

Warmzugversuche an Werkstoffen für Druckgeräte

- Ein Mythos wird entzaubert -

Dr. Daniel Hüggenberg und Dr. Dirk Kölbl

Zusammenfassung

Die Verfasser geben einen Überblick über die Normen und Vorschriften für Warmzugversuche an Werkstoffen für Druckgeräte. Anhand von zwei Beispielen werden die Ergebnisse von Warmzugversuchen dargestellt. Die Anforderungen der Europäischen Druckgeräterichtlinie, der harmonisierten Produktnorm EN 13445 und der ASME Code Section VIII Division 1 werden im Hinblick auf geforderte Erprobung und garantierte Werte betrachtet. Die Bedeutung von Warmzugeigenschaften in der Auslegung und die zulässigen Spannungen werden abschließend für einen Werkstoff dargestellt. Die Verfasser zeigen, daß Warmzugversuchen weder in der EN- noch der ASME Normenwelt immer durchgeführt werden und daß bei der Auslegung eines Druckgerätes in beiden Welten die Eigenschaften der Werkstoffe bei Auslegungstemperatur berücksichtigt werden.

Einleitung

Seit der Erfindung von technischen Regelwerken sind die Anwender derselben bemüht, ihre Sichtweise in die jeweiligen Regelwerke hineinzuprojizieren. Das soll die Anwender überhaupt nicht abwerten, denn jeder Ingenieur, der ein Druckgerät bestellt, entwirft oder herstellt, den Entwurf prüft, die Restlebensdauer eines Druckgerätes bewerten oder eine Schadensanalyse anfertigt, macht dies auf der Grundlage seiner eigenen Kenntnisse und Erfahrungen. Als die Europäische Druckgeräterichtlinie in Kraft trat, waren alle Marktteilnehmer damit konfrontiert, die Richtlinie mit ihrem Weltbild in Einklang zu bringen. Dieser Einklang war dann in Deutschland vom Hintergrund AD Merkblätter und TRD, in Frankreich von CODAP, und im Vereinigten Königreich von BS 5500 geprägt. Auch der ASME Code kam häufig zur Anwendung. Das hatte zur Folge, dass in der Bewertung der Konformität von Druckgeräten unterschiedliche Sichtweisen auftraten. Ergebnisse von Zugversuchen bei Temperaturen über der Raumtemperatur, die Warmstreckgrenzen, sind ein Thema, bei dem unterschiedliche Sichtweisen gepflegt werden. Das schauen wir uns einmal genauer an.



Abbildung 1: Zugmaschine für Warmzugversuche, Quelle: BGH Edelstahl Siegen GmbH. Die Probenaufnahme ist von einer Heizkammer umgeben, links ist die Energieversorgung und Steuerung der Heizung angeordnet.

In diesem Artikel wollen die Verfasser den Mythos der Warmzugversuche entzaubern. Woher kommt die Forderung, wie wird in harmonisierten Normen und in international beliebten ASME Codes damit umgegangen und welche Empfehlung kann Herstellern und Prüfern für diese Thematik gegeben werden?

Grundlagen zum Zugversuch

Der Zugversuch zählt zu den quasistatischen zerstörenden Prüfverfahren und dient zur experimentellen Untersuchung des elastisch-plastischen Materialverhaltens (Roos, Maile, & K., 2005) (Czichos & Hennecke, 2008). Im Zugversuch werden genormte Proben mit einem runden (Rundproben) oder rechteckigen (Streifenproben) Querschnitt (A_0) sowie einer definierten Ausgangsmesslänge (L_0) an beiden Enden in eine Prüfmaschine eingespannt und unter ansteigender einachsig wirkender Kraft sowie einer definierten Dehnrates ($\dot{\epsilon} = d\epsilon/dt$) bis zum Bruch beansprucht. Bei Bruch der Probe resultiert ein Kraft-Wegverlauf, welcher sich auf der Basis der vorliegenden Probengeometrie in die typische Spannung-Dehnungskurve überführen lässt. In Abbildung 2 sind die zwei für duktile metallische Materialien typischen Spannung-Dehnungsverläufe schematisch dargestellt.

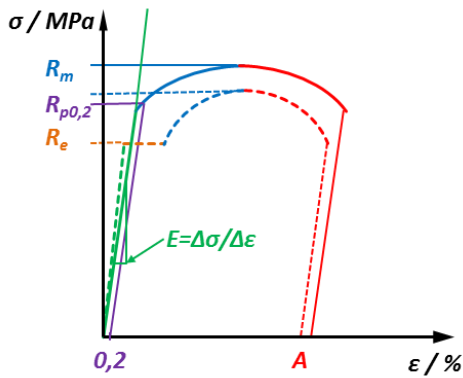


Abbildung 2: Schematische Spannung-Dehnungsverläufe eines Werkstoffs mit (gestrichelt) und eines ohne ausgeprägter Streckgrenze (Roos, Maile, & K., 2005)

Beide Verläufe starten mit einem linearen elastischen Bereich (grün dargestellt), welcher durch den Elastizitätsmodul (E) definiert ist. Der Übergang vom elastischen in den plastischen Bereich kann unterschiedlich verlaufen. Im gestrichelten Verlauf für einen Werkstoff mit ausgeprägter Streckgrenze erfolgt der Übergang vom elastischen in den plastischen Bereich über einen Bereich nahezu gleichbleibender Spannung (orange dargestellt). Diese gleichbleibende Spannung wird als Streckgrenze (R_e) bezeichnet. Anschließend beginnt die Verfestigung des Materials bis zum Höchstlastpunkt (blau dargestellt). Am Höchstlastpunkt kann die Zugfestigkeit (R_m) des Materials ermittelt werden, diese ist der Quotient aus Maximalkraft und Ausgangsquerschnitt der Probe. Vom Punkt der maximalen Kraft beginnt aufgrund von fortschreitender Einschnürung der Probe der Bereich des Lastabfalls (rot dargestellt). Mit dem Bruch der Probe ist der Versuch beendet. An der gebrochenen Probe können die Bruchdehnung (A) definiert als das Verhältnis Längenänderung zu Ausgangsmesslänge sowie die Einschnürung (Z) definiert als das Verhältnis der eingeschnürten Querschnittsfläche zur Ausgangsquerschnittsfläche bestimmt werden.

Der in Abbildung 2 als volle Linie dargestellte Verlauf repräsentiert die Spannung-Dehnungskurve eines Werkstoffes ohne eindeutige Streckgrenze bei welchem ein kontinuierlicher Übergang vom elastischen in den plastischen Bereich zu erkennen ist. Da in diesem Fall keine eindeutige Streckgrenze zu bestimmen ist, wird hierbei oft die Spannung bei 0,2% Dehnung – die 0,2%-Dehngrenze ($R_{p0,2}$)- anstelle der Streckgrenze ermittelt.

In der folgenden Abbildung 3 ist exemplarisch eine Rundprobe aus dem Material 1.0571 vor und nach der Erprobung bei einer Prüftemperatur von 400°C dargestellt. Aus der Gegenüberstellung ist eindeutig die Längenänderung vom Zustand vor der Erprobung zum Bruchzustand zu erkennen. Weiterhin zeigt die Erscheinung des Bruchbereiches, dass es sich um einen Verformungsbruch und keinen Spröbruch handelt, da eine deutliche Einschnürung ersichtlich ist.



Abbildung 3: Rundzugprobe aus dem Material 1.0571 vor und nach der Erprobung bei 400°C, es wurden $R_{p0,2}$ 292 MPa und R_m 474 MPa ermittelt. Die markierten Messpunkte um die Mitte der Probe dienen zur Ermittlung der Bruchdehnung. Quelle: BGH Edelstahl Siegen GmbH.

Die Spannung-Dehnungskurve dieses Zugversuchs am Material 1.0571 bei 400°C ist in

Abbildung 4 der Kurve eines Zugversuchs bei Raumtemperatur gegenübergestellt.

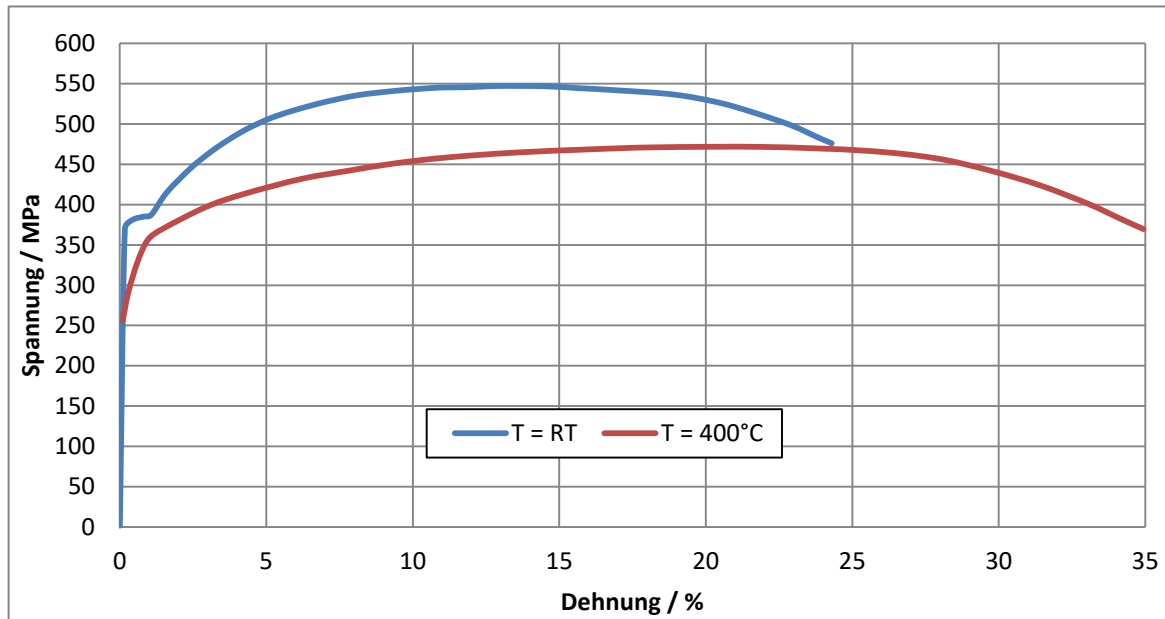


Abbildung 4: Spannung-Dehnungsverläufe von Zugversuchen am geschmiedeten Material 1.0571 bei Raumtemperatur (blau) und bei 400°C (rot). Diese Versuchsergebnisse wurden von der BGH Edelstahl Siegen GmbH zur Verfügung gestellt.

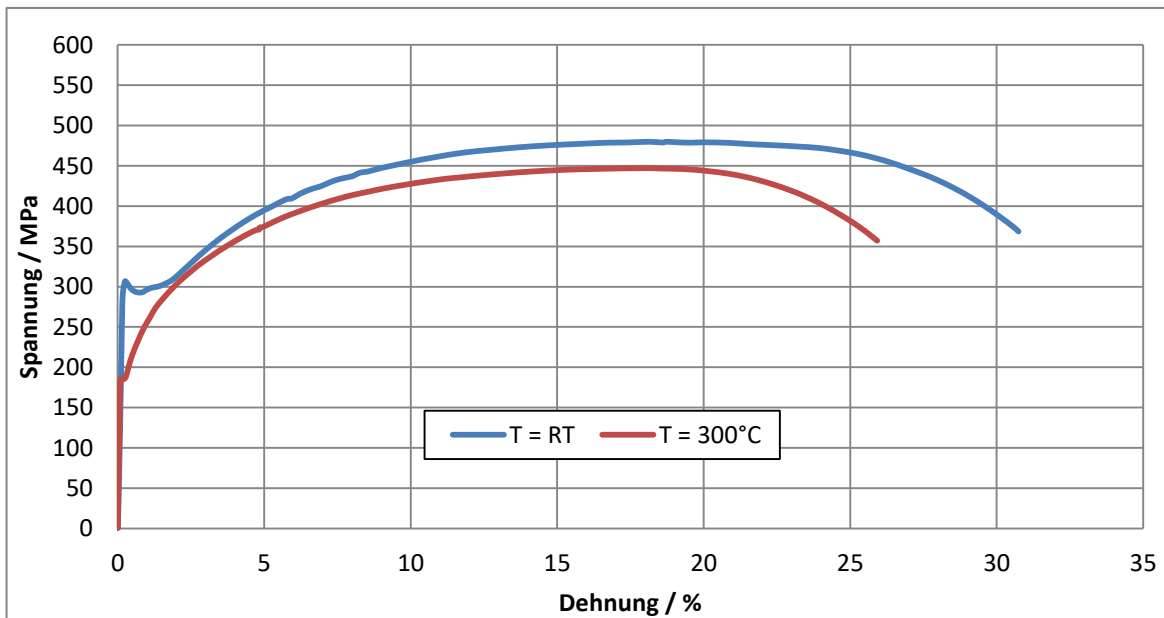


Abbildung 5: Spannung-Dehnungsverläufe von Zugversuchen am Blech aus dem Material EN 10028.2 P265GH bei Raumtemperatur (blau) und bei 300°C (rot). Diese Versuchsergebnisse wurden von der Aktien-Gesellschaft der Dillinger Hüttenwerke zur Verfügung gestellt.

Wie bei vielen Werkstoffen nehmen bei ansteigenden Temperaturen die Festigkeitskennwerte Streck- bzw. Dehngrenze und Zugfestigkeit ab, vgl. Abbildung 5. Abbildung 6 zeigt die Probe nach dem Zugversuch in der Heizkammer der Prüfmaschine. In Abbildung 5 ist das Ergebnis entsprechender Versuche an Blechmaterial dargestellt.



Abbildung 6: Zugprobe aus 1.0571 in der Heizkammer der Zugmaschine nach dem Versuch. Quelle: BGH Edelstahl Siegen GmbH.

Normen zur Durchführung von Zug- und Warmzugversuchen

Ab welcher Temperatur wird eigentlich ein Zugversuch als Warmzugversuch bezeichnet? Die Antwort auf diese Frage geben die Prüfnormen. Sowohl in den DIN EN ISO Normen als auch in den ASTM Normen wird zwischen Zugversuchen bei Raumtemperatur und Zugversuchen bei erhöhter Temperatur unterschieden. In der folgenden Tabelle 1 sind die aktuell gültigen Zugversuchsprüfnormen nach DIN ISO und ASTM aufgeführt.

Tabelle 1: Gültige DIN EN ISO bzw. ASTM Normen für die Durchführung von Zugversuchen bei Raumtemperatur und erhöhter Temperatur

	Raumtemperatur	erhöhten Temperaturen
Europa	DIN EN ISO 6892-1:2017-02	DIN EN ISO 6892-2:2011-05
USA	ASTM E8/E8M - 16a	ASTM E21 - 09

Die DIN EN ISO 6892 (Deutsche Norm, 2011) ist die europäische Norm, welche für die Durchführung von Zugversuchen heranzuziehen ist. Im ersten Teil dieser Norm sind die Anforderungen für die Zugversuche bei Raumtemperatur und im zweiten Teil diejenigen für die Warmzugprüfung definiert. Bei den ASTM Normen sind die Anforderungen ebenfalls in zwei unterschiedlichen Normen festgelegt. Die ASTM E8/E8M (ASTM International, 2016) ist anzuwenden für Zugversuche bei Raumtemperatur und die ASTM E21 (ASTM International, 2009) für Zugversuche bei erhöhten Temperaturen.

Gemäß DIN EN ISO 6892-1 wird Raumtemperatur als Prüftemperatur zwischen 10 und 35°C definiert. Der Raumtemperaturbereich nach ASTM E8/E8M liegt bei Temperaturen von 10 bis 38°C vor, ein kleiner Unterschied. Für die Zugprüfung bei Temperaturen oberhalb von 35°C (DIN EN ISO 6892-1) bzw. 38°C (ASTM E8/E8M) sind die DIN EN ISO 6892-2 bzw. ASTM E21 für die Prüfung bei erhöhten Temperaturen zu verwenden.

Hinsichtlich der Probenformen wird sowohl in der DIN EN ISO 6892-1/2 als auch in der ASTM E8/E8M und E21 in Abhängigkeit von der Geometrie des Erzeugnisses die Verwendung von Flachzugproben oder Rundzugproben nahegelegt. In der DIN EN ISO 6892-1 sind die möglichen Probengeometrien für Flacherzeugnisse in Anhang B und D enthalten. Einige Ergänzungen sind weiterhin in der DIN EN ISO 6892-2 in Anhang A gegeben. In den ASTM Normen enthält der Paragraph 6 der E8/E8M die Informationen über die möglichen Probengeometrien.

In der folgenden Tabelle 2 sind mögliche Probenabmessungen für Flachzugproben der unterschiedlichen Normen gegenübergestellt. Angegeben sind die Dicke des Flacherzeugnisses (T), die Breite der Probe (W) und die Anfangsmesslänge (L_0) für die Dehnungsmessung. Aus der Gegenüberstellung geht hervor, dass in der DIN EN ISO 6892-1/2 die notwendige Anfangsmesslänge von der jeweiligen Dicke des Flacherzeugnisses abhängt. In der ASTM E8/E8M ist hingegen für eine große Bandbreite an Erzeugnisd-

cken die gleiche Anfangsmesslänge zu verwenden. Diese Erkenntnis kann in der Praxis dazu führen, dass ein zusätzlicher Zugversuch notwendig werden könnte, um sowohl die DIN EN ISO 6892-1/2 und die ASTM E8/E8M zu erfüllen.

DIN EN ISO 6892-1/2			ASTM E8/E8M	
W / mm	T / mm	L ₀ / mm	T / mm	L ₀ / mm
12,5	0,1 – 3,0	50,0	0,13 – 19,0	50,0
12,5	3,0 - 3,5	35,0		
12,5	3,5 - 4,5	40,0		
12,5	4,5 - 5,7	45,0		
12,5	5,7 – 6,9	50,0		
12,5	6,9 – 8,3	55,0		
20,0	0,1 – 3,0	80,0		
25,0	0,1 – 3,0	50,0		
20,0	≥ 3,0	80,0		
25,0	≥ 3,0	200,0		
40,0	≥ 3,0	200,0		

W = Breite der Probe; T = Erzeugnisdicke; L₀ = Anfangsmesslänge

Tabelle 2: Gegenüberstellung der möglichen Probenmaße von Flachzugproben

Die nach den unterschiedlichen Normen möglichen Probenformen der Rundzugproben sind in der folgenden Tabelle 3 enthalten. Angegeben sind der Probendurchmesser (D), die Dicke des Flacherzeugnisses (T) und die Anfangsmesslänge (L₀).

DIN EN ISO 6892-1/2			ASTM E8/E8M	
D / mm	T / mm	L ₀ / mm	T / mm	L ₀ / mm
5,0	≥ 3,0	25,0		
10,0	≥ 3,0	50,0		
14,0	≥ 3,0	70,0		
20,0	≥ 3,0	100,0		
2,5			nicht definiert	10,0 / 12,5
4,0			nicht definiert	16,0 / 20,0
6,0			nicht definiert	24,0 / 30,0
9,0			nicht definiert	36,0 / 45,0
12,5			nicht definiert	50,0 / 62,5

D = Probendurchmesser; T = Erzeugnisdicke; L₀ = Anfangsmesslänge

Tabelle 3: Gegenüberstellung der möglichen Probenmaße von Rundzugproben

In beiden Normenwelten hängt die zu wählende Anfangsmesslänge vom Probendurchmesser ab. In der DIN EN ISO 6892-1/2 entspricht die erforderliche Anfangsmesslänge in der Regel dem 5-fachen Probendurchmesser. Die ASTM E8/E8M besagt, je nachdem, ob die „US-Customary“-Variante (E8) oder die metrische Variante (E8M) der Norm verwendet wird, dass eine Anfangsmesslänge entsprechend dem 4-fachen (E8) bzw. 5-fachen (E8M) Probendurchmesser zu berücksichtigen ist. Weiterhin zeigt die Gegenüberstellung, dass in der DIN EN ISO 6892 andere Probendurchmesser gegeben sind, als in der ASTM E8/8M. Nach DIN EN ISO 6892-1 ist es allerdings erlaubt, nach Vereinbarung Probenformen gemäß ASTM E8M zu verwenden:

Weitere Proben, wie die in entsprechenden Produktnormen oder nationalen Normen festgelegten, können in Abstimmung mit dem Vertragspartner verwendet werden, z. B. ISO 3183 [1] (API 5L), ISO 11960 [2] (API 5CT), ASTM A370 [6], ASTM E8M [7], DIN 50125 [10], IACS W2 [13] und JIS Z2201 [14].

Die Verfasser sind angesichts der verschiedenen Probenmaße zu der Ansicht gelangt, dass diese nicht wirklich relevante Unterschiede darstellen. Die Unterschiede der Bezugsmaßlänge für die Dehnungsmessung allerdings kann durchaus relevant sein, wenn die Ergebnisse genau verglichen werden sollen.

Im Folgenden wird das ASME Material SA-516 Grade 60 (ASME, ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section II Part A Ferrous Material Specifications, Edition 2017) hinsichtlich Streckgrenze sowie zulässiger Spannungen betrachtet. Die Materialspezifikation SA-516 verlangt zu erreichende Werte der Streckgrenze, Zugfestigkeit und Bruchdehnung bei Raumtemperatur. Die Ermittlung der Bruchdehnung darf über eine Anfangsmesslänge von 50 mm bzw. 200 mm erfolgen. Die nach SA-370 für Blecherzeugnisse zu verwendenden Probenformen entsprechen den Abmessungen der ASTM E8 (siehe Tabelle 2) für Flachzugproben.

Anforderungen der Druckgeräterichtlinie für Werkstoffe

In der Europäischen Druckgeräterichtlinie (2014/68/EU, 2014) sind die Anforderungen an Druckgeräte und die eingesetzten Werkstoffe definiert. Diese Anforderungen gelten für alle Druckgeräte, die in der EU in Verkehr gebracht werden.

„Bei der Berechnung des Druckraums sind bei den Werkstoffeigenschaften entsprechende Werte zu verwenden, die sich auf belegte Daten stützen, wobei sowohl die Bestimmungen gemäß Nummer 4 als auch entsprechende Sicherheitsfaktoren zu berücksichtigen sind. Zu den zu berücksichtigenden Werkstoffeigenschaften zählen:

— Streckgrenze, 0,2 %- bzw. 1 %-Dehngrenze bei der Berechnungstemperatur;(...)“

Hier wird also gefordert, dass „belegte Daten“ für die Auslegung heranzuziehen sind, dieses soll auch die „Dehngrenze bei Berechnungstemperatur“ berücksichtigen. Für die Zeugnisbelegung lauten die Forderungen der Richtlinie dann:

Der Hersteller des Druckgeräts hat die geeigneten Maßnahmen zu ergreifen, um sicherzustellen, dass der verwendete Werkstoff den vorgegebenen Anforderungen entspricht. Insbesondere sind für alle Werkstoffe vom Werkstoffhersteller ausgefertigte Unterlagen einzuholen, durch die die Übereinstimmung mit einer gegebenen Vorschrift bescheinigt wird.

Für die wichtigsten drucktragenden Teile von Druckgeräten der Kategorien II, III und IV hat dies in Form einer Bescheinigung mit spezifischer Prüfung der Produkte zu erfolgen.

Also braucht der Hersteller eines Druckgerätes 3.1 oder 3.2 Zeugnisse mit Ergebnissen der spezifischen Prüfung dieses Materials. In der Druckgeräterichtlinie werden zwar Zugversuche bei Auslegungstemperatur nicht explizit gefordert, die Berücksichtigung der entsprechenden Eigenschaften sehr wohl. Eine gute Zusammenfassung der Bescheinigung der Materialeigenschaften bei Auslegungstemperatur findet sich in der Literatur in Rao's ASME Companion Guide (Chaudouet, Osweiler, Hanmore, & Karcher, 2008):

The European material standards call for the material manufacturer to certify the elevated temperature properties not by testing the material at the temperature but by ensuring a test at any temperature meets the requirements specified in a trend curve. To prepare the trend curve the material manufacturer performs tensile tests at different temperatures (see EN 10314). A trend curve is then established using a recognised statistical procedure and once established the material manufacturer need only perform one test at any temperature on the curve and if it exceeds the value in the trend curve for that temperature, the material manufacturer may declare conformance with all elevated temperature values. In practice this temperature is often room temperature.

Dieser Sichtweise schließen sich die Verfasser an und meinen, daß ASME Material in der ASME Normenwelt unter Berücksichtigung der Eigenschaften bei Einsatztemperatur verwendet werden kann.

Harmonisierte Werkstoffnormen

In den harmonisierten Normen für Druckbehälterwerkstoffe werden deren Eigenschaften festgelegt, dazu gehören auch die Zugfestigkeit, die Bruchdehnung und die Streckgrenze bei Raumtemperatur, sowie die Streckgrenzen bei höheren Temperaturen. Die Verfasser haben sowohl in der DIN EN 10028-1 (Deutsche Norm, 2009), als auch in der DIN EN 10222-1 (Deutsche Norm, Juni 2017) die Warmzugversuche als Optionale Erprobungen gefunden. Insofern ist die tatsächliche Erprobung durch den Besteller zu spezifizieren. Nach Auskunft einiger Hersteller werden Warmzugversuche oft durchgeführt und dann auch im Zeugnis bescheinigt. Auf spezifische Kundenforderung ist die Erprobung und die Belegung im Zeugnis obligatorisch.

In EN 10028-2 (Europäische Norm, Juni 2009) werden für die Güte P265GH die Warmstreckgrenzen bis 400°C angegeben, das haben wir in Abbildung 7 beispielhaft dargestellt. Diese Werte sind durch den Werkstoffhersteller zu garantieren.

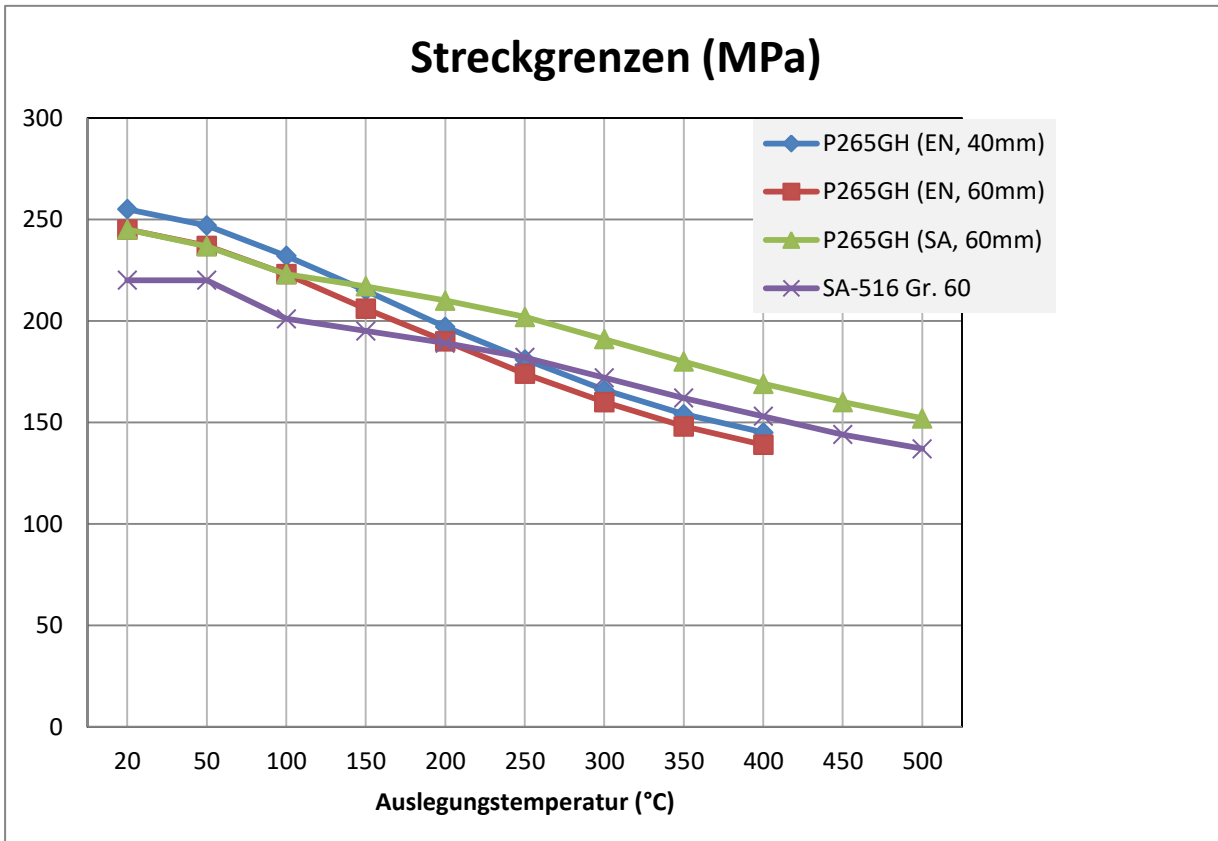


Abbildung 7: Streckgrenzenwerte aus EN 10028-2 für das Material P265GH bei 40 und 60 mm maximaler Wanddicke, bis 400°C, sowie aus der ASME Section II Part D, Tabelle Y-1 für SA/EN10028-2 P265GH bis 60 mm, bis 371°C und SA-516Gr.60, bis 538°C.

Eine spezifische Erprobung bei Auslegungstemperatur, also einen Warmzugversuch kann der Besteller spezifizieren und dieser muss gemäß EN 10028-1 Tabelle 1 auch durchgeführt werden. Wenn kein bestimmter Warmzugversuch bestellt wurde, kann der Materialhersteller auch auf den Warmzugversuch verzichten, sofern er die Normwerte der Warmstreckgrenzen garantieren kann.

Seit einigen Jahren werden EN Werkstoffnormen auf Antrag der Hersteller oder Anwender als SA/EN Materialnormen in den ASME Code aufgenommen. Dabei können zusätzliche Forderungen erhoben werden, in jedem Falle die Kennzeichnung betreffend, die Erprobung wird jedoch in aller Regel nicht verändert. Bei diesen Werkstoffen handelt es sich also um Material, das einerseits einer harmonisierten EN Norm, andererseits einer anerkannten SA/EN- Spezifikation entspricht. Die Materialeigenschaften werden in ASME Section II Part D nochmals spezifiziert, unter anderem werden die zu erwartenden Streckgrenzen über die Einsatztemperatur in Tabelle Y-1 festgelegt. In Abbildung 8 haben wir die Streckgrenze für die Güte P265GH aus Tabelle Y-1 grün dargestellt. Dabei werden keine separaten Werte für Wanddicken bis 40 mm angegeben, sondern lediglich bis 60 mm. Die Abweichung der Werte von denen der EN Norm erklärt sich aus den angewandten Kriterien. Es handelt sich bei Tabelle Y-1 um Erwartungswerte, nicht um Garantiewerte, wie in den EN Werkstoffnormen. (ASME, ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section II Part D Metric: Material Properties, Edition 2017).

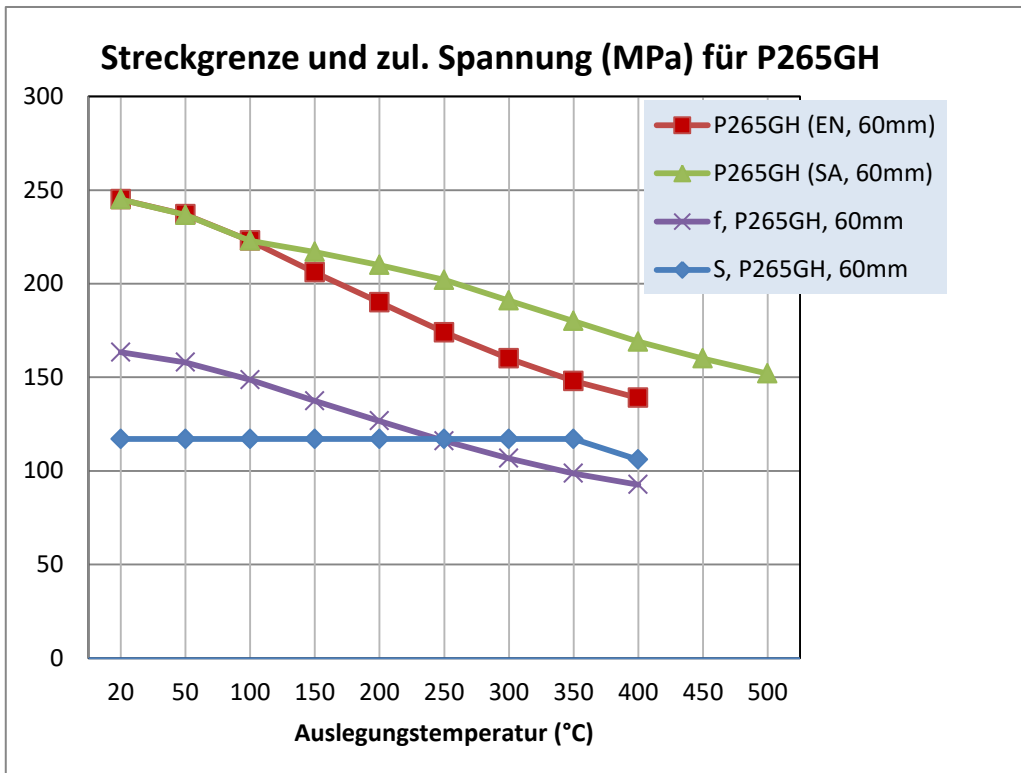


Abbildung 8: Streckgrenzen aus EN 10028-2 und ASME Section II Part D Table Y-1 (SA) für jeweils 60mm Bleche der Güte P265GH, sowie die zulässigen primären Membranspannungen „f“ nach EN 13445 (max. 400°C) und „S“ nach ASME Section II Part D Metric, Table 1A für Druckbehälter entsprechend ASME Section VIII Division 1, hier ist die Auslegungstemperatur auf 371°C beschränkt.

Um diesem Unterschied gerecht zu werden, hat ASME den Code Case 2556-2 herausgegeben, der bei Anwendung vom Materialhersteller die Garantie der Werkstoffeigenschaften der Materialspezifikation und des Komponentenregelwerks verlangt. Das wird dann auch im Werkstoffzeugnis entsprechend belegt (Chaudouet, Osweiler, Hanmore, & Karcher, 2008), (ASME, 2017). Streng genommen wird hier jedoch nicht die Einhaltung der Werte in Tabelle Y-1 garantiert, sondern dass die Auslegungswerte gemäß ASME Section II Part D auf garantierten Werkstoffeigenschaften beruhen.

Nicht Harmonisierte Werkstoffnormen

Sobald bei der Herstellung eines Druckgeräts unter der Europäischen Druckgeräterichtlinie nicht harmonisierte Werkstoffnormen eingesetzt werden, für die auch keine Europäische Werkstoffzulassung existiert, muss der Hersteller ein Einzelgutachten (engl. Particular Material Appraisal, PMA) erstellen, bei Druckgeräten der Kategorien III und IV ist dieses Einzelgutachten durch die Notifizierte Stelle einer besonderen Bewertung zu unterziehen (2014/68/EU, 2014). Für den in Abbildung 7 ebenfalls dargestellten Stahl SA-516 Grade 60 wäre also ein PMA erforderlich, das die Eignung des Werkstoffes für die betreffende Anwendung an dem betreffenden Druckgerät nachweist. In der ASME Werkstoffspezifikation ist der Warmzugversuch nach ASTM E 21 (ASTM International, 2009) als „supplementary requirement“ optional und es wird explizit darauf verwiesen, dass die Garantie bestimmter Werte zwischen Hersteller und Besteller zu vereinbaren ist. In aller Regel wird diese Option nicht bestellt und bescheinigt.

Möchte ein Hersteller nun das ASME Material SA-516 Grade 60 in einem Druckgerät gemäß EN 13445 einsetzen, so kann er nicht die Streckgrenzwerte aus der Tabelle Y-1 in seinem Entwurf anwenden, es sei denn, der Materialhersteller hat diese explizit garantiert, oder es wurde ein entsprechender Warmzugversuch durchgeführt, mit dem die Streckgrenze bei Auslegungstemperatur ermittelt wurde. Gemäß EN 13445 ist ein Wert „f“ zu bilden aus $2/3$ der Streckgrenze bei Auslegungstemperatur oder $5/12$ der Zugfestigkeit, das ist nach EN 13445 die maximale zulässige Primärspannung in der Behälterwand.

Für die Kunst der Vermischung von Regelwerken wird an dieser Stelle auf frühere Veröffentlichungen (Kölbl, 2006) verwiesen.

ASME Material und ASME Auslegung mit der Druckgeräterichtlinie

In Anhang I Abschnitt 7 der Druckgeräterichtlinie wird verlangt, dass die allgemeine Membranspannung nicht mehr als $2/3$ der Streckgrenze des Materials betragen darf. Nun dürfen wir gemäß ASME Code Section II Part D die Auslegung nicht auf Tabelle Y-1 gründen, wie bereits dargelegt. Gleichwohl werden jedoch die Streckgrenzen mit dem Quotienten $2/3$ (neben Zugfestigkeit / $3,5$) auch zur Bestimmung der zulässigen

Spannungswerte in Section II Part D Table 1A herangezogen. Die zulässigen Berechnungskennwerte „S“ werden in Section II Part D für Druckbehälter nach Section VIII Division 1 in der Tabelle 1A dargestellt. In der Abbildung 8 haben wir diese Werte für den Werkstoff SA/EN 10028-2 P265GH seinen Streckgrenzen nach EN 10028-2 und Table Y-1 gegenübergestellt. Auch der „f“ Wert gemäß EN 13445 wurde dargestellt. Nach ASME Code wird bis zu einer Temperatur von 350°C die zulässige Spannung durch das Zugfestigkeitskriterium dominiert. Die Verwendung dieses Werkstoffes ist nur bis 371°C zulässig. Bei 350°C ist die zu erwartende Streckgrenze der Table Y-1 etwa 20% höher, als die Garantiewerte aus den EN Normen. Der zulässige S-Wert steht nicht mit dem Tabelle Y-1 Wert durch den Faktor 1,5 in Beziehung, sondern wurde durch das zuständige Komitee unter Einhaltung des Faktors 1,5 in Tabelle 1A festgelegt. Hiermit ist die Auslegungsgrundlage für einen Behälter nach ASME Code Section VIII Division 1 ebenfalls unter Berücksichtigung der Streckgrenze erfolgt.

Sollte der Leser nun vermuten, dass das oben zitierte Kriterium „2/3 der Streckgrenze“ im Temperaturfenster von 300 bis 370°C nicht eingehalten wurde, so verweisen die Verfasser auf den ersten Absatz von Anhang I Abschnitt 7, der andere Faktoren der Bewertung zulässt. Die Verfasser sind der Meinung, dass mit der konsistenten Verwendung des ASME Codes für Entwurf, Prüfung und Herstellung durchaus die Streckgrenze in allen Temperaturbereichen berücksichtigt wurde und das auch noch mit einer geeigneten Sicherheitsmarge. So sind wir sicher, dass mit konsistenter und vollständiger Anwendung des ASME Code ein „gleichwertiges Gesamtsicherheitsniveau“ erreicht wird, wie es Abschnitt 7 verlangt. Der Hersteller eines Druckgeräts sollte bei seinem Entwurf im Einzelgutachten zum Material den Mut haben, das gleichwertige Sicherheitsniveau zu dokumentieren.

Literatur:

2014/68/EU. (15. . Mai 2014). *Druckgeräterichtlinie*. Amtsblatt der Europäischen Union.

ASME. (2017). Code Case 2556-2. In ASME, *Code Cases Boiler and Pressure Vessels*. New York: American Society of Mechanical Engineers.

ASME. (Edition 2017). *ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section II Part A Ferrous Material Specifications*. New York: ASME.

ASME. (Edition 2017). *ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section II Part D Metric: Material Properties*. New York: ASME.

ASTM International. (2009). *Standard Test Methods for Elevated Temperature Tension Tests of Metallic Materials*. West Conshohocken: ASTM.

ASTM International. (2016). *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. West Conshohocken: ASTM.

Chaudouet, A., Osweiler, F., Hanmore, P., & Karcher, G. (2008). Perspectives of the PED with Respect to ASME BPVC. In Rao, *Companion Guide to the ASME Code*. New York: ASME.

Czichos, H., & Hennecke, M. (2008). *Hütte - Das Ingenieurwissen*. Berlin: Springer.

Deutsche Norm. (2009). *Metallische Werkstoffe – Zugversuch – Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur*. Berlin: DIN.

Deutsche Norm. (2011). *Metallische Werkstoffe – Zugversuch – Teil 2: Prüfverfahren bei erhöhter Temperatur*. Berlin: DIN.

Deutsche Norm. (Juni 2017). *Schmiedestücke aus Stahl für Druckbehälter - Teil 1: Allgemeine Anforderungen an Freiformschmiedestücke*; . Brüssel: CEN.

Deutsche Norm. (Juni 2017). *Schmiedestücke aus Stahl für Druckbehälter - Teil 2: Ferritische und martensitische Stähle mit festgelegten Eigenschaften bei erhöhten Temperaturen*. Brüssel: CEN.

Europäische Norm. (Juni 2009). *Flacherzeugnisse aus Druckbehälterstählen- Teil 1*. Brüssel: CEN.

Europäische Norm. (Juni 2009). *Flacherzeugnisse aus Druckbehälterstählen- Teil 2*. Brüssel: CEN.

Kölbl, D. (2006). *Mixen und Mischen von Regelwerken*. Schweißen im Anlagenbau, München, 16. Februar 2006: DVS Verlag .

Roos, E., Maile, & K. (2005). *Werkstoffkunde für Ingenieure*. Stuttgart: Springer.