



# Ermittlung der Grenzflächenpressung von Bauteilwerkstoffen in Schraubenverbindungen an Ringproben bei erhöhter Temperatur bis 300 °C

Andreas Kempf<sup>1</sup> · Marcus Klein<sup>1</sup> · Matthias Oechsner<sup>1</sup>

Eingegangen: 28. Juni 2019 / Angenommen: 4. November 2020 / Online publiziert: 25. November 2020  
© Der/die Autor(en) 2020

## Zusammenfassung

Im Fokus des Leichtbaus stellt die Bewertung der Flächenpressung in druckbeanspruchten Kontaktflächen von Schraubenverbindungen eine Herausforderung an den Konstrukteur dar, um das Werkstoffpotential des Bauteils für eine Gewichtsreduktion optimal auszunutzen.

Wirkt neben den in der Regel bei der Montage vorherrschenden Raumtemperaturverhältnissen im Betrieb zusätzlich eine thermische Beanspruchung auf die Komponenten, ist von einer veränderten Druckbeanspruchbarkeit der geklemmten Bauteile auszugehen. Im Gegensatz zur Zugbeanspruchbarkeit liegen nur begrenzt Kennwerte für die Druckbeanspruchbarkeit bei erhöhter Temperatur vor. Zudem werden Werte vorrangig an Vollzylinderproben, nicht an Proben mit einem Durchgangsloch und somit nicht an bauteilrelevanter Struktur einer Schraubenverbindung ermittelt. Dies führt in der Folge zur Verwendung von konservativen Richtwerten oder ungenauen Annahmen. In diesem Beitrag wird eine Erweiterung der beiden Prüfmethode zur Ermittlung der Grenzflächenpressung bis 300 °C vorgestellt, welche in der Richtlinie 2230 Blatt 1, Ausgabe November 2015 des Vereins Deutscher Ingenieure e. V. (VDI) referenziert sind. Es sind Ergebnisse für zwei Stahl- und einen Aluminiumwerkstoff in Abhängigkeit der Prüftemperatur dargestellt. Des Weiteren werden Untersuchungen mit unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten bei kontinuierlicher Versuchsführung sowie Prüfungen zur Untersuchung des Werkstoffverhaltens im diskontinuierlichen Druckversuch mit Haltezeiten bei erhöhter Temperatur vorgestellt.

## Determination of the limiting surface pressure of component materials used in bolted joints on ring-shaped specimens at elevated temperature up to 300 °C

### Abstract

Within the focus of lightweight engineering the evaluation of the surface pressure in compressively loaded contact faces of bolted joints is challenging the designer in order to exploit the full material potential for weight reduction in an optimum way.

---

✉ Andreas Kempf  
kempf@mpa-ifw.tu-darmstadt.de

Marcus Klein  
m.klein@mpa-ifw.tu-darmstadt.de

Matthias Oechsner  
oechsner@mpa-ifw.tu-darmstadt.de

<sup>1</sup> Zentrum für Konstruktionswerkstoffe  
(MPA / IfW), Technische Universität Darmstadt,  
Grafenstraße 2, 64283 Darmstadt, Deutschland

Despite usually given ambient temperature conditions during assembly an altered compressive strength for bolted components subjected to thermal loading in service has to be considered. In contrast to tensile strength only restricted information about values for compressive strength at elevated temperature is existing. Furthermore values are largely determined on cylindrical specimens, not on specimens with clearance hole, thus not close to component structures of bolted joints. Therefore conservative guide values or assumptions are used. An extension of both testing methods referenced in guideline 2230 part 1, edition November 2015 of the association of German engineers (VDI) for determination of the limiting surface pressure up to 300°C is presented. Results for two steel and one aluminium alloy depending on the test temperature are displayed. In addition, investigations with variation of test speed in continuous runs and tests for the investigation of the material behaviour in discontinuous trials with hold times are accomplished at elevated temperature.

**Tab. 1** Formelzeichen

$A_p$ ( <i>min</i> )	mm <sup>2</sup>	(Minimale) ebene Kreisringauflagefläche
$D_A$	mm	Außendurchmesser des Modellbauteils; Außendurchmesser der Ringprobe
$d_h$	mm	Bohrungsdurchmesser der Ringprobe
$d_{ha}$	mm	Probenseitig durch Bohrungsfase vergrößerter Innendurchmesser der ebenen Druckstempelauflagefläche
$d_W$	mm	Außendurchmesser der ebenen Kopfauflagefläche des Druckstempels
$F_A$	N	Axialkraft; eine in Schraubenachse gerichtete und anteilig auf eine Schraube bezogene Komponente einer beliebig gerichteten Betriebslast
$F_D$	N	Stempeldruckkraft auf die Ringprobe
$F_M$ ( <i>zul</i> )	N	(Zulässige) Montagevorspannkraft
$F_{SA}$ ( <i>max</i> )	N	(Maximale) axiale Schraubenzusatzkraft
$F_V$	N	Schraubenvorspannkraft
$\Delta F_{Vth}$	N	Thermische Zusatzkraft
$h$	mm	Höhe der Ringprobe
$\Delta h$	mm	Ausgewertete plastische Eindringtiefe an der belasteten Kreisringfläche $A_p$
$\Delta h_{fl}$	mm	Fließweg in der Haltezeit
$p_{20\mu m}$	MPa	GFP für Auswertung bei 20 $\mu m$ bleibender Eindringung
$p_{fl > 2\mu m}$	MPa	GFP für Auswertung bei Überschreiten des Fließwegs von $\Delta h_{fl} > 2 \mu m$
$p_G$	MPa	GFP bei Raumtemperatur
$p_{G,T}$	MPa	GFP bei erhöhter Temperatur
$s$	mm	Messtechnisch erfasster Verfahrensweg an der Druckprüfvorrichtung
$T_C$	°C	Prüftemperatur; für Schraubenverbindung: über die Umgebung oder innere, über die verspannten Bauteile auf die Schraubenverbindung einwirkende Temperatur ungleich der Temperatur bei Montage der Verbindung
$t$	s	Zeit, hier: Haltezeit der Kraftstufe im diskontinuierlichen Druckversuch
$W_{t,p,pl}$	mm <sup>3</sup>	Polares Torsionswiderstandsmoment mit vollplastischer Schubspannungsverteilung
$\mu_b$	–	Teilreibungszahl in der Schraubenkopf- oder Mutterauflagefläche

## Abkürzungen

IfW	Fachgebiet und Institut für Werkstoffkunde der Technischen Universität Darmstadt
MPA	Staatliche Materialprüfungsanstalt Darmstadt
GFP	Grenzflächenpressung
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.

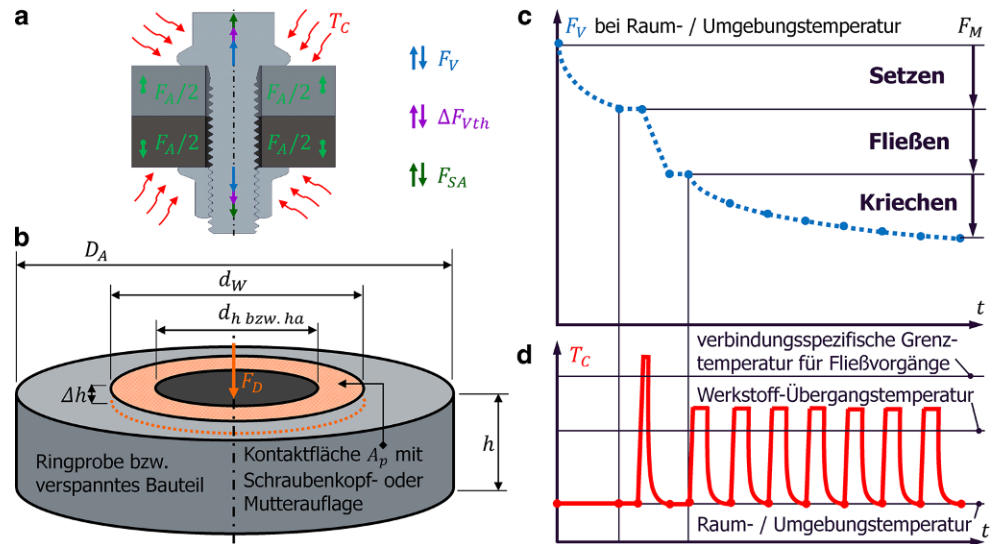
## 1 Einleitung

Schraubenverbindungen stehen, insbesondere in der Verkehrstechnik, weiterhin im Fokus von Leichtbaubestrebungen, um einen nachhaltigen Beitrag zur Ressourceneinsparung zu ermöglichen. Für die Betriebssicherheit der Schraubenverbindungen werden Festigkeitsnachweise nach der Richtlinie VDI 2230 [1] erbracht. Dabei ist die Schraubenvorspannkraft  $F_V$  (vgl. Tab. 1) mit im Betrieb überlagerter mechanischer und thermisch bedingter Zusatzkraft (vgl. Abb. 1a) als Kenngröße von zentraler Bedeutung. Nach der Montage können im Wesentlichen die drei Mechanismen Setzen, Fließen und Kriechen, welche durch zahlreiche Größen beeinflusst werden, zu einer Vorspannkraftreduktion führen (vgl. Abb. 1c, d). Im Bereich der werkstoffspezifischen Übergangstemperatur kann es zu Relaxation durch Werkstoffkriechen kommen. Bei unvorhergesehener lokaler Überschreitung der Werkstoffelastizitätsgrenze beispielsweise infolge thermischer Ausdehnung kann sich in Abhängigkeit der Verbindungsgestaltung unter anderem durch Plastifizierung an den Kontaktflächen (vgl. Abb. 1b) ein unerwünschter zusätzlicher Vorspannkraftverlust einstellen (vgl. [2]), welcher aus dem Überschreiten der Grenzflächenpressung resultiert.

## 2 Grundlagen der Grenzflächenpressung an Schraubenverbindungen

Im Rahmen der Auslegung darf die maximale Flächenpressung bei Montage  $p_{M \max}$  aus zulässiger Montagevorspannkraft  $F_{M \text{ zul}}$  bezogen auf die minimale Kreisringauflagefläche  $A_{p \text{ min}}$  sowie die maximale Flächenpressung im Betrieb  $p_{B \max}$  als Summe der maximalen Vorspannkraft  $F_{V \max}$ , maximaler

**Abb. 1** Typische Durchsteckschraubenverbindung (a), vortensspannkraftreduzierende Mechanismen (c, d) und Größen zur Ermittlung der Grenzflächenpressung (b)



axialer Schraubenzusatzkraft  $F_{SA\ max}$  infolge der Axialkraft  $F_A$  und thermischer Zusatzkraft  $\Delta F_{Vth}$  bezogen auf  $A_{p\ min}$  an keiner der Trennfugenkontaktflächen in der Verbindung die Grenzflächenpressung  $p_G$  überschreiten [1].

$$p_{M\ max} = F_{M\ zul} / A_{p\ min} \leq p_G \tag{1}$$

$$p_{B\ max} = (F_{V\ max} + F_{SA\ max} - \Delta F_{Vth}) / A_{p\ min} \leq p_G \tag{2}$$

Die Namensgebung der „Grenzflächenpressung“ geht auf Junker [3] zurück. Die Grenzflächenpressung  $p_G$  beschreibt bei Schraubenverbindungen mit Flanschen ohne Dichtfunktion die Druckbeanspruchbarkeit der Komponente. Es gilt zu beachten, dass es bei vollständiger Ausnutzung von  $p_G$  in der Regel bereits zu einer bleibenden Verformung kommt. Zudem unterliegt sowohl die Ermittlung der Grenzflächenpressung aus dem Versuch, als auch der Festigkeitsnachweis nach [1] der Annahme ideal ebener Formverhältnisse der Kontaktflächen. Bei real vorkommender Außen- oder Innenträgergeometrie der Schraubenkopfauf- lage (vgl. [4]) kann es lokal bereits bei geringerer Belastung zu einer Überschreitung der Grenzflächenpressung kommen. Im Versuch wirkt eine rein axiale Druckbelastung auf die Ringprobenoberfläche, wohingegen bei der Montage mit kopfseitigem Anzug eine zusätzliche Schubbeanspruchung auftritt. Bei Bewertung der Gesamtbeanspruchung mittels der Gestaltänderungshypothese, dem polaren Torsionswiderstandsmoment  $W_{t,pl}$  mit vollplastischer Schubspannungsverteilung, einer Teilreibungszahl in der Schraubenkopf- oder Mutterauflagefläche  $\mu_b$  von 0,08–0,16 nach [5] ergibt sich eine vernachlässigbar geringere Steigerung der Probenbeanspruchung um 1–3 % im Vergleich zu rein axialer Druckbeanspruchung im Versuch.

Für die empfohlene Vorgehensweise bei der Auslegung nach VDI 2230-1 sind in Tabelle A9 für gängige Bauteilwerkstoffe Richtwerte der Grenzflächenpressung bei Raum-

temperatur angegeben. Die Grenzflächenpressung von Bauteilwerkstoffen ist von mehreren geometrischen und versuchsbezogenen Einflussparametern abhängig.

Die Ermittlung der meisten in VDI 2230-1, Tabelle A9 angegebenen Richtwerte erfolgt nach zwei nicht genormten Prüfmethoden mit unterschiedlichen Auswertungskriterien [6, 7] (vgl. Abb. 2), welche sich zudem in den angewendeten Prüfparametern unterscheiden.

Allgemein errechnet sich die Grenzflächenpressung  $p_G$  aus der Druckkraft  $F_D$  für das Auswertungskriterium (bleibende Eindrückung  $\Delta h$  oder Fließweg  $\Delta h_{fl}$ ) bezogen auf die druckbelastete Ringfläche aus dem Stempelaußendurchmesser  $d_W$  und probenseitig dem Bohrungsdurchmesser  $d_h$  bzw. dem durch eine Bohrungsfase größeren Innendurchmesser der kopfseitigen, ebenen Auflagefläche des Druckstempels auf der Probe  $d_{ha}$ .

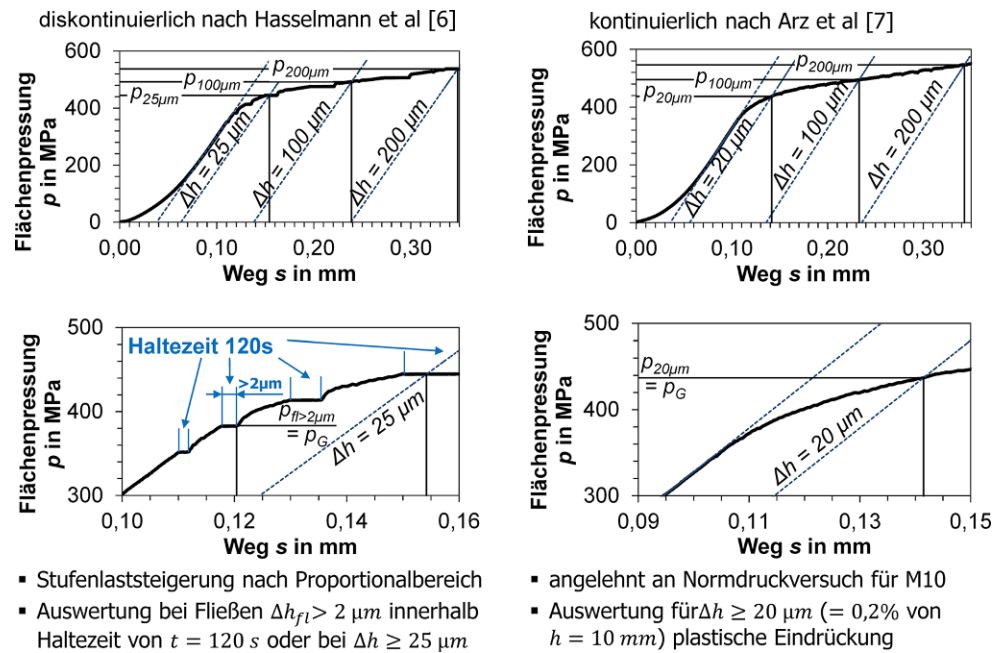
$$p_G = F_D(\Delta h) / \frac{\pi}{4} (d_W^2 - d_h \text{ bzw. } d_{ha}^2) \tag{3}$$

In Abb. 3 sind einige der bisher angewendeten Methoden mit Prüfparametern aufgeführt.

In Anlehnung an die 0,2%-Stauchgrenze im genormten Druckversuch an zylindrischen Proben nach DIN 50106 wird durch Arz in kontinuierlichen Druckversuchen erstmals die Flächenpressung für eine bleibende Eindrückung von  $\Delta h = 20\ \mu m$  ausgewertet [7]. Der Einfluss erhöhter Temperatur auf die Grenzflächenpressung wird in Kurzzeitdruckversuchen mit angepasster Methodik untersucht [8–11]. In weiteren Untersuchungen konnten Bereiche für Korrelationsfaktoren aus Grenzflächenpressung und Brinellhärte für verschiedene Werkstoffgruppen abgeleitet werden [9, 10].

Durch Hasselmann [6] werden die Zunahme der Grenzflächenpressung bei der Ausführung der Proben mit Bohrungsfasen festgestellt sowie Ergebnisse zur Variation der

**Abb. 2** Diskontinuierlicher und kontinuierlicher Druckversuch an Ringproben; Auswertung der bleibenden Eindrückung bzw. des Fließwegs nach [6, 7] in [1]



Prüfmethode	Prüfverlauf	Temperatur	Eindrücktiefe in $\mu\text{m}$	Geometrie Probe / Stempel in mm $D_A   d_h   h   d_w$	Prüfgeschwindigkeit	Referenz
Druckversuch an Ringprobe mit Druckstempel	kontinuierlich	RT	20	einheitliche Basis: M10 20   10,5   10   14,6	k. Angabe	Arz [7]
		bis 150 °C ≤ 60 s			k. Angabe ≤ 30 MPa/s	Arz [8] Stolle [10, 11]
		bis 300 °C			0,25   2,5   25 $\mu\text{m/s}$	Kempf
	diskontinuierlich	RT	100	Basis: M14 32   16   8   19,6	150 kp/s	Junker [3]
RT		25	einheitliche Basis: M10 20   10,5   10 / 15*   14,6 Abbruch: > 2 $\mu\text{m}$ n. 120 s	2 kN/s ≤ 30 MPa/s	Hasselmann* [6] Stolle [10, 11]	
bis 300 °C				2,5 $\mu\text{m/s}$	Kempf	
Korrelationshärteprüfung	nach Norm	RT	-	für St: $p_G \approx 3 \text{ HB}$ 3,5 HB < $p_G$ < 4,5 HB für Mg: $p_G < 3,5 \text{ HB}$	nach Norm	VDI2230-1 [1] Arz [9] Arz [9]

**Abb. 3** Methodenübersicht mit Prüfparametern für die Ermittlung der Grenzflächenpressung an druckbelasteten Kontaktflächen in Schraubenverbindungen

Geometrie vorgestellt. Aufbauend auf den ersten Erkenntnissen durch Hasselmann bewertet Stolle in Versuchen mit konstantem  $d_w = 14,6 \text{ mm}$  und konstantem  $d_h = 10,5 \text{ mm}$  den Einfluss der geometrischen Parameter Probenhöhe  $h$  und Probenaußendurchmesser  $D_A$  [11]. Die Grenzflächenpressung sinkt bei konstanter Probenhöhe  $h$  mit reduziertem Außendurchmesser  $D_A$  unterhalb von 20 mm bzw. verringerter Probenwandstärke deutlich ab, da eine Spannungsverteilung behindert (vgl. [1]) wird und dadurch eine verringerte Stützwirkung des reduzierten äußeren Probenbereichs besteht. Die Grenzflächenpressung nimmt tendenziell mit zunehmender Probenhöhe  $h$  ab, zeigt sich aber nur bei einem geringen Probenaußendurchmesser  $D_A < 20 \text{ mm}$  deutlich.

Beide Abhängigkeiten verdeutlichen die Notwendigkeit bisherige Richtwerte für  $p_G$  in einer kritischen Auslegung nicht ohne weitere Betrachtungen zu verwenden. Eine Va-

riation der Versuchsgeschwindigkeit zwischen 0,01 und 0,0005 mm/s zeigt keinen feststellbaren Einfluss [10].

Bei den temperaturabhängigen Untersuchungen durch Duchardt [12] wird bei zyklischer Probenbelastung in Höhe der Grenzflächenpressung aus dem statischen Versuch die zusätzliche Verformung im Vergleich zu einmalig kontinuierlicher Belastung bewertet.

### 3 Probenmaterial

Für die Versuche werden aus Rundstangenmaterial ( $\varnothing 45 \text{ mm}$ ) für drei Werkstoffe (vgl. Tab. 2) ringförmige Proben mit bisher verwendeten Abmessungen  $\varnothing 20 \times \varnothing 10,5 \times 10$  in Millimetern hergestellt. Deren rein spanend hergestellte Planflächen weisen eine bearbeitungsverfahrenstypische, maximale mittlere Oberflächenrauheit  $R_{z\text{max}} = 20 \mu\text{m}$  auf.

**Tab. 2** Prüfgutübersicht mit Angabe des Mittelwerts ( $n=3$ ) für mechanisch-technologische Kennwerte im Zugversuch bei Raumtemperatur mit dehnungsgeregelter Laststeigerung 0,025%/s bis Bruch

Werkstoff	S355J2C	42CrMo4	EN AW-6082
Zustand	+C	+QT	T6510
Zugfestigkeit $R_m$ in MPa	523	969	345
0,2% bleibende Dehngrenze $R_{p0,2}$ in MPa	439	853	325
Bruchdehnung $A$ in %	27	16	16

Die Oberflächenrauheit der Kontaktfläche an den verwendeten Druckstempeln liegt mit einer mittleren Oberflächenrauheit  $R_z$  von maximal 5  $\mu\text{m}$  im typischen Bereich einer durch Kaltverformung hergestellten Schraubenkopfaufschlagfläche. Zur weiteren Charakterisierung der Proben wird deren Druckbeanspruchbarkeit bei Raumtemperatur im Anlieferungszustand und nach Warmauslagerung untersucht.

Der kaltgezogene Baustahl zeigt in der Tendenz für Warmauslagerung eine leichte Zunahme, der Vergütungsstahl eine leichte Abnahme in der Druckfestigkeit. Für die ausscheidungsgehärtete Aluminiumlegierung zeigt sich erwartungsgemäß anfänglich eine Erhöhung der Festigkeit bis zum Maximum (T6, vgl. DIN EN 573-3) und daran anschließend in Abhängigkeit der Auslagerungstemperatur und der Warmauslagerungszeit aufgrund von Veränderungen im Gefüge eine Entfestigung.

#### 4 Aufbau, Durchführung und Auswertung der Versuche bei erhöhter Temperatur

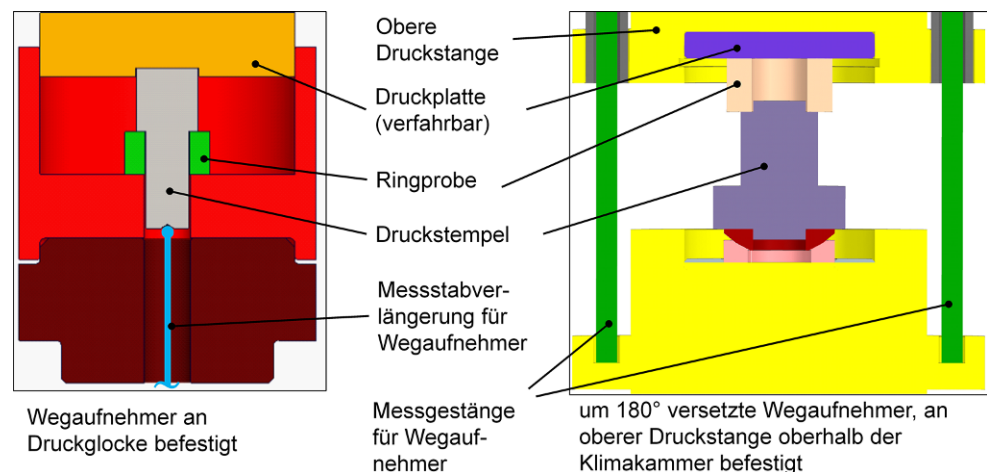
Für die in Abschn. 2 beschriebenen Untersuchungen an Universal-Prüfmaschinen unter Druckbeanspruchung wird für die Wegmessung ein Wegaufnehmer auf das freie Ende des Druckstempels aufgesetzt (vgl. Abb. 4). Zur Prüfung der Stähle bei Temperaturen bis 300 °C und geringer Verformungsgeschwindigkeit über eine längere Versuchsdauer, wird eine angepasste Wegmesstechnik in einer neu entwickelten  $T/\dot{\epsilon}$ -Prüfvorrichtung eingesetzt.

Für die  $T/\dot{\epsilon}$ -Vorrichtung werden aus dem warmdruckfesten Schnellarbeitsstahl HS6-5-2C (1.3343), vergütet auf 63 HRC, der Druckstempel, die Druckplatte und ein sich flächig berührendes Kalottenscheibenpaar als hochbeanspruchte Komponenten hergestellt. Letzteres dient dem Ausgleich von Winkelfehlern und somit einer möglichst homogenen Druckbelastung der Probe über dem Umfang. Die beiden Druckstangen werden aus dem korrosionsbeständigen Stahl X20CrMoV12-1 (1.4981) gefertigt. Diese werden konstruktiv über planaufliegende Flansche biegesteif an den Aufnahmen der Universalprüfmaschine vom Typ RM 1000 der Fa. Schenck angebunden.

Im verwendeten Prüfraum kommt ein Kraftaufnehmer mit einer Maximalkraft von 200 kN des Typs Z 12 der Genauigkeitsklasse 0,03 der Fa. HBM zum Einsatz. Die Wegmessung erfolgt mittels induktiver Wegtaster des Typs MT2571 mit einer Systemgenauigkeit von  $\pm 0,2 \mu\text{m}$  der Fa. Heidenhain. Die Messsignale beider um 180° versetzt positionierten Wegaufnehmer werden gemittelt. Die durchgeführten Validierungsversuche zeigen für den relevanten Bereich der Flächenpressungswerte eine geringe Abweichung (<5%), welche im Bereich der Werkstoffstreuung der bisherigen Versuche bei Raumtemperatur liegt.

Bei den Versuchen wird die Verformungsgeschwindigkeit über den Traversenweg geregelt. Als Referenzbasis dient die Prüfgeschwindigkeit von 2,5  $\mu\text{m/s}$ , für welche der Beginn der Abweichung vom linearen Verlauf der elastischen Drucksteifigkeit je Werkstoff und Temperatur näherungsweise ermittelt wird. Die kontinuierlichen Druckver-

**Abb. 4** RT-Prüfvorrichtung links: Raumtemperatur & Kurzzeitversuch bis 150 °C nach [8];  $T/\dot{\epsilon}$ -Prüfvorrichtung rechts: erhöhte Temperatur bis 300 °C



suche werden um den Faktor 10 in ihrer Prüfgeschwindigkeit auf  $0,25\ \mu\text{m/s}$  reduziert und auf  $25\ \mu\text{m/s}$  erhöht.

In den diskontinuierlichen Versuchen mit einer Prüfgeschwindigkeit von  $2,5\ \mu\text{m/s}$  wird zur Steigerung der Beanspruchung die Druckkraft gestuft um nominell jeweils 5 kN für die Stahlwerkstoffe und jeweils 2,5 kN für den Aluminiumwerkstoff gesteigert und jeweils für 120 s gehalten. Die erste Stufe stellt dabei die näherungsweise ermittelte Elastizitätsgrenze des Werkstoffs in den kontinuierlichen Versuchen dar.

Vor Beginn der Prüfungen wird der komplette Prüfstrang durch eine Klimakammer vom Typ K-70/500 der Fa. Laubinger & Rickmann auf konstante Temperaturverhältnisse erwärmt. Aufgrund der Wärmeleitung aus der Klimakammer über die Druckstangen nach außen wird mittels Temperatur-Referenzmessung über ein seitlich in die Referenzprobe eingesetztes Typ K-Thermoelement die einzustellende Ofenregeltemperatur ermittelt. Die parallel ermittelte Temperatur im Inneren der Klimakammer dient als Abgleichgröße vor Versuchsbeginn.

Nach Probenwechsel wird auf Einhaltung einer ausreichenden Zeitspanne für die Erwärmung bzw. die Durchwärmung von Probe und Prüfvorrichtung geachtet.

Vor Beginn der Versuche wird durch Vermessung des äußeren Stempelaufschlagdurchmessers  $d_w$  und des Bohrungsdurchmessers  $d_h$  jeder Probe die tatsächlich belastete Kreisringfläche  $A_p$  ermittelt. Für die Probenzentrierung zum Druckstempel wird zu Versuchsbeginn eine Ausrichtschale, aufgesetzt. Die Probe wird anschließend mit einer geringen Kraft ( $\leq 0,1\ \text{kN}$ ) axial geklemmt. Um zusätzliche Stützwirkungseffekte bei der Prüfung durch die Ausrichtschale zu vermeiden, wird diese wieder von der Probe abgenommen. Nach Kompensation des Verlaufs um die gemessene Prüfaufbaunachgiebigkeit wird der Druckkurvenverlauf der Probe mittels Verschiebung der ermittelten elastischen Drucksteifigkeitsgeraden ausgewertet (vgl. Abb. 2).

## 5 Temperaturabhängigkeit, Einfluss der Verformungsgeschwindigkeit und der Versuchsführungsart auf die Grenzflächenpressung

Das temperaturabhängige Verhalten der Grenzflächenpressung für den Aluminiumwerkstoff wurde durch Versuche bei  $80^\circ\text{C}$ ,  $120^\circ\text{C}$  und  $150^\circ\text{C}$ , für die beiden Stähle bei Temperaturen von  $80^\circ\text{C}$ ,  $150^\circ\text{C}$  und  $300^\circ\text{C}$  untersucht. Die Ergebnisse sind in Abb. 5 dargestellt.

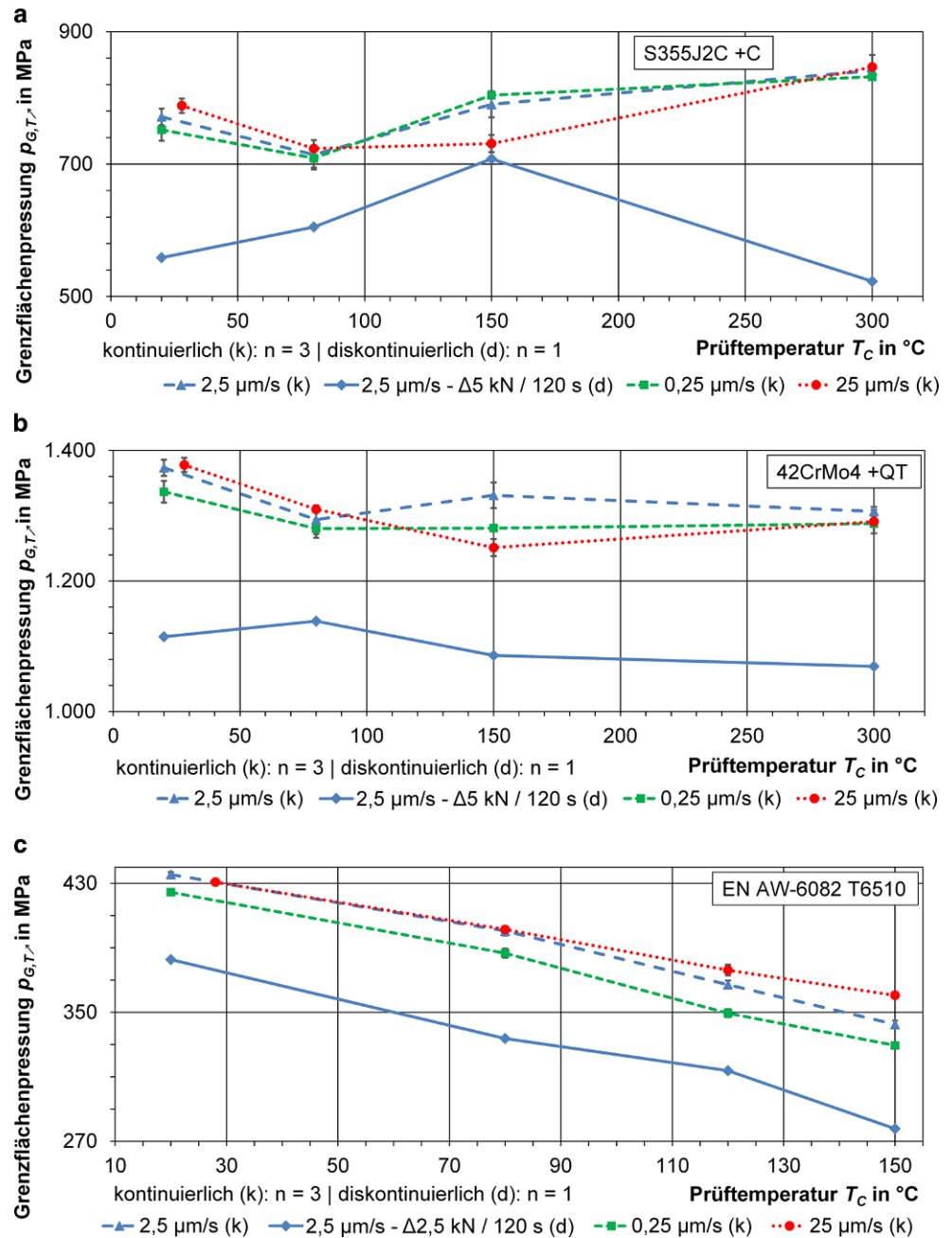
Der Verlauf der Grenzflächenpressung für den kaltgezogenen Baustahl S355J2C mit 0,14 Gew.-% Kohlenstoffgehalt zeigt bis  $80^\circ\text{C}$  eine Reduktion und einen Anstieg im weiteren Temperaturbereich bis  $300^\circ\text{C}$ , bei welcher die Werte über dem Niveau bei Raumtemperatur liegen. Die-

ser Verlauf stellt eine Analogie zum Verlauf der Zugfestigkeit in Abhängigkeit der Prüftemperatur für untereutektoide normalisierte Kohlenstoffstähle (vgl. [13]) dar und ist auf Reckalterungseffekte zurückzuführen. Für die Variation der Prüfgeschwindigkeit stellt sich am Baustahl bei einer Reduzierung kein signifikanter Unterschied ein. Bei einer Erhöhung der Verformungsgeschwindigkeit ist die Zunahme der Grenzflächenpressung zu höheren Temperaturen hin verzögert, wie es für das Verhalten unter Zugbeanspruchung bekannt ist (vgl. [14] in [13]). Die Auswertung der Einzelversuche unter diskontinuierlicher Versuchsführung ergibt für Raumtemperatur ein signifikant niedrigeres Niveau im Vergleich zu den kontinuierlichen Druckversuchen. Die Verringerung zwischen beiden Versuchsarten um 28 % fällt im Vergleich zu bisherigen Untersuchungen für einen Stahlwerkstoff deutlich höher aus. Bei diesem Stahlwerkstoff wurde lediglich eine Reduktion um 10 % festgestellt [11]. Für  $300^\circ\text{C}$  stellt eine thermisch aktivierte, erhöhte Versetzungsbewegung im kaltverfestigten Gefüge eine Erklärung für die höhere Verformbarkeit dar.

Der Vergütungsstahl 42CrMo4+QT zeigt bis ca.  $150^\circ\text{C}$  einen Abfall der Grenzflächenpressung, welche auf diesem verringerten Niveau bis  $300^\circ\text{C}$  verhartet. Für die Variation der Prüfgeschwindigkeit zeigt sich ein vergleichbares Verhalten wie für den Baustahl. Die diskontinuierliche Versuchsführung ergibt temperaturabhängig 12–19 % niedrigere Grenzflächenpressungswerte über den gesamten Temperaturbereich und liegt damit im bekannten Bereich für Raumtemperatur [11].

EN AW-6082 T6510 zeigt erwartungsgemäß eine über der Temperatur nahezu lineare Abnahme der Druckfestigkeit. Aufgrund der erhöhten Anzahl von Gleitebenen wird mit zunehmender Temperatur die Versetzungsbewegung im Gefüge weniger behindert. Dies ermöglicht die Erzeugung der auszuwertenden Eindrückung durch Verdrängung des Materials hin zur Bohrungsachse bereits bei geringerer Beanspruchung. Bei Verringerung der Prüfgeschwindigkeit auf  $0,25\ \mu\text{m/s}$  stellen sich 3–5 % geringere Werte ein. Bei Erhöhung der Prüfgeschwindigkeit auf  $25\ \mu\text{m/s}$  ist erst für Temperaturen oberhalb von  $80^\circ\text{C}$  eine leichte Zunahme der Grenzflächenpressung festzustellen. Die Versetzungsbewegung scheint unter diesen Bedingungen erst ab Erreichen einer Temperaturgrenze an den Ausscheidungen weiter begrenzt zu werden. Das Verhalten lässt sich mit der anfänglichen weiteren Aushärtung der Legierung erklären. Im diskontinuierlichen Versuch ergeben sich temperaturabhängig um 14–18 % niedrigere Werte für die zulässige Flächenpressung und liegen damit für eine ausscheidungsgehärtete Aluminiumgusslegierung vergleichsweise [11] im erwarteten Bereich.

**Abb. 5** Grenzflächenpres-  
sung  $p_{G,T}$  für S355J2C + C (a),  
42CrMo4 + QT (b), EN AW-6082  
T6510 (c) in Abhängigkeit der  
Prüf temperatur  $T_C$  für kontinu-  
ierliche und diskontinuierliche  
Versuchsführung



## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Aus den vorgestellten Untersuchungen können Ansätze zur verbesserten Ausnutzung des Werkstoffpotentials einzelner untersuchter Werkstoffe für die optimierte Auslegung druckbeanspruchter Kontaktflächen von Schraubenverbindungen unter Temperaturbeanspruchung durch versuchstechnische Variation der Verformungsgeschwindigkeit sowie der Erhöhung der Prüf temperatur bis 300 °C abgeleitet werden. An beiden untersuchten Stählen zeigt sich im kontinuierlichen Versuch bei moderat erhöhten Temperaturen eine Verringerung der Grenzflächenpres-

sung, die sich für kaltverfestigten Baustahl mit weiterer Zunahme der Prüf temperatur umkehrt und beim Vergütungsstahl auf dem anfangs verringerten Niveau bis 300 °C verhardt. Die Variation der Prüfgeschwindigkeit zeigt einen geringen Einfluss. Die Ergebnisse des diskontinuierlichen Versuchs zeigen ebenfalls keine lineare Temperaturabhängigkeit.

Für kaltverfestigte Stahlwerkstoffe scheint es aufgrund der teilweise starken Verringerung der Grenzflächenpres-sungswerte gegenüber dem kontinuierlichen Versuch auf Basis der Einzelversuche sinnvoll zu sein, die Prüfung im diskontinuierlichen Druckversuch vorzuziehen.

Für den untersuchten Aluminiumwerkstoff zeigt sich bei kontinuierlicher Versuchsführung eine annähernd lineare Reduktion der Werte, unter gesteigerter Prüfgeschwindigkeit lässt sich dabei bei geringer Temperatur kein und bei hohen Temperaturen ein leichter Anstieg der Grenzflächenpressung erkennen.

Bei der Anwendung von Grenzflächenpressungswerten sind aufgrund von Idealisierung nicht im Druckversuch abgedeckte Aspekte wie eine Außen- oder Innenträgergeometrie der Schraubkopfauflagefläche zu berücksichtigen. Für die Schraubmontage sind in der Regel die prüfgeschwindigkeitsabhängigen Werte bei Raumtemperatur relevant. Bei erhöhter Temperatur ist für den Betriebsfall neben der zu berücksichtigenden Reduktion der Grenzflächenpressungswerte auch die Erwärmungsgeschwindigkeit am Bauteil zu beachten.

**Förderung** Dieser Beitrag enthält Ergebnisse des Projekts „Rechnerische Beschreibung des Relaxationsverhaltens von Schraubenverbindungen unter leichtbaurelevanter Temperaturbelastung“. Das IGF-Vorhaben 18670N der Forschungsvereinigung Stahlverformung e. V. wurde über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e. V. (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Langfassung des Schlussberichtes kann bei der Forschungsgesellschaft Stahlverformung e. V., Goldene Pforte 1, 58093 Hagen, angefordert werden.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

**Funding** Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

**Interessenkonflikt** A. Kempf, M. Klein und M. Oechsner geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

**Open Access** Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das be-

treffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

## Literatur

1. Verein Deutscher Ingenieure e. V. (2015) Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen – Zylindrische Einschraubverbindungen. VDI-Richtlinie 2230 (Blatt 1). Beuth, Berlin
2. Kempf A, Beyer J, Oechsner M (2017) Vorspannkraftrelaxation an Schraubenverbindungen bei erhöhter Temperatur. In: VDI-Wissensforum (Hrsg) Versagensmechanismen von Schraubenverbindungen
3. Junker GH (1961) Flächenpressung unter Schraubköpfen. Maschinenmarkt 38:1–7 (Sonderdruck). Vogel, Würzburg
4. Verband der Automobilindustrie e. V. (2015) VDA – Empfehlung 235-107, Verschraubungen in Leichtmetalle. Dokumentation Kraftfahrtwesen e. V. (DKF), Bietigheim-Bissingen
5. Verband der Automobilindustrie e. V. (2009) VDA – Empfehlung 235-101, Reibungszahleinstellung. Dokumentation Kraftfahrtwesen e. V. (DKF), Bietigheim-Bissingen
6. Hasselmann U (1997) Grenzflächenpressung verspannter Teile: Geometrieabhängige Werkstoffkennwerte zur Berechnung von Schraubenverbindungen. In: 5. Informations- und Diskussionsveranstaltung des Deutschen Schraubenverbandes e. V., 1–16
7. Arz U, Berger C, Müller H et al (2002) Ermittlung der Grenzflächenpressung unter einachsialer kontinuierlicher Beanspruchung bei Raumtemperatur. Konstruktion 54(7/8):38–42. Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf
8. Arz U, Berger C, Kaiser U et al (2003) Grenzflächenpressung von Leichtmetallen unter kontinuierlicher Beanspruchung bei Temperaturen bis 150 °C. Konstruktion 55:63–67. Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf
9. Arz U, Baumgart H, Kremer U et al (2006) Grenzflächenpressung von Eisenwerkstoffen und Leichtmetallen unter kontinuierlicher Beanspruchung. Materwiss Werksttech 37(10):894–899. <https://doi.org/10.1002/mawe.200600047>. Wiley-VCH, Weinheim
10. Stolle C, Berger C, Arz U (2006) Grenzflächenpressung moderner Werkstoffe. In: Deutscher Schraubenverband (Hrsg) 8. Informations- und Diskussionsveranstaltung des Deutschen Schraubenverbandes e. V.
11. Stolle C, Berger C (2005) Einflüsse auf die Veränderungen der Vorspannkraft unter Betriebsbedingungen bei Verschraubungen im modernen Leichtbau: Schlussbericht IGF 13639 N
12. Duchardt M, Oechsner M (2011) Vorspannkraftabbau in Schraubenverbindungen unter Schwingbeanspruchung mit zusätzlicher Temperaturbelastung: Schlussbericht IGF 15320 N
13. Hüttebräucker KF (1977) Das zügige Verformungsverhalten normalisierter untereutektoider Kohlenstoffstähle (Dissertation, Universität Karlsruhe)
14. Manjoine MJ (1944) The Influence of Rate of Strain and Temperature on Yield Stresses of Mild Steel. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers 66:A211–A218