen Indenter, der aus einem 200 µm großen Diamantstempel besteht. Die ausgewählten Partikel sollten möglichst rund und ohne Fehlerstellen sein. Schematisch ist das Ganze in der **Abbildung 2.7** dargestellt. Des Weiteren sollten die Partikel das Pulver repräsentativ darstellen. Es sollte also auf eine große Varietät bei der Auswahl geachtet werden.

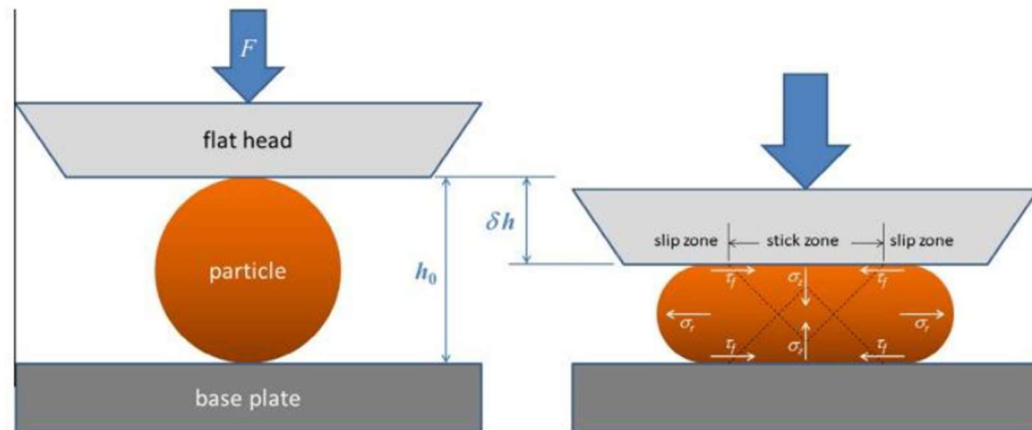


Abbildung 2.7: Partikel Kompression, Partikel wird zwischen Indenter und Hartmetallplatte gedrückt [15 S.3]

Bei dem Messvorgang nimmt die Härteprüfmaschine die aufgebrachte Kraft über den Kompressionsweg auf. Die aufgezeichneten Daten werden umgewandelt und in einem Spannungs-Dehnungs-Diagramm dargestellt. Um nun die Festigkeit ermitteln zu können, wird eine Fittingkurve dazu erstellt. Diese soll der Messkurve gleichen. Die **Gleichung 2.3** und die dazugehörigen Parameter ergeben sich aus Simulationen der Kraft-Verschiebungs-Beziehungen.

$$\sigma = A + B\varepsilon^n \quad (\text{Gl. 2.3}) [15]$$

Die Festigkeit wird nun über die Parameter A, B, n in einem externen Berechnungstool ermittelt. Die Parameter dienen dazu, später die Spannungskurve an die Messdaten anzunähern. Diese Festigkeit wird abschließend anhand der Bilder, die bei der Größenvermessung entstehen, kritisch beurteilt und dann der Gesamtauswertung beigelegt [15].

3 Experimentelles Vorgehen

In diesem Kapitel wird das experimentelle Vorgehen der einzelnen Schritte zum Erreichen des Ergebnisses erläutert. Hierbei werden ebenfalls die verwendeten Laborgeräte kurz vorgestellt. Des Weiteren wird auch das untersuchte Stahlpulver hinsichtlich seines Kohlenstoffgehaltes und seiner Legierungselemente dargestellt. Bei den getätigten Versuchen war das Ziel, die Festigkeit dieser Stahlpulver zu bestimmen.

3.1 Material

Es wurden zwei Baustähle untersucht, S235 und S355. Beide Stähle lagen im Aggregatzustand fest vor, haben eine gräuliche Färbung und sind geruchslos. Bei der äußeren Betrachtung weisen beide die gleichen optischen Merkmale auf. Auch in der Schmelztemperatur von 1450°C und den Siedebeginn von 2860°C unterscheiden sich die Stähle nicht. Des Weiteren besitzen beide Stähle eine Dichte von 7,9 g/cm³ und eine Schüttdichte von ca. 3160 kg/m³. Es wurden beide von der Firma Nanoval GmbH & Co. KG gasverdüst und die Partikel sind kleiner als 100 µm. Die Materialnummern der Stähle S235 und S355 lauten NV-0614 und NV-0615. Jedoch unterscheiden sich die Stähle in der Zusammensetzung, wie in Tabelle 3.1 dargestellt [13,14].

Tabelle 3.1: Zusammensetzung der Werkstoffe S235 und S355

Elemente	Mn	Cu	Si	C
S235	1,40%	0,55%	0,00%	0,17%
S355	1,60%	0,55%	0,55%	0,20%

Bei Betrachtung der Legierungselemente fällt auf, dass S235 kein Silizium enthält und einen geringeren Kohlenstoffgehalt aufweist.

Bei den Arbeiten mit diesen Pulvern sind gewisse Schutz und Hygienemaßnahmen zu treffen. Hierbei ist besonders darauf zu achten einen ausreichenden Atemschutz zu tragen, empfohlen wird ein Filtertyp: Filter P3. Des Weiteren sollten bei der Arbeit Schutzhandschuhe getragen werden.

3.2 Versuchsaufbau

Wärmebehandlung

Die Wärmebehandlung hat in einem Hochtemperaturofen der Firma Nabertherm stattgefunden. Hierbei wurden vier unterschiedliche Endtemperaturen in verschiedenen Durchläufen verwendet. Dabei wurde die Haltezeit und die Aufheizrate nicht verändert, als Abkühlrate wurde eine natürliche Abkühlung im Ofen gewählt.

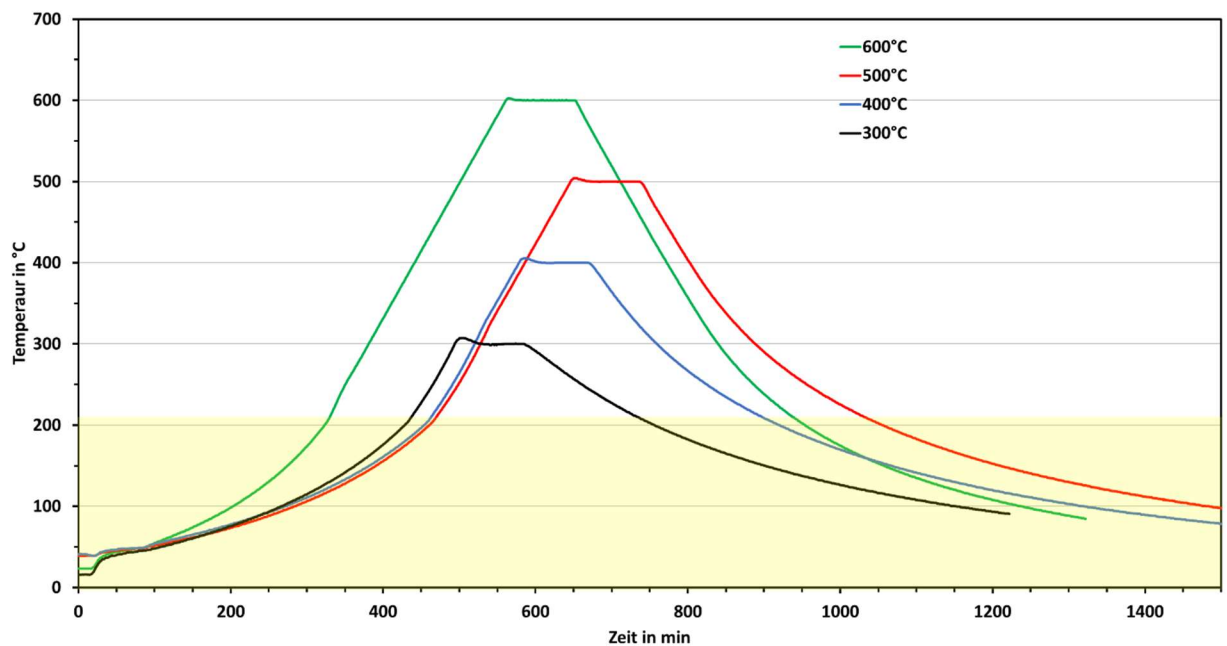


Abbildung 3.1: Diagramm der Chargentemperatur der Daten aus dem Hochtemperaturofen

Die Pulver wurden bei ca. 50°C aus dem Ofen entnommen, jedoch war die Chargentemperatur etwas höher, wie in der **Abbildung 3.1** zu sehen. Nach der Entnahme wurden die Pulver in einen geeigneten Laborbehälter umgefüllt. Anschließend wurden diese Behälter vorsichtig mit einem Schutzgas, in diesem Falle Argon, unter einem Laborabzug befüllt. Dabei war darauf zu achten, nicht durch zu viel Druck die Partikel beim Befüllen aus dem Behälter zu spülen.

3.3 Partikelkompression

Es gibt vier Schritte, die bei dem Versuch der Partikelkompression zu befolgen sind. Bei jedem dieser Schritte ist exaktes Arbeiten und Dokumentieren wichtig. Durch eine lückenlose Dokumentation wird die Auswertung des Versuches mit einer hohen Genauigkeit möglich. So können im externen Schritt der KSS-Simulation repräsentative Ergebnisse gewonnen werden.

Platzieren der Partikel

Als nächstes wurden die Partikel auf einer polierten Hartmetallplatte, mit eingelaserten Nummern von 1 bis 20, platziert. Die Platte ist in der **Abbildung 3.2** zu sehen.

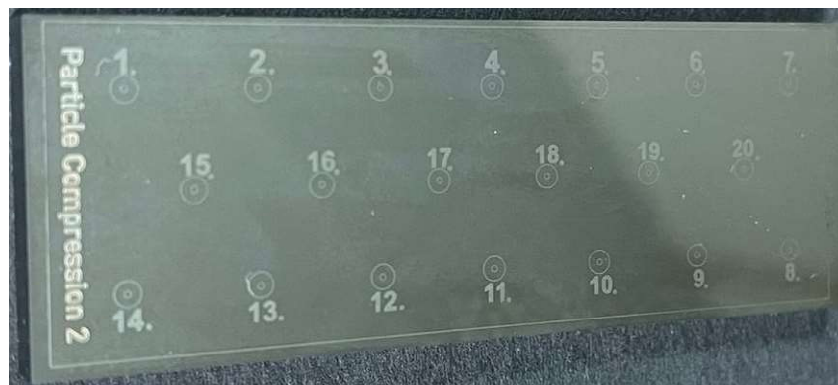


Abbildung 3.2: Polierte Hartmetallplatte mit gelaserten Markierungen von 1 bis 20 zur Platzierung einzelner Partikel

Dazu wurde ein Digitalmikroskop VHX-6000 der Firma Keyence genutzt. Dieses zeichnet sich durch seine 0,1x bis 5000x fache Vergrößerung aus. Da es mit einer digitalen Kamera und nicht mit einem Okular ausgestattet ist, können mehrere Anwender das Erfasste auf dem ausgegebenen Bildschirm auswerten. Bei der Platzierung werden nun einzelne Partikel mittels einer Labornadel unter dem Mikroskop auf einen ihnen vorgesehenen Platz gesetzt. Jeder Nummer auf der Platte wird nur ein einzelnes Partikel zugeordnet, somit ergibt sich ein Probenumfang von 20 Partikeln. Bei der Auswahl der einzelnen Partikel ist darauf zu achten, möglichst runde Partikel ohne Fehlerstellen auszuwählen und eine große Varietät der Größen zu erreichen. Es sollte ebenfalls darauf geachtet werden, dass die Partikel nicht direkt auf den Laserstrukturen platziert werden, da diese eine Unebenheit in der Platte darstellen und dies die Messung beeinflussen könnte.

Vermessen

Die Vermessung wurde an einem Konfokalem 3D Laserscanning Mikroskop der Firma Keyence der Modellreihe VK-X durchgeführt. Dies zeichnet sich durch seinen hohen Vergrößerungsbereich von 42x bis 28800x und der schnellen Flächenmessung aus. Um eine Messung zu starten, wurde ein Partikel gezielt angefahren und bei 150x Vergrößerung angepeilt. Eine perfekt mittige Ausrichtung ist hierbei essenziell. Zur Vermessung wird eine obere Grenze gesetzt, indem die Spitze vom Partikel scharf gestellt wird. Danach wird eine untere Grenze gesetzt, indem die Hartmetallplatte fokussiert wird. Danach kann die Messung gestartet werden. Diese kann bis zu 2 Minuten dauern. Nach der Messung kann bereits beurteilt werden, ob es sich um ein geeignetes Partikel handelt. Des Weiteren können nun die Abmaße des Partikels in einer Analysesoftware ermittelt werden, wie in **Abbildung 3.3** zu sehen. Das Programm legt ein Messkreuz über den Mittelpunkt des Partikels (gelbe Linie und hellblaue Linie), hiermit wird zweimal die Höhe bestimmt und einmal die Breite. Dies wird in das dazugehörige Versuchsprotokoll eingetragen. Der höchste Punkt des Partikels kann durch Unebenheiten, wie z.B. Satelliten, auch außerhalb des Mittelpunktes liegen (in der **Abbildung 3.3** durch die dunkelblaue Linie gekennzeichnet).

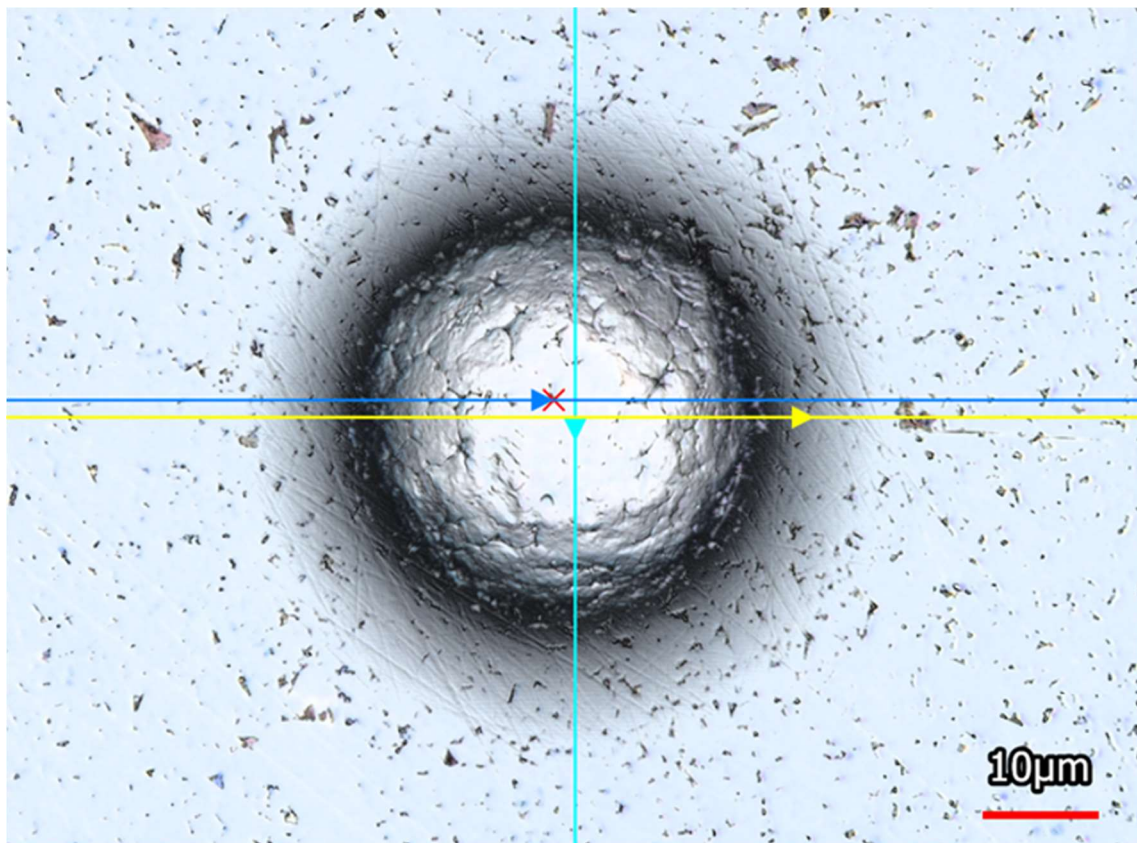


Abbildung 3.3: Automatische Messlinienvorlage nach der Messung eines Partikels des Materials S235

Zur Erfassung von möglichen Unregelmäßigkeiten des Partikels, kann eine 3D-Laseransicht wie in **Abbildung 3.4**, herangezogen werden.

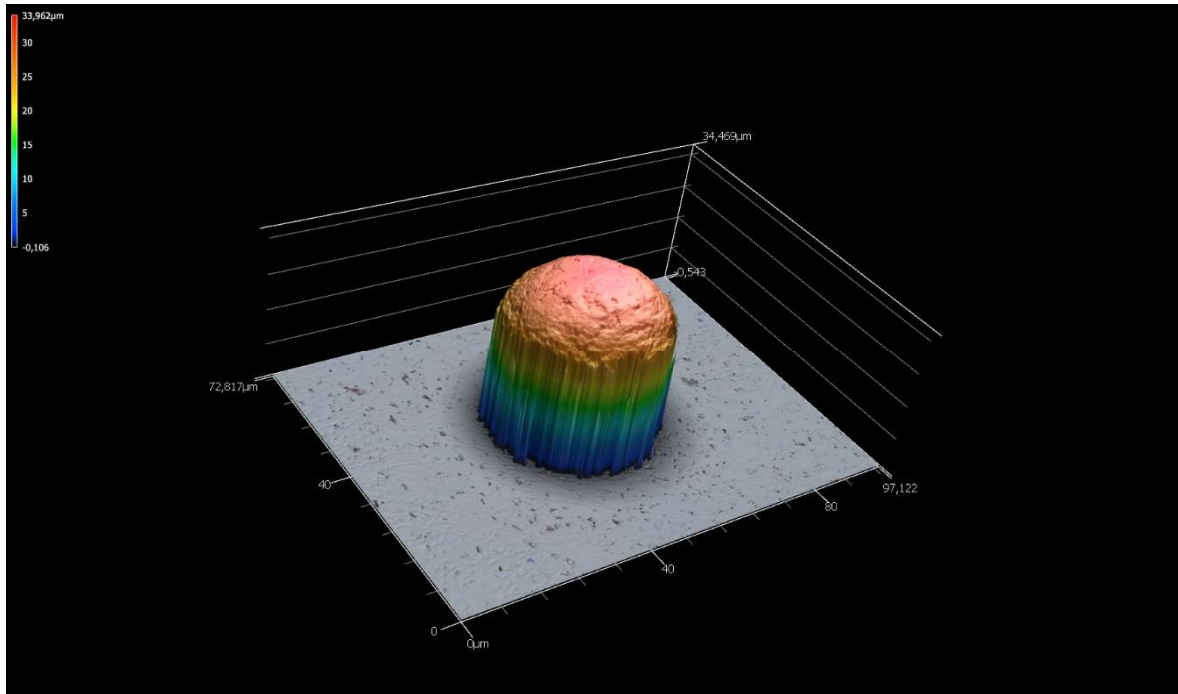


Abbildung 3.4: 3D-Ansicht des in Abbildung 3.3 gezeigten Partikels

Zuletzt werden die Aufnahmen gesichert, um diese gegebenenfalls bei der Auswertung nochmal zu betrachten.

Drücken der Partikel

Die Partikelkompression wird an einer Härteprüfmaschine ZHU 0.2 der Firma ZwickRoell durchgeführt. Hierbei wird ein 200 µm großer Diamantstempel als Eindringkörper verwendet, welcher extra für dieses Verfahren angefertigt wurde. Die Objektive der Maschine sind von 5facher bis 60facher Vergrößerung gestaffelt. Die Maschine steht auf einem externen Stahl Tisch, damit ist sie schwingungsarm gelagert.

Nachdem die Maschine und der zugehörige Computer gestartet wurden, wird die Messsoftware aufgerufen. Dort werden zunächst Referenzfahrten des Maschinentisches und der Presseinheit vorgenommen. Um nun ein Partikel zu messen, wird dieses mit dem 5fach

Objektiv anvisiert. Danach wird die Objektivvergrößerung auf 40fach gestellt und nochmal nach justiert, damit das Partikel getroffen wird. Nun wird der Vorlaufweg eingestellt, indem die obere Spitze des Partikels fokussiert und dieser als Referenzpunkt gesetzt wird. Dann sollte nur noch die gewählte Prüfkraft eingestellt werden und die Messung kann gestartet werden. Die Messung erfolgt, indem der Prüfkopf auf die anvisierte Stelle fährt und dort langsam bis zu dem Referenzpunkt abgesenkt wird. Es ist bei der gesamten Messung darauf zu achten, dass jede Erschütterung die Messung beeinflussen könnte. Nach der Messung bewegt der Prüfkopf sich wieder in seine Ausgangsposition. Die Messkurve wird im Programm gespeichert. Vor der nächsten Messung ist es wichtig, den Diamantstempel zu reinigen, da ein gedrücktes Partikel daran haften könnte, welches die nächste Messung wiederum negativ beeinflussen würde.

Auswertung eines Versuches

Zunächst werden die Daten über die Exportschnittstelle der Härteprüfmaschine exportiert und auf einem Datenträger gesichert. Diese Daten können dann in ein externes Auswertungsprogramm geladen werden. Dort werden die Messkurven grafisch dargestellt. Hier kann schon eine Aussortierung einzelner Messungen stattfinden.

In der **Abbildung 3.5** ist zu sehen, dass die Kurve 19 nicht im Koordinatenursprung beginnt. Dies ist ein Messfehler seitens der Maschine, die die ersten Daten nicht richtig erfassen konnte. Der Fehler kann auftreten, wenn der Vorlaufweg nicht korrekt eingestellt wurde, das heißt, wenn der Indenter den Partikel vor Messbeginn durch einen zu langen Vorlaufweg berührt.

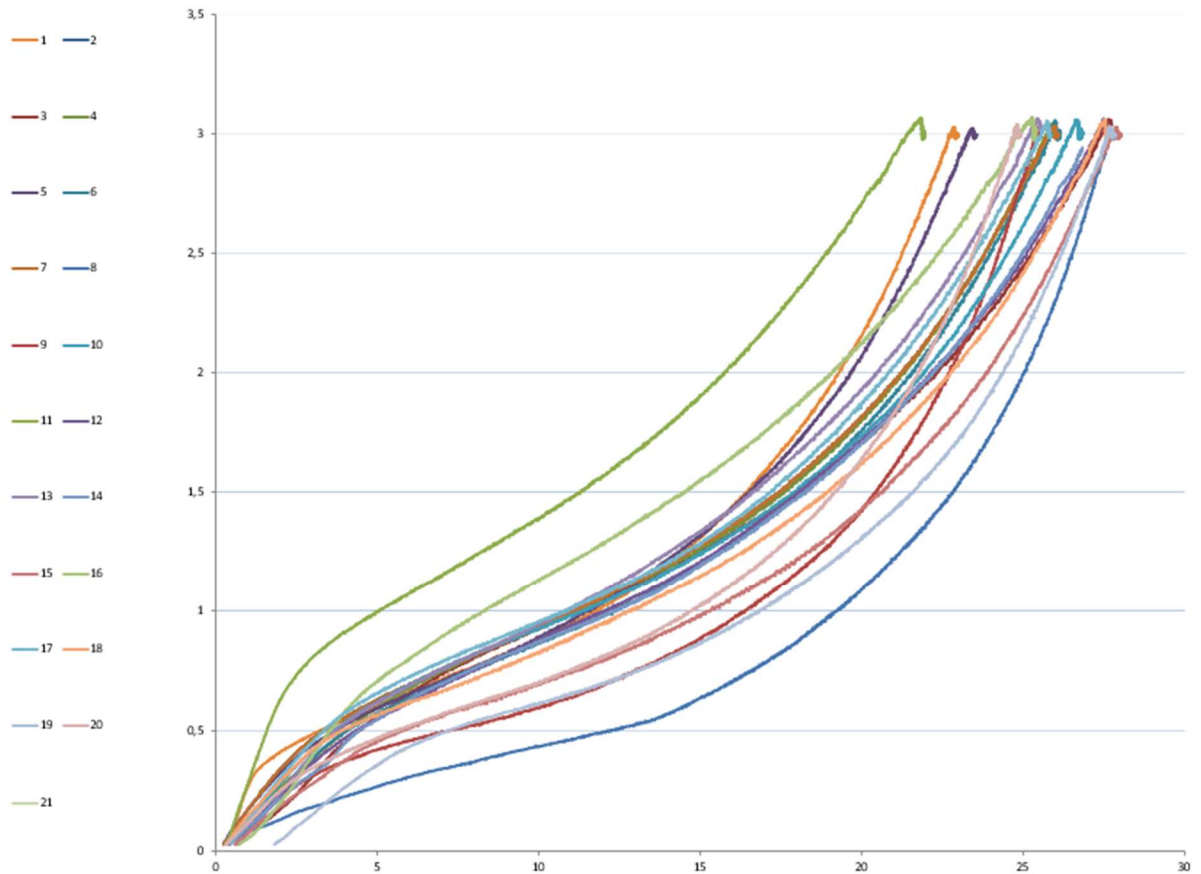


Abbildung 3.5: Messkurven einer Partikel Kompressionscharge aus den gewonnenen Daten der ZwickRoell Härteprüfmaschine

Wenn die erste Aussortierung stattgefunden hat, werden die einzelnen Messkurven der Partikel betrachtet. Auffälligkeiten und Unregelmäßigkeiten in den jeweiligen Messkurven müssen nachvollzogen werden. Dazu werden die Aufnahmen von der Vermessung gesichtet und gegebenenfalls in das Versuchsprotokoll geschaut. Bei dieser Messreihe ist der Partikel acht aufgefallen (**Abbildung 3.6**), da er einen ungewöhnlichen Knick in der Messkurve aufweist.

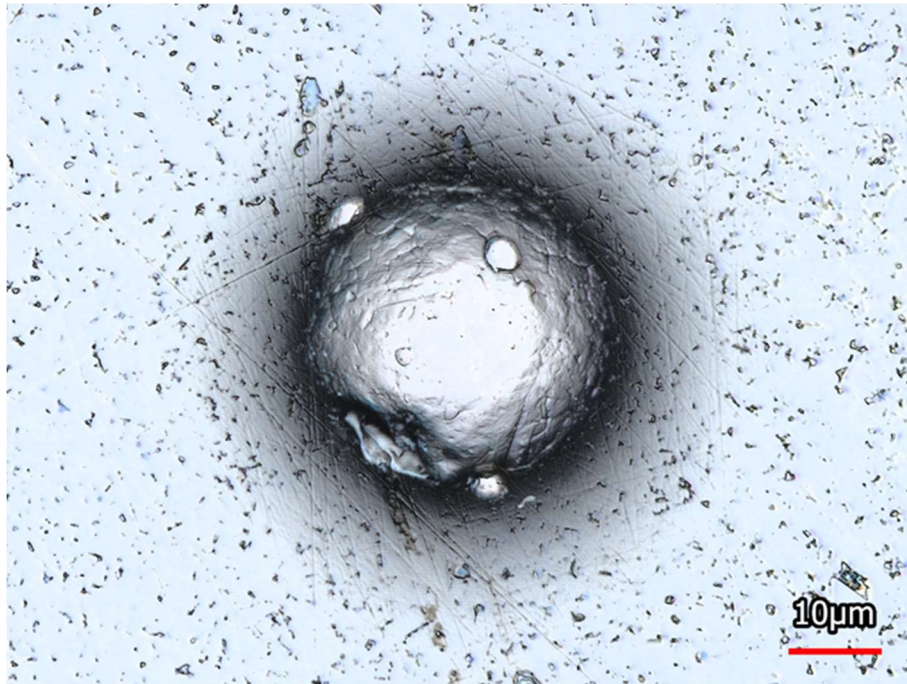


Abbildung 3.6: Aufnahme eines Partikels, der zur Auswertung ungeeignet ist, durch eine starke seitliche Eindellung

Hier fällt eine seitliche ausgeprägte Delle auf, wie in **Abbildung 3.6** zu sehen ist. Des Weiteren weist der Partikel mehrere kleine Satelliten auf. Somit wird diese Messkurve nicht weiter ausgewertet. Kleine Satelliten müssen nicht unbedingt einen Einfluss auf die Messung haben, diese hängt von der Lage des Satelliten ab. Wenn nun die Messkurve und das dazugehörige Partikel in Ordnung sind wie in **Abbildung 3.7**, wird diese Messkurve ausgewertet.

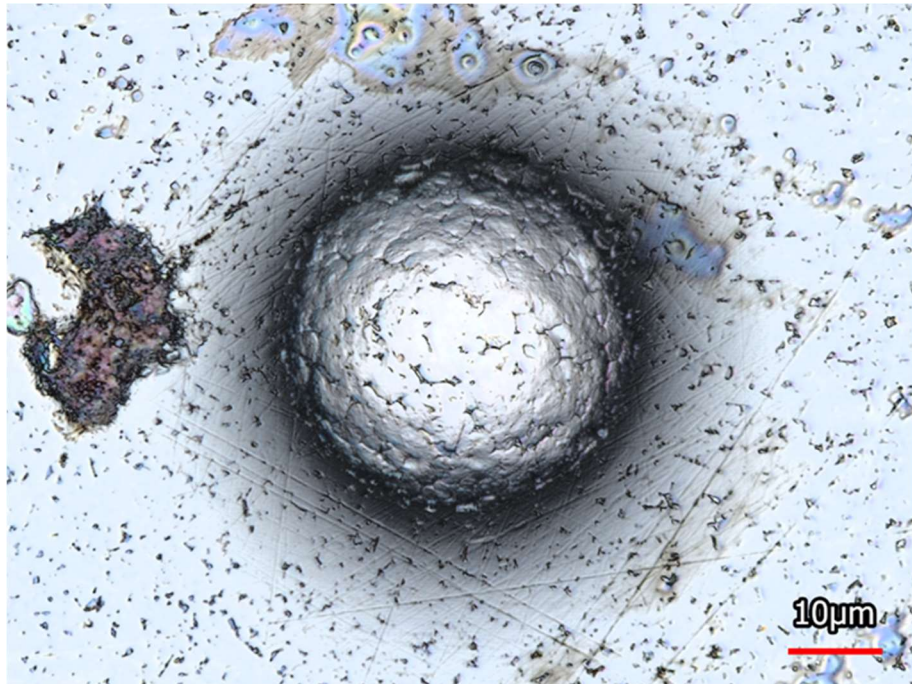


Abbildung 3.7: Ein perfekt aufgenommenes und sehr rundes Partikel der exzellent für eine Auswertung geeignet ist

Dies geschieht, indem die Messkurve durch eine Funktion der Spannung angenähert wird (**GI 2.3**). Es wird versucht einen perfekten Fit zu erreichen wie in **Abbildung 3.8** dargestellt. Mit diesen ermittelten Parametern des Fittes kann in einem weiteren Tool die Partikelfestigkeit bestimmt werden.

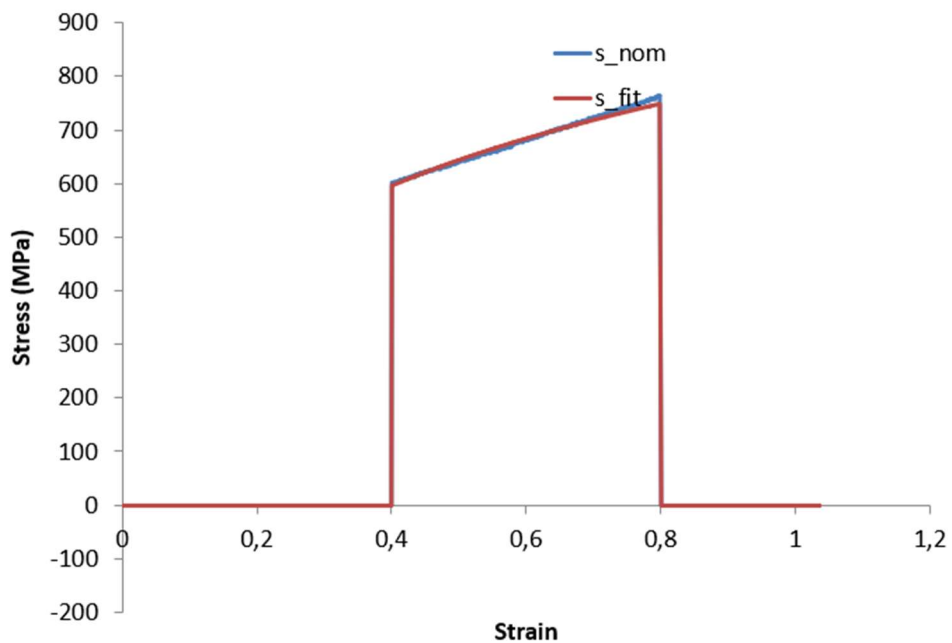


Abbildung 3.8: Fittingkurve in einem gewissen Bereich, in dem die Parameter gut ermittelt werden können.

KSS-Software

Als ersten Schritt müssen die verwendeten Materialien, also die Pulver und Substrate, in die KSS-Software geladen werden. Die Daten beziehen sich auf mechanische und chemische Eigenschaften, wie z.B. Dichte, Schmelzpunkt und Festigkeit. Die in dieser Arbeit im Vordergrund stehende Partikelfestigkeit ist also ein wichtiger Parameter in der Simulation. Bei den Daten des Pulvers, unter welche auch die Partikelfestigkeit fällt, sind Klopfdichte und Partikelgrößenverteilung einzutragen. Nachdem die Daten der Materialien eingetragen wurden, können nun Simulationen durchgeführt werden. Nach dem Abschluss dieser Simulationen kann eine Aussage über den Schichtqualitätsparameter, die Partikelgeschwindigkeit und die Pulverförderrate getroffen werden. Dazu müssen aber die Randbedingungen der Kaltgasspritzanlage hinterlegt sein. Zu den Randbedingungen gehören die gewählte Düse, der Pulverförderer und das verwendete Trägergas. Variation der Simulationen können nun über Veränderung der Prozesstemperatur, des Prozessgasdrucks, des Spritzabstandes und der Drehzahl der Förderscheibe erreicht werden. Ziel ist es, eine geeignete Anlagenkonfiguration für einen möglichst effizienten Schichtqualitätsparameter zu finden.

4 Auswertung

In diesem Kapitel wird die Auswertung der gewonnenen Ergebnisse aus den Versuchen, die ein zentraler Bestandteil dieser Arbeit sind, behandelt. Die Auswertung der gesammelten Daten kann verwendet werden, um Schlüsse für Problemstellungen zu ziehen und Fragen in der Forschung zu klären. Im Fokus steht hierbei die Veränderung der Partikelfestigkeit nach der Wärmebehandlung und die Auswirkung auf den Eta-Wert.

S235

Zuerst werden die Versuchsergebnisse, des S235 Stahlpulvers betrachtet und ausgewertet. Zu erkennen ist in der **Abbildung 4.1**, dass das unbehandelte Stahlpulver die höchste Festigkeit besitzt. Die Standardabweichung liegt bei allen Versuchen in einem akzeptablen Maß, der Variationskoeffizient übersteigt die 20% im Mittel nicht. Des Weiteren kann eine klare Tendenz bezüglich der Festigkeitsabnahme erkannt werden. Mit steigender Temperatur nimmt die Partikelfestigkeit drastisch ab. Von dem unbehandelten Pulver auf die Wärmebehandlung mit 600°C konnte eine Festigkeitsverringerung von knapp 40% erzielt werden.

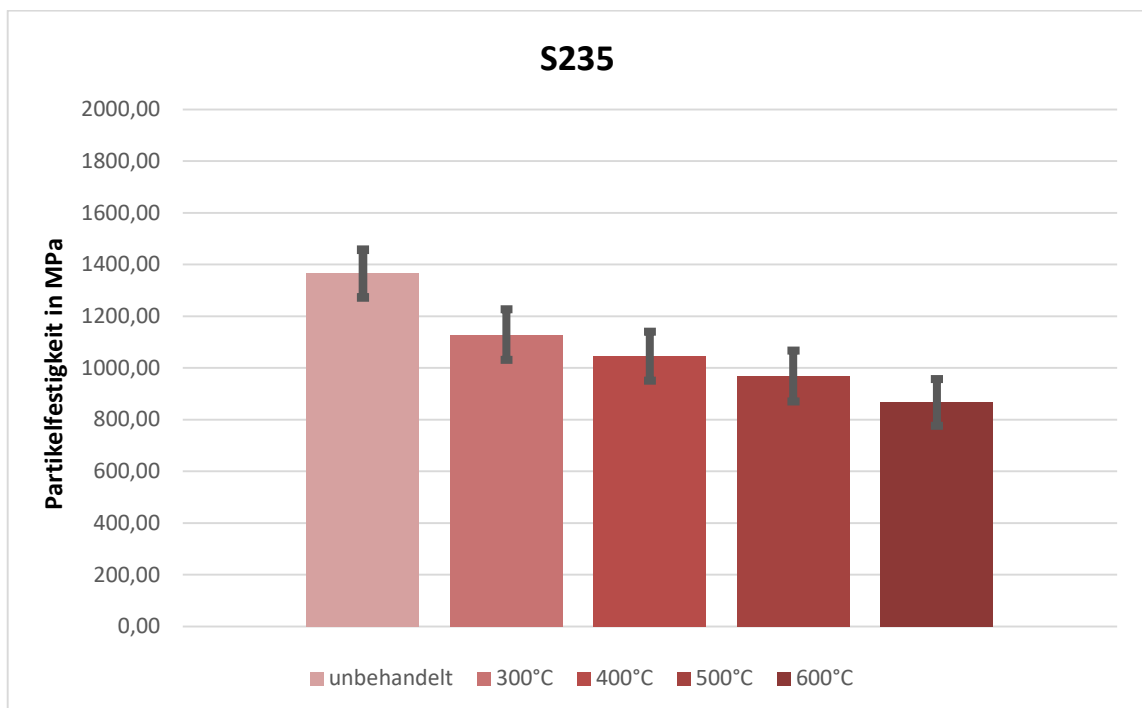


Abbildung 4.1: Dargestellt sind die verschiedenen repräsentativen Mittelwerte der Versuche von dem S235 Stahlpulver, mit der zugehörigen Standardabweichung

Um nun die Auswirkungen der Festigkeitssenkung auf das Kaltgasspritzen zu beurteilen, werden einige KSS-Simulationen herangezogen.

Zunächst wird sich der Ausgangszustand in Form des Spritzfensters angeschaut. In der **Abbildung 4.2** kann das Spritzfenster des unbehandelten S235 Stahlpulvers betrachtet werden. Simuliert wurde mit einer PF 4000 Lochscheibe mit 4 U/min als Pulverförderer, als Prozessgas wurde Stickstoff gewählt und bei einem Gasdruck von 50bar. Diese Einstellungen sind für die Vergleichbarkeit in allen nachfolgenden Simulationen gleich.

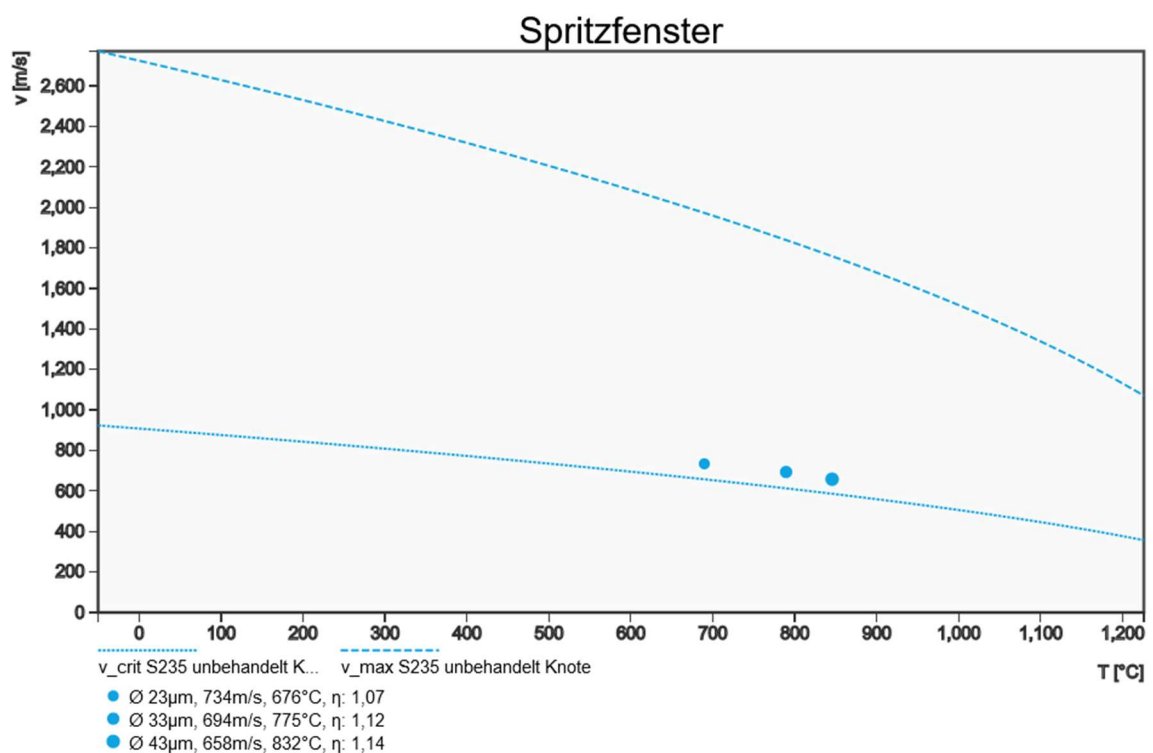


Abbildung 4.2: Spritzfenster des unbehandelten S235, simuliert mit folgenden Parametern: PF 4000 Lochscheibe bei 4,0 U/min, 50bar Gasdruck, Prozessgas Stickstoff

Auffällig bei der Simulation des unbehandelten S235 Stahlpulvers ist, dass eine sehr hohe Gastemperatur und ein ebenfalls sehr hoher Gasdruck gefahren werden, um überhaupt die kritische Geschwindigkeit zu erreichen. Wenn nun die drei repräsentativen Pulverkorn-durchmesser und die dazugehörigen Eta-Werte betrachtet werden, wird festgestellt, dass diese doch weit unter $\eta=1,5$ bleiben.

Um zu beurteilen, was mit dem verwendeten Pulver und der gewählten Anlage möglich ist, wird eine andere Darstellung in **Abbildung 4.3** betrachtet.

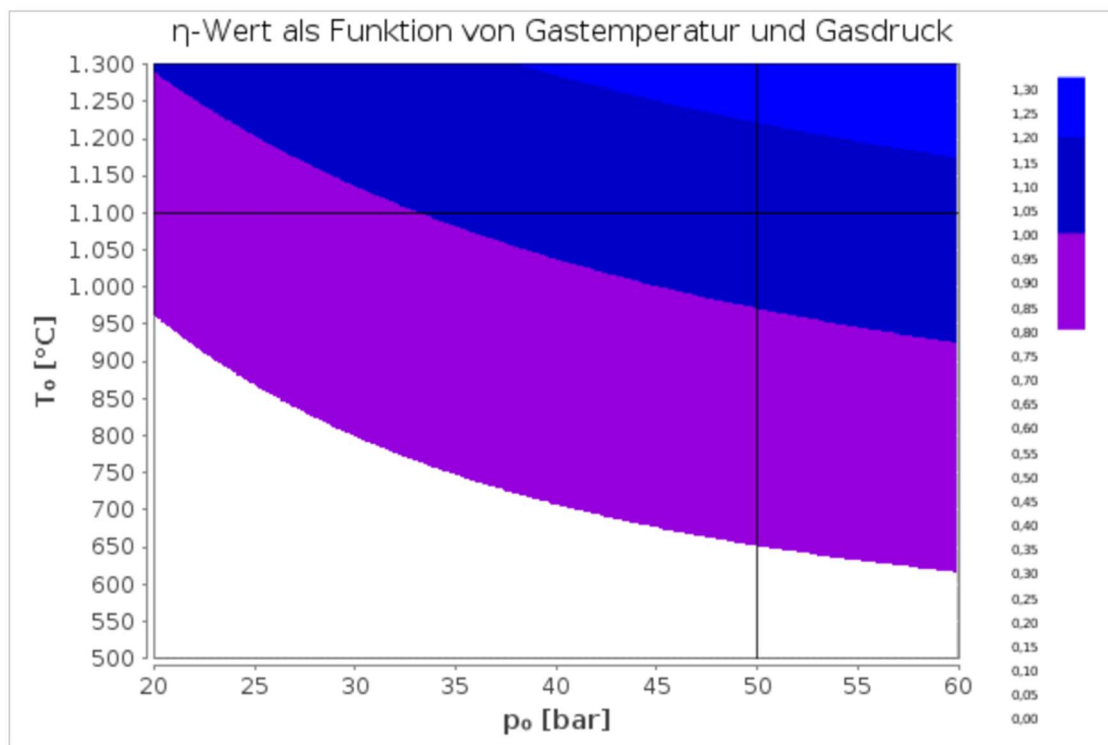


Abbildung 4.3: Diagramm zur theoretischen Einschätzung des zu erreichenden Schichtqualitätsparameter η , bei einer Simulation von einem unbehandelten S235 mit den Parametern 50bar Gasdruck und 1100°C Gastemperatur

Hier wird die Gastemperatur über den Gasdruck abgetragen. Das schwarze Kreuz kennzeichnet den verwendeten Standpunkt der Kaltgasspritzanlage, seitlich rechts sind zusätzlich die erreichbaren Eta-Werte angegeben. Mit dieser Anlagenkonfiguration ist ein theoretisch durchschnittlicher Eta-Wert zwischen 1,05 bis 1,10 erreichbar.

Diese beiden Eindrücke werden nun mit Simulationen des wärmebehandelten Stahls S235 mit der Haltetemperatur 600°C verglichen.

In der **Abbildung 4.4** ist klar zu erkennen, dass ein anderes Spritzfenster durch die Wärmebehandlung und deren resultierende Festigkeitsabnahme erreicht wurde. Die kritische Geschwindigkeit konnte um ca. 170 m/s gesenkt werden. Des Weiteren sind die Eta-Werte angestiegen und nähern sich in Richtung der $\eta = 1,5$ an.

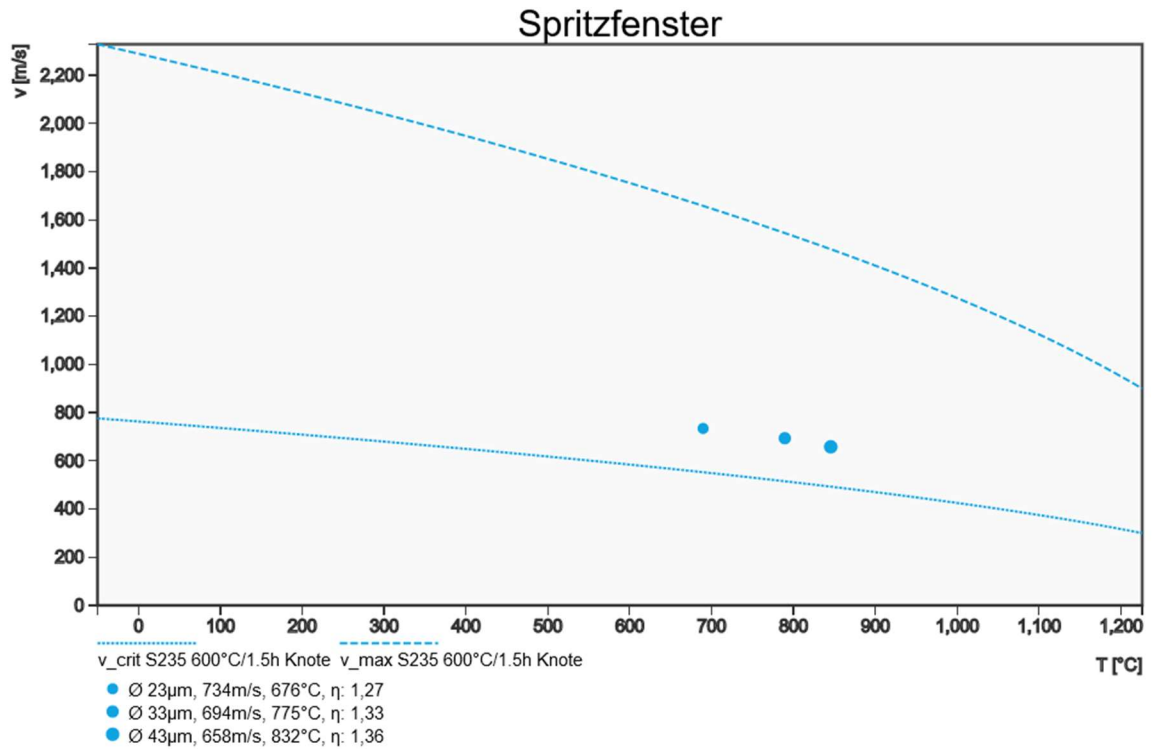


Abbildung 4.4: Spritzfenster des wärmebehandelten S235 mit der Haltetemperatur 600°C und simuliert mit den folgenden Parametern: PF 4000 Lochscheibe bei 4,0 U/min, 50bar Gasdruck, Prozessgas Stickstoff

Auch in **Abbildung 4.5** ist erkennbar, dass ein definitiv höherer durchschnittlicher Eta-Wert erreichbar ist. Es wurde eine Erhöhung des Eta-Wertes von ca. 0,2 durch die Wärmebehandlung erreicht.

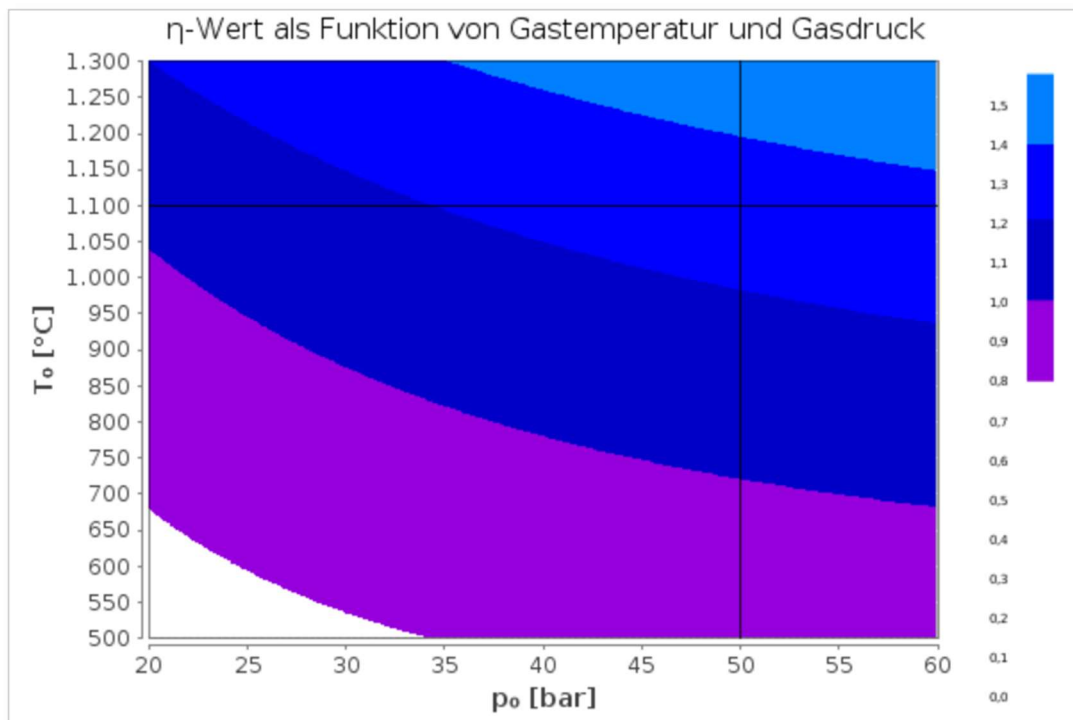


Abbildung 4.5: Diagramm zur theoretischen Einschätzung des zu erreichenden Schichtqualitätsparameter η , bei einer Simulation von einem wärmebehandelten S235 (Haltetemperatur 600°C) mit den Parametern 50bar Gasdruck und 1100°C Gastemperatur

S355

Im zweiten Abschnitt der Auswertung wird sich mit dem S355 Stahlpulver beschäftigt. Im direkten Vergleich zwischen **Abbildung 4.1** und **Abbildung 4.6** fällt auf, dass das Stahlpulver S355 eine wesentlich höhere Ausgangsfestigkeit (ca. 20% mehr) aufweist als das S235. Jedoch erreicht es eine geringere Festigkeit durch die 600°C Wärmebehandlung. Ansonsten verhält sich das S355 Pulver annähernd äquivalent zu dem S235 Pulver und zeigt eine eindeutige Tendenz der Festigkeitsverringerung. Es wird bei diesem Pulver jedoch eine Verringerung von ca. 50% erreicht, was fast 10% mehr ist als bei dem S235 Pulver.

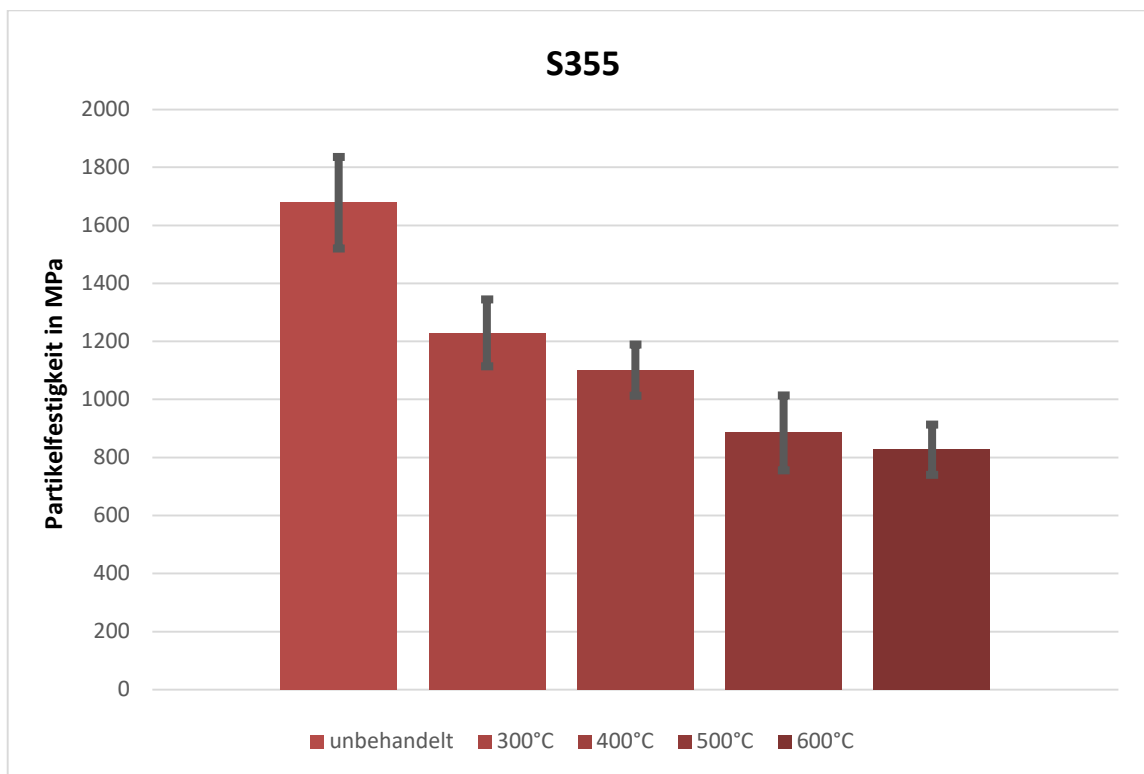


Abbildung 4.6: Dargestellt sind die verschiedenen repräsentativen Mittelwerte der Versuche von dem S355 Stahlpulver, mit der zugehörigen Standardabweichung

Auch bei diesem Pulver wird die KSS-Simulationen angeschaut, um die theoretischen möglichen Eta-Werte zu ermitteln. Zuerst wird das Spritzfenster des unbehandelten Stahlpulvers S355, welches eine höhere Ausgangsfestigkeit als das S235 Pulver besitzt, angeschaut.

In der **Abbildung 4.7** ist deutlich zu sehen, dass die repräsentativen Korndurchmesser gerade so die kritische Geschwindigkeit erreichen und sogar bei Betrachtung des kleinsten

Durchmessers mit einem Eta-Wert von unter 1,0 diese nicht erreicht wird. Somit ist das Spritzfenster hier nicht ausreichend.

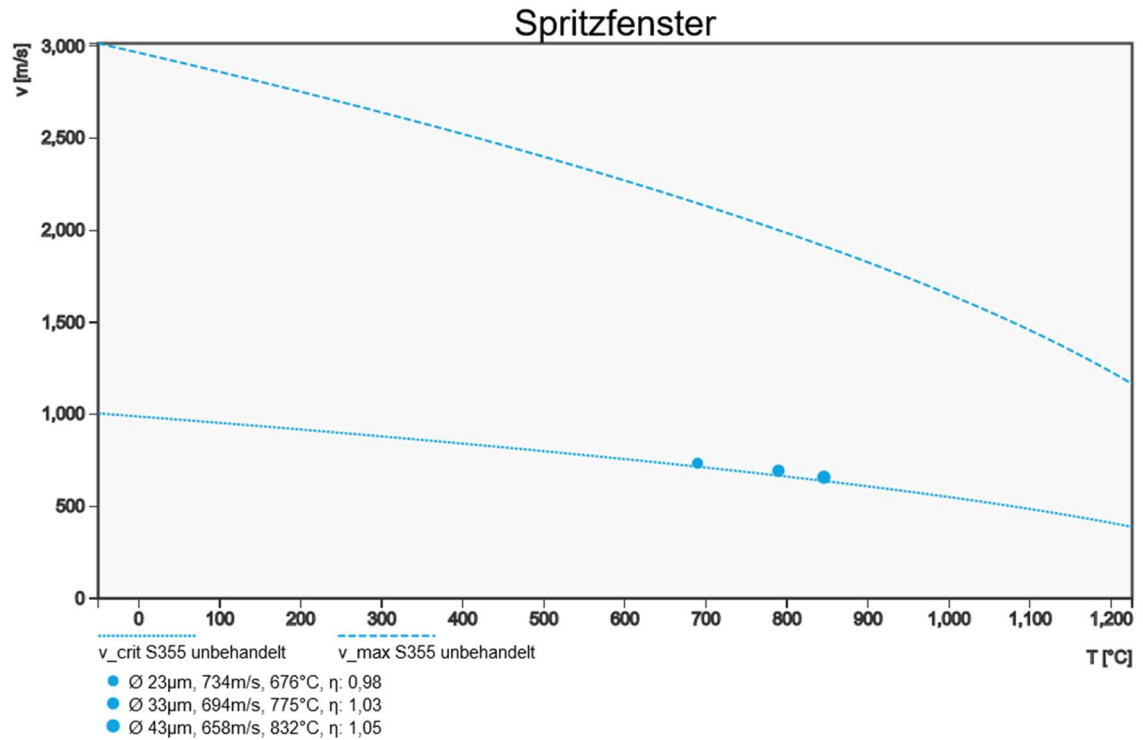


Abbildung 4.7: Spritzfenster des unbehandelten S355, simuliert mit folgenden Parametern: PF 4000 Lochscheibe bei 4,0 U/min, 50bar Gasdruck, Prozessgas Stickstoff

Auch in der Darstellung der **Abbildung 4.8** des theoretisch durchschnittlichen Eta-Werts ist klar zu erkennen, dass hier Werte unter 1,0 zustande kommen. Unbehandelt ist das S355 Pulver so nicht ausreichend spritzbar.

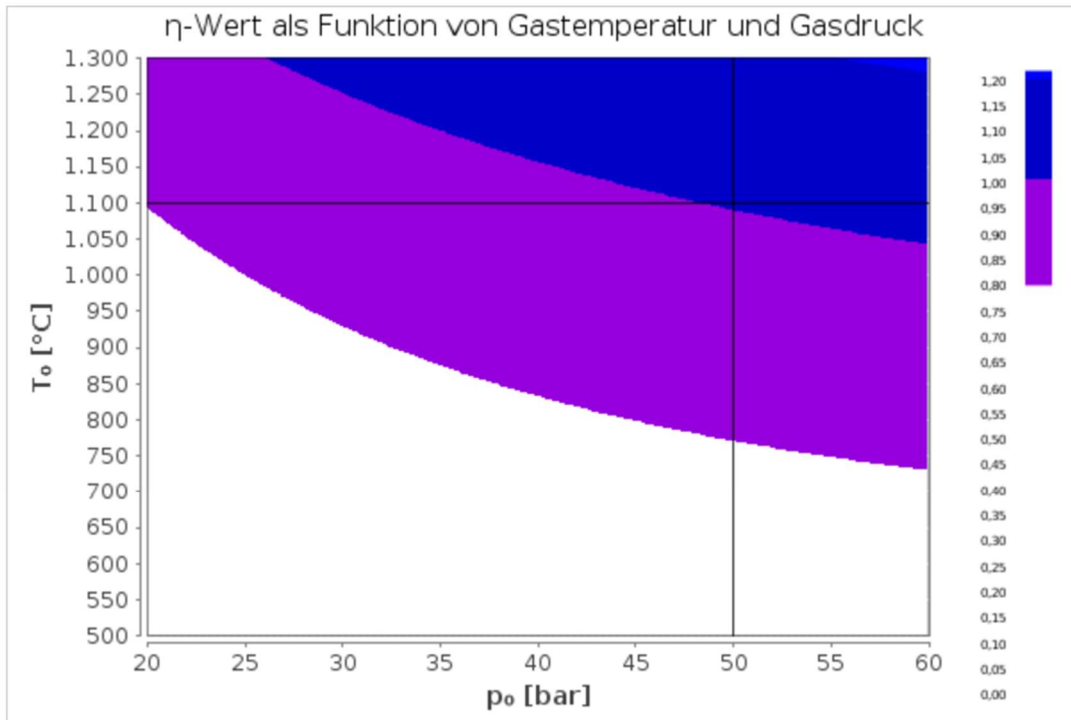


Abbildung 4.8: Diagramm zur theoretischen Einschätzung des zu erreichenden Schichtqualitätsparameter η , bei einer Simulation von einem unbehandelten S355 mit den Parametern 50bar Gasdruck und 1100°C Gastemperatur

In der Betrachtung der erzielten Festigkeiten nach der Wärmebehandlung ist bekannt, dass das S355 Pulver eine geringere Endfestigkeit als das S235 erreicht hat.

Dies kann zwar in der **Abbildung 4.9** erkannt werden, aber der Unterschied ist nicht gravierend. Es wird mit dem größten repräsentativen Korndurchmesser ein um 0,02 höherer Eta-Wert erzielt als bei dem wärmebehandelten (600°C Haltetemperatur) S235 Pulver.

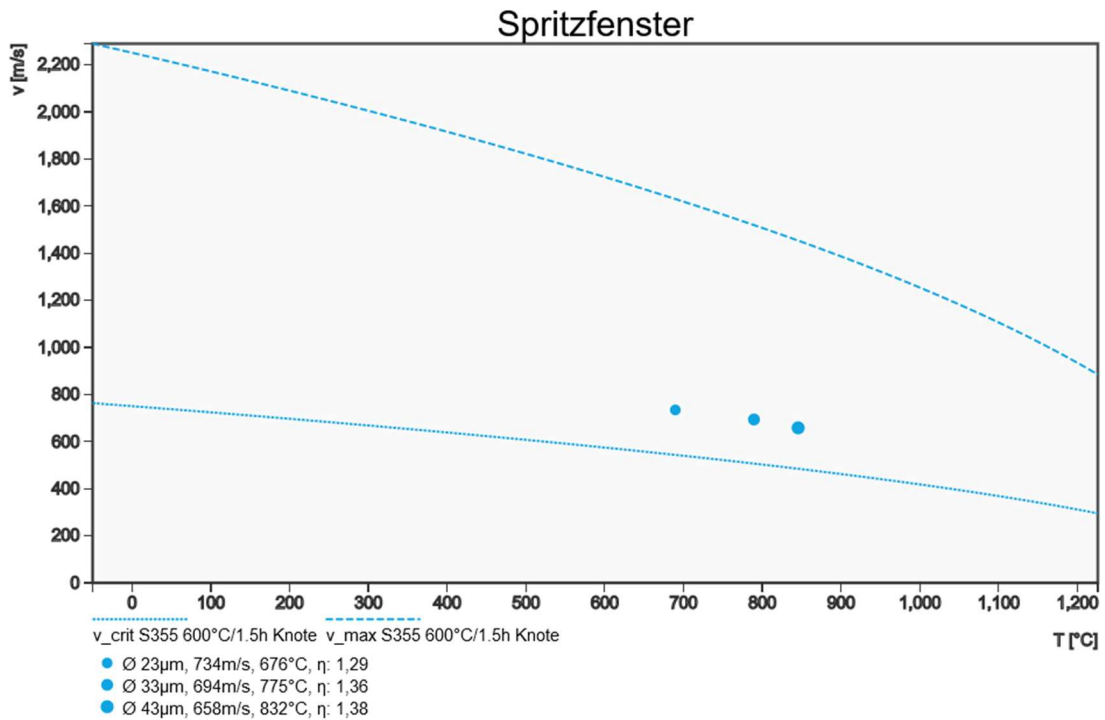


Abbildung 4.9: Spritzfenster des wärmebehandelten S355 mit der Haltetemperatur 600°C und simuliert mit den folgenden Parametern: PF 4000 Lochscheibe bei 4,0 U/min, 50bar Gasdruck, Prozessgas Stickstoff

Auch der theoretisch durchschnittliche Eta-Wert weicht kaum von dem des S235 behandelten Pulvers mit der gleichen Haltetemperatur ab, erkennbar in der **Abbildung 4.10**. Es wird somit ähnlich gut spritzbar sein.

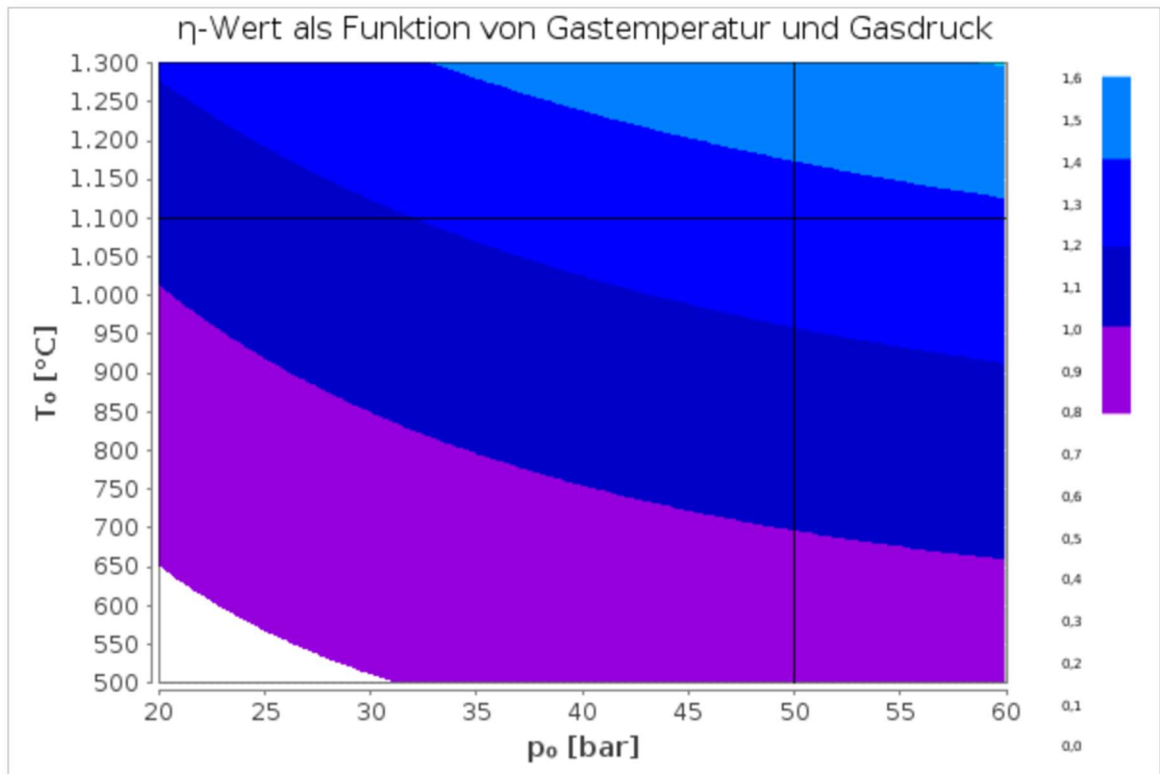


Abbildung 4.10: Diagramm zur theoretischen Einschätzung des zu erreichenden Schichtqualitätsparameter η , bei einer Simulation von einem wärmebehandelten S355 (Haltetemperatur 600°C) mit den Parametern 50bar Gasdruck und 1100°C Gastemperatur

5 Diskussion

In diesem Kapitel sollen die errungenen und zuvor ausgewerteten Ergebnisse diskutiert werden, welche Zusammenhänge zwischen den Pulvern und den simulierten Eta-Werten vorherrschen und wie dies zustande kommt.

5.1 Festigkeit und Wärmebehandlung

Bei der Betrachtung der Festigkeit beider Stahlpulver ist aufgefallen, dass die Pulver eine wesentlich höhere Festigkeit als die Rohmaterialien haben. Ein Baustahl der Sorte S235 weist als Rohmaterial eine Festigkeit von ca. 360-510 MPa auf [16]. Die gemessene vergleichbare Partikelfestigkeit liegt aber bei ca. 1370 MPa. Das ist eine Abweichung von ca. 850 bis 950 MPa zu dem Rohmaterial. Ähnliches ist erkennbar bei dem Pulver S355, welches eine Partikelfestigkeit von ca. 1680 MPa besitzt. Das Rohmaterial S355 besitzt jedoch nur eine Festigkeit von ca. 470-630 MPa [16]. Dies könnte auf eine höhere Gitterfehlerdichte aufgrund der hohen Erstarrungsrate beim Gasverdünnungsprozess zurückzuführen sein. Des Weiteren könnte durch die schnelle Abkühlung eine Martensitbildung entstehen. Diese Erkenntnisse werden auch durch andere Veröffentlichungen bestätigt [3].

Die Auswertung der Versuche zeigt, dass die gewählte Wärmebehandlung Auswirkung auf die Partikelfestigkeit hat. Hier konnten jedoch kaum Unterschiede zwischen den beiden Pulvern festgestellt werden. Auffällig war aber, dass das Pulver S355 mit einer höheren Anfangsfestigkeit sich in der Festigkeit stärker reduzieren ließ. Ebenfalls auffällig war, dass die erste Festigkeitssenkung bei dem S355 Pulver prozentual größer war als bei dem S235. Diese beiden Auffälligkeiten werden auf den etwas höheren Kohlenstoffgehalt zurückgeführt. Bei höherem Kohlenstoffgehalt kann Stahl durch eine rasche Abkühlung und damit Phasenumwandlung einen höheren Martensitgehalt erhalten [9]. Dieser trägt beträchtlich zur Festigkeit eines Stahles bei. Durch die Wärmebehandlung werden diese Festigkeiten wieder herabgesetzt. Bei der Betrachtung der verschiedenen Haltetemperaturen und deren erzielten Festigkeiten ist klar zu erkennen, desto mehr sich der Eutektiden Linie (PSK) und deren Temperatur genähert wird, desto höhere Festigkeitsminderungen werden erreicht. Das Metallgitter hat durch die höhere Temperatur mehr freie Energie zur Verfügung. Dadurch können Diffusionsvorgänge leichter stattfinden. Die Temperaturen der Wärmebehandlung wurden extra unterhalb der Eutektiden Linie (PSK) gewählt, um eine Phasenumwandlung auszuschließen. Die niedrigeren Temperaturen bei der Wärmebehandlung haben nicht genügend Festigkeitsminderung erbracht. Somit können diese Wärmebehand-

lungen für weitere Forschungen außer Acht gelassen werden und sich auf Standard-Wärmebehandlungen wie das Rekristallisationsglühen oder das Weichglühen fokussiert werden.

5.2 Einfluss auf die Schichtqualität

Im Zuge der Diskussion der Simulationsergebnisse zeigt sich eine deutliche Korrelation zwischen der Festigkeitsminderung und der Steigerung des Eta-Wertes. Insbesondere fällt auf, dass eine Festigkeitsminderung von etwa 50% mit einer durchschnittlichen Erhöhung des Eta-Wertes um etwa 0,25 einhergeht. Diese Beziehung verdeutlicht, dass die Manipulation der Festigkeitseigenschaften einen direkten Einfluss auf den Eta-Wert ausübt.

Besonders interessant ist die Betrachtung der Spritzfenster der beiden Pulver unter der Wärmebehandlung mit einer Haltetemperatur von 600°C. Hierbei zeigt sich, dass die Eta-Werte Höchstwerte von bis zu $\eta = 1,38$ erreichen. Die Erreichung solcher Eta-Höchstwerte markiert einen entscheidenden Punkt, an dem überhaupt von einer Spritzbarkeit gesprochen werden kann und einer genügenden theoretischen Schichtqualität.

Als weiteres Ziel der Optimierung kristallisiert sich nun die Verbesserung des Eta-Wertes heraus. Dies soll durch weitere Festigkeitsminderungen realisiert werden. In diesem Zusammenhang eröffnen sich vielversprechende Perspektiven für die Anwendung und Weiterentwicklung des betrachteten Verfahrens.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel dieser Bachelorarbeit war es, zwei Baustahlpulver auf ihre Partikelfestigkeit zu untersuchen und diese durch eine gezielte Wärmebehandlung herabzusetzen. Diese Ergebnisse sollten dann dazu genutzt werden, um eine Einschätzung der Spritzbarkeit bezüglich des Parameters Festigkeit abzugeben.

Die Wärmebehandlungen zeigten bei beiden Pulvern Wirkung. Es konnte eine signifikante Festigkeitsminderung festgestellt werden. Des Weiteren konnte eine Abschätzung bezüglich der Spritzbarkeit der verschiedenen wärmebehandelten Pulvern abgegeben werden. Hier war eine klare Steigerung der Spritzbarkeit erkennbar. Je mehr die Festigkeit herabgesetzt wurde, desto besser waren die simulierten Eta-Werte und damit auch die Spritzbarkeit. Hierbei muss jedoch beachtet werden, dass die Anlage in ihren Parametern stark ausgereizt wurde. Somit bedeutet das, dass nicht mehr viele Optimierungen an der Anlage getätigt werden können, sodass die Stellschrauben an dem Pulver gedreht werden müssen. Dies ist jedoch stark beschränkt. Hier muss also weiter an der Festigkeit gearbeitet werden. Um dies realisieren zu können, sollten Aufnahmen getätigt werden, auf denen die Mikrostruktur untersucht werden. Diese Mikrostrukturen geben Aufschluss über die Korngröße, Eigenspannungen und mögliche Martensitbildung.

Ein Ausblick auf anschließende Forschungen sollte darin bestehen, eine Charge wärmebehandeltes Pulver herzustellen und eine Probespritzung durchzuführen. Hierbei kann ein Aufschluss darüber geliefert werden, ob die Schichtqualitätsparameter, die simuliert wurden, überhaupt repräsentativ sind und mit der Realität übereinstimmen. Des Weiteren können die Schichten auf ihren Porengehalt und das Eindringen von Fremdpartikeln untersucht werden. Ebenfalls wichtige Faktoren sind, wie das Pulver auf dem Substrat haftet und was die Eigenschaften dieser Verbindung sind. Ein weiteres wichtiges Thema, was in diesem Forschungsgebiet behandelt werden sollte, ist die Wirtschaftlichkeit der Wärmebehandlung der Pulver im Gegensatz zu den altmodischen Fertigungsverfahren, bei denen diese Wärmebehandlung nicht nötig ist. So kann ein weiteres Ziel formuliert werden: Optimierung der Wärmebehandlung für Pulver, was auch eine weitere Erkenntnis dieser Arbeit darstellt. Es wäre im Nachhinein sinnvoller gewesen, eine Temperatur nahe der Eutektoiden Linie (PSK) mit unterschiedlich langen Haltezeiten als Versuchsumfang zu wählen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der mögliche Grundstein für eine Erschließung des Kaltgasspritzens für das Bauwesen gelegt wurde. Die weitere Forschung wird darüber mehr Aufschlüsse geben können, ob das Kaltgasspritzen eine wirtschaftlich lohnende Fertigungsart für die Bauindustrie werden kann.

7 Literaturverzeichnis

- [1] 2020 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector. (2020). In United Nations Environment Programm.
- [2] Feldmann, M., Kühne, R., Citarelli, S., Reisgen, U., Sharma, R. & Oster, L. E. 3D-Drucken im Stahlbau mit dem automatisierten Wire Arc Additive Manufacturing. Stahlbau, (2019). 88(3), 203–213. <https://doi.org/10.1002/stab.201800029>
- [3] Klemm, A. J., Taherkhani, F. & Gündel, M. (o.D.) Additive manufacturing of steel components by cold spray. ce/papers, 6(3-4), 739-744. <https://doi.org/10.1002/cepa.241>
- [4] Binder, K. Kaltgasspritzen von ermüdungsfesten Titanschichten - Korrelation materialwissenschaftlicher Zusammenhänge [Dissertation]. Helmut-SchmidtUniversität / Universität der Bundeswehr Hamburg, (2012)
- [5] Weger, D. Additive Fertigung von Betonstrukturen mit der Selective Paste Intrusion - SPI [Dissertation]. Technische Universität München, (2020)
- [6] T. Klassen: Skript Naturwissenschaftlich-technisches Praktikum (NWTP). Institut für Werkstofftechnik, Helmut-Schmidt-Universität Hamburg, Deutschland, (2019)
- [7] Ernst, K. R. Kaltgasspritzen für die Leistungselektronik - Werkstoffkombinationen und geometrische Randbedingungen [Dissertation]. Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg, (2011)
- [8] Impact Innovations: Kaltgastechnik: Kaltgasspritzen. (o.D.). Impact Innovations. Abgerufen am 9. Dezember 2023, von <https://impact-innovations.com/technologie/>

-
- [9] Roos, E., Maile, K. & Seidenfus, M. Werkstoffkunde für Ingenieure: Grundlagen, Anwendung, Prüfung. Springer-Verlag, (2017)
- [10] Bargel, H. Werkstoffkunde: Strukturen - grundlegende Eigenschaften. Springer Vieweg, (2022)
- [11] Schlegel, J. Die Welt des Stahls: Zur Geschichte, Herstellung und Verwendung eines Basiswerkstoffes. Springer, (2021)
- [12] Zuber, M. J. Werkzeugstähle mit höchster Festigkeit und Zähigkeit [Dissetation]. Montanuniversität Leoben, (2010)
- [13] Nanoval GmbH & Co. Kg (oN), Materialnummer: NV-0614, Sicherheitsdatenblatt, (o.D.)
- [14] Nanoval GmbH & Co. Kg (oN), Materialnummer: NV-0615, Sicherheitsdatenblatt, (o.D.)
- [15] Assadi, H., Irkhin, I., Gutzmann, H., Gartner, F., Schulze, M., Vidaller, M. V. & Klassen, T. Determination of plastic constitutive properties of microparticles through single particle compression. *Advanced Powder Technology*, (2015). 26(6), 1544 – 1554. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2015.08.013>
- [16] Albert, A. Bautabellen für Ingenieure. Mit Berechnungshinweisen und Beispielen. 24. Aufl. Köln: Bundesanzeiger Verl. [u.a.], (2020)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Schematische Darstellung einer Kaltgasspritzanlage (S. 7)

Abbildung 2.2: Schematische Darstellung der Partikelgeschwindigkeit als Maß für Schichtqualität und Effizienz (S. 8)

Abbildung 2.3: Schematische Darstellungen der Elementarzellen krz, kfz, hdp, in Reihenfolge von links beginnend (S. 10)

Abbildung 2.4: Schematische Darstellung von Entstehung einer Versetzungsbewegung entlang einer Gleitebenen bei einem eingespannten Biegebalken (S. 11)

Abbildung 2.5: Schematische Darstellung einer Versetzungsbewegung unter Spannung τ (S. 11)

Abbildung 2.6: Eisen-Kohlenstoff-Diagramm (S. 14)

Abbildung 2.7: Partikel Kompression, Partikel wird zwischen Indenter und Hartmetallplatte gedrückt (S. 17)

Abbildung 3.1: Diagramm der Chargentemperatur der Daten aus dem Hochtemperaturofen (S. 19)

Abbildung 3.2: Polierte Hartmetallplatte mit gelaserten Markierungen von 1 bis 20 zur Platzierung einzelner Partikel (S. 20)

Abbildung 3.3: Automatische Messlinienvorlage nach der Messung eines Partikels des Materials S235 (S. 21)

Abbildung 3.4: 3D-Ansicht des in Abbildung 3.3 gezeigten Partikels (S. 22)

Abbildung 3.5: Messkurven einer Partikel Kompressionscharge aus den gewonnenen Daten der ZwickRoell Härteprüfmaschine (S. 24)

Abbildung 3.6: Aufnahme eines Partikels, der zur Auswertung ungeeignet ist, durch eine starke seitliche Eindellung (S. 25)

Abbildung 3.7: Ein perfekt aufgenommenes und sehr rundes Partikel der exzellent für eine Auswertung geeignet ist (S. 26)

Abbildung 3.8: Fittingkurve in einem gewissen Bereich, in dem die Parameter gut ermittelt werden können. (S. 26)

Abbildung 4.1: Dargestellt sind die verschiedenen repräsentativen Mittelwerte der Versuche von dem S235 Stahlpulver, mit der zugehörigen Standartabweichung (S. 28)

Abbildung 4.2: Spritzfenster des unbehandelten S235, simuliert mit folgenden Parametern: PF 4000 Lochscheibe bei 4,0 U/min, 50bar Gasdruck, Prozessgas Stickstoff (S. 29)

Abbildung 4.3: Diagramm zur theoretischen Einschätzung des zu erreichenden Schichtqualitätsparameter η , bei einer Simulation von einem unbehandelten S235 mit den Parametern 50bar Gasdruck und 1100°C Gastemperatur (S. 30)

Abbildung 4.4: Spritzfenster des wärmebehandelten S235 mit der Haltetemperatur 600°C und simuliert mit den folgenden Parametern: PF 4000 Lochscheibe bei 4,0 U/min, 50bar Gasdruck, Prozessgas Stickstoff (S. 31)

Abbildung 4.5: Diagramm zur theoretischen Einschätzung des zu erreichenden Schichtqualitätsparameter η , bei einer Simulation von einem wärmebehandelten S235 (Haltetemperatur 600°C) mit den Parametern 50bar Gasdruck und 1100°C Gastemperatur (S. 32)

Abbildung 4.6: Dargestellt sind die verschiedenen repräsentativen Mittelwerte der Versuche von dem S355 Stahlpulver, mit der zugehörigen Standartabweichung (S. 33)

Abbildung 4.7: Spritzfenster des unbehandelten S355, simuliert mit folgenden Parametern: PF 4000 Lochscheibe bei 4,0 U/min, 50bar Gasdruck, Prozessgas Stickstoff (S. 34)

Abbildung 4.8: Diagramm zur theoretischen Einschätzung des zu erreichenden Schichtqualitätsparameter η , bei einer Simulation von einem unbehandelten S355 mit den Parametern 50bar Gasdruck und 1100°C Gastemperatur (S. 35)

Abbildung 4.9: Spritzfenster des wärmebehandelten S355 mit der Haltetemperatur 600°C und simuliert mit den folgenden Parametern: PF 4000 Lochscheibe bei 4,0 U/min, 50bar Gasdruck, Prozessgas Stickstoff (S. 36)

Abbildung 4.10: Diagramm zur theoretischen Einschätzung des zu erreichenden Schichtqualitätsparameter η , bei einer Simulation von einem wärmebehandelten S355 (Haltetemperatur 600°C) mit den Parametern 50bar Gasdruck und 1100°C Gastemperatur (S. 37)

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Zusammensetzung der Werkstoffe S235 und S355 (S. 18)