

---

# Rechnerische Beschreibung des Relaxationsverhaltens von Schraubenverbindungen unter leichtbaurelevanter Temperaturbelastung

---

Fachgebiet und Institut für Werkstoffkunde  
Prof. Dr.-Ing. Matthias Oechsner  
Dr.-Ing. Marcus Klein  
Dipl.-Ing. Andreas Kempf



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

---

Lehrstuhl für Maschinenelemente, Verbindungstechnik und Produktinnovation  
Prof. Dr.-Ing. Christoph Friedrich  
Dipl.-Wirt.-Ing. Jens Peth



---

## **1 Thema**

---

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden Einflüsse auf das zeitliche Verhalten der Schraubenvorspannkraft ermittelt und bewertet. Die genaue Kenntnis über das Relaxationsverhalten ist entscheidend, um die Betriebssicherheit der Verbindung zu gewährleisten. Es wurden typische Verbindungskonstellationen im Maschinenbau unter Einwirkung erhöhter Temperatur im Betrieb untersucht. Im Fokus stand insbesondere eine Leichtbauverbindung aus hochfester Stahlschraube und Aluminiumbauteil, welche über 1.000 h bei Temperaturen von bis zu 150 °C ausgelagert wurde. Neben der umfangreichen Werkstoffcharakterisierung für die Materialmodellierung in der Simulationssoftware ABAQUS wurden die Anwendungsgrenzen und die zu erwartenden Restvorspannkraft für diese werkstoffhybride Kombination durch aufwändige Relaxationsversuche in Abhängigkeit der Konfigurationsparameter der Schraubenverbindung ermittelt.

---

## **2 Problemstellung**

---

Die Temperatureinsatzgrenze für den Großteil von Produkten unterhalb des Hochtemperatureinsatzbereichs ist unter Berücksichtigung der betrieblichen Langzeitstabilität der Vorspannkraft in einer Schraubenverbindung gegenwärtig mittels allgemeingültiger analytischer Bewertungs- und Abschätzungszusammenhänge in Regelwerken nicht erfasst (vgl. VDI-Richtlinie 2230-1). Die Auslegung der Schraubenverbindung unter Berücksichtigung des Vorspannkraftverlusts infolge zeitabhängiger Krieeffekte ist jedoch für die Realisierung zeitgemäßer Produkte unerlässlich. Leichtbauwerkstoffe stellen im Vergleich zu Stahlwerkstoffen aufgrund der niedrigen Festigkeit, der geringeren Temperaturstabilität sowie einer stärker ausgeprägten Krieeigenschaft eine komplexe Herausforderung für den Konstrukteur dar. Die Ausschöpfung bisher ungenutzter Leistungspotenziale temperaturbeanspruchter Schraubenverbindungen erfordert die Vorhersage der Vorspannkraftrelaxation über die gesamte Produktlebensdauer. Dadurch können zukünftig moderne Produkte ressourceneffizienter mittels Gewichtsreduktion realisiert werden. Die erforderlichen entwicklungsbegleitenden Betriebssicherheitsbetrachtungen müssen dabei den Einfluss des Werkstoffs (WS), der Geometrie sowie der Beanspruchung der Schraubenverbindung bei erhöhter Temperatur berücksichtigen.

---

## **3 Ziele**

---

Das Vorhaben verfolgt das konkrete Ziel, den zeitlichen Verlauf der Vorspannkraft in Schraubenverbindungen unter zusätzlich thermischer Betriebsbeanspruchung, bezogen auf die

---

Schmelztemperatur  $T_m$  des Werkstoffs mit der niedrigsten Schmelztemperatur bzw. Festigkeit, bis zu einer Maximaltemperatur  $T_{max} = 0,3$  bis  $0,4 \cdot T_m$  (in Kelvin) zu bewerten. Hierfür werden Schraubenverbindungen aus einem Aluminium- und unterschiedlichen Stahlwerkstoffen untersucht. Der Einfluss der konstruktiven Einflussgrößen soll bewertet werden und als Grundlage für eine zukünftig verbesserte Auslegung der Schraubenverbindung hinsichtlich der Nutzung bisher vorhandener Reserven aufgrund konservativer Dimensionierung dienen. Die Betriebseinsatztemperatur stellt des Weiteren eine entscheidende Einflussgröße auf die Langzeitstabilität der Vorspannkraft dar, welche konfigurationsabhängig als Grenztemperatur der Anwendbarkeit definiert werden kann. Für die angestrebte Bewertungsmöglichkeit des zeitabhängigen Relaxationsverhaltens der Vorspannkraft unter Temperatureinwirkung ist ein detailliertes Verständnis der elastisch-plastischen Verformungen in den Teilbereichen der Schraubenverbindung in Abhängigkeit werkstoffkundlicher, beanspruchungsbezogener und geometrischer Parameter erforderlich. Der Einfluss der Verbindungsparameter soll durch die Bewertung der lokal auftretenden Verformungen über den Einsatz der Finiten-Element-Methode (FEM) zur Simulation der Schraubenverbindung ermittelt werden. Dadurch soll die rechnerische Abschätzung des Relaxationsbetrags der Schraubenvorspannkraft in Abhängigkeit der Parameter ermöglicht werden.

---

#### 4 Vorgehensweise

---

Für die in **Abbildung 1** dargestellten Untersuchungen wurden Außensechskant-Bundschrauben identischer Nennabmessungen (M10 x 1,5) und leicht innentragender Kopfauflagengeometrie mit Bauteilwerkstoffen gemäß **Tabelle 1** kombiniert. Die verwendeten Werkstoffe bzw. Komponenten werden im Anlieferungszustand und nach verschiedenen Beanspruchungszuständen werkstoffanalytisch dokumentiert. Das Werkstoffverhalten bei Raumtemperatur und bei erhöhter Temperatur wurde in mechanisch-technologischen Prüfungen, unter anderem im Zugversuch sowie im Zeitstand- / Kriechversuch, untersucht und aus den ausgewerteten Ergebnissen eine Materialdefinition für die Finite-Elemente (FE)-Simulation abgeleitet. Weitere Untersuchungen an Werkstoffproben im Relaxationsversuch dienen dem Abgleich der erzeugten FE-Materialformulierung des Werkstoffkriechens. Kurzzeitdruckversuche an Ringproben aus den eingesetzten Bauteilwerkstoffen liefern mit der ausgewerteten Grenzflächenpressung  $p_G$  einen Kennwert für die Elastizitätsgrenze, oberhalb welcher an der Kontaktfläche des verspannten Bauteils eine relevante bleibende Verformung als Eindrückung entsteht. Diese bewirkt in der Schraubenverbindung einen erheblichen

Vorspannkraftverlust. In Relaxationsversuchen an Schraube-Mutter-Verbindungen wurden für Konfigurationen mit unterschiedlicher Werkstoffkombination und Temperaturbeanspruchung die fließ- oder kriechbedingte Plastifizierung im hochbeanspruchten eingeschraubten Gewinde über dem zeitlichen Verlauf der Restvorspannung bewertet.

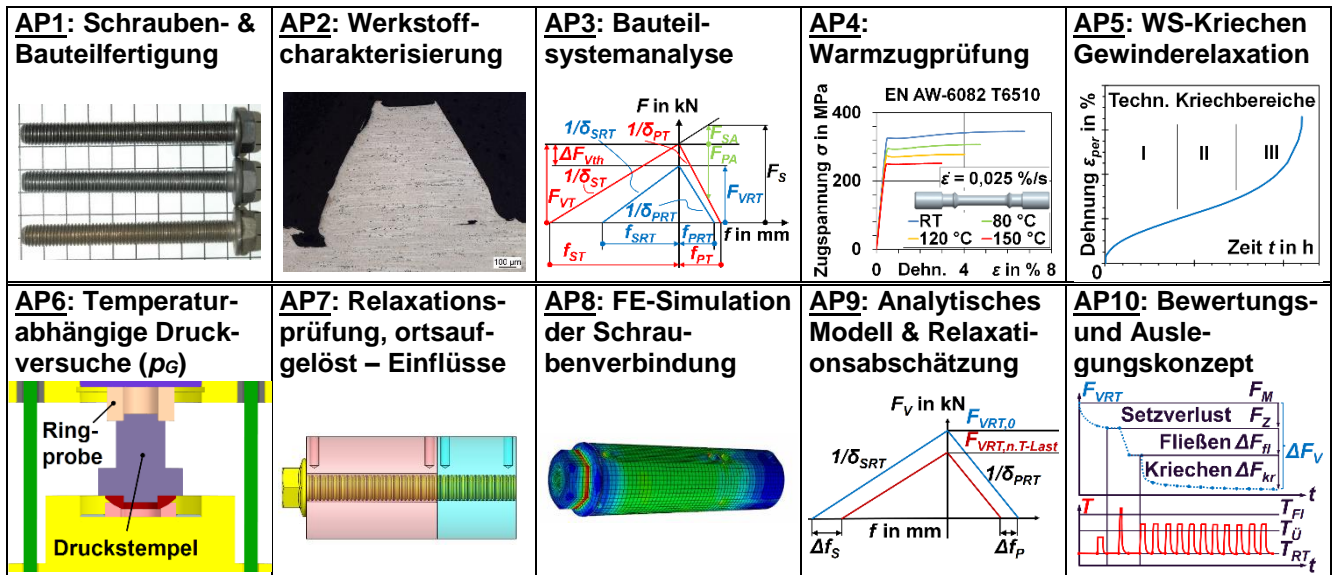


Abbildung 1: Übersicht der Untersuchungen nach Arbeitspaketen (AP)

Tabelle 1: Werkstoffübersicht

Werkstoff	23MnB3	40CrMoV 4-6	X6NiCrTiMoVB 25-15-2	S355J2C	42CrMo4	EN AW-6082
Zustand	Schraube M10x90 SV (schlussvergütet)	Schraube M10x90 SV (schlussvergütet)	Schraube M10x90 +AT +P (Fertigung, dann lösungsgeglüht und ausscheidungsgehärtet)	Rundstange Ø45mm +C (kaltgezogen)	Rundstange Ø45mm +QT (vergütet)	Rundstange Ø45mm T6510 (lösungsgeglüht, gereckt und ausscheidungsgehärtet)
	FK 10.9	FK 10.9	$R_{p0,2} \approx 700$ MPa	$R_{p0,2} \approx 440$ MPa	$R_{p0,2} \approx 850$ MPa	$R_{p0,2} \approx 320$ MPa
Kombination	I, II, III	IV	V	I	II, IV, V	III

In Relaxationsversuchen an Modell-Schraubenverbindungen werden die Einflüsse der Verbindungsparameter wie Einschraubtiefe, Klemmlänge, Außendurchmesser, Rauheit der Kontaktstellen sowie Montagehöhe und Betriebstemperatur bewertet. Die Ergebnisse dienen zudem der Validierung des numerischen Berechnungsmodells. Durch die FE-Simulation der Schraubenverbindung sollen insbesondere Erkenntnisse zum Verformungs- bzw. Relaxationsverhalten der Teilsysteme zur Verfügung gestellt werden, um daraus analytische Modellansätze sowie eine methodische Vorgehensweise zur Abschätzung der Vorspannkraftrelaxation ableiten zu können.

## 5 Ergebnisse

Im Gegensatz zu den untersuchten Stahlwerkstoffen zeigt die Aluminiumknetlegierung EN AW-6082 T6510 nach Auslagerung bei 150 °C deutliche Unterschiede im Werkstoffverhalten bei Raumtemperatur im Vergleich zum Anlieferungszustand. Durch den Unterschied im zugrundeliegenden festigkeitssteigernden Mechanismus kommt dem temperatursensitiven Ausscheidungszustand eine wesentliche Rolle zu. Unter thermischer Beanspruchung stellt sich für die AlSi1MgMn-Legierung erwartungsgemäß in Abhängigkeit von der Temperatur ein deutlicher Rückgang der Festigkeit im Zugversuch ein. Im Druckversuch zeigt sich nur ein geringer Einfluss der Prüfgeschwindigkeit, jedoch hat sich der deutliche Einfluss der Versuchsführung mit und ohne Haltezeiten aus bisherigen Untersuchungen bei Raumtemperatur auch für erhöhte Temperaturen bestätigt (**Abbildung 2, links**). Um Druckversuche mit langen Versuchszeiten (> 60 s) bis 300 °C an Stählen zu realisieren, wurde ein angepasster Prüfaufbau realisiert. Das experimentell ermittelte Werkstoffkriechverhalten wurde mittels etablierter Norton-Bailey- sowie für den kriechanfälligen Aluminiumbauteilwerkstoff zusätzlich durch die modifizierte Garofalo-Kriechformulierung (**Abbildung 2, rechts**) beschrieben und in das numerische Rechenmodell implementiert. Bei der numerisch berechneten Vorhersage des zeitlichen Vorspannkraftrelaxationsverlaufs wurden Abweichungen zu den experimentell ermittelten Verläufen festgestellt, welche eine Optimierung der Kriechformulierung erfordern. Diese muss im verspannten Bauteil die überwiegend aus Druckbeanspruchung resultierende Kriechrelaxation und die durch die mehrachsige Beanspruchung auftretende Kriechverformung im eingeschraubten Gewinde unter Parametervariation der Verbindung abbilden können.

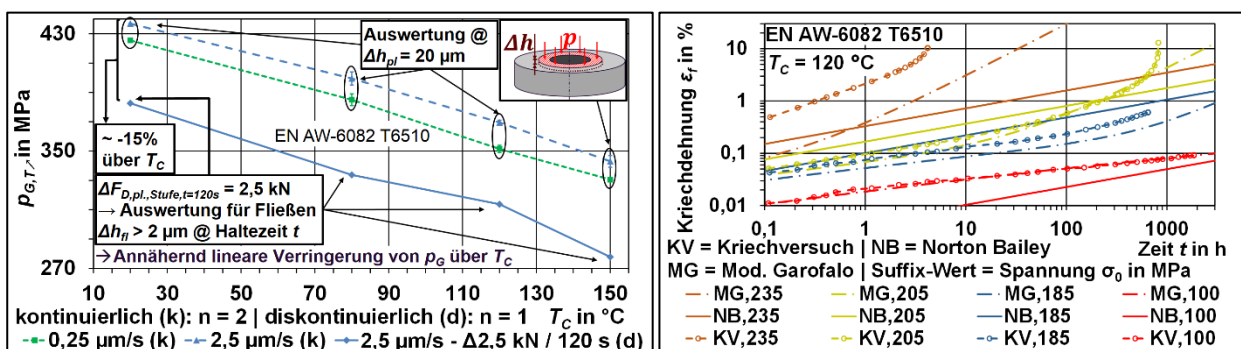
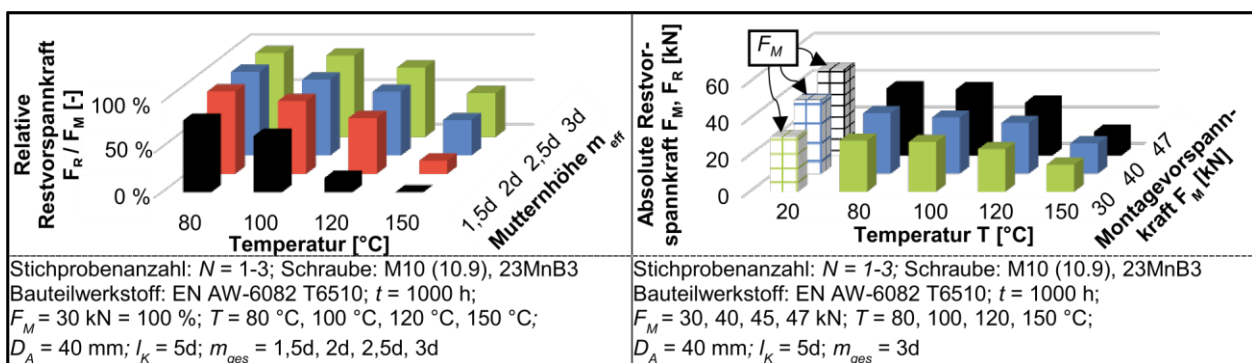


Abbildung 2: Grenzflächenpressung  $p_{G,T}$  bei erhöhter Prüftemperatur  $T_C$  für (dis)kontinuierliche Versuchsführung (links), Werkstoffkriechen bei 120 °C mit Auswertung (rechts) – EN AW-6082 T6510

Die Relaxationsuntersuchungen der Schraubenverbindung aus Schraube, Aluminiumbauteil und Aluminiummutter zeigen für alle gewählten Parametervariationen eine

stark ausgeprägte Vorspannkraftrelaxation ab  $T = 120\text{ °C}$ . Während die Variationsparameter Klemmlänge, Vorauslagerung des Werkstoffs, Mehrfachanzug sowie Rauheit eine untergeordnete Rolle für die Vorspannkraftrelaxation der Verbindung spielen, konnten neben der Auslagerungstemperatur vor allem die Mutternhöhe und die Höhe der Montagevorspannkraft als kritische Parameter für die Vorspannkraftstabilität der Verbindung identifiziert werden.

In **Abbildung 3**, links wird der ermittelte Einfluss der Mutternhöhe nach 1.000 h Relaxationsprüfung gezeigt. Bei einer Auslagerungstemperatur von  $T = 80\text{ °C}$  verlieren die Schraubenverbindungen abhängig von der Mutternhöhe 7 % ( $m_{ges} = 3d$ ) bis 20 % ( $m_{ges} = 1,5d$ ). Bei  $T = 100\text{ °C}$  können bei sonst gleicher Schraubenverbindung Vorspannkraftverluste von 9 % ( $m_{ges} = 3d$ ) bis 38 % ( $m_{ges} = 1,5d$ ) festgestellt werden. Bei einer Auslagerungstemperatur von  $T = 120\text{ °C}$  versagt die Schraubenverbindung mit der geringsten Mutternhöhe ( $m_{ges} = 1,5d$ ) fast vollständig und erleidet einen Vorspannkraftverlust in Höhe von 84 %, während die größeren Einschraubtiefen einen Vorspannkraftverlust von 38 % ( $m_{ges} = 2d$ ), 29 % ( $m_{ges} = 2,5d$ ) bzw. 23 % ( $m_{ges} = 3d$ ) aufweisen. Eine weitere Erhöhung der Auslagerungstemperatur auf  $T = 150\text{ °C}$  führt zu deutlichen Vorspannkraftverlusten von 51 % ( $m_{ges} = 3d$ ), 61 % ( $m_{ges} = 2,5d$ ), 85 % ( $m_{ges} = 2d$ ) bzw. 100 % ( $m_{ges} = 1,5d$ ). Für alle Schraubenverbindungen konnte im Auslagerungszeitraum von 500 h bis 1.000 h ein großer Vorspannkraftverlust nachgewiesen werden, sodass davon auszugehen ist, dass diese bei längerer Auslagerungszeit einen noch höheren Gesamtvorspannkraftverlust erleiden.



**Abbildung 3:** Mutterbauteilhöheneinfluss auf die relative Restvorspannkraft bei  $T = 80\text{ °C}$  bis  $150\text{ °C}$  (links), Temperatur und Montageeinfluss auf die absolute Restvorspannkraft (rechts) – nach 1.000 h

In **Abbildung 3**, rechts wird gezeigt, dass höher vorgespannte Verbindungen für die gewählte Auslagerungszeit von 1.000 h bis  $T = 120\text{ °C}$  die höchsten Restvorspannkraft  $F_R$  aufweisen. Gleichzeitig erleiden die höher vorgespannten Verbindungen jedoch auch einen höheren Vorspannkraftverlust. Es ist davon auszugehen, dass sich die Restvorspannkraft der

---

Schraubenverbindungen mit unterschiedlichen Montagehöhen bei den jeweiligen Temperaturen bei längeren Auslagerungszeiten weiter angleichen.

Bei einer Reduzierung des Außendurchmessers hin zu einer Hülse mit  $D_A = 22,5$  mm werden nach 1.000 h Auslagerungszeit für Temperaturen von 80 °C bis 150 °C annähernd gleich hohe Restvorspannkkräfte festgestellt wie für die dargestellten Konfigurationen mit  $D_A = 40$  mm.

Nach Umsetzung der numerischen Simulation (mit Variation der untersuchten Schraubenverbindungsparameter) und Abgleich mit den erlangten Ergebnissen aus den Relaxationsuntersuchungen, können analytische Teilansätze abgeleitet werden. Dadurch wird die zukünftige Etablierung eines allgemeingültigen Berechnungskonzepts hinsichtlich Relaxation möglich.

---

## **6 Praktischer Nutzen / Wirtschaftlichkeit**

---

Die erzielten Ergebnisse geben über bisherige Regelwerke hinaus Hinweise für eine optimierte Dimensionierung. Für Schraubenverbindungen mit betriebsbedingter thermischer Beanspruchung für kumuliert 1.000 h bis zu einer Maximaltemperatur von ca. 0,3 bis  $0,4 \cdot T_m$  (in Kelvin) wird der Einfluss einzelner Parameter auf die Restvorspannkrafthöhe am Beispiel typischer Materialkombinationen dargestellt. Die Resultate zeigen für die untersuchten Kombinationen die Anwendungsgrenze der im Betrieb temperaturbeanspruchten Schraubenverbindung auf, welche durch den Konstrukteur im Rahmen der Auslegung berücksichtigt werden kann. Dadurch wird ein wichtiger Beitrag zur langfristigen Vermeidung von Schadensfällen infolge großer Vorspannkraftverluste geleistet. Die angewendeten Methoden und erzielten Versuchsergebnisse zur Berücksichtigung mechanisch-technologischer Werkstoffkennwerte können für die Umsetzung eines allgemeingültigen Berechnungs- und Auslegungskonzepts hinsichtlich der Vorspannkraftrelaxation bei erhöhten Temperaturen verwendet werden.

---

## **7 Förderhinweis / Danksagung**

---

Das IGF-Vorhaben 18670 N der Forschungsvereinigung Forschungsgesellschaft 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.

Das Projekt wurde vom Arbeitskreis Gemeinschaftsforschung des Deutschen Schraubenverbandes e.V. und den im projektbegleitenden Arbeitskreis vertretenen Mitgliedsfirmen unter der Leitung von Herrn Dr.-Ing. Norbert Schneider (SEW EURODRIVE GmbH & Co KG) betreut, wofür ebenfalls herzlich gedankt wird. Besonderer Dank geht an die Industriepartner KAMAX Automotive GmbH & Co. KG und NEDSCHROEF Fraulautern GmbH für die Bereitstellung von Prüfgut sowie an den Industriepartner ESKA Automotive GmbH für die tatkräftige Unterstützung des Projekts.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages