

Ausscheidungshärtende Stähle in der Medizintechnik

Einleitung

Stähle in der Medizintechnik

Stähle, die in der Medizintechnik Verwendung finden, müssen eine große Zahl an Anforderungen bezüglich der Herstellung und der Einsatzbedingungen erfüllen. In der Orthopädie, Kardiologie, allgemeinen Chirurgie, oder Zahnmedizin kommen dafür diverse konventionelle Legierungen in Frage, zum Beispiel 1.4021, 1.4057 und 1.4542, doch die steigenden Anforderungen der Industrie haben auch zur Entwicklung spezialisierter Legierungen geführt. Die Wahl der Legierung in der Medizintechnik hängt von den geforderten Eigenschaften der jeweiligen Anwendung ab, u.a. Korrosionswiderstand, Zugfestigkeit, Zähigkeit, Ermüdungsfestigkeit, Härte, oder Verschleißwiderstand, wobei häufig mehrere dieser Eigenschaften relevant sind. [1–2]

Ausscheidungshärtende Stähle in der Medizintechnik

Bei ausscheidungshärtenden Stählen erfolgt das Härten (auch bekannt als Auslagern oder Aushärten) durch die Bildung von submikroskopischen Ausscheidungen, welche das Verformungsvermögen durch das Blockieren von Versetzungen herabsetzen. Damit eine Ausscheidungshärtung möglich ist, muss die Legierung Elemente enthalten, deren Löslichkeit mit sinkender Temperatur abnimmt. Durch ein Lösungsglühen mit anschließendem Abschrecken können diese Elemente in Lösung gebracht und vorläufig im übersättigten Mischkristall „eingefroren“ werden. Durch anschließende Diffusion werden neue Phasen aus dem Mischkristall ausgeschieden, welche eine Härtesteigerung hervorrufen. Je länger das Auslagern dauert, desto größer werden diese Ausscheidungen, was zunächst zu einer Steigerung, und nach dem Überschreiten eines Maximums wieder zur Abnahme der Härte führt („Überalterung“, oder „Überlagern“). Höhere Auslagerungstemperaturen beschleunigen die Bildung und das Wachstum der Ausscheidungen, reduzieren aber auch das mögliche Härtemaximum. Abhängig von der Legierungszusammensetzung spricht man von ferritischen, austenitischen, halb-austenitischen oder martensitischen ausscheidungshärtenden Stählen. [3]

17-4 PH

17-4 PH (1.4542, X5CrNiCuNb16-4, auch bekannt als AISI 630 nach amerikanischer Norm) ist der am weitesten verbreitete rostfreie, martensitisch ausscheidungshärtende Stahl. Er bietet hohe Festigkeit, hohen Korrosionswiderstand, und kann gut verarbeitet werden. Aufgrund der relativ niedrigen Temperaturen beim Ausscheidungshärten gibt es kaum Probleme mit Verzug. 17-4 PH ist in der Regel lösungsgeglüht erhältlich und wird nach der mechanischen Fertigung bei 482–621 °C für ein bis vier Stunden ausgelagert. Die fertigen Produkte erreichen hohe Festigkeit und Härte und haben einen ausgezeichneten Korrosionswiderstand. Damit eignet sich dieser Stahl gut für chirurgische Werkzeuge und andere medizinische Instrumente. [1, 4]

Custom 455

Custom 455® (1.4543, X3CrNiCuTiNb12-9) ist ein rostfreier, martensitisch ausscheidungshärtender Stahl, der speziell für medizinische Anwendungen entwickelt wurde. Dabei wurden vor allem hohe Festigkeit und gute Korrosionsbeständigkeit angestrebt. Dank eines geringen Kaltverfestigungsgrads kann Custom 455 gut kaltverformt werden, während die folgende Wärmebehandlung nur zu wenig Verzug führt. Wie 17-4 PH ist Custom 455 in der Regel lösungsgeglüht erhältlich und wird nach der mechanischen Fertigung bei 482–566 °C für vier Stunden ausgelagert. Dieser Stahl ist gut für die Anwendung in kleinen medizinischen Instrumenten, wie z.B. Teilen von Endoskopen, geeignet. [1, 5]

Custom 465

Custom 465® (1.4614, X2CrNiTi12-11-2) ist ein rostfreier, martensitisch ausscheidungshärtender Stahl, der entwickelt wurde, um neben hoher Zugfestigkeit, Zähigkeit und Korrosionswiderstand auch ausgezeichnete Kerbfestigkeit und Bruchzähigkeit im Zustand H950 (Auslagern bei 510 °C während vier Stunden) zu erreichen. Im Zustand H1000 (Überaltern bei 538 °C für vier Stunden) erreicht er im Vergleich zu anderen hochfesten Ausscheidungshärtern wie Custom 455 eine hervorragende Kombination

aus Festigkeit, Zähigkeit, und Widerstand gegen Spannungsrisskorrosion. In der Medizintechnik wird Custom 465 für Schraubenzieher, Reibahlen, Bohrer, Schaber, Fräser und Nadeln verwendet. [6]

Materialien und Methoden

Materialien

Untersucht wurden die ausscheidungshärtenden Stähle 17-4 PH, Custom 455, und Custom 465. Aus jeweils einer Charge Rohmaterial wurden Zugproben nach Norm DIN 50125:2022-08 (8 mm Durchmesser, 55 mm Länge) und Kerbschlagbiegeproben nach Norm ISO 148 (V-Proben) gefertigt. Die Proben werden entsprechend der Normen ASTM A564/A564M und AMS2759 behandelt und danach durch Härtemessungen, Zugversuche und Kerbschlagbiegeversuche untersucht und verglichen.

Verfahren

17-4 PH

Die Proben aus 17-4 PH wurden zunächst im Vakuumofen bei 1030 °C lösungsgeglüht, abgeschreckt, und danach gemäß AMS-Norm ausgelagert. Die erzielten Zustände werden mit H900, H1025, und H1150 bezeichnet (siehe Übersicht in Tabelle 1). Zusätzlich wurden auch Proben ohne vorheriges Lösungsglühen bei H900 ausgelagert, unter der Annahme, dass der Stahl im Anlieferzustand bereits lösungsgeglüht sein sollte.

Custom 455

Die Proben aus Custom 455 wurden bei 830 °C lösungsgeglüht, in Öl abgeschreckt, und danach gemäß AMS-Norm ausgelagert. Die erzielten Zustände werden mit H900, H950, und H1000 bezeichnet. Wie bei 17-4 PH wurden auch Proben ohne Lösungsglühen im Zustand H900 ausgelagert.

Custom 465

Die Proben aus Custom 465 wurden gemäß AMS-Norm ausgelagert, um die Zustände H950 und H1000 zu erhalten. Für beide Auslagerungen wurden Proben ohne Lösungsglühen und mit Lösungsglühen bei 980 °C, Abschrecken und Tiefkühlen verwendet.

Tabelle 1: Übersicht über die Behandlungszustände der untersuchten Materialien

Material	Zustand	Lösungsglügen (LSG) [°C]/[min]	Auslagern [°C]/[h]	Bemerkungen
17-4 PH / 1.4542	H900 o. LSG	ohne	482 / 1	
	H900 m. LSG	1030 / 45	482 / 1	
	H1025	1030 / 45	552 / 4	
	H1150	1030 / 45	621 / 4	
Custom 455 / 1.4543	H900 o. LSG	ohne	482 / 4	nach LSG: Abschrecken in Öl
	H900 m. LSG	830 / 60	482 / 4	
	H950	830 / 60	510 / 4	
	H1000	830 / 60	538 / 4	
Custom 465 / 1.4614	H950 o. LSG	ohne	510 / 4	
	H950 m. LSG	980 / 45	510 / 4	Tiefkühlen: -70 °C / 8 h
	H1000 o. LSG	ohne	538 / 4	
	H1000 m. LSG	980 / 45	538 / 4	Tiefkühlen: -70 °C / 8 h

Ergebnisse & Diskussion

17-4 PH

Härtemessungen

Die Härte nimmt mit zunehmender Auslagerungstemperatur ab (siehe Abbildung 1), von 43 HRC/448 HV10 bei H900 (mit Lösungsglügen) auf 36 HRC/370 HV10 bei H1025 und 32 HRC/330 HV10 bei H1150. Dabei lässt sich feststellen, dass die mit HV10 gemessenen Werte gemäß Umwertung nach EN ISO 18265:2014 A.1 leicht höher sind als die HRC-Werte (nicht klar ersichtlich in der Abbildung, da die Beziehung zwischen HRC und HV nicht linear ist). Bei H900 lässt sich kaum ein Unterschied zwischen den Varianten mit und ohne Lösungsglügen feststellen, da der Stahl bereits vom Lieferanten lösungsgeglüht wurde. Gemäß AMS-Norm ist für H900 eine Härte von 40–47 HRC zu erwarten, für H1025 34–42 HRC und für H1150 28–37 HRC. Die erreichten Härten sind daher im erwarteten Bereich.

Zugversuch

Der Elastizitätsmodul, die 0.2%-Streckgrenze und die Zugfestigkeit nehmen alle mit zunehmender Auslagerungstemperatur ab, während die Bruchdehnung zunimmt (siehe Abbildung 2). Der Stahl wird damit mit zunehmender Temperatur weniger fest und steif, aber dafür zäher. Bei H900 gibt es leichte Unterschiede zwischen den Varianten mit und ohne Lösungsglügen: Mit Lösungsglügen sind der E-Modul und die Zugfestigkeit unmerklich höher; die Streckgrenze leicht niedriger und dafür die Bruchdehnung etwas größer; womit man dem zusätzlichen Lösungsglügen eine kaum merkliche Steigerung der Festigkeit und eine geringe Steigerung der Zähigkeit zuweisen kann.

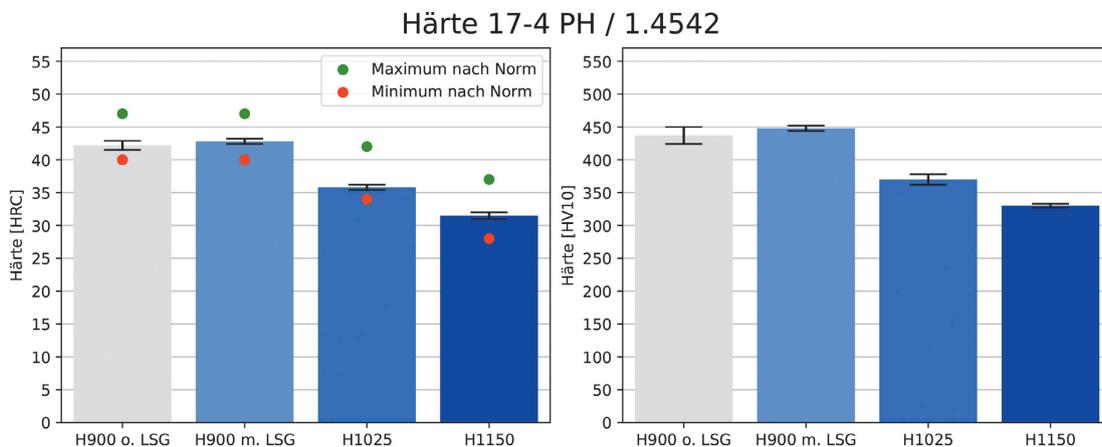
Gemäß AMS-Norm ist für H900 eine Zugfestigkeit von mind. 1310 MPa zu erwarten, für H1025 1069 MPa und für H1150 931 MPa. Die erreichten Zugfestigkeiten sind daher im erwarteten Bereich. H900 für 17-4 PH entspricht dem Zustand P1300 für

1.4542 gemäß der Norm DIN EN 10088-2. Diese fordert eine Streckgrenze von mind. 1150 MPa, Zugfestigkeit von mind. 1300 MPa und eine Bruchdehnung von mind. 3%. H1025 entspricht in etwa dem Zustand P1070 gemäß DIN-Norm. Diese fordert eine Streckgrenze von mind. 1000 MPa, Zugfestigkeit von 1070–1270 MPa und eine Bruchdehnung von mind. 10%. H1150 entspricht in etwa P850 gemäß DIN. Diese fordert eine Streckgrenze von mind. 600 MPa, Zugfestigkeit von 850–1050 MPa und eine Bruchdehnung von mind. 14%. Diese Vorgaben wurden alle erreicht, und im Falle der Bruchdehnung sogar deutlich übertroffen. Durch Umwertung der Härte gemäß DIN EN ISO 18265:2014 A.1 und B.2 lassen sich theoretische Werte für die Zugfestigkeit bestimmen, siehe Tabelle 2. Dabei kann man feststellen, dass die Umrechnung nach A.1 deutlich höhere Werte für die Zugfestigkeit ergibt als die gemessenen Werte (insbesondere mit HV10). Die Umrechnung nach B.2 ergibt niedrigere Werte für HRC und höhere Werte für HV10 als die gemessenen Werte.

Kerbschlagbiegeversuch

Die Kerbschlagarbeit für H900 ist sehr niedrig (10 bzw. 17 J, spröder Bruch), deutlich höher für H1025 (75 J, duktiler Bruch) und abermals höher für H1150 (124 J, duktiler Bruch) (siehe Abbildung 3). Dies deckt sich mit den Erkenntnissen des Zugversuchs, dass höhere Auslagerungstemperaturen zu höherer Zähigkeit führen. Bei H900 scheint es so, als ob die Probe ohne Lösungsglügen eine leicht höhere Zähigkeit hat als jene mit Lösungsglügen, was dem Resultat des Zugversuchs widerspricht. Die Ursache dafür ist unbekannt.

Abbildung 1: Härte in HRC und HV10 der Proben aus 17-4 PH/1.4542



Zugversuch 17-4 PH / 1.4552

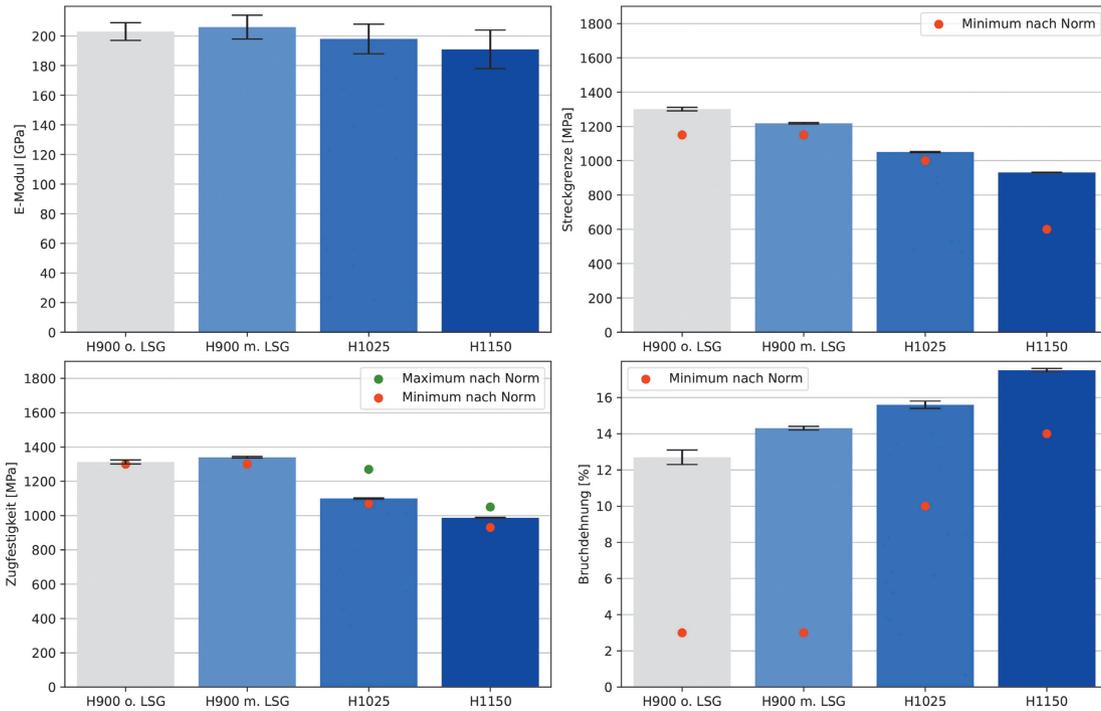


Abbildung 2: Ergebnisse der Zugversuche an den Proben aus 17-4 PH/1.4542

17-4 PH / 1.4542

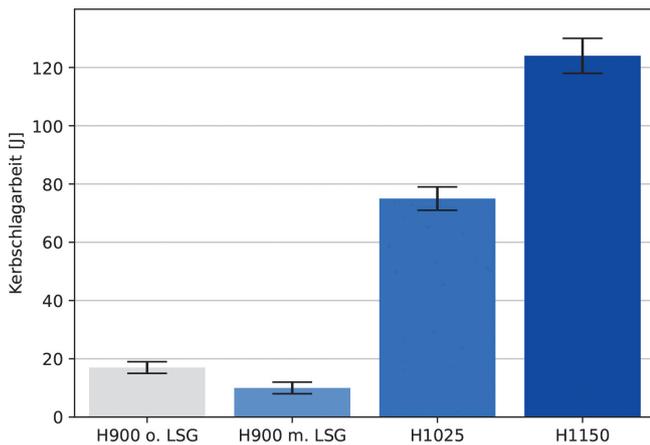


Abbildung 3: Kerbschlagarbeit der Proben aus 17-4 PH/1.4542

Zustand	Rechnung aus HRC nach A.1 [MPa]	Rechnung aus HV10 nach A.1 [MPa]	Rechnung aus HRC nach B.2 [MPa]	Rechnung aus HV10 nach B.2 [MPa]	Messung [MPa]
H900 o. LSG	1333	1410	1274	1362	1313
H900 m. LSG	1362	1448	1296	1395	1340
H1025	1139	1190	1080	1159	1100
H1150	1024	1060	965	1049	988

Tabelle 2: Berechnete und gemessene Zugfestigkeit in MPa der Proben aus 17-4 PH/1.4542; Umwertung nach DIN EN ISO 18265:2014-02, Tabelle A.1 und B.2

und für H1000 ≥ 42 HRC. Die erreichten Härten sind daher im erwarteten Bereich.

Zugversuch

Die Streckgrenze und die Zugfestigkeit nehmen mit zunehmender Auslagerungstemperatur ab, während die Bruchdehnung zunimmt (siehe Abbildung 5). Der Stahl wird damit mit zunehmender Temperatur weniger fest, aber dafür zäher. Beim E-Modul kann kein klarer Trend festgestellt werden. Bei H900 gibt es nur sehr leichte Unterschiede zwischen den Varianten mit und ohne Lösungsglügen, welche als vernachlässigbar angesehen werden können. Gemäß AMS-Norm ist für H900 eine Zugfestigkeit von mind. 1620 MPa zu erwarten, für H950 1551 MPa und für H1000 1379 MPa. Die erreichten Zugfestigkeiten sind daher im erwarteten Bereich.

Durch Umwertung der Härte gemäß DIN EN ISO 18265:2014 A.1 und B.2 lassen sich theoretische Werte für die Zugfestigkeit bestimmen, siehe Tabelle 3. Dabei kann man feststellen, dass die Umrechnung nach A.1 niedrigere Werte für HRC und leicht höhere Werte für HV10 als die gemessenen Werte ergibt. Die Umrechnung nach B.2 ergibt dagegen niedrigere Werte, wobei für H900 und H950 keine oder nur die Umrechnung nach HRC möglich ist.

Custom 455

Härtemessungen

Die Härte nimmt mit zunehmender Auslagerungstemperatur ab (siehe Abbildung 4), von 49 HRC/522 HV10 bei H900 (mit Lösungsglügen) auf 47 HRC/488 HV10 bei H950 und 43 HRC/439 HV10 bei H1000. Wie zu-

vor sind die mit HV10 gemessenen Werte leicht höher als die HRC-Werte, insbesondere für H900. Bei H900 lässt sich kaum ein Unterschied zwischen den Varianten mit und ohne Lösungsglügen feststellen. Gemäß AMS-Norm ist für H900 eine Härte von ≥ 47 HRC zu erwarten, für H950 ≥ 45 HRC

Härte Custom 455 / 1.4543

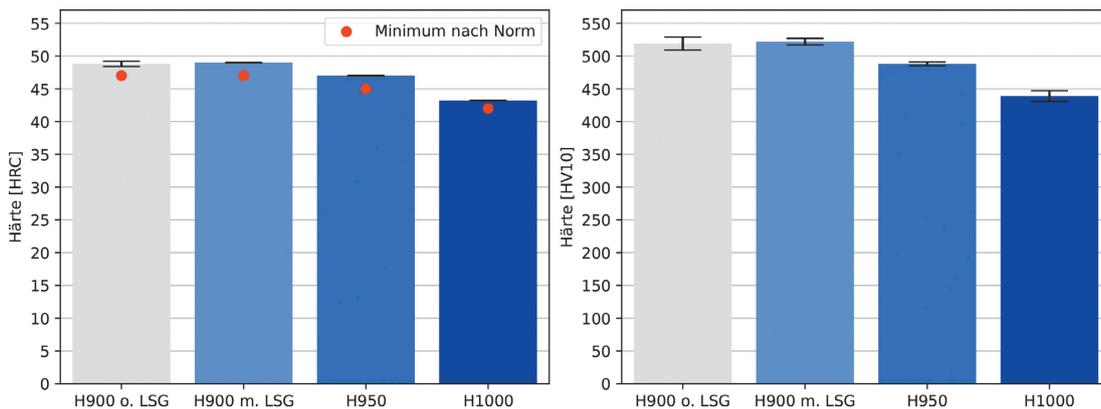


Abbildung 4: Härte in HRC und HV10 der Proben aus Custom 455/1.4543

Zugversuch Custom 455 / 1.4543

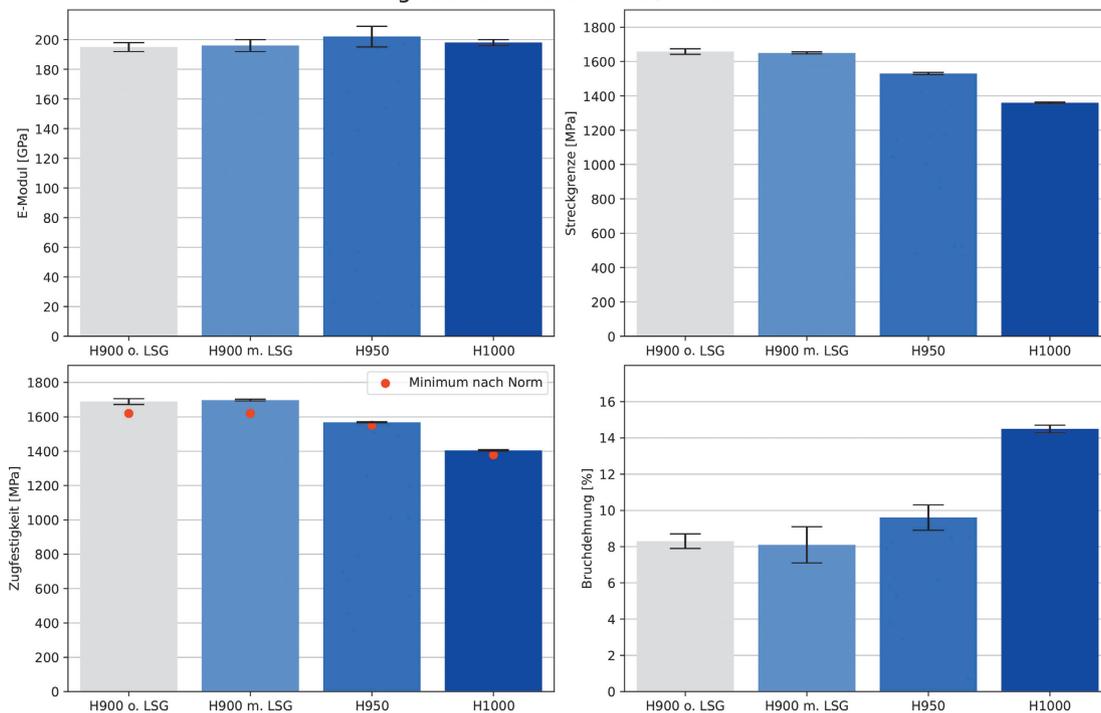


Abbildung 5: Ergebnisse der Zugversuche an den Proben aus Custom 455/1.4543

Kerbschlagbiegeversuch

Die Kerbschlagarbeit für H900 ist sehr niedrig (10 bzw. 12 J, spröder Bruch), geringfügig höher für H950 (25 J, spröder Bruch) und abermals leicht höher für H1000 (42 J, duktiler Bruch) (siehe Abbildung 6). Dies deckt sich mit den Erkenntnissen des Zugversuchs, dass höhere Auslagerungstemperaturen zu höherer Zähigkeit führen. Die Proben sind aber deutlich weniger zäh als die vergleichbaren Proben aus 17-4 PH. Bei H900 scheint es so, als ob die Probe mit Lösungsglügen eine leicht höhere Zähigkeit hat als jene ohne Lösungsglügen, aber der Unterschied ist nur gering.

Tabelle 3: Berechnete und gemessene Zugfestigkeit in MPa der Proben aus Custom 455/1.4543; Umwertung nach DIN EN ISO 18265:2014-02, Tabelle A.1 und B.2

Zustand	Rechnung aus HRC nach A.1 [MPa]	Rechnung aus HV10 nach A.1 [MPa]	Rechnung aus HRC nach B.2 [MPa]	Rechnung aus HV10 nach B.2 [MPa]	Messung [MPa]
H900 o. LSG	1615	1697	k.A.	k.A.	1689
H900 m. LSG	1625	1708	k.A.	k.A.	1698
H950	1524	1587	1453	k.A.	1569
H1000	1369	1416	1311	1368	1405

Custom 465

Härtemessungen

Die Härte nimmt mit zunehmender Auslagerungstemperatur ab (siehe Abbildung 7), von 50 HRC/539 HV10 bei H950 (mit Lösungsglügen) auf 48 HRC/498 HV10 bei H1000.

Die mit HV10 gemessenen Werte sind abermals höher als die HRC-Werte. Bei beiden Zuständen lässt sich eine leichte Abnahme der Härte durch das Lösungsglügen feststellen. Gemäß AMS-Norm ist für H950 eine Härte von ≥ 47 HRC zu erwarten, und für

Custom 455 / 1.4543

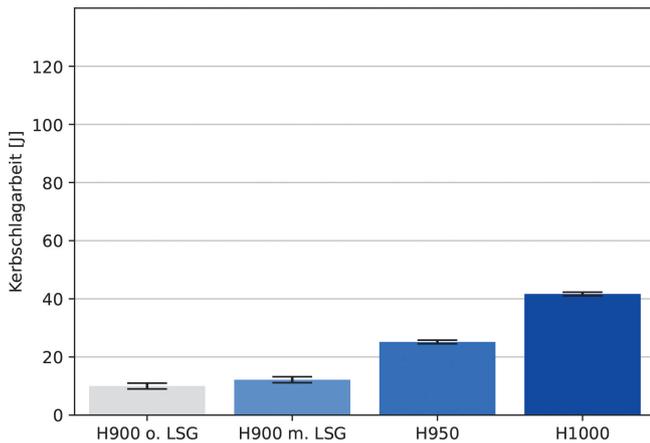


Abbildung 6: Kerbschlagarbeit der Proben aus Custom 455/1.4543

Zustand	Rechnung aus HRC nach A.1 [MPa]	Rechnung aus HV10 nach A.1 [MPa]	Rechnung aus HRC nach B.2 [MPa]	Rechnung aus HV10 nach B.2 [MPa]	Messung [MPa]
H950 o. LSG	1733	1845	k.A.	k.A.	1824
H950 m. LSG	1675	1768	k.A.	k.A.	1756
H1000 o. LSG	1584	1679	k.A.	k.A.	1634
H1000 m. LSG	1546	1623	k.A.	k.A.	1582

Tabelle 4: Berechnete und gemessene Zugfestigkeit in MPa der Proben aus Custom 465/1.4614; Umwertung nach DIN EN ISO 18265:2014-02, Tabelle A.1 und B.2

niedrigere Werte für HRC und höhere Werte für HV10 als die gemessenen Werte ergibt. Die Umrechnung nach B.2 ist dagegen nicht möglich.

Kerbschlagbiegeversuch

Die Kerbschlagarbeit für H950 ist niedrig (25 J, mehrheitlich spröder Bruch), und etwas höher für H1000 (46/48 J, duktiler Bruch) (siehe Abbildung 9). Dies deckt sich mit den Erkenntnissen des Zugversuchs, dass höhere Auslagerungstemperaturen zu höherer Zähigkeit führen. Die Proben mit und ohne Lösungsglügen zeigen fast keine Unterschiede, mit einer fast unmerklichen Steigerung der Kerbschlagarbeit von H1000 für die lösungsgeglühte Probe. Dies entspricht der geringen Steigerung der Bruchdehnung aus dem Zugversuch, ist aber deutlich weniger stark ausgeprägt.

Bewertung & Schlussfolgerungen

Bewertung

Für alle drei Legierungen nehmen die Härte, Streckgrenze, und Zugfestigkeit mit zunehmender Auslagerungstemperatur ab, während die Bruchdehnung und Kerbschlagarbeit zunehmen. Der E-Modul ändert sich je nach Werkstoff unterschiedlich, aber nicht allzu deutlich. Alle gemessenen Werte waren innerhalb der Vorgaben der AMS- und DIN-Normen. Im Vergleich der Legierungen lässt sich eine deutliche Steigerung von 17-4 PH zu Custom 455 und noch einmal eine leichte Steigerung zu Custom 465 bezüglich Härte, Streckgrenze und Zugfestigkeit für vergleichbare Auslagerungstemperaturen beobachten. Bezüglich Bruchdehnung und Kerbschlagarbeit zeichnet sich vor allem 17-4 PH

H1000 \geq 45 HRC. Die erreichten Härten sind daher im erwarteten Bereich.

Zugversuch

Die Streckgrenze und die Zugfestigkeit nehmen mit zunehmender Auslagerungstemperatur ab, während der E-Modul und die Bruchdehnung leicht zunehmen (siehe Abbildung 8). Der Stahl wird damit mit zunehmender Temperatur weniger fest, aber dafür steifer und zäher. Es gibt leichte Unterschiede zwischen den Varianten mit und ohne Lösungsglügen: Mit Lösungsglügen sind der E-Modul, die Zugfestigkeit und die Streck-

grenze leicht niedriger, und dafür die Bruchdehnung etwas grösser, womit man dem Lösungsglügen eine geringe Reduktion der Festigkeit und eine geringe Steigerung der Zähigkeit zuweisen könnte. Gemäß AMS-Norm ist für H950 eine Zugfestigkeit von mind. 1655 MPa zu erwarten, und für H1000 1515 MPa. Die erreichten Zugfestigkeiten sind daher im erwarteten Bereich. Durch Umwertung der Härte gemäß DIN EN ISO 18265:2014 A.1 und B.2 lassen sich theoretische Werte für die Zugfestigkeit bestimmen, siehe Tabelle 4. Dabei kann man feststellen, dass die Umrechnung nach A.1

Härte Custom 465 / 1.4614

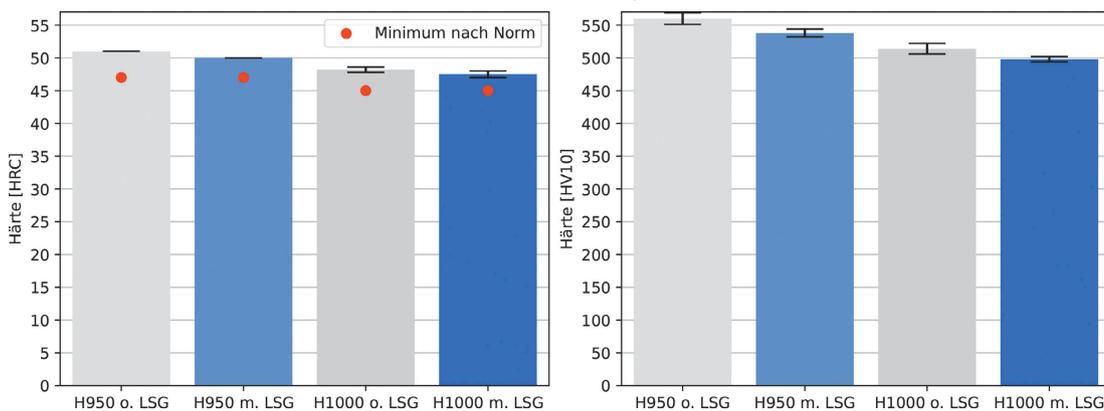


Abbildung 7: Härte in HRC und HV10 der Proben aus Custom 465/1.4614

Abbildung 8: Ergebnisse der Zugversuche an den Proben aus Custom 465/1.4614

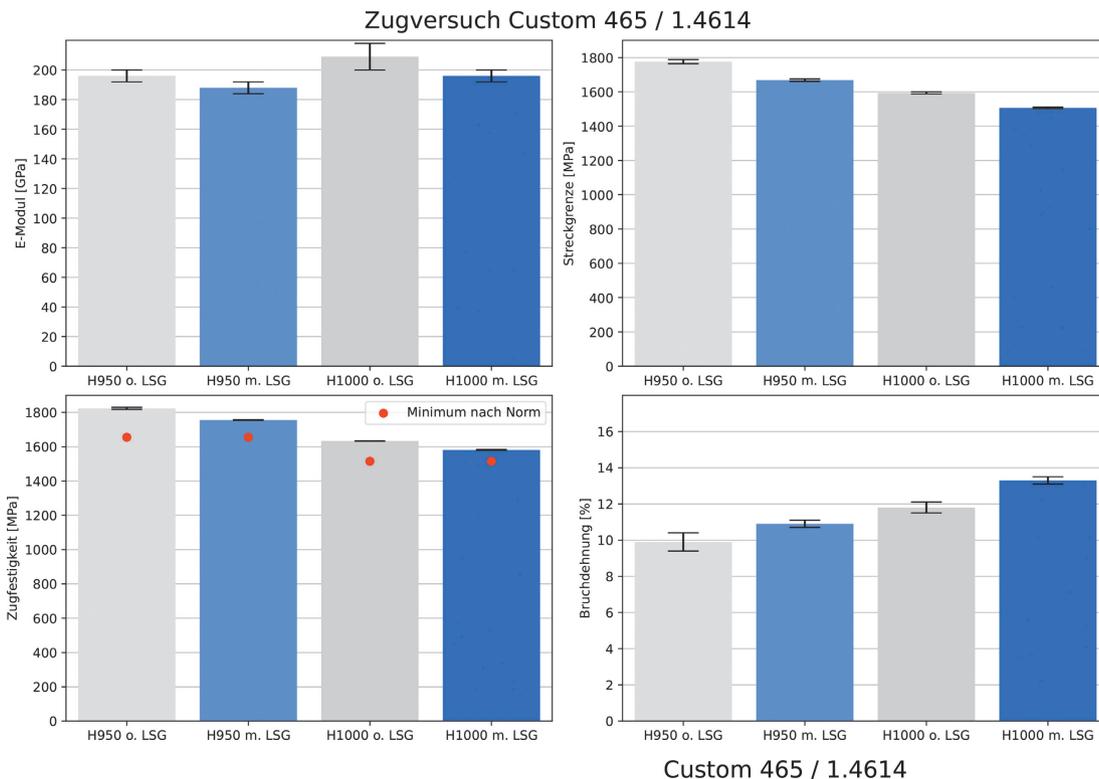
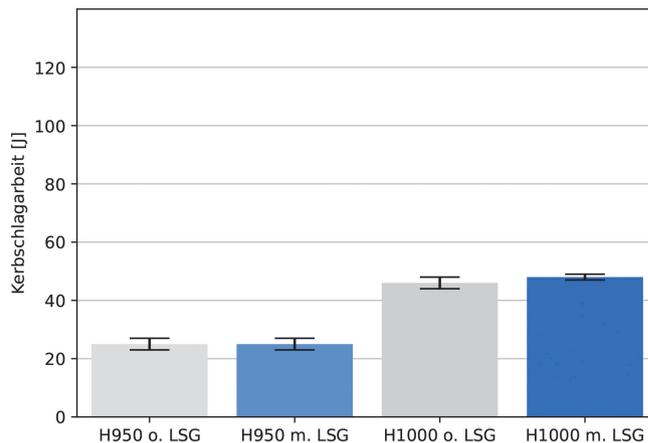


Abbildung 9: Kerbschlagarbeit der Proben aus Custom 465/1.4614



aus, der deutlich über den beiden anderen Stahltypen liegt.

Das Auslagern mit oder ohne Lösungsglühen zeigte je nach Probe leichte Unterschiede, aber keine klaren Trends. Dies lag daran, dass das Rohmaterial bereits im Lieferzustand lösungsgelüht war.

Bei der Umrechnung der Härtewerte auf theoretische Zugfestigkeiten entsprachen für 17-4 PH die mit Tabelle B.2 umgerechneten Werte in etwa den gemessenen Werten (± 60 MPa), für Custom 455 und Custom 465 hingegen die Werte nach Tabelle A.1 (± 75 MPa, bzw. ± 90 MPa). Solche Umwertungen sind jedoch immer mit Vorsicht zu genießen.

Schlussfolgerungen

Höhere Auslagerungstemperaturen führen zu weicheren, weniger festen, aber zäheren Werkstoffen, so dass die Wärmebehandlung den geforderten Eigenschaften angepasst werden kann. Im Vergleich der Legierungen sind Custom 455 und Custom 465 für vergleichbare Behandlungen deutlich härter und fester als 17-4 PH, dafür aber weniger zäh. Damit ist 17-4 PH eher für Produkte, welche hohe Zähigkeit erfordern, zu empfehlen. Custom 455 und Custom 465 eignen sich dagegen für Anwendungen, welche hohe Festigkeit erfordern (zusätzlich zu anderen

Spezifikationen, wie der Korrosionsbeständigkeit).

Da die Proben bereits im lösungsgelühten Zustand eingekauft wurden, war zu erwarten, dass das zusätzliche Lösungsglühen keinen großen Effekt zeigt. Für bereits lösungsgelühte Werkstücke ist ein erneutes Lösungsglühen vor dem Auslagern daher nicht nötig, schadet aber auch nicht (ausgenommen Verzug). Falls Zweifel am Ausgangszustand des Materials bestehen, sollte dieses auf jeden Fall lösungsgelüht werden, da das Ausscheidungshärten nicht lösungsgelühten Materials nicht funktioniert.

Die Umrechnung nach DIN EN ISO 18265:

2014, um von Härtemessungen auf die Zugfestigkeit zu schließen, kann Resultate im ungefähr richtigen Bereich liefern (mit B.2 für 17-4 PH und A.1 für Custom 455 und Custom 465). Sie sollte aber nicht ohne weiteres als Methode zur Bestimmung der Zugfestigkeit verwendet werden, da die Umrechnungstabellen nicht für ausscheidungshärtende Stähle ausgerichtet und dementsprechend ungenau sind.

Literaturverzeichnis

[1] Brown, R.S., Carpenter Technology Corporation White Paper: Unique Properties Required of Alloys for the Medical

and Dental Products Industry, Reading, USA, <https://www.carpentertechnology.com/blog/unique-properties-required-of-alloys>

- [2] Carpenter Technology Corporation White Paper: Specialty Alloys and Titanium Shapes to Consider for Latest Medical Materials Requirements, Reading, USA, <https://www.carpentertechnology.com/blog/specialty-alloys-and-titanium-shapes-to-consider>
- [3] Benninghoff, H. (Ed.): Wärmebehandlung der Bau- und Werkzeugstähle, 3. Auflage,

Sigma Fachbuchreihe zur Fertigungstechnik, BAZ Buchverlag Basel, 1978, ISBN 3858150401

- [4] Carpenter Technology Datasheet: Custom 630 (17-4), CRS Holdings LLC, 2024, <https://www.carpentertechnology.com/alloy-finder/custom-630-17-4>
- [5] Carpenter Technology Technical Datasheet: CarTech® Custom 455® Stainless, CRS Holdings LLC, 2020, <https://www.carpentertechnology.com/alloy-finder/custom-455>

- [6] Carpenter Technology Datasheet: Custom 465®, CRS Holdings LLC, 2025, <https://www.carpentertechnology.com/alloy-finder/custom-465>

Härtere Gerster AG

Michael Imhof

Güterstr. 3

CH-4622 Egerkingen

Tel.: +41 62 388 7082

michael.imhof@gerster.ch

www.gerster.ch