Lehrstuhl für Umformtechnik

Department Product Engineering

Montanuniversität Leoben

Bachelorarbeit

DAMASZENER STAHL - LITERATURÜBERSICHT, VERARBEITUNGSARTEN, EINFLUSSGRÖßEN AUF DAS ZÄHIGKEITSVERHALTEN VON SCHWEIßVERBÜNDEN

Oliver Tobin

Montanmaschinenbau

Leoben, Juli 2017

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt, die vorliegende Bachelorarbeit

„Damaszener Stahl - Literaturübersicht, Verarbeitungsarten, Einflussgrößen auf das Zähigkeitsverhalten von Schweißverbünden“

selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Oliver Tobin

Matrikelnummer: 01235406

Leoben, am 24.07.2017

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meines Bachelorstudiums am Lehrstuhl für Umformtechnik an der Montanuniversität Leoben.

Dem Leiter des Lehrstuhls, Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Bruno Buchmayr danke ich für die Möglichkeit, eine Bachelorarbeit zu einem für mich persönlich interessanten Thema zu verfassen.

Weiters möchte ich mich bei Christian Stöckl und Ralph Ambrosch (Lehrstuhl für Umformtechnik) für die Herstellung der Kerbschlagproben und der Schliffe bedanken.

Für die Bereitstellung von Werkstatt, Material und Erfahrung bei der Herstelleung von Damaszener Stahl gebührt Christoph Feichtl (Riegersburger Burgschmied) besonderer Dank.

Kurzfassung / Abstract

In der vorliegenden Arbeit werden die Geschichte, die Herstellungsweise und die Eigenschaften von Damaszener Stahl diskutiert. Bei Damaszener Stahl handelt es sich um einen Verbundwerkstoff, bei dem verschieden legierte Stahlkomponenten durch Pressschweißverfahren zusammengefügt werden. Die Geschichte des Damaszener Stahls reicht beinahe 3000 Jahre zurück. Die Arbeit gibt einen Überblick über Anwendungsgebiete in Vergangenheit und Gegenwart. Im Anschluss werden Gebrauchseigenschaften von Gegenständen aus Damaszener Stahl thematisiert und auf Unterschiede und Gemeinsamkeiten zu herkömmlichem Stahl eingegangen. Den Abschluss bildet eine Dokumentation der Herstellung von Damaszener Stahl und eine Untersuchung des erzeugten Materials in Hinblick auf Kerbschlagzähigkeit, Härte und Schädigungsmechanismen. Es wird gezeigt, dass für Verbundwerkstoffe spezifische Schädigungsmechanismen, wie Delamination und Inhomogenität, bei Damaszener Stahl einen Einfluss auf die Zähigkeit im Kerbschlagbiegeversuch ausüben.

In this thesis, the history, production methods and properties of Damascus steel are discussed. Damascus steel refers to a compound material in which differently alloyed steels become pressure welded together. The history of Damascus steel dates back almost 3000 years. This thesis offers an overview of applications in past and present days. Eventually, properties and characteristics of items made of Damascus steel are explained, as well as differences and similarities to common steel. Finally, the process of making Damascus steel is documented and the produced material is tested in terms of notch toughness , hardness and damage mechanisms. It is shown that typical damage mechanisms for compound materials, such as delamination and inhomogeneity have influence on notch toughness of Damascus steel.

Inhalt

1. Einleitung 6
2. Historischer Überblick 6
   2.1. Begriffsdefinitionen, Abgrenzung 7
   2.2. Tiegelstahl 8
   2.3. Schweißdamast 9
   2.4. Raffinierstahl 9
   2.5. Laminate 10
3. Physik des Schweißdamasts 11
   3.1. Musterung des Stahls 11
   3.2. Grundlagen und Legierungselemente 13
   3.3. Verbindung der Schichten 13
   3.4. Wärmebehandlung 14
   3.5. Diffusion 15
   3.6. Kontrastbildung 15
4. Gebrauchseigenschaften von Damaszener Stahl in Klingen 16
   4.1. Anforderungen an eine Klinge 16
   4.2. Hohe Härte und gleichzeitig große Zähigkeit? 17
   4.3. Unerreichte Schärfe? 18
5. Herstellungspraxis von Damaszener Stahl 18
   5.1. Feuerschweißen mit Flussmittel 18
   5.2. Feuerschweißen unter Luftabschluss 24
6. Mechanische Eigenschaften des Damaszener Stahls 28
   6.1. Probenherstellung 29
   6.2. Kerbschlagbiegeversuch, Härtemessung 29
   6.3. Bruchflächen 33
   6.4. Mikroskopaufnahmen 35
   6.5. Zusammenfassung und Diskussion 37

Literatur 39

Abbildungen 40

1. Einleitung

Als Damaszener Stahl bezeichnet man einen Stahlwerkstoff, der sich durch einen schichtförmigen Aufbau aus mehreren, unterschiedlichen, Phasen oder Stahlsorten auszeichnet. Dieser spezielle Aufbau kann zur Herstellung optisch ansprechender Muster auf Werkstücken ausgenutzt werden. Die Verbindung der Schichten kann auf unterschiedliche Weise erfolgen, zumeist kommen Pressschweißverfahren zum Einsatz. Entsprechend der Herstellungsweise gehört Damaszener Stahl mit Ausnahmen[1] zur Gruppe der Schweißverbundstähle.

Europa und Asien blicken auf eine jahrtausendealte Tradition im Herstellen und Verarbeiten von Schweißverbundstählen zurück. Die resultierenden Werkstücke waren hauptsächlich Waffen und Klingen aller Art. Es ist festzuhalten, dass aus keinem Kulturkreis eine vollständige Überlieferung dieser Schmiedekunst vorliegt. Es scheint daher notwendig, im ersten Teil der vorliegenden Arbeit eine historische und örtliche Einordnung verschiedener Begriffe zu geben.

In weiterer Folge werden Grundtechniken des Damaszierens vorgestellt und ausgewählte Herstellungsmethoden beschrieben. Dabei soll auch auf die metallkundlichen Hintergründe und ihre Einflüsse auf die Gebrauchseigenschaften dieser speziellen Stahlwerkstoffe eingegangen werden. Durch die historische Verklärung ist Damaszener Stahl auch heute noch eine beliebte Projektionsfläche für Mythen rund um überragende Materialeigenschaften und „sagenhafte Werkstattgeheimnisse“. Es gilt, diese Wahrnehmungen auf eine wissenschaftliche Basis zu stellen. Wichtige Untersuchungen wurden dazu bereits in den letzten Jahrzehnten veröffentlicht und sollen in dieser Arbeit kurz zusammengefasst werden.

Der letzte Teil der Arbeit beschäftigt sich mit den mechanischen Eigenschaften von Damaszener Stahl. In den vergangenen Jahren wurde bereits der positive Einfluss von mehrlagigen Werkstoffen auf das Zähigkeitsverhalten im Kerbschlagbiegeversuch untersucht.[2] Im Zuge dieser Arbeit sollte u.A. geprüft werden, ob dieses Materialverhalten von der Herstellungsart und der Lagenorientierung des Schweißverbundes abhängig ist. Zu diesem Zweck wurden entsprechend der vorgestellten Herstellungsverfahren Proben aus Damaszener Stahl angefertigt, die unterschiedlichen Prüfungen unterzogen wurden. (Lichtmikroskop, Härtemessung, Kerbschlagbiegeversuche).

2. Historischer Überblick

Der Begriff Damaszener Stahl wird zwar meistens mit der Syrischen (ehemals Persischen) Stadt Damaskus assoziiert, allerdings gibt es zum gegenwärtigen Zeitpunkt keine Hinweise auf eine dortige Produktion.[3] Stattdessen ist anzunehmen, dass die gesamte zentralasiatische Region, Indien und Europa eine wichtige Rolle gespielt haben. Auf eine mögliche alternative Namensherkunft weist daher Sachse hin: Die Entwicklung des „Damaszener Stahls“ aus dem Arabischen Wort „damas“ („fließend“ bzw. „wässrig“), bezugnehmend auf die Wellenmuster auf Damastklingen.[4]

[1] Siehe Tiegelstahl als gänzlich andere Herstellungsmethode, beschrieben in Kapitel 2.2
[2] Zgraggen / Trüllinger 2005
[3] Feuerbach 2002, S. 38f und Feuerbach 2001
[4] Sachse 1989, S. 13

2.1. Begriffsdefinitionen, Abgrenzung

Es empfiehlt sich, zunächst einige Grundbegriffe zu definieren, die in dieser Arbeit häufig Anwendung finden. Abbildung 1 stellt die Beziehungen der Begriffe dar.

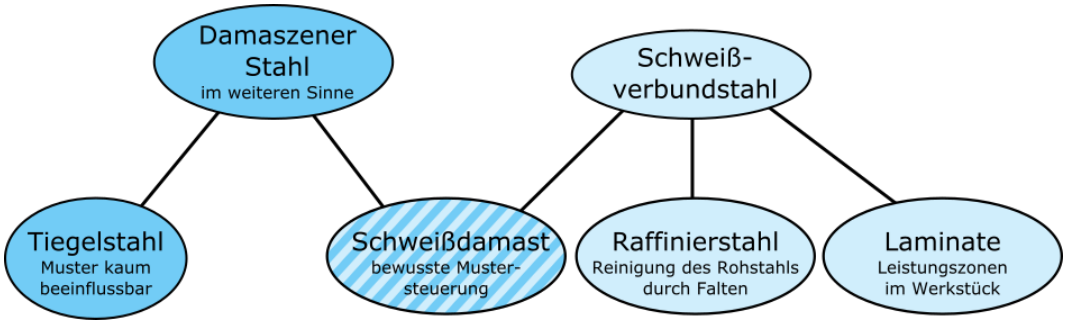


Abbildung 1: Einordnung der Begriffe rund um das Thema Damaszener Stahl

Damaszener Stahl: Überbegriff für Tiegelstahl und Schweißdamast.

Schweißverbundstahl: Alle Arten von Stahl, die sich durch Schichtaufbau auszeichnen. Die Verbindung erfolgt *unter* der Solidustemperatur. Den wichtigsten Stellenwert als Fügeverfahren nimmt das Feuerschweißen ein, das seit Beginn der Eisenverarbeitung von Schmieden praktiziert wird.

Schweißdamast: Schweißverbundstahl, bei dem unterschiedliche Stahlsorten bewusst verarbeitet werden, um dekorative Muster („Zeichnung“) zu erreichen.

Tiegelstahl: Alternative, schmelzmetallurgische Herstellungsroute für ähnlich gemusterte Stähle. Hier liegen keine unterschiedlichen Stahlsorten, sondern mehrphasige Gefüge vor. Dieser Stahl wird auch als Schmelzdamast, „Bulat“ oder „Wootz“ bezeichnet. Die Herstellung erfolgt *über* der Solidustemperatur, wodurch kaum Einfluss auf die Zeichnung genommen werden kann.

Raffinierstahl: Methode, bei der Erzeugnisse aus Rennöfen durch oftmaliges Falten und Ausschmieden gereinigt werden, sodass ein homogener Stahl entsteht. Ziel ist hier nicht das Erreichen einer Zeichnung, sondern im Gegenteil die Homogenisierung des Werkstoffs.

Laminate: Schweißverbund aus unterschiedlichen Stählen mit dem Ziel, in einem Werkstück unterschiedliche Leistungszonen herzustellen. (z.B. harte Schneide - zäher Rücken bei einer Klinge)

Für die vier letztgenannten Begriffe, allesamt eigenständige Stahlsorten, folgt eine kurze historische Einordnung. In dieser Arbeit wird danach nicht weiter auf Tiegelstahl eingegangen, sondern nur noch auf die Gruppe der Schweißverbundstähle. Daher werden die Begriffe „Damaszener Stahl“ und „Schweißdamast“ von nun an synonym verwendet.

2.2. Tiegelstahl

Nachweise von Objekten aus Tiegelstahl finden sich in Nordindien im 1.Jh. n. Chr. in Form von Schwertern und Äxten[5].

Der Wootz-Prozess wurde entwickelt, um das vorhandene reine Eisen kontrolliert aufzukohlen und so ein brauchbares Material für Werkzeuge und Waffen herzustellen. Im Vergleich zu Reineisen bringt härtbarer Stahl wesentlich bessere Gebrauchseigenschaften hinsichtlich Schärfe und Schnitthaltigkeit mit sich.

Sowohl Feuerbach[6] und Verhoeven[7] geben Hinweise auf die ursprüngliche Herstellung und die Metallurgie des Tiegelstahls. Zunächst wird dabei Reineisen gemeinsam mit Hilfsstoffen wie Erz, Gusseisen (bzw. Sorel-Eisen) oder pflanzlichem Material, in einem einfachen Lehmtiegel erhitzt. Glasscherben wurden zum Zweck der Schlackenbildung beigemengt. Historische Funde deuten darauf hin, dass in den Anfängen der Produktion das Fassungsvermögen der Tiegel lediglich ca. 1 kg betrug. Die Mischung wird dabei so eingestellt, dass ein übereutektoider Stahl entsteht. Verhoeven gibt z.B. folgende Analyse an:

C	Mn	Si	S	P
1-2%	~0.2%	~0.15%	~0.02%	~0.1%

Von besonderer Bedeutung ist hierbei, dass die Schmelze Spuren von Verunreinigungen (Mn, Si, P oder S) enthält. Auch Vanadium, welches in Spuren bereits im Eisenerz vorhanden sein kann, findet sich sehr häufig in historischen Erzeugnissen.[8] Anschließend wurde das Material im Tiegel aufgeschmolzen und langsam zum Erstarren gebracht. Durch die niedrige Abkühlgeschwindigkeit entstehen beim Erstarren große Dendriten und im weiteren Austenitkristalle. Da es sich um einen übereutektoiden Stahl handelt, sammeln sich an den Korngrenzen sowohl Zementit, als auch Fremdatome und Karbide (z.B. von Vanadium) an.

Das so gewonnene Erzeugnis („Regulus“) ist aufgrund der groben Struktur viel zu spröde um z.B. direkt zu Klingen verarbeitet zu werden. Daher wird dieses im nächsten Schritt einem Diffusionsglühprozess unter oxidierender Atmosphäre unterzogen. Dies hat zwei Effekte: Die grobe kristalline Struktur löst sich auf und man erhält einen homogenen Stahl. Allerdings bleiben die Anreicherungen an den ehemaligen Korngrenzen weitgehend erhalten. Die zweite Auswirkung des Glühens ist die Entkohlung der Randschicht des Regulus.

Der Regulus wird nun bei relativ niedrigen Temperaturen (Verhoeven nennt als Obergrenze 1100°C) geschmiedet. Der entkohlte, duktile Mantel hält hierbei das anfangs immer noch brüchige Innere des Regulus zusammen. Durch die vielen Temperatur – und Umformzyklen sammelt sich der Zementit an den Fremdatomen – und Karbiden und es bildet sich ein Netz aus Karbidsträngen. Sie sorgen letztendlich für das Muster des Stahls, das sich durch Ätzen sichtbar machen lässt.

Anwendung fand der Tiegelstahl in der Herstellung von orientalischen Schwertern und anderen Schneidwerkzeugen. Die Herstellung von Wootz ist in Indien bis ins 18. Jh. dokumentierbar.

[5] Feuerbach 2003, S. 38
[6] Feuerbach 2006
[7] Verhoeven 1993
[8] Dauksch, Pendray, Verhoeven 1998, S. 62ff

Auch heute gibt es wieder vermehrt Schmiede die die ursprüngliche Technik für sich entdeckt haben und Tiegelstahl produzieren[9]

2.3. Schweißdamast

Während der Tiegelstahl seine Ausbreitung hauptsächlich in Zentralasien fand, lassen frühe Funde keltischer Klingen aus der Eisenzeit den Schluss zu, dass die Herstellung von Schweißdamast seine Anfänge in Europa nahm.

Wie Lehmann[10] ausführt, konnte bereits an einem in Singen am Hohentwiel gefunden Grabschwert aus dem 9. Jh. v. Chr. ein Schichtaufbau nachgewiesen werden, der auf die Anwendung des Feuerschweißens hindeutet. Weiters werden Beispiele von durch Marcin Biborski untersuchte Klingenfunde aus dem 2. Jh. V. Chr. genannt, die schon die bewusste Anwendung von Schweißmustertechnik zeigen. Besonders Saxe und Spathae erfuhren im ersten Jahrtausend n. Chr. aufwändige Damastaufbauten. Es sei hier besonders auf die wurmbunten Spathaklingen hingewiesen, die einen komplexen Aufbau aus mehreren Damastsorten aufwiesen. Einige „Meilensteine“ finden sich bei Manfred Sachse[11], der von zahlreichen Waffenfunden Nachbildungen angefertigt hat.

In der heutigen Zeit erlebt die Verwendung von Damaszenerstahl eine Renaissance im Bereich der hochwertigen Schneidwaren. Hierbei geht es primär um optische Kriterien und um die Unter-Beweis-Stellung von besonderer Kunstfertigkeit. Hersteller und Verarbeiter von Damaszener Stahl reichen von unter einfachen Bedingung arbeitenden Schmieden bis hin zu Großbetrieben.

Die frühen Zeitangaben für erste Funde aus Schweißdamast begründen auch, warum die Behauptung, dieser wurde als Imitationsversuch von Tiegelstahl entwickelt, als nicht zutreffend erscheint.

2.4. Raffinierstahl

In allen Erzgebieten war die Reduktion von Erz zu Eisen in sogenannten Rennöfen seit der frühen Eisenzeit gängige Praxis.[12] In diesen einfachen Schachtöfen wurde das Erz ohne aufschmelzen reduziert. Das entstehende Produkt, die Luppe, bestand aus einer porösen Eisenstruktur mit zahlreichen Schlacken – und Kohleeinschlüssen. Darüber hinaus konnte der Kohlenstoffgehalt innerhalb der Luppe stark variieren. Ziel des Raffinierens oder „Gärbens“ war es, ein homogenes Material zu erhalten und den Kohlenstoffgehalt auf das gewünschte Maß einzustellen. Dazu wurden ausgewählte Bruchstücke der Luppe miteinander so lange feuerverschweißt und gefaltet, bis ein homogenes Material entstand und der Kohlenstoffgehalt durch Diffusion ausgeglichen war. Das ist auch der wesentliche Unterschied zur Herstellung von Schweißdamast. In dem einen Fall wird ein homogenes Material angestrebt, beim Damast wird eine bewusst herbeigeführte Inhomogenität zur Mustererzeugung verwendet.[13] Raffinierstähle

[9] z.B. Achim Wirtz (Deutschland) oder Vasily Fursa (Ukraine)
[10] Lehmann 2016, S. 13ff
[11] Sachse 1993, Nachbildungen z.B. vom Schwert von Sutton Hoo, ebenfalls mit einer wurmbunten Klinge.
[12] Denig 1997
[13] Vgl. Kapitel 3.6

unterschiedlicher Herkunft[14] waren die wesentlichen Ausgangskomponenten für Schweißdamast.

Im Europa des Mittelalters war die Hochofentechnik zunehmend so weit fortgeschritten, dass es qualitativen Stahl in großen Mengen gab. Dies führte zur Wegrationalisierung des Raffinierstahls, der die steigende Nachfrage nach Stahl für Waffen und Alltagsgegenstände nicht mehr bedienen konnte.

Die Thematik der historischen Stahlerzeugung würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen, es sei hier auf die ausführliche Abhandlung von Osann verwiesen.[15]

2.5. Laminate

Bei Laminaten strebt man, wie auch bei Schweißdamast, einen ungleichmäßigen Aufbau des Produkts an. Ziel ist jedoch nicht, eine dekorative Optik herbeizuführen, sondern eine bestimmte Eigenschaftsverteilung (Leistungszonen) zu erreichen. Die Herstellung von Verbundwerkstoffen, bei der eine Leiste aus hartem Stahl von einer Schale aus einer weicheren und zäheren Legierung umgeben ist, hat eine lange Tradition und fand ganz offensichtlich auch bei Asiatischen und Europäischen Schwertern Anwendung. Abbildung 2 stellt gebräuchliche Klingenaufbauten von Katana-Klingen gegenüber. Auch Europäische Schwerter wurden nach ähnlichen konstruktiven Prinzipien ausgelegt.

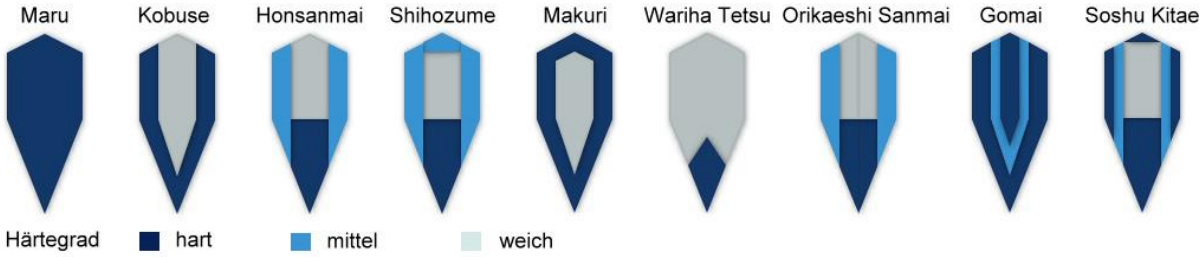


Abbildung 2: Leistungszonen in Katana-Klingen

Begründbar ist die Laminattechnik mit der elementaren Festigkeitslehre: Bringt man auf eine Klinge eine Biegebelastung auf, so steht die Randfaser des Querschnitts unter der höchsten Biegespannung und ist der größten Dehnung ausgesetzt. Die Randschicht muss also – möglichst ohne Bruch – ein Vielfaches der Verformungsenergie aufnehmen. Gehärteter Stahl hat zwar eine hohe Zugfestigkeit, ist jedoch nur zu minimaler plastischer Verformung fähig. Dagegen kann ein zäherer Baustahl oder Vergütungsstahl wesentlich mehr plastische Verformung ertragen. Man erhält durch geschickte Anwendung der Laminattechnik eine Klinge, die sich bei Belastung zwar leichter verbiegt, aber dabei keinen bleibenden Schaden nimmt. Durch den kleineren Abstand von der neutralen Faser des Querschnitts erfährt die harte Mittellage nur elastische Formänderungen.
Weitere Vorteile der Laminattechnik werden von Bergland[16] herausgestrichen: Die bessere Ausnutzung des (besonders in früheren Zeiten) teureren Schneidenstahls und die einfachere Bearbeitbarkeit der großteils weichen Klingenflanken.

[14] Durch die unterschiedliche Herkunft ergaben sich aus Unterschieden in der Legierungszusammensetzung die gewünschten Kontraste im Damast.
[15] Osann 1971
[16] Bergland 2013, S. 109ff

Ähnliche Effekte können aber auch bei Werkzeugen aus einfachem Stahl erreicht werden: Eine differenzielle Wärmebehandlung, bei der nur die Schneide gehärtet wird oder der Rest des Werkzeugs höher angelassen wird und somit Zähigkeit zurück gewinnt.

3. Physik des Schweißdamasts

Die folgenden Kapitel sollen einen Überblick über die theoretischen Aspekte bei der Herstellung von Schweißdamast geben. Da Schweißdamast heute wie damals hauptsächlich für Klingen aller Arten Verwendung findet, wird besonders auf die Eignung als Werkzeugmaterial eingegangen. Auf weiten Strecken handelt es sich dabei um Erkenntnisse, die gleichermaßen alle Werkzeugstähle betreffen, ob als Damast verwendet, oder nicht. Diverse Autoren[17] geben ausführliche Einführungen in dieses Grundlagenwissen.

3.1. Musterung des Stahls

Der augenscheinliche Unterschied durch die Verwendung von Damaszener Stahl ist die gemusterte Oberfläche der geschliffenen Werkstücke.

Im Gegensatz zu Tiegelstahl lässt Schweißdamast weitreichende Mustersteuerung zu, die auf der gezielten Anordnung der einzelnen Stahlkomponenten im Verbund basieren. Dabei können einzelne Muster auch zu einem noch komplexeren Aufbau kombiniert werden. Den ersten Schritt beim Damaszieren stellt für gewöhnlich die Herstellung eines Lagendamasts dar. Dabei handelt es sich um ein sandwichartiges Laminat aus flachen Schichten. Durch unterschiedliche Weiterverarbeitung lassen sich daraus z.B. folgende Muster ableiten (siehe auch Abbildung 3):

- Wilder Damast: Die Weiterverarbeitung von Lagendamast ohne Mustersteuerung. Durch ungleichmäßige Hammerschläge entsteht im geschliffenen Werkstück ein „zufälliges“ Lagenbild
- Geprägter Damast: Wilder Damast wird mit verschiedenen Formen gezielt geprägt. Das Muster kann mit den Höhenschichtlinien einer Landkarte verglichen werden, bei dem die „Täler“ die Form des Prägewerkzeuges annehmen
- „Masame“-Orientierung: Die Lagenorientierung im (flachen, z.B. Klinge) Werkstück wird bewusst gedreht, sodass Fügeflächen und Werkstückebene zueinander orthogonal sind.
- Federdamast: Deformierung der Lagenstruktur mittels Durchtreiben eines Meißels. Anschließend erneutes Fügen der Einzelteile. Der Damast muss in der Masame-Orientierung verwendet werden, damit das Muster zur Geltung kommt.
- Torsionsdamast: Verdrehung eines Stabes aus Lagendamast, anschließendes ausschmieden. Damit das Muster sichtbar wird, muss beim Schleifen weit ins Innere des Schweißverbundes vorgedrungen werden.

Besonders die letzten drei Aufbauten setzen eine einwandfreie Verbindung der Schichten voraus. Durch die kleinen Fügeflächen können bereits kleine Schweißfehler zur Delamination im Gebrauch führen. Enges Tordieren von Damast stellt schon während der Herstellung hohe Ansprüche an die Güte der Schweißung. Im Gebrauch liegen die Fügeflächen in Torsionsdamast ungünstig schräg zur Bauteilachse, sodass sie bei Zug – oder Biegebelastungen

[17] Siehe Landes 2006, Verhoeven 2013, Rapatz 1962

Schubspannungen ausgesetzt sind. Denig betont daher auch, dass Torsionsdamast nicht in leistungsrelevanten Zonen eines Werkstücks verwendet werden sollte. [18]

Abbildung 3: Damastmuster auf Klingen. Wilder Damast, "Masame", Torsionsdamast, Federdamast, Explosionsdamast (v.o.n.u.)

[18] Denig 1997, S. 118

Vorwiegend für dekorative Elemente gibt es eine Vielzahl an weiteren Möglichkeiten, Muster zu erzeugen. Dazu gehören auszugsweise Mosaikdamaste, Drahtseildamast, Kettendamast. Eine ausführliche und bebilderte Beschreibung verschiedenster Muster aus der Sicht eines Handwerkers findet sich bei Hrisoulas und Löbach.

3.2. Grundlagen und Legierungselemente

Praktisch alle Aussagen über herkömmliche Stahlwerkstoffe lassen sich unverändert auf die Komponenten in Damaszener Stahl übertragen.

- Kohlenstoff ist für alle klassischen Werkzeugstähle das wichtigste Legierungselement. Der für Klingen im Damast sinnvolle Gehalt erstreckt sich von 0.5-1.5 %. Eine Ausnahme ist Dekordamast, der nicht im Bereich der Schneide zum Einsatz kommt und auch geringere C-Gehalte besitzen kann.
- Weitere Legierungselemente dienen der Herbeiführung spezieller Eigenschaften. Schnitthaltigkeit durch Bildung von Karbiden (Chrom, Wolfram, Molybdän, Vanadium), Hitzebeständigkeit (Molybdän, Cobalt), Korrosionsbeständigkeit (Chrom), Durchhärtbarkeit (Mangan), Kontrastbildner im Damast (Mangan, Nickel), Zähigkeit (Nickel, Vanadium)
- Stähle über 13% Cr gelten als rostbeständig. Die Eignung zum Feuerschweißen und damit die Herstellbarkeit von Damast mit herkömmlichen Methoden wird ab ca. 2% Cr durch die Bildung von Chromoxid an der Stahloberfläche deutlich herabgesetzt.

3.3. Verbindung der Schichten

Zur Verbindung der einzelnen Damastkomponenten kommen eine Vielzahl unterschiedlicher Techniken in Frage. Neben der historisch ausschließlich und auch heute häufig angewendeten Technik des Feuerschweißens existieren u.a. folgende Fügemethoden für mehrlagige Schichten:

- Reibschweißen
- Kaltpresschweißen
- Plattieren / Walzschweißen
- Pulvermetallurgische Herstellung („Damasteel“)
- Sprengschweißen

Grundlage dieser Verfahren ist, dass die Fügeflächen durch hohen Druck (teilweise auch unter Wärmeeinfluss) zusammengebracht werden und in der Lage sind, Metallbindungen aufzubauen. Für das Kaltverschweißen unter Rekristallisationstemperatur sind nach Bay[19] die wichtigsten Verfahrensparameter:

- Die plastische Deformation der Fügefläche
- Die Relativgeschwindigkeit zwischen den Flächen
- Die Normalspannung
- Das Vorhandensein bzw. die Beschaffenheit von Oberflächenschichten (Oxidschichten)

Die praktische Herstellung von feuergeschweißtem Damast wird in Kapitel 5 ausführlich beschrieben.

[19] Bay 1986

3.4. Wärmebehandlung

Auch die Temperaturführung beim Schmieden und die Wärmebehandlung erfolgen bei Damaszener Stahl analog zu herkömmlichen Stählen. Je nach Anforderung sind für Klingen der Reihe nach folgende Schritte empfehlenswert:

- Warmformgebung über den gesamten nutzbaren Temperaturbereich mit einer geringen Anzahl von Hitzen. Die Wichtigkeit der richtigen Temperaturführung wird von Verhoeven[20] beschrieben. Gerade bei Damaszener Stahl, vom Feuerschweißen bei hohen Temperaturen einen schlechten Gefüge-Ausgangszustand mitbringt, ist eine sorgfältige Verformung wichtig.
- Nach Beenden des Schmiedens zunächst Normalglühen und Weichglühen. Das Weichglühen stellt einen optimalen Zustand für eventuelle mechanische Bearbeitung her und verringert das Risiko von Härterissen oder Verzug. Es kann je nach Bedarf (und Legierungszusammensetzung) mit einer Einformbehandlung auf kugeligen Zementit verbunden werden. Näheres ist bei Landes[21] nachzulesen.
- Das Härten erfolgt, sofern vorhanden, nach Angaben des Stahlherstellers. Spätestens hier wird auch evident, dass man gewisse Materialkombinationen zwar theoretisch herstellen kann, aber nur halbwegs gleichartige Stähle einen Damast ergeben, der sich durch ein gebrauchsfähiges Härtegefüge auszeichnet. Ein anschauliches Negativbeispiel wäre etwa die Kombination von Schnellarbeitsstahl und einem Kohlenstoffstahl, wobei der eine entweder unterhärtet wird oder der andere extremes Grobkorn und Restaustenit ausbildet. Die Haltezeit liegt bei niedriglegierten Stählen und herkömmlichen Klingenquerschnitten im Bereich von 1-10 Minuten, je nach zu lösenden Karbiden.
- Die Abschreckung erfolgt zumeist im Ölbad, nur bei hochreinen C-Stählen oder geringen C-Gehalten kann eine Wasserhärtung zielführend sein. Ziel ist bei Klingen normalerweise eine möglichst vollständige Martensitumwandlung, wobei auch Tiefkühlbehandlungen zum Einsatz kommen können.
- Alternativ sei hier noch auf die Erzeugung von bainitischen Gefügen in Klingen hingewiesen, die von verschiedenen Materialforschern und Messermachern regelmäßig diskutiert wird. Unter gewissen Voraussetzungen können diese bei gleicher Härte eine wesentlich höhere Zähigkeit als angelassener Martensit aufweisen, wie Grossmann u.a. eindrucksvoll demonstriert haben.[22] Gegen die Anwendung bainitischer Gefüge spricht eine wesentlich aufwendigere Temperaturführung (isotherme Umwandlung) und die Tatsache, dass bainitische Gefüge nicht die gleiche Maximalhärte erbringen wie konventioneller Martensit.[23] Für feine Schneidaufgaben ist daher dem Martensit der Vorzug zu geben, während das Bainitisieren für Anwendungen, die hohe Zähigkeit erfordern (Blankwaffen, Haumesser) eine interessante Alternative darstellt.
- Die Anlasstemperaturen liegen für die meisten Stähle bei 150-250°C. Mehrmaliges Anlassen kann aufgrund der Karbidausscheidung und Umwandlung von Restaustenit zweckmäßig sein.

[20] Verhoeven 2013, S. 110ff
[21] Landes 2006, S. 131
[22] Grossmann / Bain (1964), S.178
[23] Verhoeven 2013, Tabelle 12.1

3.5. Diffusion

Die Beweglichkeit von Fremdatomen in Stahl darf bei der Herstellung von Damaszener Stahl nicht aus den Augen gelassen werden. Diffusion ist im Besonderen von zwei Parametern abhängig, nämlich welches Element betrachtet wird und bei welcher Temperatur der Vorgang stattfindet.

Quantitativ lässt sich Diffusion durch Diffusionskoeffizienten D beschreiben. Friedberg u.a.[24] geben für die wichtigsten Legierungselemente in Stahl die gemessenen Koeffizienten in Diagrammen an. Die Tabelle wurde ergänzt durch die Zeit, die ein jeweiliges Atom für einen Diffusionsweg von 1mm benötigt.[25]

	$D_C \left[{mm^2}/{s}\right]$	$D_{Mn} \left[{mm^2}/{s}\right]$	$D_{Cr} \left[{mm^2}/{s}\right]$	$D_{Ni} \left[{mm^2}/{s}\right]$
800°C	$5 \cdot 10^{-6}$ / 9.3h	$1.4 \cdot 10^{-12}$ / 3700a	$5.5 \cdot 10^{-12}$ / 95a	$6.5 \cdot 10^{-13}$ / 8000a
1000°C	$4.5 \cdot 10^{-5}$ / 1h	$2.1 \cdot 10^{-10}$ / 25a	$5.0 \cdot 10^{-9}$ / 1a	$9.9 \cdot 10^{-11}$ / 53a
1200°C	$2.2 \cdot 10^{-4}$ / 14min	$8.3 \cdot 10^{-9}$ / 0.63a	$1.4 \cdot 10^{-7}$ / 14d	$3.9 \cdot 10^{-9}$ / 1.4a

Bei der Herstellung von Damaszener Stahl bewegt sich das Temperaturfenster beim Schmieden meist zwischen 1200-1000°C. Man erkennt, dass selbst bei diesen Temperaturen nur kleine, im Austenit interstitiell gelöste Elemente nennenswerte Diffusionswege erreichen.

Beim Herstellen von Damast muss bei der Kombination von Stahlsorten die Kohlenstoffdiffusion beachtet werden. Ist die Lagendichte und die Zeit im Feuer hoch genug, kann der Kohlenstoff zwischen den Komponenten diffundieren.

Ein Beispiel dazu: Es liegt ein 250-lagiger Schweißdamast aus dem zähen C45 und dem für feine, harte Schneiden geeigneten SC145 im Verhältnis 1:1 vor. Am Ende der letzten Feuerschweißung hat der Stahl eine Dicke von 25mm. Die durchschnittliche Lagendicke liegt also bei 0.1mm. Selbst wenn bis zu diesem Punkt keine Diffusion stattgefunden hätte, reichen nun 8s bei 1200°C aus, um den Ausgleich des Kohlenstoffgehaltes herbeizuführen. Äußere Einflüsse ausgenommen, kann also von einem Material mit gleichverteilten 0.85% C ausgegangen werden.

Praktisch bedeutet das, dass für die meisten Damaszener Stähle mit einem Ausgleich des Kohlenstoffgehalts gerechnet werden kann. Ausnahme bilden höchstens grobe Musteraufbauten bei Vermeidung unnötiger Haltezeiten. Eine Möglichkeit, Diffusion zu verhindern, ist die Verwendung von Zwischenschichten aus Nickel, die die Wanderung des Kohlenstoffs blockieren.

3.6. Kontrastbildung

Die dekorative Optik, für die Damaszener Stahl heute wie damals geschätzt wird, tritt am besten durch das Ätzen der fein geschliffenen Oberflächen des Werkstücks hervor. Der Kontrast ergibt sich hierbei durch die individuelle Reaktion der unterschiedlich legierten Stähle. Abbildung 4 gibt einen Überblick über den Einfluss der Legierungselemente beim Ätzen mit einer heutzutage

[24] Friedberg / Torndahl / Hillert 1969, S. 263-276

[25] Gemäß der von Verhoefen (Verhoeven 2013, Gleichung 7.1) gegebenen Formel $t = {x^2}/{6D}$

häufig verwendeten Säure[26]. Zusätzlich sind die Reaktionen einiger gebräuchlicher Damastkomponenten verortet. Mehrere Legierungselemente beeinflussen einander gegenseitig.

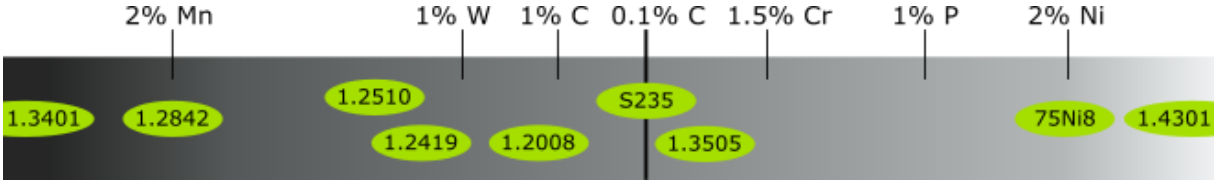


Abbildung 4: Kontraste beim Ätzen von Damaszener Stahl (schematisch)

In der Praxis fällt durch die zuvor besprochene starke Diffusionsneigung des Kohlenstoffs während des Schmiedens dieses Element als Kontrastbildner aus. Metallische Legierungselemente sind aufgrund der vernachlässigbaren Diffusion für die Kontrastbildung besser geeignet.

Bei Verwendung moderner Materialien bietet sich die Damaszierung mit nickel – bzw. manganhaltigen Stählen an, wobei starke Kontraste erreicht werden können. Bei Leistungsdamast tritt die Optimierung der Zeichnung zurück hinter der Anpassung der Legierungszusammenstellung an die jeweilige Schneidaufgabe. Für kontrastreichen Dekordamast kann hingegen mit entsprechendem Mehraufwand bei der Verarbeitung auch auf Mn- oder Ni-legierte austenitische Stahlsorten zurückgegriffen werden.[27]

Die Herstellung speziell legierter Stähle ist jedoch der Neuzeit vorbehalten. Frühere Stahlherstellungsmethoden boten keine Möglichkeit, gezielte Gehalte von Ni, Mn, W u.ä. einzustellen. Durch die Untersuchung zahlreicher historischer Waffen und Werkzeuge kann heute gesagt werden, dass vor allem Phosphor zur Mustererzeugung verwendet wurde. Kinder[28] beschreibt dies an zwei wikingerzeitlichen Schwertern und stellt dabei Gehalte zwischen 0.1 und 0.7% P fest, die signifikanten Einfluss auf den Kontrast der einzelnen Lagen haben. Phosphor gilt heute als Stahlschädling, der Gehalt in modernen Stählen sollte unter 0.03% betragen. Bei den o.g. hohen Gehalten ist davon auszugehen, dass die Verwendung P-haltigen Schweißdamastes stets auf Kosten der Zähigkeit im Gebrauch ging.

4. Gebrauchseigenschaften von Damaszener Stahl in Klingen

In den letzten Jahrzehnten war Damaszener Stahl das Thema zahlreicher archäologischer, historischer und werkstofftechnischer Untersuchungen. Dennoch halten sich bestimmte „Mythen“ über diese alte Technik hartnäckig, sowohl was die Herstellung als auch die Gebrauchseigenschaften betrifft. Im Folgenden soll zunächst eine kurze Einführung in die Anforderungen an Klingen gegeben werden. Anschließend sollen häufig anzutreffende Pauschalausaussagen zu Damast mit wissenschaftlichen Erkenntnissen verglichen werden.

4.1. Anforderungen an eine Klinge

Betrachten wir die mechanischen Anforderungen, denen Klingen ausgesetzt sind: im Bereich der Schneide strebt man möglichst hohe Härte bei ausreichender Zähigkeit an, sodass eine hohe Schnitthaltigkeit bei genügend Sicherheit gegen Ausbrüche entsteht. Für die restliche Klinge

[26] Die Grafik ergibt sich aus der Erfahrung des Autors beim Ätzen von feingeschliffenen Stahloberflächen mit 40%-iger Eisen(III)-Chlorid-Lösung
[27] Denig 1999
[28] Kinder 2005

(Klingenkörper) ist eine sehr gute Zähigkeit wünschenswert, die im Fall hoher Belastungen vor Bruch schützt. Maximale Härte ist in dieser Region nicht von Bedeutung.

Roman Landes[29] skizziert ein „Anforderungsdreieck" für Klingen: Die Wahl des passenden Werkstoffs, die Wärmebehandlung und die Geometrie der Klinge sind jeweils entscheidende Parameter für die Leistungsfähigkeit einer Klinge für die betreffende Anforderung. Es ist darauf hinzuweisen, dass es kein eindeutiges Optimum gibt: Eine Spaltaxt wird immer andere Stähle und Geometrien einfordern als eine Rasierklinge. Alles was ein Hersteller tun kann, ist, den optimalen Kompromiss zwischen konkurrierenden Eigenschaften zu finden.

Manche Hersteller von Damastklingen vereinfachen in Werbetexten diesen Sachverhalt oft und preisen die Verwendung von Damast als unbedingten Leistungsvorteil an:

„Durch die Kombination aus zwei Sorten bestem Werkzeugstahl und einem zähen, nickelhaltigen Stahl entstehen Messer mit einer überragenden Schnitthaltigkeit sowie dem optimalen Maß an Flexibilität und Härte." [30]

„Es werden unterschiedlich legierte Stähle eingesetzt, um die Schneide mit dem besten aus den beiden Welten hart und zäh zu versehen" [31]

Wie im folgenden Kapitel erläutert, kann diesen und ähnlichen Aussagen nicht oder nur teilweise zugestimmt werden.

4.2. Hohe Härte und gleichzeitig große Zähigkeit?

Häufig wird der Vorteil von Damaszener Stahl damit begründet, durch die Verschweißung eines harten (hoher C-Gehalt) und eines weichen (niedriger C-Gehalt) Stahls einen Werkstoffverbund zu erhalten, der die eingangs erwähnten Anforderungen der hohen Härte an der Schneidkante bei Erhalt der guten Zähigkeit eines weichen Werkstoffs kombiniert. Hier muss nochmals auf den Unterschied zwischen klassischem Schweißdamast und Laminaten, hingewiesen werden.

Wählt man einen sinnvollen Aufbau des Laminats, lässt sich durch harte und weiche Bereiche im Querschnitt der geforderte Spagat erreichen.

Stellt man hingegen die gesamte Klinge aus ein und demselben Schweißdamast mit harten und weichen Komponenten her, sind die Ausgangskomponenten über den Querschnitt des Werkstücks gleichverteilt. Es können zwei Fälle eintreten:

- Erfolgt die Diffusion des Kohlenstoffs zwischen den Lagen, liegt letztlich wieder ein (je nach Materialkombination mehr oder weniger härtbares) Material vor. Man hat man zwar vielleicht immer noch einen härtbare Schneide, aber nur durchschnittliche Zähigkeit und Schnitthaltigkeit.
- Sind die Diffusionswege jedoch zu groß oder ist die weiche, zähe Komponente kein Stahlwerkstoff (z.B. Reinnickel wird häufig in Dekordamast verarbeitet), werden die weichen Anteile in der Schneide bei der Anwendung hohen Verschleiß erfahren.

Man kann erkennen, dass die Kombination von harten und weichen Materialien in der *Schneide* ausschließlich Nachteile mit sich bringt.

[29] Landes 2006
[30] http://hohenmoorer-messermanufaktur.de
[31] https://lookalivecontest.wordpress.com/2011/12/08/

4.3. Unerreichte Schärfe?

Oft werden Damastmesser mit von herkömmlichen Stählen unerreichbarer Schärfe beworben. Auch hier ist wesentlich zu verstehen, dass Damast nur maximal so gute Ergebnisse erzielen kann wie die einzelnen Komponenten. Andererseits wird hier auch oft Schärfe mit Schneidfähigkeit verwechselt. Wie Landes[32] ausführt, ist die Schärfe eine messbare Größe, während die Schneidfähigkeit z.B. beim Schneiden von Gemüse, sowohl von der Klingengeometrie als auch vom Schnittgut abhängt und nicht ein Merkmal eines bestimmten Stahls ist.

Wie jeder andere Stahl im gleichen Legierungsbereich lässt sich auch Damast bei optimaler Wärmebehandlung auf eine bestimmte Maximalschärfe bringen, die sich auch nicht von der eines herkömmlichen Stahls unterscheidet.

5. Herstellungspraxis von Damaszener Stahl

In diesem Abschnitt wird die Herstellung von Damaszener Stahl durch Feuerschweißen beschrieben. Die Herstellung von feuergeschweißtem Damast geschieht üblicherweise in einem Temperaturfenster zwischen 1050°C und 1200°C. Wird das Ausgangsmaterial unter herkömmlicher Atmosphäre diesen Temperaturen ausgesetzt, so ist mit starker Verzunderung der Fügeflächen zu rechnen. In heutigen Damastschmieden sind zwei Techniken etabliert, um der Verzunderung entgegenzuwirken.

- Verwendung von Flussmitteln zum Schutz vor Verzunderung (klassische Methode)
- Abdichten der blank geschliffenen Fügeflächen durch Dichtschweißen oder Formrohre

Zusätzlich sei auf die Möglichkeit hingewiesen, den Erwärmungsvorgang unter Schutzgasatmosphäre oder Vakuum durchzuführen. Wegen der dazu benötigten Aggregate, die über die Ausstattung herkömmlicher Schmieden hinausgehen, ist diese Methode Großherstellern vorbehalten.

Die beiden erwähnten Techniken werden im Folgenden beschrieben. Die Dokumentation führt durch die Herstellung von Damaszener Stahl für die Materialproben, die im letzten Teil dieser Arbeit benötigt werden. Es handelt sich dabei jeweils um einen ca. 150-lagigen Lagendamast aus den Stählen 75Ni8 und 75Cr1.

5.1. Feuerschweißen mit Flussmittel

Die Feuerschweißung unter Verwendung von Flussmitteln ist die herkömmliche und seit Jahrtausenden praktizierte Methode zum Verbinden von Stahlteilen im Schmiedefeuer. Wie von Denig[33] ausgeführt, sind unterschiedliche Flussmittel geeignet. Bei der Feuerschweißung von legierten und hoch C-haltigen Stählen wird auf Borax-basierte Flussmittel zurückgegriffen. Eine hauptsächlich aus Quarzsand, etwas Schmiedezunder und Kohlestaub hergestellte Mischung kann alternativ verwendet werden. Sie hat den Nachteil, dass Quarzsand durch den hohen Schmelzpunkt hohe Schweißtemperaturen erfordert, die die Eignung dieses Flussmittels auf niedrig C-haltige Stähle beschränken.

[32] Landes 2006, S.29ff
[33] Denig 1999, S. 38ff

Die Herstellung beginnt mit dem Vorbereiten der Stähle, die in diesem Fall in Form von dünnen Blechstreifen (1 und 2mm) vorliegen. Die Verwendung von dünnen Blechen hat den Vorteil, dass bereits bei der ersten Schweißung eine hohe Lagenzahl erreicht wird.

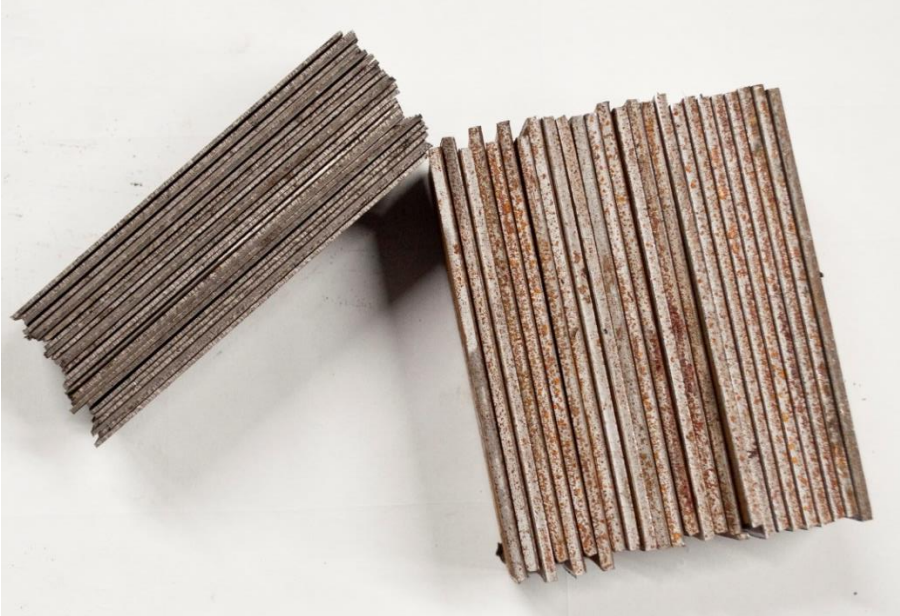


Abbildung 5: Ausgangsmaterialien für die Pakete; 75Ni8 links, 75Cr1 rechts

Die Streifen werden abwechselnd aufeinander gestapelt und durch Schweißnähte fixiert. Außerdem wird eine kurze Handhabe angeschweißt, die das Manipulieren im Feuer erleichtert. Man erhält ein sogenanntes „Paket“, das fertig zum Feuerschweißen ist.

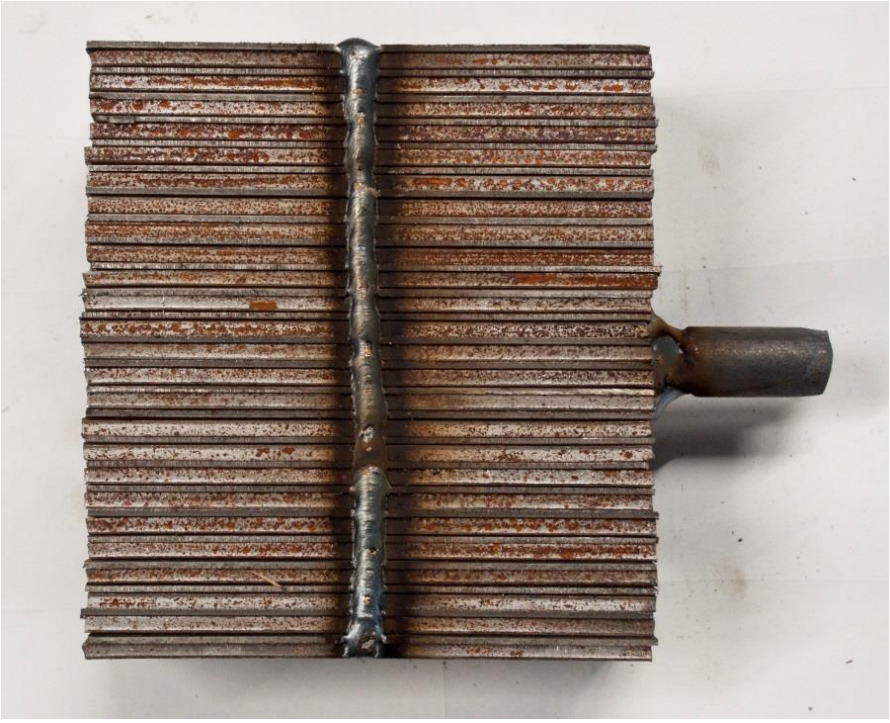


Abbildung 6: Das Borax-Paket

Als Flussmittel kommt Borax Anhydrit zum Einsatz. Um das Paket bereits beim Erwärmen zu schützen, wird es davor mit Borax bestreut.

Abbildung 7: Flussmittel auf dem Paket

Die Erwärmung erfolgt in einer Propan-Gasesse. Gegenüber Kohleessen erlauben Gasessen die Einhaltung einer Maximaltemperatur, sodass das Risiko, den Stahl zu verbrennen, sehr gering ist. Durch die Isolierung der Esse wird auch bei großen Paketen eine homogene Temperaturverteilung erreicht.

Das auf etwa 900°C erwärmte Paket wird erneut mit Borax bestreut und weiter erwärmt.

Abbildung 8: Aufbringen des Flussmitttels

Abbildung 9: Blick in die Gasesse beim Erwärmen auf Schweißtemperatur

Das Feuerschweißen erfolgt mit einem Lufthammer. Bei den ersten Schlägen auf das Paket wird das Borax aus den Zwischenräumen gedrückt und hinterlässt blanke Fügeflächen.

Abbildung 10: Feuerschweißen am Lufthammer

Nach der ersten Schweißung und dem Ausschmieden zu einem geeigneten Maß wird das Paket gedrittelt.

Abbildung 11: Dritteln des Pakets

Optional können die Fügeflächen grob abgeschliffen werden, um den dicken Schweißzunder zu entfernen. Anschließend wird erneut ein Paket aufgebaut und feuerverschweißt. Durch die Drittelung erhält man die angestrebten 150 Lagen.

Abbildung 12: Entzundern der Flächen vorm erneuten Stapeln

Abbildung 13: Das Paket für den zweiten Schweißdurchgang

Der Verwendungszweck des Materials ist die Herstellung von Kerbschlagproben. Daher wird das Material nach der letzten Schweißung auf Quadratstäbe mit 12x12mm ausgeschmiedet.

Kenndaten der Herstellung (man beachte den Gewichtsverlust durch Verzunderung):

Ausgangspaket	Maße und Gewichte	36x90x100mm, ~2500g, 50 Lagen
Feuerschweißen u. Schmieden Ausgangspaket	Dickenabnahmen der zwei Schweißdurchgänge	100 / 74 / 58mm
	Umformgrade der zwei Schweißdurchgänge	0.3 / 0.24
	Dicke ausgeschmiedet	33mm
Zweites Paket	Maße und Gewichte	~40x70x97mm, ~2100g, 150 Lagen
Feuerschweißen u. Schmieden zweites Paket	Dickenabnahmen der zwei Schweißdurchgänge	97 / 60 / 42mm
	Umformgrade der zwei Schweißdurchgänge	0.48 / 0.36
	Dicke, Gewicht ausgeschmiedet	12mm (Quadratstäbe), 1570g

5.2. Feuerschweißen unter Luftabschluss

Es ist möglich, auf den Einsatz von Flussmitteln zu verzichten, wenn die Erwärmung des Pakets unter Luftabschluss erfolgt. Im einfachsten Fall geschieht das durch Dichtschweißen der Spalte zwischen den Lagen oder durch Verpacken des Pakets in einem umhüllenden Rohr. Die Methode des Dichtschweißens ist mit Mehraufwand bei der Vorbereitung verbunden, hat aber einige Vorteile. So können auch Legierungskombinationen geschweißt werden, die unter Luftatmosphäre kaum herstellbar sind. Ein Beispiel sind Cr-haltige Stähle, die unter Atmosphäre trotz Flussmittel zur Bildung von Chromoxiden neigen, die die Schweißbarkeit herabsetzen. Außerdem wird die Möglichkeit, dass Flussmittelreste in den Schweißzonen verbleiben, ausgeschlossen.

Zunächst werden die gleichen Ausgangskomponenten wie für das erste Paket dicht in ein Formrohr gepackt. Um das Verschweißen der Randlagen mit dem Rohr zu verhindern, kann ein streifen oxidierter Edelstahlfolie dazwischen gelegt werden. Anschließend erfolgt das Dichtschweißen des Pakets unter Verwendung zweier Blechstücke als Deckel.

Abbildung 14: Stapeln der Stahlbleche in einem Formrohr

Abbildung 15: Das Paket fertig zum Feuerschweißen

Das Erwärmen und Feuerschweißen wird analog zum Flussmittel-Paket durchgeführt. Danach muss der Damastblock aus dem Formrohr geschält werden. Bei diesem Schritt arbeiten zwei Personen mit Warmschrot und Vorschlaghammer am Amboss.

Abbildung 16: Auspacken des Pakets nach dem Schweißen

Der Damastblock wird anschließend ausgeschmiedet, durch Sägen gedrittelt und die Fügeflächen flachgeschliffen.

Abbildung 17: Zersägen des Pakets nach dem Ausschmieden

Abbildung 18: Planschleifen der Fügeflächen für die zweite Schweißung

Danach erfolgt die Vorbereitung zum zweiten Schweißdurchgang. Da nur zwei Fügeflächen abzudichten sind, wird hier auf ein Rohr verzichtet und direkt rund um die Schweißstelle geschweißt.

Abbildung 19: Das Paket für den zweiten Schweißdurchgang

Nach der zweiten Feuerschweißung erhält man 144 Lagen. Der Damastblock wird wiederum auf 12x12mm Stäbe ausgewalzt.

Abbildung 20: Die ausgewalzten Quadratstäbe

Kenndaten der Herstellung:

Ausgangspaket	Maße und Gewichte	36x90x96mm, ~2500g (Ohne Hülle), 48 Lagen
Feuerschweißen u. Schmieden Ausgangspaket	Dickenabnahme des einen Schweißdurchgangs	100 / 52mm
	Umformgrad	0.65
	Dicke ausgeschmiedet	33mm
Zweites Paket	Maße und Gewichte	~40x75x97mm, ~2300g, 144 Lagen
Feuerschweißen u. Schmieden zweites Paket	Dickenabnahmen der zwei Schweißdurchgänge	97 / 75 / 50mm
	Umformgrade der zwei Schweißdurchgänge	0.26 / 0.41
	Dicke, Gewicht ausgeschmiedet	12mm (Quadratstäbe), 1810g

6. Mechanische Eigenschaften des Damaszener Stahls

Unter den Publikationen, in denen die mechanischen Eigenschaften von Damaststahl behandelt werden, sind insbesondere jene von Zgraggen / Trüllinger[34] und Pohl / Lindner[35] für die folgenden Ausführungen relevant. Die Autoren gehen auf das Verhalten von Schweißverbundstahl im Kerbschlagbiegeversuch ein. In beiden Arbeiten konnte für Damastproben eine signifikante Erhöhung der Kerbschlagarbeit gegenüber herkömmlichem Stahl nachgewiesen werden.

Wie Buchmayr / Kasberger ausführen, kann neben klassischen Schädigungsmechanismen von Verbundwerkstoffen wie Delamination oder Rissablenkung auch der „Materialinhomogenitäts-effekt“ auftreten. Dieser nimmt Einfluss, wenn Werkstoffe unterschiedlicher Härte, Fließspannung oder E-Modul zu einem Verbund kombiniert werden und kann zu einem Rissstop führen.[36] Sowohl deren Untersuchungen wie auch jene von Zgraggen / Trüllinger wurden mit solchen weich-hart-Kombinationen durchgeführt. In der Anwendung für Klingen tritt Damaszener Stahl zweckmäßigerweise jedoch in Form zweier martensitisch gehärteter Komponenten auf (hart-hart-Kombinationen).

Darauf aufbauend wurden folgende Fragestellungen formuliert:

1) Kann die von Zgraggen / Trüllinger beobachtete Abhängigkeit der Kerbschlagarbeit von der Lagenorientierung bestätigt werden?
2) Kann der Effekt der Zähigkeitserhöhung auch bei Laminaten aus zwei martensitisch gehärteten Komponenten beobachtet werden?
3) Hat das Herstellungsverfahren (Borax oder Sauerstoffabschluss) einen Einfluss auf die Ergebnisse?
4) Welches Schädigungsverhalten weist der Damaststahl im Kerbschlagbiegeversuch auf?

[34] Zgraggen / Trüllinger (2005)
[35] Pohl / Lindner (1994)
[36] Buchmayr / Kasberger (2014), S. 203

Zur Untersuchung dieser Fragen wurden aus dem hergestellten Damaststahl Kerbschlagproben hergestellt. Diese wurden folgenden Untersuchungen unterzogen: Härteprüfung, Kerbschlagbiegeversuch, lichtmikroskopische Analyse.

6.1. Probenherstellung

Die Kerbschlagproben wurden aus den ausgewalzten Quadratstäben hergestellt. Durch das Auswalzen auf 12x12mm Querschnitt wurde sichergestellt, dass genug Bearbeitungsaufmaß für die Herstellung der 10x10x55mm Proben erhalten bleibt. Insgesamt wurden 28 Proben hergestellt, wobei Lagenorientierung, Wärmebehandlung und Schweißmethode Unterscheidungskriterien waren. Die Proben sind in Abbildung 21 aufgelistet und benannt.

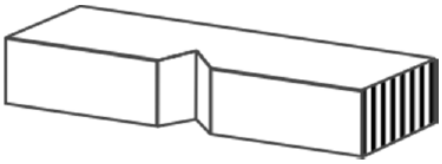
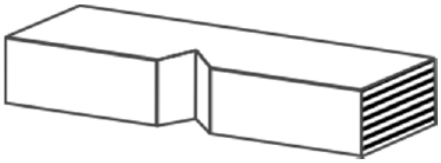
Lagenorientierung	Schweißmethode	Normalisiert	Vergütet
 "liegend"	Dichtgeschweißt	A1 A2 A3 AA0 AA1 AA2 AA3	A4 A5 A6
	Borax	C1 C2 C3	C4 C5 C6
 "stehend"	Dichtgeschweißt	B1 B2 B3	B4 B5 B6
	Borax	D1 D2 D3	D4 D5 D6

Abbildung 21: Einteilung und Benennung der Proben

Der Herstellungsweg der Proben umfasste zunächst das Normalisieren der Schmiedestücke. Der Stahl wurde zwei Mal mit kurzer Haltezeit bei 760°C mit Luftabkühlung normalisiert. Die Wärmebehandlung erfolgte in einem temperaturgesteuerten Elektroofen. Zusätzlich wurde die Temperatur durch ein eingebohrtes Thermoelement geprüft. Der genormte Probenquerschnitt wurde durch Planschleifen hergestellt. Die Herstellung der V-Kerben erfolgte durch Erodieren. Die vergüteten Proben wurden abschließend aus 820°C in Öl abgeschreckt und bei 220°C angelassen.

6.2. Kerbschlagbiegeversuch, Härtemessung

Die 28 Proben wurden einem Kerbschlagversuch bei Raumtemperatur unterzogen. Nachfolgend wurde an allen Proben eine Härtemessung nach Rockwell-C durchgeführt. Da beide Stähle im gleichen Legierungsbereich liegen, kann davon ausgegangen werden, dass zwischen den Schichten keine nennenswerten Härteunterschiede bestehen. Tabelle 1 zeigt die Kerbschlagarbeiten und die Härte der Probe. Zusätzlich ist angegeben, ob die Proben vollständig durchschlagen wurden und ob mit bloßem Auge eine Delamination der Lagenstruktur ersichtlich ist.

Probe	Schlagarbeit [J]	Härte [HRC]	Delamination erkennbar	Durchschlagen
A1	20.6	19	Ja	Nein
A2	3.8	26	Nein	Ja
A3	11.4	23	Nein	Ja
A4	3.6	56	Nein	Ja
A5	4.5	58	Nein	Ja
A6	4	58	Nein	Ja
AA0	11.7	24	Nein	Ja
AA1	12.9	23	Nein	Ja
AA2	27.1	19	Ja	Ja
AA3	7.9	23	Nein	Ja
B1	7.1	22	Nein	Ja
B2	42.3	18	Nein	Ja
B3	42.2	20	Ja	Ja
B4	4.5	58	Nein	Ja
B5	4.5	57	Nein	Ja
B6	4.9	58	Nein	Ja
C1	7	22	Nein	Ja
C2	36	17	Ja	Nein
C3	15.3	21	Nein	Ja
C4	6.1	57	Ja	Ja
C5	20.3	56	Ja	Ja
C6	4.2	56	Ja	Ja
D1	18.1	23	Ja	Ja
D2	6.8	21	Nein	Ja
D3	8.2	21	Nein	Ja
D4	3.3	58	Nein	Ja
D5	3.1	55	Nein	Ja
D6	4	55	Ja	Ja

Tabelle 1: Versuchsdaten der Proben

Trägt man die Schlagarbeit über die Härte auf, zeigt sich der Zusammenhang aus Abbildung 22. Im Hinblick auf das Zähigkeitsverhalten können bei Betrachtung dieses Diagramms folgende Aussagen getroffen werden:

- Allgemein ist die Schlagarbeit der normalisierten Proben größer als die der vergüteten. Jedoch streuen gerade die normalisierten Proben sehr stark.
- Die Härte der vergüteten Proben streut zwischen 55-58 HRC, was für diese Kombination aus Wärmebehandlung und Werkstoff ein durchaus typischer Wert ist. Gründe für die Unterschiede können z.B. unterschiedliche Öltemperaturen beim Abschrecken oder auch die Härtemessung selbst sein. Es scheint jedoch (für die vergüteten Proben) keine Korrelation zwischen Härte und Schlagarbeit zu geben. Die Proben mit den größten Schlagarbeiten (vor allem C5) weisen allesamt deutliche Delaminationen auf.
- Die Härte der normalisierten Proben streut zwischen 17-26 HRC. Dies weist auf Unterschiede in der Abkühlrate der einzelnen Proben hin. Es ist ersichtlich, dass die Proben mit den höchsten Schlagarbeiten im unteren Härtebereich (< 21 HRC) liegen. Bei steigender

Härte nimmt die Schlagarbeit ab. Die Probe A2 liegt bei 26 HRC und 3.8J Schlagarbeit sogar unter den meisten vergüteten Proben. Auch bei den normalisierten Proben liegen die Proben mit augenscheinlicher Delamination im oberen Bereich des Spektrums. Allgemein erreichen die normalisierten Proben gegenüber den vergüteten höhere Schlagarbeiten. Diese ließen sich vermutlich bei sorgfältigerer und langsamerer Abkühlung noch steigern.

- Hinsichtlich der Lagenorientierung lässt sich kein Zusammenhang zwischen „stehender“ und „liegender“ Ausrichtung festmachen. So sind die sehr zähen Proben B2 und B3 stehend orientiert, die Probe C2 jedoch liegend. Hier muss allerdings erwähnt werden, dass C2 nicht durchschlagen wurde und eventuell mehr Schlagarbeit aufnehmen hätte können. Hier sei auf die Prüfungen von Zgraggen / Trüllinger hingewiesen, die für die „liegende“ Orientierung wesentlich höhere Werte feststellen konnten[37].

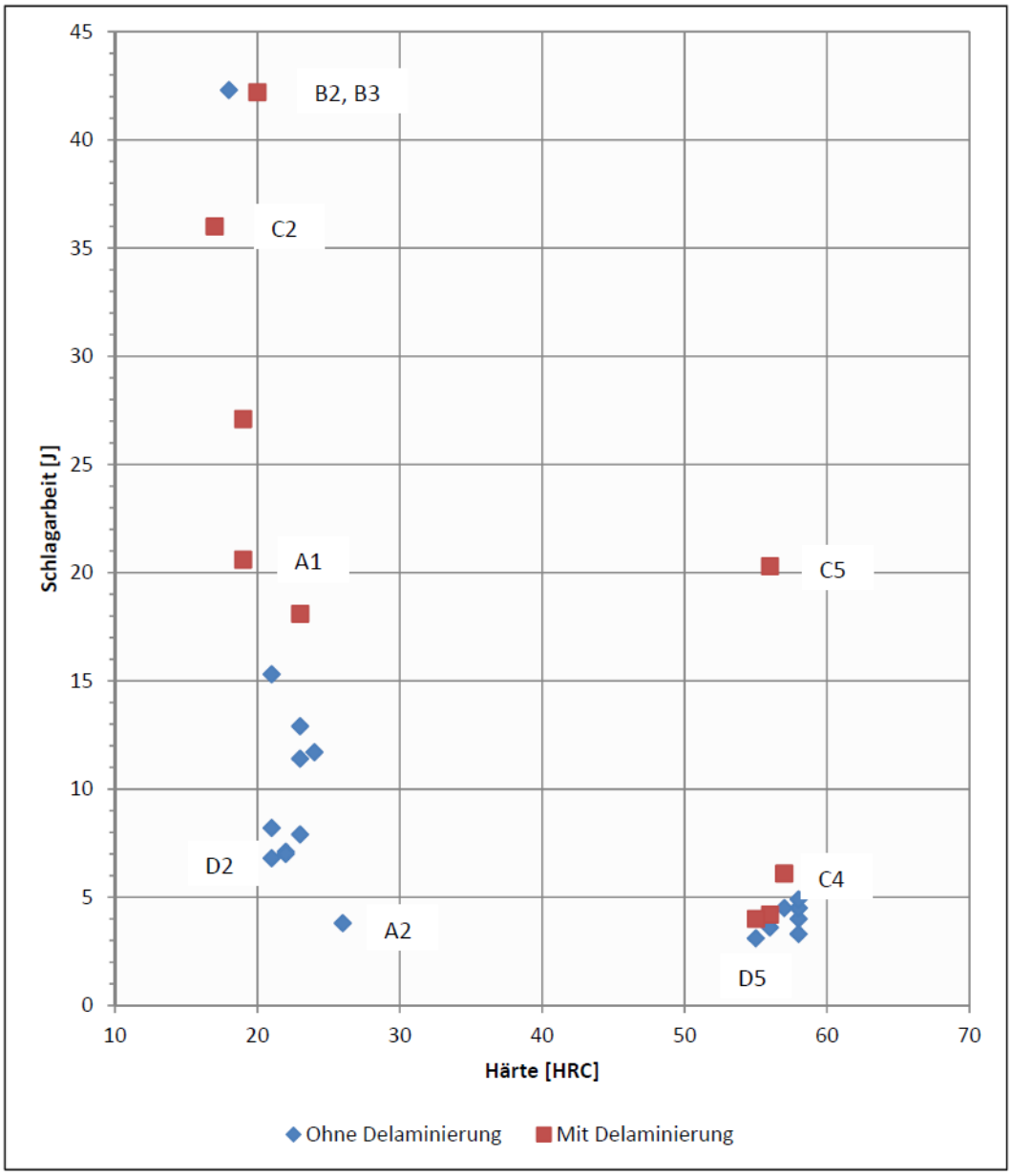


Abbildung 22: Schlagarbeit über Härte mit Hinweis auf Delaminierung

[37] Zgraggen, Trüllinger (2005), S. 226

- Unterscheidet man die Proben hinsichtlich des Schweißverfahrens erhält man Abbildung 23. Es kann also auch kein klarer Zusammenhang zwischen Schweißverfahren und Schlagarbeit benannt werden. Auffällig ist jedoch, dass von den 12 Borax-Proben 6 eine augenscheinliche Delamination aufweisen (=50%), von den 16 dichtgeschweißten Proben nur 3 (=19%).

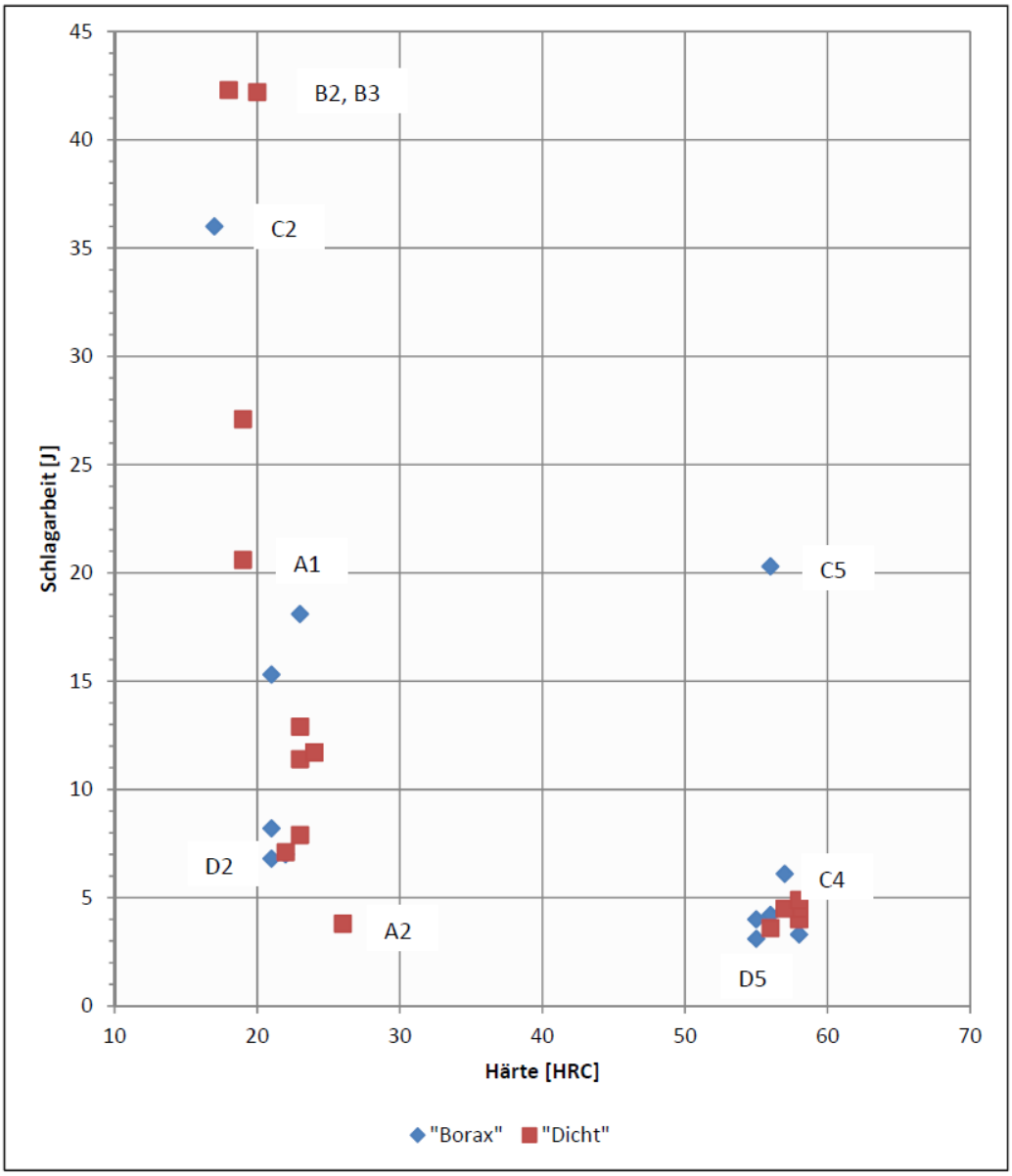


Abbildung 23: Schlagarbeit über Härte mit Hinweis auf die Schweißmethode

6.3. Bruchflächen

Die folgenden Abbildungen zeigen Makroaufnahmen der Bruchflächen ausgewählter Proben. Die diskutierten Proben sind in Diagramm Abbildung 22 hervorgehoben. Proben A1 und C2 (Abbildung 24 und Abbildung 25) wurden nicht durchschlagen. Die Bruchfläche zeigt Sprödbruchcharakter. In den noch verbundenen Bereichen tritt erhebliche Delamination auf. Beide Proben hatten hohe Schlagarbeiten.

Abbildung 24: Probe C2

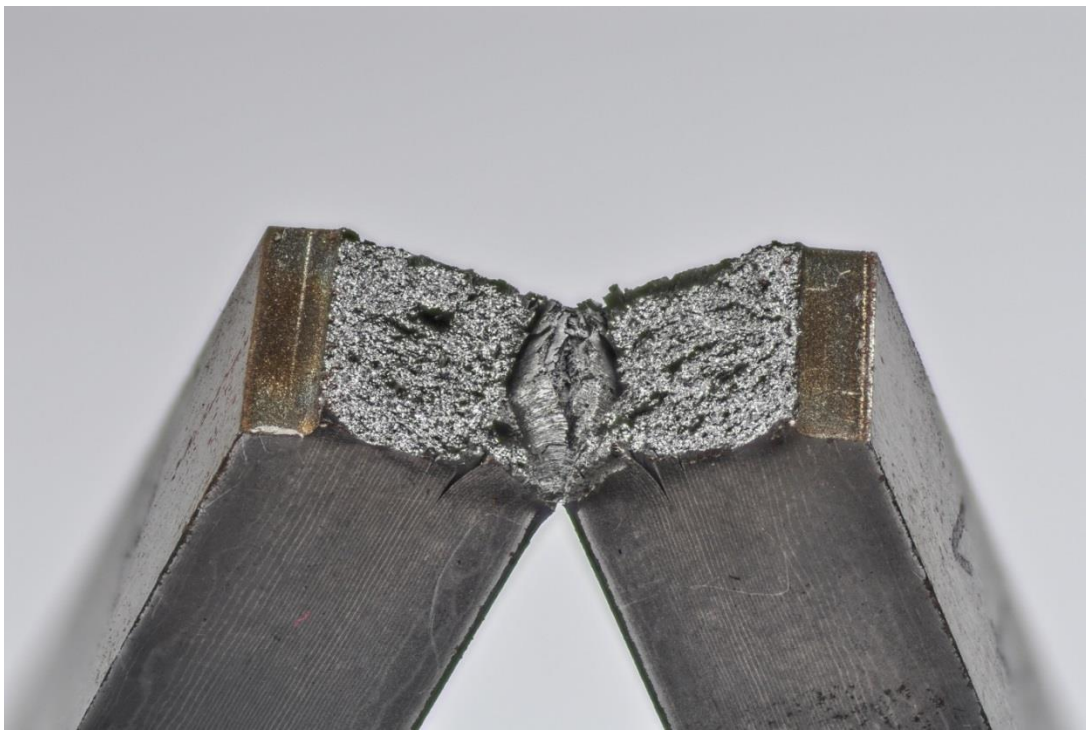


Abbildung 25: Probe A1

Probe C5 in Abbildung 26 ist vergütet und wies trotzdem eine Schlagarbeit von 20J auf. Bei dieser Probe entstanden deutlich aufklaffende Risse.

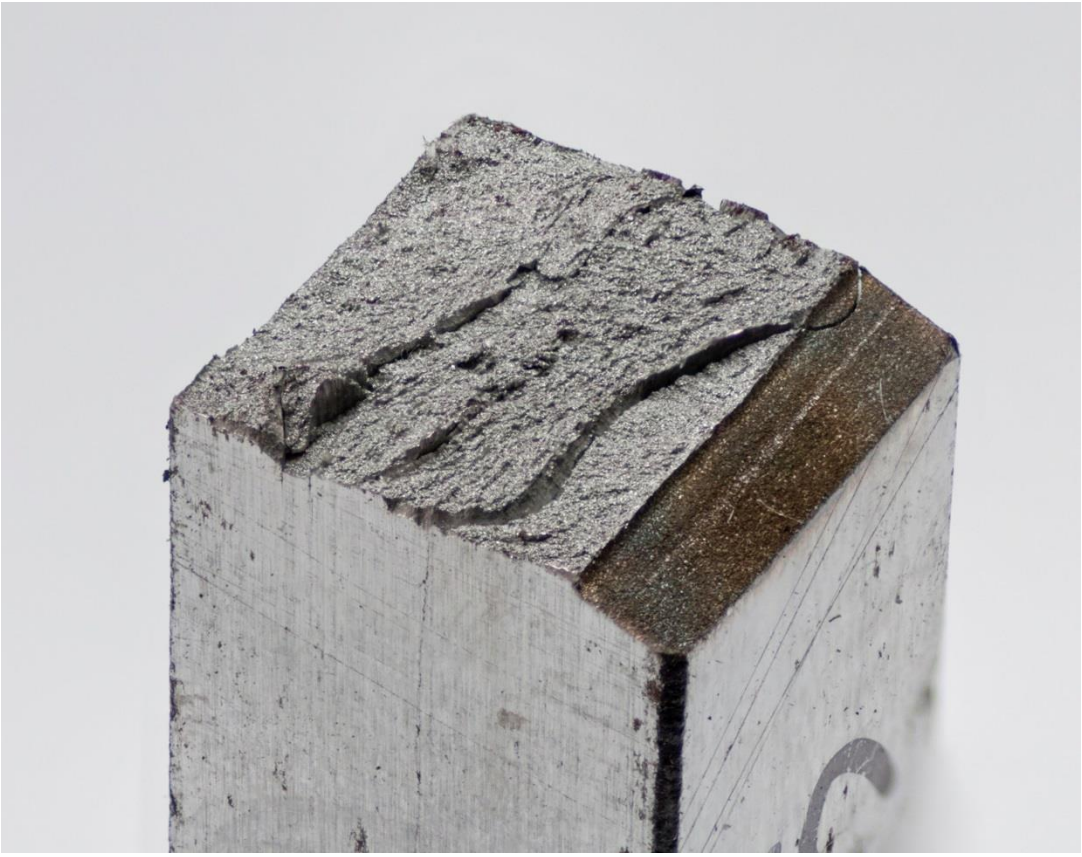


Abbildung 26: Probe C5

Abbildung 27: Proben B3 und D2 (v.l.n.r.)

Abbildung 27 vergleicht Proben B3 und D2. Unter den normalisierten Proben wies B3 eine der höchsten Schlagarbeiten auf und D2 eine der niedrigsten. Von der Kontaktlinie mit dem Schlaghammer ausgehend breiten sich bei Probe B3 Delaminationen aus, mit freiem Auge ist auch ein kompletter Durchriss durch die Probenstärke bis zur Kerbe erkennbar. Abseits dieser Zonen zeigt sich erneut Sprödbruchverhalten. Probe D2 zeigt hingegen über den gesamten Querschnitt reines Sprödbruchverhalten ohne erkennbares Versagen der Schweißverbindungen.

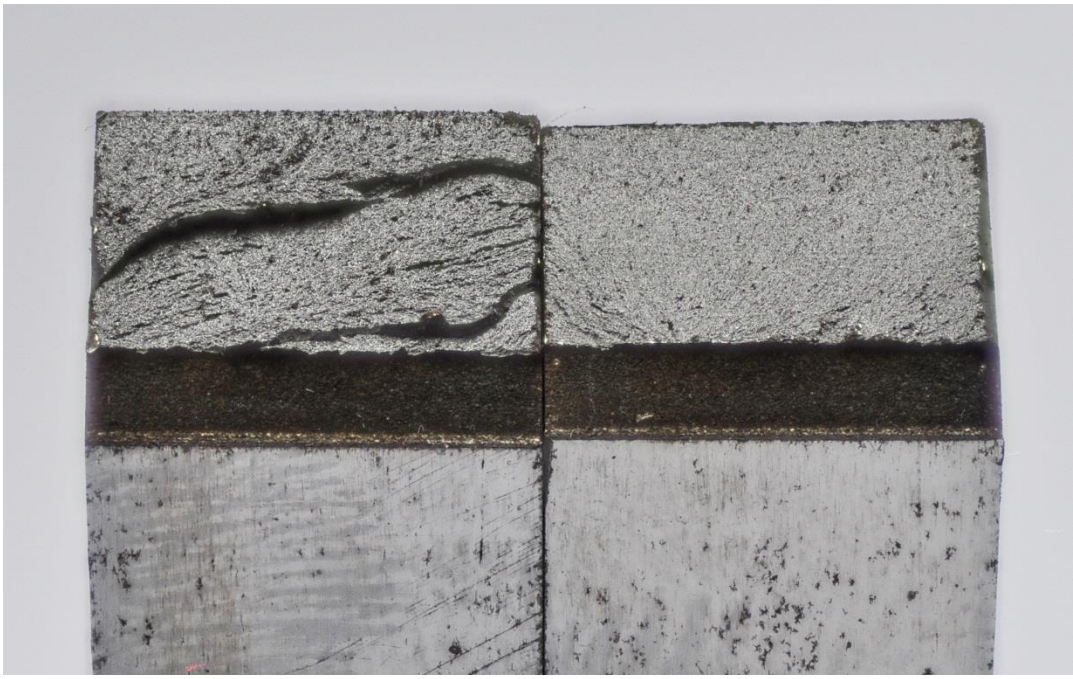


Abbildung 28: Proben C4 und D5 (v.l.n.r.)

Im gehärteten Zustand zeigt sich ein ähnliches Bild: Proben C4 und D5 aus Abbildung 28 markieren obere bzw. untere Grenze der Schlagarbeiten unter den vergüteten Proben (Probe C5 wurde als Ausreißer behandelt und bereits separat diskutiert). Auch hier korreliert die Schlagarbeit mit dem sichtbaren Grad der Delamination.

6.4. Mikroskopaufnahmen

Von den Probenpaaren B3-D2 und C4-D5 wurde je eine Bruchhälfte eingebettet, geschliffen, geätzt und Lichtmikroskopisch untersucht. Die Darstellung der Bilder erfolgte mit 50facher bzw. 1000facher Vergrößerung.

Unter den Proben B3 und D2 (Abbildung 29) ist auffällig, dass die Korngröße von B3 geringer ist, was eine Erklärung für die höhere Schlagarbeit sein kann. Grund hierfür kann eine ungleiche Haltezeit oder Temperaturverteilung bei der Wärmebehandlung sein. In Probe B3 sind an der am Schliff sichtbaren Linie keine Auffälligkeiten zu erkennen. Bei D2 erkennt man ein weißes Band zwischen zwei Lagen, das sich auch weiter in die Probe hineinzieht. Da es sich um eine Borax-geschweißte Probe handelt, kann es sich um Flussmitteleinschlüsse handeln.

Proben C4 und D5 (Abbildung 30) weisen keine nennenswerten Unterschiede untereinander auf. Probe C4 zeigt einige Einrisse, die beim Einbetten von Kunststoff aufgefüllt wurden. Probe D5 lässt wiederum ein helles Band erkennen, das jedoch in der Mitte einer Lage aus 75Cr1 verläuft. In 1000facher Vergrößerung zeigen die Proben Martensit mit ein wenig Restaustenit (Abbildung 31).

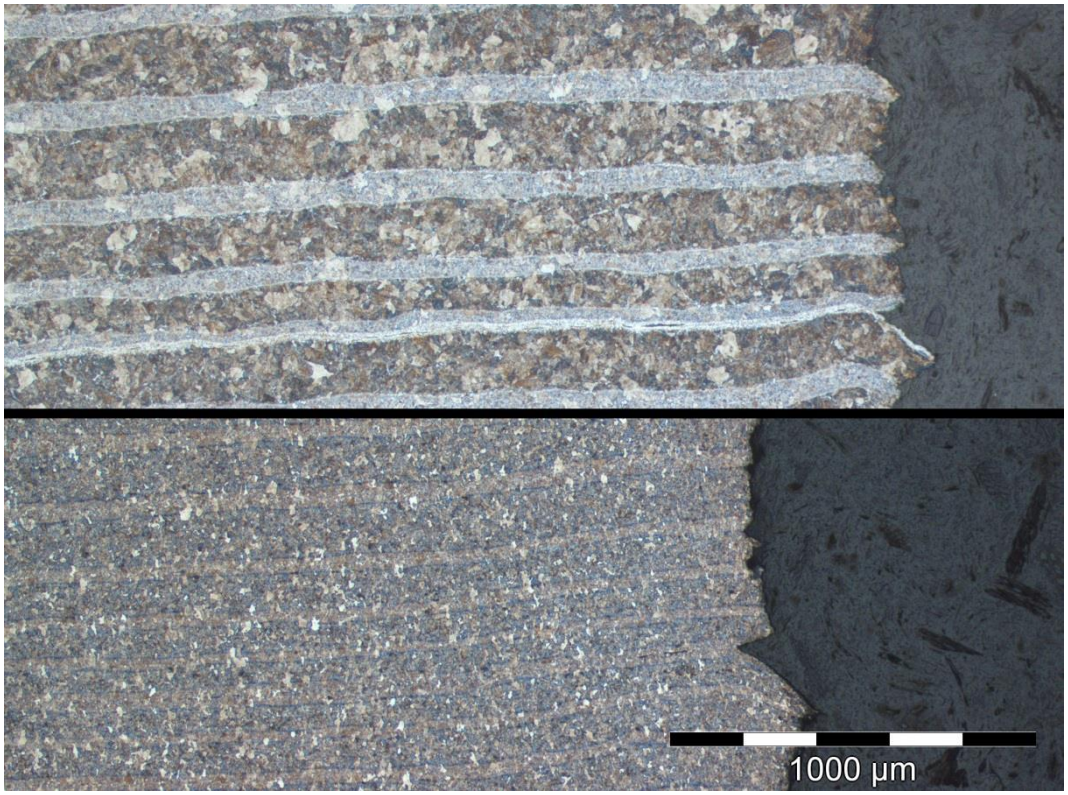


Abbildung 29: Proben D2 und B3 (v.o.n.u.); V=50

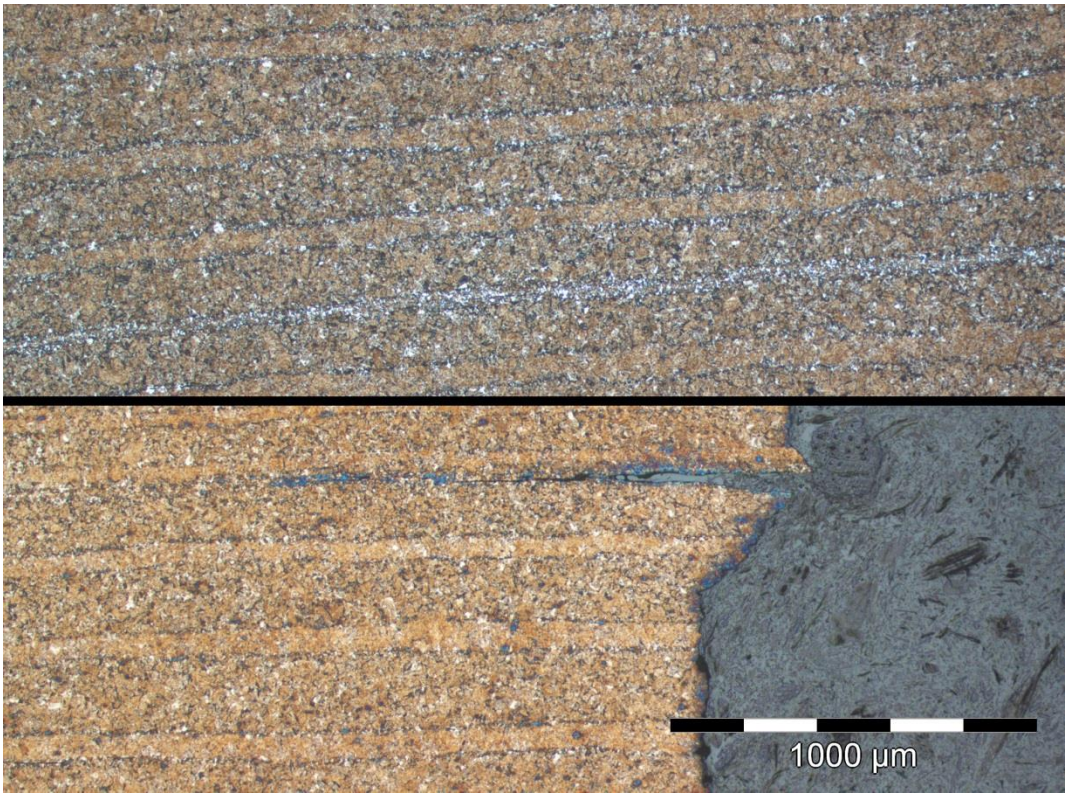


Abbildung 30: Proben D5 und C4 (v.o.n.u.); V=50

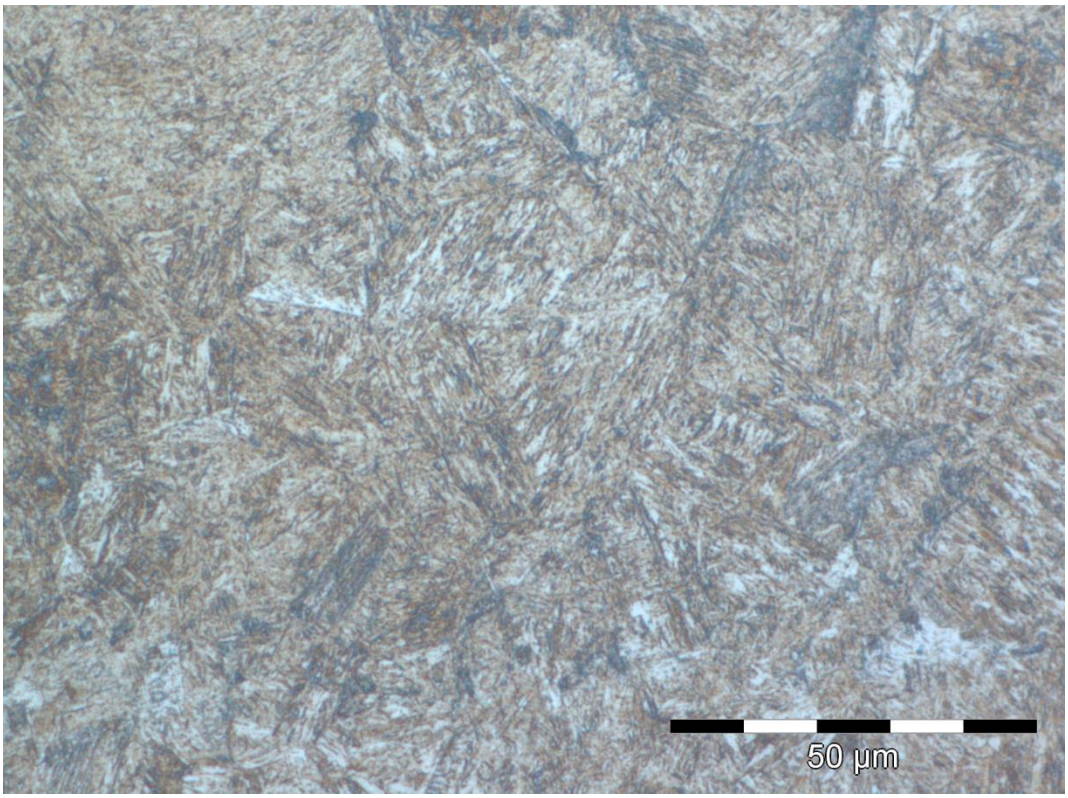


Abbildung 31: Probe D5; V=1000

6.5. Zusammenfassung und Diskussion

Die Herstellung von Kerbschlagproben aus Damaszener Stahl umfasst viele Schritte und birgt Risiken, einzelne Schritte unsauber auszuführen. Besonders bei der Wärmebehandlung können ungewollter Weise Verfälschungen entstehen, die die Vergleichbarkeit der Ergebnisse reduzieren. Im Hinblick auf die große Streuung der Härte und Schlagarbeit der normalisierten Proben scheint dies durch ungleiche Haltezeiten und Abkühlgeschwindigkeiten passiert zu sein. Die relativ grobkörnigen Bruchflächen deuten zudem auf insgesamt zu lange Haltezeit hin. Unter diesem Gesichtspunkt ließen sich nicht alle Fragestellungen mit der erhofften Eindeutigkeit beantworten.

Zu den am Kapitelanfang gestellten vier Fragen erlaubt der Informationsstand folgende Rückschlüsse:

Ad 1) Die Abhängigkeit der Kerbschlagarbeit von der Lagenorientierung kann nicht nachvollzogen werden. Für beide Orientierungen gibt es sowohl sehr zähe, als auch sehr spröde Proben.

Ad 2) Auch bei den vorliegenden zwei martensitischen Komponenten lassen sich – zumindest durch Delamination – gesteigerte Schlagarbeiten feststellen. Ob der Materialinhomogenitätseffekt bei zwei sehr ähnlichen Stählen eine Rolle spielt, lässt sich durch die verwendeten Untersuchungsverfahren nicht abschätzen.

Ad 3) Hinsichtlich des Schweißverfahrens wurden keine Unterschiede in der Schlagarbeit festgestellt.

Ad 4) Das Bruchverhalten der Proben war weitgehend spröd und kristallin glänzend. Im Bereich von Delaminationen sieht die Bruchfläche eher matt aus, was auf eher duktiles Verhalten hindeutet.

Das Resultat 1) steht im Widerspruch zu den Ergebnissen von Zgraggen / Trüllinger. Um den Grund dafür zu finden, könnten ähnliche Versuche, allerdings zunächst ebenfalls mit einer hart-weich-Kombination, wiederholt werden. Zeigt sich hier eine Übereinstimmung, könnten die bei der vorliegenden Arbeit durchgeführten Tests widerholt werden, allerdings unter besserer Überwachung der Wärmebehandlung der Proben. Jedoch kann auch der benannte Inhomogenitätseffekt verantwortlich für die unterschiedlichen Ergebnisse sein. Die gegenwärtigen Untersuchungen können als Beitrag zum Verständnis des Materialverhaltens von hart-hart-Kombinationen verstanden werden.

Durch moderne Stahlherstellungsverfahren und den beobachtbaren Rückgang der Handwerkskunst ist Damaszener Stahl als Konstruktionswerkstoff nicht mehr relevant. Es darf jedoch nicht außer Acht gelassen werden, dass Forschung auf diesem Gebiet Aussagen über Verbundwerkstoffe im Allgemeinen beisteuern kann.

Literatur

Bay, Niels (1986): Cold Welding: Part 1. Characteristics, bonding mechanisms, bond strength. Metal Construction: Vol. 18 (6)

Bergland, Håvard (2013): Die Kunst des Schmiedens: Das große Lehrbuch der Traditionellen Technik, 4. unveränderte Auflage, Wieland

Buchmayr, Kasberger (2014): Fabrikation und Anwendung von metallischen Schichtverbund-werkstoffen, BHM: Vol. 159 (5), pp. 201-207

Dauksch, Pendray, Verhoeven (1998): The Key Role of Impurities in Ancient Damascus Steel Blades, Journal of Metals: Vol. 50 (9), pp. 58-64

Denig, Heinz (1997): Alte Schmiedekunst, Damaszenerstahl Band 1, 3. Auflage, Bezirksverband Pfalz Institut für pfälzische Geschichte

Denig, Heinz (1999): Alte Schmiedekunst, Damaszenerstahl Band 2, 2. Auflage, Arbogast

Feuerbach, Ann (2001): The Glitter of the Sword: The fabrication of the legendary Damascus steel blades, The Minerva Awards Winner, Minerva: Vol. 12 (4), pp. 45-48

Feuerbach, Ann (2002): Damascus Steel and Crucible Steel in Central Asia, American Society of Arms Collectors Bulletin: Vol. 82, pp. 33-42

Feuerbach, Ann (2006): Crucible steel: Production and identification, Make all sure, Basilicoe Press

Friedberg, Torndahl, Hillert (1969): Diffusion in Iron, Jernkontorets Ann. Vol. 153

Hrisoulas, Jim (1994): The Pattern-Welded Blade: Artistry in Iron, Paladin

Landes, Roman (2006): Messerklingen und Stahl: Technologische Betrachtung von Messerschneiden, 2. überarbeitete Auflage, Wieland

Löbach, Gunther (2009): Damaszenerstahl: Theorie und Praxis, 1. Auflage, Wieland

Lehmann, Ulrich (2016): Wumbunte Klingen: Studien zu Konstruktion, Herstellung und Wertigkeit der frühmittelalterliche Spatha in Westfalen, Veröffentlichungen der Altertumskommission für Westfalen, Band 21, Aschendorff

Osann, Bernhard (1971): Rennverfahren und Anfänge der Roheisenerzeugung, zur Metallurgie und Wärmetechnik der alten Eisengewinnung, Verein deutscher Eisenhüttenleute (Fachausschussbericht: 9.001)

Pohl, Lindner (1994): Gefüge und Eigenschaften von Damaszener-Stählen, Praktische Metallographie: Sonderband 25, S. 519-530

Rapatz, Franz (1962): Die Edelstähle, 5. Verbesserte und erweiterte Auflage, Springer

Sachse, Manfred (1989): Damaszenerstahl: Mythos – Geschichte – Technik – Anwendung, 1. Auflage, Stahleisen

Verhoeven, John D. (2013): Stahl-Metallurgie für Einsteiger, 1. Auflage der deutschen Ausgabe, Wieland

Verhoeven, John D. u.a. (1993): Method of making "Damascus" blades, US-Pat. Nr. 5185044

Zgraggen, Trüllinger (2005): Einfluss der Lagenanzahl auf die Kerbschlagarbeit bei Lagen- bzw. Schweißdamast, Practical Metallography: Vol. 42 (5), pp. 219-238

Abbildungen

Abbildung 1: Einordnung der Begriffe rund um das Thema Damaszener Stahl 7
Abbildung 2: Leistungszonen in Katana-Klingen 10
Abbildung 3: Damastmuster auf Klingen. Wilder Damast, "Masame", Torsionsdamast, Federdamast, Explosionsdamast (v.o.n.u.) 12
Abbildung 4: Kontraste beim Ätzen von Damaszener Stahl (schematisch) 16
Abbildung 5: Ausgangsmaterialien für die Pakete; 75Ni8 links, 75Cr1 rechts 19
Abbildung 6: Das Borax-Paket 19
Abbildung 7: Flussmittel auf dem Paket 20
Abbildung 8: Aufbringen des Flussmitttels 20
Abbildung 9: Blick in die Gasesse beim Erwärmen auf Schweißtemperatur 21
Abbildung 10: Feuerschweißen am Lufthammer 21
Abbildung 11: Dritteln des Pakets 22
Abbildung 12: Entzundern der Flächen vorm erneuten Stapeln 22
Abbildung 13: Das Paket für den zweiten Schweißdurchgang 23
Abbildung 14: Stapeln der Stahlbleche in einem Formrohr 24
Abbildung 15: Das Paket fertig zum Feuerschweißen 25
Abbildung 16: Auspacken des Pakets nach dem Schweißen 25
Abbildung 17: Zersägen des Pakets nach dem Ausschmieden 26
Abbildung 18: Planschleifen der Fügeflächen für die zweite Schweißung 26
Abbildung 19: Das Paket für den zweiten Schweißdurchgang 27
Abbildung 20: Die ausgewalzten Quadratstäbe 27
Abbildung 21: Einteilung und Benennung der Proben 29
Abbildung 22: Schlagarbeit über Härte mit Hinweis auf Delaminierung 31
Abbildung 23: Schlagarbeit über Härte mit Hinweis auf die Schweißmethode 32
Abbildung 24: Probe C2 33
Abbildung 25: Probe A1 33
Abbildung 26: Probe C5 34
Abbildung 27: Proben B3 und D2 (v.l.n.r.) 34
Abbildung 28: Proben C4 und D5 (v.l.n.r.) 35
Abbildung 29: Proben D2 und B3 (v.o.n.u.); V=50 36
Abbildung 30: Proben D5 und C4 (v.o.n.u.); V=50 36
Abbildung 31: Probe D5; V=1000 37