



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

## **Bachelorarbeit**

Patrick Amalou

# **Auswahl eines Stahlwerkstoffs für die Herstellung von Wärmeaustauschplatten zur Beheizung von Industriebacköfen**

*Fakultät Technik und Informatik  
Department Maschinenbau und Produktion*

*Faculty of Engineering and Computer Science  
Department of Mechanical Engineering and  
Production Management*

**Patrick Amalou**

**Auswahl eines Stahlwerkstoffs für die  
Herstellung von Wärmeaustauschplatten  
zur Beheizung von Industriebacköfen**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Maschinenbau/Entwicklung und Konstruktion  
am Department Maschinenbau und Produktion  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:  
BUCO Laserplate GmbH

Sandstrasse 31  
21502 Geesthacht

Erstprüfer/in: Prof. Dr.-Ing. Gerhard Biallas  
Zweitprüfer/in : Dr.-Ing. Bernhard Spang

Abgabedatum: 03.03.2020

# **Zusammenfassung**

**Patrick Amalou**

## **Thema der Bachelorthesis**

Auswahl eines Stahlwerkstoffs für die Herstellung von Wärmeaustauschplatten zur Beheizung von Industriebacköfen.

## **Stichworte**

Wärmeaustauschplatte, Kaltverformung, Druckgeräte, deutsche Industrienorm, Zugversuch, Berstdruckversuch, DC01, DC03, Prüfbescheinigung, Materialzeugnis, Werkstoffzulassung

## **Kurzzusammenfassung**

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wird eine Analyse hinsichtlich Eigenschaften, Verfügbarkeit und Kosten eines Werkstoffs für eine bestimmte Anwendung durchgeführt. Ziel ist es eine Alternative zum aktuell eingesetzten Werkstoff DC01 für die Herstellung von Wärmeaustauschplatten gemäß Druckgeräterichtlinie zu finden.

**Patrick Amalou**

## **Title of the paper**

Selection of a suitable steel for the fabrication of heat exchange panels used for heating of industrial ovens.

## **Keywords**

Heat exchange panel, cold working, pressure equipment, German Industrial Standard, tensile test, burst pressure test, DC01, DC03, test certificate, material certificate, approval for materials

## **Abstract**

This bachelor thesis will analyse steel materials regarding material properties, availability and costs for one particular application. The objective is to find an alternative option to the material DC01 presently used to fabricate heat exchange panels in accordance with the pressure equipment directive.

# Aufgabenstellung

## für die Bachelorthesis

von Herrn Patrick Amalou

### Thema:

Auswahl eines Stahlwerkstoffes für die Herstellung von Wärmeaustauschplatten zur Beheizung von Industriebacköfen

### Schwerpunkte:

Vollverschweißte Wärmeaustauschplatten für die Beheizung von Industriebacköfen mit Thermoöl werden durch Verschweißen von 2 Blechen mit dem Widerstandsrollennaht-Schweißverfahren und pneumatisches Aufdrücken (Kaltverformung) der Strömungskanäle zwischen den Blechen hergestellt. Wegen des Betriebs in heißer, trockener Atmosphäre, den erforderlichen Strahlungseigenschaften der Oberfläche und den Kosten sind unlegierte Qualitätsstähle der bevorzugte Werkstoff für diese Anwendung.

Für die Herstellung und den Betrieb als Druckgerät müssen die Bleche aus dem zu verwendenden Stahl folgende Eigenschaften haben:

- verfügbar in Wanddicken von 1,5 und 2,0 mm
- gut schweißbar
- gut kaltumformbar
- möglichst kaltgewalzte Oberfläche
- möglichst nicht eingefettet
- geeignet für max. zulässige Temperaturen bis 400 °C
- für den Einsatz in Druckgeräten zugelassen (z.B. nach europäischer Druckgeräterichtlinie 2014/68/EU)

Ein Stahl, der diese Eigenschaften aufweist und seit vielen Jahren für diese Anwendung eingesetzt wird, ist der Werkstoff DC01 (1.0330) nach EN 10130. DC01 ist nicht nach einer harmonisierten europäischen Norm für die Herstellung von Druckgeräten zugelassen, kann aber über den Nachweis ausreichender Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften (Bruchdehnung) durch ein Einzelgutachten (PMA) qualifiziert werden.

Aufgrund sich ändernder Marktbedingungen ist aber die Versorgung mit Flacherzeugnissen aus DC01 zunehmend schwieriger geworden. Es mussten in den letzten Monaten sogar Aufträge storniert werden, weil keine Bleche in den erforderlichen Abmessungen und Mengen beschaffbar waren. Im Rahmen dieser Arbeit sollen alternative unlegierte Qualitätsstähle auf Ihre Eignung für diese Anwendung geprüft werden. Neben den oben

genannten Eigenschaften sind dabei vor allem Beschaffbarkeit und Kosten zu berücksichtigen.

Durch eine Recherche in der einschlägigen Literatur und den Werkstoffnormen sowie Anfragen bei Blechlieferanten sollen zunächst in Frage kommende Werkstoffe hinsichtlich Eigenschaften, Verfügbarkeit und Kosten identifiziert werden. Mit dem nach dieser Recherche am besten geeigneten Werkstoff soll dann anhand von Schweißversuchen, Berstdruckversuchen und Zugversuchen die Eignung im Vergleich zu dem bewährten Werkstoff DC01 geprüft werden.

# Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	I
Aufgabenstellung.....	II
Inhaltsverzeichnis .....	IV
Symbolverzeichnis .....	V
Abkürzungsverzeichnis .....	VI
Tabellenverzeichnis .....	VII
Abbildungsverzeichnis .....	VIII
<b>1. Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Stand der Technik .....</b>	<b>3</b>
2.1 Particular Material Appraisal .....	3
2.2 Metallische Erzeugnisse – Arten von Prüfbescheinigungen .....	3
2.3 Werkstoff DC01 .....	4
2.4 Zugversuch .....	5
2.5 Berstdruckversuch .....	5
2.6 Widerstandsrollennaht - Schweißmaschine.....	6
2.7 Europäische Werkstoffzulassung .....	6
<b>3. Auswahl geeigneter Werkstoffe.....</b>	<b>7</b>
3.1 Werkstoffanforderungen gemäß Richtlinie 2014/68/EU nach Druckgeräterichtlinie.....	7
3.2 Methodik der Werkstoffauswahl .....	7
3.3 Werkstoffauswahl.....	9
<b>4. Versuchsdurchführung und Auswertung.....</b>	<b>15</b>
4.1 Allgemeines .....	15
4.2 Berstdruckversuch .....	16
4.3 Zugversuch .....	23
4.4 Analyse der Ergebnisse .....	24
<b>5. Zusammenfassung .....</b>	<b>26</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>28</b>
<b>Anhang.....</b>	<b>A</b>
Werkstofftabellen .....	A-1
Prüfberichte Zugversuche.....	A-11
Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit.....	A-21

## Symbolverzeichnis

Beschreibung	Symbol	Einheit
Streckgrenze	$R_e$	MPa
0,2 % Dehngrenze	$R_{p0,2}$	MPa
Zugfestigkeit	$R_m$	MPa
Bruchdehnung	A	%
Mittenrauwert	$R_a$	$\mu\text{m}$
Elektrische Spannung	U	V
Kraft	F	N
Geschwindigkeit	v	m/s
mind. erforderlicher Berstdruck	$P_B$	bar
max. zulässiger Druck im Druckgerät	$P_S$	bar
Festigkeitskennwert bei max. zulässigen Temperatur des Druckgerätes	K	MPa
Festigkeitskennwert bei Umgebungstemperatur	$K_{20}$	MPa

## **Abkürzungsverzeichnis**

HAW Hamburg	Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	Europäische Norm
ISO	International Organization for Standardization
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
PMA	Particular Material Appraisal
ERP	Enterprise-Resource-Planning
HFS	Hagener Feinblech Service GmbH
Schütt	Heinrich Schütt KG GmbH & Co
TKS	ThyssenKrupp Schulte GmbH
VBS	VB Stahlblechverarbeitungs GmbH
SMS	Salzgitter Mannesmann Stahlhandel GmbH
BSN	Blech-Service Nordhausen GmbH & Co.KG
LCK	LCK. Metall
RT	Raumtemperatur
ASME	American Society of Mechanical Engineers



## Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 1</b> Lieferantenübersicht der Materialanfragen.....	12
<b>Tabelle 2</b> Angebotsübersicht ausgewählter Werkstoffe und Abmessungen.....	13
<b>Tabelle 3</b> Ergebnisse Berstdruckversuch, DC01 .....	21
<b>Tabelle 4</b> Ergebnisse Berstdruckversuch, DC03 .....	22
<b>Tabelle 5</b> Kennwerte des Zugversuches vom DC01.....	23
<b>Tabelle 6</b> Kennwerte des Zugversuches vom DC03.....	23
<b>Tabelle 7</b> Prozentuale Abweichung der Streckgrenze und Zugfestigkeit.....	24
<b>Tabelle 8</b> Unlegierte Baustähle nach DIN EN 10025-2.....	A-1
<b>Tabelle 9</b> Stähle für einfache Druckbehälter nach DIN EN 10207 .....	A-2
<b>Tabelle 10</b> Warmfeste Stähle nach DIN EN 10028-2.....	A-3
<b>Tabelle 11</b> Schweißgeeignete normalgeglühte Feinkornbaustähle nach DIN EN 10028-3 .....	A-5
<b>Tabelle 12</b> Kaltzähe Stähle nach DIN EN 10028-4 .....	A-7
<b>Tabelle 13</b> Stähle mit hoher Streckgrenze zum Kaltumformen nach DIN EN 10268.....	A-8
<b>Tabelle 14</b> Kaltgewalzte Flacherzeugnisse aus weichen Stählen zum Kaltumformen nach DIN EN10130.....	A-9
<b>Tabelle 15</b> Warmgewalzter Stahl nach DIN EN 10111 .....	A-10

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1</b> Lösungsprozess der methodischen Produktentwicklung .....	9
<b>Abbildung 2</b> Grundblech mit kaltgewalzter Oberfläche .....	10
<b>Abbildung 3</b> Grundblech mit warmgewalzter Oberfläche .....	10
<b>Abbildung 4</b> Prüfbescheinigung für ein Blech aus DC03 .....	14
<b>Abbildung 5</b> Übersicht Auftragsablauf .....	15
<b>Abbildung 6</b> Schweißprozess für die Längsnähte der Berstdruckversuchsplatte vom DC01 .....	16
<b>Abbildung 7</b> Berstdruckplatten DC01 .....	17
<b>Abbildung 8</b> Berstdruckplatten DC03 .....	17
<b>Abbildung 9</b> Berstdruckplatte, Anlauffarbe DC01 .....	17
<b>Abbildung 10</b> Berstdruckplatte, Anlauffarbe DC03 .....	17
<b>Abbildung 11</b> Berstdruckversuch, Pumpe .....	18
<b>Abbildung 12</b> Versuchstisch mit eingespannter Platte .....	18
<b>Abbildung 13</b> Zeichnung 19/41799/0, inkl. Notiz erreichter Berstdruck vom DC01 .....	19
<b>Abbildung 14</b> Zeichnung 19/41799/0, inkl. Notiz erreichter Berstdruck vom DC03 .....	20
<b>Abbildung 15</b> Prüfbericht 4919-24497, Zugversuch DC01 .....	A-11
<b>Abbildung 16</b> Prüfbericht 4919-25043, Zugversuch DC01 .....	A-13
<b>Abbildung 17</b> Prüfbericht 4919-26111, Zugversuch DC01 .....	A-15
<b>Abbildung 18</b> Prüfbericht 4919-26887, Zugversuch DC01 .....	A-17
<b>Abbildung 19</b> Prüfbericht 4920-28672, Zugversuch DC03 .....	A-19

# 1. Einleitung

Aufgrund einer immer stärker spürbaren Rohstoffknappheit auf dem industriellen Markt ist der Einsatz von neuen Werkstoffen und alternativ einsetzbaren Materialien wichtiger denn je und stellt viele Unternehmen vor neue Herausforderungen. Die Nachfrage vieler Rohstoffe steigt stetig, was unter anderem durch das Aufkommen neuer Technologien hervorgerufen wird. Aufgrund dessen ist nicht nur der technologische Fortschritt oder das Wirtschaftswachstum beeinträchtigt, sondern auch die Herstellung aktueller Produkte vieler Unternehmen gefährdet.

Die Aufgabe dieser Bachelorthesis wurde von der Firma BUCO Laserplate GmbH angeregt und die Bearbeitung unterstützt. Das Hauptgeschäft des Unternehmens liegt in der Projektierung und Herstellung komplexer Wärmeaustauschsysteme aus Normalstahl und austenitischen Stählen. Durch modernste Laserschweißverfahren werden kundenspezifische Lösungen individuell realisiert.

In dieser Arbeit wird die Verwendungsfähigkeit alternativer Werkstoffe untersucht, da die Beschaffbarkeit des bisher eingesetzten Werkstoffes aktuell als schwierig und perspektivisch als unsicher einzuschätzen ist. Die derzeitige Marktsituation wird berücksichtigt, um die Herstellung der firmeneigenen Produkte weiterhin zu ermöglichen. Die Firma BUCO Laserplate GmbH sieht generell die Schwierigkeit Kundenaufträge nicht erfüllen zu können. Grund dafür ist die unzureichende Materialbeschaffbarkeit bezüglich der Eigenschaften, der Stückzahl, der gewünschten Abmessung und der Oberflächenbeschaffenheit.

Die Wärmeaustauschplatten werden bisher durch das Verschweißen von zwei deckungsgleichen Blechen aus dem Werkstoff DC01 (1.0330) nach DIN EN 10130 hergestellt. Durch das Widerstandsrollennaht- Schweißverfahren wird ein Schweißmuster aufgebracht, welches einen optimalen Strömungsfluss ermöglicht. Anschließend werden die Bleche durch ein pneumatisches Aufdrücken in Form gebracht. Das im Betrieb eingesetzte Fluid zur Beheizung von Industriebacköfen ist heißes Thermoöl. Thermoöl wird in geschlossenen Kreisläufen verwendet und zeichnet sich durch eine gute Wärmeleitfähigkeit aus. Aufgrund herrschender Temperaturen bis ca. 350 °C und einem Betriebsdruck von ca. 3 bar kann Wasser nicht eingesetzt werden, obwohl Wasser eine deutlich höhere Wärmeleitfähigkeit als Thermoöl aufweist und günstiger bei der Beschaffung ist. Wasser würde bei den herrschenden Temperaturen verdampfen. Außerdem wird durch den Einsatz von Thermoöl mögliche Korrosion im Inneren der Platten vorgebeugt.

Ziel dieser Bachelorarbeit ist es, einen Stahlwerkstoff zu finden, der für die Herstellung von Wärmeaustauschplatten zur Beheizung von Industriebacköfen neben dem Werkstoff DC01 geeignet ist. Der Einsatz der Wärmeaustauschplatten findet in heißer und trockener Umgebung statt. Aufgrund dessen wird aktuell der unlegierte Qualitätsstahl DC01 verwendet, der die Anforderungen an Strahlungseigenschaften und Kosten erfüllt.

Die Herausforderungen an den Werkstoff im Herstellungsprozess der Platten liegen darin, dass dieser gut schweißbar sein muss und eine gute Kaltverformbarkeit aufweisen muss. Da das Heizmedium unter Überdruck stehen muss, sind diese Wärmeaustauschplatten Druckgeräte und unterliegen in den meisten Ländern Gesetzen zur Arbeitssicherheit. In Europa ist dies die europäische Druckgeräterichtlinie 2014/68/EU. Da der Werkstoff DC01 jedoch nicht durch eine europäische Werkstoffnorm für die Herstellung von Druckgeräten zugelassen ist, sind entsprechende Nachweise über Festigkeits- und Zähigkeitskennwerte zu erbringen. Diese Nachweise finden in Form von Werkstoff- Einzelgutachten (PMA: Particular Material Appraisal) statt. Für den Betrieb im Backofen müssen die Bleche zusätzlich weitere

Bedingungen erfüllen. Dazu zählen eine kaltgewalzte und möglichst fettfreie Oberfläche sowie die Eignung für maximal zulässige Temperaturen bis 400 °C. Die Forderung einer fettfreien und ungeölte Oberfläche der Bleche ist für industrielle Anwendungen eher untypisch und stellt bei der Materialbeschaffung eine zusätzliche Herausforderung dar, da aus der geringen Nachfrage nach ungeölte Blechen auch ein geringes Angebot resultiert. Außerdem sollten die Bleche in Wanddicken von 1,5 und 2,0 mm und bei Bedarf auch in geringeren Stückzahlen verfügbar sein. Um in diesem Marktsegment auch weiterhin wettbewerbsfähig zu bleiben, sind die Kosten für die Blechbeschaffung stets zu berücksichtigen.

Der bei BUCO aktuell eingesetzte Werkstoff DC01 wird in Kapitel 2 ausführlich betrachtet und hinsichtlich seiner Merkmale und Vorteile für den Einsatz untersucht. Diese Betrachtung dient als Referenz für die Auswahl weiterer in Frage kommender Werkstoffe. Durch Recherche in Fachliteratur und Werkstoffnormen werden potenzielle Werkstoffe aufgefunden. Hierzu bietet sich explizit das Merkblatt AD 2000 W1 [3] an, das Werkstoffe auflistet, die zum Bau von Druckbehältern zulässig sind. Darüber hinaus ist die DIN EN 10130 [12] heranzuziehen, die hingegen keine Werkstoffe nach harmonisierter europäischer Norm gemäß Druckgeräterichtlinie beinhaltet, in der jedoch der Werkstoff DC01 und verwandte Werkstoffe ausführlich beschrieben sind.

Harmonisierte Normen sind europäische Normen für Produkte, die durch bestimmte Organisationen im Auftrag der Europäischen Kommission erarbeitet werden. Entscheidend ist, dass durch die Harmonisierung von technischen Normen eine europaweite Gültigkeit geschaffen wird.

Sobald eine Übersicht möglicher Werkstoffe hinsichtlich Eigenschaften, Kennwerten usw. vorhanden ist, werden weitere Aspekte wie Verfügbarkeit und Kosten betrachtet. Um die zu Beginn angesprochene problematische Materialverfügbarkeit umfangreich zu prüfen, werden Blechanfragen in verschiedenen Variationen bei Blechlieferanten platziert. Hier ist speziell darauf zu achten, dass die geforderte Qualität der Bleche eingehalten wird. Dazu gehört insbesondere die Ausstellung eines Werksabnahmeprüfzeugnisses 2.2, welches die Übereinstimmung mit der Bestellung, unter Angabe von Ergebnissen nichtspezifischer Prüfung, bestätigt. Weitere Qualifizierungen sind für diese Stähle möglich, indem entsprechende Nachweise über Festigkeits- und Zähigkeitskennwerte erbracht werden (siehe PMA Gutachten, Kapitel 2).

Anschließend werden für ausgewählte alternative Werkstoffe die geforderten Eigenschaften praktisch überprüft und mit den Kennwerten des aktuell eingesetzten Werkstoffes DC01 verglichen. Dies findet anhand zerstörender Werkstoffprüfungen statt, die entsprechende Materialkennwerte liefern. Je nachdem, ob und zu welchem Grad eine Eignung festgestellt wird, werden anschließend Schweißversuche, Zugversuche und Berstdruckversuche an dem gewählten Werkstoff durchgeführt. Zusätzlich zu den Kaltzugversuchen werden auch Warmzugversuche betrachtet, die hinsichtlich der Einsatztemperaturen von bis zu 400 °C weitere Erkenntnisse liefern. Die praktischen Werkstoffbetrachtungen stellen einen wesentlichen Punkt der vorliegenden Arbeit dar, da dadurch mögliche Zweifel und Unsicherheiten ausgeschlossen werden können, die nach der Vorauswahl noch bestanden haben [22].

## **2. Stand der Technik**

### **2.1 PMA: Particular Material Appraisal**

Hierbei handelt es sich um ein Einzelgutachten für Werkstoffe, das technische Spezifikationen beinhaltet. Das Gutachten ist zu erstellen, wenn ein Werkstoff hinsichtlich Form und Dicke durch eine harmonisierte europäische Werksnorm oder Werkszulassung nicht abgedeckt ist. Des Weiteren ist das Gutachten erforderlich, wenn ein Werkstoff außerhalb seines festgelegten Anwendungsbereiches wie beispielsweise zusätzlich für Druckanwendungen eingesetzt werden soll. Ein Abnahmeinspektor kontrolliert das vorliegende Werkszeugnis dahingehend, ob alle im PMA gegebenen Anforderungen erfüllt sind. Dies geschieht im Rahmen der Schluss- und Druckprüfung des Druckgerätes. Die grundlegenden Anforderungen der Druckgeräte-Richtlinie werden im AD 2000 Regelwerk erläutert [2]. Sollte von den Forderungen abgewichen werden, so muss nachweisbar sein, dass der sicherheitstechnische Maßstab erfüllt ist. Der Nachweis kann in Form von Werkstoffprüfungen, Analysen oder Versuchen stattfinden. Allgemeine Anforderung an die Werkstoffe ist die Einhaltung der mechanischen Eigenschaften am fertigen Bauteil. Die Werkstoffe sind so auszuwählen, dass die Eigenschaften für die Beanspruchungen beim Betrieb der Druckbehälter ausreichend sind. Um die Eignung der Werkstoffe zu beurteilen, gilt grundlegend die Werkstoffspezifikation. Die Überprüfung der Werkstoffe findet durch die zuständige unabhängige Stelle statt. In der Werkstoffspezifikation müssen mindestens Angaben zur chemischen Zusammensetzung und zu den mechanisch- technologischen Eigenschaften gemacht werden. Außerdem sind Art und Vorgehen bei der Verarbeitung und Wärmebehandlung, die Werkstoffprüfung sowie Art und Inhalt der Prüfbescheinigung, die Kennzeichnung und Kennwerte für die Bemessung festzulegen [2].

### **2.2 Metallische Erzeugnisse - Arten von Prüfbescheinigungen**

Anhand der DIN EN 10204 [13] werden die verschiedenen Arten von Prüfbescheinigungen für metallische Erzeugnisse erläutert. Die Prüfbescheinigungen liefern Angaben, die dem Besteller, in Übereinstimmung mit den Vereinbarungen, bei der Bestellung ausgehändigt werden können. Man unterscheidet dabei zwischen Werksbescheinigung 2.1, Werkszeugnis 2.2, Abnahmeprüfzeugnis 3.1 und Abnahmeprüfzeugnis 3.2. Bei der Werksbescheinigung 2.1 bestätigt der Hersteller ohne Angabe von Prüfergebnissen die Übereinstimmung mit der Bestellung. Beim Werkszeugnis 2.2 wird die Bestätigung zusätzlich durch die Angabe von Ergebnissen nichtspezifischer Prüfung gestärkt. Nichtspezifische Prüfungen bestätigen, ob die Erzeugnisse mit den in der Bestellung festgelegten Anforderungen übereinstimmen. Die Prüfungen werden vom Hersteller nach einem geeigneten Verfahren durchgeführt. Bei den Abnahmeprüfzeugnissen 3.1 und 3.2 findet die Bestätigung unter Angabe der spezifischen Prüfung statt. Dabei handelt es sich um Prüfungen, die entsprechend der Erzeugnisspezifikation vor der Lieferung durchgeführt werden. Es muss eine eindeutige Zuordnung der Prüfergebnisse zu den Prüflingen hergestellt werden. Dies kann zum Beispiel mit Hilfe einer angebrachten Schmelznummer erfüllt werden. Eine Bestätigung der Angaben erfolgt durch einen von der Fertigungsabteilung unabhängigen Abnahmebeauftragten des Herstellers. Bei dem Abnahmeprüfzeugnis 3.2 findet die Bestätigung der Bescheinigung zusätzlich durch einen vom Besteller beauftragten Abnahmebeauftragten oder einen amtlich genannten Beauftragten statt [13].

## 2.3 Werkstoff DC01

Als Grundlage der Recherche und Referenz für die Auswahl eines alternativen Stahlwerkstoffes wird der aktuell eingesetzte Werkstoff DC01 und dessen Anforderungen im Folgenden näher betrachtet. Der Werkstoff DC01 (1.0330) ist auch unter dem Namen St12 oder FeP01 bekannt und in DIN EN 10130 [12] spezifiziert. Der Stahl zählt zu der Gruppe der Flacherzeugnisse aus weichen Stählen zum Kaltumformen. Für die Herstellung der Wärmeaustauschplatten und den Betrieb als Druckgerät wird aufgrund der besseren Oberflächenbeschaffenheit eine kaltgewalzte Oberfläche gefordert. Aufgrund der teilweise schlechten Materialbeschaffbarkeit werden keine weiteren Anforderungen bzgl. der Oberflächenart gestellt. Im besten Fall wird Oberflächenart B gewählt, die gewährleistet, dass eine Seite soweit fehlerfrei ist. Da auch keine weiteren Anordnungen an die Oberflächenausführung gestellt werden, werden die Erzeugnisse in „matt“ gewählt. Die Kennzeichnung findet durch den Buchstaben „m“ statt und liefert einen Mittenrauwert im Intervall von  $0,6 \mu\text{m} < R_a \leq 1,9 \mu\text{m}$ . Bei DC01 bleibt es dem Hersteller überlassen, ob der Stahl als beruhigter oder unberuhigter Stahl hergestellt wird. Diese Eigenschaft wird durch die Desoxidationsart definiert. Bei DC03 bis DC07 ist die Desoxidationsart hingegen als vollständig beruhigter Stahl festgelegt. Ein vollständig beruhigter Stahl hat den Vorteil, dass kein reaktionsfähiger Sauerstoff enthalten ist, eine annähernd gleiche Zusammensetzung vorliegt und kaum oder gar keine Lufteinschlüsse im Material vorhanden sind. Dies führt zu besseren mechanischen Eigenschaften und zu einer guten Schweißbeignung. Die Oberfläche wird üblicherweise geölt geliefert, so dass eine Schutzschicht vor Korrosion vorliegt. Sollte vom Besteller explizit eine ungeölte Oberfläche gewünscht sein, so kann der Hersteller für Korrosionsschäden nicht verantwortlich gemacht werden. Werden mechanische Eigenschaften ermittelt, gelten diese ab dem Zeitpunkt der Zurverfügungstellung im Herstellerwerk für DC03 bis DC07 für sechs Monate. Für DC01 sind die Angaben nicht garantiert. Ein längeres Lagern von DC01 Blechen ist nicht zu empfehlen, da es dann zu einer Änderung der mechanischen Eigenschaften kommen kann. Insbesondere kann es zu einer Verminderung der Eignung zum Kaltumformen führen. Das hängt damit zusammen, dass der Stahl DC01 nach einer gewissen Zeit, insbesondere nach dem Kaltwalzen, eine Neigung zur Bildung von Fließfiguren aufweist. Fließfiguren treten häufig bei weichen Stählen auf, die eine ausgeprägte Streckgrenze aufweisen. Ursache ist die Behinderung der Versetzungsbewegung durch Kohlen- oder Stickstoffatome. Im Allgemeinen werden die Erzeugnisse beim Hersteller nach dem Glühen leicht kalt nachgewalzt. Bei den Stählen DC06 und DC07 finden keine Fließfiguren statt. Eine Schweißbeignung ist bei diesen Stählen gegeben. Bei erforderlichen Materialprüfungen ist zu beachten, dass bei Zugversuchen die Proben quer zur Walzrichtung entnommen werden. Der Zugversuch ist mit Proben der Form 2 nach EN 10002-1 [5] bei Raumtemperatur durchzuführen. Um die Bleche den Zeugnissen später zuzuordnen, wird die Kennzeichnung auf der besichtigten Seite mit Tinte vorgenommen. Die Eigenschaften vom kaltgewalzten Werkstoff DC01 werden nach EN 10130:2016 (D) [12] beschrieben. Daraus geht hervor, dass die Zugfestigkeit zwischen 270 und 410 MPa liegen muss. Der maximal zulässige Wert für Kohlenstoff beträgt 0,12 %, für Phosphor 0,045 %, für Schwefel 0,045 %, für Mangan 0,60 % [12].

## 2.4 Zugversuch

Beim Zugversuch handelt es sich um ein nach DIN EN 10002-1 genormtes und vereinheitlichtes Verfahren der zerstörenden Werkstoffprüfung. Man unterscheidet zwischen Warmzugversuchen bei vorgegebener erhöhter Temperatur und Kaltzugversuchen, die bei Raumtemperatur stattfinden. Die wesentlichen zu ermittelnden mechanischen Kenngrößen sind die Zugfestigkeit, die Streckgrenze und die Bruchdehnung. Die Kennwerte werden mit einer festgelegten Geometrie der Proben bestimmt und liefern wichtige Erkenntnisse bzgl. des Werkstoffverhaltens bei einachsiger Belastung. Man unterscheidet zwischen einer Rundzugprobe und einer Flachzugprobe. Die Proben werden durch eine Zugbeanspruchung so weit gedehnt, dass es zu einem Bruch der Probe führt. Die Dehnung soll gleichmäßig, stoßfrei und mit geringer Geschwindigkeit erfolgen [5].

## 2.5 Berstdruckversuch

Der Berstdruckversuch dient einerseits zur Qualitätskontrolle (zerstörendes Verfahren zur Prüfung der Schweißnähte auf ausreichende Güte), andererseits zum experimentellen Nachweis ausreichender Druckfestigkeit. Dabei wird der Druck in einem Prüfstück bei Umgebungstemperatur bis zum Bersten des Prüfstücks erhöht. Der dabei erreichte Druck ist der Berstdruck  $P_B$ . Das Prüfstück selbst muss in allen festigkeitsmäßig relevanten Parametern (Werkstoff, Schweißverfahren, Wandstärken, Abmessungen und Abstände der Schweißkonturen), nicht aber in den Außenabmessungen dem Bauteil entsprechen, dessen Druckfestigkeit nachgewiesen werden soll. Kriterien für eine ausreichende Druckfestigkeit wurden in verschiedenen Regelwerken zur Auslegung von Druckgeräten entwickelt, z.B. im AD 2000-Merkblatt S5 [1]. Für Werksabnahmen, bei denen keine besonderen sicherheitstechnischen Anforderungen erfüllt werden müssen, die sich aus Gesetzen zur Arbeitssicherheit im Betreiberland des Druckgeräts ergeben, wird bei der Firma BUCO Laserplate GmbH folgendes einfaches Kriterium zum Nachweis ausreichender Druckfestigkeit verwendet:

$$P_{B,erf} = 5 \times P_s \times K_{20}/K \quad (2.1)$$

In Gl. (2.1) ist  $P_{B,erf}$  der mindestens erforderliche Berstdruck,  $P_s$  der maximal zulässige Druck im Druckgerät,  $K$  der maßgebende Festigkeitskennwert des Werkstoffs bei der maximal zulässigen Temperatur des Druckgeräts und  $K_{20}$  der maßgebende Festigkeitskennwert bei Umgebungstemperatur. Der tatsächlich erreichte Berstdruck  $P_B$  muss mindestens dem erforderlichen Berstdruck entsprechen (Gl. 2.2):

$$P_B \geq P_{B,erf} \quad (2.2)$$

Die Berechnungsformel wird bei der Abnahme vom TÜV akzeptiert, um den Druck zu bestimmen, der beim Berstdruckversuch mindestens erreicht werden muss. Die Formel ist prinzipiell für austenitische Stähle gedacht, kann jedoch auch für andere Stähle verwendet werden. Je nachdem wie sich die Werte aus den Zugversuchen zueinander verhalten, sind für die Berechnung als Festigkeitskennwert  $K$  die Streckgrenze oder Zugfestigkeit zu verwenden. Für den Streckgrenzenabfall bzw. Zugfestigkeitsabfall werden die Werte bei Umgebungstemperatur und bei Warmtemperatur eingesetzt.

Bei dem Berstdruckversuch handelt es sich um ein zerstörendes Prüfverfahren, das stichprobenartig durchgeführt wird. Die Berstdruckversuche sind in Kombination mit weiteren Angaben zu betrachten. Dazu zählen Konstruktionszeichnungen, Herstellerverfahren, Prüfbedingungen, Beschreibung der Prüfinstrumentierung und Beurteilung der Ergebnisse.

Aufgrund eines möglichen schlagartigen Versagens des Prüfkörpers, sind entsprechende Sicherheitsvorkehrungen zu treffen. Aufgrund dessen wird der erforderliche Berstdruck mit einer nicht korrosiven Flüssigkeit aufgebracht. Beim Berstdruckversuch sollten einfache Formen und weiche Übergänge untersucht werden. Es ist darauf zu achten, dass bei Beginn des Versuches die Temperatur der Prüfkörper und der Prüfliquidität nah an der Raumtemperatur liegt. Während der Durchführung sollte die Prüfliquidität eine Temperatur von mindestens 10 °C unterhalb der Siedetemperatur bei Atmosphärendruck nicht überschreiten. Der Berstdruck ist so aufzubringen, dass im ersten Lastschritt 50 % des erforderlichen Mindestberstdruckes aufgebracht wird und danach jeweils weiter 10 % des erforderlichen Mindestberstdruckes. Nach jeder Steigerung muss der Druck konstant gehalten werden. Der Berstdruckversuch ist als bestanden anzusehen, insofern der Prüfkörper bis zum Erreichen des erforderlichen Berstdruckes keine unzulässige plastische Verformung und kein Austreten der Prüfliquidität aufweist. Andernfalls muss der Berstdruckversuch mit einem zweiten Prüfkörper aus der Produktionsreihe wiederholt werden. Der Berstdruckversuch ist vom Hersteller mit einem Prüfbericht abzuschließen [1].

## **2.6 Widerstandsrollennaht- Schweißmaschine**

Die Vollverschweißung der Wärmeaustauschplatten findet durch eine Widerstandsrollennaht-Schweißmaschine statt. Die im Unternehmen eingesetzte Schweißmaschine wurde von der Firma Schlatter Industries AG hergestellt. Es handelt sich um das Model GPN3.242.99.32, das 1984 gebaut wurde. Die Elektroden der Schweißmaschine bilden hierbei ein Rollenpaar aus Kupfer, das sich so dreht, dass das Werkstück infolge der Anpresskraft weiterbewegt wird. Die Rollen pressen dabei die Bleche zusammen, wobei der Schweißstrom definiert in die zu verbindenden Werkstücke eingeleitet wird. Vorteile gegenüber dem Nahtschweißen sind ein geringerer Elektrodenverschleiß und eine höhere Schweißgeschwindigkeit. Die axiale Bewegung der Bleche findet mittels Achswellen statt, die eine Vorrichtung durch Linearführung in zwei Dimensionen bewegen. Das Schweißergebnis ist abhängig vom Zusammenspiel von Schweißstrom, Schweißgeschwindigkeit und Kraft der Elektroden [16].

## **2.7 Europäische Werkstoffzulassung**

Durch Antrag eines Herstellers von Druckgeräten ist die europäische Werkstoffzulassung von einer notifizierten Stelle zu erstellen. Durch geeignete Untersuchungen und Prüfungen werden die Anforderungen gemäß RICHTLINIE 2014/68/EU [21] zur Zertifizierung bestätigt. Die Angaben sind den Mitgliedsstaaten und der Kommission zur Prüfung vorzulegen. Insofern die Anforderungen für die Werkstoffzulassung erfüllt sind, führt dies zu einer Aktualisierung der Liste der Zulassungen im Amtsblatt der Europäischen Union. Sollte ein Mitgliedsstaat oder die Kommission Bedenken bzgl. der einzuhaltenden Sicherheitsanforderungen sehen, ist die Werkstoffzulassung für Druckgeräte in Frage zu stellen und kann sonst aus dem Amtsblatt der Europäischen Union gestrichen werden [21, Artikel 15].



## **3. Auswahl geeigneter Stähle**

### **3.1 Werkstoffanforderungen gemäß Richtlinie 2014/68/EU nach Druckgeräterichtlinie**

Um einen Werkstoff für Druckgeräte einzusetzen, muss dieser bestimmte Qualitätsmerkmale gemäß der europäischen Druckgeräterichtlinie 2014/68/EU [21] erfüllen. Im Folgenden werden diese Anforderungen, die in der Druckgeräterichtlinie definiert sind, beschrieben.

Im Punkt 30 der Einleitung der Druckgeräterichtlinie 2014/68/EU [21] ist genannt, dass Druckgeräte aus als sicher geltende Werkstoffen herzustellen sind. Als sicher gelten zunächst alle Werkstoffe, die nach einer harmonisierten europäischen EN-Norm spezifiziert sind.

Eine zweite Möglichkeit ist die Verwendung von Werkstoffen, für die eine europäische Werkstoffzulassung nach Artikel 15 der Druckgeräterichtlinie vorliegt. Von dieser Möglichkeit wird aber praktisch kaum Gebrauch gemacht [21].

Wenn ein Werkstoff verwendet werden soll, der nicht in einer harmonisierten EN-Norm spezifiziert ist und für den auch keine europäische Werkstoffzulassung vorliegt, muss ein Einzelgutachten (PMA) für diesen Werkstoff erstellt werden. In diesem PMA muss nachgewiesen werden, dass der Werkstoff ausreichende Eigenschaften für den sicheren Einsatz im Druckgerät besitzt. Dazu zählt, dass die Werkstoffe insbesondere ausreichend Duktilität und Zähigkeit aufweisen und spröde Werkstoffe vermieden werden. Es ist ebenfalls auf ausreichende chemische Beständigkeit gegen das im Druckraum verwendete Fluid zu achten. Die Lebensdauer ist daher von der Beständigkeit der Werkstoffe gegenüber chemischen und physikalischen Angriffen abhängig [21].

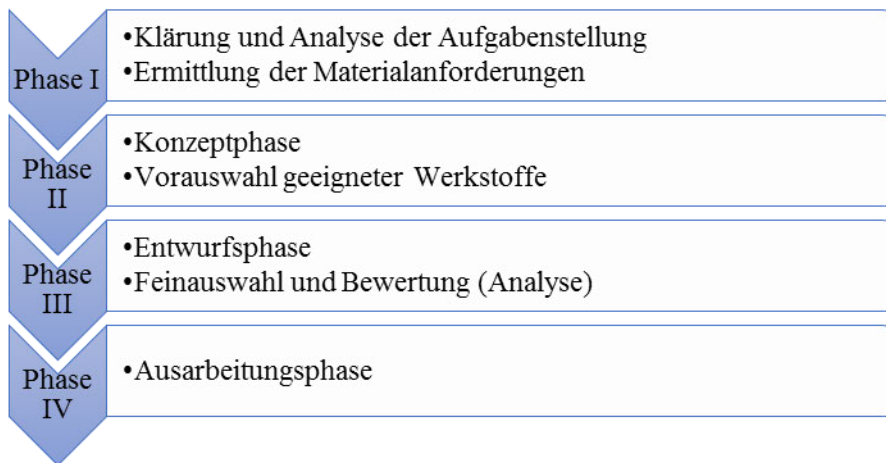
### **3.2 Methodik der Werkstoffauswahl**

Nachdem die Aufgabenstellung sowie deren Intention in der Einleitung ausführlich erläutert wurden, wird neben den bereits beschriebenen relevanten Begriffen in diesem Unterpunkt eine erste lösungsorientierte Recherche durchgeführt. Es ist zu untersuchen, ob Stähle, die speziell für einfache Druckgeräte nach AD 2000 W1 [3] definiert sind, eine mögliche Alternative zu DC01 darstellen. Darüber hinaus sind in der DIN EN 10130 [12] neben dem Werkstoff DC01 auch verwandte Werkstoffe mit einer kaltgewalzten Oberfläche beschrieben. Diese Werkstoffe werden anhand ihrer Eigenschaften und Kennwerte mit dem DC01 verglichen. Wie bereits erwähnt, ist hierbei zu beachten, dass es sich um Werkstoffe handelt, die nicht nach einer harmonisierten Norm gemäß der Druckgeräterichtlinie eingestuft sind und entsprechende Einzelnachweise erfordern. Als dritte Möglichkeit geeignete Werkstoffe zu finden, wird außerdem speziell nach kaltgewalzten Stahlblechen recherchiert.

Um die speziellen Materialeigenschaften und Kennwerte möglicher einzusetzender Werkstoffe vergleichen und bewerten zu können, wurden Tabellen mit allen relevanten Werkstoffeigenschaften erstellt. Da die Werkstoffe in Druckbehältern zum Einsatz kommen, sind vor allem die Werte für Festigkeit und Verformbarkeit zu betrachten. Ein proportioniertes Verhältnis aus Festigkeit und Duktilität weist in der Regel auf zähe Werkstoffe hin. Die Zähigkeit liefert Erkenntnis über das verformungsfähige Verhalten des

Werkstoffes. Dies ist zu analysieren, da der Werkstoff während der Plattenfertigung kaltumgeformt wird. Hierzu sind außerdem die Bruchdehnung und Kerbschlagarbeit zu betrachten. Für die Festigkeit sind schwerpunktmäßig die Streckgrenze bzw. Dehngrenze auszuwerten. Aufgrund der Einsatztemperaturen der Platten empfiehlt sich, dass die Werte bei Raumtemperatur und erhöhter Temperatur verglichen werden. Bereits 2017 wurde der Werkstoff DC04 von BUCO Laserplate als mögliche Alternative zu DC01 in Betracht gezogen. Die Resonanz einiger Lieferanten hatte ergeben, dass der Werkstoff DC04 ca. 40 Euro pro Tonne günstiger zu beschaffen ist und dass die Lieferzeit in der Regel eine Woche beträgt. In der Regel kann man für die Beschaffung von DC04 aktuell von 900-1000 Euro pro Tonne ausgehen. Die Angaben basieren jedoch auf einer definierten Abnahmemenge, die im Vorfeld mit den Lieferanten abgestimmt wird. Bei DC01 ist die aktuelle Lieferzeit schwankend, im Mittelwert kann man jedoch von 1 bis 2 Wochen ausgehen. Die Lieferzeit ist abhängig von den aktuell auf dem Markt verfügbaren Abmessungen und Oberflächenbeschaffenheiten. Die damaligen Untersuchungen haben jedoch weiterführend ergeben, dass die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffes DC04 nicht ausreichen, insbesondere bei höheren Temperaturen. Im Zuge dieser Bachelorthesis werden nun zusätzlich zur Verfügbarkeit auch die werkstofftechnischen Hintergründe weiterer Werkstoffe untersucht. Für den Werkstoff DC01 wurden bereits aussagekräftige Zugversuche bei Raumtemperatur und Warmzugversuche durchgeführt, die für diese Bachelorthesis genutzt werden. Die Zugversuche finden für DC01 für laufende Aufträge regelmäßig statt, um den Nachweis der geforderten Materialeigenschaften für den Einsatz von Druckbehältern sicherzustellen.

Im Folgenden werden der systematische Weg und die angewandte Methodik zur Identifizierung des Werkstoffs mit der besten Eignung beschrieben. In der methodischen Produktentwicklung werden neue Produkte oft durch die VDI-Richtlinie 2221 [20] entwickelt. In dieser Richtlinie ist der Prozess vom Anstoß einer Aufgabe bis hin zur Entscheidung bzw. einer Lösung in Arbeitsschritten dargestellt. Die Materialauswahlprozesse sind Teile des Konstruktionsprozesses und zeigen hinsichtlich der Vorgehensweise zur Lösung von Konstruktionsaufgaben Ähnlichkeiten auf. Beide Prozesse beruhen auf einem allgemein formulierten Problemlösungszyklus, der durch einen nicht vorhersehbaren Impuls oder Beweggrund einer Lösung bedarf. Im Falle dieser Bachelorthesis ist der Impuls die immer schlechter werdende Materialversorgung mit einem bestimmten Werkstoff. Um den Lösungsprozess zu beginnen, ist es wichtig eine genau definierte Situationsanalyse zu formulieren, die die Forderungen und Wünsche enthält. In der VDI 2221 spricht man von einer Klärungsphase, die die technischen und wirtschaftlichen Anforderungen festlegt. Sobald die Anforderungen und Strukturen geklärt sind, beginnt die Suche nach ersten Lösungsprinzipien und deren Strukturen. Bezogen auf die systematische Werkstoffauswahl leitet sich eine zweite Phase ab, die erste mögliche Konzepte durch gezielte Lösungssuche aufstellt. In diesem Fall ist es das Suchen und Finden geeigneter Werkstoffe. Diese Phase wird auch als Konzeptphase bezeichnet. Aus der Konzeptphase leitet sich die Entwurfsphase ab. Hier sind potenzielle Materiallösungen daraufhin zu untersuchen, ob die geforderten Eigenschaften erfüllt werden können. In dieser dritten Phase soll eine Überprüfung der Werkstoffe durch Versuche stattfinden. Anschließend werden die Versuchsergebnisse und Eigenschaften in der Ausarbeitungsphase diskutiert. Die Evaluierung und Validierung der Eigenschaften führt letztlich zur Entscheidungsfindung. Die vier Phasen sind in Abbildung 1 zusammengefasst.



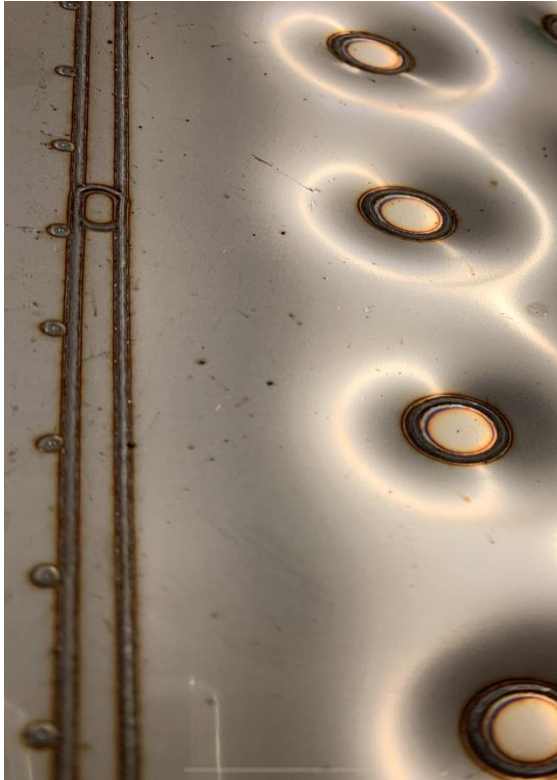
**Abbildung 1:** Lösungsprozess der methodischen Produktentwicklung [nach 20]

Die beschriebene Vorgehensweise ist angelehnt an die Top-Down-Methode. Von einer unüberschaubaren Anzahl an verfügbaren Werkstoffen wird die Zahl an Lösungsvarianten immer weiter eingeschränkt. Die Reduktion erfolgt durch die Ableitung von Auswahlkriterien und Materialanforderungen. Eine weitere Beschränkung und Detaillierung erfolgen durch das Beschaffen weiterer Informationen und ergänzende Untersuchungen, so dass die Zahl möglicher Kandidaten weiter spezifiziert wird. Es ist stets zu beachten, dass der Auswahlprozess bei der systematischen Werkstoffauswahl nachvollziehbar beschrieben ist [20].

### 3.3 Werkstoffauswahl

Die Werkstoffauswahl wird in dieser Bachelorthesis dahingehend eingegrenzt, dass nur Werkstoffe mit einer kaltgewalzten Oberfläche für die Herstellung von Wärmeaustauschplatten zur Beheizung von Industriebacköfen ausgewählt werden. Werkstoffe mit einer warmgewalzten Oberfläche werden im Rahmen dieser Bachelorthesis nicht betrachtet, sind aber der Vollständigkeit halber für spätere Untersuchungen in der Werkstoffübersicht in den Tabellen 8 bis 15 aufgenommen. Die Tabellen 8 bis 15 sind im Anhang abgebildet.

Eine warmgewalzte Oberfläche hat gegenüber einer kaltgewalzten Oberfläche eine deutlich schlechtere Oberflächenbeschaffenheit. Aus dem Merkblatt 984 geht hervor, dass die Rauheitswerte bei kaltgewalzten Oberflächen typischerweise bei maximal  $0,5 \mu\text{m}$  liegen und bei warmgewalzten Oberflächen bei  $5,5 \mu\text{m}$  [19]. Die unebenere warmgewalzte Oberfläche bewirkt beim Schweißprozess, der hier als Widerstandsrollennaht-Schweißung stattfindet, ein schlechteres Schweißergebnis (vgl. Abbildung 2 und 3). Das hängt damit zusammen, dass bei unebenen Oberflächen ein höherer Anpressdruck der Elektrodenrollen erforderlich ist. Des Weiteren entsteht beim Schweißen warmgewalzter Oberflächen eine Beeinträchtigung durch Zunder.



**Abbildung 2:** Grundblech mit kaltgewalzter Oberfläche



**Abbildung 3:** Grundblech mit warmgewalzter Oberfläche

In Abbildung 2 ist eine durchgeschweißte Laserschweißnaht abgebildet, die einen sauberen und homogenen Verlauf aufweist. Das Aufdrücken der beiden Bleche zu einer profilierten Platte erfolgte ohne Schwierigkeiten. Die Schweißnaht auf Abbildung 3 zeigt hingegen ein schlechteres Schweißergebnis mit einer spröderen Schweißnaht und einer stärker ausgeprägten Wärmeeinflusszone. Außerdem ist eine stärker sichtbare braune Verfärbung an der Schweißnaht zu erkennen. Hier kam es beim Aufdrücken der Platte zum Lösen von Schweißstellen, die per Hand nachgeschweißt werden mussten.

In den Tabellen 8 bis 15 sind die mechanischen und technologischen Eigenschaften der Werkstoffe dargestellt. Des Weiteren sind Aspekte bzgl. der Materialbeschaffbarkeit wie Oberflächenausführung, verfügbare Materialdicken und Materialzertifizierung mit einbezogen. Die Materialkennwerte sind aus den entsprechenden Werkstoffnormen und Werkstoffdatenblättern entnommen. Die Werkstoffdatenblätter wurden von Materiallieferanten dahingehend ergänzt, dass Angaben zur Schweißbarkeit, Kaltumformbarkeit und Beschaffbarkeit gemacht werden. Diese Angaben wurden in den Tabellen 8 bis 15 ebenfalls eingetragen. Die Werkstoffe, die in den Tabellen 8 bis 12 genannt sind, sind explizit nach dem AD 2000 – Merkblatt W1 [3] für Druckgeräte zugelassen. Da diese Werkstoffe für die Herstellung von Druckbehältern zugelassen sind, sind in der Norm auch Angaben zu dem Werkstoffverhalten bei höheren Temperaturen aufgeführt, wie beispielsweise die Warmdehngrenze. Die Angaben sind insbesondere bei für Druckbehälter zugelassenen Werkstoffen gegeben und sind in den Tabellen entsprechend ergänzt. Die Betrachtung bei höheren Temperaturen kann bei ausgewählten Werkstoffen weitere entscheidende Auswahlkriterien liefern. Bei den Werkstoffen der Tabellen 13 bis 15 müssen für den Einsatz von Druckgeräten entsprechende Nachweise erbracht werden, da diese nicht nach einer harmonisierten Norm geregelt sind.

In der Tabelle 8 sind unlegierte Baustähle nach DIN EN 10025-2 aufgeführt, die auch als Grobblech bezeichnet werden und überwiegend in größeren Materialdicken verfügbar sind. Nach DIN EN 10079 [10] ist ein Grobblech als Flacherzeugnis mit einer Blechdicke über 3mm definiert. [10] Die Stähle zeichnen sich durch eine hohe Streckgrenze, ausreichende

Zähigkeit, gute Zerspanbarkeit und Kaltumformbarkeit aus. Die mechanischen Eigenschaften sind auch bei Stoß- und Schlagbeanspruchungen oder tiefen Temperaturen erfüllt. Da bei diesen Stählen überwiegend die guten mechanischen Anforderungen zählen, werden die Oberflächen warmgewalzt verwendet und sind für den Einsatz von Wärmeaustauschplatten schlecht geeignet. Des Weiteren sind die Stähle überwiegend erst ab 3 mm Dicke verfügbar und erfüllen somit nicht die Anforderungen der Aufgabenstellung [6].

Die Werkstoffe nach Tabelle 9, die für einfache Druckbehälter nach DIN EN 10207 geeignet sind, und die Stähle nach Tabelle 11, bei denen es sich um schweißgeeignete normalgeglühte Stähle nach DIN EN 10028-3 handelt, sind schwer bis gar nicht in kleineren Materialstärken verfügbar und bilden somit keine mögliche Alternative für die Anwendung [14].

In Tabelle 12 sind kaltzähe Stähle nach DIN EN 10028-4 abgebildet. Diese Stähle sind speziell für den Einsatz bei niedrigen Temperaturen ausgelegt, da ihre Zähigkeit mit fallender Temperatur deutlich langsamer abnimmt als bei vergütbaren Nickelstählen [9]. Resultierend aus dieser speziellen Eigenschaft ist im Abschnitt 2.5 nach AD 2000-Merkblatt W1 [3] definiert, dass diese Stähle nur bis zu einer maximalen Temperatur von 50 °C eingesetzt werden dürfen. In dieser Bachelorthesis soll jedoch ein Werkstoff gefunden werden, der für den Einsatz bis 400 °C geeignet ist, daher sind die kaltzähen Werkstoffe nicht weiter zu betrachten.

In Tabelle 10 sind warmfeste Stähle aufgezählt, die gegenüber den kaltzähen Stählen eher für höhere Temperaturen ausgelegt werden und dann gute mechanische Eigenschaften besitzen. Die Einsatztemperaturen dieser Stähle liegen oft zwischen 400 °C bis 600 °C. Aufgrund der extremen Beständigkeit und oft größeren Materialdicken werden die Oberflächen warmgewalzt hergestellt. Für weitere Betrachtungen in Zukunft könnte der Werkstoff 16Mo3 für den Einsatz von Wärmeaustauschplatten geprüft werden, da er nicht unter den mechanischen Eigenschaften vom DC01 liegt und in den Materialstärken 1,5 mm und 2 mm grundsätzlich verfügbar ist. Auch hier ist weiter zu untersuchen, ob eine warmgewalzte Oberfläche eingesetzt werden kann.

Bei den aufgeführten Werkstoffen in Tabelle 13 handelt es sich um Stähle nach DIN EN 10268 [15], die eine hohe Streckgrenze aufweisen und sehr gut kaltumgeformt werden können. Die Stähle weisen weiterhin eine gute mechanische Festigkeit sowie eine gute Schweißbarkeit auf. Ferner handelt es sich um kaltgewalzte Flacherzeugnisse, die in den geforderten Materialdicken von 1,5 mm und 2 mm erhältlich sind. Da es sich um Stähle mit einer kaltgewalzten Oberfläche und entsprechend niedrigen Mittenrauwerten handelt, werden diese für die Werkstoffauswahl in Betracht gezogen und auf Verfügbarkeit und Kosten geprüft. Der Werkstoff HC260LA ähnelt den mechanischen Eigenschaften des DC01 und wird folglich ausgewählt [15].

Bei den Werkstoffen gemäß DIN EN 10111 [11], die in Tabelle 15 aufgeführt sind, handelt es sich um warmgewalzte Erzeugnisse, die durch eine sehr gute Umformbarkeit gekennzeichnet sind. Aufgrund schlechter Oberflächenqualitäten und einer schlechten Materialverfügbarkeit in mindestens 2 mm Dicke, wird diese Stahlgruppe nicht weiter betrachtet [11].

Wie bereits erwähnt, sind in der DIN EN 10130 [12] neben DC01 weitere verwandte Werkstoffe mit einer kaltgewalzten Oberfläche beschrieben, die für die Anwendung in Betracht gezogen werden. Diese sind jedoch nicht nach einer harmonisierten Norm definiert. Die Kennwerte dieser Werkstoffgruppe sind in Tabelle 14 abgebildet. Der Werkstoff DC01 muss laut Norm eine Zugfestigkeit zwischen 270 und 410 MPa aufweisen. Die Werkstoffe DC05 bis DC07 weisen jedoch lediglich eine maximale Zugfestigkeit von 310 bis 330 MPa

auf. DC03 und DC04 hingegen erreichen eine maximale Zugfestigkeit von 350 bis 370 MPa, die dem eingesetzten Werkstoff DC01 sehr nahekommt. Der Mindestwert der Zugfestigkeit ist bei DC01 bis DC06 jeweils identisch. Die Werkstoffe DC03 und DC04 weisen eine doppelt so lange Freiheit von Fließfiguren auf, was für eine längere mögliche Lagerhaltbarkeit sorgt [12]. Bei DC04 sind die zulässigen Schwankungen kleiner als bei DC01. Der maximale C-Gehalt beträgt bei DC01 0,12 % und bei DC04 0,08 %. Von Vorteil ist auch der höhere Mindestwert der Bruchdehnung von 38 % bei DC04 und 34 % bei DC03 gegenüber 28 % bei DC01, wodurch eine größere Duktilität erreicht wird. Da die Norm nichts über Zugfestigkeit und Bruchdehnung bei höheren Temperaturen aussagt, sind hier Ergebnisse von Warmzugversuchen heranzuziehen, die im methodischen Versuchsteil der Bachelorthesis untersucht werden [12].

Da die Werkstoffe DC03 und DC04 eine mögliche Alternative zu DC01 darstellen, wird die Materialverfügbarkeit neben dem Werkstoff HC260LA genauer betrachtet und bei Lieferanten in unterschiedlichen Abmessungen angefragt.

In Tabelle 1 wurden neben den drei ausgewählten Werkstoffen und zwecks Vergleichbarkeit auch DC01, die Materialangebote mehrerer Stahlhändler mit den notwendigen Kriterien wie Oberfläche, Abmessung, Materialzertifizierung, Kosten und Verfügbarkeit zusammengestellt. Die angegebenen Preise beziehen sich pro Blechposition auf eine voneinander unabhängige Abnahme von jeweils 50 Blechen.

Bei diesen Stahlwerkstoffen ist es üblich, größere Mengen bei den Stahlhändlern abzunehmen. Geringe Stückzahlen werden daher oft nicht angeboten.

Die Anfragen wurden Ende November 2019 bei 7 Stahlhändlern platziert und sind der Tabelle 2 zu entnehmen. Die Lieferanten, die kein brauchbares Angebot erstellen konnten, sind nicht in der Angebotsübersicht in Tabelle 2 aufgeführt.

Lieferant	Standort	gewählte Abkürzung	Angebotsdatum
Hagener Feinblech Service GmbH	Hagen	HFS	04.12.2019
Heinrich Schütt KG GmbH & Co	Hamburg	Schütt	28.11.2019
ThyssenKrupp Schulte GmbH	Hamburg	TKS	06.12.2019
VB Stahlblechverarbeitungs GmbH	Sarstedt	VBS	25.11.2019
Salzgitter Mannesmann Stahlhandel GmbH	Hamburg	SMS	02.12.2019
Blech-Service Nordhausen GmbH & Co.KG	Nordhausen	BSN	04.12.2019
LCK. Metall	Henstedt-Ulzburg	LCK	-

**Tabelle 1:** Lieferantenübersicht der Materialanfragen

	DIN	Oberfläche Geölt = 1 Ungeölt = 2	Dicke [mm]	Breite [mm]	Länge [mm]	Werkzeugnis 2.2	Preis [€/Tonne]	Lieferzeit	Lieferant
									<b>HFS</b>
<b>DC01</b>	EN 10130	2	1,5	2000	3000	ja	895	10 Tage	
		2	2	2000	3000	ja	895	10 Tage	
<b>DC03</b>	EN 10130	2	1,5	2000	3000	ja	905	10 Tage	
		2	2	2000	3000	ja	895	10 Tage	
<b>DC04</b>	EN 10130	2	1,5	2000	3000	ja	915	10 Tage	
		2	2	2000	3000	ja	905	10 Tage	
<b>HC260LA</b>	EN 10268	2	1,5	2000	3000	ja	-	-	
		2	2	2000	3000	ja	-	-	
									<b>TKS</b>
<b>DC01</b>	EN 10130	2	1,5	2000	3000	ja	995	10 Tage	
		2	2	2000	3000	ja	985	10 Tage	
<b>DC03</b>	EN 10130	2	1,5	2000	3000	ja	995	10 Tage	
		2	2	2000	3000	ja	985	10 Tage	
<b>DC04</b>	EN 10130	2	1,5	2000	3000	ja	1150	10 Tage	
		2	2	2000	3000	ja	1050	10 Tage	
<b>HC260LA</b>	EN 10268	2	1,5	2000	3000	ja	-	-	
		2	2	2000	3000	ja	-	-	
									<b>VBS</b>
<b>DC01</b>	EN 10130	2	1,5	2000	3000	ja	895	Neueingang kw01/20	
		2	2	2000	3000	ja	895	1 Woche (Vorrat)	
<b>DC03</b>	EN 10130	2	1,5	2000	3000	ja	900	Neueingang kw01/20	
		2	2	2000	3000	ja	900	Neueingang kw01/20	
<b>DC04</b>	EN 10130	2	1,5	2000	3000	ja	910	1 Woche (Vorrat)	
		2	2	2000	3000	ja	910	1 Woche (Vorrat)	
<b>HC260LA</b>	EN 10268	2	1,5	2000	3000	ja	935	Neueingang kw01/20	
		2	2	2000	3000	ja	935	Neueingang kw01/20	


**Tabelle 2:** Angebotsübersicht ausgewählter Werkstoffe und Abmessungen

Die Materialanfragen ergeben, dass der Werkstoff HC260LA schlechter beschaffbar ist, als die Werkstoffe DC01, DC03 und DC04. Nur der Lieferant VBS konnte für diesen Werkstoff ein Angebot unterbreiten. Weiterhin ist bei diesem Werkstoff, insofern überhaupt verfügbar, eine längere Lieferzeit zu erwarten. Aus diesem Grund wird dieser Werkstoff aus der weiteren Analyse ausgeschlossen. Die Werkstoffe DC03 und DC04 sind im Vergleich zu DC01 grundsätzlich schwieriger zu beschaffen und sind nur bei wenigen Lieferanten erhältlich. Diese Güte, die über beste Eigenschaften zum Tiefziehen verfügt, wird meist für Rahmenverträge mit garantierter Abnahme disponiert und weniger im Tagesgeschäft benötigt. Hier reicht DC01 für die meisten Stanz- Nippel oder Laserbetriebe aus [4]. Die Lieferanten Schütt, SMS, BSN und LCK können aktuell gar keine Angebote erstellen, da sie keinen Zugriff auf entsprechendes Vormaterial haben oder die Werkstoffe im Sortiment erst gar nicht führen. Aus den Materialanfragen geht hervor, dass die Beschaffungskosten für DC01 und DC03 vergleichbar sind und bei DC04 tendenziell etwas teurer.



Bei der Auswahl zwischen DC03 und DC04 sind die Aspekte der Verfügbarkeit und die mechanischen Eigenschaften gegenüber dem Werkstoff DC01 zu bewerten. DC04 weist gemäß den Materialanfragen eine geringfügig bessere Verfügbarkeit gegenüber DC03 auf. Bei TKS und HFS sind die Werkstoffe DC01, DC03 und DC04 mit einer Lieferzeit von 10 Arbeitstagen freibleibend angeboten. Bei VBS ist das Vormaterial zu DC03 nicht verfügbar und als Neueingang im Januar 2020 zu erwarten.

Die mechanischen Eigenschaften des DC03 ähneln denen des DC01 mehr als die des DC04 (siehe Kapitel 3.3, Werkstoffauswahl). Da die Materialverfügbarkeit allgemein als sehr schwankend bezeichnet werden kann, wird der Schwerpunkt auf die Werkstoffeigenschaften gelegt. Demnach wird der Werkstoff DC03 für weitere Untersuchungen herangezogen und im Kapitel 4, Versuchsdurchführung, weiter betrachtet. Die Prüfbescheinigung vom Lieferanten, die den Werkstoff DC03 bestätigt, ist in Abbildung 4 dargestellt.



Werk Delta Stahl  
Werk Frankfurt a. M.  
Werk Max Baum  
Werk Mittingen  
Werk Wiskel & Winkler  
Werk Walter Patz

---

PRÜFBESCHEINIGUNG Nr. 71137 12.12.2019 Seite: 1

Werkstoffkennwerte aus spezif. Prüfung in Anlehnung an DIN EN 10204 Abnahmeprüfzeugnis 3.1

<b>FIRMA</b> thyssenkrupp Schulte GmbH ThyssenKrupp Allee 1 D-45143 Essen	<b>Sachbearbeiter :</b> Manuela Christmann  <b>Bestell-Nr. :</b> C14-5404542565 TKsHs <b>Sach-Nr. Kunde :</b> SDC03200BGD <b>Auftrags-Nr. :</b> 362002.00/0001 -0010 <b>Bestellgüte:</b> DC03 AM o.-geölt	<b>Durchwahl:</b> 0203/4519-216  <b>Erzeugnis:</b> Ia Flachbleche <b>Liefergewicht:</b> Netto: 50 kg / Brutto: 80 kg <b>Abmessungen:</b> 2 x 1250 x 2500 mm  <b>Tech.-Lieferbedingungen:</b> DIN EN 10130 / 10131
--	--	--

---

**PRÜFERGEBNISSE (Test results)**

Identity	Zugversuch (tensile test)				Chemische Analyse (chemical composition) (%)										
Coil-Nr. (Charge)	A80 [%]	Re [N/mm <sup>2</sup> ]	Rm [N/mm <sup>2</sup> ]	r90 n90	t/l 1.)	C V	Si Cr	Mn Ni	P Cu	S Mo	Al N	Ti	Nb	2.) sonstige/others	
-----															
Soll:	Min 34,0	140	270	1,30											
(target):Max		240	370			0,1000		0,4500	0,0350	0,0350					
-----															
	Min														
	Max														
-----															
2019855621	38,9	210 Rp0,2	311	1,61	T	0,0001		0,2090	0,0140	0,0250					

1) Probenlage: t = transversal (quer); l = longitudinal (längs)  
2) sonstige:

Es wird bestätigt, dass die unter Prüfergebnisse genannte(n) Coil-Nr. (Charge) den vorgenannten Prüfungen unterzogen wurden. Die aufgeführten Prüfergebnisse entsprechen den Anforderungen aus den Technischen Lieferbedingungen. Weitergehende Prüfungen wurden nicht vorgenommen.

Dieses Dokument wurde maschinell erstellt und ist auch ohne Unterschrift gültig.

**Abbildung 4:** Prüfbescheinigung für ein Blech aus DC03



## 4. Versuchsdurchführung und Auswertung

### 4.1 Allgemeines

Um das benötigte Material und die notwendigen Arbeitsgänge für die durchzuführenden Versuche zu planen, wurde im ERP- System der Fa. BUCO Laserplate (Beosys 9) ein interner Auftrag mit Nummer 319020 angelegt. Die Auftragsübersicht, in Form einer Stückliste, ist in Abbildung 5 dargestellt.

The screenshot displays the SAP ERP interface for an internal order. The top section shows the order details: 'Interner Auftrag' with order number 319020, description 'Versuche DC03 (Bachelorarbeit Patrick)', product area '30 Sonstiges', and company 'BUCO Laserplate GmbH'. Below this is a table of 'Interne Auftragspositionen' (Internal Order Positions) with columns for Article Number, Position, Description, Quantity, Unit, Article Type, and Drawing. Two positions are listed: Position 10 for 'Berst- und Zugversuche DC03' and Position 20 for 'Berstversuche DC01'. The bottom section shows a detailed view of Position 10, including its sub-positions: '11210 Schlatter' (welding process), 'BLE-300052' (steel plate), and 'PRÜ-300621' (tensile tests).

Interner Auftrag		319020	
Auftragsnummer			
Bezeichnung	Versuche DC03 (Bachelorarbeit Patrick)		
Produktbereich	30 Sonstiges		
Mandant	BUCO Laserplate GmbH		

Artikelnummer	Position	Bezeichnung	Menge	Einheit	Artikelart	Zeichnung
PRD-981000	10	Berst- und Zugversuche DC03	1,00	Stück	Fertigungsteil	
PRD-981000	20	Berstversuche DC01	1,00	Stück	Fertigungsteil	

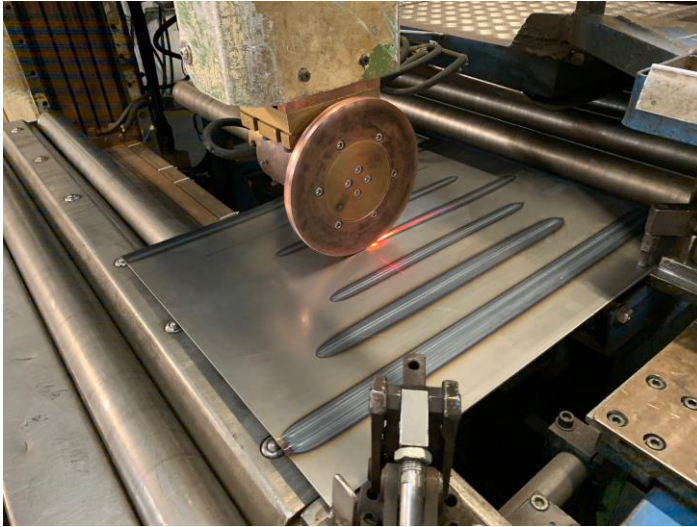
Position gesamt	Nummer	AG	Bezeichnung	Bezeichnung intern/Tätigkeit	Zeit
>	10	SO: PRD-981000	--- Berst- und Zugversuche DC03		
	10	10	11210 Schlatter	Zusatzarbeitsgang ausführen	
	10.10	SO: BLE-300052	--- Blech Standard Stahl (EA)		
	10.20	SO: PRÜ-300621	--- Zugversuche an Proben au...		

Abbildung 5: Übersicht Auftragsablauf

Für die geplanten Versuche wurden zwei Positionen 10 und 20 im Auftrag angelegt, die für den Werkstoff DC03 zwei Berstdruckversuche, 2 Kaltzugversuche bei Raumtemperatur und zwei Warmzugversuche bei 400 °C beinhalten. Für den Werkstoff DC01 sind in Position 20 zwei Berstdruckversuche angelegt. Um die zu prüfenden Platten durch die Widerstandsrollennaht- Schweißmaschine zu schweißen, wurde zusätzlich der Arbeitsgang 10 erstellt. Für das Schweißmuster der Platten ist eine Schweißzeichnung von der Konstruktionsabteilung erstellt wurden. Für den Werkstoff DC01 liegen ausreichend Zugversuche im Betrieb vor, die zum Vergleich mit denen des DC03 herangezogen werden. Um die Berstdruckversuche der beiden Werkstoffe unter denselben Bedingungen zu vergleichen, wurden hierfür jeweils 2 Versuche für jeden Werkstoff durchgeführt. Die Versuchsprotokolle der Berstversuche befinden sich im Kapitel 4.2. Die Zugversuche wurden bei der Prüfstelle, BK Werkstofftechnik - Prüfstelle für Werkstoffe GmbH, in Bremen durchgeführt. Die bereits vorhandenen Zugversuche am Werkstoff DC01 und die daraus resultierenden Ergebnisse wurden ebenfalls von dieser Prüfstelle erstellt, so dass ein Vergleich unter äquivalenten Prüfbedingungen stattfindet. Für einen Berstdruckversuch werden zwei Zuschnitte mit den Maßen 700x565 mm benötigt und für die Zugversuche jeweils zwei Zuschnitte mit den Maßen 250x250 mm. Die Proben für die Zugversuche werden direkt von der Prüfstelle herausgeschnitten. Hierfür wurde für beide Werkstoffe jeweils eine Blechtafel mit den Abmessungen 2,0x1250x2500 mm bestellt, aus der die benötigten Zuschnitte herausgeschnitten wurden. Das Maß für die Berstversuche ergibt sich aus dem Mindestmaß der Schweißmaschine, um die Patten sicher einzuspannen.

## 4.2 Berstdruckversuch

Der nachfolgende Abschnitt beschreibt zwei Berstdruckversuche der Werkstoffe DC01 und DC03, die nach Zeichnung 19/41799/0 (Abb. 13 und 14) durchgeführt wurden. Auf den Zeichnungen sind die erreichten Berstdrücke und die jeweiligen Stellen des Materialversagens durch den Prüfer vermerkt. Der Schweißprozess der Versuchsplatte, die im Berstdruckversuch geprüft wird, ist exemplarisch für den Werkstoff DC01, in Abbildung 6 dargestellt.



**Abbildung 6:** Schweißprozess für die Längsnähte der Berstdruckversuchsplatte vom DC01

Anhand der Versuche wird der Berstdruck bestimmt, der neben dem Nachweis der Druckfestigkeit auch Aussagen über die Güte und Eignung von Werkstoff und Schweißnähten erlaubt. Die im Vorfeld hergestellten Platten sind bis auf einen Hilfsanschluss komplett geschlossen und werden über diesen mit Wasser langsam gefüllt, da Wasser beim Bersten nicht oder nur schwach expandiert.

Es wurde in Betracht gezogen, dass während der Durchführung der Berstdruckversuche, zusätzlich die Aufdrückhöhen in vorher definierten Schritten gemessen werden. Da der Berstdruckversuch jedoch langsam und gleichmäßig ohne weitere Störeinflüsse durchgeführt wird und durch das Messen der Aufdrückhöhen das Ergebnis des eigentlichen Berstdruckversuches verfälscht werden könnte, wurde darauf verzichtet und nicht weiter bei der Beurteilung beider Werkstoffe untersucht. Die Versuche wurden mit gleichen Schweißparametern durchgeführt, die der Zeichnung 19/41799/0 in Abbildung 13 und 14 zu entnehmen sind. Zu den Schweißparametern zählen die Maschineneinstellungen, der Stromanstieg, die Elektrodenkraft und die Geschwindigkeit. Es wird ein kalibriertes Manometer verwendet, das den Druck beim Berstdruckversuch anzeigt. Die Nummer des Manometers wird im Versuchsprotokoll festgehalten, damit man später nachvollziehen kann, ob das Manometer tatsächlich zum Zeitpunkt der Messungen kalibriert war.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse ist die Anzahl der Versuche zu beachten. Da die Berstdruckergebnisse beider Werkstoffe auf jeweils zwei Versuchen beruhen, ist für die Bewertung zusätzlich die Erfahrung im Unternehmen heranzuziehen. Um auftragsbezogene Betrachtungen zu erzielen, ist im Unternehmen oft nur ein Berstdruckversuch ausreichend. Die jeweiligen Berstdruckplatten für DC01 und DC03 sind in den Abbildungen 7 und 8 dargestellt, auf denen die Position der Hilfsanschlüsse am unteren Rand erkennbar ist.

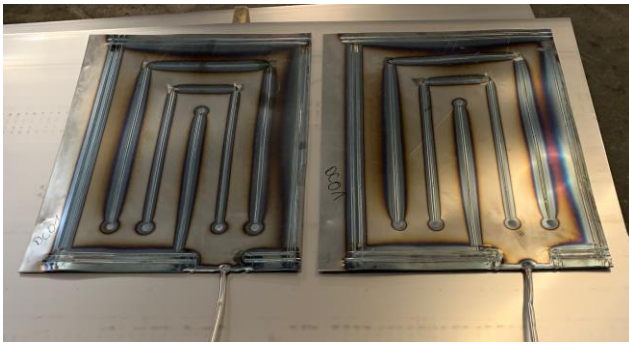


Abbildung 7: Berstdruckplatten DC01



Abbildung 8: Berstdruckplatten DC03

In den Abbildungen 9 und 10 ist jeweils ein Foto der geschweißten Platten zu sehen, auf der man beim Werkstoff DC01 einen Unterschied der Anlauffarben an den Schweißnähten erkennt. Speziell an der äußeren Schweißnaht der DC01 Platten sind die Anlauffarben stärker ausgeprägt als beim Werkstoff DC03. Um die Ursache der unterschiedlichen Anlauffarben zu beurteilen, ist insbesondere die chemische Zusammensetzung der Werkstoffe heranzuziehen, die aus der Norm DIN EN 10130 zu entnehmen ist. Die chemische Zusammensetzung gibt Aufschluss darüber, welche Elemente im Werkstoffgefüge enthalten sind. Der Anteil der einzelnen Elemente wird dabei in Prozent angegeben. Dieser Punkt wird im Kapitel 4.3, Analyse der Ergebnisse, weiter betrachtet.

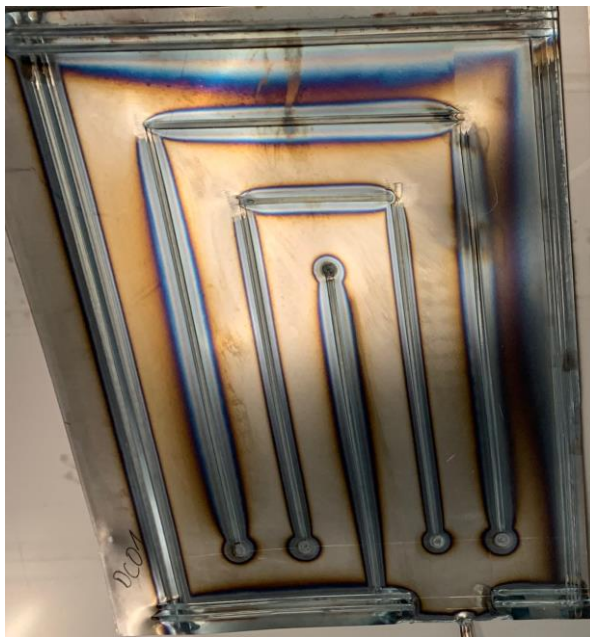


Abbildung 9: Berstdruckplatte, Anlauffarbe DC01



Abbildung 10: Berstdruckplatte, Anlauffarbe DC03

Nach dem Schweißen werden die Platten auf einem Versuchstisch fixiert, so dass der Druck über einen Hilfsanschluss aufgebracht werden kann. Das Fixieren geschieht über das Positionieren mehrerer festschraubbarer Backen, die von einem Mitarbeiter per Hand angezogen werden. Um die Sicherheit zu gewährleisten, sind hochfeste Schrauben sowie ein Spritzschutz verbaut.

Der aufgebraachte Druck wird durch eine Pumpe erzeugt, die in Abbildung 11 dargestellt ist. Abbildung 12 zeigt den Versuchstisch, kurz vor Beginn des Versuchsstarts, mit einer bereits eingespannten Platte.





**Abbildung 11:** Berstdruckversuch, Pumpe



**Abbildung 12:** Versuchstisch mit eingespannter Platte

Auf der Zeichnung 19/41799/0 (Abb. 13 und 14) sind die erreichten Berstdrücke der beiden Werkstoffe, das Datum der Versuchsdurchführung, die Maschinenparameter sowie die Unterschrift des Prüfers notiert.

Die durchgeführten Versuche haben ergeben, dass das Versagen der Platten für den Werkstoff DC01 bei einem Druck von 27 bar und 25 bar stattfand und für die Platten aus dem Werkstoff DC03 bei einem Berstdruck von 25 bar und 24 bar. Der Betriebsdruck der Wärmeaustauschplatten beträgt in der Regel ca. 3 bar. Das Materialversagen ist bei beiden Werkstoffen am gleichen verstärkten Schweißpunkt feststellbar, der sich dicht am Hilfsanschluss befindet. Der Schweißpunkt ist beim Erreichen des Berstdruckes an seinem äußeren Rand ausgeknöpft. Die Stelle wurde auf der Zeichnung vom Prüfer rot eingekreist. In den Tabellen 3 und 4 sind jeweils Bilder dargestellt, die die ausgeknöpften Schweißstellen durch einen roten Pfeil kennzeichnen.

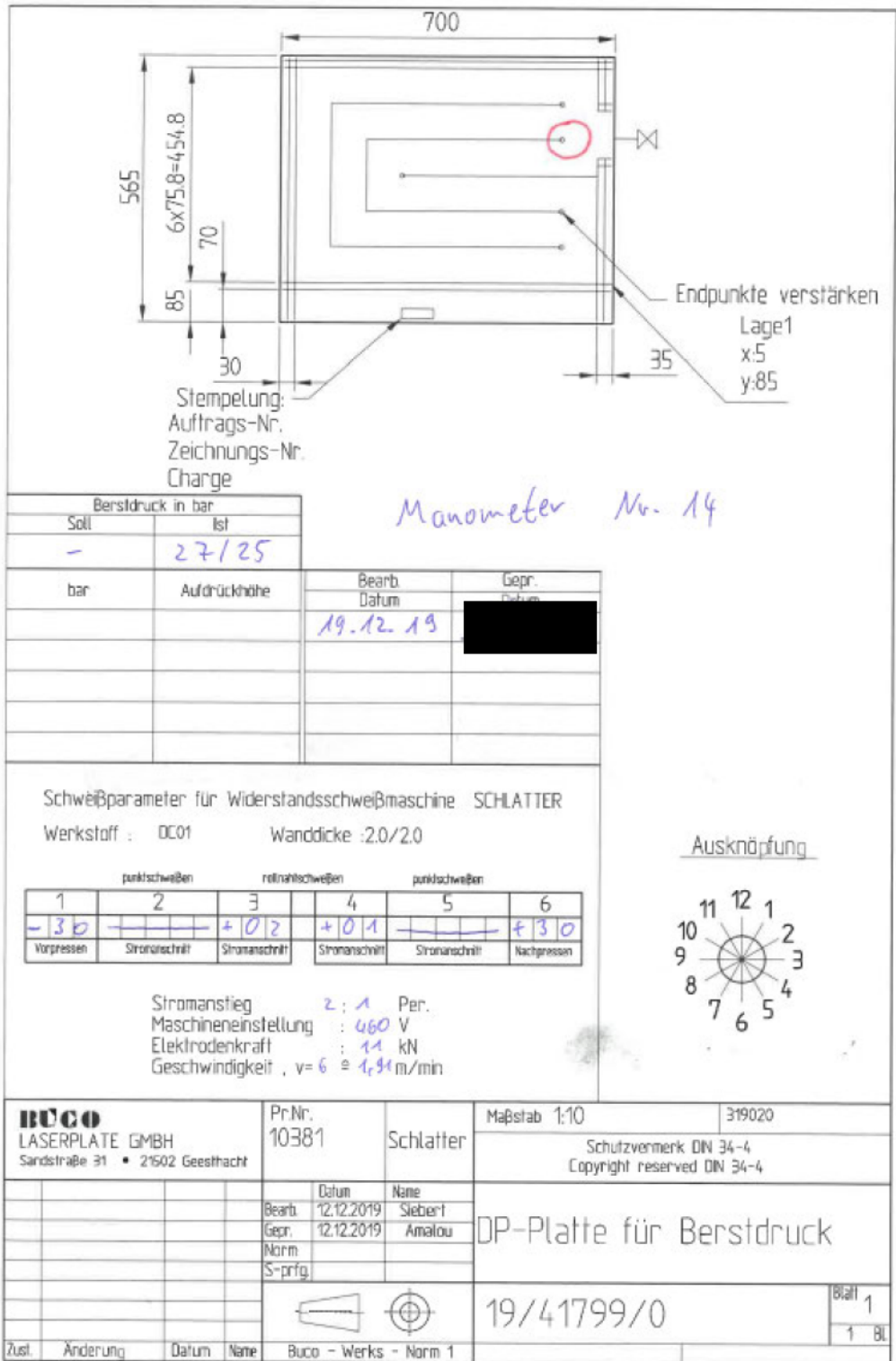
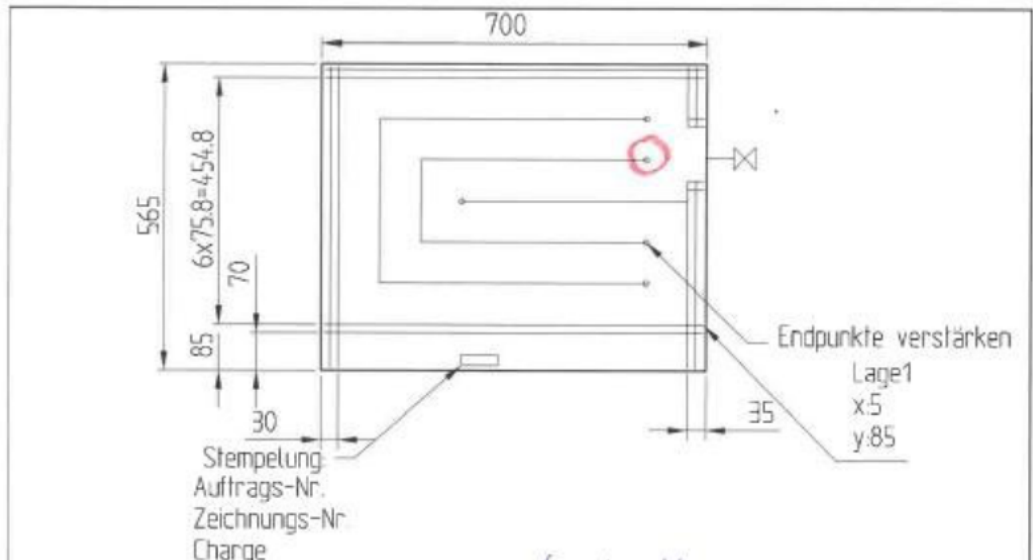


Abbildung 13: Zeichnung 19/41799/0, inkl. Notiz erreichter Berstdruck vom DC01



Manometer Nr. 16

Berstdruck in bar		Bearb. Datum	Gepr. Datum
Soll	Ist		
-	25/24	19.12.19	
bar	Aufdrückhöhe		

Schweißparameter für Widerstandsschweißmaschine SCHLATTER  
Werkstoff : DC03 Wanddicke : 2.0/2.0

punktschweißen		rollnahtschweißen		punktschweißen	
1	2	3	4	5	6
- 3 0	+	+ 0 2	+ 0 1	+	+ 3 0
Vorgewissen	Stromanschnitt	Stromanschnitt	Stromanschnitt	Stromanschnitt	Nachpressen

Stromanstieg : 2 : 1 Per.  
Maschineneinstellung : 460 V  
Elektrodenkraft : 11 kN  
Geschwindigkeit : v = 6 = 1,91 m/min





Ausknöpfung



<b>BUCCO</b> LASERPLATE GMBH Sandstraße 31 • 21502 Geesthacht	Pr.Nr. 10381	Schlatter	Maßstab 1:10	319020
				Schutzvermerk DIN 34-4 Copyright reserved DIN 34-4
		Datum	Name	DP-Platte für Berstdruck
		Bearb. 12.12.2019	Siebert	
		Gepr. 12.12.2019	Amatou	
		Norm		
		S-prüf		
				19/41799/0
Zust.	Änderung	Datum	Name	Blatt 1 1 Bl
Bucco - Werks - Norm 1				



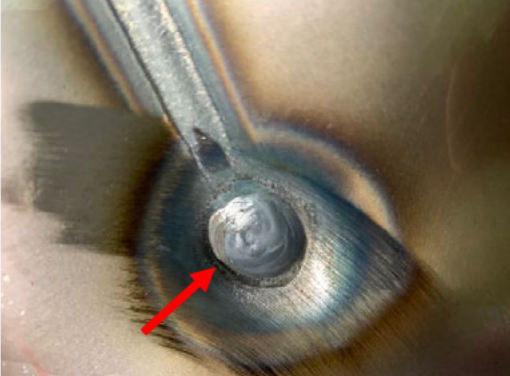
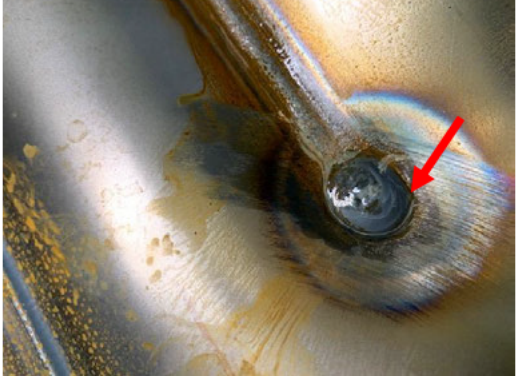
Abbildung 14: Zeichnung 19/41799/0, inkl. Notiz erreichter Berstdruck vom DC03

In den Tabellen 3 und 4 sind die Platten nach der Durchführung der Berstdruckversuche abgebildet. Die jeweiligen Stellen, an denen das Versagen erkennbar ist, sind den Tabellen zu entnehmen. Durch den aufgebrachten Druck ist feststellbar, dass sich die Platten stark verformt haben. Durch die Fixierung der Spannbacken wurden die Platten bis zum Versagen gehalten.

Werkstoff	DC01	
	Platte 1	Platte 2
geberstete Platten		
Schadensstelle am verstärkten Schweißpunkt		

**Tabelle 3:** Ergebnisse Berstdruckversuch, DC01



Werkstoff	DC03	
	Platte 1	Platte 2
geberstete Platten		
Schadensstelle am verstärkten Schweißpunkt		

**Tabelle 4:** Ergebnisse Berstdruckversuch, DC03



### 4.3 Zugversuch

Um die Eignung des Werkstoffs DC03 im Vergleich zu Werkstoff DC01 für die Anwendung „thermoölbeheizte Backofenplatte“ beurteilen zu können, wurden neben den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Zugversuchen für den Werkstoff DC03 auch 12 vorhandene Kalt- und Warmzugversuche aus dem Archiv der Fa. BUCO Laserplate herangezogen.

Hierfür sind gemäß DIN EN 10130 Mindestwerte und Maximalwerte für den Zugversuch bei Raumtemperatur angegeben. Der Mindestwert der 0,2 % Dehngrenze von DC01 liegt bei 140 MPa, der Mindestwert der Zugfestigkeit bei 270 MPa und der Mindestwert der Bruchdehnung bei 28 %. Bei der Zugfestigkeit ist zusätzlich ein Maximalwert von 410 MPa angegeben. Aufgrund hoher Kosten der Zugversuche, wurden für den Werkstoff DC03 im Rahmen dieser Bachelorthesis zwei Zugversuche beauftragt. Diese beinhalten jeweils 3 Proben bei Raumtemperatur und drei Proben bei 400 °C. Um die Materialkennwerte von DC01 so genau wie möglich zu bestimmen, wurden die vier vorhandenen Zugversuche ausgewertet. Die mechanischen Kennwerte aus den Zugversuchen sind in Tabelle 5 eingetragen, aus denen jeweils der Mittelwert für die spätere Betrachtung berechnet wurde. Die Kennwerte des DC03 sind der Tabelle 6 zu entnehmen. Die Prüfprotokolle befinden sich im Anhang. Die Zugversuche bei Raumtemperatur wurden nach DIN EN ISO 6892-1B:2017-02 mit der Probenform nach DIN 50125-H quer zur Walzrichtung durchgeführt. Die Warmzugversuche wurden gemäß DIN EN ISO 6892-2 B:2018-09 bei 400 °C und nach einer Dauer von 10 Minuten Durchwärmzeit durchgeführt.

Probennummer	R <sub>p0,2</sub> [MPa]		R <sub>m</sub> [MPa]		A <sub>80</sub> [%]	
	RT	400 °C	RT	400 °C	RT	400 °C
8871-1	201	159	320	242	40,8	62,4
8871-2	200	159	318	260	41,8	59,6
8871-3	199	163	318	262	40,5	62,0
1111-1	188	150	301	253	44,8	60,4
1111-2	185	147	296	249	45,5	64,4
1111-3	187	150	301	250	46,3	62,8
0431-1	218	149	313	261	44,3	39,0
0431-2	218	151	312	268	43,3	40,8
0431-3	217	154	311	273	43,8	39,6
4971-1	204	175	341	284	37,5	71,6
4971-2	204	182	340	282	37,6	70,6
4971-3	202	176	338	277	37,9	80,2
<b>Mittelwert</b>	<b>201,9</b>	<b>159,6</b>	<b>317,4</b>	<b>263,4</b>	<b>42,1</b>	<b>59,4</b>

Tabelle 5: Kennwerte des Zugversuches vom DC01

Probennummer	R <sub>p0,2</sub> [MPa]		R <sub>m</sub> [MPa]		A <sub>5</sub> [%]	
	RT	400 °C	RT	400 °C	RT	400 °C
6721-1	157	135	294	224	42,3	62,6
6721-2	156	131	293	221	43,6	58,7
6721-3	159	135	296	229	44,4	63,4
<b>Mittelwert</b>	<b>157,3</b>	<b>133,6</b>	<b>294,3</b>	<b>224,6</b>	<b>43,4</b>	<b>61,5</b>

Tabelle 6: Kennwerte des Zugversuches vom DC03

## 4.4 Analyse der Ergebnisse

Die beiden Berstdruckversuche für den Werkstoff DC01 haben einen Berstdruck von 27 bar und 25 bar ergeben. Für den Werkstoff DC03 wurden 25 bar und 24 bar erreicht. Daraus ergibt sich für den Werkstoff DC01 ein errechneter Mittelwert von 26 bar und für DC03 von 24,5 bar und folglich eine Druckdifferenz von 1,5 bar. Die gemessenen Berstdrucke für DC03 sind bei der Betrachtung der Mittelwerte also um 6 % niedriger als die für DC01. Da die Druckunterschiede innerhalb der Versuche für DC01 bei 2 bar und für DC03 bei 1 bar liegen, liegt die Druckdifferenz der beiden Werkstoffe von 1,5 bar innerhalb der Messgenauigkeit. Aufgrund der kleinen Differenz von 1,5 bar sind die in Kapitel 4.1 beschriebenen Anlauffarben nach dem Schweißen bei Werkstoff DC01 nicht weiter zu betrachten, da sie sich nicht weiter auf die Festigkeit ausgewirkt haben. Das Materialversagen beider Werkstoffe trat bei allen Versuchen an der gleichen Stelle auf, die sich im Bereich des Hilfsanschlusses befindet. Das Versagen erfolgte somit an der Stelle mit der höchsten Belastung, nämlich an dem Schweißpunkt, an dem die größte Kraft aus dem inneren Überdruck wirkt. Daraus lässt sich schließen, dass nicht das Material, sondern die Schweißstelle nachgegeben hat. In den zahlreichen Berstdruckversuchen, die für DC01 bereits durchgeführt wurden, fand das Versagen an dieser Stelle besonders häufig statt. Nach den Berstdruckversuchen bei Raumtemperatur ist die Eignung von DC03 für die Fertigung von Backofenplatten also gegeben [23].

Für die Auswertung der Zugversuche werden, die in Kapitel 4.3 errechneten Mittelwerte im Folgenden betrachtet. Für die Beurteilung der Eignung des Werkstoffs ist der Nachweis ausreichender Duktilität und ausreichender Festigkeit bei hohen Temperaturen entscheidend, da für beide Eigenschaften keine Werte in DIN EN 10130 gefordert sind. Bei der Betrachtung der Mittelwerte der Zugversuche wurde bei DC03 ein signifikant größerer Abfall der Streckgrenze und Zugfestigkeit bei Raumtemperatur sowie bei höher Temperatur festgestellt als im Mittel für DC01. Die prozentuale Abweichung ist der Tabelle 7 zu entnehmen. Wenn dies generell so ist, ist die Druckfestigkeit bei Ofentemperaturen bis zu 400 °C schlechter. Die Bruchdehnung vom DC03 ist bei Raumtemperatur sowie bei 400 °C durchwegs höher als die von DC01. Somit wäre eine ausreichende Zähigkeit und Kaltumformbarkeit gewährleistet. Die Bruchdehnung stellt somit kein Ausschlusskriterium für DC03 dar und wurde in der Tabelle 7 nicht weiter betrachtet.

	<b>Streckgrenze</b> [MPa]		<b>Zugfestigkeit</b> [MPa]	
	RT	400 °C	RT	400 °C
<b>Mittelwert DC01</b>	201,9	159,6	317,4	263,4
<b>Mittelwert DC03</b>	157,3	133,6	294,3	224,6
<b>Abweichung [%]</b>	22,09	16,29	7,28	14,73

**Tabelle 7:** Prozentuale Abweichung der Streckgrenze und Zugfestigkeit

Die drei erstellten Proben aus dem Zugversuch für DC03 bilden die Grundlage der Analyse. Es ist jedoch zu unterstreichen, dass es sich auch um statistische Ausreißer handeln kann. Die Kennwerte der Bruchdehnung bei Warmtemperatur für DC01, die der Tabelle 5 zu entnehmen sind, zeigen Werte, die teilweise im Faktor 2 zueinanderstehen. Für die Betrachtung des statistischen Aspekts, der im Rahmen diese Arbeit nicht durchgeführt wird, wären weitere Proben heranzuziehen.

Anhand der Formel (2.1), die im Kapitel 2.4 Berstdruckversuch näher erläutert ist, wird im Folgenden der maximal zulässige Druck  $P_S$  für DC01 und DC03 verglichen. Die errechneten Mittelwerte der Berstdrücke, die in der Versuchsdurchführung erzielt wurden, werden für  $P_B$  eingesetzt. Für den Sicherheitsfaktor  $S$  wird 5 gewählt. Da beim Berstdruckversuch die maximale Festigkeit relevant ist, werden als maßgebende Festigkeitskennwerte die Werte der Zugfestigkeit eingesetzt. Nach Auflösen der Gleichung (2.1) erhält man für den maximal zulässigen Druck der beiden Werkstoffe folgende Ergebnisse:

$$\text{DC01:} \quad P_{S,DC01} = \frac{P_B}{S \cdot \frac{K_{20}}{K}} = P_S = \frac{26 \text{ bar}}{5 \cdot \frac{317,4 \text{ MPa}}{263,4 \text{ MPa}}} = 4,32 \text{ bar}$$

$$\text{DC03:} \quad P_{S,DC03} = \frac{P_B}{S \cdot \frac{K_{20}}{K}} = P_S = \frac{24,5 \text{ bar}}{5 \cdot \frac{294,3 \text{ MPa}}{224,6 \text{ MPa}}} = 3,74 \text{ bar}$$

Der sich aus den Berstdrücken und Zugversuchen für den Werkstoff DC01 ergebende maximal zulässige Betriebsdruck ist ca. 15 % größer als der Wert für den Werkstoff DC03. Der reale Betriebsdruck beträgt in der Regel ca. 3 bar.

Die Vergleichsrechnung der maximal zulässigen Betriebsdrücke für DC01 und DC03 zeigt einen um ca. 15 % niedrigeren Wert für DC03. Dies schließt zwar nicht von vorneherein die Verwendung des Werkstoffs DC03 für Backofenplatten bei Temperaturen von 300 bis 400 °C aus. Allerdings ist die geringere Druckfestigkeit in jedem Fall ein Nachteil gegenüber dem Werkstoff DC01.

Um mit DC03 annähernd die gleiche Druckfestigkeit zu erreichen wie mit DC01 müssen die Abstände zwischen den Schweißkonturen und damit die Kanalbreiten verringert werden, damit beim Berstdruckversuch höhere Berstdrücke erreicht werden können. Kleinere Kanalbreiten bedeuten aber einerseits längere Schweißzeiten und damit höhere Kosten, weil mehr Schweißnähte auf der gleichen Fläche geschweißt werden müssen. Andererseits verringern sich auch die freien Strömungsquerschnitte. Damit wird aber bei gleichem Volumenstrom des Thermoöls die mittlere Strömungsgeschwindigkeit und damit der Druckverlust und die Pumpkosten größer [24].

## 5. Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Bachelorarbeit bestand darin, eine Alternative zum Werkstoff DC01 zu finden, der für die Herstellung von Wärmeaustauschplatten in Industriebacköfen eingesetzt werden kann. Dazu wurden die relevanten Eigenschaften der in Frage kommenden Werkstoffe in Tabellen zusammengefasst und ausgewertet. Da für den Einsatz der Wärmeaustauschplatten die Anforderungen der europäischen Druckgeräterichtlinie 2014/68/EU [21] erfüllt werden müssen, wurden die entsprechenden Normen herangezogen um die notwendigen Anforderungen zu beschreiben. In den harmonisierten EN-Normen zur Druckgeräterichtlinie sind Werkstoffe genannt, die explizit für den Einsatz in Druckgeräten zugelassen sind. Diese wurden bei der Recherche zunächst bevorzugt. Es hat sich jedoch herausgestellt, dass diese Werkstoffe überwiegend nur mit einer warmgewalzten Oberfläche erhältlich sind. Da die Beschaffenheit einer warmgewalzten Oberfläche deutlich schlechter ist als die einer kaltgewalzten Oberfläche, wurden diese Werkstoffe nicht weiter berücksichtigt. In zukünftigen Untersuchungen könnte jedoch geprüft werden, unter welchen Voraussetzungen warmgewalzte Oberflächen eventuell doch eingesetzt werden können. Hierzu ist insbesondere die Schweißbarkeit hinsichtlich des Widerstandsrollennaht-Schweißens zu prüfen, da unebene und fehlerbehaftete Oberflächen schadhafte Schweißnähte verursachen können.

Der aktuell eingesetzte Werkstoff DC01 ist für die Herstellung von Druckgeräten nicht zugelassen und bedarf eines entsprechenden Einzelgutachtens (PMA). Die Zertifizierung findet in Form eines Gutachtens statt, in dem Nachweise über Festigkeits- und Zähigkeitskennwerte erbracht werden.

Die Recherche hat ergeben, dass mit dem DC01 verwandte Werkstoffe für die Herstellung von Wärmeaustauschplatten in Betracht gezogen werden können. Die Werkstoffe sind in der Norm DIN EN 10130 [12] beschrieben. Sie sind allerdings wie DC01 nicht für die Herstellung von Druckgeräten nach europäischen Normen zugelassen. Da deshalb ebenfalls ein Einzelgutachten (PMA) notwendig ist, wurden das Verfahren und die Voraussetzungen in dieser Bachelorarbeit näher betrachtet.

Anhand von Materialanfragen bei verschiedenen Lieferanten wurden für ausgewählte Werkstoffe die Beschaffbarkeit und Lieferzeit erfragt. Der Werkstoff DC03 hat sich dabei als besonders geeignet herausgestellt, da die Verfügbarkeit und die Kosten mit dem Werkstoff DC01 vergleichbar sind. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wurde geprüft, ob die mechanischen Eigenschaften von DC03 ausreichend sind. Hierzu wurden Berstdruckversuche und Zugversuche durchgeführt.

Die Berstdruckversuche haben gezeigt, dass nur ein geringer Unterschied zwischen den erreichten Berstdrücken von DC01 und DC03 besteht. Das Versagen fand jeweils an den Stellen statt, die sich in der Vergangenheit als besonderes typisch herausgestellt haben. Nach den Berstdruckversuchen bei Raumtemperatur ist die Eignung von DC03 für die Fertigung von Backofenplatten nicht schlechter als die von DC01.

Für die Beurteilung der Ergebnisse aus den Zugversuchen ist die Gewährleistung einer ausreichenden Duktilität und Festigkeit bei hohen Temperaturen entscheidend. Eine ausreichende Druckfestigkeit bei Ofentemperaturen bis zu 400 °C ist beim Werkstoff DC03 nicht gewährleistet, da die Zugversuche einen Abfall der Streckgrenze und der Zugfestigkeit bei Raumtemperatur sowie bei höherer Temperatur zeigen.

Im Kapitel 4.4 wurden die maximal zulässigen Betriebsdrücke für DC01 und DC03 verglichen, die sich aus den Eigenschaften beider Werkstoffe ergeben. Die Berechnung hat für den Werkstoff DC03 einen 15 % niedrigeren Wert ergeben. Um den Werkstoff für die Herstellung von Wärmeaustauschplatten bis zu 400 °C einsetzen zu können, sind wegen der geringeren Druckfestigkeit vom DC03 konstruktive Maßnahmen zur Erhöhung der Druckfestigkeit zu ergreifen. Hierfür sind beispielsweise die Abstände zwischen den Schweißkonturen zu verringern. Es ist zu erwarten, dass durch die Änderung Nachteile bzgl. der Schweißzeiten und damit höherer Kosten entstehen, die dem Kunden berechnet werden müssten.

Durch die Verringerung der Strömungsquerschnitte sind auch höhere Betriebskosten zu erwarten, da der auftretende Druckverlust durch mehr Pumpenleistung kompensiert werden muss.

Aufgrund dieser Nachteile bei den Herstell- und Betriebskosten wird der Einsatz von DC03 nur in Frage kommen, wenn Bleche aus Werkstoff DC01 überhaupt nicht oder nur zu deutlich höheren Kosten verfügbar sein sollten [24].

## Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] AD 2000-Merkblatt S5: Berechnung von Druckbehältern, Experimentelle Auslegungsmethode, Ausgabe Juli 2009.
- [2] AD 2000-Merkblatt W0: Allgemeine Grundsätze für Werkstoffe, Ausgabe Juli 2016. Fassung 2004.
- [3] AD 2000-Merkblatt W1: Flacherzeugnisse aus unlegierten und legierten Stählen, Ausgabe Mai 2018.
- [4] Böckmann, K.: Persönliche Mitteilung vom 16.12.2019.
- [5] DIN EN 10002-1: Metallische Werkstoffe-Zugversuch, Deutsche Fassung 2001.
- [6] DIN EN 10025-2: Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen- Teil 2: Technische Lieferbedingungen für unlegierte Baustähle, Deutsche Fassung EN 10025-2: 2019.
- [7] DIN EN 10028-2: Flacherzeugnisse aus Druckbehälterstählen-Teil 2, 2009.
- [8] DIN EN 10028-3: Flacherzeugnisse aus Druckbehälterstählen-Teil 2, 2017.
- [9] DIN EN 10028-4: Flacherzeugnisse aus Druckbehälterstählen-Teil 2, 2017.
- [10] DIN EN 10079: Begriffsbestimmungen für Stahlerzeugnisse, 2007.
- [11] DIN EN 10111: Kontinuierlich warmgewalztes Band und Blech aus weichen Stählen zum Kaltumformen, Deutsche Fassung 1998.
- [12] DIN EN 10130: Kaltgewalzte Flacherzeugnisse aus weichen Stählen zum Kaltumformen-Technische Lieferbedingungen, Deutsche Fassung 2006.
- [13] DIN EN 10204: Metallische Erzeugnisse-Arten von Prüfbescheinigungen, Deutsche
- [14] DIN EN 10207: Stähle für einfache Druckbehälter, 2015.
- [15] DIN EN 10268: kaltgewalzte Flacherzeugnisse aus Stahl mit hoher Streckgrenze zum Kaltumformen, Deutsche Fassung, 2006.
- [16] EN ISO 4063 + DVS-Merkblatt 2906-1, 2006.
- [17] Gobrecht, J.: Werkstofftechnik – Metalle, 3. Auflage, Oldenbourg, 2009.
- [18] Heine, B.: Werkstoffprüfung - Ermittlung von Werkstoffeigenschaften, 2. neu bearbeitete Auflage, Hanser, 2011.
- [19] Merkblatt 984: Rauheitsmaße bei Oberflächen von nichtrostendem Stahl, 2016.
- [20] Reuter, M.: Methodik der Werkstoffauswahl. 2. Aktualisierte Auflage, Hanser, 2014.
- [21] RICHTLINIE 2014/68/EU über Druckgeräte.
- [22] Spang, B.: Persönliche Mitteilung vom 10.12.2019.
- [23] Spang, B.: Persönliche Mitteilung vom 14.01.2020.
- [24] Spang, B.: Persönliche Mitteilung vom 21.01.2020.

# Anhang A

## A-1 Werkstofftabellen

Legende zu den Tabellen 8-15	
✓	geeignet
✓✓	gut geeignet
✓✓✓	sehr gut geeignet
-	Keine Angabe

Mechanische Eigenschaften							
	Werkstoff-Nr.	Streckgrenze $R_e$ [MPa]	Warmdehngrenze $R_{p0,2}$ [MPa]	Zugfestigkeit $R_m$ [MPa]	Bruchdehnung A, bezogen auf Nennstärke e [%]		
S235JR+N	1.0038	$\geq 235 (R_{eH})$	-	360 - 510	$1,5 < e \leq 2$	$\geq 19/17$	
S235J2+N	1.0117	$\geq 235 (R_{eH})$	-	360 - 510	$1,5 < e \leq 2$	$\geq 19/17$	
S275JR+N	1.0044	$\geq 275 (R_{eH})$	-	410 - 560	$1,5 < e \leq 2$	$\geq 17/15$	
S275J2+N	1.0145	$\geq 275 (R_{eH})$	-	430 - 580	$1,5 < e \leq 2$	$\geq 17/15$	
S355J2+N	1.0577	$\geq 355 (R_{eH})$	-	510 - 680	$1,5 < e \leq 2$	$\geq 16/14$	
S355K2+N	1.0596	$\geq 355 (R_{eH})$	-	510 - 680	$1,5 < e \leq 2$	$\geq 16/14$	
Technologische Eigenschaften							
	Kohlenstoffgehalt min./max. [%]	Zulassung für Druckbehälter nach 2014/68/EU 1 = nach harmonisierter Norm 2 = PMA erforderlich	Schweißbarkeit	Kaltumformbarkeit			
S235JR+N	max. 0,2	1	✓✓✓	✓✓			
S235J2+N	max. 0,17	1	✓✓✓	✓✓			
S275JR+N	max. 0,21	1	✓✓✓	✓✓			
S275J2+N	max. 0,18	1	✓✓✓	✓✓			
S355J2+N	max. 0,2	1	✓✓✓	✓✓			
S355K2+N	max. 0,2	1	✓✓✓	✓✓			
Beschaffbarkeit							
	verfügbar mit ungefetteter Oberfläche (nur bei in Frage kommenden Werkstoffen prüfen)	Werkabnahmeprüfzeugnis 2.2	warmgewalzte Oberfläche	kaltgewalzte Oberfläche	Materialdicke 1,5mm	Materialdicke 2,0mm	Beschaffbarkeit (nur bei in Frage kommenden Werkstoffen prüfen)
S235JR+N	-	ja	ja	nein	nein	nein	-
S235J2+N	-	ja	ja	nein	ja	ja	-
S275JR+N	-	ja	ja	nein	ja	ja	-
S275J2+N	-	ja	ja	nein	ja	ja	-
S355J2+N	-	ja	ja	nein	ja	ja	-
S355K2+N	-	ja	ja	nein	ja	ja	-

Tabelle 8: Unlegierte Baustähle nach DIN EN 10025-2

Mechanische Eigenschaften							
	Werkstoff-Nr.	Streckgrenze $R_e$ [MPa]	Warmdehngrenze $R_{p0,2}$ bei 300°C [MPa]	Zugfestigkeit $R_m$ [MPa]	Bruchdehnung A, bezogen auf Nenn Dicke e [min. %]		
<b>P235S</b>	1.0112	min. 235	$\geq 117$	360 - 480	$2 < e \leq 2,5$	20	
<b>P265S</b>	1.0130	min. 265	$\geq 140$	410 - 530	$2 < e \leq 2,5$	17	
<b>P275SL</b>	1.1100	min. 275	$\geq 132$	390 - 510	$2 < e \leq 2,5$	19	
Technologische Eigenschaften							
	Kohlenstoffgehalt min./max. [%]	Zulassung für Druckbehälter nach 2014/68/EU 1=nach harmonisierter Norm 2=PMA erforderlich	Schweißbarkeit	Kaltumformbarkeit			
<b>P235S</b>	max. 0,16	1	✓✓	✓✓			
<b>P265S</b>	max. 0,20	1	✓✓	✓✓			
<b>P275SL</b>	max. 0,16	1	✓✓	✓✓			
Beschaffbarkeit							
	verfügbar mit ungefetteter Oberfläche (nur bei in Frage kommenden Werkstoffen prüfen)	Werkabnahmeprüfzeugnis 2.2	warmgewalzte Oberfläche	kaltgewalzte Oberfläche	Materialdicke 1,5mm	Materialdicke 2,0mm	Beschaffbarkeit (nur bei in Frage kommende Werkstoffe prüfen)
<b>P235S</b>	-	ja	ja	nein	nein	nein	-
<b>P265S</b>	-	ja	ja	nein	nein	nein	-
<b>P275SL</b>	-	ja	ja	nein	nein	nein	-

Tabelle 9: Stähle für einfache Druckbehälter nach DIN EN 10207



Mechanische Eigenschaften							
	Werkstoff-Nr.	Streckgrenze $R_{eH}$ [MPa]	Warmdehngrenze bei 300° $R_{p0,2}$ [MPa]	Zugfestigkeit $R_m$ [MPa]	Bruchdehnung A [%]		
<b>P235GH</b>	1.0345	≥ 235 ( $R_{eH}$ )	≥ 153	360 - 480	≥ 24		
<b>P265GH</b>	1.0425	≥ 265 ( $R_{eH}$ )	≥ 173	410 - 530	≥ 22		
<b>P295GH</b>	1.0481	≥ 295 ( $R_{eH}$ )	≥ 192	460 - 580	≥ 21		
<b>P355GH</b>	1.0473	≥ 355 ( $R_{eH}$ )	≥ 232	510 - 650	≥ 20		
<b>16Mo3</b>	1.5415	≥ 275 ( $R_{eH}$ )	≥ 194	440 - 590	≥ 22		
<b>13CrMo4-5</b>	1.7335	≥ 300 ( $R_{eH}$ )	≥ 216	450 - 600	≥ 19		
<b>10CrMo9-10</b>	1.7380	≥ 310 ( $R_{eH}$ )	≥ 236	480 - 620	≥ 18		
<b>12CrMo9-10</b>	1.7375	≥ 355 ( $R_{eH}$ )	≥ 295	540 - 690	≥ 18		
<b>20MnMoNi4-5</b>	1.6311	≥ 470 ( $R_{eH}$ )	≥ 415	590 - 750	≥ 18		
<b>15NiCuMoNb5-6-4</b>	1.6368	≥ 460 ( $R_{eH}$ )	≥ 380	610 - 780	≥ 16		
Technologische Eigenschaften							
	Kohlenstoffgehalt min./max. [%]	Zulassung für Druckbehälter nach 2014/68/EU 1=nach harmonisierter Norm 2=PMA erforderlich	Schweißbarkeit	Kaltumformbarkeit			
<b>P235GH</b>	max. 0,16	1	✓✓	✓✓			
<b>P265GH</b>	max. 0,2	1	✓✓	✓✓			
<b>P295GH</b>	0,08 - 0,2	1	✓✓	✓✓			
<b>P355GH</b>	0,10 - 0,22	1	✓✓	✓✓			
<b>16Mo3</b>	0,12 - 0,20	1	✓✓	✓✓			
<b>13CrMo4-5</b>	0,08 - 0,18	1	✓✓	✓✓			
<b>10CrMo9-10</b>	0,08 - 0,14	1	✓✓	✓✓			
<b>12CrMo9-10</b>	0,10 - 0,15	1	✓✓	✓✓			
<b>20MnMoNi4-5</b>	0,15 - 0,23	1	✓✓	✓✓			
<b>15NiCuMoNb5-6-4</b>	max. 0,17	1	✓✓	✓✓			

<b>Beschaffbarkeit</b>							
	<b>verfügbar mit ungefetteter Oberfläche</b> (nur bei in Frage kommenden Werkstoffen prüfen)	<b>Werkabnahmeprüfzeugnis 2.2</b>	<b>warmgewalzte Oberfläche</b>	<b>kaltgewalzte Oberfläche</b>	<b>Materialdicke 1,5mm</b>	<b>Materialdicke 2,0mm</b>	<b>Beschaffbarkeit</b> (nur bei in Frage kommenden Werkstoffen prüfen)
<b>P235GH</b>	-	ja	ja	nein	ja	ja	-
<b>P265GH</b>	-	ja	ja	nein	ja	ja	-
<b>P295GH</b>	-	ja	ja	nein	nein	ja	-
<b>P355GH</b>	-	ja	ja	nein	nein	ja	-
<b>16Mo3</b>	-	ja	ja	nein	ja	ja	-
<b>13CrMo4-5</b>	-	ja	ja	nein	nein	ja	-
<b>10CrMo9-10</b>	-	ja	ja	nein	nein	nein	-
<b>12CrMo9-10</b>	-	ja	ja	nein	nein	ja	-
<b>20MnMoNi4-5</b>	-	ja	ja	nein	nein	nein	-
<b>15NiCuMoNb5-6-4</b>	-	ja	ja	nein	nein	nein	-

**Tabelle 10:** Warmfeste Stähle nach DIN EN 10028-2

Mechanische Eigenschaften							
	Werkstoff-Nr.	Streckgrenze R <sub>e</sub> [MPa]	Warmdehngrenze bei 300°C R <sub>p0,2</sub> [MPa]	Zugfestigkeit R <sub>m</sub> [MPa]	Bruchdehnung A [%]		
P275NH	1.0487	min. 275	≥ 179	390 - 510	≥ 24		
P275NL1	1.0488	min. 275	≥ 179	390 - 510	≥ 24		
P275NL2	1.1104	min. 275	≥ 179	390 - 510	≥ 24		
P355N	1.0562	min. 355	≥ 323	490 - 630	≥ 22		
P355NH	1.0565	min. 355	≥ 232	490 - 630	≥ 22		
P355NL1	1.0566	min. 355	≥ 232	490 - 630	≥ 22		
P355NL2	1.1106	min. 355	≥ 232	490 - 630	≥ 22		
P420NH	1.8932	min. 420	≥ 274	540 - 690	≥ 19		
P420NL1	1.8912	min. 420	≥ 274	540 - 690	≥ 19		
P420NL2	1.8913	min. 420	≥ 274	540 - 690	≥ 19		
P460NH	1.8935	min. 460	≥ 300	570 - 730	≥ 16		
P460NL1	1.8915	min. 460	≥ 300	570 - 730	≥ 16		
P460NL2	1.8918	min. 460	≥ 300	570 - 730	≥ 16		
Technologische Eigenschaften							
	Kohlenstoffgehalt min./max. [%]	Zulassung für Druckbehälter nach 2014/68/EU 1=nach harmonisierter Norm 2=PMA erforderlich	Schweißbarkeit	Kaltumformbarkeit			
P275NH	max. 0,16	1	✓✓	✓✓			
P275NL1	max. 0,16	1	✓✓	✓✓			
P275NL2	max. 0,16	1	✓✓	✓✓			
P355N	max. 0,18	1	✓✓	✓✓			
P355NH	max. 0,18	1	✓✓	✓✓			
P355NL1	max. 0,18	1	✓✓	✓✓			
P355NL2	max. 0,18	1	✓✓	✓✓			
P420NH	max. 0,20	1	✓✓	✓✓			
P420NL1	max. 0,20	1	✓✓	✓✓			
P420NL2	max. 0,20	1	✓✓	✓✓			
P460NH	max. 0,20	1	✓✓	✓✓			
P460NL1	max. 0,20	1	✓✓	✓✓			
P460NL2	max. 0,20	1	✓✓	✓✓			

Beschaffbarkeit							
	verfügbar mit ungefetteter Oberfläche (nur bei in Frage kommenden Werkstoffen prüfen)	Werkabnahmeprüfzeugnis 2.2	warmgewalzte Oberfläche	kaltgewalzte Oberfläche	Materialdicke 1,5mm	Materialdicke 2,0mm	Beschaffbarkeit (nur bei in Frage kommenden Werkstoffen prüfen)
P275NH	-	ja	ja	nein	nein	nein	-
P275NL1	-	ja	ja	nein	nein	nein	-
P275NL2	-	ja	ja	nein	nein	nein	-
P355N	-	ja	ja	nein	nein	nein	-
P355NH	-	ja	ja	nein	nein	nein	-
P355NL1	-	ja	ja	nein	nein	nein	-
P355NL2	-	ja	ja	nein	nein	nein	-
P420NH	-	ja	ja	nein	nein	nein	-
P420NL1	-	ja	ja	nein	nein	nein	-
P420NL2	-	ja	ja	nein	nein	nein	-
P460NH	-	ja	ja	nein	nein	nein	-
P460NL1	-	ja	ja	nein	nein	nein	-
P460NL2	-	ja	ja	nein	nein	nein	-

Tabelle 11: Schweißgeeignete normalgeglühte Feinkornbaustähle nach DIN EN 10028-3

Mechanische Eigenschaften								
	Werkstoff-Nr.	Streckgrenze $R_e$ [MPa]	Warmdehngrenze $R_{p0,2}$ [MPa]	Zugfestigkeit $R_m$ [MPa]	Bruchdehnung A [min. %]			
<b>11MnNi5-3</b>	1.6212	$\geq 285 (R_{eH})$	-	420 - 530	24			
<b>13MnNi6-3</b>	1.6217	$\geq 355 (R_{eH})$	-	490 - 610	22			
<b>12Ni14</b>	1.5637	$\geq 355 (R_{eH})$	-	490 - 640	22			
<b>X12Ni5</b>	1.5680	$\geq 390 (R_{eH})$	-	530 - 710	20			
<b>X8Ni9</b>	1.5662	$\geq 490 (R_{eH})$	-	640 - 840	18			
Technologische Eigenschaften								
	Kohlenstoffgehalt min./max. [%]	Zulassung für Druckbehälter nach 2014/68/EU 1=nach harmonisierter Norm 2=PMA erforderlich	Schweißbarkeit		Kaltumformbarkeit			
<b>11MnNi5-3</b>	max. 0,14	1	✓✓		✓✓			
<b>13MnNi6-3</b>	max. 0,16	1	✓✓		✓✓			
<b>12Ni14</b>	max. 0,15	1	✓✓		✓✓			
<b>X12Ni5</b>	max. 0,15	1	✓✓		✓✓			
<b>X8Ni9</b>	max. 0,10	1	✓✓		✓✓			
Beschaffbarkeit								
	verfügbar mit ungefetteter Oberfläche (nur bei in Frage kommenden Werkstoffen prüfen)	Werkabnahmeprüfzeugnis 2.2	warmgewalzte Oberfläche		kaltgewalzte Oberfläche	Materialdicke 1,5mm	Materialdicke 2,0mm	Beschaffbarkeit (nur bei in Frage kommenden Werkstoffen prüfen)
<b>11MnNi5-3</b>	-	ja	ja	nein	nein	nein	nein	-
<b>13MnNi6-3</b>	-	ja	ja	nein	nein	nein	nein	-
<b>12Ni14</b>	-	ja	ja	nein	nein	nein	nein	-
<b>X12Ni5</b>	-	ja	ja	nein	nein	nein	nein	-
<b>X8Ni9</b>	-	ja	ja	nein	nein	nein	nein	-

Tabelle 12: Kaltzähle Stähle nach DIN EN 10028-4

Mechanische Eigenschaften							
	Werkstoff-Nr.	Streckgrenze $R_e$ [MPa]	Warmdehngrenze $R_{p0,2}$ [MPa]	Zugfestigkeit $R_m$ [MPa]	Bruchdehnung A [min. %]		
<b>HC260LA</b>	1.0480	240-310 ( $R_{p0,2}$ )	-	340 - 420	27		
<b>HC300LA</b>	1.0489	280-360 ( $R_{p0,2}$ )	-	370 - 470	24		
<b>HC340LA</b>	1.0548	320-410 ( $R_{p0,2}$ )	-	400 - 500	22		
<b>HC380LA</b>	1.0550	350-450 ( $R_{p0,2}$ )	-	430 - 550	20		
<b>HC420LA</b>	1.0556	390-500 ( $R_{p0,2}$ )	-	460 - 580	18		
Technologische Eigenschaften							
	Kohlenstoffgehalt min./max. [%]	Zulassung für Druckbehälter nach 2014/68/EU 1=nach harmonisierter Norm 2=PMA erforderlich	Schweißbarkeit	Kaltumformbarkeit			
<b>HC260LA</b>	max. 0,1	2	✓✓	✓✓✓			
<b>HC300LA</b>	max. 0,12	2	✓✓	✓✓✓			
<b>HC340LA</b>	max. 0,12	2	✓✓	✓✓✓			
<b>HC380LA</b>	max. 0,12	2	✓✓	✓✓✓			
<b>HC420LA</b>	max. 0,14	2	✓✓	✓✓✓			
Beschaffbarkeit							
	verfügbar mit ungefetteter Oberfläche (nur bei in Frage kommenden Werkstoffen prüfen)	Werkabnahmeprüfzeugnis 2.2	warmgewalzte Oberfläche	kaltgewalzte Oberfläche	Materialdicke 1,5mm	Materialdicke 2,0mm	Beschaffbarkeit (nur bei in Frage kommenden Werkstoffen prüfen)
<b>HC260LA</b>	-	ja	nein	ja	ja	ja	-
<b>HC300LA</b>	-	ja	nein	ja	ja	ja	-
<b>HC340LA</b>	-	ja	nein	ja	ja	ja	-
<b>HC380LA</b>	-	ja	nein	ja	ja	ja	-
<b>HC420LA</b>	-	ja	nein	ja	ja	ja	-

Tabelle 13: Stähle mit hoher Streckgrenze zum Kaltumformen nach DIN EN 10268

Mechanische Eigenschaften							
	Werkstoff-Nr.	Streckgrenze $R_e$ [MPa]	Warmdehngrenze $R_{p0,2}$ [MPa]	Zugfestigkeit $R_m$ [MPa]	Bruchdehnung A [min. %]		
DC01	1.0330	140-280 ( $R_{p0,2}$ )	-	270 - 410	28		
DC03	1.0347	140-240 ( $R_{p0,2}$ )	-	270 - 370	34		
DC04	1.0338	140-210 ( $R_{p0,2}$ )	-	270 - 350	38		
DC05	1.0312	140-180 ( $R_{p0,2}$ )	-	270 - 330	40		
DC06	1.0873	120-170 ( $R_{p0,2}$ )	-	270 - 330	41		
DC07	1.0898	100-150 ( $R_{p0,2}$ )	-	250 - 310	44		
Technologische Eigenschaften							
	Kohlenstoffgehalt min./max. [%]	Zulassung für Druckbehälter nach 2014/68/EU 1=nach harmonisierter Norm 2=PMA erforderlich	Schweißbarkeit	Kaltumformbarkeit			
DC01	max. 0,12	2	✓✓	✓✓✓			
DC03	max. 0,1	2	✓✓	✓✓			
DC04	max. 0,08	2	✓✓	✓✓			
DC05	max. 0,06	2	✓✓	✓✓			
DC06	max. 0,02	2	✓✓	✓✓			
DC07	max. 0,01	2	✓✓	✓✓			
Beschaffbarkeit							
	verfügbar mit ungefetteter Oberfläche (nur bei in Frage kommenden Werkstoffen prüfen)	Werkabnahmeprüfzeugnis 2.2	warmgewalzte Oberfläche	kaltgewalzte Oberfläche	Materialdicke 1,5mm	Materialdicke 2,0mm	Beschaffbarkeit (nur bei in Frage kommenden Werkstoffen prüfen)
DC01	ja	ja	nein	ja	ja	ja	✓
DC03	ja	ja	nein	ja	ja	ja	✓
DC04	ja	ja	nein	ja	ja	ja	✓
DC05	*	ja	nein	ja	ja	ja	✓
DC06	*	ja	nein	ja	ja	ja	✓
DC07	*	ja	nein	ja	ja	ja	x

Tabelle 14: Kaltgewalzte Flacherzeugnisse aus weichen Stählen zum Kaltumformen nach DIN EN 10130

<b>Mechanische Eigenschaften</b>							
	Werkstoff-Nr.	Streckgrenze $R_e$ e < 2mm [MPa]	Warmdehngrenze $R_{p0,2}$ [MPa]	Zugfestigkeit $R_m$ [MPa]	Bruchdehnung A [%]		
<b>DD11</b>	1.0332	170 - 360	-	≥ 440	≥ 23		
<b>DD12</b>	1.0398	170 - 340	-	≥ 420	≥ 25		
<b>DD13</b>	1.0335	170 - 330	-	≥ 400	≥ 28		
<b>DD14</b>	1.0389	170 - 310	-	≥ 380	≥ 31		
<b>Technologische Eigenschaften</b>							
	Kohlenstoffgehalt min./max. [%]	Zulassung für Druckbehälter nach 2014/68/EU 1=nach harmonisierter Norm 2=PMA erforderlich	Schweißbarkeit	Kaltumformbarkeit			
<b>DD11</b>	max. 0,12	2	✓✓	✓✓			
<b>DD12</b>	max. 0,1	2	✓✓	✓✓			
<b>DD13</b>	max. 0,08	2	✓✓	✓✓			
<b>DD14</b>	max. 0,08	2	✓✓	✓✓			
<b>Beschaffbarkeit</b>							
	verfügbar mit ungefetteter Oberfläche (nur bei in Frage kommenden Werkstoffen prüfen)	Werkabnahmeprüfzeugnis 2.2	warmgewalzte Oberfläche	kaltgewalzte Oberfläche	Materialdicke 1,5mm	Materialdicke 2,0mm	Beschaffbarkeit (nur bei in Frage kommenden Werkstoffen prüfen)
<b>DD11</b>	-	ja	ja	nein	nein	ja	-
<b>DD12</b>	-	ja	ja	nein	nein	ja	-
<b>DD13</b>	-	ja	ja	nein	nein	ja	-
<b>DD14</b>	-	ja	ja	nein	nein	ja	-

Tabelle 15: Warmgewalzter Stahl nach DIN EN 101



## A-2 Zugversuche

BK Werkstofftechnik –  
Prüfstelle für Werkstoffe GmbH  
Zur Aumundswiese 2  
28279 Bremen  
Germany  
Fon: +49 421 43828-0  
Fax: +49 421 43828-18  
www.bk-werkstofftechnik.de

Akkreditiertes Prüflabor nach:  
DIN EN ISO 17025 und Nadcap (NMMT und MTL)  
(Die DAkkS-Akkreditierung gilt nur für den in der Urkundenanlage  
D-PL-11336-01-00 aufgeführten Akkreditierungsumfang.)



Prüfbericht Nr. / Test Report No.: 4919-24497

BUCO Laserplate GmbH  
Sandstr. 31  
21502 Geesthacht

Seite / Page: 1 / 2  
Best. Nr. / PO no.: 131900084-60  
Abnahmeorganisation /  
Inspection authority:

### Prüfgegenstand / Test object

<u>Pos. /</u> <u>item</u>	<u>Menge /</u> <u>qte.</u>	<u>Bezeichnung /</u> <u>description</u>	<u>wesentliche Kennzeichnung /</u> <u>essential marking</u>	<u>BKW-Probe /</u> <u>BKW specimen.</u>
1	1	Blech / plate, 2 mm	Ch. 380034144, 71900626, 13190084	4971-1/-3

### Prüfauftrag / Order

Durchführung von Prüfungen wie dokumentiert. / Performing of testings as documented.

### Werkstoff / Prüfanforderung / Material / Requirements

DC01 / DIN EN 10130:2007-02, Anforderung an Warmzugversuch nicht benannt / requirement for tensile test at elevated temperature not stated

### Zugversuch / Tensile test

Durchführung / procedure	DIN EN ISO 6892-1 B:2017-02
Probenform / specimen type	DIN 50125-H
Probenlage / position of specimen	quer / transversal
Temperatur / temperature	RT / ambient temperature

Anforderung / requirement	ReH/Rp0,2 MPa	Rm MPa	A80 %
	min. 140	270	28
	max.	410	

### Ergebnis Probe / result spec.

4971-1	204	341	37,5
4971-2	204	340	37,6
4971-3	202	338	37,9

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die untersuchten Proben. Alle Prüfungen wurden entsprechend der zugrunde gelegten Materialspezifikation durchgeführt, wenn benannt. Bei Übermittlung in digitaler Form ist nur das unterzeichnete Original rechtsverbindlich. Der Bericht darf ohne schriftliche Zustimmung des Labors nicht auszugsweise vervielfältigt werden. Wenn nicht anders genannt/ gefordert werden: Prüfergebnisse nach DIN 1333 gerundet. / The test results solely refer to the tested specimens. All tests performed conform to the relevant material specification when named. In case of digital transmission only the signed original test report is legally binding. The report shall not be reproduced except in full without the written approval of the laboratory. Unless otherwise named/required test results will be rounded acc. DIN 1333.

Dokument: 4919-24497


**Warmzugversuch / Tensile test at elevated temperature**

Durchführung / procedure DIN EN ISO 6892-2 B:2018-09  
 Probenform / specimen type DIN 50125-B  
 Probenlage / position of specimen quer / transversal  
 Temperatur / temperature +400°C  
 Durchwärmzeit / soaking time 10 Min.  
 Verfahren für  $L_e$  / procedure for  $L_e$  2a – Nominale  $L_e$  bei Prüftemperatur / nominal  $L_e$  at test temperature

	$R_{p0.2}$ MPa	$R_m$ MPa	A %
Ergebnis Probe / result spec.			
4971-1	175	284	71,6
4971-2	182	282	70,6
4971-3	176	277	80,2

**Ergebnis / Result**

Die Anforderungen an den Zugversuch bei RT sind erfüllt / equirements are fulfilled.

Probeneingang / Specimen received:	Prüfungsabschluss / Testing completed:	Berichterstellung / Report prepared:	Unterschrift / Signature:
25.04.2019	14.05.2019	14.05.2019	

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die untersuchten Proben. Alle Prüfungen wurden entsprechend der zugrunde gelegten Materialspezifikation durchgeführt, wenn benannt. Bei Übermittlung in digitaler Form ist nur das unterzeichnete Original rechtsverbindlich. Der Bericht darf ohne schriftliche Zustimmung des Labors nicht auszugsweise vervielfältigt werden. Wenn nicht anders genannt/ gefordert werden Prüfergebnisse nach DIN 1333 gerundet. / The test results solely refer to the tested specimens. All tests performed conform to the relevant material specification when named. In case of digital transmission only the signed original test report is legally binding. The report shall not be reproduced except in full without the written approval of the laboratory. Unless otherwise named/required test results will be rounded acc. DIN 1333.

Abbildung 15: Prüfbericht 4919-24497, Zugversuch DC01

BK Werkstofftechnik –  
 Prüfstelle für Werkstoffe GmbH  
 Zur Aumundswiese 2  
 28279 Bremen  
 Germany  
 Fon: +49 421 43828-0  
 Fax: +49 421 43828-18  
 www.bk-werkstofftechnik.de

Akkreditiertes Prüflabor nach:  
 DIN EN ISO 17025 und Nadcap (NMMT und MTL)  
 (Die DAkkS-Akkreditierung gilt nur für den in der Urkundenanlage  
 D-PL-11336-01-00 aufgeführten Akkreditierungsumfang.)



**Prüfbericht Nr. / Test Report No.: 4919-25043**

BUCO Laserplate GmbH  
 Sandstr. 31  
 21502 Geesthacht

Seite / Page: 1 / 2  
 Best. Nr. / PO no.: 71900937  
 Abnahmeorganisation /  
 Inspection authority:

**Prüfgegenstand / Test object**

<u>Pos. / item</u>	<u>Menge / qte.</u>	<u>Bezeichnung / description</u>	<u>wesentliche Kennzeichnung / essential marking</u>	<u>BKW-Probe / BKW specimen.</u>
1	1	Blech / plate, 2 mm	131900150-70, DC01, 2.0, Ch. 878044	0431-1/-3

**Prüfauftrag / Order**

Durchführung von Prüfungen wie dokumentiert. / Performing of testings as documented.

**Werkstoff / Prüfanforderung / Material / Requirements**

DC01 / DIN EN 10130:2007-02, Anforderung an Warmzugversuch nicht benannt / requirement for tensile test at elevated temperature not stated

**Zugversuch / Tensile test**

Durchführung / procedure DIN EN ISO 6892-1 B:2017-02  
 Probenform / specimen type DIN 50125-H  
 Probenlage / position of specimen quer / transversal  
 Temperatur / temperature RT / ambient temperature

Anforderung / requirement	ReH/Rp0,2	Rm	A80
	MPa	MPa	%
	min. 140	270	28
	max.	410	
<b>Ergebnis Probe / result spec.</b>			
0431-1	218	313	44,3
0431-2	218	312	43,3
0431-3	217	311	43,8

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die untersuchten Proben. Alle Prüfungen wurden entsprechend der zugrunde gelegten Materialspezifikation durchgeführt, wenn benannt. Bei Übermittlung in digitaler Form ist nur das unterzeichnete Original rechtsverbindlich. Der Bericht darf ohne schriftliche Zustimmung des Labors nicht auszugsweise vervielfältigt werden. Wenn nicht anders genannt/ gefordert werden Prüfergebnisse nach DIN 1333 gerundet. / The test results solely refer to the tested specimens. All tests performed conform to the relevant material specification when named. In case of digital transmission only the signed original test report is legally binding. The report shall not be reproduced except in full without the written approval of the laboratory. Unless otherwise named/required test results will be rounded acc. DIN 1333.

Dokument: 4919-25043.docx


**Warmzugversuch / Tensile test at elevated temperature**

Durchführung / procedure DIN EN ISO 6892-2 B:2018-09  
 Probenform / specimen type DIN 50125-E  
 Probenlage / position of specimen quer / transversal  
 Temperatur / temperature +400°C  
 Durchwärmzeit / soaking time 10 Min.  
 Verfahren für  $L_e$  / procedure for  $L_e$  2a – Nominale  $L_e$  bei Prüftemperatur / nominal  $L_e$  at test temperature

	$R_{p0,2}$ MPa	$R_m$ MPa	A %
Ergebnis Probe / result spec.			
0431-1	149	261	39,0
0431-2	151	268	40,8
0431-3	154	273	39,6

**Ergebnis / Result**

Die Anforderungen an den Zugversuch bei RT sind erfüllt / equirements are fulfilled.

Probeneingang / Specimen received:	Prüfungsabschluss / Testing completed:	Berichterstellung / Report prepared:	Unterschrift / Signature:
29.05.2019	13.06.2019	17.06.2019	

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die untersuchten Proben. Alle Prüfungen wurden entsprechend der zugrunde gelegten Materialspezifikation durchgeführt, wenn benannt. Bei Übermittlung in digitaler Form ist nur das unterzeichnete Original rechtsverbindlich. Der Bericht darf ohne schriftliche Zustimmung des Labors nicht auszugsweise vervielfältigt werden. Wenn nicht anders genannt/ gefordert werden Prüfergebnisse nach DIN 1333 gerundet. / The test results solely refer to the tested specimens. All tests performed conform to the relevant material specification when named. In case of digital transmission only the signed original test report is legally binding. The report shall not be reproduced except in full without the written approval of the laboratory. Unless otherwise named/required test results will be rounded acc. DIN 1333.

Abbildung 16: Prüfbericht 4919-25043, Zugversuch DC01

BK Werkstofftechnik –  
 Prüfstelle für Werkstoffe GmbH  
 Zur Aumundswiese 2  
 28279 Bremen  
 Germany  
 Fon: +49 421 43828-0  
 Fax: +49 421 43828-18  
 www.bk-werkstofftechnik.de

Akkreditiertes Prüflabor nach:  
 DIN EN ISO 17025 und Nadcap (NMMT und MTL)  
 (Die DAkkS-Akkreditierung gilt nur für den in der Urkundenanlage  
 D-PL-11336-01-00 aufgeführten Akkreditierungsumfang.)



**Prüfbericht Nr. / Test Report No.: 4919-26111**

BUCO Laserplate GmbH  
 Sandstr. 31  
 21502 Geesthacht

Seite / Page: 1 / 2  
 Best. Nr. / PO no.: 131900209-50  
 Abnahmeorganisation /  
 Inspection authority:

**Prüfgegenstand / Test object**

<u>Pos. /</u> <u>item</u>	<u>Menge /</u> <u>qte.</u>	<u>Bezeichnung /</u> <u>description</u>	<u>wesentliche Kennzeichnung /</u> <u>essential marking</u>	<u>BKW-Probe /</u> <u>BKW specimen.</u>
1	1	Blech / plate 2 mm	Ch. 509634, 131900209, 71901463	1111

**Prüfauftrag / Order**

Durchführung von Prüfungen wie dokumentiert. / Performing of testings as documented.

**Werkstoff / Prüfanforderung / Material / Requirements**

DC01 / DIN EN 10130:2007-02, Anforderung an Warmzugversuch nicht benannt / requirement for tensile test at elevated temperatures not stated

**Zugversuch / Tensile test**

Durchführung / procedure	DIN EN ISO 6892-1 B:2017-02
Probenform / specimen type	DIN 50125-H
Probenlage / position of specimen	quer / transversal
Temperatur / temperature	RT / ambient temperature

Anforderung / requirement	R <sub>p0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>80</sub>
	MPa	MPa	%
	min. 140	270	28
	max.	410	
<b>Ergebnis Probe / result spec.</b>			
1111-1	188	301	44,8
1111-2	185	296	45,5
1111-3	187	301	46,3

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die untersuchten Proben. Alle Prüfungen wurden entsprechend der zugrunde gelegten Materialspezifikation durchgeführt, wenn benannt. Bei Übermittlung in digitaler Form ist nur das unterzeichnete Original rechtsverbindlich. Der Bericht darf ohne schriftliche Zustimmung des Labors nicht auszugsweise vervielfältigt werden. Wenn nicht anders genannt/ gefordert werden Prüfergebnisse nach DIN 1333 gerundet. / The test results solely refer to the tested specimens. All tests performed conform to the relevant material specification when named. In case of digital transmission only the signed original test report is legally binding. The report shall not be reproduced except in full without the written approval of the laboratory. Unless otherwise named/required test results will be rounded acc. DIN 1333.

Dokument: 4919-26111.docx


**Warmzugversuch / Tensile test at elevated temperature**

Durchführung / procedure DIN EN ISO 6892-2 B:2018-09  
 Probenform / specimen type DIN 50125-B  
 Probenlage / position of specimen quer / transversal  
 Temperatur / temperature +400°C  
 Durchwärmzeit / soaking time 10 Min.  
 Verfahren für L<sub>e</sub> / procedure for L<sub>e</sub> 2a – Nominale L<sub>e</sub> bei Prüftemperatur / nominal L<sub>e</sub> at test temperature

	R <sub>p0.2</sub> MPa	R <sub>m</sub> MPa	A5 %
Ergebnis Probe / result spec.			
1111-1	150	253	60,4
1111-2	147	249	64,4
1111-3	150	250	62,8

**Ergebnis / Result**

Die Anforderungen an den Zugversuch bei RT sind erfüllt. / The requirements for tensile test at ambient temperature are fulfilled.

Probeneingang / Specimen received:	Prüfungsabschluss / Testing completed:	Berichterstellung / Report prepared:	Unterschrift / Signature:
31.07.2019	08.08.2019	15.08.2019	

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die untersuchten Proben. Alle Prüfungen wurden entsprechend der zugrunde gelegten Materialspezifikation durchgeführt, wenn benannt. Bei Übermittlung in digitaler Form ist nur das unterzeichnete Original rechtsverbindlich. Der Bericht darf ohne schriftliche Zustimmung des Labors nicht auszugsweise vervielfältigt werden. Wenn nicht anders genannt/ gefordert werden Prüfergebnisse nach DIN 1333 gerundet. / The test results solely refer to the tested specimens. All tests performed conform to the relevant material specification when named. In case of digital transmission only the signed original test report is legally binding. The report shall not be reproduced except in full without the written approval of the laboratory. Unless otherwise named/required test results will be rounded acc. DIN 1333.

Dokument: 4919-26111

Abbildung 17: Prüfbericht 4919-26111, Zugversuch DC01



BK Werkstofftechnik –  
 Prüfstelle für Werkstoffe GmbH  
 Zur Aumundswiese 2  
 28279 Bremen  
 Germany  
 Fon: +49 421 43828-0  
 Fax: +49 421 43828-18  
 www.bk-werkstofftechnik.de

Akkreditiertes Prüflabor nach:  
 DIN EN ISO 17025 und Nadcap (NMMT und MTL)  
 (Die DAKS-Akkreditierung gilt nur für den in der Urkundenanlage  
 D-PL-11336-01-00 aufgeführten Akkreditierungsumfang.)



**Prüfbericht Nr. / Test Report No.: 4919-26887**

BUCO Laserplate GmbH  
 Sandstr. 31  
 21502 Geesthacht

Seite / Page: 1 / 2  
 Best. Nr. / PO no.: 131900256  
 Abnahmeorganisation /  
 Inspection authority:

**Prüfgegenstand / Test object**

<u>Pos. / item</u>	<u>Menge / qte.</u>	<u>Bezeichnung / description</u>	<u>wesentliche Kennzeichnung / essential marking</u>	<u>BKW-Probe / BKW specimen.</u>
1	1	Blech / plate 2 x 250 x 250 mm	DC01, 380040365, 131900256, 71900878	8871

**Prüfauftrag / Order**

Durchführung von Prüfungen wie dokumentiert. / Performing of testings as documented.

**Werkstoff / Prüfanforderung / Material / Requirements**

DC01 / DIN EN 10130:2007-02, Anforderung an Warmzugversuch nicht benannt / requirement for tensile test at elevated temperatures not stated

**Zugversuch / Tensile test**

Durchführung / procedure	DIN EN ISO 6892-1 B:2017-02
Probenform / specimen type	DIN 50125-H
Probenlage / position of specimen	quer / transversal
Temperatur / temperature	RT / ambient temperature

Anforderung / requirement	R <sub>p0,2</sub> MPa	R <sub>m</sub> MPa	A <sub>80</sub> %
min.	140	270	28
max.		410	
<hr/>			
Ergebnis Probe / result spec.			
8871-1	201	320	40,8
8871-2	200	318	41,8
8871-3	199	318	40,5

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die untersuchten Proben. Alle Prüfungen wurden entsprechend der zugrunde gelegten Materialspezifikation durchgeführt, wenn benannt. Bei Übermittlung in digitaler Form ist nur das unterzeichnete Original rechtsverbindlich. Der Bericht darf ohne schriftliche Zustimmung des Labors nicht auszugsweise vervielfältigt werden. Wenn nicht anders genannt/ gefordert werden Prüfergebnisse nach DIN 1333 gerundet. / The test results solely refer to the tested specimens. All tests performed conform to the relevant material specification when named. In case of digital transmission only the signed original test report is legally binding. The report shall not be reproduced except in full without the written approval of the laboratory. Unless otherwise named/required test results will be rounded acc. DIN 1333.

Dokument: 4919-26887.docx


**Warmzugversuch / Tensile test at elevated temperature**

Durchführung / procedure DIN EN ISO 6892-2 B:2018-09  
 Probenform / specimen type DIN 50125-B  
 Probenlage / position of specimen quer / transversal  
 Temperatur / temperature +400°C  
 Durchwärmzeit / soaking time 10 Min.  
 Verfahren für L<sub>e</sub> / procedure for L<sub>e</sub> 2a – Nominale L<sub>e</sub> bei Prüftemperatur / nominal L<sub>e</sub> at test temperature

	R <sub>p0,2</sub> MPa	R <sub>m</sub> MPa	A5 %
Ergebnis Probe / result spec.			
8871-1	159	242	62,4
8871-2	159	260	59,6
8871-3	163	262	62,0

**Ergebnis / Result**

Die Anforderungen an den Zugversuch bei RT sind erfüllt. / The requirements for tensile test at ambient temperature are fulfilled.

Probeneingang / Specimen received:	Prüfungsabschluss / Testing completed:	Berichterstellung / Report prepared:	Unterschrift / Signature:
19.09.2019	26.09.2019	27.09.2019	

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die untersuchten Proben. Alle Prüfungen wurden entsprechend der zugrunde gelegten Materialspezifikation durchgeführt, wenn benannt. Bei Übermittlung in digitaler Form ist nur das unterzeichnete Original rechtsverbindlich. Der Bericht darf ohne schriftliche Zustimmung des Labors nicht auszugsweise vervielfältigt werden. Wenn nicht anders genannt/ gefordert werden Prüfergebnisse nach DIN 1333 gerundet. / The test results solely refer to the tested specimens. All tests performed conform to the relevant material specification when named. In case of digital transmission only the signed original test report is legally binding. The report shall not be reproduced except in full without the written approval of the laboratory. Unless otherwise named/required test results will be rounded acc. DIN 1333.

Abbildung 18: Prüfbericht 4919-26887, Zugversuch DC01



BK Werkstofftechnik –  
 Prüfstelle für Werkstoffe GmbH  
 Zur Amundswiese 2  
 28279 Bremen  
 Germany  
 Fon: +49 421 43828-0  
 Fax: +49 421 43828-18  
 www.bk-werkstofftechnik.de

Akkreditiertes Prüflabor nach:  
 DIN EN ISO 17025 und Nadcap (NMMT und MTL)  
 (Die DAkkS-Akkreditierung gilt nur für den in der Urkundenanlage  
 D-PL-11336-01-00 aufgeführten Akkreditierungsumfang.)



**Prüfbericht Nr. / Test Report No.: 4920-28672**

BUCO Laserplate GmbH  
 Sandstr. 31  
 21502 Geesthacht

Seite / Page: 1 / 2  
 Best. Nr. / PO no.: 719002508  
 Abnahmeorganisation /  
 Inspection authority:

**Prüfgegenstand / Test object**

<u>Pos. / item</u>	<u>Menge / qte.</u>	<u>Bezeichnung / description</u>	<u>wesentliche Kennzeichnung / essential marking</u>	<u>BKW-Probe / BKW specimen.</u>
1	1	Blech / plate, 2 mm	keine Kennzeichnung / no marking	6721-1/-2/-3

**Prüfauftrag / Order**

Durchführung von Prüfungen wie dokumentiert. / Performing of testings as documented.

**Werkstoff / Prüfanforderung / Material / Requirements**

DC03 / DIN EN 10130:2007-02, Anforderung an Warmzugversuch nicht benannt / requirements for tensile test at elevated temperatures not stated

**Zugversuch / Tensile test**

Durchführung / procedure	DIN EN ISO 6892-1 B:2017-02		
Probenform / specimen type	DIN 50125-H		
Probenlage / position of specimen	quer / transversal		
Temperatur / temperature	RT / ambient temperature		

Anforderung / requirement	R <sub>p0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>80</sub>
	MPa	MPa	%
	min.	270	34
	max. 240	370	
<hr/>			
Ergebnis Probe / result spec.			
6721-1	157	294	42,3
6721-2	156	293	43,6
6721-3	159	296	44,4

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die untersuchten Proben. Alle Prüfungen wurden entsprechend der zugrunde gelegten Materialspezifikation durchgeführt, wenn benannt. Bei Übermittlung in digitaler Form ist nur das unterzeichnete Original rechtsverbindlich. Der Bericht darf ohne schriftliche Zustimmung des Labors nicht auszugsweise vervielfältigt werden. Wenn nicht anders genannt/ gefordert werden Prüfergebnisse nach DIN 1333 gerundet. / The test results solely refer to the tested specimens. All tests performed conform to the relevant material specification when named. In case of digital transmission only the signed original test report is legally binding. The report shall not be reproduced except in full without the written approval of the laboratory. Unless otherwise named/required test results will be rounded acc. DIN 1333.

Dokument: 4920-28672


**Warmzugversuch / Tensile test at elevated temperature**

Durchführung / procedure DIN EN ISO 6892-2 B:2018-09  
 Probenform / specimen type DIN 50125-E  
 Probenlage / position of specimen quer / transversal  
 Temperatur / temperature +400°C  
 Durchwärmzeit / soaking time 10 Min.  
 Verfahren für  $L_e$  / procedure for  $L_e$  2a – Nominale  $L_e$  bei Prüftemperatur / nominal  $L_e$  at test temperature

	$R_{p0,2}$ MPa	$R_{p1,0}$ MPa	$R_m$ MPa	$A_5$
Ergebnis Probe / result spec.				
6721-1	135	162	224	62,6
6721-2	131	159	221	58,7
6721-3	135	163	229	63,4

**Ergebnis / Result**

Die Anforderungen an den Zugversuch bei Raumtemperatur sind erfüllt / The requirements for tensile test at ambient temperature are fulfilled.

Probeneingang / Specimen received:	Prüfungsabschluss / Testing completed:	Berichterstellung / Report prepared:	Unterschrift / Signature:
07.01.2020	13.01.2020	14.01.2020	

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die untersuchten Proben. Alle Prüfungen wurden entsprechend der zugrunde gelegten Materialspezifikation durchgeführt, wenn benannt. Bei Übermittlung in digitaler Form ist nur das unterzeichnete Original rechtsverbindlich. Der Bericht darf ohne schriftliche Zustimmung des Labors nicht auszugsweise vervielfältigt werden. Wenn nicht anders genannt/ gefordert werden Prüfergebnisse nach DIN 1333 gerundet. / The test results solely refer to the tested specimens. All tests performed conform to the relevant material specification when named. In case of digital transmission only the signed original test report is legally binding. The report shall not be reproduced except in full without the written approval of the laboratory. Unless otherwise named/required test results will be rounded acc. DIN 1333.

Dokument: 4920-28672

Abbildung 19: Prüfbericht 4920-28672, Zugversuch DC03



## Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

<b><u>Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit</u></b>		
Hiermit versichere ich,		
Name:	<u>Amalou</u>	
Vorname:	<u>Patrick</u>	
dass ich die vorliegende Bachelorarbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:		
Auswahl eines Stahlwerkstoffs für die Herstellung von Wärmeaustauschplatten zur Beheizung von Industriebacköfen.		
ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.		
<i>- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -</i>		
Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der -bitte auswählen- ist erfolgt durch:		
Hamburg	Datum	Unterschrift im Original
Ort		