



Montanuniversität Leoben

Lehrstuhl für Gießereikunde,

Department für Metallurgie

Vorstand Univ.Prof.Dipl.-Ing.Dr. Peter Schumacher



MASTERARBEIT

Thema:

Entwicklung von Fachwerkknoten im Feingussverfahren

Ersteller:

Georg Einödhofer, BSc

Betreuer:

Univ.Prof.Dipl.-Ing.Dr. Peter Schumacher

Dipl.-Ing. Bernd Panzirsch



Leoben, im Februar 2011

Kurzfassung

Das Fügen artfremder Werkstoffe gewinnt zunehmend an Bedeutung für den Leichtbau. Dadurch können vorteilhafte Eigenschaften unterschiedlichster Materialien kombiniert werden. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Substitution einer aus Stahlrohren geschweißten Fachwerkskonstruktion. Es wurden Fachwerksknoten designed und hergestellt, die Rohrelemente, welche aus einem beliebigen Werkstoff sein können, mithilfe von Klebstoffen verbinden sollen. Die Knotenelemente wurden aus Stahl gefertigt, deren hervorragende mechanische Eigenschaften bei einem kleinen Bauvolumen und niedrigen Kosten ermöglicht. Aufgrund der geringen Wandstärken bei gleichzeitig hoher Gestaltungsfreiheit wurde für den Herstellungsprozess das Feingussverfahren ausgewählt. Das Erstellen der Geometrie inklusive einer FEM-Simulation, das Feingussverfahren und die Qualitätssicherung der hergestellten Bauteile, unter anderem unter Einsatz der Computertomographie, sind in der Arbeit beschrieben, aber auch Klebeverbindungen werden untersucht.

Abstract

The joining of different materials is of increasing importance for lightweight designs. Advantageous properties of material combinations can be used to obtain optimal structural properties. The current work is on the substitution of a welded steel-tube framework. Thus, joints of an alternative framework were designed and manufactured to connect tube elements, made from high strength materials, via an adhesive. The joints were made of steel, which is a material that combines excellent mechanical properties and low costs. For the manufacturing, the investment-casting process was chosen as thin wall-thicknesses are possible and because of increased design freedom. The development of the geometry was via FEM-analysis, the investment-casting process and the necessary quality assurance, using a computer tomography. Moreover, bonded joints and their strength were examined.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den verwendeten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche erkenntlich gemacht habe.

.....
Georg Einödhofer

Danksagung

Das Erstellen der vorliegenden Arbeit wäre ohne die Mithilfe und Unterstützung einer Vielzahl an Personen nicht möglich gewesen. Allen voran gilt mein Dank Univ.Prof.Dipl.-Ing.Dr. Peter Schumacher, Betreuer von Universitätsseite und gleichzeitig Geschäftsführer des Österreichischen Gießerei-Institutes und meinem Firmenbetreuer Dipl.-Ing. Bernd Panzirsch, des Weiteren Dipl.-Ing. Gerhard Schindelbacher, ebenfalls Geschäftsführer des ÖGI, der gemeinsam mit Prof. Schumacher die Umsetzung des Projektes möglich gemacht hat.

Das gesamte Mitarbeiterteam des Österreichischen Gießereiinstitutes hat mich freundlich aufgenommen und tatkräftig unterstützt, wofür ich mich an dieser Stelle ebenfalls herzlich bedanken möchte, besonders bei Dipl.-Ing.(FH) Christian Kneißl, Dipl.-Ing. Peter Hofer, Albert Jahn, Carmen Promer, Ing. Heinz Holzer, Klaus Rabelhofer, Dipl.-Ing.Dr. Martin Fechter, Gerhard Umbauer, Mag. Jödis Rosc, Daniel Habe, Werner Breitenberger und Dusan Zivkovic.

Zuletzt muss ich mich noch bei meiner Familie bedanken, die das gesamte Studium über hinter mir stand und die Ausbildung an der Montanuniversität Leoben überhaupt erst ermöglicht hat.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Abstract.....	II
Eidesstattliche Erklärung	III
Danksagung.....	IV
Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	I
Tabellenverzeichnis	VI
1 Einleitung	1
2 Theoretische Betrachtung	4
2.1 Werkstoffauswahl	4
2.2 Stahlguss allgemein.....	7
2.3 Einteilung Stahl.....	8
2.4 Erschmelzen von Stahl	9
2.5 Erstarrung von Stahl	10
2.5.1 Allgemein	10
2.5.2 Erstarrung von Stahl	14
2.6 Feinguss	16
2.6.1 Geschichtliches.....	16
2.7 Das Feingussverfahren.....	19
2.7.1 Modellherstellung.....	20

2.7.1.1	Konventionelle Methode	20
2.7.1.2	Wachsmo­delle mittels 3D-Druckverfahren	21
2.7.1.3	Wachse	23
2.7.1.4	Patentrecherche Wachse	26
2.7.2	Zusammenfügen der Gießeinheit	27
2.7.3	Herstellung der Gießform	28
2.7.4	Ausschmelzen und Brennen	30
2.7.5	Gießen	31
2.7.6	Entformen	32
2.7.7	Trennen und Schleifen	32
2.7.8	Prüfung und Kontrolle	33
2.7.8.1	Kontrolle der Toleranzen	33
2.7.8.2	Zerstörungsfreie Prüfung	34
2.7.9	Auftreten von Toleranzproblemen	35
2.8	Gussfehler	36
2.8.1	Wasserstoffproblematik	39
2.9	Wärmebehandlung	40
2.9.1	Vergüten	40
2.9.2	Abschrecken	42
3	Experimentelle Methoden	44
3.1	Konstruktion und Festigkeitssimulation der Knotenelemente	44
3.2	Herstellung des Bauteils	44
3.2.1	Montage der Gießeinheit	45
3.2.2	Besanden, Ausschmelzen, Brennen	46
3.2.3	Abguss	47
3.3	Chem. Analyse	50
3.3.1	Kohlenstoff/Schwefel-Analyse	50
3.3.2	ICP	50
3.4	Härtemessung	53
3.5	Zugfestigkeit und Bruchdehnung	56
3.6	Rauheit	58
3.7	Gefügeuntersuchung am Lichtmikroskop	58
3.8	REM	61
3.9	Computertomographie	64
3.10	Klebeversuche	65

4	Resultate und Diskussion	68
4.1	Von der Skizze zum 3D-Datensatz	68
4.1.1	Bauteilzeichnung	70
4.1.2	Festigkeitssimulation	71
4.2	Eingangsprüfung.....	76
4.3	Chemische Analyse	79
4.4	Härtemessung	80
4.5	Zugfestigkeit und Bruchdehnung	81
4.6	Rauheit	84
4.7	Gefügeuntersuchung am Lichtmikroskop.....	85
4.7.1	Bauteil 1	85
4.7.1.1	Bereich 1.....	85
4.7.1.2	Bereich 2.....	87
4.7.1.3	Bereich 3.....	88
4.7.1.4	Bereich 4.....	89
4.7.2	Bauteil 2.....	90
4.7.2.1	Bereich 5.....	90
4.7.2.2	Bereich 6.....	92
4.7.2.3	Bereich 7.....	93
4.8	Rasterelektronenmikroskopie.....	94
4.8.1	Untersuchung des Saumes	94
4.8.2	Untersuchung Bruchstelle	102
4.9	Computertomographie	105
4.10	Simulation Einfluss Fehlergröße	107
4.11	Klebeversuche	110
5	Zusammenfassung	114
6	Literaturverzeichnis.....	115
7	Anhang	1
7.1	Ergebnisse Rauigkeitsmessung.....	1

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Einflusszone beim Schweißen von Stahl [1].....	2
Abbildung 2-1: Eisen-Kohlenstoffdiagramm [5].	8
Abbildung 2-2: Konstitutionelle Unterkühlung [10].....	11
Abbildung 2-3: Einfluss der konst. Unterkühlung auf die Erstarrungsmorphologie [10].....	11
Abbildung 2-4: Erstarrungstypen [9].....	13
Abbildung 2-5: Veränderung der Morphologie [2].....	14
Abbildung 2-6:Entstehung von Mikroseigerungen [12].	14
Abbildung 2-7: Bildung von Körnern [2].....	15
Abbildung 2-8: Korngrenzen während der Erstarrung [2].	15
Abbildung 2-9: Geschichtliche Feingussstücke [13].	17
Abbildung 2-10: Beispielteile Feinguss [15].....	18
Abbildung 2-11: Das Feingussverfahren [8].	19
Abbildung 2-12: Voxeljet 3D Druck [17].	22
Abbildung 2-13: Vorteil des Druckverfahrens [18].	23
Abbildung 2-14: Temperaturabhängige Ausdehnung von Wachsen nach [21].	25
Abbildung 2-15: Einfluss Füller nach [22].	25
Abbildung 2-16: Thermische Ausdehnung Besandungsmaterial nach [22].....	29
Abbildung 2-17: Counter-gravity casting [19].	32
Abbildung 2-18: Koordinatenmessmaschine [24].	33
Abbildung 2-19: Unvollständige Füllung [26], Beschädigung durch Auswerfer [26].	37

Abbildung 2-20: Treibstellen [27], Formriss [27].	38
Abbildung 2-21: Unvollständige Formfüllung, Heißriss [29].	39
Abbildung 2-22: ZTU-Diagramm 25CrMo4 [35].	42
Abbildung 2-23: Abkühlphasen [36].	43
Abbildung 3-1: 3D gedruckte Modelle.	45
Abbildung 3-2: Modell mit aufgeklebten Anschnitten.	45
Abbildung 3-3: Fertig montierte Gießeinheiten.	46
Abbildung 3-4: Ausgeschmolzene Formen.	47
Abbildung 3-5: Probennahme.	48
Abbildung 3-6: Abguss.	48
Abbildung 3-7: Kaltläufe bei Teilen aus der Versuchstraube.	49
Abbildung 3-8: Schema eines ICP [38].	51
Abbildung 3-9: Leco CS200, Varian Vista MPX.	52
Abbildung 3-10: Übersicht Probenentnahme.	53
Abbildung 3-11: Teile aus T-Stück.	53
Abbildung 3-12: Übersicht Probenentnahme.	54
Abbildung 3-13: Teile aus Eckstück.	54
Abbildung 3-14: Eingebettete Proben.	55
Abbildung 3-15: EMCO Test M5U.	55
Abbildung 3-16: Ort der Probenentnahme.	56
Abbildung 3-17: Zugprobe.	56
Abbildung 3-18: Zugprüfmaschine.	57
Abbildung 3-19: Messaufbau für Rauigkeitsmessung.	58
Abbildung 3-20: Buehler Simplimet 1000, Buehler Phoenix 4000.	59
Abbildung 3-21: ATM Sapkir 550 Poliermaschine.	60
Abbildung 3-22: Lichtmikroskop Olympus BX 51.	60
Abbildung 3-23: Anregungsbirne [40].	61
Abbildung 3-24: Rasterelektronenmikroskop [41].	62

Abbildung 3-25: Zugprobe und Analyseaufbau.	62
Abbildung 3-26: Schematischer Aufbau Computertomograph [42].	64
Abbildung 3-27: Streak-shape Oberfläche.	65
Abbildung 3-28: Werkstattzeichnung.....	66
Abbildung 3-29: Geklebte Rohrzugprobe mit Einsatzstück.....	66
Abbildung 3-30: In Prüfmaschine eingespannte Probe.	67
Abbildung 4-1: Handskizzen.	69
Abbildung 4-2: Handskizzen.	69
Abbildung 4-3: Früher Entwurf T-Stück.	70
Abbildung 4-4: Fertiges T-Stück.....	71
Abbildung 4-5: Fertiges Eckstück.....	71
Abbildung 4-6: Anpassungen des Netzes.	72
Abbildung 4-7: 1. Version.....	73
Abbildung 4-8: Version mit Materialauftrag.	73
Abbildung 4-9: Version mit Ring.....	74
Abbildung 4-10: Letzte Version.	74
Abbildung 4-11: Netz für Simulation.....	75
Abbildung 4-12: Fertiges Bauteil mit Diagonale unter Schubbeanspruchung.	75
Abbildung 4-13: Bauteil mit kleineren Fehlern.....	76
Abbildung 4-14: Ergebnisse Härtemessung.....	80
Abbildung 4-15: Ergebnisse Härtemessung.....	80
Abbildung 4-16: Spannungs-Dehnungsdiagramm Bauteil 9.....	82
Abbildung 4-17: Spannungs-Dehnungsdiagramm Bauteil 13.....	82
Abbildung 4-18: Spannungs-Dehnungsdiagramm Bauteil 25.....	83
Abbildung 4-19: Untersuchte Bereiche T-Stück.	85
Abbildung 4-20: Bereich 1, Rand, Ätzung mit 2%iger HNO ₃	86
Abbildung 4-21: Bereich 1, Mitte, Ätzung mit 2%iger HNO ₃	86
Abbildung 4-22: Bereich 2, Rand, Ätzung mit 2%iger HNO ₃	87

Abbildung 4-23: Bereich 2, Mitte, Ätzung mit 2%iger HNO ₃	87
Abbildung 4-24: Bereich 3, Rand, Ätzung mit 2%iger HNO ₃	88
Abbildung 4-25: Bereich 3, Mitte, Ätzung mit 2%iger HNO ₃	88
Abbildung 4-26: Bereich 4, Rand, Ätzung mit 2%iger HNO ₃	89
Abbildung 4-27: Bereich 4, Mitte, Ätzung mit 2%iger HNO ₃	89
Abbildung 4-28: Untersuchte Bereiche Eckstück.	90
Abbildung 4-29: Bereich 5, Rand, Ätzung mit 2%iger HNO ₃	91
Abbildung 4-30: Bereich 5, Mitte, Ätzung mit 2%iger HNO ₃	91
Abbildung 4-31: Bereich 6, Rand, Ätzung mit 2%iger HNO ₃	92
Abbildung 4-32: Bereich 6, Mitte, Ätzung mit 2%iger HNO ₃	92
Abbildung 4-33: Bereich 7, Rand, Ätzung mit 2%iger HNO ₃	93
Abbildung 4-34: Bereich 7, Mitte, Ätzung mit 2%iger HNO ₃	93
Abbildung 4-35: Übersicht Randbereich.....	95
Abbildung 4-36: Untersuchte Stellen.....	95
Abbildung 4-37: Übersicht untersuchter Bereich und Ergebnis für Eisen.	97
Abbildung 4-38: Ergebnisse für Mangan, Vanadium und Silizium.	97
Abbildung 4-39: Ergebnisse für Chrom, Sauerstoff und Schwefel.....	97
Abbildung 4-40: Runder Einschluss.	98
Abbildung 4-41: Markierung untersuchter Bereich plus Ergebnisse.	99
Abbildung 4-42: Verteilung von Eisen, Chrom und Sauerstoff.....	99
Abbildung 4-43: Verteilung von Mangan, Schwefel und Vanadium.	99
Abbildung 4-44: Verteilung von Aluminium.	100
Abbildung 4-45: Plattenförmige Einschlüsse mit hohem Al-Anteil.	100
Abbildung 4-46: Gesamte Bruchfläche.....	102
Abbildung 4-47: "Großer" Lunker (ca. 1 mm) in der Mitte.....	103
Abbildung 4-48: "Kleinerer" Lunker (ca. 0,5 mm) am Rand.	103
Abbildung 4-49: Spaltbruchfläche der Probe, Bereich ohne Fehler.	104
Abbildung 4-50: Spaltbruchfläche mit Fehlern.....	104

Abbildung 4-51: Ergebnis T-Stück.	105
Abbildung 4-52: Ergebnis Eckstück.	106
Abbildung 4-53: Schnitt durch Pore in 3D Solidworks Zeichnung.	107
Abbildung 4-54: Mesh im Bereich der Pore.	107
Abbildung 4-55: Randbedingungen, statische Belastung.	108
Abbildung 4-56: Ergebnis Spannungen, Pore mit 0,02 mm vernetzt.	108
Abbildung 4-57: Detailergebnis Pore.	109
Abbildung 4-58: getestete Klebproben.	110
Abbildung 4-59: Ergebnis der Klebstoffe, Durchführung durch OFI.	110
Abbildung 4-60: Probe mit 54 mm geklebter Länge und streakshape Oberfläche.	112
Abbildung 4-61: Einfluss der Oberfläche.	112

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Referenzstahl und mögliche Gussstähle	5
Tabelle 4-1: Messergebnisse T-Stück.....	77
Tabelle 4-2: Messergebnisse Eckstück.....	78
Tabelle 4-3: Ergebnisse der chemischen Analyse.....	79
Tabelle 4-4: Ergebnisse Zugversuch.....	81
Tabelle 4-5: Gemittelte Ergebnisse Rauigkeitsmessung.	84
Tabelle 4-6: Ergebnis chemische Analyse.	90
Tabelle 4-7: Ergebnisse der untersuchten Spektren.	96
Tabelle 4-8: Ergebnisse Analyse runder Einschluss.	98
Tabelle 4-9: Analyse plattenförmige Einschlüsse.....	101
Tabelle 4-10: Ergebnisse Rohrzugversuch.	111
Tabelle 7-1: Ergebnisse Rauigkeitsmessung Teil 15.....	1
Tabelle 7-2: Ergebnisse Rauigkeitsmessung Teil 21.....	2
Tabelle 7-3: Ergebnisse Rauigkeitsmessung Teil 29.....	2
Tabelle 7-4: Ergebnisse Rauigkeitsmessung Teil 33.....	3
Tabelle 7-5: Ergebnisse Rauigkeitsmessung Teil 42.....	3
Tabelle 7-6: Ergebnisse Rauigkeitsmessung Teil 57.....	4

1 Einleitung

In der heutigen Zeit ist es sehr wichtig, bei Kraftfahrzeugen Gewicht einzusparen, um den Treibstoffverbrauch und die damit verbundenen Emissionen zu senken. Aus diesem Grund beschäftigt sich diese Arbeit mit dem Themenbereich Verbundwerkstoffe. Um jahrelang verwendete und somit bestens bekannte Verfahren zu ersetzen, müssen neue Technologien, welche durch den Einsatz neuer Materialien und Herstellverfahren leichter sind, vorteilhaft und im Idealfall kostengünstiger als die bisher verwendeten sein. Zusätzlich müssen fundierte Daten vorhanden sein, bevor ein Prototyp gebaut werden kann.

Ziel dieser Arbeit ist es, ein Knotenelement herzustellen, welches in der Lage sein soll, Rohre zu einem fachwerkartigen Rahmen zu verbinden. Dieser Rahmen soll mit Klebstoff verbunden werden und den Stand der Technik der Kleberentwicklung zeigen, insbesondere die Leistungsfähigkeit neuer Klebstoffe gegenüber dem großindustriell verbreiteten Schweißprozess.

Bisherige Fachwerkskonstruktionen werden mittels Schweißprozess hergestellt. Dieser Prozess ist schon lange in Verwendung und somit bestens bekannt. Zusätzlich ist er reproduzierbar, in höchstem Maße serientauglich und kostengünstig. Das Schweißen ist ein thermischer Prozess, bei dem Bauteile durch das Aufschmelzen des Werkstoffs und das anschließende Erstarren miteinander verbunden werden. Dies hat zur Folge, dass der Werkstoff im Bereich der Schweißnaht durch das Einbringen von Wärme beeinflusst wird. In der folgenden Abbildung 1-1 ist die Wärmeeinflusszone WEZ für FeC-Stahl detailliert beschrieben.

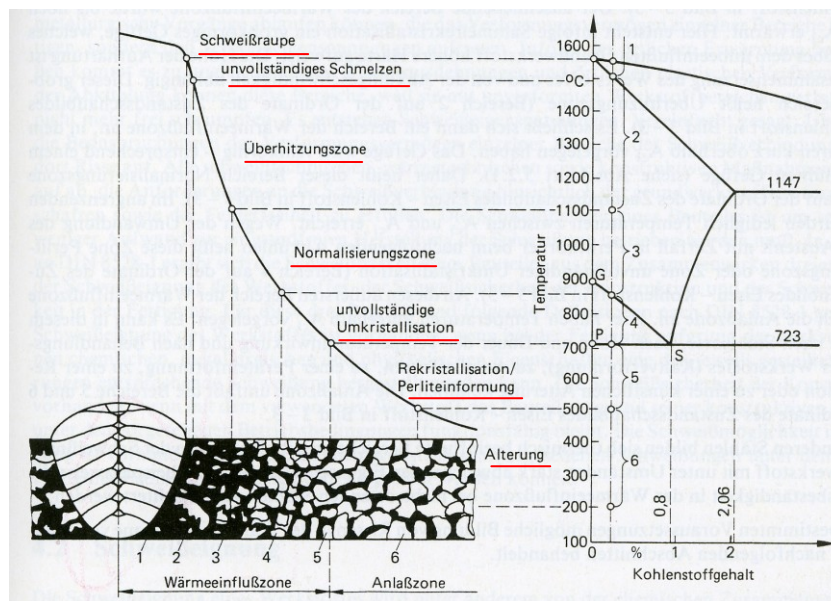


Abbildung 1-1: Einflusszone beim Schweißen von Stahl [1].

Ausgehend von der Schweißnaht werden im Folgenden die auftretenden Zonen beschrieben. Direkt an die Schweißraupe grenzt die Zone des unvollständigen Schmelzens. Im zweiten Bereich, der Überhitzungszone, entsteht durch Rekristallisation ein grobkörniges Gefüge mit hoher Härte. Der dritte Bereich ist die so genannte Normalisierungszone. Die Temperaturen in dieser Zone entsprechen jenen bei der Normalglühung, es entsteht also ein feinkörniges Gefüge. Der nächste Bereich der Wärmeinflusszone ist die Perlitumwandlungszone. Hier wird der Perlit in Austenit umgewandelt, der bei der Abkühlung wieder in Perlitkörner zerfällt. In der folgenden Anlasszone kommt es, wie der Name schon sagt, zu Anlasseffekten, also zu einer Perliteinformung, Rekristallisation oder künstlichen Alterung. Danach beginnt die nicht beeinflusste Zone. Hier verliert der Wärmeeintrag an Einfluss, es liegt das Gefüge vor, welches das Bauteil vor dem Schweißen aufweist.

Im Schweißbereich liegt eine Vielzahl von unterschiedlichen Gefügeausprägungen vor. Üblicherweise ist dieser Bereich, der abhängig von der Wanddicke des Werkstoffs und dem Schweißverfahren ist, nur zwischen 20 und 40 mm breit. Um diesen Bereich wieder zu homogenisieren und damit die gewünschten Werkstoffeigenschaften zu erzielen, wäre eine nachfolgende Wärmebehandlung notwendig. Da Schweißkonstruktionen oftmals große Abmessungen haben, sind Wärmebehandlungen schwierig durchzuführen und damit kostenintensiv. Probleme hierbei sind, neben den bereits erwähnten Abmessungen, dass es zu Verzug und somit zu Eigenspannungen kommt. Aus diesem Grund wird in vielen Fällen darauf verzichtet und die verringerten Eigenschaften in Kauf genommen [1].

Hochfeste Klebstoffe verfügen über eine relativ geringe Duktilität. Daher ist es wichtig, ein Material für das Knotenelement auszuwählen, welches über einen hohen E-Modul verfügt, und dabei nur ein geringes Volumen aufweist. Dies ist der Werkstoff Stahl, der aus diesem Grund für dieses Projekt ausgewählt wird. Da das Hauptziel aber auch eine Gewichtsreduzierung ist, muss ein Herstellungsprozess gewählt werden, der es ermöglicht, die mechanischen Vorteile von Stahl gegenüber Leichtmetallen mit einem möglichst geringen Gewicht zu kombinieren. Das Verfahren, welches größtmögliche Gestaltungsfreiheit bietet, ist der Feinguss. Zusätzlich kann man bei diesem Verfahren unter Einsatz von 3D-Drucktechnologie effizient, schnell und kostengünstig Prototypen anfertigen.

Die vorliegende Arbeit soll den Weg von der ersten Skizze bis zum fertigen Bauteil zeigen, welches unter Einsatz modernster Verfahren wie der FEM-Simulation bei der Bauteiloptimierung oder der Computertomographie bei der Fehleruntersuchung erstellt wurde.

2 Theoretische Betrachtung

2.1 Werkstoffauswahl

Die bestehende geschweißte Fachwerkskonstruktion, die mithilfe eines Verbundes aus mehreren Werkstoffen ersetzt werden soll, ist aus an den Knotenpunkten geschweißten Stahlrohren hergestellt. Die Probleme der geschweißten Konstruktion liegen darin, dass sie aufgrund der schlechten Werkstoffeigenschaften in der Wärmeeinflusszone oftmals nicht die gewünschten mechanischen Eigenschaften erbringt, da aufgrund des fertigungstechnischen Ablaufes eine nachfolgende Wärmebehandlung nicht möglich ist. Die Wahl für den Herstellungsprozess der Knotenelemente fällt auf einen Gießprozess. Um eine Gewichtsoptimierung zu erzielen, ist es notwendig, dünne Wandstärken zu erreichen, welche im Feingussverfahren umgesetzt werden können. Als Werkstoff soll aufgrund der Eigenschaften Stahl zum Einsatz kommen.

Bei der Auswahl des Stahles werden die mechanischen Eigenschaften des zur Zeit in der Schweißkonstruktion verwendeten Materials als Anhaltspunkt hergenommen. Die Firma, die die Gussknoten herstellen sollte, übermittelte eine Liste der von ihr vergossenen Stahlsorten inklusive deren garantierten mechanischen Kennwerten. Aus dieser Liste werden die in Frage kommenden Stähle in der folgenden Tabelle aufgezeigt und zusätzlich die Referenzwerte angegeben. N. I. bedeutet niedriglegiert, u.I. unlegiert und h. I. hochlegiert.

Tabelle 2-1: Referenzstahl und mögliche Gussstähle.

Name	Werkstoffnr.	R_p [N/mm ²]	R_m [N/mm ²]	A [%]	
Ref.: 25 CrMo 4	1.7218	>500	>600	≥18	} n.l.
GS 25 CrMo 4	1.7218	>650	750 - 1100	≥9	
C35	1.0501	>430	630 - 780	≥15	} u.l.
C45	1.0503	>500	700 - 850	≥10	
C55	1.0535	>550	800 - 950	≥10	
GS 16 MnCr5	1.7131	>600	800 - 1100	≥10	} n.l.
14 CrMoV 6 9	1.7734	>790	980 - 1180	≥11	
GS 42 CrMo 4	1.7225	>800	900 - 1100	≥10	} h.l.
G X 22 CrMoV 12 1	1.4931	>590	740 - 880	≥15	
G X 2 CrNiMoN 26 7 4	1.4469	>480	>650	≥22	
G X 2 CrNiMoCuN 25 6 3 3	1.4517	>480	650 - 850	≥22	

Bei Betrachtung von Tabelle 2-1 fällt sofort auf, dass die niedriglegierten Stahlsorten, die im Guss hergestellt werden, nur eine geringere Bruchdehnung vorweisen können als umgeformte. Streckgrenze und Zugfestigkeit dagegen weisen keinen Nachteil auf. Vielmehr muss erwähnt werden, dass Gussteile über isotrope Eigenschaften verfügen, die angegebenen Kennwerte also ungeachtet der Richtung der Belastung erfüllen. Auch ist klar, dass sich diese Kennwerte mit einer geeigneten Wärmebehandlung verschieben lassen, insbesondere, was Zugfestigkeit und Bruchdehnung betrifft. Sehr hohe Bruchdehnungswerte können im Stahlguss nur bei hochlegierten, rostbeständigen Stählen erzielt werden.

Die Auswahl der für die Gussknoten verwendeten Stahlsorte orientiert sich an der Mindestbefüllung der Kennwerte von Streckgrenze und Zugfestigkeit. Somit wäre ein C45-Stahl die erste Wahl. Alle anderen Stahlsorten haben bessere Werte bei Streckgrenze und Zugfestigkeit bei gleicher Bruchdehnung, doch sind diese Stähle durch ihre Legierungszusätze finanziell unvorteilhafter. Die hochlegierten Stähle am Ende von Tabelle 2-1 erfüllen die Mindestanforderungen bezüglich der Streckgrenze und Zugfestigkeit nur knapp oder liegen leicht darunter, jedoch übertreffen die erzielbaren Werte der Bruchdehnung die der umgeformten Referenzstahlsorte. Doch ist hier zu berücksichtigen, dass durch die extrem hohen Anteile von Chrom (25 bis 26 %), Nickel und Molybdän die

Materialkosten in etwa sechsmal so hoch sind wie jene von unlegierten Stahlsorten wie dem C45.

Aufgrund der Verfügbarkeit in der mit der Herstellung der Gussteile beauftragten Firma fiel die Wahl auf den Stahl mit der Werkstoffnummer 1.7734, 14 CrMoV 6-9. Dieser Stahl verfügt über sehr gute Werte bei Streckgrenze und Zugfestigkeit, aber auch die Bruchdehnung liegt im Bereich der anderen Stähle aus der Tabelle 2-1. Zu den Kosten ist anzumerken, dass im Feinguss nur ein sehr geringer Prozentsatz der Gesamtkosten auf den verwendeten Stahl entfällt und somit die Entscheidung für den letztendlich gewählten Stahl gerechtfertigt werden kann, weil dieser ohnehin nicht viel teurer als ein C45 Standardstahl gewesen wäre. Hinzu kommt noch die bereits erwähnte Tatsache der sofortigen Verfügbarkeit der besseren Stahlsorte, das Bestehen auf den Standardstahl hätte eine Lieferung der Bauteile verzögert, und wurde somit zum Entscheidungskriterium. Auch können nun etwaige mechanische Bearbeitungen am Bauteil im Zuge weiterführender Versuche problemlos erfolgen, da über die höheren mechanischen Kennwerte auch bei einer Wandstärkenverringerung in Folge der Bearbeitung genügend Festigkeit vorhanden sein sollte. Des Weiteren ist dieser Stahl durch seinen geringen Kohlenstoffgehalt schweißbar. Dies erleichtert das Anbringen von eventuell benötigten Halterungen oder Aggregaten.

Mithilfe der Referenzwerte aus Tabelle 2-1 können nun die benötigten Wandstärken für die Elemente der Fachwerkskonstruktion berechnet werden.

Das Ergebnis zeigt, dass dank der höheren Festigkeit des 14CrMoV 6-9 die benötigte Wandstärke geringer ist als jene, die im Feinguss hergestellt werden kann. Aus diesem Grund ist, wie bereits erwähnt, eine Reserve für mechanische Bearbeitung vorhanden.

Die Berechnung der notwendigen Wandstärke für Zugbelastung erfolgt relativ einfach und ist nachfolgend ausgeführt (Anmerkung: Der Außendurchmesser der Bauteile wird mit 29 mm festgelegt, um mit aufgeklebten Rohren den selben Gesamtaußendurchmesser wie bei der Schweißkonstruktion zu erhalten):

$$d = \sqrt{D^2 - \left(\frac{4 * F}{R_m * \pi} \right)} \quad (2-1)$$

mit $F = R_m * A$ bzw. $F = R_{p0,2} * A$,

wobei A die Fläche (Außen- minus Innendurchmesser) der zu ersetzenden Stahlrohre ist.

Rechnet man nun beispielsweise den notwendigen Mindestinnendurchmesser für das Erreichen der Streckgrenze aus, so multipliziert man den Referenzwert für R_m , der der

Tabelle 2-1 entnommen werden kann, also 600 N/mm^2 mit der Fläche, welche die Referenzrohre aufweisen (hier: $143,73 \text{ mm}^2$) und erhält so das „F“ aus der Formel. Der Außendurchmesser „D“ ist mit 29 mm gegeben, für das R_m unter dem Bruchstrich wird das R_m des zu verwendeten Stahles eingesetzt, hier 1000 N/mm^2 , also die untere Grenze aus Tabelle 2-1. Dies ergibt einen erforderlichen Innendurchmesser von 27,04 mm, also eine Wandstärke von lediglich 1 mm. Spezifiziert werden, nach Absprache mit der Firma, welche minimalen Wandstärken bei diesem Bauteil und Stahl gefertigt werden können, 1,75 mm und somit mehr als ausreichend, um Reserven zu erhalten.

2.2 Stahlguss allgemein

Bereits 1740 wurde in England der erste vergießbare Stahl erzeugt. Dieser musste nach dem Abguss in kleine Kokillen in Hammerwerken weiterverarbeitet werden. Erst die Entwicklung von feuerfesten Formstoffen machte das Gießen von Bauteilen ohne weitere Warmverformung möglich. Dies geschah Mitte des 19. Jahrhunderts. Auf der Pariser Weltausstellung wurden 1855 Glocken aus Stahlguss gezeigt [2].

Das Gießen gehört zu den Urformverfahren. Dabei wird flüssiger Stahl in feuerfesten Formen zu einem Bauteil vergossen. Die Entwicklung vieler Stahlsorten erleichtert es dem Anwender, den geeigneten Stahl für seine Konstruktion auszuwählen. Der Gießprozess ermöglicht eine hohe Gestaltungsfreiheit für Konstrukteure, die somit ideal an die jeweiligen Anforderungen angepasst werden können. Durch den Gießprozess lassen sich sehr komplexe Geometrien darstellen, welche durch andere Prozesse nicht gefertigt werden können. Diesen Vorteil nutzend kann der Hersteller fast alle relevanten Geometrien liefern. Stahlguss wird auf verschiedene Arten vergossen. Meistens jedoch wird auf ein Dauermodell gesetzt, das in Verbindung mit verlorenen Sandformen genutzt wird. Andere Verfahren sind der Schleuderguss, der Feinguss und der Vollform-Guss.

Viele Stahlgussarten sind zusätzlich noch schweißbar, was ihren möglichen Einsatzbereich noch erweitert. Auch die isotropen Werkstoffeigenschaften bieten einen Vorteil gegenüber umgeformten Produkten [3,4].

2.3 Einteilung Stahl

Im Folgenden soll ein kurzer Überblick über die generelle Unterteilung von Stahl gegeben werden. Als unlegierter Stahl werden Stahlsorten bezeichnet, die einen Kohlenstoffgehalt von 0,02 bis 2,1 % vorweisen. Der Kohlenstoff ist das einzige nennenswerte Begleitelement im Eisen und somit ist allein der Gehalt desselben für die mechanischen Eigenschaften verantwortlich.

Damit hohe Festigkeitswerte auch bei geringeren Mengen an Kohlenstoff erzielt werden können, werden Legierungselemente zugegeben. Legierten Stahl unterteilt man in niedriglegierten und hochlegierten Stahl. Niedriglegierter Stahl kann neben Kohlenstoff noch bis zu 5 % andere Elemente aufweisen. Hochlegierter Stahl weist mehr als die gerade erwähnten 5 % an Begleitelementen auf [4].

Die Trenngrenze zwischen Stahl und Gusseisen liegt bei einem Kohlenstoffgehalt von 2,1 %. In der folgenden Abbildung 2-1 ist der Bereich von Stahl mit den roten, senkrechten Strichen markiert. Das abgebildete Eisen-Kohlenstoffdiagramm zeigt sowohl das stabile als auch das metastabile System. Zur kurzen Erklärung der in Abbildung 2-1 verwendeten Abkürzungen: S bedeutet Schmelze, A Austenit, F Ferrit, Z Zementit und G Graphit.

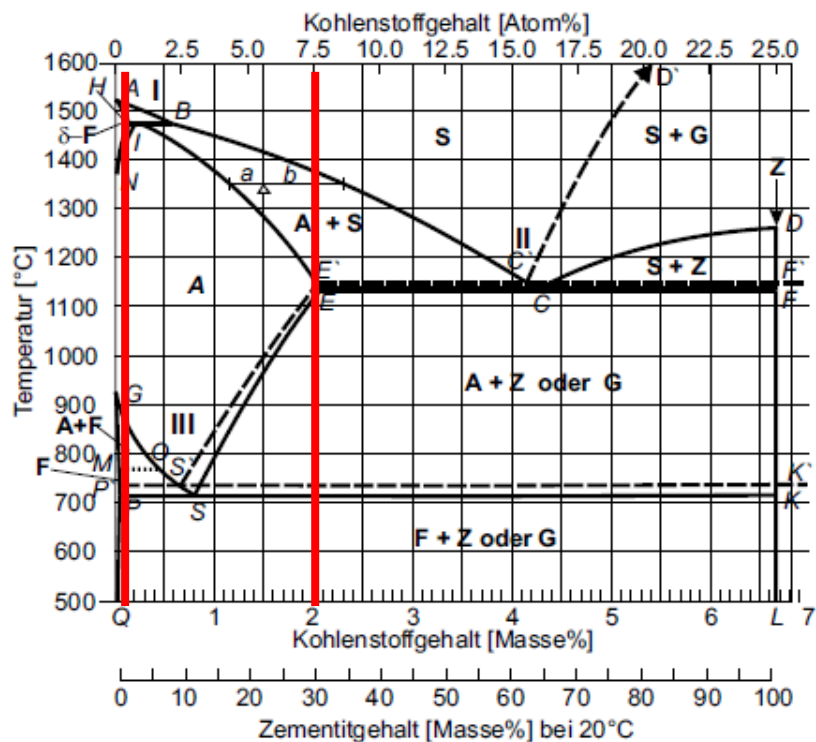


Abbildung 2-1: Eisen-Kohlenstoffdiagramm [5].

2.4 Erschmelzen von Stahl

Aus dem Phasendiagramm ist ersichtlich, dass durch die niedrigen Kohlenstoffgehalte von Stahlgusslegierungen sehr hohe Abgusstemperaturen notwendig sind. Daher kommen nur solche Herstellungsverfahren in Frage, welche die Schmelztemperatur ermöglichen. Deshalb wird heute in den meisten Fällen ein Elektroofen verwendet.

Es gibt zwei Arten von Elektroöfen: den Lichtbogenofen und den Induktionsofen. Die im Einsatz befindlichen Lichtbogenöfen haben Nenngrößen von 5 bis 10 t, aber es sind auch nur 2 t möglich. Bei den Induktionsöfen ist der Mindesteinsatz schon bei 10 kg, es gibt aber auch hier Öfen mit einer Kapazität bis 10 t [6].

Bei der Verwendung eines Lichtbogenofens sind große Produktionsmengen in kurzer Zeit möglich. Es gilt aber zu beachten, dass der Betrieb eines Lichtbogenofens einen hohen Aufwand in Bezug auf Betrieb sowie Umweltschutz voraussetzt. Einerseits ist der Lichtbogenofen ein Aggregat, das einen enormen Stromverbrauch hat und auch Rückwirkungen in das Stromnetz verursacht, außerdem müssen für einen reibungslosen Betrieb immer Ersatzwannen und -deckel bereitstehen. Während des Betriebs des Lichtbogenofens kommt es zu einer starken Rauchentwicklung, und ein Betriebsgeräusch von über 100 dB ist keine Seltenheit.

Der Betrieb von Induktionsöfen gestaltet sich etwas einfacher. Die Lärmentwicklung ist geringer, der Betrieb auf das Stromnetz bezogen einfacher. Auch ist es, im Gegensatz zum Lichtbogenofen, kein Problem, ohne Sumpf anzufahren. Eine Besonderheit dieser Ofenart sind die durch die Induktion entstehende Badbewegung und die Badkuppe. Die Badbewegung führt zwar einerseits zu einer hervorragenden Durchmischung der Schmelze, hat aber zur Folge, dass es zu Wechselwirkungen mit dem Ofenfutter kommt und dieses zusätzlich schnell verschleißt. Durch diese Badbewegung lösen sich die Legierungselemente schnell auf, und auch die Treffsicherheit der chemischen Analysen ist hoch. Jedoch muss der erhöhte Abbrand der Legierungselemente berücksichtigt werden. Allerdings ist metallurgische Arbeit nur bedingt möglich. Aus diesem Grund ist auf den Einsatz von höherwertigerem Schrott zu achten. Bei extrem hohen Anforderungen an die Materialqualität kann ein Vakuum-Induktionsofen zum Einsatz kommen [6,7,8].

2.5 Erstarrung von Stahl

2.5.1 Allgemein

Bei der Herstellung eines Bauteils ist es wichtig, dass die Form vollständig gefüllt wird. Dies hängt von mehreren Faktoren ab. Einerseits von den physikalischen Eigenschaften der Schmelze, die sich in Formfüllungsvermögen und Fließvermögen äußern, und andererseits von der Erstarrungsmorphologie. Das Formfüllungsvermögen gibt die Fähigkeit des Gießmetalls, die Konturen der Form darzustellen, an.

Probleme können hier zum Beispiel Ecken und Kanten bereiten, die nur abgerundet wiedergegeben werden, weil die Schmelze diese nicht vollständig füllt. Das Formfüllungsvermögen steigt aber mit der Temperatur der Schmelze, es kann also mit einer höheren Abgusstemperatur positiv beeinflusst werden. Das Fließvermögen gibt an, wie weit das Metall in einer Form fließt, bevor der Fluss durch die Erstarrung gestoppt wird. Es wird fast immer in Form der Auslauflänge angegeben. Dabei wird die Schmelze in einen meist spiralförmigen Kanal gegossen und nach der Erstarrung gemessen, wie weit die zurückgelegte Strecke ist. Auch hier kann mittels einer Temperaturerhöhung ein besseres Ergebnis erzielt werden.

Probleme, die bei einem zu geringen Fließvermögen auftreten, sind Kaltschweißungen oder überhaupt fehlende Teilbereiche des Gesamtstücks, weil durch eine vorzeitige Erstarrung nicht die gesamte Form ausgefüllt wird. Vor allem das Fließvermögen wird von der Erstarrungsmorphologie beeinflusst, welche im Folgenden behandelt wird [9].

Die Erstarrungsmorphologie befasst sich mit dem zeitlichen und örtlichen Ablauf der Erstarrung. Durch den Effekt der konstitutionellen Unterkühlung kommt es zur Ausbildung unterschiedlicher Erstarrungsmorphologien. Konstitutionelle Unterkühlung entsteht, wenn der Gradient der wahren Temperatur an der Erstarrungsfront flacher verläuft als jener der Liquidustemperatur. Abbildung 2-2 dient zur Veranschaulichung dieses Effekts.

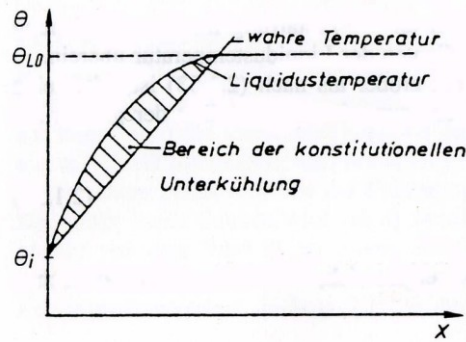
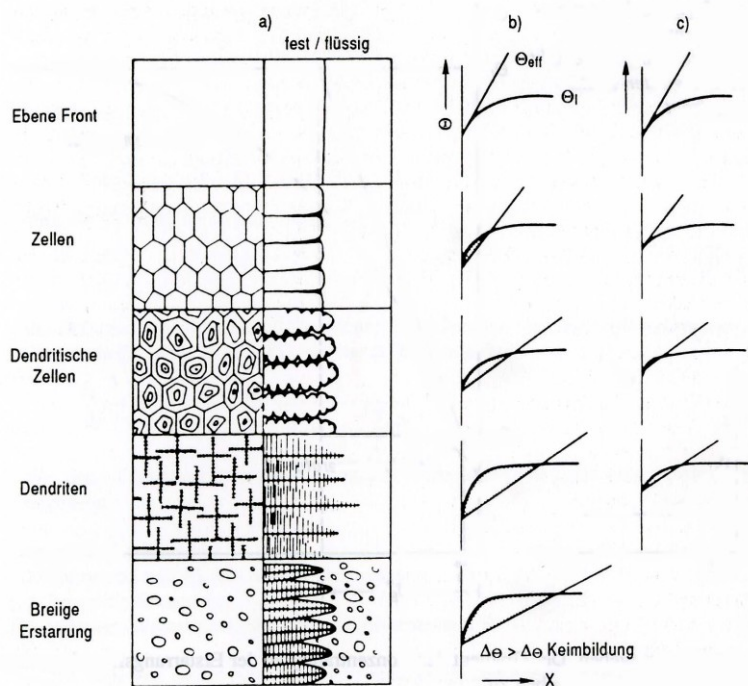


Abbildung 2-2: Konstitutionelle Unterkühlung [10].

Ist der Gradient der wahren Temperatur steiler oder gleich jenem der Liquidustemperatur, so kommt es zu einer glattwandigen Erstarrungsfront. Tritt aber konstitutionelle Unterkühlung auf, so ist die Temperatur vor der Erstarrungsfront niedriger als die Liquidustemperatur, es kommt zu einer Unterkühlung. Diese Unterkühlung wirkt als Triebkraft für die Erstarrung. Mit zunehmender Unterkühlung bilden sich Zellen, danach dendritische Zellen, Dendriten und bei sehr starker Unterkühlung kommt es zur Bildung von freien globulitischen Kristallen [10].



Konstitutionelle Unterkühlung und Gefüge. **a** Erscheinungsformen der Phasengrenze bei verschiedener konstitutioneller Unterkühlung; **b** konstitutionelle Unterkühlung vor der Bildung des Gefüges nach **a**; **c** konstitutionelle Unterkühlung nach der Bildung des Gefüges

Abbildung 2-3: Einfluss der konstitutionellen Unterkühlung auf die Erstarrungsmorphologie [10].

Durch den eben erklärten Effekt der konstitutionellen Unterkühlung kommt es zu einer Einteilung in fünf verschiedene Arten, wie die Erstarrung ablaufen kann, und zwar drei Arten einer exogenen Erstarrung und zwei Möglichkeiten einer endogenen. Exogene Erstarrung bedeutet, dass die Erstarrung am Rand beginnt und das Gusstück zur Mitte hin zuwächst. Endogen hingegen wird jene Erstarrung bezeichnet, bei der Kristalle aus der Schmelze herauswachsen.

Exogene Erstarrungstypen:

- glattwandige Erstarrung: Hier wachsen exogen-kompakte Kristalle zur Mitte des Gussteiles, bis die Kristallfronten zusammenstoßen. Die Grenzfläche der nebeneinander wachsenden Kristalle ist glatt.
- rauwandige Erstarrung: Durch den Umstand, dass die Kristalle hier exogendendritisch wachsen, ist die Grenzfläche Kristalle-Schmelze stark zerklüftet. Auch hier wachsen die Kristalle, bis sie in der Mitte zusammenstoßen.
- schwammartige Erstarrung: Exogene Dendriten durchziehen die Schmelze netzwerkartig. Die vielen Seitenarme werden immer dicker, bis die gesamte Schmelze aufgezehrt und somit das Ende der Erstarrung erreicht ist.

Endogene Erstarrungstypen:

- breiartige Erstarrung: Die Kristalle wachsen endogen, dendritisch oder kompakt, radial in der Schmelze. Dadurch wirkt die Schmelze während der Erstarrung wie ein Brei.
- schalenbildende Erstarrung: Hier wachsen die endogenen Kristalle, wiederum kompakt oder dendritisch, in der Schmelze, die Größe der Kristalle nimmt aber nach außen hin zu. Die geringe Beweglichkeit der größeren Kristalle am Rand führt zu einer Randschale, die eine höhere Widerstandskraft als die Mitte des erstarrenden Gussteiles aufweist.

In der folgenden Abbildung 2-4 sind die unterschiedlichen Erstarrungsarten dargestellt.

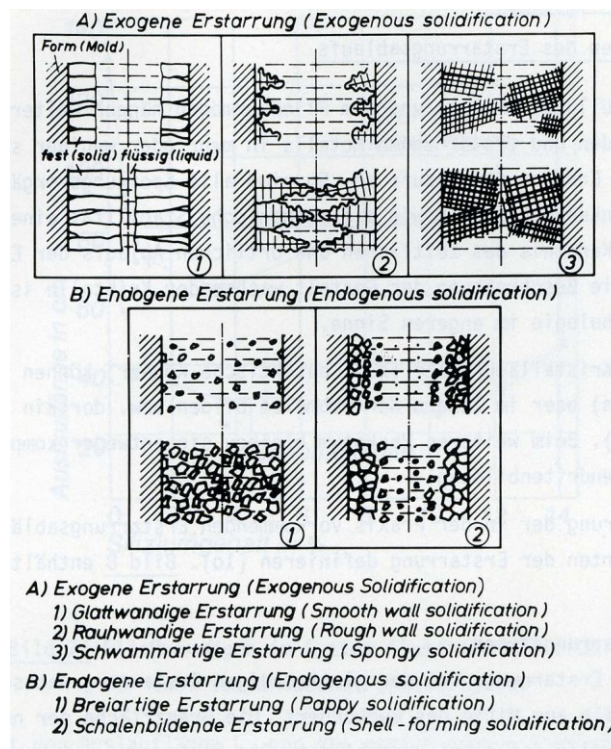


Abbildung 2-4: Erstarrungstypen [9].

Reine Metalle erstarren glattwandig. Wird jedoch eine Legierung vergossen, so ändert sich der Erstarrungstyp mit dem Legierungsgehalt. Neben der Legierungszusammensetzung hat auch die Abkühlgeschwindigkeit einen Einfluss auf die Erstarrungstypen. So kann durch eine Erhöhung der Abkühlrate aus einer normalerweise schwammartigen eine rauwandige und aus einer rauwandigen eine glatte Erstarrung werden. Bei den endogenen Erstarrungstypen führt eine erhöhte Abkühlrate zu einer verstärkten Schalenbildung [9,11].

Viele Legierungen erstarren aber nicht exakt nach einem der oben genannten Typen, sondern als Mischformen. Stahlguss beispielsweise erstarrt in den Außenzonen exogen-rauwandig, also dendritisch, und im Inneren endogen-breiartig [11].

2.5.2 Erstarrung von Stahl

Stahl erstarrt in den meisten technischen Anwendungsfällen dendritisch. Die Länge der Dendriten ist von der Wanddicke und der Abkühlgeschwindigkeit abhängig und kann von submikroskopisch bis zu mehreren Zentimetern reichen. Mit steigender Unterkühlung verändert sich die Dendritenmorphologie. Bei geringer Unterkühlung bildet sich der charakteristische, tannenbaumähnliche Habitus, bei starker Unterkühlung wächst nur noch der Primärstamm in Richtung der Wärmeabfuhr. Abbildung 2-5 stellt dies dar.

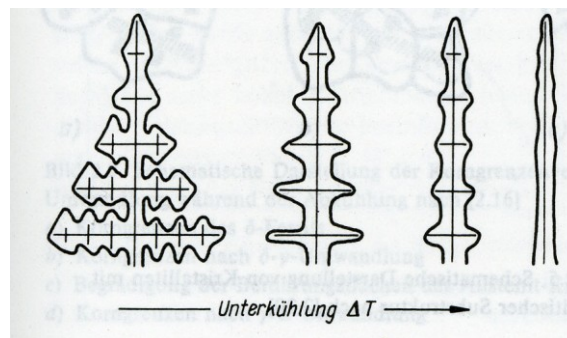


Abbildung 2-5: Veränderung der Morphologie [2].

Durch die dendritische Erstarrung werden Kristall- oder Mikroseigerungen gebildet. Die zuerst erstarrte Schmelze weist einen geringeren Gehalt an Begleit- und Legierungselementen auf. Dies führt dazu, dass der Dendrit ähnlich den Jahresringen eines Baumes von innen nach außen immer höhere Gehalte an Elementen hat. Abbildung 2-6 zeigt dies.

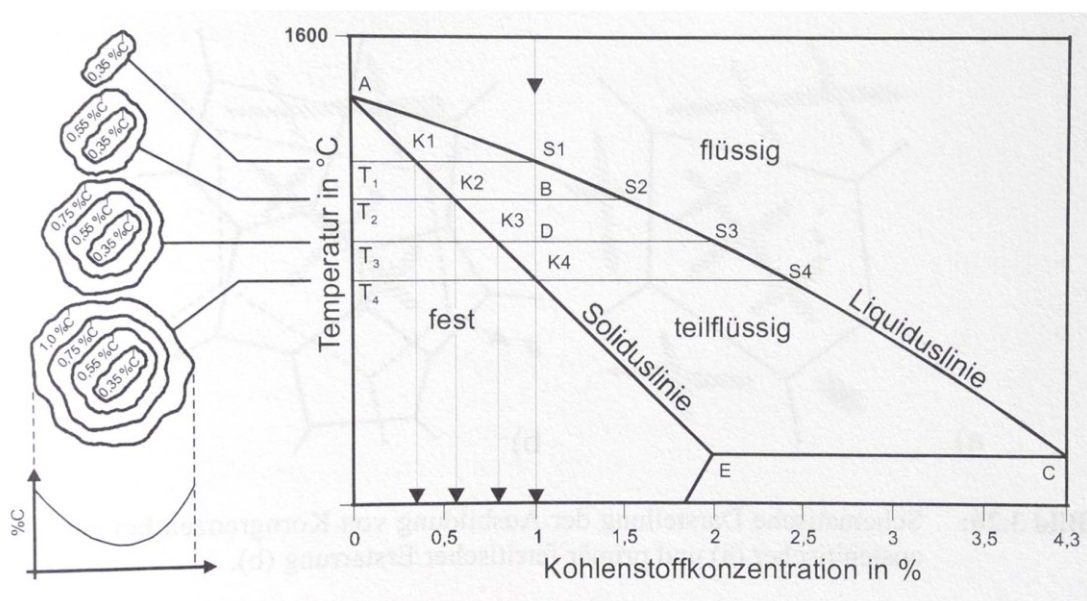


Abbildung 2-6: Entstehung von Mikroseigerungen [12].

Die Dendritenzwischenräume füllen sich während der Erstarrung mit Restschmelze. Dabei werden Korngrenzen ausgebildet. Die Körner werden nicht um einzelne Dendriten, sondern um Bündel parallel verlaufender Dendriten mit der gleichen Orientierung gebildet, wie Abbildung 2-7 zeigt.

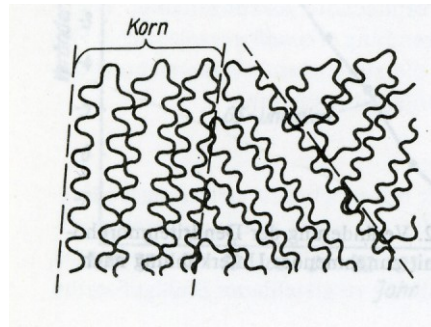


Abbildung 2-7: Bildung von Körnern [2].

Wenn der Erstarrungsvorgang abgeschlossen ist, werden aus energetischen Gründen die Korngrenzenflächen reduziert. Am Beispiel eines peritektisch erstarrenden Stahles soll dieser Vorgang erläutert werden (siehe Abbildung 2-8).

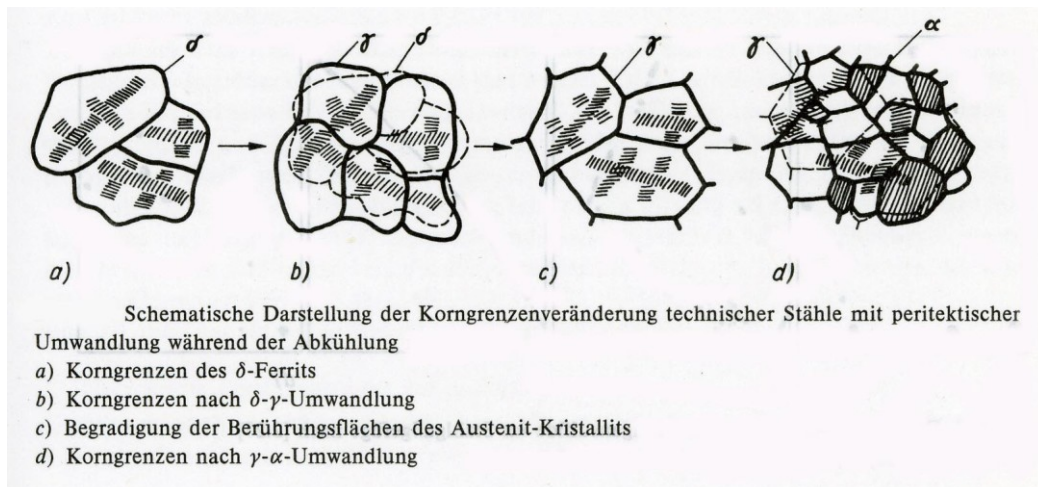


Abbildung 2-8: Korngrenzen während der Erstarrung [2].

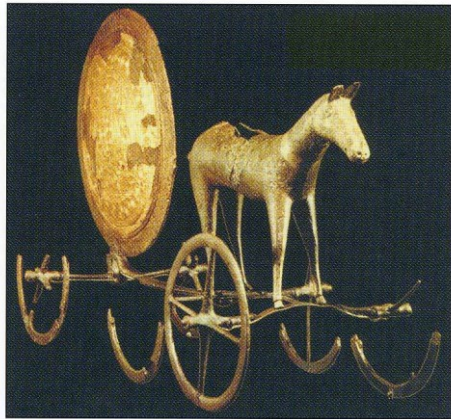
Die Erstarrung endet mit der Bildung von δ -Mischkristallen (a). Bei weiterer Abkühlung wandelt sich der δ -Ferrit in Austenit (γ) um. Am Ende dieser Umwandlung wird die Grenzfläche zwischen den Körnern begradigt, um die Oberflächenenergie zu reduzieren (b und c). Bei weiterer Abkühlung wird der Austenit in Ferrit (α) umgewandelt (d). Jede dieser Umwandlungen kann quer durch das Dendritenskelett gehen, weshalb die Dendriten im Lichtmikroskop nicht mehr zu sehen sind. Bei umwandlungsfreien austenitischen oder ferritischen Stählen hingegen können sie durch Ätzen sichtbar gemacht werden [2, 12].

2.6 Feinguss

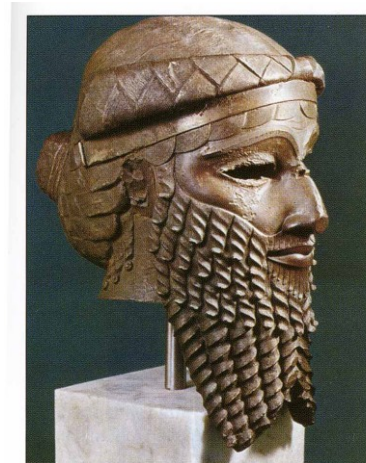
Mit Feinguss werden jene Verfahren bezeichnet, die darauf basieren, dass die Gussform mithilfe eines Modells, welches ausgeschmolzen werden kann, hergestellt wird. Das Besondere an diesem Prozess sind also die verlorenen Modelle. Diese werden meist aus Wachs hergestellt und anschließend mit einer keramischen Masse umgeben. Vor dem Abguss wird die Keramik gebrannt, das Wachsmo­dell wird bei diesem Vorgang flüssig, rinnt aus der Form und lässt somit den Hohlraum in Form des späteren Bauteils zurück. Ein großer Vorteil dieses Verfahrens ist es, dass durch diesen Prozess eine teilungsfreie Form entsteht. Dadurch können sehr maßgenaue Gussteile ohne Teilungsgrad hergestellt werden. Auch bietet das Gießen in die heiße Form die Möglichkeit, komplizierte Geometrien und geringe Wandstärken herzustellen [13].

2.6.1 Geschichtliches

Seinen Ursprung hat das Feingussverfahren in der Herstellung von Schmuck. Die ältesten Funde sind ungefähr 4000 Jahre alt. Hierfür wurden die zu gießenden Gegenstände aus Bienenwachs geformt und mit einer Lehmhülle umgeben. Anschließend wurde das Bienenwachs ausgeschmolzen, die Lehmhülle gebrannt und mit flüssigem Metall ausgefüllt. Ab 1800 vor Christus war das Verfahren auch in Mittel- und Nordeuropa bekannt. Aus der Bronzezeit gibt es etliche Funde von sowohl Gegenständen als auch Gießstellen. Mit der Zeit wurde das Feingießen nicht nur zur Herstellung von Schmuck verwendet, vielmehr begann man, auch Gebrauchsgegenstände, Musikinstrumente und Waffen zu fertigen. In der Renaissance erlebte das Verfahren eine Wiederbelebung. Viele bekannte Skulpturen aus jener Zeit wurden mittels Feinguss hergestellt. Die folgende Abbildung 2-9 zeigt 2 Beispiele für geschichtlichen Feinguss [13,14].



Kult- und Sonnenwagen von Trundholm, Bronzekunstguss nach dem Ausschmelzverfahren aus dem 11. Jahrhundert v. Chr. (Bestand: Museum Kopenhagen)



Kopf eines Mannes als Kupferplastik, Feinguss aus Mesopotamien, um 2000 v. Chr., gefunden bei Ausgrabungen am Ichtatempel (Im zweiten Golfkrieg verschollen)

Abbildung 2-9: Geschichtliche Feingussstücke [13].

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts begannen schließlich Zahnärzte, aus Modellen mit Abdrücken des Patienten, Zahnprothesen und Kronen herzustellen. Der erste großindustrielle Einsatz erfolgte schließlich ab 1940, als in den Vereinigten Staaten die Schaufeln für Abgasturbinen der Firma General Electric aus Kobaltlegierungen erzeugt wurden, die aufgrund der hohen Härte nicht mehr nachbearbeitet werden konnten. 1944 wurde die erste Feingießerei in den USA gegründet. In den 1950ern kam das Verfahren über Lizenzerteilungen auch nach Europa.

Heute ist das Feingussverfahren etabliert. Es werden sowohl Eisen- und Stahllegierungen wie auch Legierungen aus Nichteisenmetallen vergossen. Feingussteile werden vom Maschinenbau über Teile für die chemische Industrie bis hin zum Einsatz in Sportartikeln in nahezu jedem Bereich, wo metallische Werkstoffe verwendet werden, eingesetzt. Abbildung 2-10 zeigt einige mit dem Feingussverfahren hergestellte Teile [13,14].



Abbildung 2-10: Beispielteile Feinguss [15].

2.7 Das Feingussverfahren

Die Herstellung eines Bauteils im Feingussverfahren bedingt die Durchführung mehrerer Prozessschritte. Es wird für jedes Bauteil, das hergestellt wird, ein eigenes Modell benötigt. Auch kann jede keramische Form nur ein Mal verwendet werden. Abbildung 2-11 stellt die Prozessschritte vom Modell bis zum fertigen Bauteil dar.

Ein wichtiger Punkt bei der Herstellung von Bauteilen ist das Einhalten von Toleranzen. Auf diese Problematik soll deshalb besonders eingegangen werden, und die kritischsten Schritte sind auch in Abbildung 2-11 markiert.

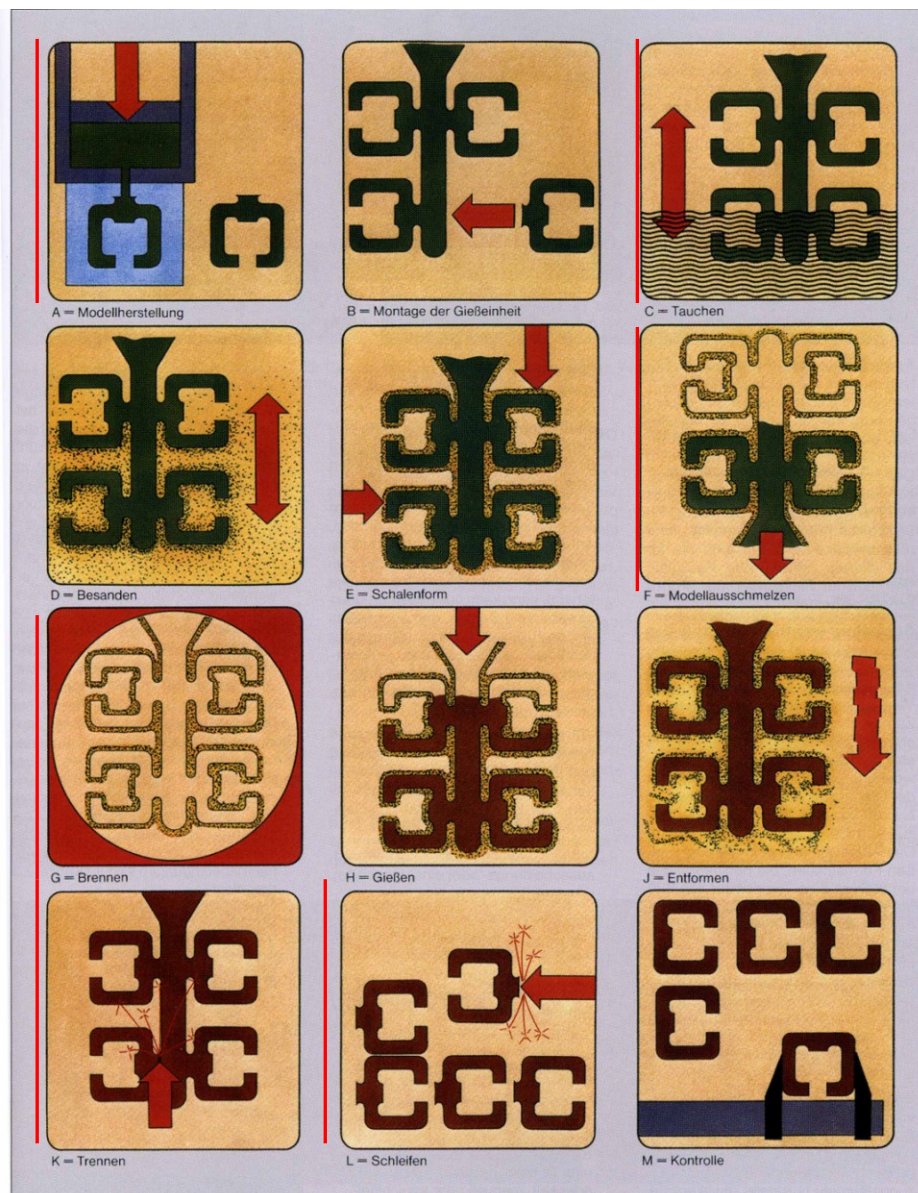


Abbildung 2-11: Das Feingussverfahren [8].

2.7.1 Modellherstellung

2.7.1.1 Konventionelle Methode

Die Werkzeuge zur Herstellung der Modelle werden auch Matrizen oder Wachsspritzformen genannt. Letzterer Ausdruck ist darauf zurückzuführen, dass die Werkzeuge den Spritzgussformen aus der Kunststoffindustrie sehr ähnlich sind. Allerdings sind die Formen beim Feingussprozess meist handbetätigt, was bedeutet, dass Schieber, Stecker oder Einlagen von Hand in das Werkzeug eingelegt werden, und auch die Entnahme der fertigen Modelle erfolgt von Hand. Dies ist darauf zurückzuführen, dass im Feinguss aus wirtschaftlichen Gründen vermehrt Kleinserien gefertigt werden. Für Teile, die in großer Stückzahl an die Automobilindustrie geliefert werden, gibt es aber durchaus Automatikwerkzeuge.

Es gibt zwei grundsätzliche Werkzeugarten: Mehrfachwerkzeuge für größere Serien, wo mehrere Modelle und Teile des Gießsystems hergestellt werden, und Einfachwerkzeuge, mit denen jeweils nur ein Modell pro Vorgang gefertigt wird.

Des Weiteren kommen verschiedene Werkstoffe für die Matrizen in Frage. Einerseits werden natürlich Formen aus Stahl eingesetzt, da diese für eine Großserienfertigung hohe Standzeiten haben. Aber auch Werkzeuge aus Aluminium werden häufig verwendet, da diese einfacher zu bearbeiten sind und ebenfalls hohe Standzeiten vorweisen können und auch durch die geringere Dichte von Aluminium leichter und somit einfacher in der Handhabung sind. Durch die hohe Wärmeleitfähigkeit von Aluminium (Rein-Alu 235 W/(m*K)) ist die Wärmeabfuhr höher als jene von Stahl (variiert je nach Legierungsgehalt, Reineisen: 80 W/(m*K), mit Legierungselementen niedriger). Dies macht sich in kurzen Taktzeiten positiv bemerkbar. Weichmetallwerkzeuge aus Sn-Bi-Legierungen werden nur noch sehr selten für Kleinserien verwendet, da heute diverse Rapid-Prototyping-Verfahren zur Anwendung kommen, die schneller und auch flexibler in Bezug auf Anpassungen sind.

Die Spritzformen unterliegen verschiedensten Anforderungen, um die Funktionalität zu erfüllen. Es wird eine hohe Oberflächengüte verlangt, und auch die Toleranzen in Bezug auf die Abmessungen sind sehr eng, da die Modelle 1:1 dem fertigen Bauteil entsprechen. Neben diesen Punkten ist es auch wichtig, dass eine gute Luftabfuhr beim Befüllen gegeben ist und die Entformung einfach vonstatten geht. Die Entformbarkeit kann durch den Einsatz von Schiebern erleichtert werden, sollten die üblichen Formschrägen zu wenig oder nicht machbar sein. Beim Großserieneinsatz können automatische Auswerfersysteme integriert werden. Des Weiteren muss, wie auch beim Druckguss, darauf geachtet werden, dass es zu

einer vollständigen Befüllung der Form kommt. Es darf zu keiner vorzeitigen Erstarrung des Wachses kommen, welche ein Befüllen von weiter vom Anschnitt entfernten, schwer erreichbaren Bereichen erschweren oder gar unmöglich macht. Um solche Probleme zu verhindern, ist es manchmal notwendig, die Matrize mittels Temperierungsflüssigkeit auf eine geeignete Temperatur zu bringen [8,16].

Für den Prototypenbau können Werkzeuge aus Silikon hergestellt werden, oder, wie im folgenden Kapitel ausführlich beschrieben, die Modelle direkt 3D gedruckt werden.

2.7.1.2 Wachsmodelle mittels 3D-Druckverfahren

Die Herstellung der Wachsmodelle, welche für diese Arbeit benötigt werden, erfolgt nach dem Voxeljet-Verfahren. Bei diesem Verfahren handelt es sich um ein 3D-Druckverfahren. Hierbei können 3D-CAD-Daten nahezu direkt hergestellt werden. Der CAD-Datensatz wird von einem Rechner in dünne Scheiben zerschnitten. Diese können anschließend nacheinander gedruckt werden, das Teil wird Scheibe für Scheibe aufgebaut.

Das Verfahren selbst läuft wie folgt ab: Es wird eine ungefähr 0,15 mm dicke Schicht eines so genannten PMMA-Pulvers auf eine Grundplatte aufgetragen. Dann werden mithilfe eines Druckkopfes, der je nach Druckermodell bis zu 10000 einzeln ansteuerbare Düsen besitzt, die vom Rechner vorgegebenen Teile mit einem Binder bedruckt. Anschließend kann die Grundplatte abgesenkt werden, und es wird die nächste Schicht des Pulvers aufgetragen. Dieser Vorgang wird so oft wiederholt, bis das gewünschte Modell aus einer Vielzahl an dünnen Schichten fertig gestellt ist. Das Modell, welches sich nun in einem Kasten mit losem, unbedrucktem Pulver befindet, kann entnommen werden und wird vor dem Reinigen mit Druckluft für einige Stunden gelagert, um ein vollständiges Abbinden des Bindemittels zu gewährleisten.

Für den Einsatz im Feinguss muss das solcherart gewonnene Modell noch mit Wachs infiltriert werden, um die benötigten Ausschmelzeigenschaften zu erzielen. Das Modell kann aber auch mit anderen Stoffen, wie zum Beispiel Epoxy-Harzen infiltriert werden, wenn andere Eigenschaften gewünscht werden.



Abbildung 2-12: Voxeljet 3D Druck [17].

Der 3D-Druckbereich, in dem gedruckt werden kann, ist je nach Drucker unterschiedlich groß. Die beiden derzeit von der Firma voxeljet technology angebotenen Modelle können ein Volumen von 190 l (850 x 450 x 500 mm) beziehungsweise 60 l (500 x 400 x 300 mm) bedrucken. Auch ist es natürlich möglich, mehrere Modelle gleichzeitig im vorhandenen Volumen zu platzieren. Die Genauigkeit der für das Feingussverfahren hergestellten Modelle liegt laut Hersteller bei der Klasse A3 nach VDG P690, der höchstmöglichen Güteklasse.

Ein großer Vorteil dieses Druckverfahrens ist die Tatsache, dass keine Werkzeuge für die Prototypenherstellung benötigt werden. Deshalb können mehrere unterschiedliche Geometrien gefertigt werden, ohne dass es zu Mehrkosten kommt. Auch entfällt die Zeitspanne, die zur Fertigung der benötigten Werkzeuge notwendig ist. Im Prototypenbau werden oftmals zerspanend hergestellte Teile verwendet, doch können viele Formen nicht solcherart hergestellt werden, sehr wohl aber mit stereolithographischem Druck. Selbst bei der Herstellung von Kleinserien kann es kostengünstiger sein, ausschließlich gedruckte Modelle zu verwenden [17,18].

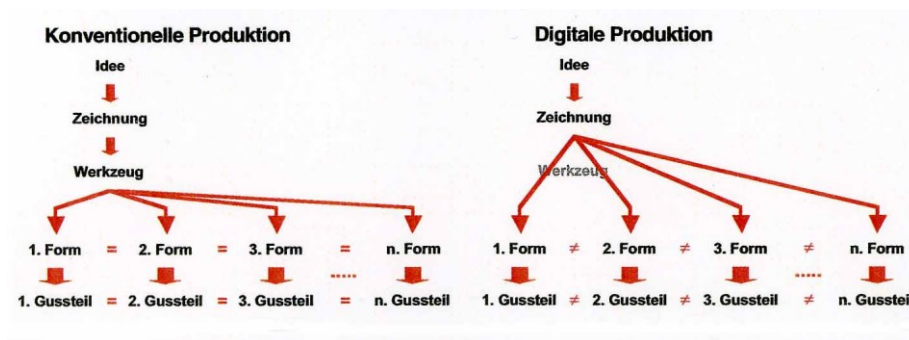


Abbildung 2-13: Vorteil des Druckverfahrens [18].

2.7.1.3 Wachse

Generell betrachtet sind Wachse eine organische Verbindung von Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff. Sie sind Ester, die aus fetthältigen Säuren und Alkoholen gebildet werden. Beispiele aus der Natur wären Carnaubawachs, welches die Blätter der Carnaubapalme bedeckt, oder Bienenwachs. Die ersten bekannten „Feingussteile“ wurden ja, wie bereits im Kapitel 2.6.1 erwähnt, 4000 v. Chr. mit Hilfe von Bienenwachs erzeugt. Im Laufe der Zeit wurden die Eigenschaften von Bienenwachs durch Zugabe von Harzen (härter) oder Butter (weicher) verbessert. Heute werden verschiedenste Zusätze verwendet, um für jeden Anwendungsfall geeignete Eigenschaften zu erzielen. Dabei kann eine Einteilung in drei grobe Klassen vorgenommen werden:

- natürliche Ester-Wachse
- natürliche Kohlenwasserstoff-Wachse
- synthetische Wachse

Natürliche Ester-Wachse werden nur in sehr geringen Mengen benutzt, um die Eigenschaften anderer Wachse zu beeinflussen. Sie sind teuer und haben einen relativ hohen Aschegehalt, der bei der Verbrennung in der Form zurückbleibt. Ihr hoher Schmelzpunkt und die damit verbundene hohe Härte sind der Hauptgrund für ihre Verwendung in Wachsmischungen. Außerdem haben Ester-Wachse eine geringe Wärmeausdehnung, die bei der Erstarrung mit geringer Schrumpfung einhergeht.

Natürliche Kohlenwasserstoff-Wachse haben Rohöl als Basis und werden ihrerseits wieder in drei Gruppen unterteilt:

- Paraffinwachse
- intermediäre Wachse
- mikrokristalline Wachse

Paraffinwachse werden über eine Vakuumdestillation gewonnen. Sie sind günstig, haben einen sehr eng definierten Schmelzpunkt ($\pm 1,5^\circ\text{C}$), der meist zwischen 52 bis 68 °C liegt, und besitzen im festen Zustand eine grobe Kristallstruktur. Ihr Nachteil ist eine hohe Schrumpfung beim Erstarren und Sprödigkeit. *Intermediäre Wachse* könnten auch halb-mikrokristalline Wachse genannt werden. Auch sie werden über Vakuumdestillation erzeugt. Sie sind undurchsichtig, hart und haben eine feinere Kristallstruktur als Paraffinwachse, sind also nicht so spröde. Die *mikrokristallinen Wachse* schließlich werden aus den Rückständen der Schmierölherstellung destilliert. Auch dieses Wachs ist undurchsichtig und hat eine sehr feine Kristallstruktur.

Synthetische Wachse sind Derivate von entweder Ester- oder Kohlenwasserstoffwachsen. Somit können die gewünschten Eigenschaften eingestellt werden.

Um ein Wachs an spezielle Anforderungen anzupassen, können auch Additive, welche keine Wachs-Basis haben, zum Einsatz kommen. Polymere werden zugegeben, um sowohl Festigkeits- als auch Zähigkeitseigenschaften zu verbessern. Ihre Viskosität ist allerdings problematisch, weshalb nur ein geringer Anteil verwendet werden kann. Dafür verringern Polymere die Schrumpfung. Diese stellt bei der Erstarrung von Wachsen ein Problem dar, da die Modelle im festen Zustand besandet werden. Beim Ausschmelzen wird das Wachs dann wieder flüssig und dehnt sich aus. Diese Ausdehnung kann zu Formbrüchen führen und ist deshalb unbedingt so niedrig wie möglich zu halten. Auch Harze, synthetisch wie natürlich, verringern die Schrumpfung, da sie nur eine geringe Volumsänderung aufweisen. Füller sind im Gegensatz zu Polymeren und Harzen immer fest, weshalb sie die Schrumpfung ebenfalls reduzieren. Sie sollen möglichst aschefrei verbrennen und dürfen nicht mit dem Wachs oder der keramischen Schale reagieren. Ein solcher Füller wäre beispielsweise Polystyrol, aber auch Wasser oder Isophthalsäure [19,20].

Die folgende Abbildung 2-14 zeigt die temperaturabhängige Ausdehnung von Paraffin- und mikrokristallinem Wachs. Hierbei ist auffällig, dass die Ausdehnung von mikrokristallinem Wachs linearer verläuft als jene von Paraffinwachs. Auch ist generell die prozentmäßig hohe Ausdehnung bemerkenswert, da über 20% angegeben werden. Da die Modelle bei Raumtemperatur über eine hohe Maßgenauigkeit verfügen müssen, ist hier die Berechnung der Schrumpfung elementar, um die Toleranzen am fertigen Bauteil einhalten zu können.

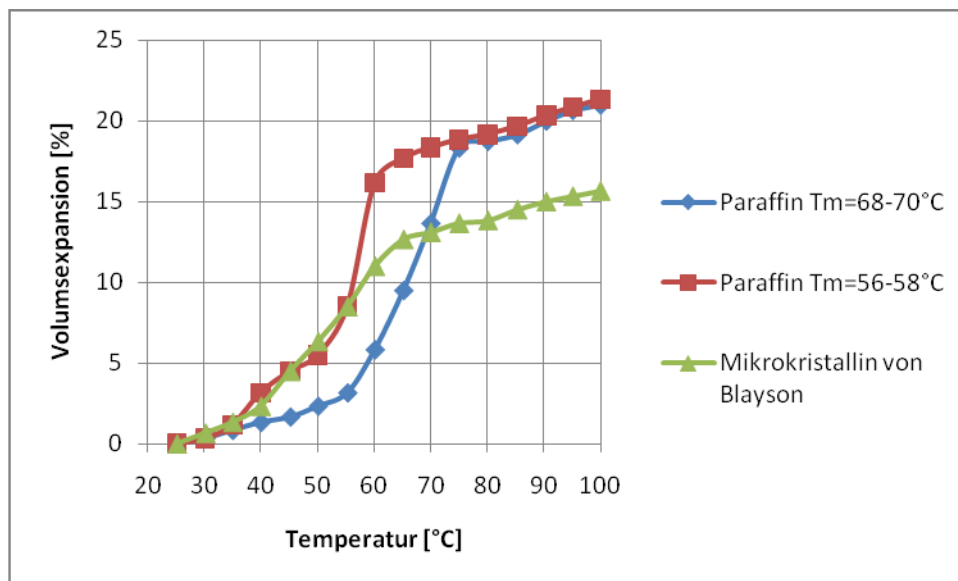


Abbildung 2-14: Temperaturabhängige Ausdehnung von Wachsen nach [21].

Eine weitere Abbildung (Abbildung 2-15) soll den Vorteil illustrieren, der durch die Verwendung von Füllern entsteht. Die thermische Ausdehnung von Wachs kann dadurch drastisch reduziert werden. Auch die nachfolgende Patentrecherche förderte zu Tage, dass die Wachse selbst kaum noch weiterentwickelt werden. Sämtliche Erfindungen drehen sich um verschiedenste Füllermaterialien und deren Vor- und Nachteile.

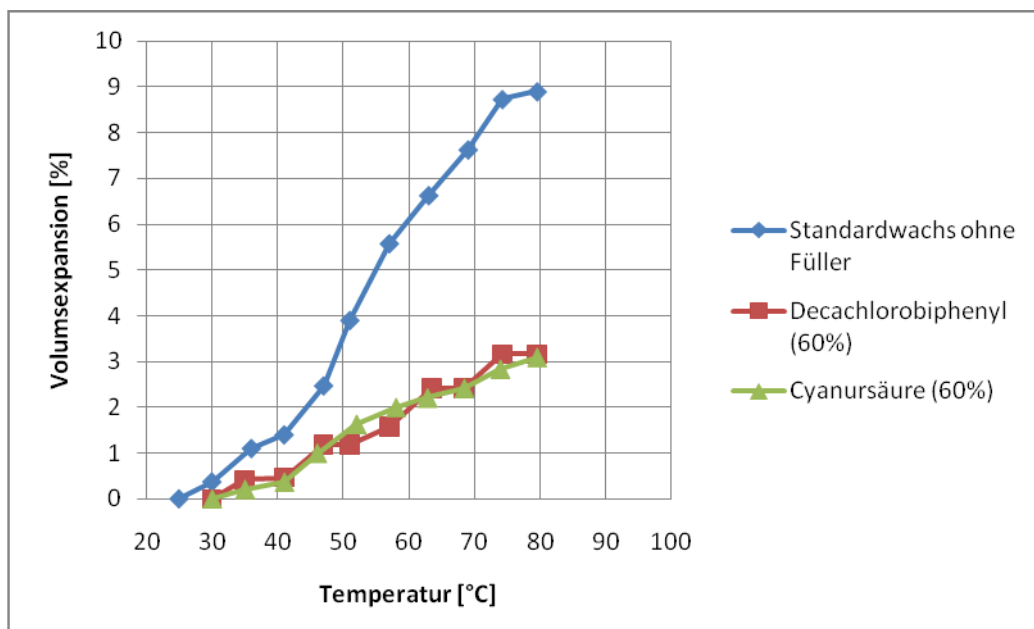


Abbildung 2-15: Einfluss Füller nach [22].

2.7.1.4 Patentrecherche Wachse

Da die vorhandene Literatur auf diesem Gebiet schon relativ alt ist, wurde eine Patentrecherche auf diesem Gebiet durchgeführt. Diese Recherche fördert zu Tage, dass die meisten Entwicklungen jüngeren Datums weniger die Wachse selbst betreffen als vielmehr die Füller, mit denen, wie bereits erwähnt, teures Wachs billig substituiert werden kann und auch die Eigenschaften verbessert werden.

Das Patent US 3655414 aus dem Jahr 1972 schützt die Möglichkeit, bis zu 75 gew.% des Wachses durch die bereits genannte Isophthalsäure zu ersetzen, welche laut Erfinder die beste Variante aller Säuren aus der Phthalsäurefamilie ist. Das Patent GB 2366232 aus dem Jahr 2002 schützt dem Erfinder Polyethylenterephthalat als Füllmaterial, und es erwähnt auch die Nachteile von Säuren wie der Isophthalsäure. Diese neigen dazu, mit dem Feuerfestmaterial zu reagieren, was die Oberflächenqualität und die Maßgenauigkeit der fertigen Bauteile negativ beeinflussen kann. Positiv bei Säuren ist hingegen, dass sie über eine sehr gute Wärmeleitfähigkeit verfügen und somit sowohl das Abkühlen als auch das Ausschmelzen beschleunigen. Verwendet man hingegen Polystyren, oder simpel Styroporkügelchen als Füller, so kann es beim Ausbrennen zu tropfenförmigen Rückständen, die in der Form haften bleiben, kommen. Polyethylenterephthalat, oder kurz PET, also das Material, aus dem auch Einwegflaschen hergestellt werden, reagiert nicht mit dem Feuerfestmaterial, führt zu keinen Formbrüchen und hat darüber hinaus noch gute Wärmeleiteigenschaften. Bereits 1979 wird Hexamethylentetramin, kurz HMTA, in dem Patent US 4144075 geschützt. Dies soll laut Erfinder nicht mit dem Feuerfestmaterial reagieren und darüber hinaus über eine sehr geringe Dichte verfügen. Dadurch bleibt dieser Füller leicht in Lösung. Zellulosisches Azetatharzpulver aus sehr feinen Partikeln eignet sich laut Patent US 5518537 aus dem Jahr 1996 ebenfalls hervorragend als Füllmaterial für Wachse. Das Patent WO 0110582 von 2001 schlägt polymerische, organische Carbonate als Füller vor. Einen anderen Weg, Wachs zu ersetzen, wählte man in Japan bereits im Jahr 1974. Ihre Idee, hohle Kohlenstoffkügelchen in das Wachs zu mischen und dadurch zwischen 20 und 60 Volumsprozent Wachs einzusparen, ließen sie unter anderem mit dem Patent GB 1378526 schützen. Das Patent EP 0499486 aus dem Jahr 1992 wählt einen ähnlichen Weg, doch mit einigen Verbesserungen. Es ist möglich Mikrokugeln, welche mit Isobutangas gefüllt sind, dem Wachs beizumengen. Wird das Wachs beim Ausbrennen auf über 154 °C erwärmt, entweicht das Gas und die Kugeln kollabieren. Dadurch wird jedwede Ausdehnung des Wachses beim Schmelzen ausgeglichen. Die Kugeln selbst bestehen aus einem Copolymer aus Vinylidenchlorid und Acrylnitril.

2.7.2 Zusammenfügen der Gießereinheit

Wann immer möglich werden Modelle aus einem Stück und eventuell bereits mit Anschnitt in der Matrize gefertigt. Große oder sehr komplexe Formen müssen aus mehreren Wachsteilen zusammengesetzt werden. Die fertigen Modelle werden in diesem Schritt zu so genannten Gusstrauben zusammengebaut. Dabei werden die Modelle mit einem Gießsystem verbunden. Hier ist darauf zu achten, dass die entstehende Einheit sowohl gießgerecht als auch wirtschaftlich sinnvoll ausgeführt wird. Hierzu gehören eine sorgfältige Planung und Erfahrung, denn von der Gestaltung der Gießereinheit hängen viele essentielle Punkte sowohl der Weiterverarbeitung als auch der Bauteileigenschaften ab.

Der Zusammenbau der Gießereinheit soll möglichst einfach sein, doch entscheidet die Anzahl der in einem Schritt gefertigten Bauteile über das Verhältnis von verkauftem Metall zu benötigtem Metall für die Gießereinheit. Viele Bauteile auf einmal abzugießen erhöht die Wirtschaftlichkeit, doch muss die Gusstraube auch einfach getaucht werden können, beim Ausschmelzen das Wachs leicht abrinnen können, beim Abgießen dünne Bereiche ausgefüllt werden und beim Erstarren eine Speisung möglich sein. Auch soll das Abtrennen der fertigen Bauteile vom Gießsystem möglichst einfach sein. Kurzum, es müssen Wirtschaftlichkeit, Verarbeitbarkeit und metallurgische Notwendigkeiten optimal aufeinander abgestimmt werden.

Das Zusammenbauen erfolgt über ein kurzes Erhitzen des Wachses mit einer beheizten Spachtel oder einer Gasflamme. Dabei schmilzt nur ein kleiner Bereich an der Oberfläche auf, der anschließend so lange an die richtige Position gehalten wird, bis das Wachs wieder erstarrt ist und das Bauteil auf diesem Weg mit der Gießereinheit verklebt wird. Da diese Arbeit meist von Hand verrichtet wird, ist hier große Sorgfalt notwendig, um einerseits eine durchgehende Verbindung zu erhalten und andererseits die Modelle nicht zu beschädigen. Sollte bei diesem Schritt ein Spalt im Wachs zurückbleiben, so kann beim folgenden Herstellen der Gießform Feuerfestmaterial in das Modell eindringen, welches beim Abgießen Einschlüsse bildet.

Bevor die fertige Gießereinheit, wie im nächsten Kapitel beschrieben, mit der keramischen Masse umgeben werden kann, muss sie gereinigt werden. Trennmittel sind notwendig, welche ein Entnehmen der Modelle aus der Matrize erleichtern, lose Wachsteile und Staub müssen entfernt werden. Dafür kann Wasser mit Benetzungsmittel, Lösungsmittel, welches das Wachs nicht angreift oder Lösungsmittel, welches das Wachs leicht und kontrollierbar angreift, verwendet werden. Ein leichtes Anätzen der Oberfläche kann die Benetzbarkeit der Oberfläche erhöhen, ohne die Gussteiloberfläche zu beeinträchtigen [8,19,22].

2.7.3 Herstellung der Gießform

Auf die Gießeinheit wird die keramische Masse in einem mehrstufigen Verfahren aufgebracht. Sie wird in einen Formstoffschlicker eingetaucht und anschließend besandet. Dann wird die solcherart entstandene Schicht getrocknet. Dieser Vorgang wird so oft wiederholt, bis eine ausreichend dicke Schale gegeben ist. Der Schlicker besteht aus sehr feinem Material, da die erste Schicht desselben die Gussstückoberfläche bestimmt. Die Stärke einer solchen Schlickerschicht beträgt ungefähr 0,5 bis 1 mm.

Sofort nach dem Tauchen erfolgt das Besanden mit einem etwas gröberen Material. Dies hat mehrere Gründe. Erstens sorgt das gröbere Material dafür, dass der feine Schlicker nicht verrinnen kann, zweitens haftet die nächste Schlickerschicht besser, da die Oberfläche rauer ist, und drittens kommt es zu einem schnelleren Zuwachs an Dicke, wodurch weniger Schritte notwendig sind, die erforderlichen 3 bis 5 mm Schichtdicke zu erhalten. Das Besanden erfolgt in einem Fließbett oder der Sand wird von oben auf das Modell gestreut. Nach dem Besanden wird die Schicht in klimatisierten Räumen getrocknet, bevor der nächste Tauchvorgang stattfindet.

Der Schlicker und auch das Besandungsmaterial sind meist Quarz, Zirkon- oder Aluminiumsilikate, seltener reine Tonerde, reines Zirkon- oder Yttriumoxid. Quarz ist das mit Abstand billigste der genannten Materialien und wird deshalb auch häufig verwendet. Ein Nachteil ist der Quarzsprung bei 573 °C, der zu einer Volumenzunahme führt. Besser ist das bereits als Glas vorliegende Quarzglas, welches nur noch eine geringe Wärmeausdehnung hat. Zirkon kommt fast ausschließlich im Schlicker zur Anwendung, da sein natürliches Vorkommen bereits sehr kleine Korngrößen hat. Er wird oft in Verbindung mit Quarzglas oder Aluminiumsilikaten verwendet. Aluminiumsilikate bestehen aus einem von 42 bis 73 % reichenden Prozentsatz Mullit ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), der Rest ist jeweils Quarzglas. Reine Tonerde wird nur bei Legierungen mit einem sehr hohen Schmelzpunkt, beispielsweise Ni-Basislegierungen, angewendet. Auch Yttriumoxid kommt selten zum Einsatz, es wird bei reaktiven Legierungen eingesetzt. Die folgende Abbildung 2-16 zeigt die thermische Ausdehnung der genannten Besandungsmaterialien.

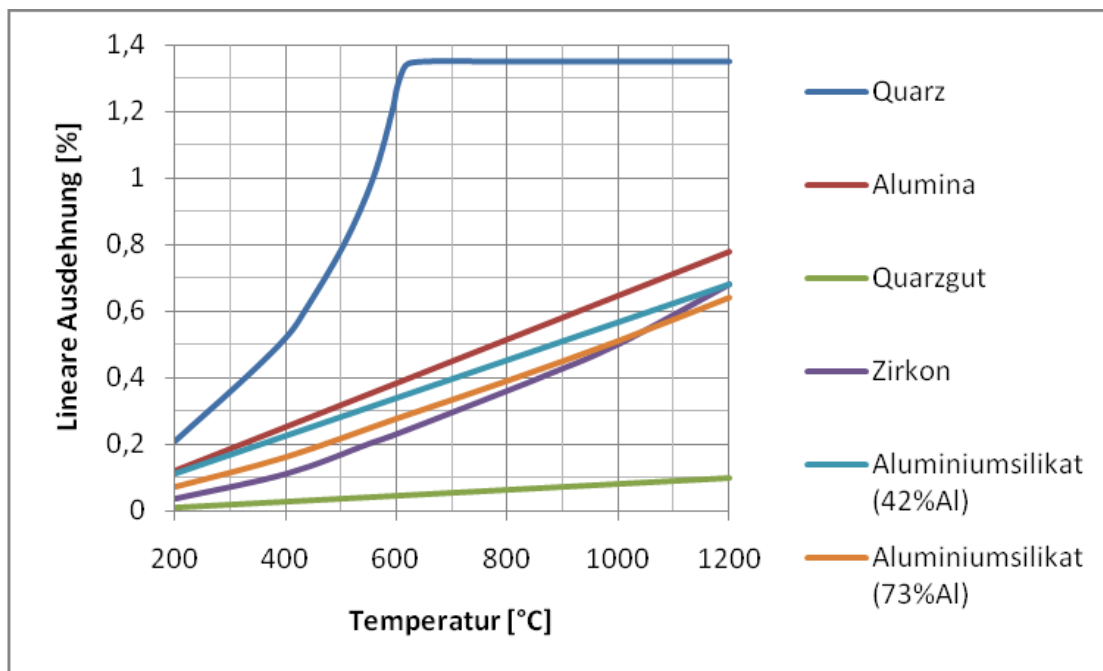
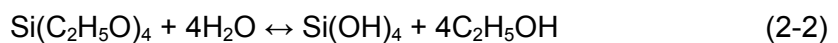


Abbildung 2-16: Thermische Ausdehnung Besandungsmaterial nach [22].

Als Bindemittel im Schlicker wird meist kolloidale Kieselsäure, Kieselzol, verwendet. Ausgeliefert mit ein solcher Binder mit einem Anteil von 30 % SiO_2 mit einer Korngröße von 7 bis 12 nm. Mit der Zugabe von Natrium bildet sich ein Gel, welches über exzellente Bindeeigenschaften verfügt. Der einzige Nachteil ist die relativ lange Trocknungszeit. Ein weiteres Bindemittel ist Äthylsilikat. Dieses Bindemittel trocknet schneller, da Alkohol schneller verdunstet als Wasser. Die chemischen Reaktionen, die wiederum zu einem Gel führen, lauten vereinfacht:



Selten zum Einsatz kommen ein Hybridbinder, der die Vorteile der beiden eben genannten Möglichkeiten verbindet, und flüssiges Natriumsilikat. Dieses verfügt über schlechte Feuerfesteeigenschaften und nur geringe Beständigkeit gegen Dampf, welche beim Ausschmelzen im Dampfautoklaven benötigt wird.

Dem Schlicker werden auch noch Tenside beigemischt, die die Benetzung der eingetauchten Wachsmodele verbessern sollen. Diese sind anionisch oder nichtionisch, beispielsweise Sulfonate, Sulfate oder Ethoxylate. Auch Inhaltsstoffe, die eine Schaumbildung und somit ungleichmäßigen Auftrag verhindern sollen, kommen dazu. Dies sind wässrige Silikonemulsionen oder fettige Alkohole wie 2-Ethyl-Hexylalkohol.

Ein Schlicker besteht aus 5 bis 10 % festem Binder, 15 bis 30 % Flüssigkeit (vom Binder oder zugegeben) und 60 bis 80 % feuerfestes Pulver, welches aus den oben genannten Materialien zusammengesetzt ist. Die Zusätze haben einen Gesamtanteil von weniger als einem Prozent, die Menge der Tenside reicht von 0,03 bis 0,3 %, die der Schaumbildungshemmer nur von 0,002 bis 0,1 % [8,22,23].

Die Verwendung von Kernen ist auch im Feinguss möglich, um Hohlräume an Stellen zu erhalten, an denen ein Besanden von außen nicht durchführbar ist. Die Kerne werden in den allermeisten Fällen aus Quarzglas hergestellt, auch die Binder sind dieselben wie in diesem Kapitel beschrieben. Das Quarzglas wird zusammen mit dem Binder in eine Stahlform gepresst. Anschließend erfolgt eine zweistufige Wärmebehandlung. Im ersten Schritt werden nur die organischen Anteile entfernt, im zweiten Schritt wird der Kern gesintert [19,22].

2.7.4 Ausschmelzen und Brennen

Nach dem letzten Trocknungsvorgang, der mehrere Stunden (16 bis 48) dauert und selten von Vakuum unterstützt wird oder bei niedriger Luftfeuchtigkeit durchgeführt wird, um maximale Grünfestigkeit zu erreichen, muss das Wachs aus der Form entfernt werden, um den Formhohlraum freizugeben. Dieser Schritt ist ein sehr kritischer Abschnitt im Feingussverfahren. Ruft man sich Abbildung 2-14, Abbildung 2-15 und Abbildung 2-16 in Erinnerung, so ist zu sehen, dass die thermischen Ausdehnungen von Wachs und der umgebenden keramischen Masse extreme Unterschiede aufweisen. Während sich Wachs selbst bei hohem Fülleranteil noch um 3 % ausdehnen, liegt die Expansion der Feuerfestmaterialien unter einem Prozent. Erhitzt man die Form langsam und gleichmäßig, wird es mit großer Wahrscheinlichkeit zu Rissen kommen, da das sich ausdehnende Wachs die ungebrannte, nur grünfesteste Form sprengen wird. Die einzige Möglichkeit, dies zu umgehen, ist ein extrem schnelles Aufheizen von außen nach innen, sodass die Außenbereiche des Wachses schon aus der Form rinnen, während das Wachs im Zentrum noch fest ist, um so den Platz für die Ausdehnung zu schaffen. Zwei Methoden haben sich für das schnelle Aufheizen durchgesetzt: der Dampfautoklav und der Flash Dewaxer.

Die meistverwendete Methode ist der Dampfautoklav. Hier werden die Grünformen mit dem Wachs in einen Druckkessel gegeben, wo mit übersättigtem Dampf ein Druck von 5,5 bis 6,2 bar innerhalb von nur 4 bis 7 Sekunden erreicht wird. Die gesamte Form kann so in 15 Minuten oder schneller ausgeschmolzen werden.

Beim flash dewaxing wird die Form in einen Ofen mit 870 bis 1095°C gegeben. Bei dieser Temperatur beginnt ein Teil des Waxes zu brennen, und die Möglichkeit, dass die Form beschädigt wird, ist etwas höher als jene beim Dampfautoklaven.

Das solcherart ausgeschmolzene Wachs kann aufbereitet und wieder verwendet werden. Anschließend wird die Form bei einer Temperatur um 1000°C gebrannt, um die benötigte Festigkeit der Form zu erreichen. Dabei verbrennt auch das beim Ausschmelzen in der Form verbliebene restliche Wachs. Für diesen Vorgang werden in der Regel gasbeheizte Öfen verwendet. Nach dem Brennen werden die abgekühlten Formen inspiziert, um etwaige Risse zu entdecken. Diese Risse können mit keramischer Masse oder speziellen Zementen repariert werden, sodass der Abguss trotz Rissen durchgeführt werden kann [8,19,22].

2.7.5 Gießen

Die für das Erschmelzen der zu vergießenden Legierung benötigten Aggregate sind in Kapitel 2.4 beschrieben. Vor dem Abgießen werden die Formen vorgeheizt, um eine vollständige Formfüllung zu gewährleisten. Auch gilt es zu berücksichtigen, dass Quarz bei etwa 580°C eine Kristallumwandlung erfährt, die zu einer Volumsänderung und damit zu Formrissen führt. Aus diesem Grund liegt die Vorwärmtemperatur der Form je nach verwendeter Legierung zwischen 600 und 900°C, aber keinesfalls darunter. Damit die Form auf dem Weg vom Ofen zur Gießstelle nicht zu sehr abkühlt, kann sie vor dem Vorheizen mit einer Decke aus Keramikfaser umwickelt werden. Beim Gießen kommt es hauptsächlich darauf an, über eine saubere Schmelzuführung zu verfügen und die Gießtemperatur genau einzuhalten. Auch muss die Zusammensetzung der Schmelze kontrolliert werden. Dies erfolgt meist durch das Ziehen oder Abgießen einer Probe, welche mithilfe eines Funkenspektrometers schnell überprüft werden kann.

Die häufigste Abgussmethode ist der Schwerkraftguss, der in seltenen Fällen auch unter Vakuum durchgeführt wird. Eine weitere Methode ist der Schleuderguss. Hierbei wird in eine rotierende Form gegossen. Dieses Verfahren ermöglicht ein Abgießen von sehr dünnen Sektionen, und es wird beispielsweise in der Schmuckerzeugung und Zahntechnik angewandt. Das Counter-gravity Casting funktioniert ähnlich dem Niederdruckguss und kann sowohl an der Atmosphäre als auch im Vakuum durchgeführt werden. Die Schmelze wird bei diesem Verfahren jeweils über ein Vakuum in die Form gesaugt. Die folgende Abbildung 2-17 soll dies veranschaulichen.

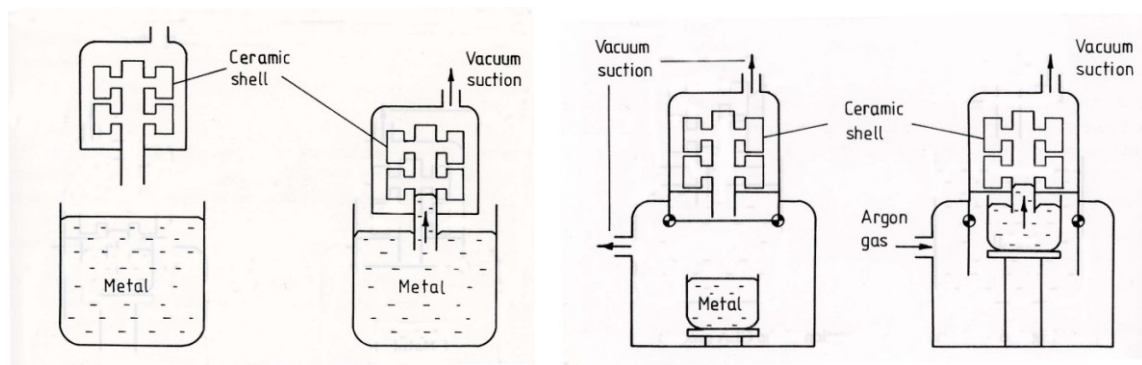


Abbildung 2-17: Counter-gravity casting [19].

Bei diesem Verfahren kommt die keramische Form in einen dicht verschlossenen Behälter, die Schmelze wird durch das Anlegen eines Vakuums nach oben in die Form gesaugt (linkes Bild). Bei dem am rechten Bild gezeigten Verfahren können auch solche Legierungen im Feinguss vergossen werden, deren Erschmelzung unter Vakuum erfolgen muss, wie beispielsweise Superlegierungen mit Anteilen an Zirkon, Titan oder Hafnium. [8,19,22].

2.7.6 Entformen

Nach dem Abgießen werden die Teile von der Formkeramik befreit, sobald sie formfest sind. Dazu werden Drucklufthammer oder Druckwasser mit bis zu 70 bar [19] verwendet. Bei schlagempfindlichen oder verzugsgefährdeten Teilen können auch chemische Bäder zur Entfernung der Keramik benutzt werden. Auch wenn Kerne verwendet werden, muss meist auf Bäder zurückgegriffen werden, um die Bauteile an unzugänglichen Stellen zu reinigen. Diese Bäder können zum Beispiel aus auf 500°C erhitzte Natronlauge oder Kaliumhydroxid sein [8,19,22].

2.7.7 Trennen und Schleifen

Wenn die Keramik entfernt ist, werden die Bauteile von der Gusstraube getrennt. Dafür werden meist Bandsägen oder Trennscheiben verwendet. Im Anschluss an den Trennvorgang kann ein Strahlvorgang durchgeführt werden, wenn noch Reste der Keramik am Bauteil anhaften. Je nach vergossenem Material können dafür Stahlkies, Korund oder Glasperlen zum Einsatz kommen. Danach müssen noch Reste des Angusses beseitigt werden, was meist durch Schleifen oder auch durch spanende Bearbeitung geschieht. Sollte der Abnehmer die Teile ohnehin nachbearbeiten, kann dieser Schritt auch entfallen [8,19,22].

2.7.8 Prüfung und Kontrolle

Die Modelle sowie die fertigen Bauteile müssen während des gesamten Prozesses kontrolliert werden. Doch auch die Einsatzstoffe, Eigenschaften der keramischen Masse wie Ausdehnungsverhalten und Gasdurchlässigkeit sowie Feingusswerkstoffe unterliegen einer ständigen Qualitätskontrolle, die zeigen soll, ob die geforderten Parameter erfüllt werden.

Am fertigen Gussteil wird als Erstes natürlich eine visuelle Prüfung vorgenommen, da eine unvollständige Formfüllung, größere Risse und Ähnliches sofort festgestellt werden können. Sollte das Bauteil keine offensichtlichen Fehler haben, kommt es zur Maßkontrolle und zur zerstörungsfreien Prüfung, je nach Vereinbarung zwischen Produzent und Abnehmer [8].

2.7.8.1 Kontrolle der Toleranzen

Hierbei wird überprüft, ob das erzeugte Bauteil mit der vom Kunden gewünschten Zeichnung übereinstimmt und ob die vereinbarten Toleranzen eingehalten werden. Bei Gussteilen muss zudem eine Überprüfung von Form- und Lagetoleranzen stattfinden. Dazu werden vom Kunden Bezugsebenen und Bezugspunkte definiert. Die Überprüfung kann mithilfe von Messlehren oder Koordinatenmessmaschinen vorstatten gehen. Die folgende Abbildung 2-18 zeigt ein Beispiel für eine solche Messmaschine.



Abbildung 2-18: Koordinatenmessmaschine [24].

In der Serienfertigung wird meist nicht jede einzelne Abmessung jedes Teiles kontrolliert, sondern je nach Vereinbarung. Nur Vorserienteile werden üblicherweise komplett vermessen [8].

2.7.8.2 Zerstörungsfreie Prüfung

Genau genommen ist bereits die visuelle Kontrolle zur Gruppe der zerstörungsfreien Prüfungen zu zählen. Hier kommt es zu einer Beurteilung, ob Oberflächenfehler wie Poren, Schlackenstellen, Kaltschweißen, Schülpen, Keramikreste, Unebenheiten und Grate noch den Vorgaben entsprechen oder das Teil Ausschuss ist. Dafür können Oberflächenvergleichsmuster verwendet werden [8].

Eine genauere Oberflächenprüfung ist mithilfe der Magnetpulverprüfung oder der Farbeindringprüfung möglich. Die Magnetpulverprüfung kann, wie der Name bereits vermuten lässt, nur an ferromagnetischen Stahlsorten vorgenommen werden. Dabei wird das zu prüfende Teil magnetisiert und ein Prüfmittel trocken oder nass aufgebracht. Für diese Prüfung muss das Bauteil bereits sauber sein und eine gewisse Oberflächeneigenschaft besitzen, um Fehler korrekt anzuzeigen. Sämtliche Bestimmungen hierzu sind in EN ISO 9934 Teil 1 bis 3 genau vorgegeben.

Die Farbeindringprüfung arbeitet meist mit fluoreszierenden Prüfmitteln, die auf das Bauteil aufgebracht werden. Mithilfe eines sogenannten Entwicklers kommt es zur Anzeige von Fehlern, da das Prüfmittel in Risse und andere Oberflächenfehler eindringen kann. Dieses Verfahren funktioniert bei allen Stahlsorten und ist in DIN EN 1371 Teil 1 und 2 geregelt.

Zur Überprüfung von Fehlern unterhalb der Oberfläche wird eine sogenannte Volumenprüfung durchgeführt. Hierbei kommen die Ultraschall- und die Durchstrahlungsprüfung zum Einsatz. Neuerdings wird die Computertomographie vermehrt angewendet [8].

Bei der *Ultraschallprüfung* kommen zwei verschiedene Prüfköpfe zum Einsatz, um alle gusstypischen Fehler zu detektieren. Mithilfe eines Normalprüfkopfes können solche mit Volumenausdehnung gefunden werden und mit einem Winkelprüfkopf rissartige Fehler. Die Norm DIN EN 12680 gibt die Regeln für die Ultraschallprüfung an.

Die *Durchstrahlungsprüfung* für das Gießereiwesen ist in der EN 12681 geregelt. Als Vergleichsbilder werden allerdings ASTM-Bildreihen verwendet. Die europäische Norm regelt sämtliche sicherheitstechnischen Aspekte, Aufnahmeanordnungen und Techniken zur Erhöhung des Objekumfangs.

Die *Computertomographie* ist das neueste Verfahren, welches bislang hauptsächlich in der Medizin angewendet wurde. Mit dieser Technologie können dreidimensionale Bilder von Bauteilen erstellt werden, die sehr präzise Fehler anzeigen können. Dadurch kann man komplexe Innen- und Außenkonturen überprüfen. Es muss allerdings angemerkt werden,

dass dieses Verfahren aufgrund der relativ langen Taktzeiten nicht in der Großserienfertigung eingesetzt werden kann.

2.7.9 Auftreten von Toleranzproblemen

Nach der genauen Verfahrensbeschreibung soll noch einmal auf die für die Einhaltung von Toleranzen wichtigen Verfahrensschritte eingegangen werden. Bereits der erste Schritt, die Modellherstellung, ist hierfür problematisch. Durch die hohe thermische Ausdehnung von Wachs muss beim Herstellen der Modelle darauf geachtet werden, dass es bei der Erstarrung dieser zu einer großen Schwindung kommen kann. Das Zusammenfügen der Gießeinheit erfolgt meist händisch unter der Verwendung einer heißen Spachtel oder ähnlichem. Bei diesem Schritt muss einerseits jede Klebestelle sorgfältig versiegelt werden, aber auch hier werden die Wachsmodele ein weiteres Mal erhitzt und können sich verformen. Beim Tauchen in das Schlickerbad und dem darauffolgenden Besanden ist eine gleichmäßige Benetzung der Oberfläche essentiell. Auch darf hier in der ersten Schicht kein zu grobes Material verwendet werden, da dies unweigerlich eine zu raue Oberfläche zur Folge hat.

Das nachfolgende Ausschmelzen ist, wie bereits erwähnt, ein sehr kritischer Schritt. Durch die Ausdehnung des Wachses kann die Form Sprünge bekommen. Das bedeutet, dass die nur grünfeste Form, auch wenn sie nicht springt, unter erheblichen Belastungen verformt werden kann und sich selbst etwas thermisch ausdehnt. Beim Brennen der Form dehnt sich die Form ein weiteres Mal aus und beim Vorheizen vor dem Abguss noch einmal.

Das Erstarren stellt ein weiteres Problem dar. Die Schrumpfung des Metalls wird zwar bei der Modellherstellung berücksichtigt, doch spielt die Gestalt des Bauteils und der Anschnitte eine wichtige Rolle. Durch mehrere Anschnitte, Hinterschneidungen, Vorsprünge oder Bohrungen kann die Schrumpfung behindert oder ganz unterbunden werden. Dies hat zur Folge, dass die Maßänderungen nicht in allen Richtungen gleich groß ausfallen. Besonders bei runden Formen kommt es hierdurch oftmals zu einer Ovalisation des fertigen Bauteils.

Abschließend ist beim Trennen der Bauteile vom Gießsystem darauf zu achten, dass dieser meist händisch durchgeführte Prozessschritt sorgfältig ausgeführt wird und weder Teile des Anschnitts am Bauteil verbleiben noch ein Teil des Werkstücks weggeschliffen wird [19,22,25].

2.8 Gussfehler

Dieses Kapitel befasst sich näher mit den möglichen Fehlern, welche bei (Fein-) Gussteilen zu erwarten sind. Wie vielfältig die Fehlerquellen sein können, die zu einem unerwünschten Ergebnis führen, soll dieses Kapitel aufzeigen. Grundsätzlich können diese in drei große Bereiche eingeteilt werden: Fehler bei der Modellherstellung, der Formherstellung und in der Metallurgie.

Als Erstes werden die Fehler, welche bei der Modellherstellung vorkommen können, behandelt. Da auch die Wachsmodele, wie bereits in Kapitel 2.7.1 ausführlich erklärt, für jedes Feingussbauteil extra hergestellt werden, ist es wichtig, auch hier die Fehler zu kennen, um für Abhilfe sorgen zu können.

- Lufteinschlüsse: Auch in Wachsmodellen kann es zu Lufteinschlüssen kommen, die diese unbrauchbar machen.
- Unvollständige Füllung durch zu geringe Wachstemperatur
- Oberflächenfehler können durch zu wenig/viel Schmiermittel, Entmischung des Wachses oder durch Fehler in der Form verursacht werden. Auch eine falsche Anordnung und/oder Größe von Kühlelementen kann Oberflächenfehler verschulden. Sollten automatische Auswerfer verwendet werden, können auch diese das Modell beschädigen, wenn sie zum Beispiel nicht ganz in ihre Ausgangsposition zurückkehren.
- Verzug kann durch Spannungen beim Abkühlen, falscher Modellentfernung aus der Form oder durch ungeeignete Lagerung entstehen.
- Gratbildung: Wie bei Gussteilen kann es auch bei Wachsmodellen zu einer Gratbildung bei der Formteilung kommen. Hier kann die Ursache von ungenügend geschlossenen Formen über große Abnutzung bis hin zur simplen Verschmutzung der Schließfläche sein [26].

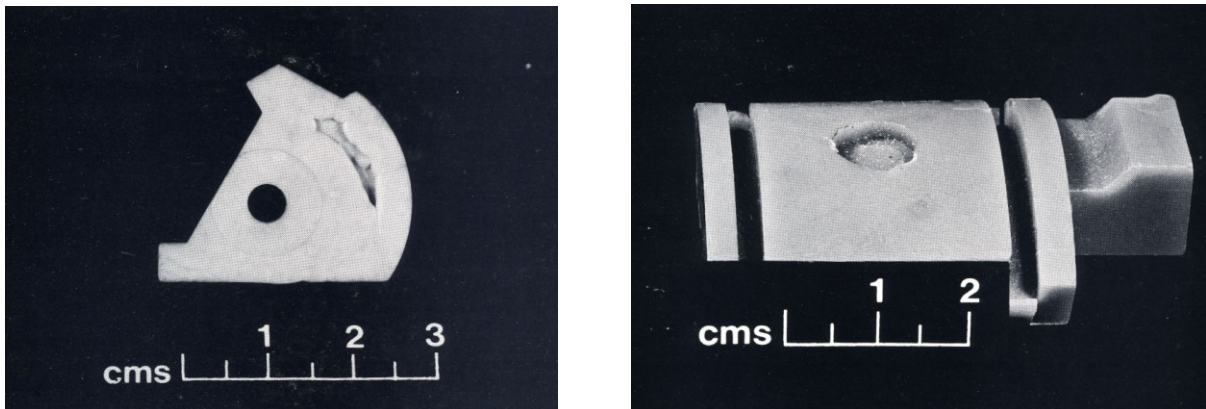


Abbildung 2-19: Unvollständige Füllung [26], Beschädigung durch Auswerfer [26].

Die zweite Art von Fehlern, die behandelt werden, sind jene, die ihren Ausgang in der Herstellung der Gussform nehmen:

- **Treibstellen:** Anders als beim „normalen“ Sandgussverfahren ist die Ursache nicht eine zu schwache Verdichtung, sondern ihr Gegenstück beim Feinguss: ein Fehler bei der Besandung der Modelle, wie beispielsweise Luftbläschen im Schlicker oder ungenügende Durchmischung desselben oder aber zu hohe Gießtemperatur.
- **Rauer Guss:** Eine raue Gussoberfläche kann mehrere Gründe haben. Eine mögliche Entstehungsart ist eine Reaktion des Metalls mit der ersten Schicht der aufgetragenen Schichte der Form. Auch Verunreinigungen in dieser ersten Schicht können die Ursache sein. Speziell im Feinguss kann auch das Problem auftreten, dass beim Ausschmelzen des Wachsmodells Erosion auftritt und die erste Schicht stellenweise überhaupt fehlt. Bei einer zu heftigen Besandung nach der ersten Schichte kann es vorkommen, dass die Sandkörner diese zur Gänze bis zum Wachsmodell durchdringen und somit ebenfalls die so wichtige erste Schicht beschädigt wird.
- **Ausbauchungen:** Auch der Fehler für Ausbauchungen oder Ausbeulungen ist meist in einem Fehler bei der Formherstellung begründet. Der Grund hierfür liegt in einer zu geringen Festigkeit der Form. Als Möglichkeiten für die Entstehung kommen hier eine zu kurze Trocknungszeit zwischen den Tauchvorgängen oder überhaupt die Verwendung von zu wenigen Schichten in Frage.
- **Sprünge in der Form:** Hierfür kann eine zu große Wachsausdehnung während der Tauch- und Besandungsschritte, dem Trocknen oder dem Ausschmelzen verantwortlich sein. Aber auch eine zu geringe Festigkeit der Form ist möglich [27,28].

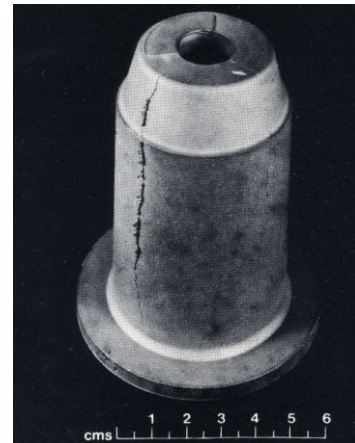
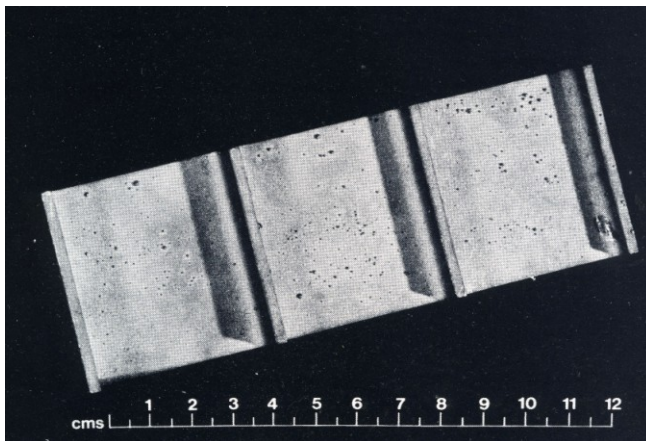


Abbildung 2-20: Treibstellen [27], Formriss [27].

Die dritte und letzte Fehlerquelle liegt im Bereich des Abgießens. Hier kommt es vor allem auf eine hohe Reinheit der Schmelze und eine genaue Temperaturführung an, doch auch Spannungsrisse entstehen in dieser Phase. Folgende Fehler können während des Abgießens auftreten:

- Oberflächeneinschlüsse können aus Schlacke, Oxiden oder Fremdmaterial wie beispielsweise Feuerfest-Rückstände sein.
- Oberflächenschrumpfung kann durch Hot Spots oder zu wenig Speisung entstehen.
- Lunker treten als Mikro- oder Makrolunker auf, haben aber grundsätzlich die selbe Entstehungsursache. Möglich ist eine falsche oder zu wenig Speisung, zu niedrige Schmelze- oder Formtemperatur und eine falsche Erstarrungsrate.
- Spannungsrisse treten bereits bei erhöhten Temperaturen als Heißrisse oder bei niedrigen Temperaturen auf. Für Heißrisse sind meist Auslegungsfehler die Ursache, wie beispielsweise zu scharfe Winkel oder ein falsches Speisersystem. Heißrisse zeigen eine oxidierte Oberfläche. Tritt der Riss erst bei niedrigeren Temperaturen auf, hat er eine helle Oberfläche und wird durch eine zu feste Form oder wiederum Auslegungsfehler verursacht.
- Kaltschweißstellen treten bei zu geringer Gieß- oder Formtemperatur oder starker Oxidierung der Oberfläche der Schmelze auf.
- Unvollständige Formfüllung: Auch hier kann die Ursache eine zu niedrige Form- oder Gießtemperatur sein. Es können aber auch ein falsches Gießsystem oder schlicht zu dünne Wandstärken der Grund sein.
- Gasporosität: Hier kommen mehrere Möglichkeiten in Frage. Die erste ist eine zu turbulente Formfüllung oder eine zu geringe Gasdurchlässigkeit der Form, sodass Luft und Gase nicht schnell genug aus der Form entweichen können. Auch Pinholes

gehören in diese Kategorie. Diese entstehen aufgrund einer Reaktion zwischen Form und Schmelze, bei der Wasserstoff, CO oder Wasserstoff-Stickstoff gebildet wird. Welche negativen Auswirkungen das Auftreten von Wasserstoff mit sich bringt, ist detailliert im folgenden Kapitel 2.8.1 beschrieben.

- Randentkohlung: Randentkohlung entsteht, wenn die Erstarrung unter einer oxidierenden Atmosphäre unter Bildung von CO_2 stattfindet. Sie kann aber auch bei einer Wärmebehandlung auftreten, wenn diese nicht unter Schutzgas durchgeführt wird [28,29].

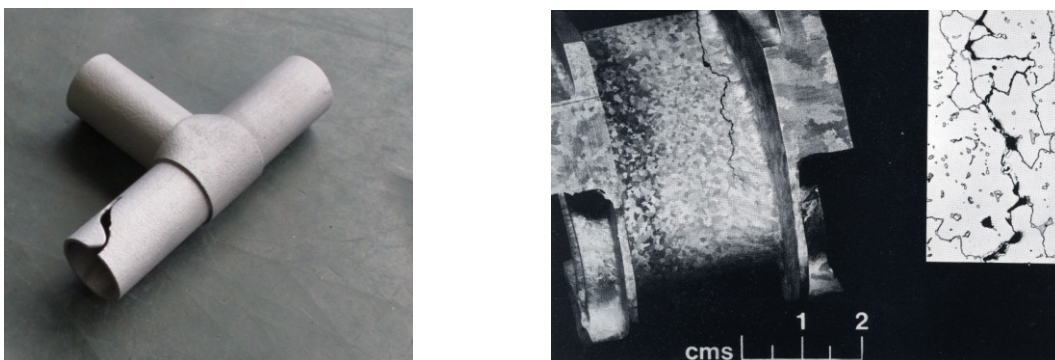


Abbildung 2-21: Unvollständige Formfüllung, Heißriss [29].

2.8.1 Wasserstoffproblematik

Wasserstoff im Werkstoff kann zu verschiedenen Schädigungen führen. Die wichtigsten sind Wasserstoffversprödung (HE Hydrogen Embrittlement), wasserstoffinduzierte Rissbildung (HIC Hydrogen Induced Cracking) und wasserstoffinduzierte Spannungsrissskorrosion (HSCC Hydrogen Induced Stress Corrosion Cracking).

Die Wasserstoffversprödung führt zu einer Abnahme der Duktilität des Werkstoffes. Atomar gelöster Wasserstoff senkt die Bindungskräfte und damit die Spaltbruchspannung.

Bei der wasserstoffinduzierten Rissbildung kommt es zu einer Blasen- und Rissbildung, ohne dass Zugbeanspruchungen vorhanden sind. Meist gehen diese Schädigungen von nichtmetallischen Einschlüssen oder Seigerungen aus, an denen sich Wasserstoff rekombinieren kann und so einen hohen inneren Druck aufbaut.

Bei der wasserstoffinduzierten Spannungsrissskorrosion ist die zeitgleiche Anwesenheit von Wasserstoff und Zugspannungen notwendig. Dabei diffundiert Wasserstoff immer an die Rissspitze in den Bereich der größten Zugspannung. Diese Art der Schädigung führt je nach Stahlsorte zu trans- (normalfest) oder interkristallinen Brüchen (hochfeste Sorte) [5,30,31].

2.9 Wärmebehandlung

Viele Feingussteile können ohne weitere Behandlung sofort eingesetzt werden, Stahlgussteile jedoch erfahren fast immer eine Wärmebehandlung. Dies dient zur Erreichung der zwischen Kunden und Herstellern vereinbarten Eigenschaften. Die Ziele der Wärmebehandlung sind meist ein Verringern von erstarrungsbedingten Seigerungen, ein Kornfeinen, sofern die Stahlsorte dies erlaubt, und das Einstellen der Werkstoffeigenschaften, insbesondere der mechanischen.

Die Dauer der Wärmebehandlung von (Fein-)Gussteilen ist üblicherweise etwas länger als jene von umgeformten, da Seigerungen homogenisiert werden müssen und die Bauteile meist eine größere Wandstärke haben, alle anderen Parameter sind gleich.

Die zur Wärmebehandlung verwendeten Öfen sind beispielsweise über mehrere Kleinbrenner beheizt, die meist computergesteuert sind, um die geforderten Aufheiz- und Abkühlkurven exakt einhalten zu können. Auch während der Haltezeit ist ein computergesteuertes System von Vorteil, um eine gleichmäßige Temperaturverteilung im Ofen zu haben, auch wenn die Belegungsdichte des Ofens variiert. Kleinere Öfen sind meist elektrisch beheizt [8,32].

Für den ausgewählten Stahl wird nur das Vergüten benötigt, welches nachfolgend beschrieben wird.

2.9.1 Vergüten

Das Ziel des Vergütens ist es, sowohl hohe Festigkeitswerte als auch eine ausreichende Zähigkeit zu erhalten. Da extrem hohe Festigkeitswerte immer mit einer geringen Zähigkeit einhergehen, ist das Vergüten stets ein Kompromiss zwischen diesen beiden Eigenschaften. Es soll ein feines Gefüge hergestellt werden, welches diesen Kompromiss darstellt.

Das Vergüten geschieht in drei Teilschritten: dem Austenitisieren, dem Abschrecken und dem darauf folgenden Anlassen. Das Austenitisieren erfolgt etwa 30 bis 50 °C oberhalb von A_{c3} für untereutektoidische Stähle. Um eine vollständige Umwandlung in Austenit zu erhalten, dient eine Haltezeit von 30 Minuten als Anhaltspunkt. Übereutektoidische Stähle werden nicht vollständig austenitisiert, sondern über A_{c1} erwärmt, um eine Mischung aus Austenit und Karbid zu erzielen.

Beim Abschrecken soll der gesamte Querschnitt in Martensit umgewandelt werden. Die möglichen Abschreckmittel sind beispielsweise Wasser oder Öl, genauer behandelt werden sie in einem eigenen Kapitel 2.9.2. Um die Gefahr von Spannungen und Verzug im Bauteil zu verringern, kann stufenweise abgeschreckt werden, wenn der Stahl dies zulässt. Hierbei wird bis knapp oberhalb von M_s abgeschreckt und diese Temperatur gehalten, bis das gesamte Bauteil auf dieser Temperatur ist und erst dann weiter abgeschreckt.

Der letzte Teilschritt des Vergütens ist das Anlassen. Hier werden feine Zementitausscheidungen gebildet, die eine Kugelform erhalten. Dadurch nimmt die Festigkeit etwas ab, dafür steigt die Zähigkeit. Übliche Temperaturen liegen zwischen 540 und 680 °C. Oftmals wird auch zwei- oder dreimal angelassen. Wichtig ist bei diesem Vorgang noch, dass keinesfalls im Bereich um 300 °C oder 500 °C angelassen wird, da es in diesen Bereichen zu Blau- beziehungsweise Anlasssprödigkeit kommt. Auch beim Abkühlen soll ein längeres Verweilen in diesen Temperaturbereichen vermieden werden.

Eine Sonderform des Vergütens ist Bainitisieren oder Zwischenstufenvergüten. Hierbei wird nach dem Austenitisieren auf die Temperatur abgeschreckt, bei der eine direkte Umwandlung in Bainit erfolgen kann, welche isotherm durchgeführt wird. Nach der vollständigen Umwandlung in Bainit kann das Bauteil auf Raumtemperatur abgekühlt werden. Die erzielbaren Eigenschaften entsprechen in etwa jenen von niedrig angelassenem Martensit. Problematisch ist hier, dass nicht alle Stahlsorten direkt umgewandelt werden können und auch die Bauteilgröße kann dazu führen, dass die notwendige Temperaturführung nicht eingehalten werden kann, da Austenit direkt in Bainit ohne vorangehende Umwandlung überführt werden muss. Wenn möglich wird dieses Verfahren dennoch gerne angewendet, da durch den Entfall des Anlassens Zeit und Kosten eingespart werden können. Außerdem kommt es nicht zu einem Verzug durch den Volumensprung, da kein Martensit gebildet wird [33,34]. Abschließend für dieses Kapitel wird ein ZTU (Zeit-Temperatur-Umwandlungs-) Diagramm für einen klassischen Vergütungsstahl, einen 25CrMo4, in Abbildung 2-22 gezeigt.

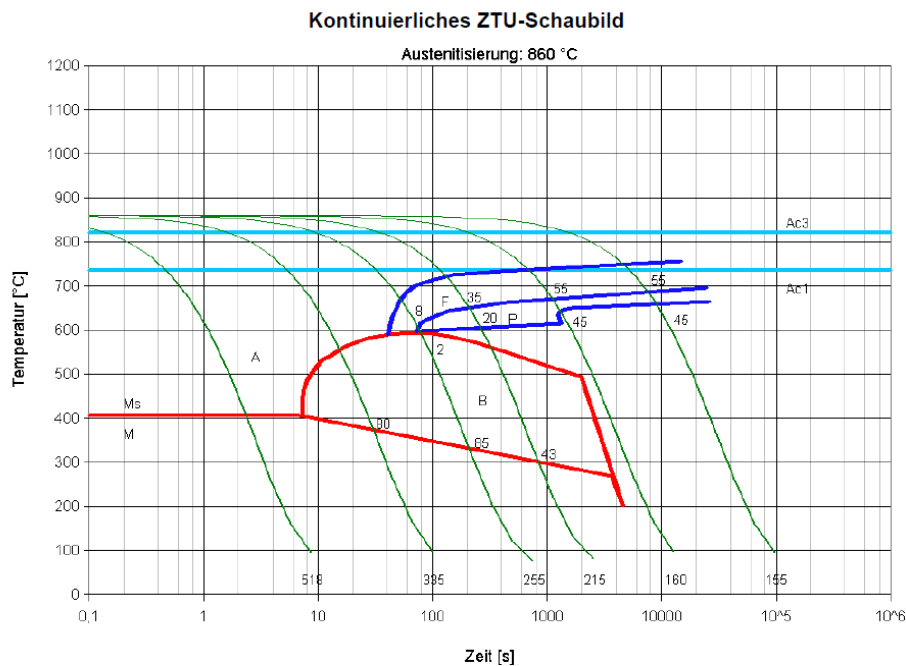


Abbildung 2-22: ZTU-Diagramm 25CrMo4 [35].

2.9.2 Abschrecken

Das Abschrecken wird meist nur als notwendiger Zwischenschritt nach dem Austenitisieren und vor dem Auslagern erwähnt, doch ist es genauso wichtig wie die anderen Teilschritte, die zu einem vergüteten Bauteil führen.

Das Abschrecken in einer Flüssigkeit kann in drei Teilschritte aufgeteilt werden. Die erste Phase ist die Dampfhautphase. Dabei entsteht durch den Leidenfrost'schen Effekt ein Dampffilm an der Oberfläche des Bauteils, der zu einer verminderten Wärmeleitung führt. Wenn die Temperatur erreicht ist, bei der die Dampfhaut durchbrochen wird, beginnt die Kochphase. Dabei können die beim Kochen der Flüssigkeit gebildeten Bläschen aufsteigen und immer neue Flüssigkeit kommt mit dem Bauteil in Kontakt. Dadurch wird in dieser zweiten Phase die höchste Abkühlgeschwindigkeit erzielt. Ist das Bauteil soweit abgekühlt, dass das Kühlmedium nicht mehr kocht, markiert das den Beginn der dritten und letzten Phase des Abschreckvorganges, der Konvektionsphase. Dabei kommt es zu einem vollständigen Kontakt zwischen Bauteil und Kühlmedium. Die Kühlung erfolgt nur noch durch Konvektion, ist also auch langsamer als jene während der Kochphase. Abbildung 2-23 zeigt Bilder aller drei Phasen (Bild a die austenitisierte Probe, b die Dampfhautphase, c die Kochphase und d die Konvektionsphase) sowie die Abkühlrate und die Abkühlzeit aufgetragen gegen die Probertemperatur.

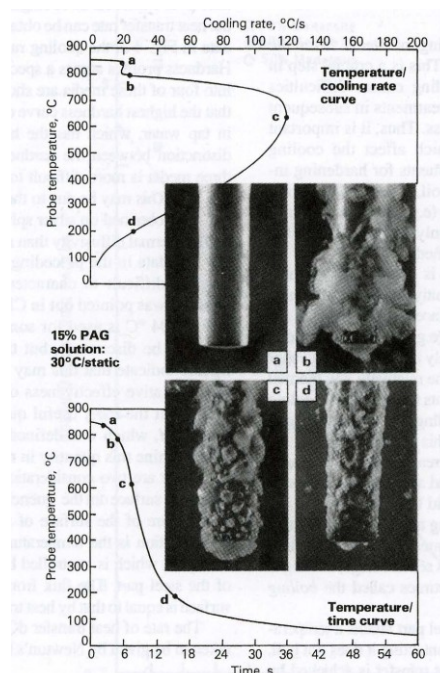


Abbildung 2-23: Abkühlphasen [36].

Das Abschreckmedium hat die Aufgabe, eine möglichst kurze Dampfhautphase zu bilden, um eine schnelle Abschreckung zu ermöglichen. Am einfachsten ist die Verwendung von Wasser, doch hat reines Wasser nicht die besten Eigenschaften. Daher werden Zusätze verwendet, die diese verbessern. Diese Zusätze können Salze oder Polymere sein. Salze verbessern die Abschreckwirkung teils erheblich, es werden viel höhere Abkühlraten über einen größeren Temperaturbereich erzielt als mit reinem Wasser. Polymere hingegen vermindern die Abkühlrate, verschieben sie aber zu günstigeren Temperaturen. Ein weiteres Medium, welches die Abkühlrate senkt, ist Abschrecköl, welches aber mehr und mehr von Wasser mit Polymeren ersetzt wird. Benötigt man ein isothermes Umwandeln bei einer etwas höheren Temperatur, wie beispielsweise beim Bainitvergüten, so kann auf Salzschnmelzen zurückgegriffen werden. Eine sehr selten zur Anwendung kommende Möglichkeit ist die Verwendung von Metallschnmelzen wie Blei oder Zinn. Diese haben zwar eine hohe Wärmeleitfähigkeit, sind aber umwelttechnisch problematisch. Lässt die Legierung überhaupt niedrige Abkühlraten zu, so können auch strömende Gase (Luft, Stickstoff, Schutzgas) Verwendung finden.

Nicht vergessen werden darf beim Abschrecken auch, dass die Abkühlrate so niedrig wie möglich sein soll, da ein schnelles Abschrecken zu Eigenspannungen führt, jedoch genügend hoch sein muss, um das gewünschte Resultat zu erhalten. Diese Eigenspannungen können in ungünstigen Fällen bis zum Bruch des Teils führen. Verantwortlich dafür ist die Martensitbildung, da hierbei ein Volumensprung auftritt [32,36].

3 Experimentelle Methoden

3.1 Konstruktion und Festigkeitssimulation der Knotenelemente

Begonnen wurde das Projekt mit einer Bauteilzeichnung. Dabei musste eine mit der Hand angefertigte Skizze der Idee in einen dreidimensionalen Datensatz überführt werden. Dies war einerseits notwendig, da heute praktisch jede Firma, die Bauteile fertigt, diese Daten für den Prozess benötigt und, für dieses Projekt ebenfalls sehr wichtig, eine Festigkeitssimulation durchgeführt werden sollte, um die Form des Bauteils zu überprüfen und zu verbessern. Für die Zeichnung am Computer wurde das Programm SolidWorks 2010 verwendet. Erstellt wurden die Daten im STEP-Format, denn sowohl die Festigkeitssimulation als auch der Hersteller der Bauteile arbeiten mit diesem Datenformat.

Zur Optimierung der Gestalt der Bauteile wurde eine FEM-Simulation für die auftretenden Spannungen bei verschiedenen Belastungsfällen durchgeführt. Dafür kam das Programm ANSYS Workbench 11.0 SP1 zum Einsatz. Es ermöglicht die Eingabe von verschiedenen Parametern wie geometrischen Abmessungen, Materialeigenschaften, Randbedingungen oder abgeleiteten Ergebnissen.

3.2 Herstellung des Bauteils

Nach der Auswahl des Stahles und Besprechung der Machbarkeit der gewünschten Teile, deren Ergebnis es war, dass die Geometrie ohne Änderungen gefertigt werden kann, wurde mit der Produktionsplanung begonnen. Für die Modellherstellung wurde ein 3D

Druckverfahren gewählt, da eine Silikonform, die für diese Bestellmenge ebenfalls in Frage kommen würde, Kerne benötigt. Dieser Mehraufwand kann mit den gedruckten Modellen umgangen werden. Eine genaue Erklärung des verwendeten Druckverfahrens erfolgt in Kapitel 2.7.1.2.

3.2.1 Montage der Gießeinheit

Die fertigen Modelle wurden auf eine Gießeinheit montiert, wie die folgende Abbildung 3-3 zeigt. Dazu wurden mehrere Angüsse aus Wachs auf die Modelle aufgebracht und diese Angüsse wiederum auf die vorbereiteten Gießsysteme geklebt.

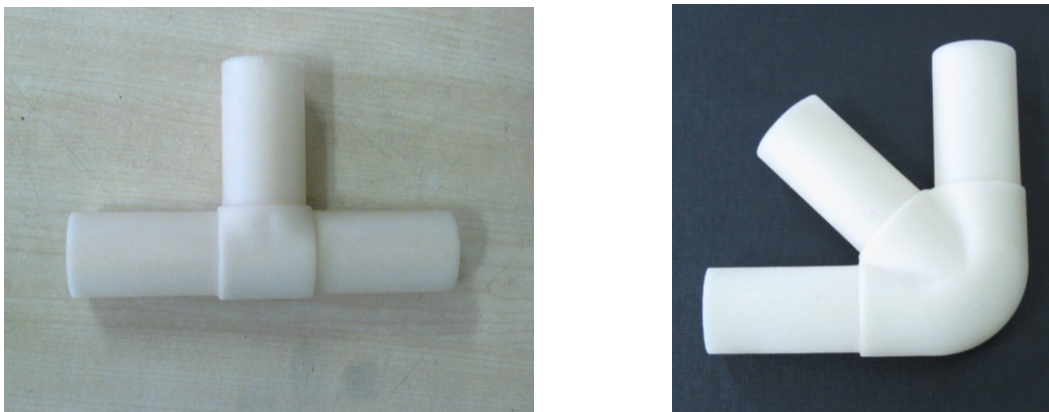


Abbildung 3-1: 3D gedruckte Modelle.

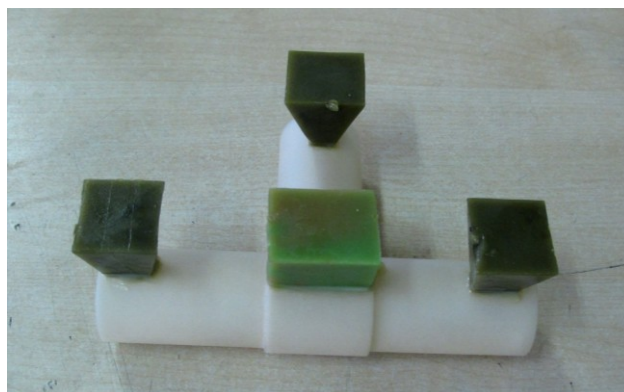


Abbildung 3-2: Modell mit aufgeklebten Anschnitten.

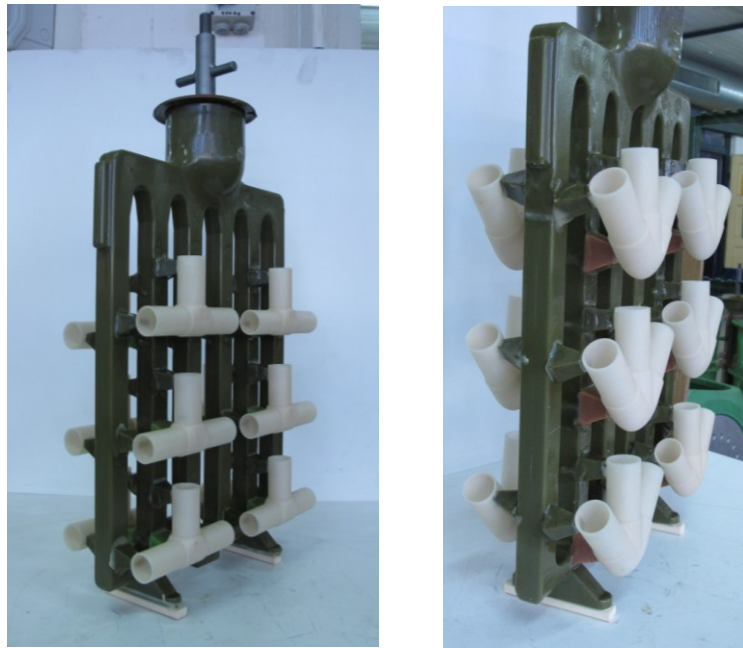


Abbildung 3-3: Fertig montierte Gießeinheiten.

3.2.2 Besanden, Ausschmelzen, Brennen

Nach der Montage erfolgte das Tauchen und Besanden. Als Besandungsmaterial wurde eine Mischung aus Zirkon- und Quarzsand verwendet, die mit einem Silica-Binder auf Wasserbasis gebunden wird. Deren genaue Zusammensetzung ist firmeninternes Know-how und wird somit verständlicherweise nicht näher bekannt gegeben. Im nächsten Schritt erfolgte das Ausschmelzen des Waxes. Die Gießeinheit, welche bereits ausgeschmolzen, aber noch nicht gebrannt ist, wird in Abbildung 3-4 gezeigt.



Abbildung 3-4: Ausgeschmolzene Formen.

3.2.3 Abguss

Nach dem Brennen erfolgte der Abguss. Dazu wurde die Form vorgeheizt, um eine gute Formfüllung zu erhalten. Die Schmelze wurde in einem Induktionsofen erwärmt, dessen Kapazität für eine Gusstraube reicht. Vor dem Abguss wurde eine Probe genommen und chemisch analysiert. Sollten Korrekturen notwendig sein, wird das entsprechende Element nachlegiert. Wenn die Zusammensetzung innerhalb der gewünschten Grenzen liegt, wird kurz vor dem Abguss die Temperatur gemessen, um mit der richtigen Temperatur abzugießen. Bei dem verwendeten Stahl und der Geometrie der Bauteile liegt die Gießtemperatur bei knapp über 1770 °C. Unterstützt durch die vorgeheizte Form kann der lange, dünnwandige Bereich der Bauteile vollständig gefüllt werden. Die folgenden Abbildung 3-5 und Abbildung 3-6 zeigen die Entnahme der Probe und den Abguss. In Abbildung 3-6 ist auch zu sehen, dass die Form, um zwischen Vorheizen und Abguss nicht abzukühlen, mit einem keramischen Gewebe abgedeckt ist.



Abbildung 3-5: Probennahme.



Abbildung 3-6: Abguss.

Nach dem Abkühlen wurden die Teile vom Gießsystem getrennt. Danach mussten die Stellen, an denen sich die Angüsse befinden, verschliffen werden.

Die folgende Abbildung 3-7 soll einige Teile mit Fehlern zeigen, die aus der Versuchstraube stammen. Hierbei kommt es jeweils zu einer unvollständigen Formfüllung,

die auf eine zu niedrig gewählte Gießtemperatur zurückzuführen ist. Aus diesem Grund wird für die folgenden Abgüsse die bereits oben erwähnte Gießtemperatur von 1770 °C gewählt. Die Abgüsse sind auf diesen Abbildungen bereits verschliffen.

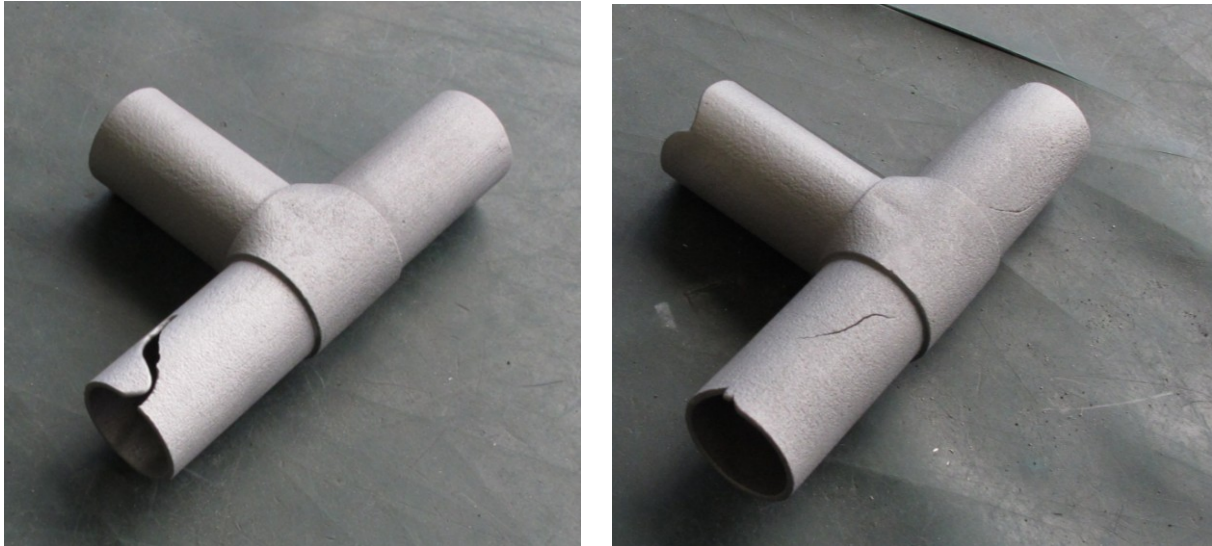


Abbildung 3-7: Kaltläufe bei Teilen aus der Versuchstraube.

3.3 Chem. Analyse

Die chemische Analyse wurde erstellt, um zu prüfen, ob die Zusammensetzung des Stahles innerhalb der Norm liegt. Dazu müssen sämtliche in der Norm angegebenen Elementgehalte gemessen werden.

Die dazu verwendeten Geräte sind ein Kohlenstoff/Schwefel-Analysator und ein ICP-OES, welche nachfolgend erklärt werden.

3.3.1 Kohlenstoff/Schwefel-Analyse

Ein Kohlenstoff/Schwefelanalysator macht sich den Umstand zu Nutze, dass der Großteil aller Metalle mit Sauerstoff verbrannt werden kann, wenn diese hoch genug erhitzt werden. Sauerstoff dient jedoch nicht nur zum Verbrennen, sondern fungiert gleichzeitig als Trägergas. Die zum Verbrennen benötigte Temperatur wird mittels Induktion erzielt. Verbrennt die Probe, so wird fester Kohlenstoff zu Kohlendioxid und Schwefel zu Schwefeldioxid oxidiert. Diese beiden Gase können mittels Infrarotdetektor gemessen werden. Über die gemessene Menge an Gas kann der Kohlenstoff- und Schwefelgehalt einer eingewogenen Probe errechnet werden [37].

3.3.2 ICP

Als eine moderne Form der Anregung dient heute Plasma. Die meistgenutzte Form ist ein Plasmabrenner mit ICP Anregung. Dies steht für ein hochfrequenzerhitztes, induktiv gekoppeltes Plasma, englisch Inductively Coupled Plasma – ICP. Ein solcher Brenner besteht aus drei konzentrischen Quarzrohren, welche in einem Hochfrequenzgenerator aufgestellt werden. Diese Rohre werden von Argon durchströmt. Nach der Zündung entsteht ein Hochfrequenz-Argonplasma. Das Argon wird teilweise ionisiert, wobei freie Ladungsträger entstehen. In dieses nun leitfähige Gas wird ein Hochfrequenzstrom induziert, was eine lawinenartige Ionisierung zur Folge hat. Durch den Ohmschen Widerstand des Plasmas werden so 6000 bis 10000 K erreicht. Die Probe kann nun in den zentralen Kanal des torodialen Plasmas als Aerosol eingeführt werden, ohne dass das Plasma beeinträchtigt wird. Das zu untersuchende Material, welches immer in flüssiger Form zugeführt wird, wird getrocknet, die Moleküle dissoziieren, was die Entstehung von freien Atomen oder Ionen zur Folge hat, welche thermisch angeregt werden. Durch eine relativ lange Verweilzeit im Plasma werden optimale Atomisierungs-, Ionisierungs- und Anregungsbedingungen

geschaffen. Durch die effektive Probeneinfuhr werden sehr niedrige Nachweisgrenzen erreicht. Auch ist die ICP Anregung ideal für eine Multielementanalyse, da sie einen guten Kompromiss für viele Elemente darstellt. Ein weiterer Vorteil ist, dass sich der lineare Konzentrationsbereich der Kalibrationskurven über mehrere Größenordnungen erstreckt, und das bei hoher Präzision. Anzumerken ist noch, dass es zwei verschiedene Detektortypen gibt: ICP-MS für Massenspektroskopie und ICP-OES für optische Emissionsspektroskopie. Die folgende Abbildung 3-8 soll den grundsätzlichen Aufbau eines ICP veranschaulichen [38].

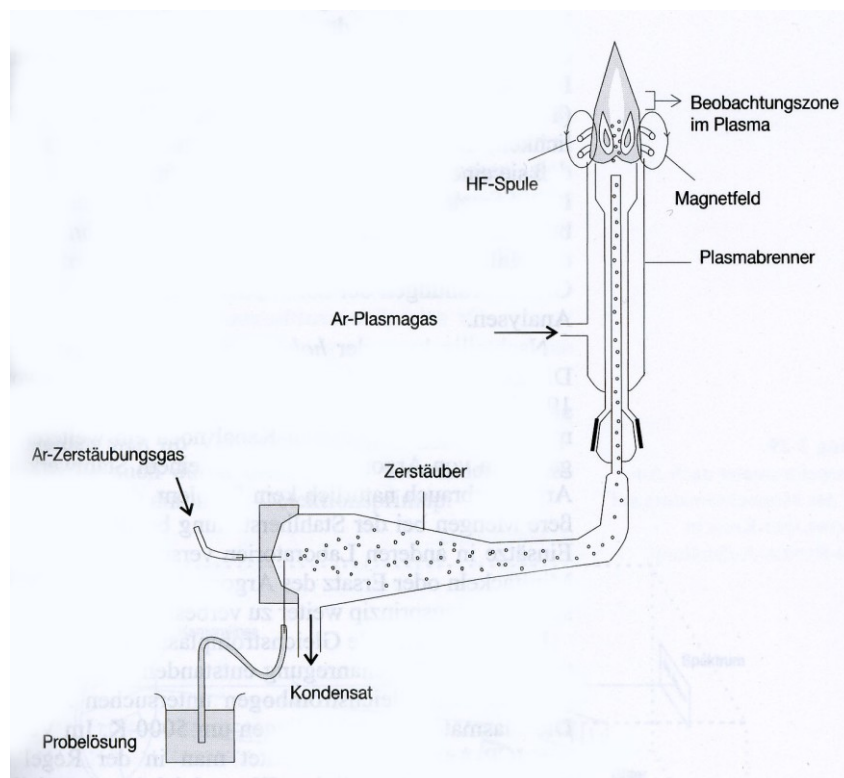


Abbildung 3-8: Schema eines ICP [38].

Der Kohlenstoff- und der Schwefelgehalt der Probe werden mittels Kohlenstoff/Schwefel-Analysator überprüft. Zum Einsatz kommt ein LECO CS-200, welches in Abbildung 3-9 zu sehen ist.

Das Gerät, mit dem alle anderen Elemente mit der Ausnahme von Silizium überprüft werden sollen, ist ein am Kapitelbeginn beschriebenes ICP. Genauer wird für die Messungen ein Varian Vista-MPX ICP-OES verwendet, also ein Vertreter der optischen Emissionsspektroskopie. Dieses Gerät verfügt über einen CCD-Detektor mit einer Megapixel-Auflösung (CCD = Charge Coupled Device). Dieser sogenannte Arraydetektor ermöglicht eine simultane Messung aller Elemente, was Zeit und Argongas, also Kosten spart. Auch muss jede Probe nur einmal gemessen werden, um ein Ergebnis zu erhalten.

Sämtliche Funktionen werden mittels PC gesteuert und auch die Ausgabe der Ergebnisse erfolgt mittels Software sofort nach Ende des Messzyklus [39]. Abbildung 3-9 zeigt das verwendete Gerät.



Abbildung 3-9: Leco CS200, Varian Vista MPX.

Der Gehalt an Silizium wird normalerweise über eine Fällungsreaktion gemessen. Dazu werden Späne des Stahles in Perchlorsäure aufgelöst. Anschließend wird das Silizium ausgefällt und mit einem Filterpapier abgetrennt. Dann wird das Filterpapier bei 900 °C verbrannt und es bleibt lediglich SiO_4 zurück. Dieses wird im letzten Schritt dieser Analyse wiederum in Säure gelöst und verkocht. Der Siliziumgehalt kann über eine Differenzwiegung bestimmt werden, indem die Lösung vor und nach dem Verkochen abgewogen wird. Da bei dieser Analyse allerdings ein extrem niedriger Wert bestimmt wird, wird auch von diesem Element eine weitere Messung mithilfe des ICP durchgeführt. Dazu werden 0,5 Gramm Späne des Stahles in Salpetersäure (1:1) aufgelöst und mit ultrareinem Wasser gemischt. Diese Probe kann anschließend mit dem ICP gemessen werden.

Die Messung am ICP kann nicht unmittelbar durchgeführt werden, es muss erst eine Einstellung des Geräts auf das zu erwartende Element erfolgen. Dazu ist eine reine Leerprobe notwendig, um die Hintergrundstrahlung bei der Messung eliminieren zu können. Anschließend werden zwei exakt bekannte Standardproben verwendet, um das Gerät zu eichen. Dann erfolgt die Messung einer ebenfalls bekannten Probe, um die Eichung zu überprüfen. Ist diese Messung erfolgreich, also das Ergebnis nah genug am vorgegebenen Wert, wird die eigentliche Probe, in diesem Fall das Silizium, gemessen.

3.4 Härtemessung

Im nächsten Schritt wurde eine Härtemessung durchgeführt, da diese einerseits einen guten Eindruck über die Zugfestigkeit der Bauteile gibt und andererseits die einzelnen Bereiche der Bauteile anders als in einem Zugversuch punktuell untersucht werden können. Zur Vorbereitung dieser Härtemessung musste je ein Bauteil entlang der Längsachse aufgeschnitten werden, um Proben aus allen Bereichen der Teile entnehmen zu können. Die Abbildung 3-10, Abbildung 3-11, Abbildung 3-12 und Abbildung 3-13 sollen diesen Schritt veranschaulichen.

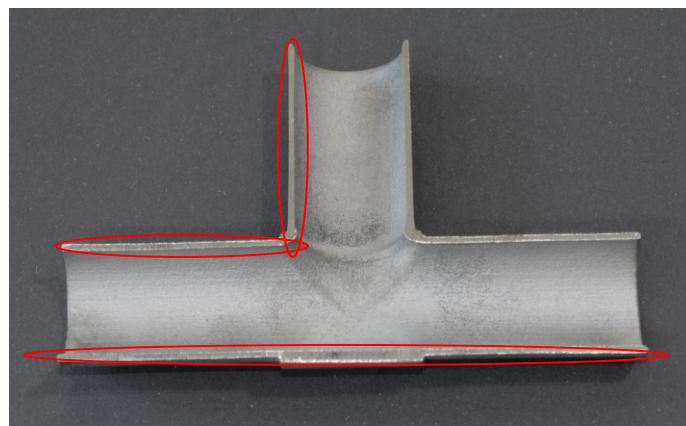


Abbildung 3-10: Übersicht Probenentnahme.



Abbildung 3-11: Teile aus T-Stück.



Abbildung 3-12: Übersicht Probenentnahme.



Abbildung 3-13: Teile aus Eckstück.

Die auf diese Art gewonnenen Streifen mussten als Nächstes auf eine Länge zugeschnitten werden, die in die Einbettmaschine passt. Beim Einbetten wurde auf die Anordnung und Zugehörigkeit der Proben geachtet.



Abbildung 3-14: Eingebettete Proben.

Die Härtemessung der eingebetteten Proben erfolgte mithilfe einer EMCOTest M5U Härtemessmaschine, die in Abbildung 3-15 zu sehen ist. Diese Maschine ist vom BEV (Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen) nach den folgenden Normen kalibriert: DIN 51220, DIN EN ISO 6506-2, -6507-2, -6508-2.



Abbildung 3-15: EMCO Test M5U.

3.5 Zugfestigkeit und Bruchdehnung

Die Zugfestigkeit kann auch anhand der Härtemessung mithilfe von Tabellen gut bestimmt werden. Da aber auch die Bruchdehnung eine wichtige Rolle spielt, ist es notwendig, einen Zugversuch durchzuführen. Die Probenentnahme erfolgte aus drei T-Stücken, da diese über eine ausreichend lange Gerade verfügen (siehe Abbildung 3-16). Um die unterschiedliche Wandstärke auszugleichen, mussten die Proben überfräst werden. Dies bot den zusätzlichen Vorteil, dass diese nach der Bearbeitung über eine glatte Oberfläche verfügte und somit weniger Kerben wirksam waren. Es muss noch erwähnt werden, dass die leichte Krümmung der Proben ein exaktes Erfassen der Abmessungen erschwert. Die folgende Abbildung 3-17 soll eine solche, aus dem Bauteil entnommene Zugprobe zeigen.

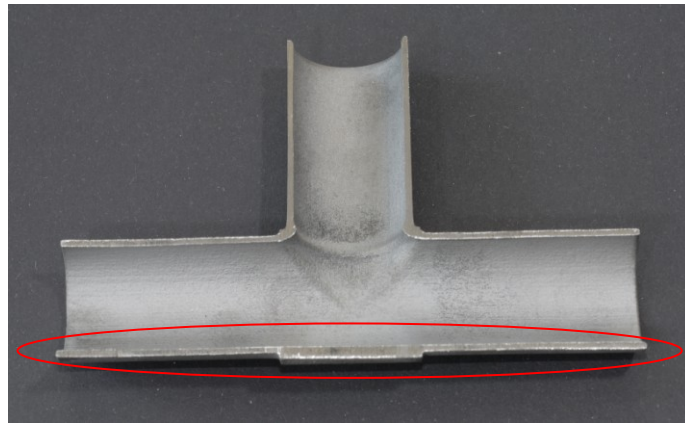


Abbildung 3-16: Ort der Probenentnahme.

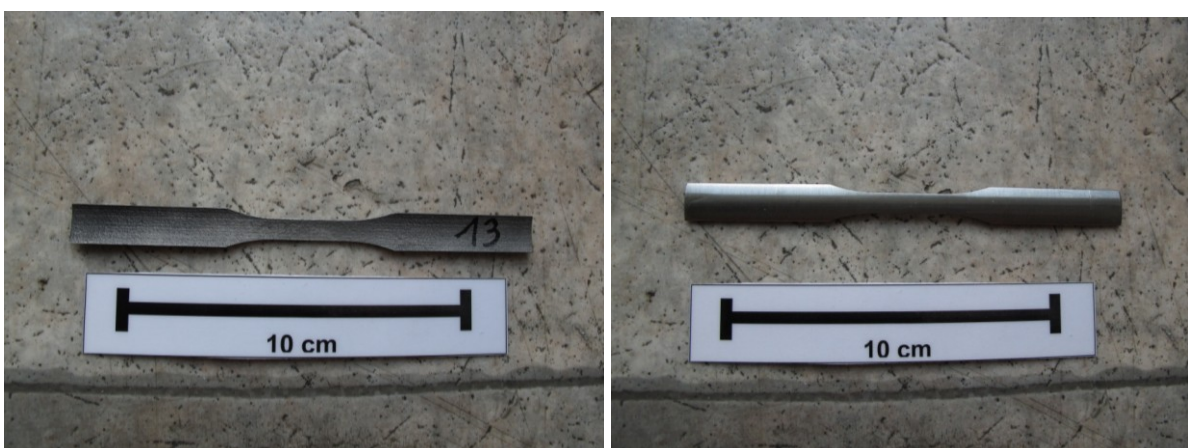


Abbildung 3-17: Zugprobe.

Die verwendete Maschine der Firma Zwick, Modell Z1484, ist in Abbildung 3-18 zu sehen. Diese Maschine kann mittels Computer gesteuert werden und gibt die ermittelten Daten in Echtzeit an den PC weiter. Die maximale Prüfkraft beträgt 200 kN.



Abbildung 3-18: Zugprüfmaschine.

3.6 Rauheit

Die Rauigkeit der Oberfläche hat einen Einfluss auf die Dauerfestigkeit von Bauteilen. Aus diesem Grund wurde mithilfe eines Messgerätes die Rauigkeit von je drei Bauteilen pro Ausführung ermittelt. Ein Messfühler wird über die zu prüfende Oberfläche gezogen und zeichnet dabei jede Höhenänderung auf. Am Ende der Wegstrecke, die eine genau definierte Länge hat, errechnet das Gerät den R_a - sowie den R_z -Wert. Das verwendete Messgerät ist das Modell SJ-301 der Firma Mitutoyo.

Das Messgerät mitsamt dem Versuchsaufbau ist in der folgenden Abbildung 3-19 zu sehen.



Abbildung 3-19: Messaufbau für Rauigkeitsmessung.

3.7 Gefügeuntersuchung am Lichtmikroskop

Für die Gefügeuntersuchung wurden dieselben eingebetteten Proben verwendet, an denen auch die Härtemessung durchgeführt wurde.

Nach dem Heraustrennen und Zerteilen der Proben wurden die Probenteile an der Fläche, die betrachtet werden sollte, mit einem rauen Schleifpapier geschliffen, um eine möglichst gute Auflagefläche für den Einbettprozess zu erhalten. Aufgrund der Geometrie der Proben war die Verwendung von Probenhaltern unumgänglich. Die folgende Abbildung 3-20 zeigt die verwendete Einbettmaschine Simplimet 1000 der Firma Buehler. Bei dieser vollautomatischen Maschine werden die Proben aufgelegt und anschließend mit der

gewünschten Menge Einbettpulver bedeckt. Der Rest des Einbettvorganges, also das Pressen, Erhitzen und abschließende Abkühlen erfolgt automatisch.

Die fertig eingebetteten Proben wurden im nächsten Schritt geschliffen. Dieser Vorgang erfolgte in zwei Schritten. Im ersten Schritt wurde ein Wasserschleifpapier mit Körnung 100 und im zweiten mit Körnung 300 verwendet. Dazu kam eine speziell für Laborzwecke erzeugte Schleifmaschine der Firma Buehler, Modell Phoenix 4000, zur Anwendung. Abbildung 3-20 zeigt diese. Es wird in nur zwei Schritten geschliffen, da durch das händische Aufdrücken der Probe von ungeübten Personen meist eine nicht plane Oberfläche erzeugt wird. Diese schiefen Proben können nicht mehr automatisch poliert werden und hätten somit zu weiteren Unregelmäßigkeiten und Zeitverlust geführt.



Abbildung 3-20: Buehler Simplicmet 1000, Buehler Phoenix 4000.

Das Polieren war der letzte Schritt der mechanischen Probenbearbeitung. Bei den hier vorliegenden Proben erfolgte das Polieren in vier Stufen. Zuerst mit 30 μm Polierscheibe und Suspension, dann mit einer ebensolchen Kombination für 9 μm und darauf folgend für 3 μm . Im vierten Schritt wurde noch mit OPS (Oxid Polier Suspension) poliert. Für diese Schritte wurde eine Maschine der Firma ATM, Modell Saphir 550, zu sehen in Abbildung 3-21, verwendet.



Abbildung 3-21: ATM Sapkir 550 Poliermaschine.

Damit das Gefüge der Bauteile sichtbar wurde, musste vor der Betrachtung noch ein Ätzzvorgang zum Kontrastieren durchgeführt werden. Dazu wurden die Schiffe für etwa 30 Sekunden in zweiprozentige HNO_3 getaucht.

Auch soll hier das verwendete Lichtmikroskop der Firma Olympus, Modell BX 51, gezeigt werden, welches mit einem PC verbunden die Möglichkeit bietet, die Aufnahmen direkt mit der erforderlichen Software zu erstellen. Nur das Scharfstellen der Bilder erfolgt manuell, doch auch hier unterstützt die Software.



Abbildung 3-22: Lichtmikroskop Olympus BX 51.

3.8 REM

Das Bild, das bei der Rasterelektronenmikroskopie am Computer ausgegeben wird, entsteht durch ein Abrastern der Oberfläche mit einem Elektronenstrahl. Die dabei entstehenden Sekundär- und Rückstrahlelektronen werden detektiert und können zu einem topographischen Bild zusammengesetzt werden. Auch die chemische Zusammensetzung der Oberfläche kann mittels einer energiedispersiven Röntgenanalyse (EDX) bestimmt werden. Abbildung 3-23 zeigt die Anregungsbirne, die entsteht, wenn ein Elektronenstrahl auf die Oberfläche trifft. Die Sekundär- und Rückstrahlelektronen entstehen in einem oberflächennahen Bereich, die Röntgenstrahlung hingegen stammt aus einem größeren Volumen. Die Ortsauflösung der chemischen Analyse ist dementsprechend etwas geringer als die des Oberflächenbildes [40].

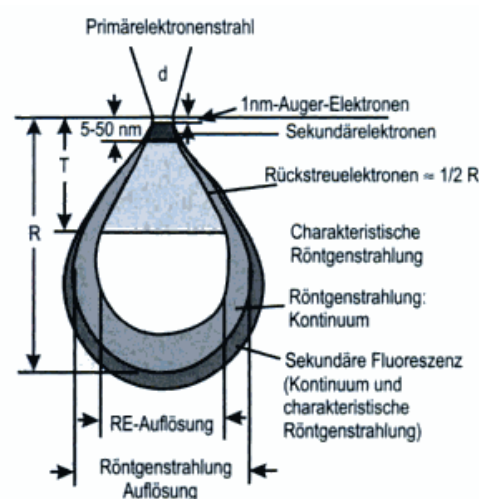


Abbildung 3-23: Anregungsbirne [40].

Das verwendete Rasterelektronenmikroskop war ein Quanta 200 Mk2 von FEI Company. Die EDX-Einheit stammt von Oxford Instruments, Modell INCA Energy 200. Beide Geräte sind in der folgenden Abbildung 3-24 zu sehen, wobei das zylinderförmige Gerät im Hintergrund die EDX-Einheit ist.



Abbildung 3-24: Rasterelektronenmikroskop [41].

Das Rasterelektronenmikroskop arbeitet mit einer Beschleunigungsspannung von 200 V bis 30 kV. Der Probenstisch kann während der Untersuchung mittels eines Elektromotors bewegt werden. Das Gerät besitzt eine Wolframkathode mit automatischer Filamentsättigung. Im Probenraum ist ein Detektor für Sekundärelektronen und Rückstreuielektronen verbaut. Die EDX Einheit zur Aufnahme von Spektren kann sowohl manuell als auch automatisch gesteuert werden [41].

Für die Untersuchung der Zugprobe, welche einen Defekt aufweist, wurde kein metallographischer Schliff in den Standardprobenhalter geschraubt. Stattdessen wurde das zu untersuchende Teil in einer spezielle Vorrichtung fixiert. Die folgende Abbildung 3-25 zeigt die Probe sowie den Probenhalter mit Probe.



Abbildung 3-25: Zugprobe und Analyseaufbau.

Bei Verwendung eines solchen Probenhalters ist darauf zu achten, dass der Mindestabstand zwischen Probe und den elektronischen Bauteilen eingehalten wird, um das Gerät nicht zu beschädigen. Nach dem Scharfstellen der Bilder können wiederum manuell Aufnahmen gemacht werden.

3.9 Computertomographie

Bei zwei willkürlich ausgewählten Bauteilen wurde die neueste Art der Durchstrahlungsprüfung angewendet: die Computertomographie. Auch in diesem Kapitel soll die verwendete Technik kurz erklärt werden. Die Computertomographie ist eine Art der Durchstrahlungsprüfung, wie eingangs bereits erwähnt wurde. Es handelt sich um eine Bauteilprüfung mithilfe von Röntgenstrahlen. Damit das Volumen dargestellt werden kann, muss eine Serie von Einzelbildern aufgenommen werden, die mittels Computer zu einer dreidimensionalen Darstellung zusammengesetzt werden. Dazu rotiert das zu untersuchende Objekt im Gerät. Die Darstellungsqualität hängt dabei von der Anzahl der Voxel ab, die ermittelt werden können. Ein Voxel ist das 3D Gegenstück zu den von Digitalkameras bekannten Pixeln. Je mehr Voxel, desto detailreicher die Bilder. Abbildung 3-26 soll das Verfahren veranschaulichen.

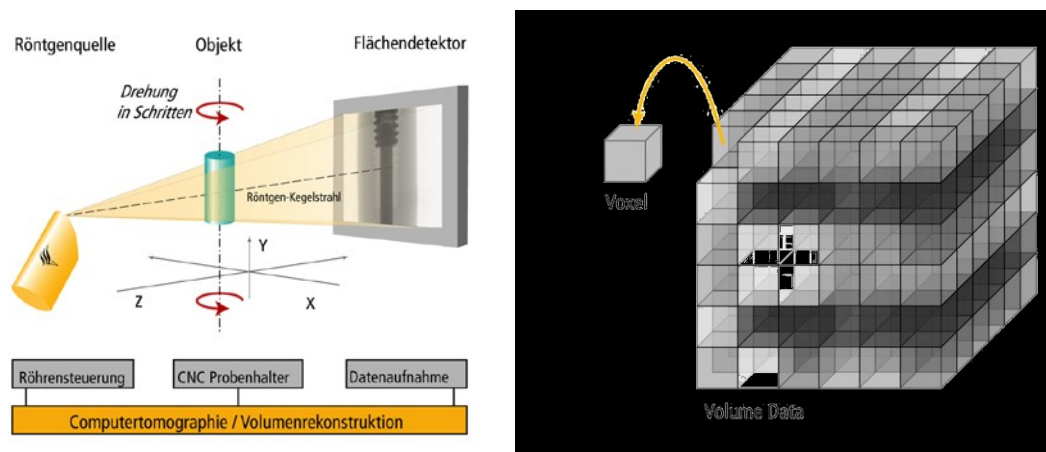


Abbildung 3-26: Schematischer Aufbau Computertomograph [42].

3.10 Klebeversuche

In diesem Kapitel wird auf die Klebeverbindungen eingegangen. Die Stahlknoten sollen, wie in der Einleitung beschrieben, als Verbindungselemente für Rohre dienen, welche geklebt anstatt geschweißt werden sollen. Um die Festigkeit der Klebeverbindung zu prüfen, wurden sechs Proben vom Österreichischen Forschungsinstitut für Chemie und Technik (OFI) verklebt. Diese Proben wurden Stahl auf Stahl geklebt. Auch wurden zwei unterschiedliche Oberflächenformen untersucht.

Der zum Einsatz kommende Kleber ist der Epoxydharz-basierte Klebstoff "Betamate 1496V" von Dow Automotive. Zum Aushärten benötigt dieser Ein-Komponenten-Klebstoff 60 Minuten bei 155°C oder 30 Minuten bei 170°C, er härtet also nur bei erhöhten Temperaturen. Es kommt zu keiner Verschlechterung der Eigenschaften durch Umwelteinflüsse, und auch die Widerstandskraft gegen Chemikalien wird mit "Gut" angegeben [43].

Es werden drei verschiedene Klebelängen mit jeweils einer glatten und einer profilierten Oberfläche untersucht. Die profilierte Oberfläche ist wellenartig und wird "streak-shape" genannt. Abbildung 3-27 dient zur Erklärung dieser Oberflächenform.



Abbildung 3-27: Streak-shape Oberfläche.

Die drei Längen, welche geprüft werden, sind 34, 43 und 54 mm. Die auf passende Gegenstücke geklebten Rohre werden in der Zugprüfmaschine getestet. Die folgende Abbildung 3-28 zeigt die Werkstattzeichnung, und Abbildung 3-29 die geklebte Probe mit dem Einsatzstück. Dieses ist notwendig, um ein Eindringen des Rohres beim Einspannen in die Zugprüfmaschine und dem anschließenden Versuch zu verhindern. Auch ist die eingespannte Probe in der Zugprüfmaschine in Abbildung 3-30 zu sehen, welche dieselbe ist wie im Kapitel 3.5.

Auf der Werkstattzeichnung (Abbildung 3-28) ist in Detail A zu sehen, dass das vordere Ende der Probe abgerundet ist. Dies dient dazu, dass es beim Zugversuch zu keiner Verkantung zwischen Rohr und Probe kommen kann, die das Ergebnis des Zugversuchs verfälschen würde. Des Weiteren ist die Streakshape-Oberfläche vergrößert zu sehen. Detail B zeigt das wiederum abgerundete Ende des Rohres. In diesem Fall ist es notwendig, eventuell zurückgeschobenen Klebstoff aufnehmen zu können, damit dieser nicht an der Oberfläche sichtbar wird. Auch zu sehen ist, dass der verwendete Kleber einen konstanten Klebspalt von 0,1 mm benötigt, um optimale Resultate zu erzielen.

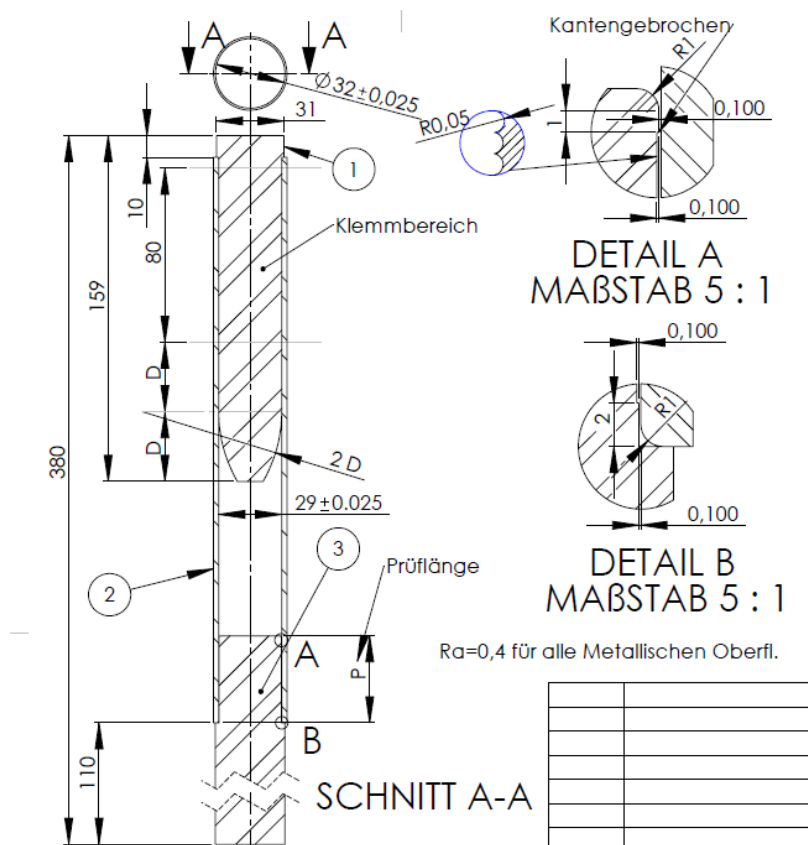


Abbildung 3-28: Werkstattzeichnung.



Abbildung 3-29: Geklebte Rohrzugprobe mit Einsatzstück.

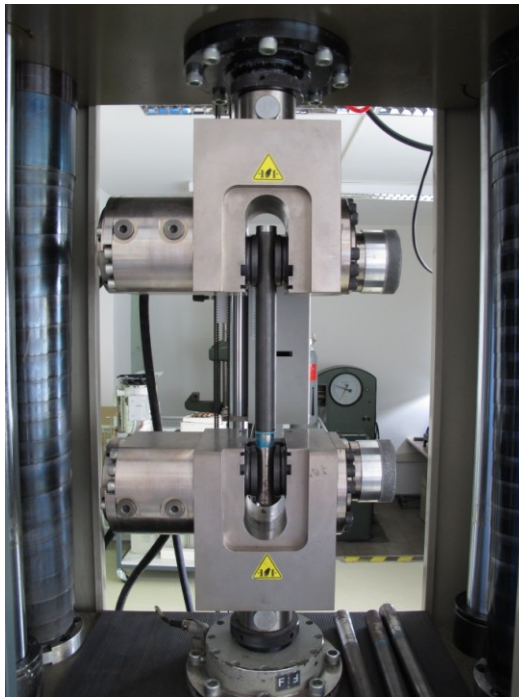


Abbildung 3-30: In Prüfmaschine eingespannte Probe.

4 Resultate und Diskussion

4.1 Von der Skizze zum 3D-Datensatz

Im ersten Schritt muss überlegt werden, wie eine der Aufgabe gerecht werdende Geometrie aussehen könnte. Die Anforderung ist, dass möglichst viel an einem einfachen Fachwerk gemessen werden soll. Aus diesem Grund wird ein Quadrat mit einer Diagonale gewählt. Dies ermöglicht mit nur zwei unterschiedlichen Bauteilen eine gute Konstruktion, an der mehrere Messungen möglich sind. Es soll also ein Eckstück mit einem Aufsatz für die Diagonale und ein T-Stück, an welches eventuell weitere Fortsätze angefügt werden können, hergestellt werden. Die weitere Überlegung, eine Pyramide anzufertigen, wird verworfen, da hierfür viel komplexere Bauteile notwendig wären.

Nach der Festlegung der gewünschten Grundgeometrie ist im nächsten Schritt das Bauteildesign gefragt. Hier soll ein optisch ansprechendes, den technischen Anforderungen gewachsenes Äußeres das Ziel sein. Die technischen Anforderungen bestehen im Wesentlichen aus Zug-, Druck-, Torsions- und Biegebeanspruchung und aus der Bereitstellung einer ausreichend großen Klebefläche, die mit einem Anschlag für die Rohrelemente enden muss. Daraus ergibt sich eine Kerbe, die bestmöglich kompensiert werden sollte. Die Gesamtform der Teile soll, wie bereits erwähnt, Biegekräfte aufnehmen können. Aus diesem Grund ist die Anpassung der Eckteile auf eine möglichst günstige Form notwendig, um die Anforderungen mit geringer Wandstärke der Bauteile erfüllen zu können.

Die Abbildung 4-1 und Abbildung 4-2 sollen einige Entwürfe zeigen. Die Y-förmigen Anschläge sind möglich, da Rohre grundsätzlich auf jede gewünschte Form zugeschnitten und geschliffen werden können. Bei diesen Versionen ist nur wenig Metall sichtbar, welches vor Korrosion geschützt werden muss.

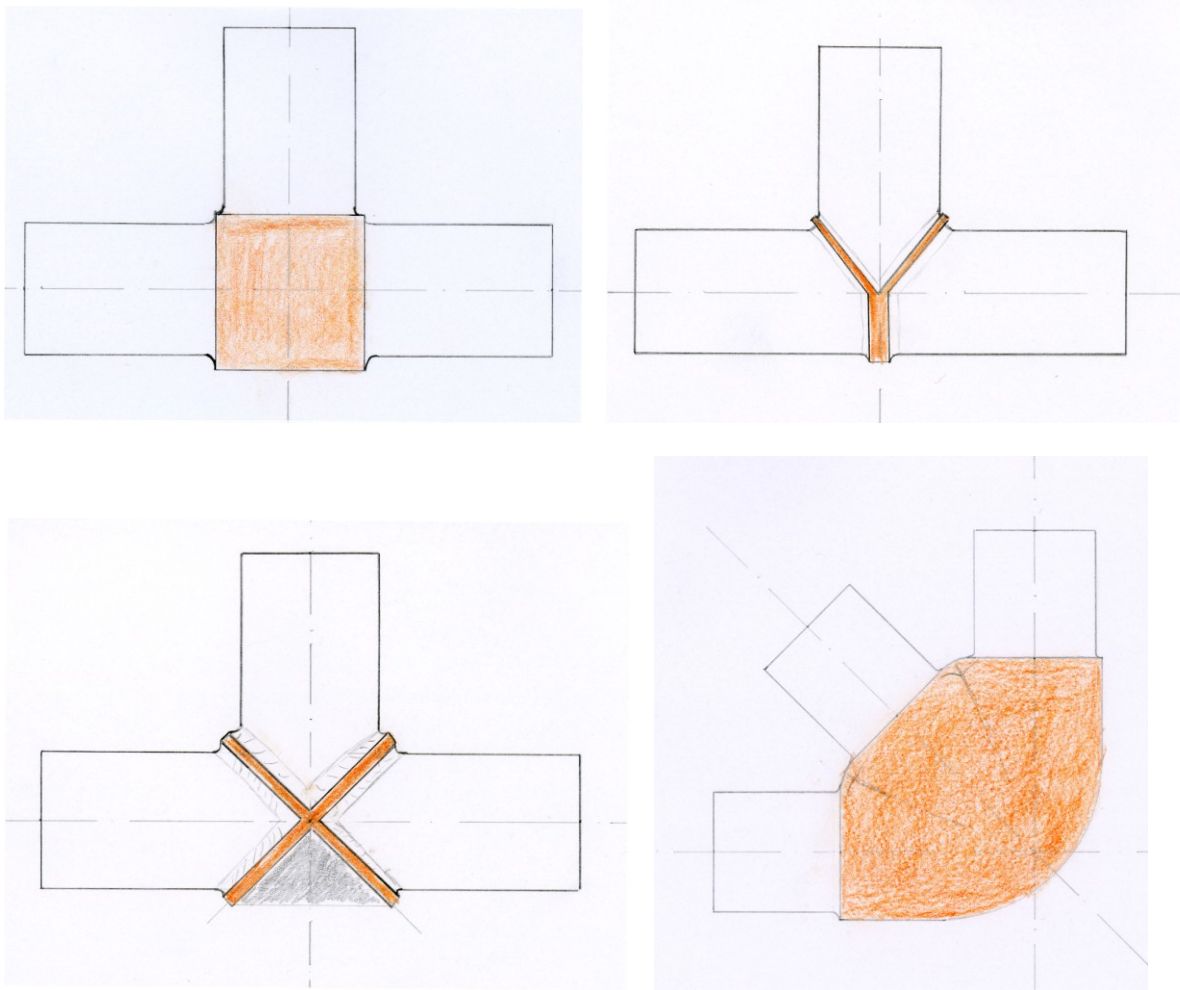


Abbildung 4-1: Handskizzen.

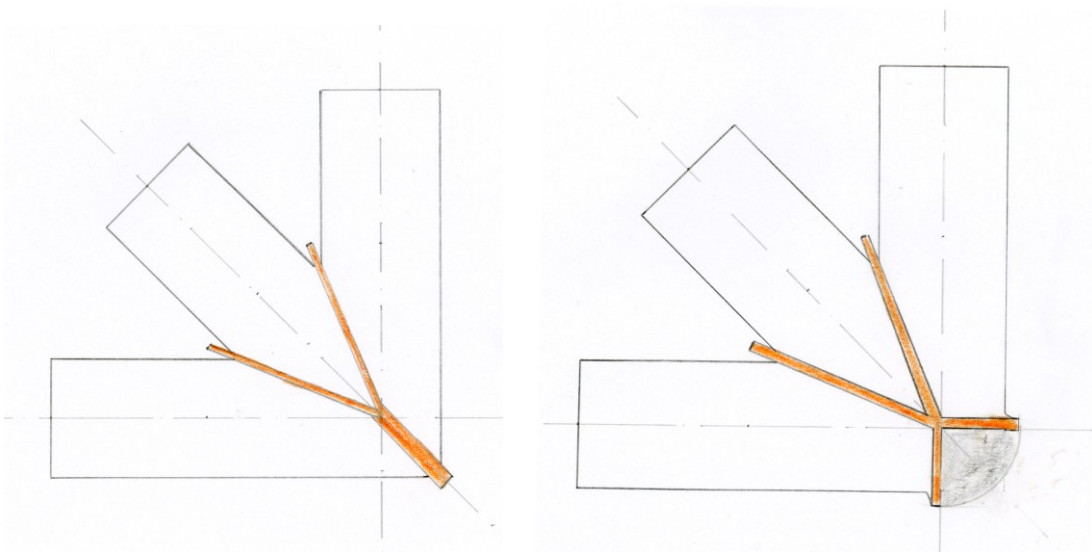


Abbildung 4-2: Handskizzen.

Aus all diesen Ideen muss für jede Bauteilart eine ausgewählt werden, die möglichst einfach herzustellen, aber eigentlich noch wichtiger, gut prüfbar ist. Aus diesem Grund wird jeweils die Lösung mit runden Anschlägen eingesetzt, da sich diese zylinderförmigen Flächen am besten für nachfolgende Klebeversuche eignen. Auch ist davon auszugehen, dass für erste Klebeversuche noch eine maschinelle Nachbearbeitung notwendig sein wird, welche auf einer Zylinderform leichter auszuführen ist als auf der Fläche, die sich aufgrund der Y-Form ergeben würde.

4.1.1 Bauteilzeichnung

Die Abbildung 4-3, Abbildung 4-4 und Abbildung 4-5 sollen Schritte der Bauteilentwicklung zeigen, wobei anzumerken ist, dass die Fläche für die Klebeverbindungen am letzten Bauteil vergrößert werden, um keinesfalls zu riskieren, dass mögliche Versuche an einer zu niedrigen Klebekraft scheitern könnten. Dies äußert sich in den verlängerten Armen. Auch ist zu erkennen, dass der anfangs aus einem Polygon zugeschnittene Zentralbereich durch eine schlankere, materialsparende Version ersetzt worden ist.

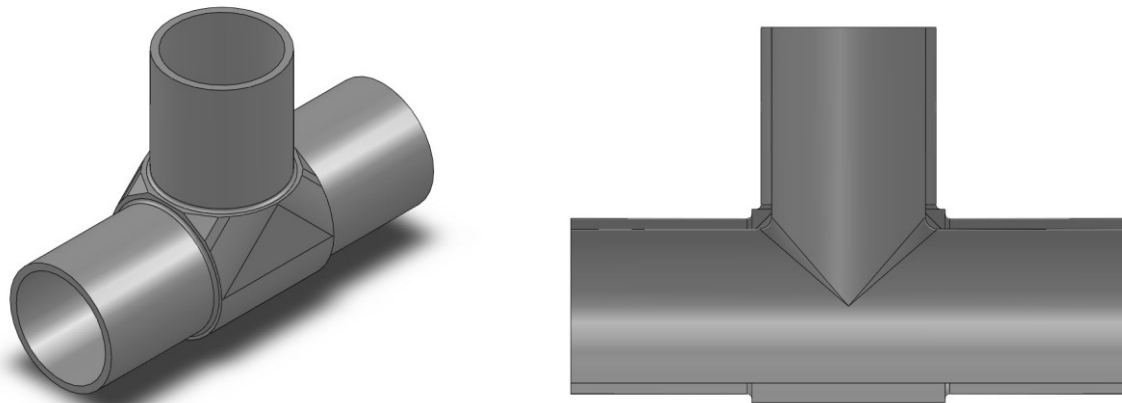


Abbildung 4-3: Früher Entwurf T-Stück.

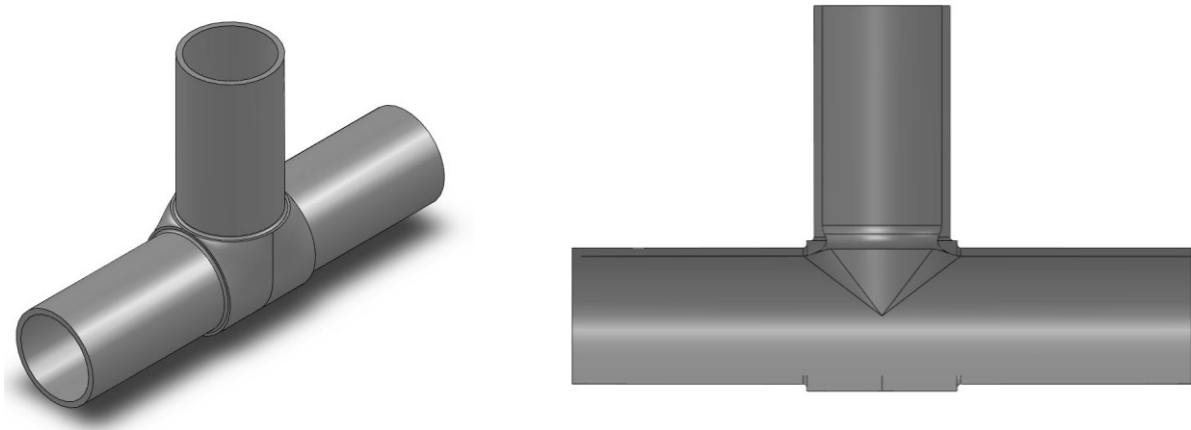


Abbildung 4-4: Fertiges T-Stück.

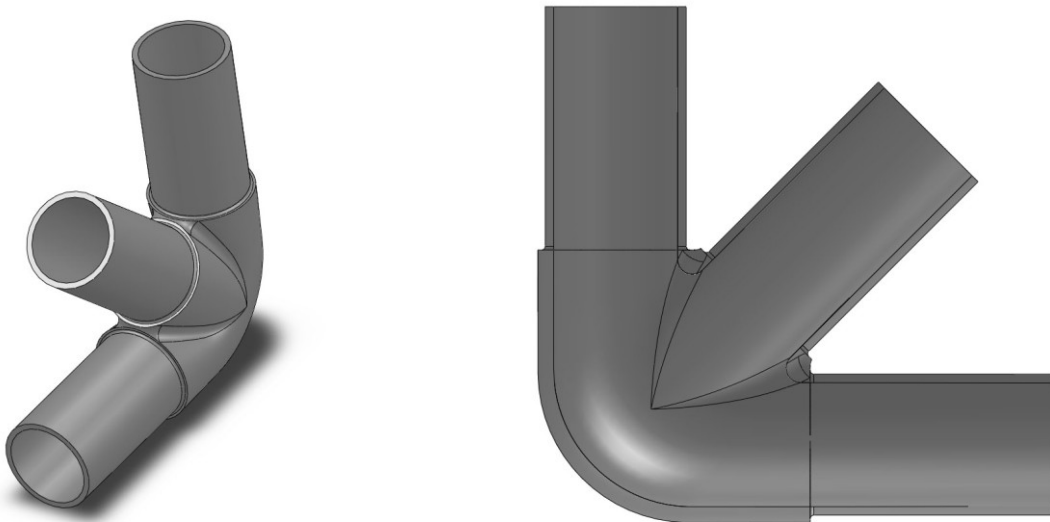


Abbildung 4-5: Fertiges Eckstück.

4.1.2 Festigkeitssimulation

Die vorangegangenen Abbildung 4-3, Abbildung 4-4 und Abbildung 4-5 zeigen unterschiedlich ausgeführte Bauteile. Der Weg zu dieser Form soll in diesem Kapitel erklärt werden.

Für die im Anschluss präsentierten Festigkeitssimulationen müssen die zu untersuchenden Geometrien vernetzt werden. Dieses Mesh verfügt über in etwa 90.000 Elemente. Diese Elementanzahl ergibt ein ausreichend feines Netz über das gesamte Bauteil. Stellen mit einem geometrischen Übergang werden feiner vernetzt. Um den Simulationsaufwand möglichst gering zu halten, wird jeweils die gesamte Randfläche als Festlager angenommen. Die Kraft, welche als Belastung dienen soll, wird ebenfalls flächig in

das Bauteil eingeleitet. Während der Simulation wird die Prüfkraft nicht schlagartig, sondern in mehreren Stufen bis zum Maximum aufgebracht. Als Werkstoff wird ein Stahl ausgewählt, der in etwa im Bereich der möglichen Stahlsorten liegt. Da das Ziel dieser Simulation eine Verbesserung der Geometrie ist, ist eine Basisspezifikation ausreichend.

Die erste Simulation (Abbildung 4-7) soll zeigen, wo genau am Bauteil Spannungsspitzen zu erwarten sind. Da durch die Klebeverbindung die Außengeometrie nicht verändert werden kann, müssen sämtliche Änderungen an der Innenseite vorgenommen werden. Dazu wird Material an den höchstbeanspruchten Stellen aufgetragen (Abbildung 4-8). Hierbei muss aber auf einen sehr fließenden Verlauf des Materialauftrags geachtet werden, um nicht an einer anderen Stelle eine Kerbe zu schaffen und das Bauteil auf diese Art wiederum zu schwächen. Da auch die erste Modifikation mit Materialauftrag im Bereich des Übergangs beider Rohrelemente keine zufrieden stellenden Ergebnisse liefert, werden zusätzliche Veränderungen überlegt. Man bringt anstelle eines Materialauftrages zwei Ringe ein, die das T-Stück versteifen sollen (Abbildung 4-9). Da aber auch diese Veränderung keine nennenswerten Verbesserungen erbringt, wird im nächsten Schritt wieder vom Ring im unteren Bereich abgegangen und auf eine kombinierte Form der früheren Versionen gesetzt (Abbildung 4-10). Hierbei wird der Materialauftrag, der den kragenförmigen V-Ausschnitt bildet, fließend mit dem Ring für das senkrechte Rohrelement verbunden. Für diesen Schritt wird zusätzlich die Außengeometrie, die nicht als Klebefläche gebraucht wird, in einer optisch verbesserten Variante, die auch Volumen und somit Gewicht spart, verwendet.

Abbildung 4-6 zeigt die Evolution der Probengeometrie mit angepasstem Mesh. Hierbei ist auch die bereits erwähnte Tatsache, dass die Größe der Netzelemente im Laufe der verschiedenen Simulationen an die Anforderungen sowie zur Optimierung der Berechnungszeit angepasst wurde, deutlich zu erkennen.

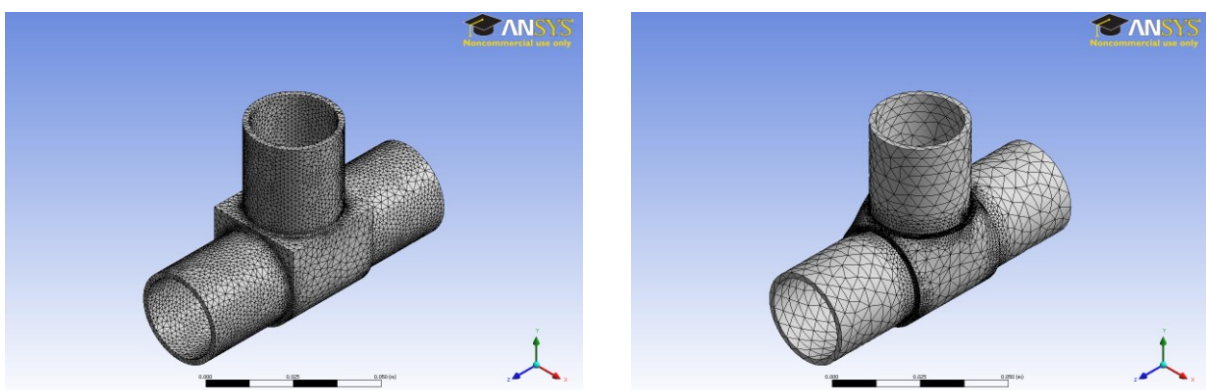


Abbildung 4-6: Anpassungen des Netzes.

Die Abbildung 4-7, Abbildung 4-8, Abbildung 4-9 und Abbildung 4-10 sollen die oben beschriebenen Schritte, welche simuliert werden, zeigen. Sämtliche dargestellten Verformungen sind um das 100fache überhöht, damit sie auch sichtbar sind. Die Kräfteinleitung erfolgt flächig. Im jeweils linken Bild wird das Ergebnis einer Schubbeanspruchung entlang der horizontalen Achse gezeigt und im rechten eine Schubbeanspruchung in X-Richtung, also rechtwinkelig zur Achse durch das Bauteil. Das gegenüber der Kräfteinleitung befindliche Ende wird als Festlager definiert. Das Ergebnis ist so zu interpretieren, dass, je weiter sich die Farbe von blau hin zu rot verändert, die auftretenden Spannungen größer werden. Anzumerken ist noch, dass im Bereich der Kräfteinleitung natürlich ebenfalls hohe Spannungen angezeigt werden und nicht nur im Bereich des Übergangs zwischen Zentralbereich und Armen.

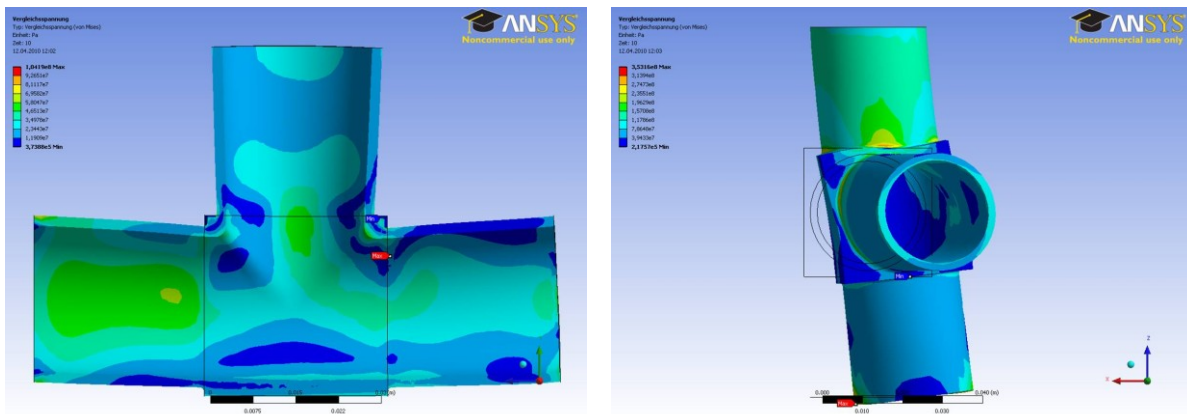


Abbildung 4-7: 1. Version.

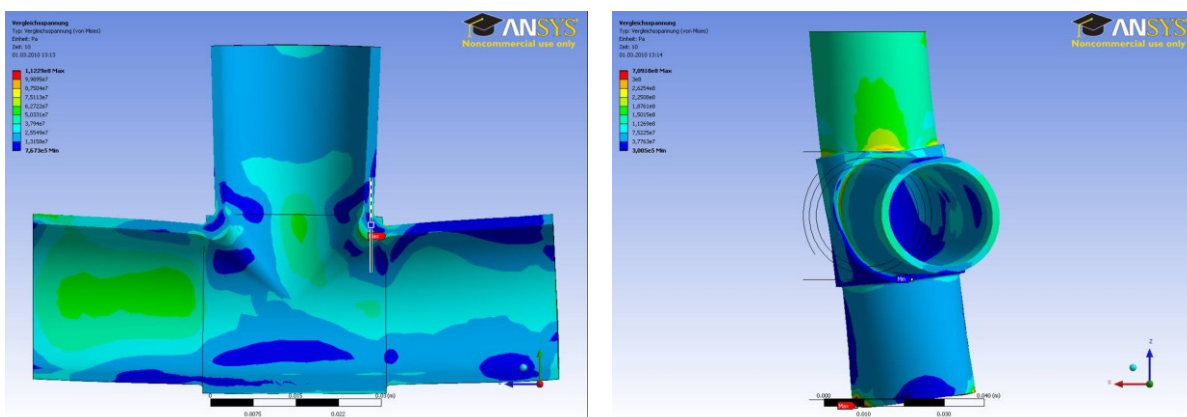


Abbildung 4-8: Version mit Materialauftrag.

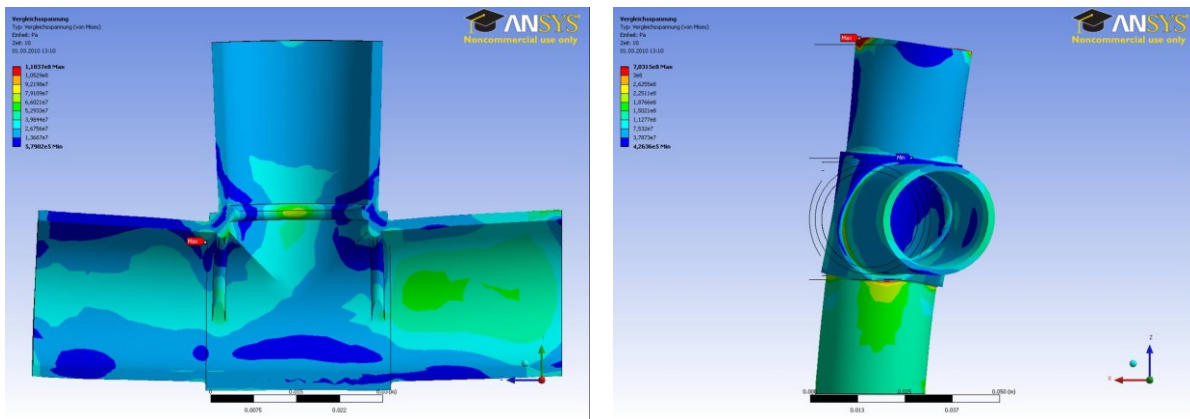


Abbildung 4-9: Version mit Ring.

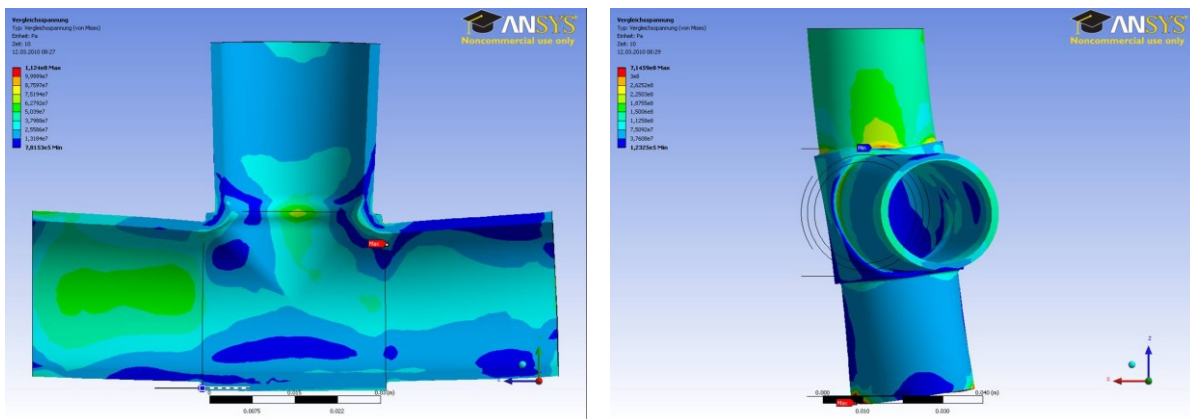


Abbildung 4-10: Letzte Version.

Das Bauteil mit der Diagonale wird im Anschluss an das T-Stück gezeichnet und simuliert. Die Erkenntnisse aus den bereits erfolgten Berechnungen können somit von Anfang an mit einbezogen werden. Wie die Simulation dieses Bauteils zeigt, liegen die kritischen Stellen an genau denselben wie beim T-Stück, also am Ende der fix vorgegebenen Klebestellen im Radius zum Anschlag hin, welcher verstärkt wird. Der Rest des Bauteils erfährt nur eine sehr geringe Belastung. Aus diesem Grund wird auf weitere Modifikationen dieses Bauteils verzichtet, da eine Gewichtoptimierung in diesem Stadium funktionell nicht relevant ist. Die Abbildungen Abbildung 4-11 und Abbildung 4-12 sollen dies verdeutlichen. Die Kräfteinleitung erfolgt in diesem Fall über den mittleren der drei Arme, die Stelle ist wiederum gekennzeichnet.

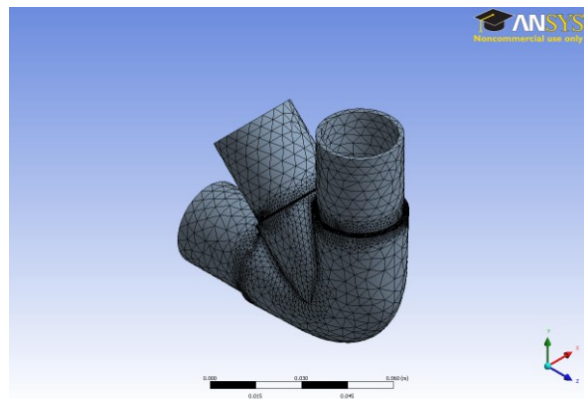


Abbildung 4-11: Netz für Simulation.

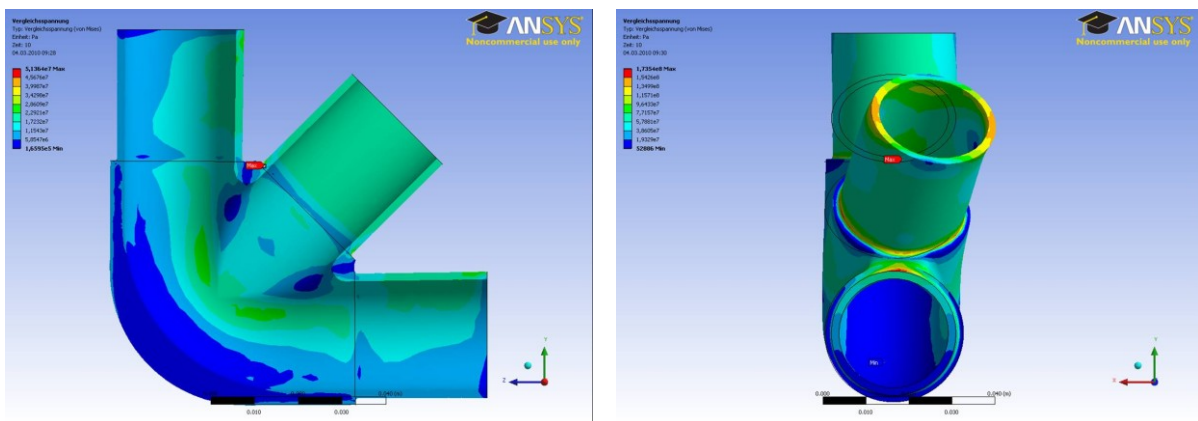


Abbildung 4-12: Fertiges Bauteil mit Diagonale unter Schubbeanspruchung.

4.2 Eingangsprüfung

Nach der Fertigstellung von 30 Stück je Knotentyp werden die Teile von der Firma O.St. Feinguss angeliefert. Als erster Schritt erfolgt eine Beschriftung und optische Eingangskontrolle. Bei einer Eingangskontrolle werden die Teile auf etwaige, bereits mit freiem Auge erkennbare Fehler untersucht. Bei dieser Untersuchung sind einige Poren und andere Fehlstellen, wie beispielsweise Unregelmäßigkeiten im Übergangsbereich Klebestelle zum Rohranschlag hin aufgefallen und werden markiert. Abbildung 4-13 zeigt ein Bauteil mit markierten Fehlerstellen.



Abbildung 4-13: Bauteil mit kleineren Fehlern.

Ein weiteres Problem, das ausnahmslos alle Bauteile vorweisen, wurde detektiert. In jenem Bereich, in dem sich die Angussstellen befunden haben, ist eine Einfallstelle im Inneren des Bauteils zu finden. Die Ursache für diese ist mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit eine Speisung des Gießsystems aus dem Bauteil heraus. Bei neuerlicher Betrachtung von Abbildung 3-3 mit den fertigen Gusstrauben ist erkennbar, dass sowohl das Grundgerüst als auch die Anschnitte einen in Bezug auf das Bauteil sehr großen Durchmesser haben. Um eine vollständige Füllung der Bauteile zu erhalten, ist es natürlich notwendig, dass diese Bereiche erst nach dem Bauteil erstarren. Durch die geringe Wandstärke der Bauteile erstarren die Bereiche, in denen sich die Anschnitte befinden, nicht vor den Anschnitt, sondern gemeinsam mit jenem Bereich. Aus diesem Grund kann das erstarrende Gießsystem aus dem Bauteil heraus Schmelze ansaugen. Abhilfe könnte hier nur ein geringerer Angussdurchmesser schaffen, damit das Bauteil bereits fertig erstarrt ist, wenn der Rest der Gusstraube beginnt, Schmelze anzusaugen, um seine Schwindung auszugleichen.

Als Nächstes wird der Außendurchmesser aller Klebeflächen mit einer Schublehre vermessen, da diese über einen gleichmäßigen Durchmesser verfügen müssen, um einen konstant dicken Klebefilm zu erreichen. Hierzu wird jeder Arm zwei Mal um 90 Grad versetzt gemessen, um einen Eindruck von der Rundheit der Arme zu erhalten. Auch werden sämtliche Bauteile gewogen, um etwaige Unterschiede in der verwendeten Materialmenge zu erkennen. Die Ergebnisse dieser Messungen werden in Tabelle 4-1 und Tabelle 4-2 dargestellt. Die Bezeichnungen Links, Mitte, Rechts beschreiben jeweils die drei Arme der Bauteile, wenn sie von der Seite betrachtet werden, an der die Nummerierung angebracht ist. Anzumerken ist, dass die Messungen alle in der Mitte des Armes durchgeführt werden und durch die Toleranzen bei der Fertigung die Durchmesser auch in Längsrichtung variieren.

Tabelle 4-1: Messergebnisse T-Stück.

Teilnummer	Durchmesser [cm]						Gewicht [g]
	Links 1	Links2	Mitte 1	Mitte 2	Rechts 1	Rechts 2	
1	29,17	29,30	29,08	29,04	28,75	29,46	230,55
2	29,19	29,15	29,13	28,99	29,40	29,13	230,66
3	29,28	28,95	29,18	28,90	29,20	29,30	227,37
4	29,34	28,86	29,52	29,02	29,30	29,18	230,19
5	29,23	28,92	28,90	29,00	28,98	29,24	213,73
6	29,42	29,04	29,06	29,13	29,62	29,10	237,43
7	29,33	28,80	29,03	29,00	29,29	29,10	225,66
8	28,93	29,30	29,00	28,98	29,47	29,04	222,29
9	29,27	28,88	29,00	29,28	29,34	28,92	236,71
10	29,25	28,82	29,33	28,98	28,95	29,25	223,46
11	28,90	29,50	29,00	29,10	28,90	29,42	222,35
12	28,87	29,42	29,38	28,92	29,32	28,94	240,66
13	28,98	29,39	29,01	28,96	29,31	28,85	231,11
14	29,31	29,03	29,05	29,00	29,38	28,87	223,20
15	28,84	29,32	28,92	29,04	29,34	28,74	232,90
16	29,00	29,19	29,22	28,95	28,81	29,50	227,38
17	29,36	28,99	29,10	28,83	29,26	28,91	224,80
18	28,92	29,24	28,82	29,00	29,30	28,92	221,99
19	28,89	29,41	29,14	28,96	29,05	29,31	228,96
20	28,95	29,24	29,10	28,96	29,31	28,92	234,19
21	29,44	28,96	29,00	28,96	29,46	28,77	224,75
22	29,20	28,92	29,16	28,93	29,20	28,93	226,10
23	29,43	29,23	29,05	29,09	29,48	29,14	232,90
24	29,29	28,85	29,22	29,07	29,38	28,83	222,21
25	29,17	28,85	28,98	29,10	29,22	29,00	224,48
26	29,23	29,13	29,13	28,97	29,42	28,88	224,47
27	29,36	28,91	29,18	28,93	29,14	28,78	221,17
28	29,48	29,00	29,05	29,04	29,31	28,97	225,55
29	29,31	29,12	29,10	28,95	29,44	29,13	238,27
30	29,24	29,08	29,23	29,04	29,23	29,14	233,64

Tabelle 4-2: Messergebnisse Eckstück.

	Durchmesser [cm]						Gewicht [g]
31	29,42	29,03	29,14	28,95	29,07	29,12	313,11
32	29,04	29,04	29,23	28,98	29,41	29,09	308,42
33	29,29	29,25	29,24	29,09	29,05	28,98	317,14
34	29,15	28,90	29,04	28,97	29,20	28,90	311,06
35	29,06	28,99	29,27	29,35	29,23	29,02	325,37
36	29,26	29,09	29,12	29,30	29,16	29,08	309,70
37	29,35	28,92	29,19	29,02	29,32	29,01	312,76
38	29,21	29,03	29,15	28,72	28,98	29,26	314,76
39	29,29	29,06	29,28	29,04	29,20	29,17	315,02
40	29,12	28,83	29,15	29,18	29,09	28,96	308,94
41	28,85	28,96	29,19	29,19	29,24	29,23	317,07
42	29,13	29,02	29,25	28,98	29,19	29,06	318,87
43	28,98	28,99	29,12	29,15	29,08	29,12	305,55
44	29,13	29,10	29,33	29,13	29,27	29,02	308,71
45	29,24	29,14	29,11	29,05	29,05	29,09	310,21
46	29,12	29,08	29,11	29,11	28,80	28,96	308,59
47	29,22	29,10	29,00	29,15	28,67	28,73	301,65
48	29,17	29,14	29,07	29,15	29,07	28,98	307,73
49	28,95	29,34	29,24	29,10	29,27	28,89	311,49
50	29,14	29,11	29,17	28,90	29,38	29,09	317,90
51	29,28	29,08	29,11	29,12	29,09	29,08	310,85
52	29,31	29,25	29,03	29,15	29,15	28,91	319,91
53	29,05	28,99	28,92	29,06	29,25	28,76	301,15
54	29,21	29,12	29,21	28,81	29,22	28,92	317,86
55	29,00	29,35	29,25	29,21	29,18	29,17	314,69
56	29,01	28,87	28,84	29,27	29,18	28,97	305,00
57	29,23	29,20	29,17	29,18	29,18	29,09	321,44
58	29,08	29,13	29,30	28,91	29,18	29,19	314,06
59	28,92	29,07	29,05	29,15	29,19	28,87	301,07
60	29,06	29,34	28,99	29,23	29,00	29,10	313,29
Stdabw.:	0,17	0,17	0,13	0,12	0,19	0,17	

Bei Betrachtung von Tabelle 4-1 und Tabelle 4-2 fällt auf, dass der Durchmesser der Arme, der in der Zeichnung mit 29 mm gegeben ist, in den meisten Fällen etwas überschritten wird. Die Standardabweichung über alle 60 Teile ist in der letzten Zeile angegeben. Die Abweichungen liegen allerdings im mit der Firma vereinbarten Toleranzbereich D1 nach VDG P690. Auch beim Gewicht liegt keine allzu große Streuung vor. Bereits zu diesem Zeitpunkt ist absehbar, dass die engen Toleranzen, die im derzeitigen Stadium der Kleberentwicklung gefordert sind, nicht ohne mechanische Nachbearbeitung verwirklicht werden können. Ein Überdrehen der Bauteile ist also zwingend erforderlich. Hierbei ist anzumerken, dass es von Vorteil ist, dass der etwas hochwertigere Werkstoff gewählt wurde, da auch mit einer etwas geringeren Wandstärke noch genügend Festigkeit vorhanden ist.

4.3 Chemische Analyse

Die Werte, welche in Tabelle 4-3 angegeben sind, werden mit der Ausnahme von Kohlenstoff am ICP gemessen. Diese Elemente werden bis auf das Silizium gemeinsam bestimmt, nachdem das Gerät auf diese Elemente hin geeicht wurde. Die angegebenen Normwerte sind dem Stahlschlüssel [44] entnommen. Die Genauigkeit der Messungen des ICP liegen bei 5 % vom angegebenen Wert, die des Funkenspektrometers bei 2 %. Der Wert von Kohlenstoff beispielsweise hat also lediglich einen Streubereich von $\pm 2,4 \cdot 10^{-3}$.

Tabelle 4-3: Ergebnisse der chemischen Analyse.

Element	Gemessener Wert [%]	Sollwert Norm [%]
C	0,12	0,12 - 0,18
Si	0,12	$\leq 0,20$
Mn	0,82	0,80 – 1,10
P	0,005	$\leq 0,020$
S	0,004	$\leq 0,015$
Cr	1,46	1,25 – 1,5
Mo	0,90	0,80 – 1,00
V	0,27	0,20 – 0,30

Wie anhand von Tabelle 4-3 einfach abgelesen werden kann, sind alle Werte innerhalb der Norm, die Werte für Schwefel und Phosphor unterschreiten den erlaubten Grenzwert deutlich. Der Kohlenstoffgehalt liegt am unteren Ende des möglichen Bereichs, alle anderen Elemente sind mitten im vorgegebenen Intervall. Eine Gusstraube umfasst nur zwölf Teile und der verwendete Induktionsofen kann nur Schmelze für eine Gusstraube bereitstellen. Deshalb wird die chemische Zusammensetzung der Bauteile etwas variieren. Im Nachhinein kann unmöglich festgestellt werden, welches der Bauteile aus welchem Abgussvorgang stammt, und daher wird nur ein Bauteil exemplarisch untersucht.

4.4 Härtemessung

Die folgenden Graphiken sollen die bei der Härtemessung ermittelten Ergebnisse veranschaulichen. Anzumerken ist, dass sämtliche Werte in HV 30 angegeben sind.

Die Abbildung 4-14 und Abbildung 4-15 zeigen das Ergebnis der Härtemessungen.

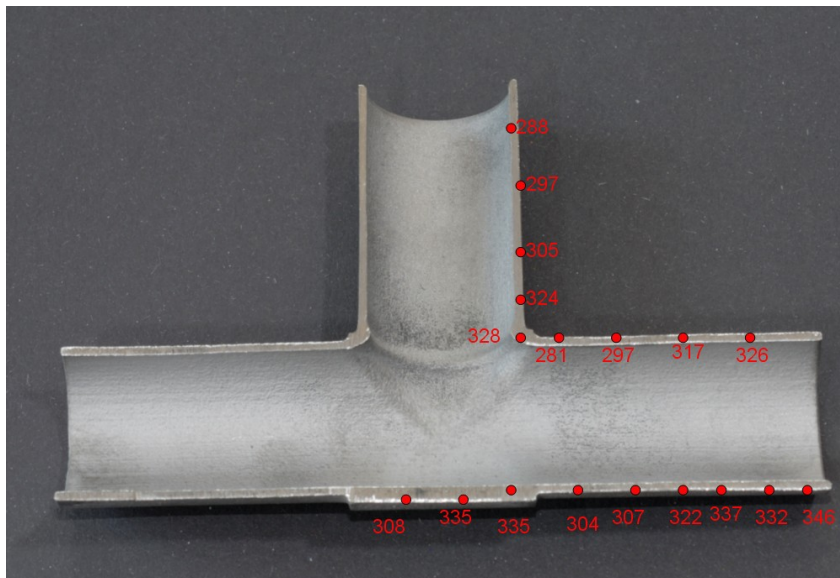


Abbildung 4-14: Ergebnisse Härtemessung.

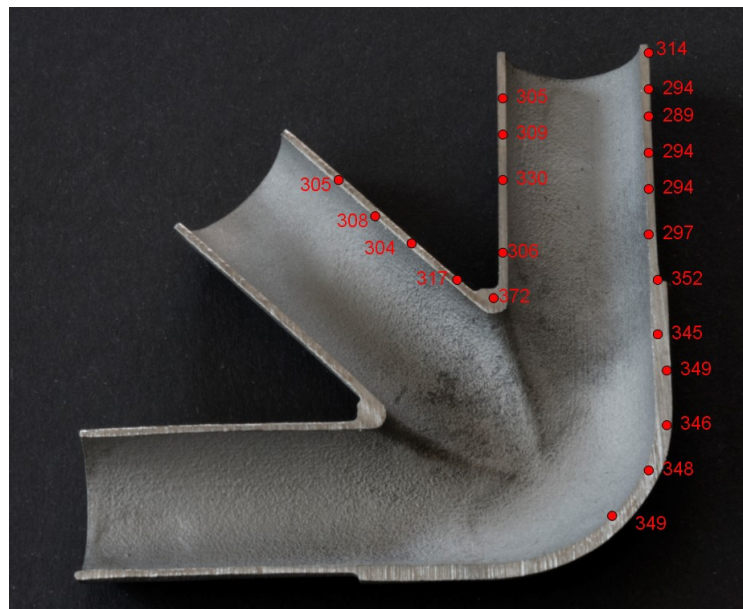


Abbildung 4-15: Ergebnisse Härtemessung.

Bei Betrachtung der Messwerte ist zu erkennen, dass im dickeren Bereich unabhängig vom Bauteil eine höhere Härte gemessen wird. Dies ist insofern bemerkenswert, als dass die Verteilung der Härtewerte, so sie überhaupt unregelmäßig sein sollte, spiegelverkehrt erwartet worden ist. Durch die schnellere Abkühlgeschwindigkeit bei dünneren Wandstärken wäre eine höhere Härte im dünnen Abschnitt des Bauteils logisch. Die Ursachenforschung für dieses Phänomen wird in Kapitel 4.7 bei der Gefügeuntersuchung weitergeführt.

4.5 Zugfestigkeit und Bruchdehnung

Die Ergebnisse der Zugversuche werden in der folgenden Tabelle 4-4 angegeben. Im Anschluss daran sind die ermittelten Kurven abgebildet. In der letzten Zeile ist die Standardabweichung für die jeweilige Spalte angegeben.

Tabelle 4-4: Ergebnisse Zugversuch.

Probe	R _{p0,2} [Mpa]	R _m [Mpa]	A [%]
9_1	718	853	11,98
9_2	813	949	13,37
13_1	840	989	13,35
13_2	730	862	12,83
25_1	665	834	12,96
25_2	853	1010	9,45
25_3	782	920	10,98
Stdabw.	69,63	69,37	1,46

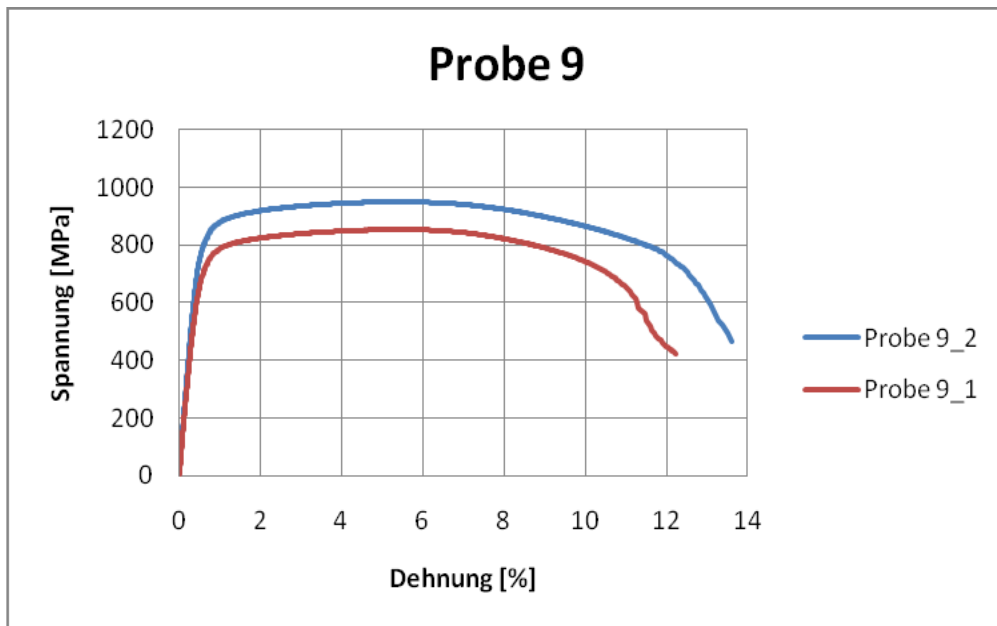


Abbildung 4-16: Spannungs-Dehnungsdiagramm Bauteil 9.

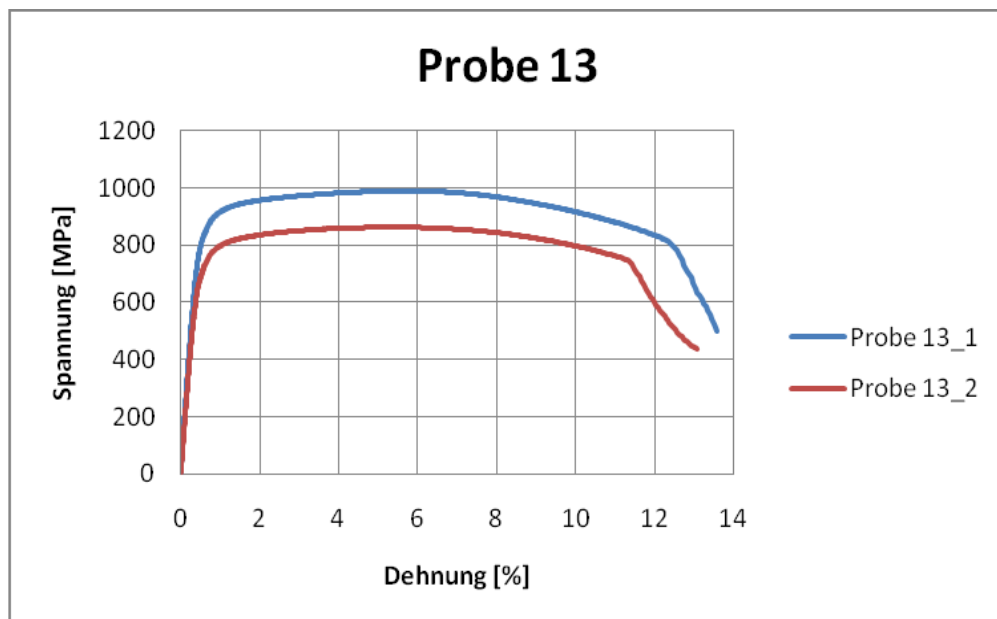


Abbildung 4-17: Spannungs-Dehnungsdiagramm Bauteil 13.

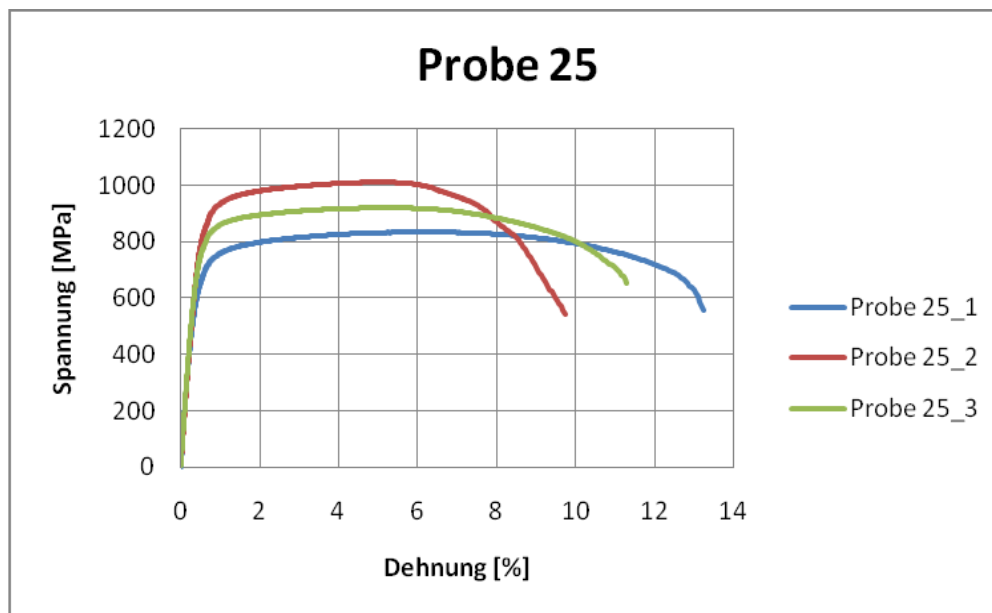


Abbildung 4-18: Spannungs-Dehnungsdiagramm Bauteil 25.

Wie die Spannungs-Dehnungsdiagramme zeigen, werden bei sämtlichen Proben, auch wenn sie aus dem selben Bauteil stammen, leicht unterschiedliche Kurven ermittelt. Die Zugfestigkeit liegt bei allen Proben zwischen 800 und 1000 N/mm². Die Probe 25_2 weist eine sehr viel geringere Bruchdehnung auf als alle anderen Proben. Hier ist die Ursache mit freiem Auge zu erkennen: Ein relativ großer Lunker in der Probe lässt die Bruchdehnung deutlich absacken, durch seine Kerbwirkung erhöht er allerdings die Zugfestigkeit. Die Unterschiede zwischen den restlichen Proben können von der Anzahl der vorhandenen Poren und Mikrolunker verursacht werden. Der große Lunker wird, um den Defekt genau zu analysieren, in einem Rasterelektronenmikroskop untersucht. Diese Untersuchung wird gesondert im Kapitel 4.8.2 behandelt.

Vergleicht man nun die tatsächlich gemessenen Werte mit den theoretisch erzielbaren aus Kapitel 2.1, so ist einfach zu erkennen, dass weder die Werte für die Dehn- noch die Streckgrenze erreicht werden. Dafür verfügen die gelieferten Bauteile über eine sehr viel bessere Bruchdehnung. Dies ist, wenn man den Referenzwert betrachtet, weniger ein Nachteil als vielmehr eine sehr positive Entwicklung. Die Dehn- und Streckgrenze der Bauteile liegen ohnehin immer noch einiges über den Werten, die erreicht werden müssen, und dennoch ist auch über eine für Gussteile gute Bruchdehnung genügend Sicherheit vorhanden.

4.6 Rauheit

Die Messungen werden sowohl an der Außen- als auch an der Innenoberfläche durchgeführt. Aufgrund der Bauart des Messgeräts sowie der Bauteilgeometrie können nur jene Bereiche des Bauteils gemessen werden, die mit dem Messfühler erreicht werden können, wenn das Bauteil ruhig liegt, da jede Bewegung einen Messfehler zur Folge hat.

Bei Betrachtung der ermittelten Ergebnisse fällt auf, dass die Rauigkeit an der Außenseite variiert. Dieser Effekt ist aber einfach zu erklären. Die Stellen, die über die geringere Rauigkeit verfügen, sind jene Stellen, an deren Innenseite die Vertiefungen durch die Speisung des Gießsystems auffindbar sind. Es handelt sich also um die Bereiche, in denen die Angüsse abgeschliffen wurden und sich auf diese Art eine glattere Oberfläche einstellt. Diese sind in der Tabelle 4-5 in der Spalte „geschliffen“ angeführt. Weiters ist anzumerken, dass an der Innenoberfläche nur die Seite ohne die Einfallstelle gemessen werden kann, da der Messfühler bei jeder möglichen Anordnung zumindest einmal jenen vertieften Bereich durchläuft und somit das Ergebnis massiv verfälschen würde.

Tabelle 4-5: Gemittelte Ergebnisse Rauigkeitsmessung.

Durchschnittsergebnisse			
[μm]	geschliffen	ungeschliffen	innen
R _a	4,55	7,61	9,04
R _z	39,92	57,50	64,59

Die exakten Ergebnisse der Rauigkeitsmessungen, welche an sechs Teilen durchgeführt wurden, sind in Anhang A.1 zu finden.

4.7 Gefügeuntersuchung am Lichtmikroskop

Damit das Gefüge gut zu erkennen ist und auch Details festgehalten werden können, werden von jedem Bauteil die jeweils dicken und dünnen Bereiche am Rand und in der Mitte gezeigt. Die untersuchten Bereiche sind in Abbildung 4-19 und Abbildung 4-28 dargestellt, damit die gezeigten Gefüge einfach zugeordnet werden können. Aufgrund der Symmetrie der Bauteile wird wiederum nur ein halbes Bauteil analysiert. Sämtliche untersuchten Stellen werden einmal mit 200facher und einmal mit 1000facher Vergrößerung abgebildet. So kann gewährleistet werden, dass sowohl ein guter Überblick als auch eine genauere Betrachtung möglich ist.

4.7.1 Bauteil 1

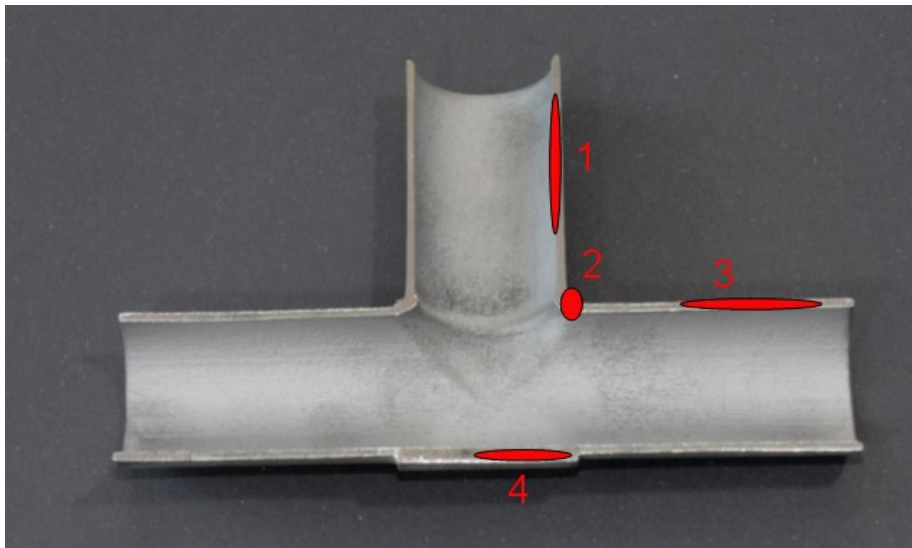


Abbildung 4-19: Untersuchte Bereiche T-Stück.

4.7.1.1 Bereich 1

Der Rand jeder im Folgenden gezeigten Probe weist eine für wärmebehandelte Stahlgussteile typische Auffälligkeit auf. Es ist ein entkohlter Bereich zu sehen. Des Weiteren ist am äußersten Rand ein Saum mit großteils runden, dunklen Einschlüssen zu erkennen. Um diesen Saum eindeutig bestimmen zu können, wird dieser im Kapitel 4.8.1 mithilfe der Rasterelektronenmikroskopie analysiert.

Bei dem Gefüge der Probe handelt es sich um Bainit/Übergangsgefüge. Diese Beobachtung geht auch Hand in Hand mit den erfolgten Zugversuchen, bei denen eine sehr gute Zugfestigkeit bei ausreichender Bruchdehnung gemessen werden konnte. Auffällig sind jedoch einige hellere Inseln, die auch die Problematik der in Kapitel 4.4 durchgeführten Härtemessung erklärt. Hierbei handelt es sich um Ferritinseln, die das Gefüge weicher machen. Die Entstehung dieser Ferritinseln ist auf eine Entkohlung über den gesamten Querschnitt zurückzuführen, da diese Bauteile abgedeckt wurden, um eine Vergütung aus der Gusswärme heraus durchzuführen. Da dies an Luft geschah, war genügend Sauerstoff vorhanden, um mit dem im Bauteil vorhandenen Kohlenstoff zu reagieren und als Kohlenmono- oder dioxid in die Atmosphäre zu entweichen.

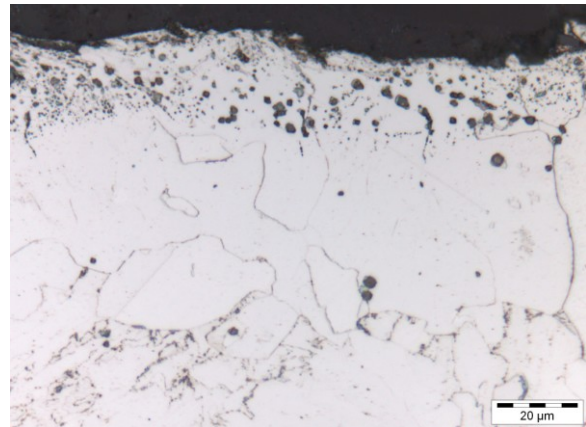
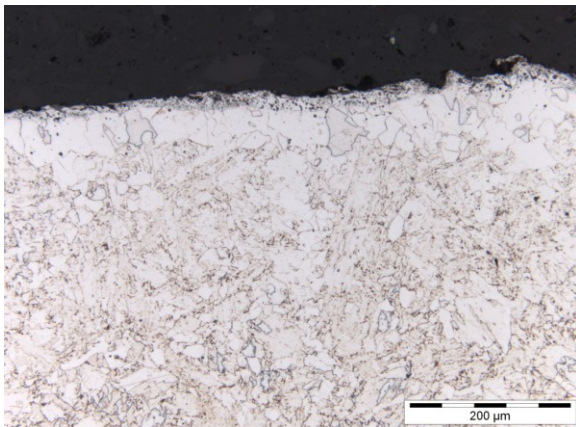


Abbildung 4-20: Bereich 1, Rand, Ätzung mit 2%iger HNO_3 .

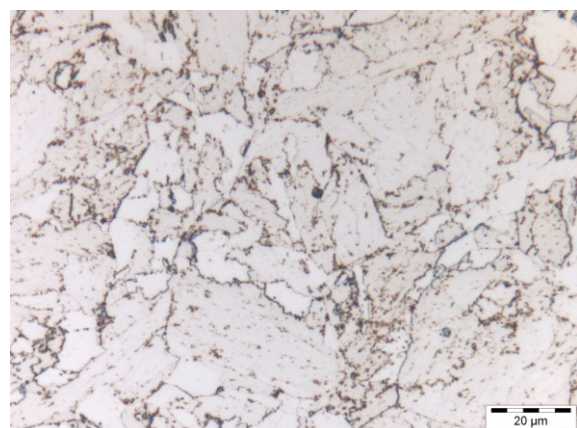
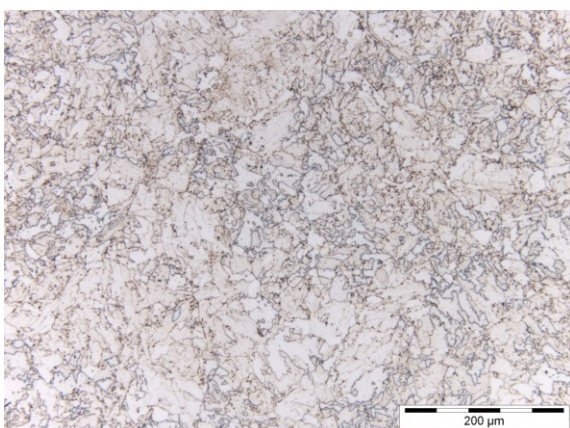


Abbildung 4-21: Bereich 1, Mitte, Ätzung mit 2%iger HNO_3 .

4.7.1.2 Bereich 2

In diesem Bereich ist das Gefüge quasi identisch mit jenem aus Bereich 1.

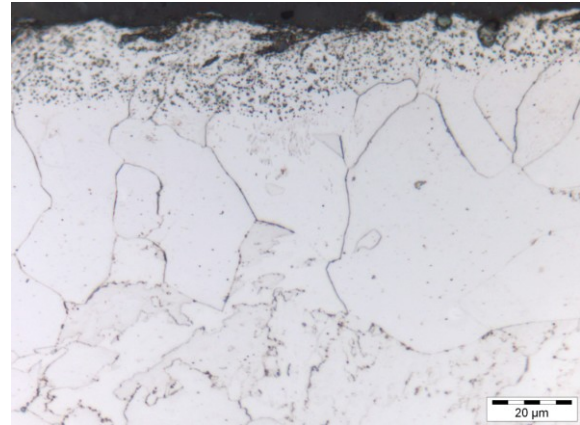
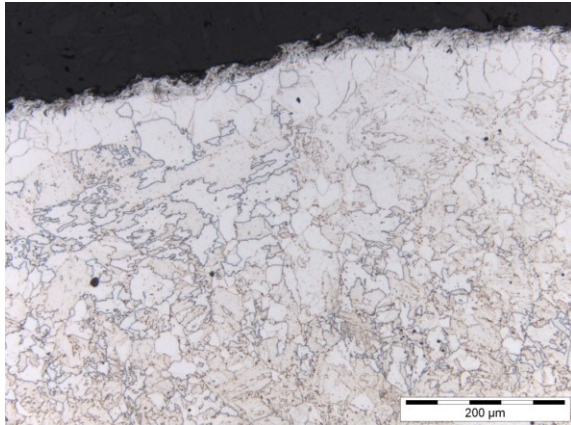


Abbildung 4-22: Bereich 2, Rand, Ätzung mit 2%iger HNO_3 .

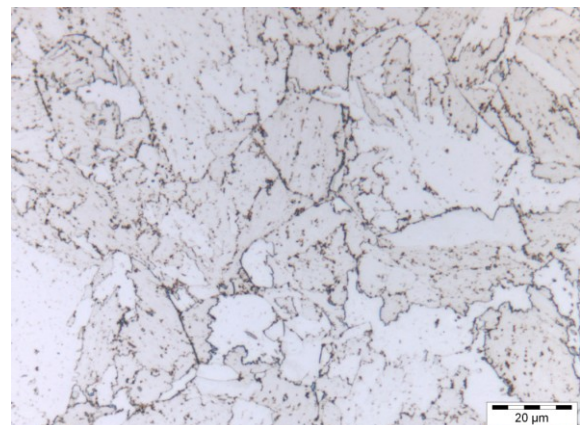
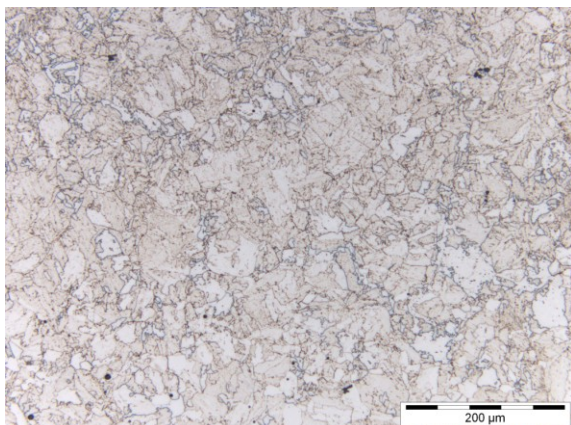


Abbildung 4-23: Bereich 2, Mitte, Ätzung mit 2%iger HNO_3 .

4.7.1.3 Bereich 3

Auch dieser Bereich unterscheidet sich von den bisher gezeigten nur marginal.

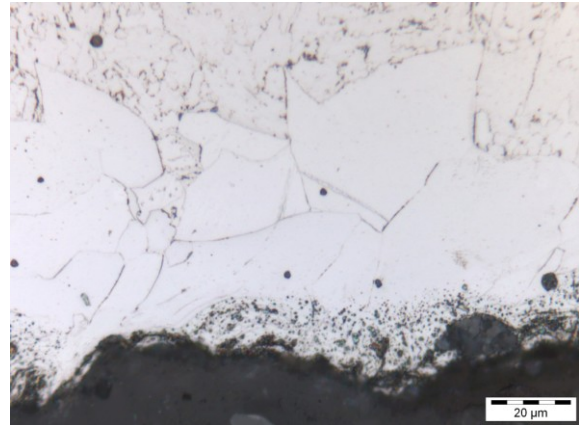
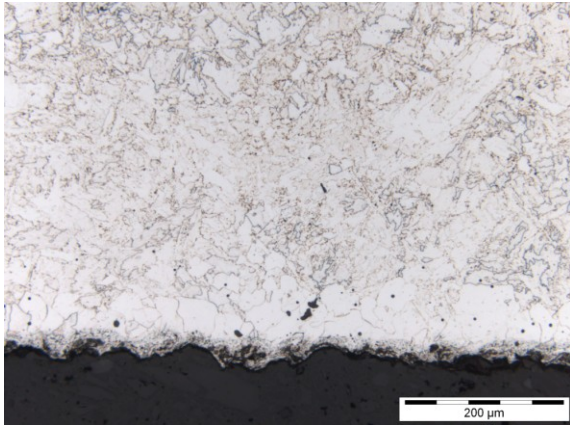


Abbildung 4-24: Bereich 3, Rand, Ätzung mit 2%iger HNO_3 .

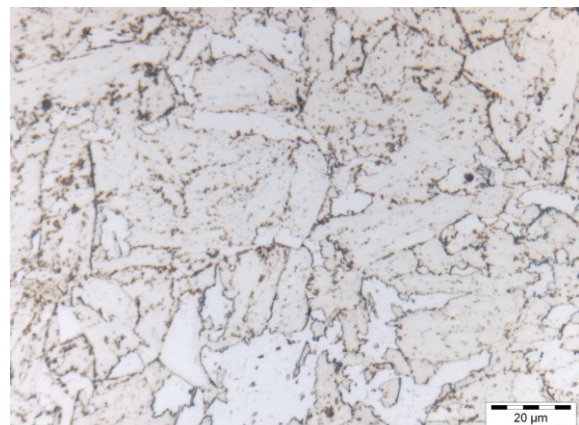
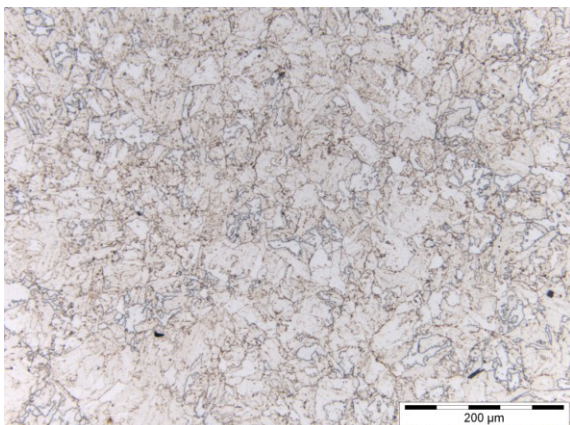


Abbildung 4-25: Bereich 3, Mitte, Ätzung mit 2%iger HNO_3 .

4.7.1.4 Bereich 4

Dieser Bereich ist der erste, der sich unterscheidet. Das Gefüge ist hier um einiges feiner, was sich auch in der Härtemessung widerspiegelt, da sich ja ein direkter Zusammenhang zwischen Härte und Festigkeit herstellen lässt und gute Festigkeiten nur mit feinem Gefüge erzielt werden können.

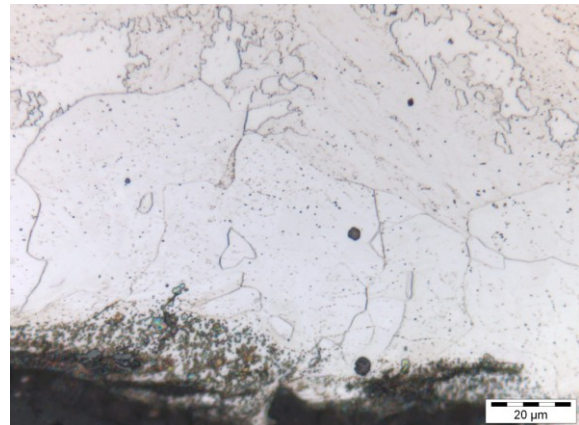
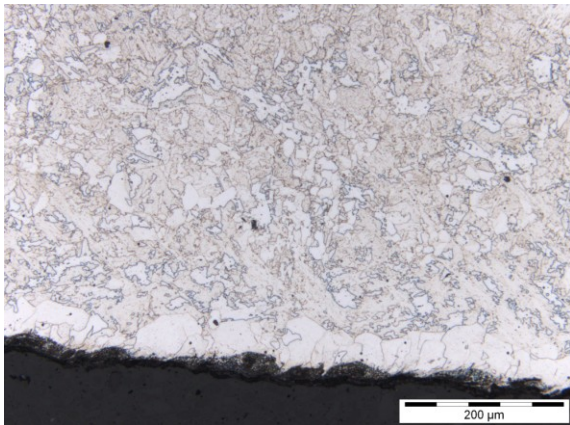


Abbildung 4-26: Bereich 4, Rand, Ätzung mit 2%iger HNO_3 .

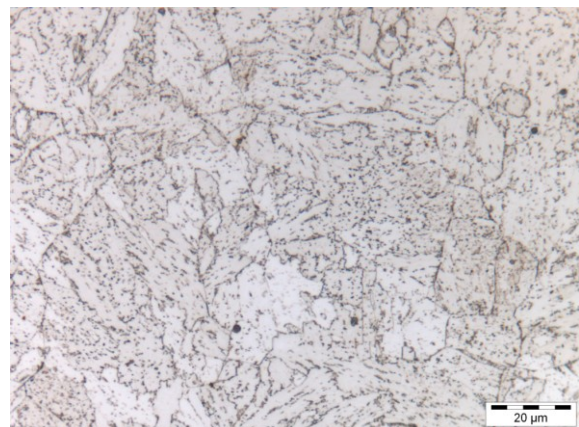
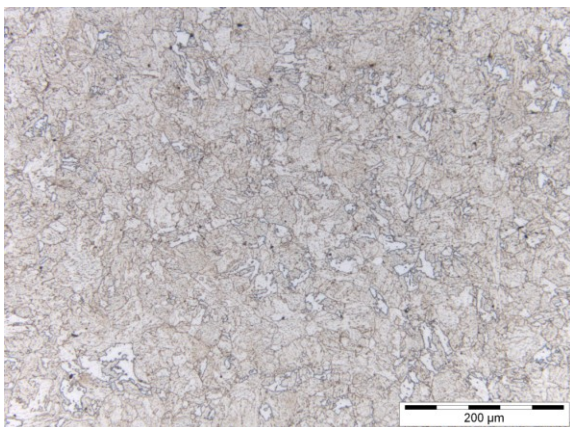


Abbildung 4-27: Bereich 4, Mitte, Ätzung mit 2%iger HNO_3 .

4.7.2 Bauteil 2



Abbildung 4-28: Untersuchte Bereiche Eckstück.

4.7.2.1 Bereich 5

Auch bei diesem Bauteil ist eine Randentkohlung zu erkennen. Ebenso ist der Saum am Rand vorhanden. Auch bei diesem Gefüge handelt es sich um Bainit mit Ferritinseln. Von diesem Bauteil wird auch eine weitere chemische Analyse durchgeführt, um den Kohlenstoff im dicken sowie im dünnen Bereich gesondert zu ermitteln. Tabelle 4-6 zeigt das Ergebnis dieser Analyse. Es wird festgestellt, dass bei dieser Probe der Mindestkohlenstoffgehalt, der in der in Kapitel 3.3 gegebenen Norm von 0,12 % bereits im dicken Bereich unterschritten wird und im dünnen Bereich nur 50 % des geforderten Gehalts gemessen wird.

Tabelle 4-6: Ergebnis chemische Analyse.

Wandstärke	Dick	Dünn
[%C]	0,10	0,06

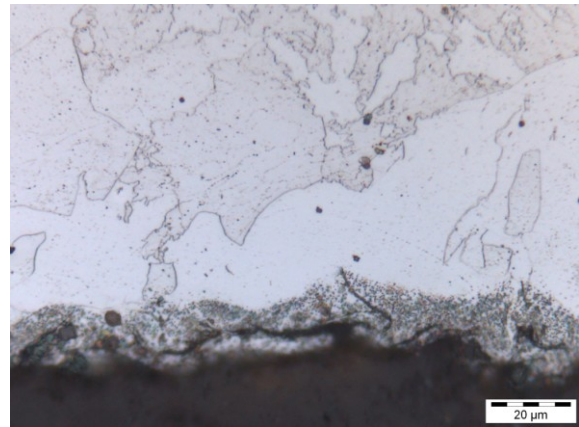
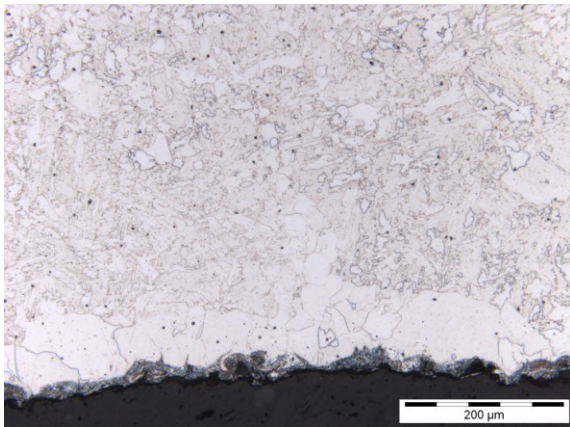


Abbildung 4-29: Bereich 5, Rand, Ätzung mit 2%iger HNO_3 .

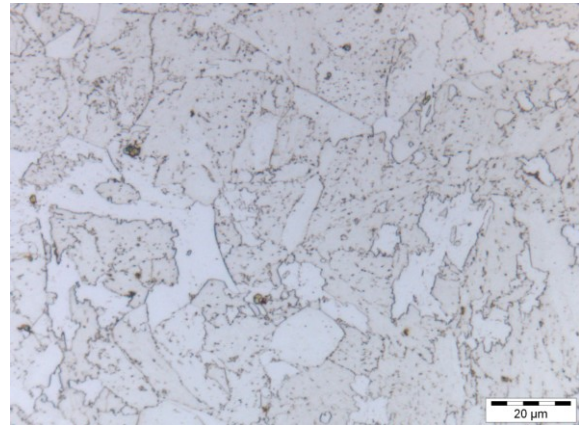
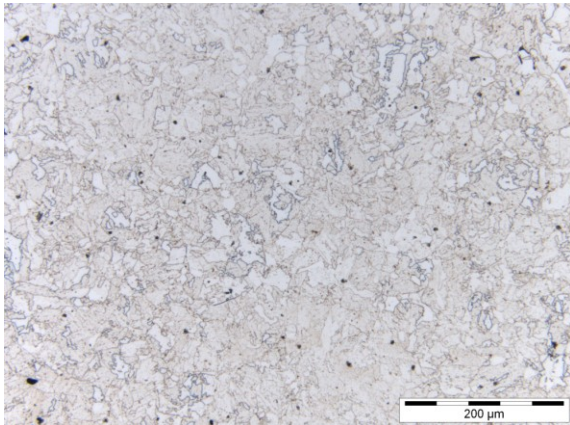


Abbildung 4-30: Bereich 5, Mitte, Ätzung mit 2%iger HNO_3 .

4.7.2.2 Bereich 6

In diesem Bereich wird die höchste Härte gemessen. Das Gefüge ist hier sehr fein, und es sind auch nur wenige, verglichen mit den bisher gezeigten Bereichen, kleine Ferritinseln zu sehen.

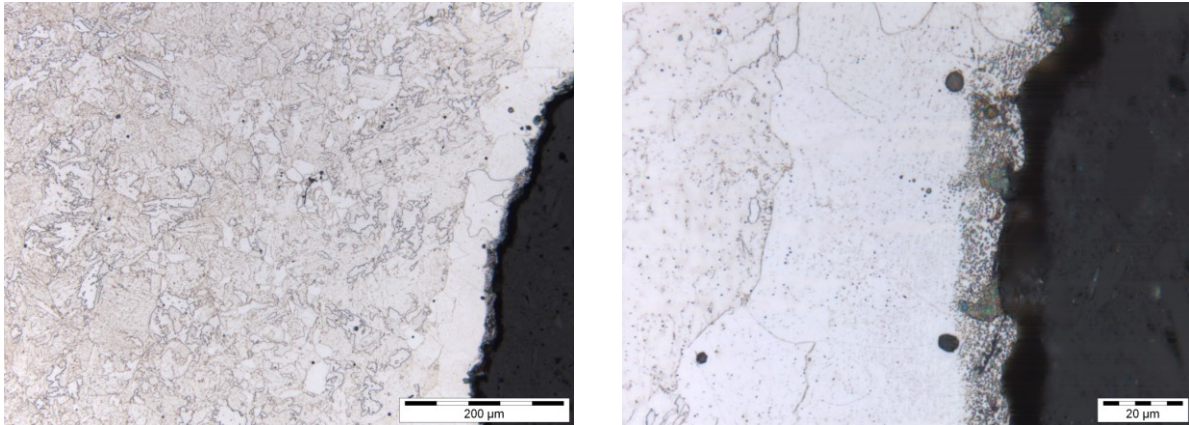


Abbildung 4-31: Bereich 6, Rand, Ätzung mit 2%iger HNO_3 .

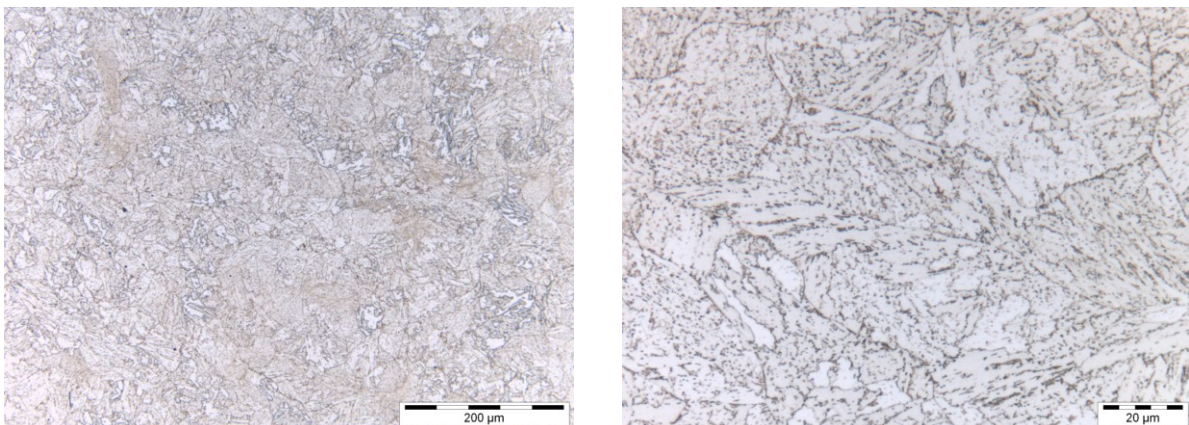


Abbildung 4-32: Bereich 6, Mitte, Ätzung mit 2%iger HNO_3 .

4.7.2.3 Bereich 7

Das Gefüge in Bereich 7 ähnelt dem im zuvor gezeigten Bereich 6, und auch hier wird in der Härtemessung ein hoher Wert ermittelt.

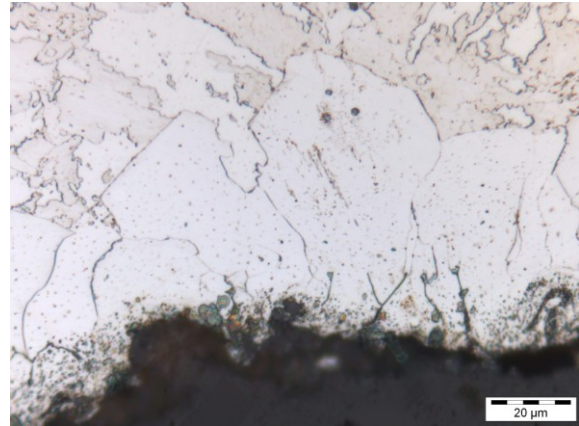
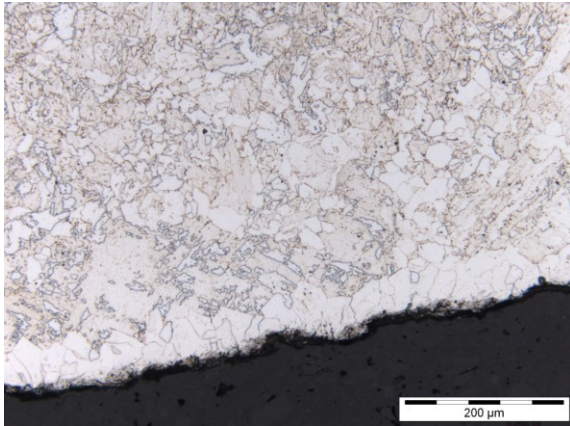


Abbildung 4-33: Bereich 7, Rand, Ätzung mit 2%iger HNO_3 .

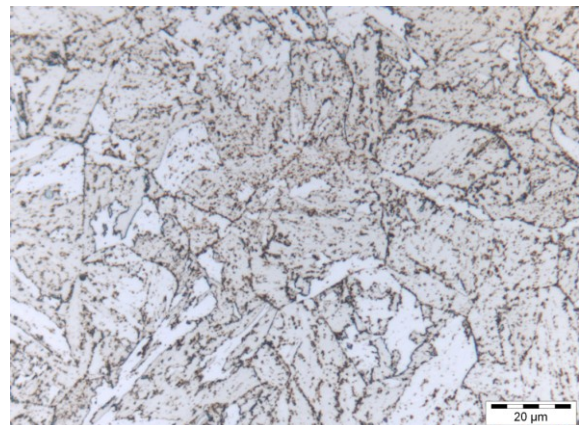
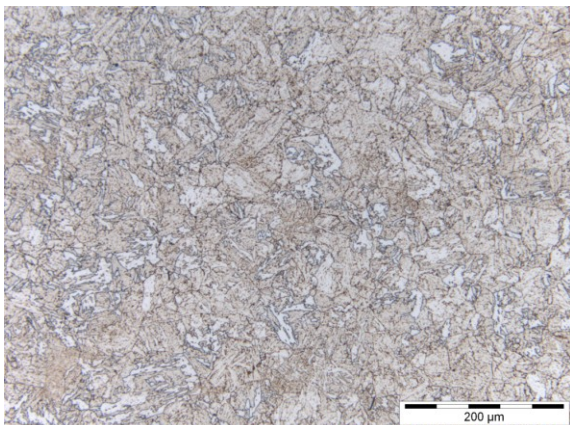


Abbildung 4-34: Bereich 7, Mitte, Ätzung mit 2%iger HNO_3 .

4.8 Rasterelektronenmikroskopie

Es werden zwei Untersuchungen am Rasterelektronenmikroskop durchgeführt. Einerseits soll der Saum am Rand der Bauteile untersucht werden, und andererseits wird die Bruchfläche des Bauteils mit dem klar niedrigsten Bruchdehnungswert begutachtet, um den Fehler zu analysieren.

4.8.1 Untersuchung des Saumes

Um die Auffälligkeiten am Rand zu untersuchen, wird ein neues Abschnitt des T-Stücks präpariert. Da die Teile alle dieselben Merkmale aufweisen, wird ein Bauteilabschnitt, welcher aus Symmetriegründen nicht für das Lichtmikroskop vorbereitet wurde, neu eingebettet. Um die Untersuchung im REM zu erleichtern, wird diese Probe in einer speziellen, leitfähigen Masse eingebettet. Diese Masse hat den Nachteil, dass durch den hohen Graphitgehalt, der sie leitfähig macht, ein Schleifen der Probe erschwert wird. Einerseits verschmutzt die Probe sämtliche Polierscheiben stark und andererseits brechen immer wieder kleine Teile aus der Masse aus, was zu unvermeidlichen Kratzern an der Oberfläche führt.

Die Beschleunigungsspannung, bei der die Bilder aufgenommen werden, beträgt 20 kV. Die Anregungsbirne ist bei dieser Spannung und für das geprüfte Material 1,3 μm tief und hat einen Durchmesser von 2,3 μm . Die Abweichung der chemischen Analyse liegt bei 0,1 %.

Bei der ersten Untersuchung soll analysiert werden, welche chemische Zusammensetzung die runden Teile im Gefüge und am äußersten Rand haben, die im Lichtmikroskop zu beobachten sind. Die folgenden Abbildungen sollen einen Überblick geben und die Ergebnisse zeigen.

Die Abbildung 4-35 zeigt den Randbereich der Probe. In dem Saum vor der im Lichtmikroskop gefundenen Entkohlungszone befindet sich leicht rechts der Mitte ein blitzähnlicher hellgrauer Bereich. Dieser wird, nach Analyse einiger der „schwarzen Punkte“ genauer untersucht.

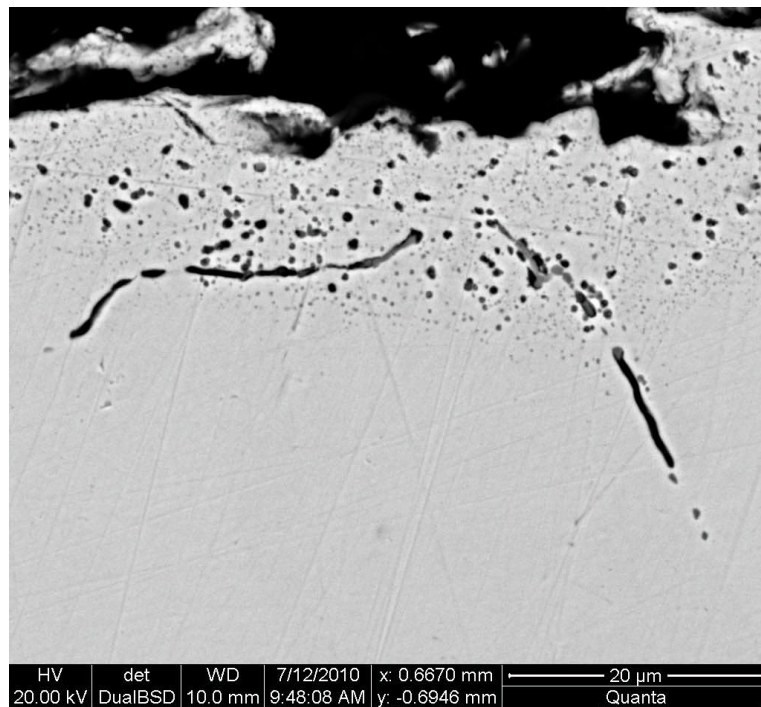


Abbildung 4-35: Übersicht Randbereich.

Als Erstes werden, wie bereits angekündigt, einige der dunklen Flecken analysiert. Die folgende Abbildung 4-36 mit anschließender Tabelle 4-7 zeigt das Ergebnis dieser Untersuchungen.

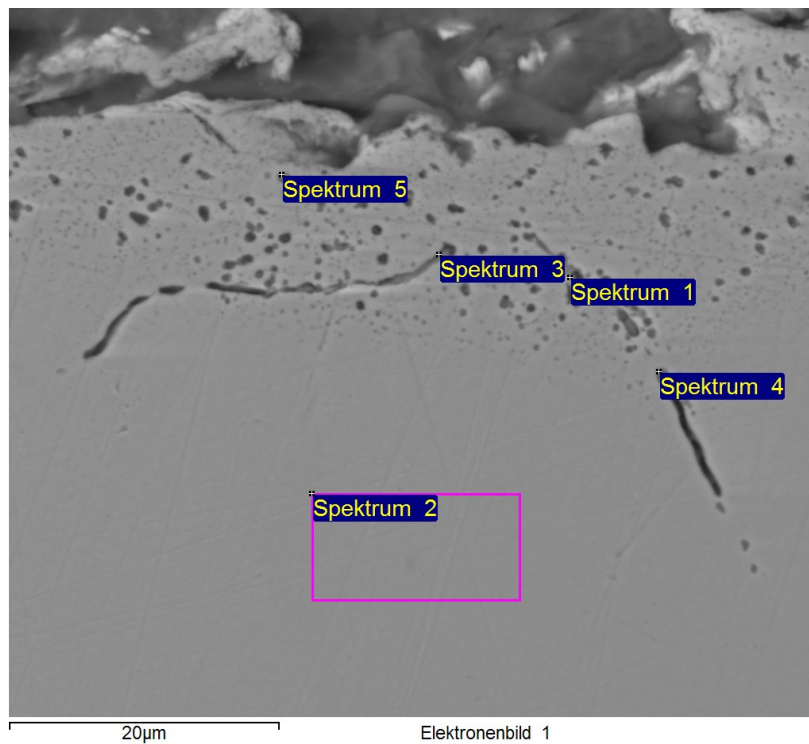


Abbildung 4-36: Untersuchte Stellen.

Tabelle 4-7: Ergebnisse der untersuchten Spektren.

Spektrum	C	O	Si	S	V	Cr	Mn	Fe	Mo	Summe
Spektrum 1	3.75	19.30	2.31		2.17	10.74	6.67	54.24	0.81	100.00
Spektrum 2	1.86					1.63	0.88	95.64		100.00
Spektrum 3	2.38	16.61	0.75		3.86	16.74	6.72	52.92		100.00
Spektrum 4		13.66	0.43		5.52	15.13	8.35	56.90		100.00
Spektrum 5	2.56	13.67	0.64	0.38	1.96	8.12	3.33	69.33		100.00
Max.	3.75	19.30	2.31	0.38	5.52	16.74	8.35	95.64	0.81	
Min.	1.86	13.66	0.43	0.38	1.96	1.63	0.88	52.92	0.81	

Wie man anhand von Tabelle 4-7 sehen kann, handelt es sich bei den „schwarzen Punkten“ vorwiegend um Oxide, hauptsächlich mit Chrom gebildet. Im Fall von Spektrum 5 dürfte auch ein Sulfid direkt neben dem Oxid sein. Die hohen Werte für Kohlenstoff entstehen, da das leitfähige Einbettmittel einen hohen Graphitanteil aufweist.

Als Nächstes wird die in Abbildung 4-37 zu sehende Anomalie und ihre Umgebung komplett analysiert und eine Anreicherung für jedes Element, das gefunden wird, graphisch ausgegeben. Dabei markieren weiße Stellen Positionen, an denen das betreffende Element gefunden wird und schwarze Stellen bedeuten, dass an dieser Position nichts vom Element vorhanden ist.

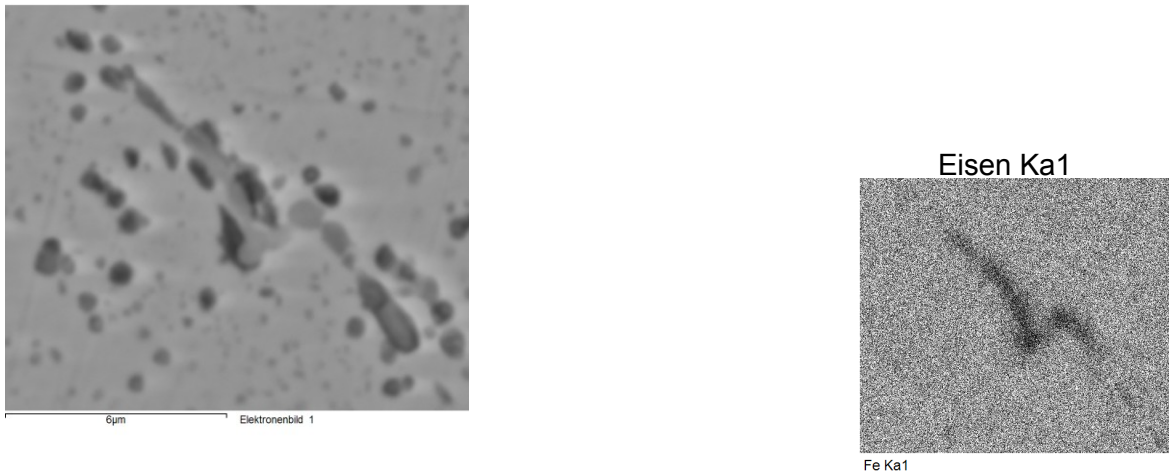


Abbildung 4-37: Übersicht untersuchter Bereich und Ergebnis für Eisen.

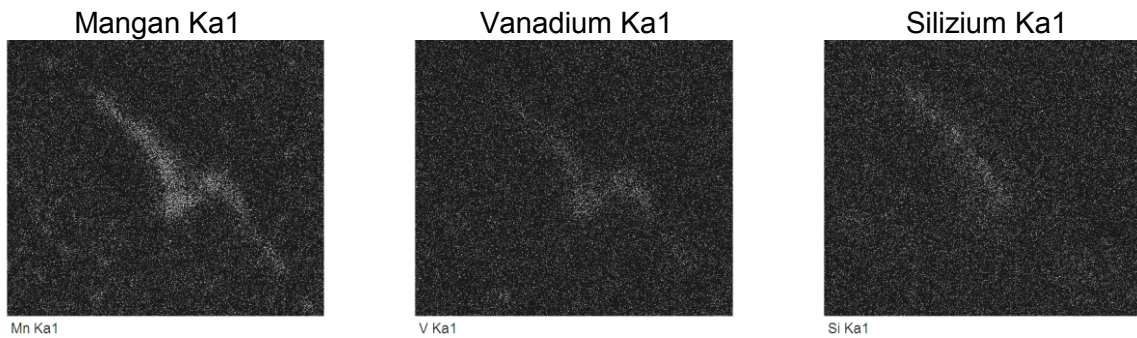


Abbildung 4-38: Ergebnisse für Mangan, Vanadium und Silizium.

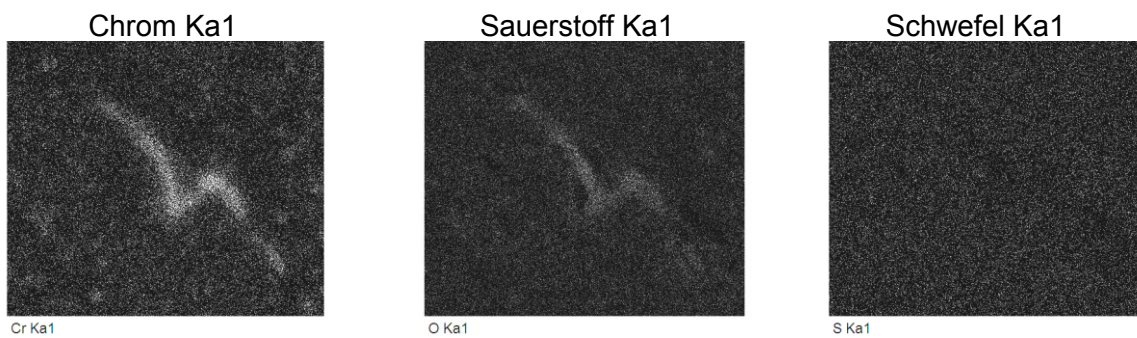


Abbildung 4-39: Ergebnisse für Chrom, Sauerstoff und Schwefel.

Bei diesen Abbildungen (Abbildung 4-37, Abbildung 4-38 und Abbildung 4-39) fällt auf, dass sich praktisch alle in der chemischen Analyse gefundenen Elemente mit Ausnahme des Eisens, also der Matrix, angereichert haben. Je heller ein Bildpunkt erscheint, desto mehr von diesem Element ist an dieser Stelle vorhanden. Die Analyse des Elements Eisen dient bei dieser Untersuchung eigentlich nur als Kontrolle, durch die im Gegensatz zu den anderen Elementen umgedrehte Farbgebung kommt es hier aber auch zu einem starken Kontrast.

Bei der Betrachtung des gesamten Schliffes wird noch ein runder Einschluss gefunden, der ebenfalls analysiert wird. Abbildung 4-40 und Tabelle 4-8 zeigen das Ergebnis der Untersuchung.

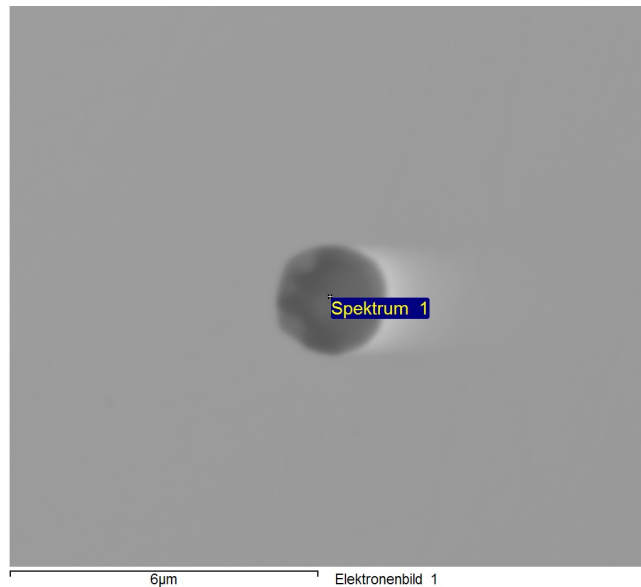


Abbildung 4-40: Runder Einschluss.

Tabelle 4-8: Ergebnisse Analyse runder Einschluss.

Element	O	Al	Si	S	V	Cr	Mn	Fe	Summe
[%]	26.29	9.42	10.58	1.63	0.74	1.25	18.82	31.27	100.00

Über diesen Einschluss wird auch ein sogenannter Linescan durchgeführt, dessen Auswertung wiederum graphisch erfolgt.

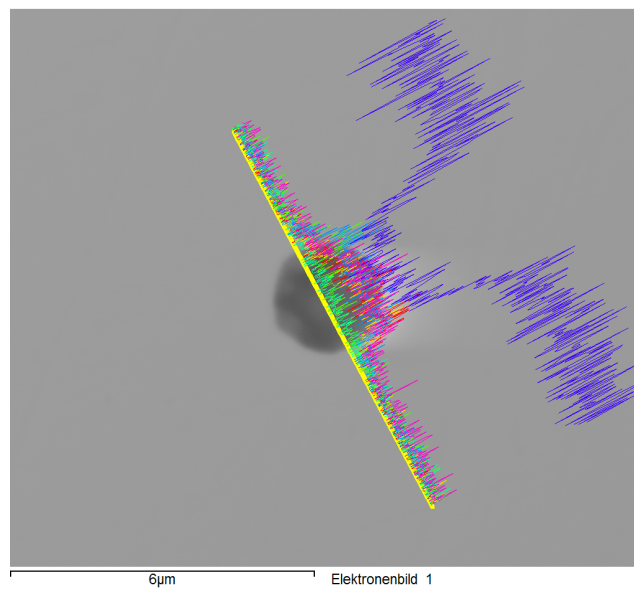


Abbildung 4-41: Markierung untersuchter Bereich plus Ergebnisse.

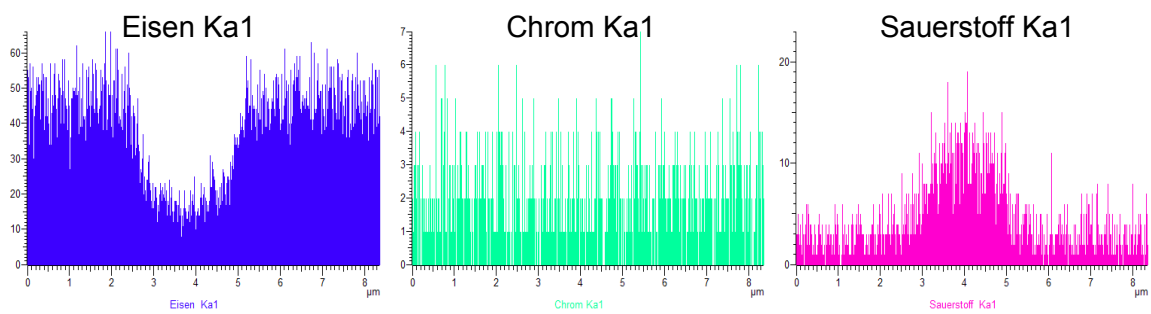


Abbildung 4-42: Verteilung von Eisen, Chrom und Sauerstoff.

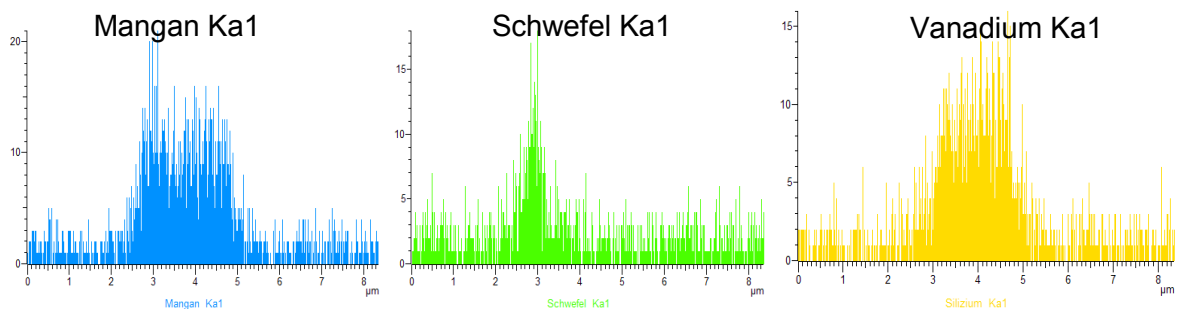


Abbildung 4-43: Verteilung von Mangan, Schwefel und Vanadium.

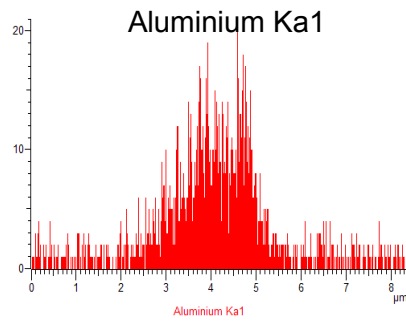


Abbildung 4-44: Verteilung von Aluminium.

Bei Betrachtung der Ergebnis-Graphiken fällt auf, dass in diesem Fall keine Chromanreicherung stattgefunden hat. Auch Schwefel ist nur in einem kleinen Bereich zu finden. Aluminium, Silizium, Mangan und Sauerstoff sind im gesamten Einschluss vorhanden.

An einer anderen Stelle werden schließlich noch plattenförmige Einschlüsse entdeckt. Auch diese werden untersucht und die Ergebnisse in Tabelle 4-9 dargestellt.

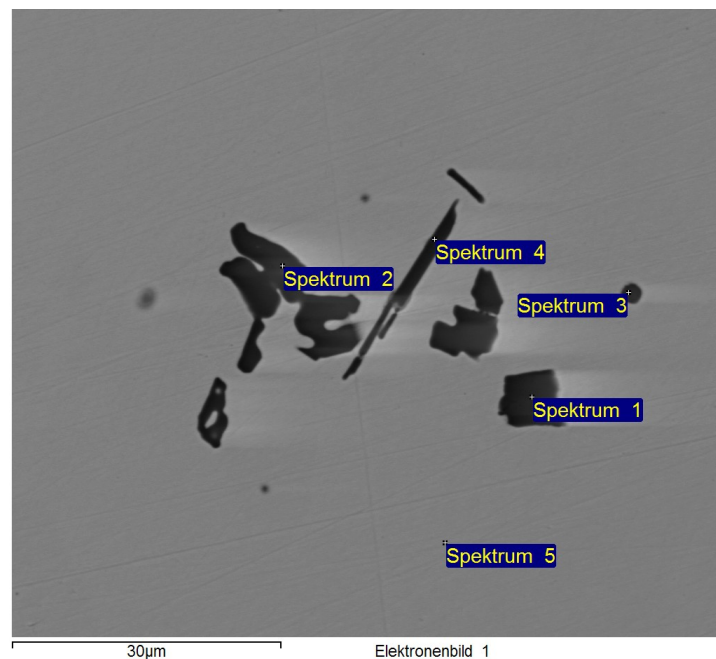


Abbildung 4-45: Plattenförmige Einschlüsse mit hohem Al-Anteil.

Tabelle 4-9: Analyse plattenförmige Einschlüsse.

Spektrum	O	Al	Si	P	S	V	Cr	Mn	Fe	Ir	Summe
Spektrum 1	48.88	49.65							1.47		100.00
Spektrum 2	43.46	44.21					0.35		11.34	0.65	100.00
Spektrum 3	34.09	22.75	3.88		0.71	1.14	1.97	24.49	10.96		100.00
Spektrum 4	40.06	45.52		0.23			0.43		13.76		100.00
Spektrum 5							1.76	1.10	97.14		100.00

Bei diesen Einschlüssen handelt es sich laut der chemischen Analyse hauptsächlich um Al_2O_3 , nur in einem Fall wird ein hoher Mangangehalt gemessen.

4.8.2 Untersuchung Bruchstelle

Die zweite Untersuchung am Rasterelektronenmikroskop wird nach dem Zugversuch durchgeführt. Bei dieser Analyse soll die Ursache der niedrigen Bruchdehnung von Probe 25_2 geklärt werden.

Abbildung 4-46 gibt einen Überblick über fast die gesamte Bruchfläche. Dabei ist der Grund für die niedrigen Bruchdehnungswerte bereits zu erkennen: In der Mitte befindet sich eine sehr große Pore mit einem einzelnen Dendriten, und auch am linken Rand ist eine kleinere Pore mit Dendrit zu erkennen. Die Bearbeitungsriefen der Probe rühren daher, dass sie aus einem ganzen Bauteil mit einer Drehmaschine entnommen wurde und die Wellen bei diesem Vorgang entstanden sind. Die markierten Stellen zeigen jene zwei Bereiche, die in Abbildung 4-47 und Abbildung 4-48 vergrößert dargestellt werden.

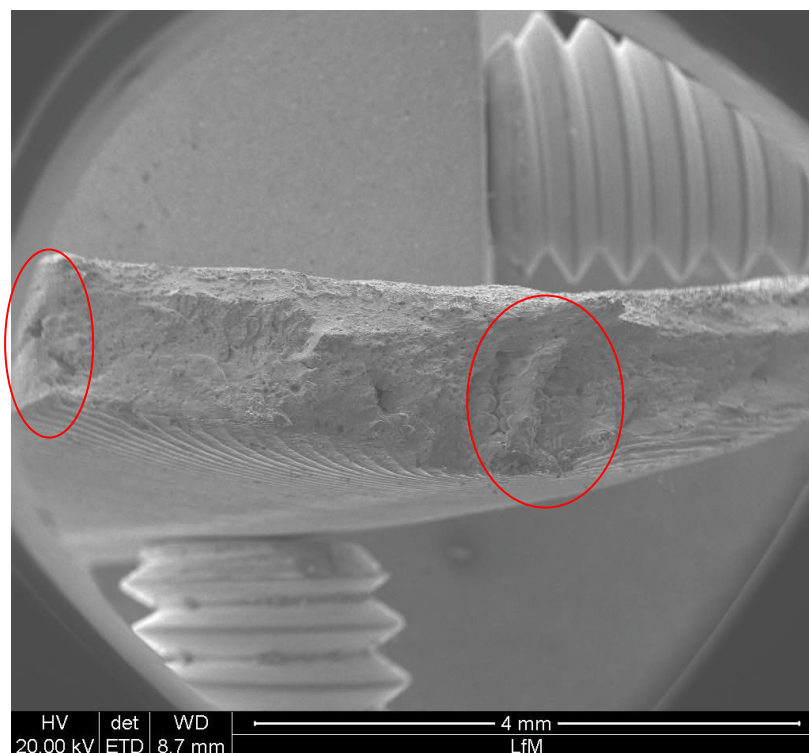


Abbildung 4-46: Gesamte Bruchfläche.

Die folgenden Abbildungen, Abbildung 4-47 und Abbildung 4-48, stellen die Lunker mit den Dendriten genauer dar. Abbildung 4-47 zeigt die Fehlerstelle in der Mitte der Zugprobe und Abbildung 4-48 jene am linken Rand.

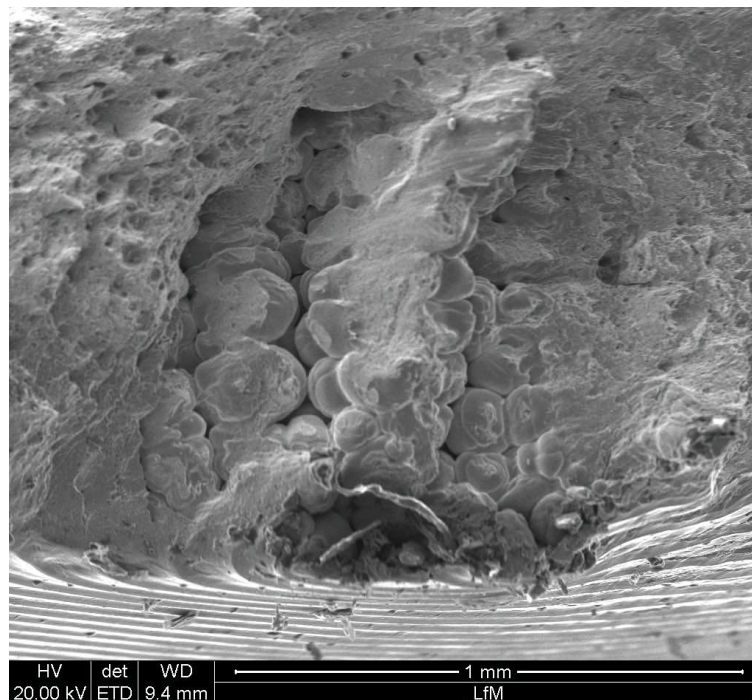


Abbildung 4-47: "Großer" Lunker (ca. 1 mm) in der Mitte.

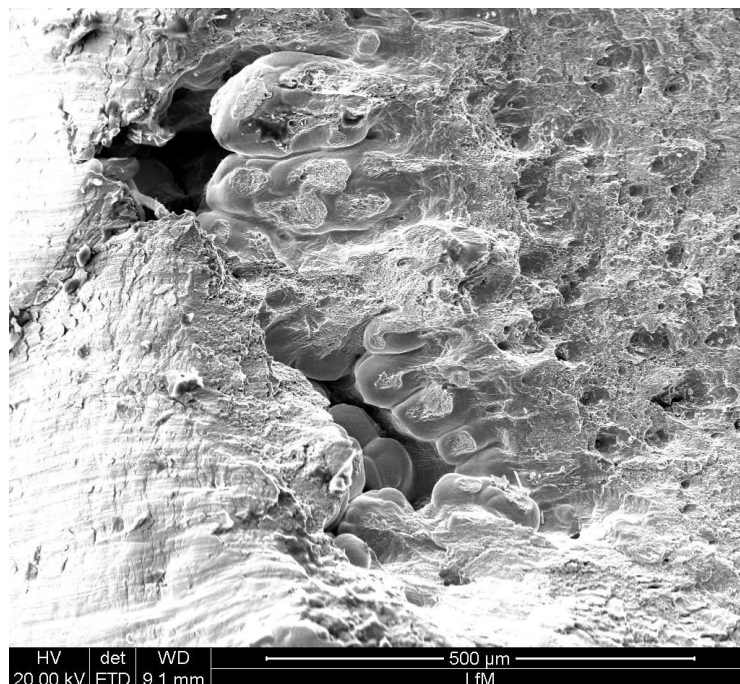


Abbildung 4-48: "Kleinerer" Lunker (ca. 0,5 mm) am Rand.

Die Erstarrungsmorphologie des Stahles ist, wie in Kapitel 2.5 beschrieben, eindeutig dendritisch. Die nun folgenden Abbildungen, Abbildung 4-49 und Abbildung 4-50, zeigen repräsentativ die Restbruchfläche. In Abbildung 4-49 ist ein gewöhnlicher Spaltbruch und in Abbildung 4-50 ein Spaltbruch mit kleineren Ausbrüchen und Poren im Material zu sehen.

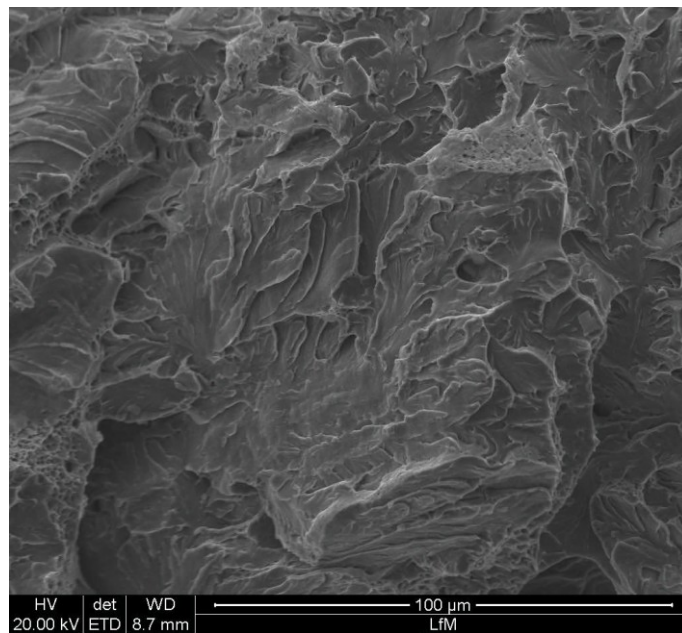


Abbildung 4-49: Spaltbruchfläche der Probe, Bereich ohne Fehler.

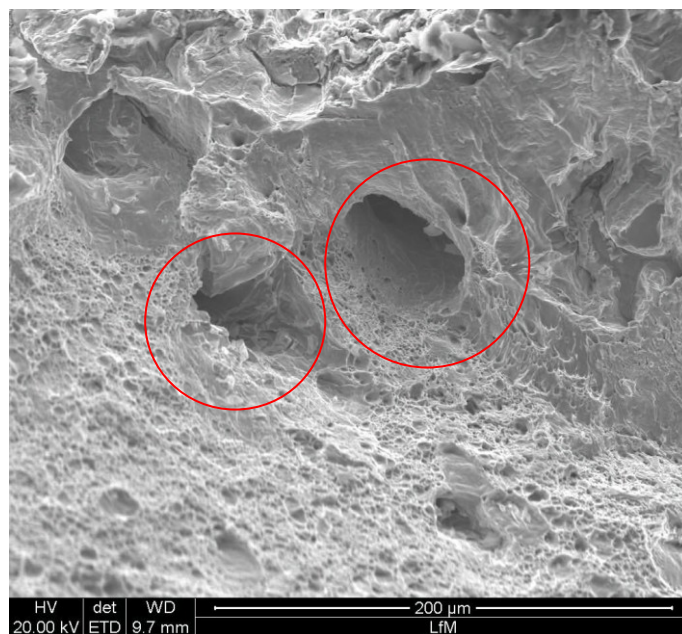


Abbildung 4-50: Spaltbruchfläche mit Fehlern.

In Abbildung 4-50 sind eine Pore und ein Materialausbruch markiert.

4.9 Computertomographie

Die folgenden Abbildungen, Abbildung 4-51 und Abbildung 4-52, zeigen die Fehlerstellen im Bauteil, welche bei der Untersuchung gefunden werden. Begonnen wird wiederum mit dem T-Stück. Hier können an einer Seite des Bauteils mehrere kleine Poren gefunden werden. Die Stelle, an der sich diese befinden, ist in der Übersichtsgrafik klar ersichtlich.

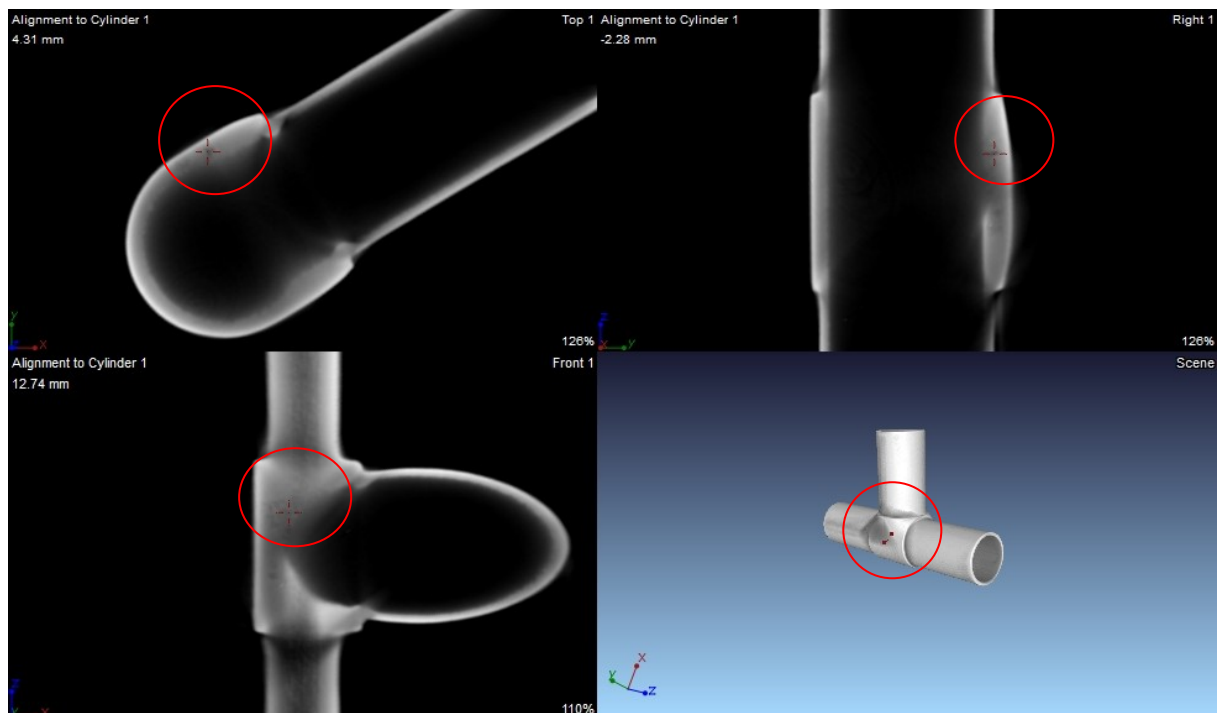


Abbildung 4-51: Ergebnis T-Stück.

Bei dem zweiten Bauteil kann nur ein einziger, kleiner Fehler gefunden werden. Diese Bauteile sind bis auf den systematischen Fehler der Einfallstellen an der Innengeometrie nahezu fehlerfrei. Abbildung 4-52 soll den kleinen Hohlraum zeigen, der auch hier mit einem roten Kreis markiert ist.

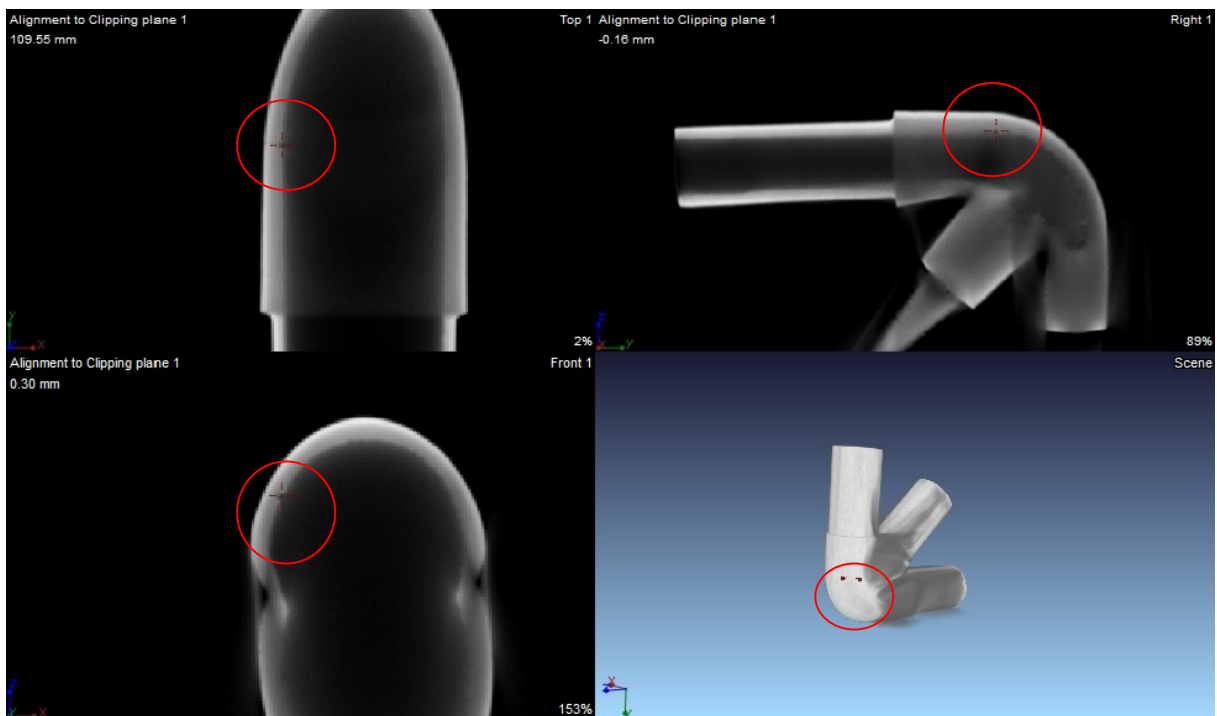


Abbildung 4-52: Ergebnis Eckstück.

Bei Betrachtung dieser Ergebnisse fällt auf, dass die Fehler, welche im T-Stück zu finden sind, eventuell an mehreren Bauteilen sein werden. Dies würde auch den Lunker, der zu der schlechten Bruchdehnung in Bauteil 25_2 geführt hat, erklären. Aus diesem Bauteil gelang es nämlich, drei Proben zu fertigen, was den Schluss zulässt, dass es sich bei der besagten Probe um ein Teil handelt, welches weiter oben aus der Kontur entnommen wurde, also jenem Bereich, in dem auch bei der Computertomographie Lunker angezeigt werden. Durch die Geometrie des T-Stücks ist es nämlich nur möglich, aus dem unteren Teil genügend lange Proben zu entnehmen, da im oberen Bereich das „Loch“ für den dritten Arm ist.

4.10 Simulation Einfluss Fehlergröße

In den vorhergehenden Kapiteln wurden einige wenige Lunker im Bauteil gefunden. Aus diesem Grund wird eine FEM-Simulation durchgeführt, die den Einfluss eines Fehlers im T-Stück analysieren soll. Als Fehler wird ein Ellipsoid in den laut Festigkeitssimulation höchstbeanspruchten Teil des Bauteils gelegt, dessen Größe in etwa dem größten gefundenen Fehler entspricht. Die verwendete Software ist dieselbe wie sie auch bei der Festigkeitssimulation zum Einsatz gekommen ist.

Abbildung 4-53 zeigt den Fehler in der Zeichnung und Abbildung 4-54 das Mesh, welches im Bereich der Pore sehr eng vernetzt wird.

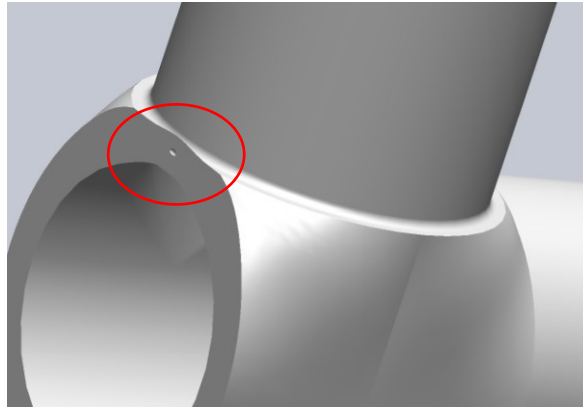


Abbildung 4-53: Schnitt durch Pore in 3D Solidworks Zeichnung.

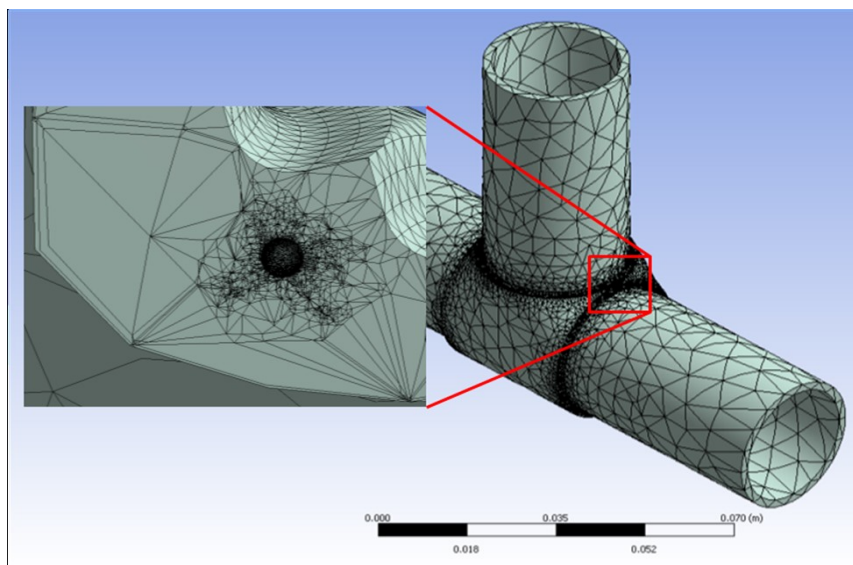


Abbildung 4-54: Mesh im Bereich der Pore.

Die folgenden Abbildungen sollen das Ergebnis der Simulation darstellen. Abbildung 4-55 dient zur Erklärung der Randbedingungen, Abbildung 4-56 und Abbildung 4-57 zeigen die in der Simulation ermittelten Spannungen. Die Farben bedeuten wiederum, dass blaue Bereiche wenig belastet sind und je mehr sie sich der Farbe Rot nähern, umso mehr Spannungen werden in jenem Bereich erwartet.

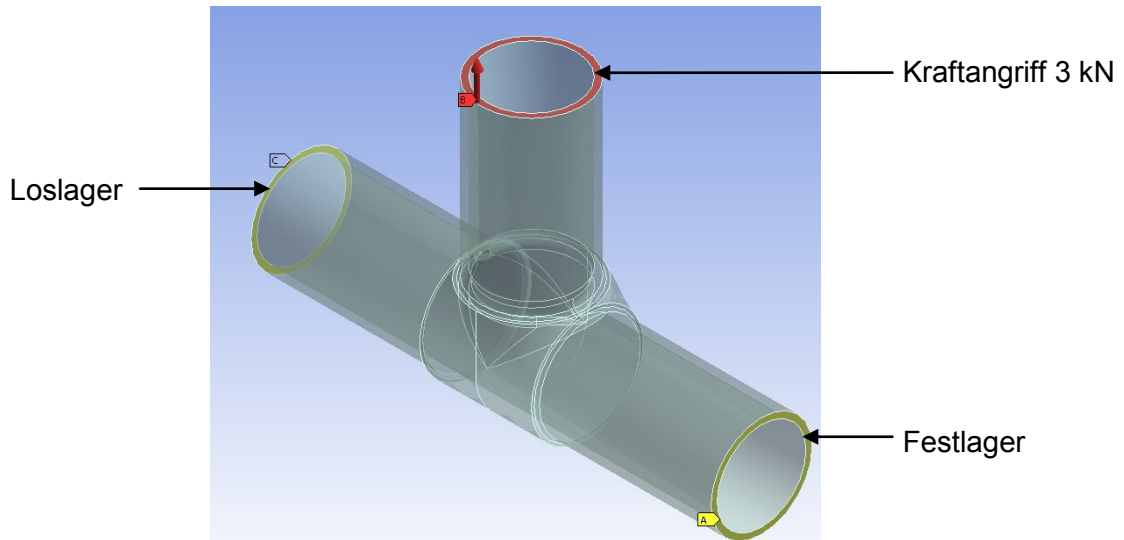


Abbildung 4-55: Randbedingungen, statische Belastung.

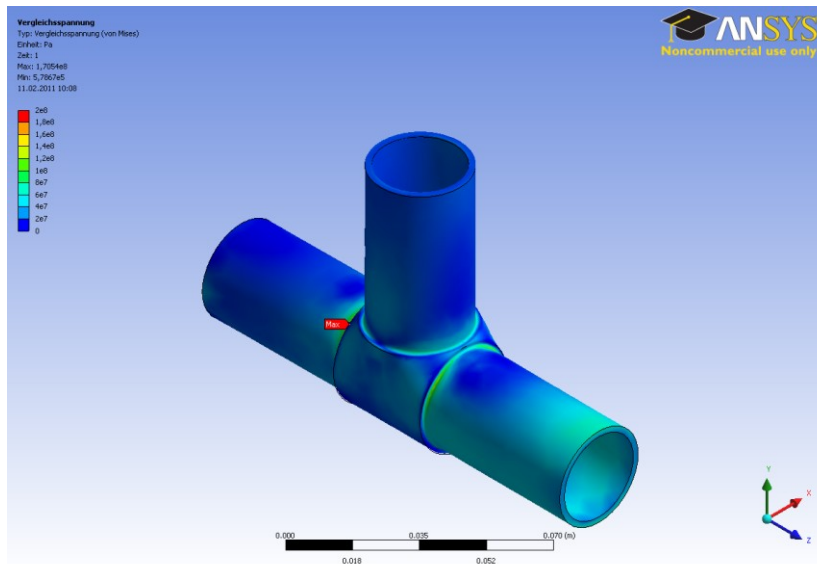


Abbildung 4-56: Ergebnis Spannungen, Pore mit 0,02 mm vernetzt.

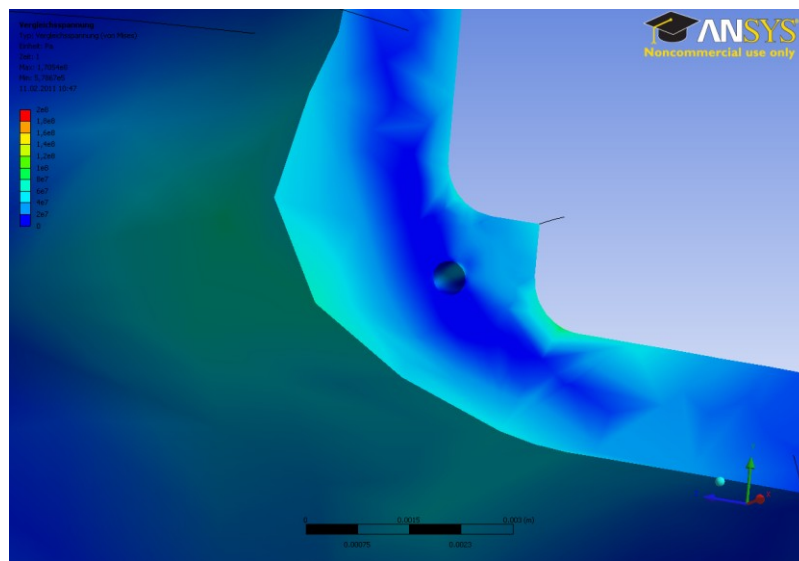


Abbildung 4-57: Detailergebnis Pore.

Bei Betrachtung der Ergebnisse, insbesondere von Abbildung 4-57, fällt auf, dass trotz der Lage der Pore im höchstbelasteten Bereich keine Probleme zu erwarten sind, zumindest bei statischer Beanspruchung. Die Knoten würden auch mit Fehlerstellen im Material die an sie gestellten Anforderungen erfüllen.

4.11 Klebeversuche

Für die Auswahl des Klebers werden am OFI Vorversuche mit verschiedenen Werkstoffen durchgeführt. Dabei werden zwei Kleber (Bezeichnung BM1469 = Dow Automotive Betamate 1496V und DP490 = 3M Scotch Weld DP490), die vom OFI nach Absprache mit dem ÖGI empfohlen werden, getestet. Die folgende Abbildung 4-58 zeigt einige Proben und Abbildung 4-59 das Ergebnis dieser Versuche. Für die Klebeversuche Stahl auf Stahl kommt der in Kapitel 3.10 beschriebene blaue Klebstoff Betamate 1496V zum Einsatz.

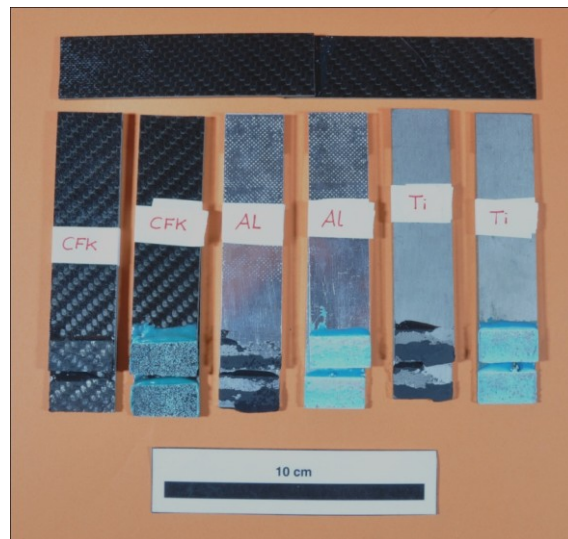


Abbildung 4-58: getestete Klebproben.

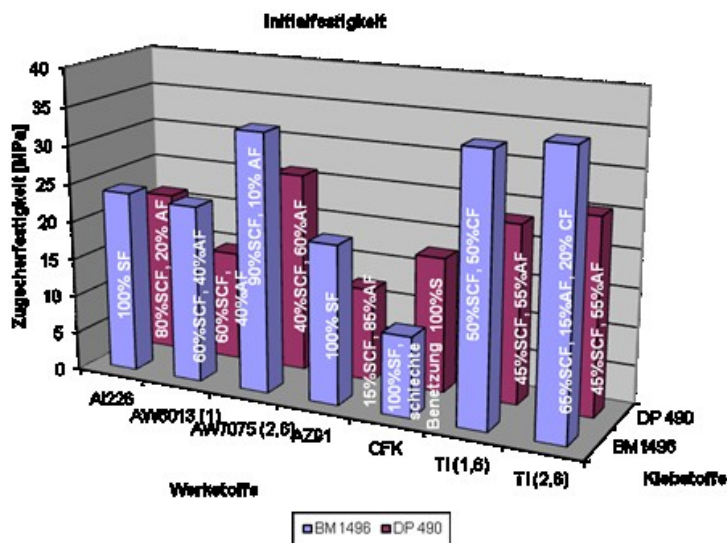


Abbildung 4-59: Ergebnis der Klebstoffe, Durchführung durch OFI.

Die folgende Tabelle 4-10 zeigt die im Zugversuch ermittelten Kräfte, welche bei der jeweiligen Klebelänge erreicht werden können. Hierzu gleich vorweg eine Anmerkung: Bei der Probenlänge 54 mm mit rauer Oberfläche wurde nur eine Länge von in etwa 40 mm verklebt. Es kann weder auf der Probe noch im Rohr Klebstoff auf dem letzten Zentimeter gesehen werden. Daher dient dieser Wert eher zur Bestätigung der für eine Klebelänge von 43 mm ermittelten Maximalkraft. In diese Werte reiht er sich auch sehr gut ein.

Tabelle 4-10: Ergebnisse Rohrzugversuch.

Länge [mm]	F glatt [kN]	F streakshape [kN]
34	46	56
43	78	76
54	93	79

Bei Betrachtung der Zahlenwerte, insbesondere für die Klebelänge von 43 mm, fällt auf, dass es offensichtlich keinen großen Unterschied macht, ob eine glatte oder raue Oberfläche verklebt wird. Da die Kleberreste einer mit Gewalt getrennten Klebeverbindung dieses Klebers abblättern, kann hier nur die direkt nach dem Versuch gemachte optische Kontrolle herangezogen werden. Dabei fällt auf, dass ebendiese Proben der Klebelänge 43 mm gleichmäßig verklebt waren. Ebenfalls ist offensichtlich, dass bei der 34 mm Probe mit der rauen Oberfläche nicht die gesamte Oberfläche mit Klebstoff bedeckt war, was allerdings dennoch zu einem höheren Wert als an der glatten Probe reicht. Man kann also durchaus davon ausgehen, dass bei gleichmäßiger Klebverteilung auch hier noch etwas bessere Werte erreicht werden können. Abbildung 4-60 zeigt die Probe mit 54 mm Klebelänge und Streakshape-Oberfläche, bei der es zur bereits erwähnten zu kurzen Verklebung gekommen ist. Weiters sieht man auch deutlich, dass ein Teil des Klebstoffs an der Stirnfläche der Probe zu finden ist, dieser also keinen Beitrag zur Festigkeit der Klebeverbindung leistet.



Abbildung 4-60: Probe mit 54 mm geklebter Länge und Streakshape Oberfläche.

In der folgenden Abbildung 4-61 ist ein Diagramm zu sehen, welches Aufschluss darüber geben soll, welche Klebelänge bei welcher Klebbebreite notwendig ist, um die gewünschte Festigkeit zu erhalten. Auch der Einfluss der Oberfläche wird dargestellt. Durchgeführt wurden diese Versuche an der gezeigten runden Probe, doch sollte der Fehler, der auftritt, wenn man dieses Diagramm für eine ebene Klebefläche oder andere Oberflächenformen zur Anwendung bringt, äußerst gering sein. Es ist klar ersichtlich, dass die glatte Oberfläche bessere Werte ergibt, je länger die Gesamtklebefläche wird. Der erhoffte positive Effekt durch die Wellenform der Streakshape-Oberfläche bleibt aus.

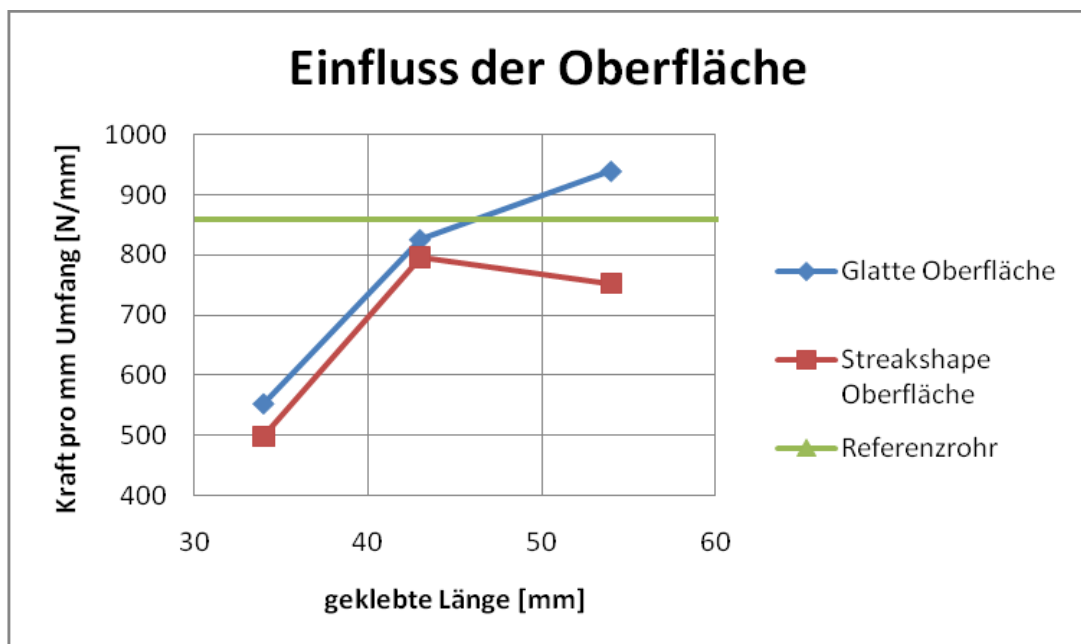


Abbildung 4-61: Einfluss der Oberfläche.

Die in Abbildung 4-61 zu sehenden Werte sind die Mittelwerte aus zwei Zugversuchen je Datenpunkt. Zusätzlich zeigt die grüne Gerade die Kraft pro Millimeter Umfang an, den das Referenzrohr mit einer Zugfestigkeit von 600 N/mm^2 bringt. Die Klebeverbindung mit der glatten Oberfläche schneidet diese Linie bei 46 mm geklebter Länge. Ab diesem Wert ist die Klebeverbindung stärker als das durch die Schweißung unbeeinflusste Rohr. Durch die bereits in der Einleitung beschriebene Wärmeeinflusszone beim Schweißen ist die Festigkeit im Bereich der Knotenpunkte beeinträchtigt. Dies zeigt, dass es durchaus möglich sein sollte, die Schweißkonstruktion durch eine geklebte Konstruktion zu ersetzen.

5 Zusammenfassung

Die mithilfe der FEM-Simulation optimierte Geometrie lässt sich ohne Änderungen im Feingussverfahren herstellen. Der verwendete Stahl ist ein Werkstoff mit sehr guten mechanischen Eigenschaften, der auch in der Luftfahrt oder im Rennsport zum Einsatz kommt. Die fertigen Bauteile werden einer kompletten Qualitätssicherung unterzogen. Dabei werden nur wenige Mängel festgestellt: einerseits die Einfallstelle im Bereich der Angüsse und die im Zugversuch und der Computertomographie gefundenen Lunker, andererseits die Entkohlung im Bereich der dünnen Wandstärken. Solche Probleme können im Prototypenbau auftreten und lassen sich im Serienbetrieb relativ einfach abstellen. Durch die Entkohlung kann das gewünschte Gefüge nicht erreicht werden, was sich im Zugversuch auf die, verglichen mit der Wertetabelle, etwas niedrigeren Werte für Dehn- und Streckgrenze auswirkt. Durch den höheren Ferritanteil wird eine höhere Bruchdehnung erreicht. Die gemessenen Werte liegen allerdings immer noch mehr als 200 N/mm^2 über den Referenzwerten, welche unbedingt erreicht werden müssen. Die Festigkeitssimulation mit dem eingefügten Defekt zeigt überdies, dass einzelne Fehler im Größenbereich des gefundenen Lunkers zumindest im statischen Belastungsfall keine negativen Auswirkungen hervorrufen.

Die Klebeversuche zeigen, dass die Festigkeit der Klebeverbindung bei ausreichender Klebefläche in der Lage ist, die Referenzwerte für das ungeschweißte, gezogene Stahlrohr zu überbieten. Demnach sollte die Substitution einer geschweißten Konstruktion durch eine geklebte Version auch aus unterschiedlichen Werkstoffen nicht nur Leichtbau ermöglichen, sondern auch gleichzeitig die mechanischen Eigenschaften verbessern.

Fazit: Die Knotenelemente liefern mechanische Kennwerte, die jene des Referenzmaterials übertreffen. Zusätzlich ist die Klebeverbindung in der Lage, die Schweißung zu substituieren. Es ist demnach möglich, eine Multimaterialverbindung anstelle der herkömmlichen Schweißkonstruktion zum Einsatz zu bringen.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Lohrmann G., H. Lueb: Kleine Werkstoffkunde für das Schweißen von Stahl und Eisen, 8. Auflage, Kapitel 2, S. 29ff., Dt. Verlag für Schweißtechnik, Düsseldorf, 1995.
- [2] Wittekopf D. und O. Liesenberg: Stahlguß- und Gußeisenlegierungen, Kapitel 2, S. 63 ff., Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig Stuttgart, 1992.
- [3] Roesch K., H. Zeuner und K. Zimmermann: Stahlguss, 2. Auflage, Kapitel 1, S. 1ff., Verlag Stahleisen, Düsseldorf, 1982.
- [4] Arnold M. et al: Was ist und kann Stahlguss, konstruieren und giessen, 29. Jahrgang, Nr. 1, S. 2ff., ZGV, Düsseldorf, 2004.
- [5] Berns H., W. Zheisen: Eisenwerkstoffe – Stahl und Gusseisen, 4. Auflage, Springer, Berlin, 2008.
- [6] Arnold M. et al: Erschmelzen von Stahlguss, konstruieren und giessen, 29. Jahrgang, Nr. 1, S. 12ff., ZGV, Düsseldorf, 2004.
- [7] Roesch K., H. Zeuner und K. Zimmermann: Stahlguss, 2. Auflage, Kapitel 2, S. 5ff., Verlag Stahleisen, Düsseldorf, 1982.
- [8] Aue H.: Das Verfahren Feingießen, konstruieren und giessen, 33. Jahrgang, Nr. 1, S. 7ff., ZGV, Düsseldorf, 2008.
- [9] Engler S.: Erstarrung metallischer Schmelzen, Kapitel: Eigenschaften des fließenden und erstarrenden Metalls von S. Engler, S. 7ff., Deutsche Gesellschaft für Metallkunde, Oberursel, 1981.
- [10] Schwerdtfeger K.: Metallurgie des Stranggießens, Kapitel 2: Allgemeine Grundlagen der Erstarrung, S. 35 ff., Verlag Stahleisen, Düsseldorf, 1992.

- [11] Kurz W., D. J. Fisher: Fundamentals of Solidification, Kapitel 1: Introduction, S. 1 ff., Trans Tech Publication, Ütikon-Zürich, 1998.
- [12] Bleck W.: Werkstoffkunde Stahl für Studium und Praxis, Kapitel 3: Legierungen des Eisens, S.64 ff., 2. Auflage, Verlag Mainz, Aachen 2004.
- [13] Aue H.: Einleitung, konstruieren und giessen, 33. Jahrgang, Nr. 1, S. 2ff., ZGV, Düsseldorf, 2008.
- [14] Krekeler H. A.: Feinguß, Kapitel 2, S. 9ff., Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1963.
- [15] <http://www.klein-industrievertretung.de/de/produkte/feinguss.php>, aufgerufen am 8. 1. 2011
- [16] Krekeler H. A.: Feinguß, Kapitel 3, S. 14ff., Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1963.
- [17] Ederer I.: Druckguss beginnt mit VX-Anlagen von voxeljet, Giesserei Erfahrungsaustausch 3+4/2010, S. 44-45.
- [18] Ederer I.: Werkzeuglose Formherstellung mittels 3D-Drucktechnologie, Giesserei-Praxis 11/2004, S. 407-410.
- [19] Clegg A. J.: Precision Casting Processes, Kapitel 7, S. 145ff., Pergamon Press, Oxford, 1991.
- [20] Allendorf H.: Präzisionsgießverfahren mit Ausschmelzmodellen, Kapitel 2, S. 39ff., Fachverlag Leipzig, 1956.
- [21] <http://www.investmentcastingwax.com/downloads/tl14.pdf>, aufgerufen am 3. 2. 2011.
- [22] Horton R. A.: Investment Casting in Metals Handbook, Ninth Edition, Volume15 Casting, S. 253ff., ASM International, Ohio, 1988.
- [23] Ambos E.: Urformtechnik metallischer Werkstoffe, 3. Auflage, Kapitel 7, S. 66ff., Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1990.
- [24] http://img.directindustry.de/images_di/photo-g/tragbare-koordinatenmessmaschine-cmm-55081.jpg, aufgerufen am 2. 6. 2010.
- [25] Krekeler H. A.: Feinguß, Kapitel 4, S. 23ff., Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1963.
- [26] Bratby T. et al.: Investment casting: Recognition and definition of flaws, Kapitel: Patternmaking, The British Investment Casters´ Technical Association, Sheffield, 1971.
- [27] Bratby T. et al.: Investment casting: Recognition and definition of flaws, Kapitel: Mould Manufacturing, The British Investment Casters´ Technical Association, Sheffield, 1971.
- [28] Baier J. et al.: Handbuch der Gussfehler, 3. Auflage, S&B Industrial Minerals, Marl, 2005.
- [29] Bratby T. et al.: Investment casting: Recognition and definition of flaws, Kapitel: Metallurgical, The British Investment Casters´ Technical Association, Sheffield, 1971.
- [30] A. Zaki: Corrosion Engineering and Corrosion Control, Kapitel 4: Types of Corrosion, S. 120 ff., Butterworth-Heinemann, Oxford, 2006.

- [31] K. H. Tostmann: Korrosion, Kapitel 5: Korrosion bei mechanischer Beanspruchung, S. 108 ff., Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2001.
- [32] Kohtz D.: Wärmebehandlung metallischer Werkstoffe, Kapitel Grundlagen, S. 1ff., VDI-Verlag, Düsseldorf, 1994.
- [33] Kohtz D.: Wärmebehandlung metallischer Werkstoffe, Kapitel Wärmebehandlungs-verfahren, S. 51ff., VDI-Verlag, Düsseldorf, 1994.
- [34] Brooks C. R.: Principles of the heat treatment of plain carbon and low alloy Steels, Chapter 7: Annealing, Normalizing, Martempering and Austempering, S. 235ff., ASM International, Ohio, 1996.
- [35] http://www.banki.hu/~aat/oktatas/gepesz/anyagtudomany2/diagram/m_7218_25CrMo4.pdf, aufgerufen am 3. 11. 2010.
- [36] Brooks C. R.: Principles of the heat treatment of plain carbon and low alloy Steels, Chapter 4: Quenching of Steels, S. 87ff., ASM International, Ohio, 1996.
- [37] http://www.leco.com/resources/application_note_subs/pdf/inorganic/Analytical%20Tips/C-S209-141-001.pdf, aufgerufen am 20. 09. 2010.
- [38] Otto M.: Analytische Chemie: Atomemissionsspektroskopie, S. 192ff., VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim (1995).
- [39] Werbebroschüre des Geräts.
- [40] Musiol G.: Kapitel 2: Effekte der Atom- und Molekülphysik, S. 168ff., in von Ardenne M., G. Musiol, U. Klemradt: Effekte der Physik, 3. Auflage, Wissenschaftlicher Verlag Harri Deutsch, Frankfurt 2005.
- [41] http://www.metallurgy.ac.at/index.php?menu=forschung&sub=ausstattung_raster, aufgerufen am 17. 11. 2010.
- [42] http://www.phoenix-xray.com/images/principles_of_operation/tomography_dt.jpg, aufgerufen am 17. 11. 2010.
- [43] Technisches Datenblatt des Klebstoffes BETAMATE 1496 V von Dow Automotive.
- [44] Wegst C., M. Wegst: Stahlschlüssel, 21. Auflage, Verlag Stahlschlüssel Wegst GMBH, Marbach, 2007.

7 Anhang

7.1 Ergebnisse Rauigkeitsmessung

Tabelle 7-1: Ergebnisse Rauigkeitsmessung Teil 15

Teil 15			
[μm]	Links vorne	Links hinten	Links innen
R_a	4,85	7,79	8,82
R_z	38,16	56,13	63,37
	Mitte vorne	Mitte hinten	Mitte innen
R_a	4,37	8,24	9,16
R_z	49,95	69,86	72,01
	Rechts vorne	Rechts hinten	Rechts innen
R_a	3,84	8,80	9,30
R_z	31,29	56,21	69,40

Tabelle 7-2: Ergebnisse Rauigkeitsmessung Teil 21

Teil 21			
[μm]	Links vorne	Links hinten	Links innen
R_a	3,99	10,30	9,65
R_z	35,39	77,40	78,96
	Mitte vorne	Mitte hinten	Mitte innen
R_a	4,18	11,06	10,19
R_z	40,21	75,84	61,45
	Rechts vorne	Rechts hinten	Rechts innen
R_a	4,91	7,36	7,03
R_z	35,92	46,99	44,43

Tabelle 7-3: Ergebnisse Rauigkeitsmessung Teil 29

Teil 29			
[μm]	Links vorne	Links hinten	Links innen
R_a	8,17	3,65	9,54
R_z	60,1	30,02	73,54
	Mitte vorne	Mitte hinten	Mitte innen
R_a	3,40	3,86	8,70
R_z	37,27	34,10	62,72
	Rechts vorne	Rechts hinten	Rechts innen
R_a	6,10	4,04	9,80
R_z	43,66	29,73	64,58

Tabelle 7-4: Ergebnisse Rauigkeitsmessung Teil 33

Teil 33			
[μm]	Links vorne	Links hinten	Links innen
R _a	6,74	4,57	9,92
R _z	49,30	45,82	68,31
	Mitte vorne	Mitte hinten	Mitte innen
R _a	7,89	4,60	7,36
R _z	63,50	39,74	53,23
	Rechts vorne	Rechts hinten	Rechts innen
R _a	6,74	5,78	10,32
R _z	44,45	45,81	81,25

Tabelle 7-5: Ergebnisse Rauigkeitsmessung Teil 42

Teil 42			
[μm]	Links vorne	Links hinten	Links innen
R _a	4,71	7,90	8,89
R _z	40,28	68,69	62,96
	Mitte vorne	Mitte hinten	Mitte innen
R _a	6,14	7,22	9,74
R _z	49,51	53,70	70,24
	Rechts vorne	Rechts hinten	Rechts innen
R _a	4,85	9,65	9,54
R _z	41,01	66,76	75,27

Tabelle 7-6: Ergebnisse Rauigkeitsmessung Teil 57

Teil 57			
[μm]	Links vorne	Links hinten	Links innen
R_a	4,24	5,75	10,52
R_z	34,93	54,12	41,06
	Mitte vorne	Mitte hinten	Mitte innen
R_a	4,80	7,59	7,92
R_z	48,35	59,98	69,01
	Rechts vorne	Rechts hinten	Rechts innen
R_a	4,49	6,19	6,23
R_z	48,38	51,05	50,75