

# Übertragung von Methoden zur Kenngrößenermittlung des selbsttätigen Losdrehens für Versuche am Vibrationsprüfstand nach Junker auf Versuche an einem neuentwickelten Prüfaufbau für Einschraubenverbindungen mit kurzer Klemmlänge unter Verwendung eines Axialpulsers

## Transfer of methods for determining parameters of self-loosening for tests on the vibration test bench according to Junker to tests on a newly developed test setup for single-bolted joints with short clamping length using an axial test bench

A. Eberhard<sup>1,2</sup>, S. Beyer<sup>1</sup>, M. Klein<sup>2</sup>, M. Oechsner<sup>2</sup>

Der Mechanismus des selbsttätigen Losdrehens kann über Kenngrößen, die am Vibrationsprüfstand nach Junker entwickelt wurden, beschrieben und eingeteilt werden. Hierbei sind die Kenngrößen der kritischen Grenzverschiebung, der kritischen Querkraft und der kritischen Drehwinkelsteigung  $\Delta\phi/\Delta N$  von entscheidender Wichtigkeit. Bei konstanten Randbedingungen wird es zu einem selbsttätigen Losdrehen der Verbindung kommen, wenn der Grenzwert dieser Kenngrößen überschritten wird. Im Folgenden wird betrachtet, in wieweit die Methoden zur Ermittlung dieser kritischen Kenngrößen auf einen neuentwickelten Prüfaufbau im Axialpulsers für Einschraubenverbindungen der Abmessungen M12 und M8 mit kurzen Klemmlängen übertragbar sind.


**Schlüsselwörter:** Schraubenverbindungen / selbsttätiges Losdrehen / Vibrationsprüfung / Einschraubenverbindungen

The self-loosening mechanism can be described and classified using characteristics developed with a Junker vibration test rig. The parameters of critical displacement, critical transverse force and critical angle of rotation gradient  $\Delta\phi/\Delta N$  are of crucial importance. Under constant boundary conditions the connection will loosen itself, when the threshold value of these critical parameters is exceeded. In the following, the transfer of the methods for determining these critical parameters

<sup>1</sup> Deutscher Schraubenverband e. V., Goldene Pforte 1, 58093 HAGEN, FEDERAL REPUBLIC OF GERMANY

<sup>2</sup> Technische Universität Darmstadt, Zentrum für Konstruktionswerkstoffe (MPA-IfW), Grafenstraße 2, 64283 DARMSTADT, FEDERAL REPUBLIC OF GERMANY

Korrespondenzautor: A. Eberhard, Deutscher Schraubenverband e. V., Goldene Pforte 1, 58093 HAGEN, FEDERAL REPUBLIC OF GERMANY, E-Mail: eberhard@mpa-ifw.tu-darmstadt.de

 This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial NoDerivs License, which permits use and distribution in any medium, provided the original work is properly cited, the use is non-commercial and no modifications or adaptations are made.

to a newly developed test setup using an axial test bench for single-bolted joints of the dimensions M12 and M8 with short clamping lengths is investigated.

**Keywords:** Bolted joints / self-loosening / vibration test / single-bolt connection

### 1 Einleitung

Die fachgerechte Auslegung von Schraubenverbindungen ist eine sehr komplexe Aufgabe, die viel Erfahrung und Wissen erfordert. Sie kann im Allgemeinen durch Richtlinien wie der VDI 2230 Blatt 1 oder numerische Simulationstechniken unterstützt werden [1]. Die Komplexität wird beispielsweise dadurch verdeutlicht, dass in den letzten fünf Jahren 13 % der zurückgerufenen Automodelle in Deutschland durch unsachgemäß angewandte Verbindungstechnik entstanden sind. Der größte Teil der Rückrufe ist auf Schraubenverbindungen zurückzuführen, während nur ein geringerer Teil Schweiß-, Löt- und Klebeverbindungen betrifft, Bild 1 links. Wenn es wegen fehlerhafter Schraubenverbindungen zu Rückrufen kommt, wird in den meisten Fällen ein Lösen (Lockern oder selbsttätiges Losdrehen) in Kombination mit einem falschen Anziehdrehmoment angegeben. An zweiter Stelle steht der Schraubenbruch (Dauerbruch) und an dritter Stelle werden Probleme mit Sicherungselementen aufgeführt, Bild 1 rechts.

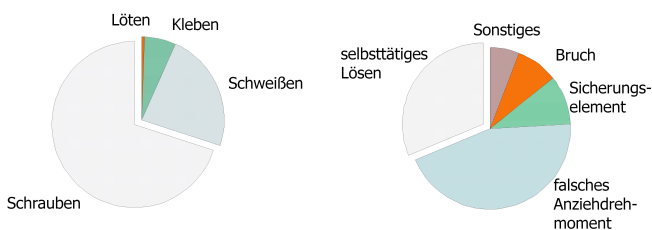
Im Allgemeinen kann es zu einem selbsttätigen Losdrehen kommen, wenn die äußeren Belastungen (Kräfte, Momente oder auch Temperaturen) dazu führen, dass die Selbsthemmung der Verbindung aufgehoben wird. Besonders schwerwiegend ist, dass es aktuell keine Norm oder Richtlinie gibt,

nach der eine Schraubenverbindung so ausgelegt werden kann, dass kein selbsttätiges Losdrehen eintritt. Beispielsweise können in der VDI 2230 Blatt 1 nur allgemeine Hinweise zum selbsttätigen Losdrehen gefunden werden [1]. Weiterhin wurde in einem Entwurf zur DIN 25201-4 versucht, einheitliche Prüfbedingungen für den Vibrationsprüfstand nach Junker festzulegen, jedoch ist dieser Entwurf mittlerweile zurückgezogen [2, 3]. Die aktuelle Normenlage verdeutlicht, wie komplex das Thema des selbsttätigen Losdrehens ist und dass es von einer hohen Anzahl an Einflussgrößen abhängt, die nur sehr schwer mit Formeln ausgedrückt werden können, Bild 2. Einen grundsätzlichen Einfluss der wichtigsten Parameter gibt die folgende Formel für eine Schraube unter transversaler Belastung wieder:

$$s_{G\ th} = \frac{F_Q \cdot l_K^3}{12 \cdot E_S \cdot I_S} = \frac{F_V \cdot \mu_b \cdot l_K^3}{12 \cdot E_S \cdot I_S} \tag{1}$$

$$= \frac{F_V \cdot \mu_b \cdot l_K^3}{k_{sk} \cdot E_S \cdot I_S} \text{ [nach 4]}$$

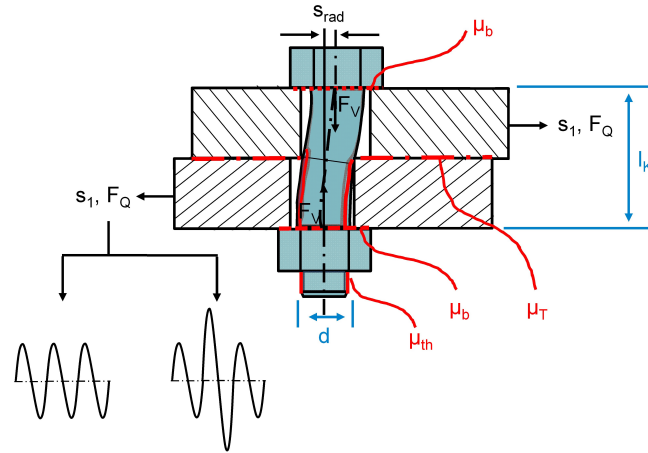
Hierbei wird davon ausgegangen, dass es zu einem selbsttätigen Losdrehen der Verbindung kommt, wenn die theoretische Grenzverschiebung  $s_{G\ th}$  überschritten wird, Gleichung 1. Die Höhe der theoretischen Grenzverschiebung  $s_{G\ th}$  wird von der Querkraft  $F_Q$  (Produkt aus der Vorspannkraft  $F_V$  und der Reibungszahl unter der Schraubenkopfaufgabe  $\mu_b$ ), der Klemmlänge  $l_K$ , dem Elastizitätsmodul der Schraube  $E_S$ , dem Flächenträgheitsmoment der Schraube  $I_S$  und dem Steifigkeitsfaktor  $k_{sk}$  beeinflusst. Ein Steifigkeitsfaktor  $k_{sk} = 12$  ergibt sich aus der konservativen Modellvorstellung, dass die Schraube einem Biegebalken nach Bernoulli entspricht, der auf der einen Seite fest eingespannt ist und auf der anderen Seite eine Parallelführung besitzt [5, 6]. Somit wird von einer starren Schraubenverbindung ausgegangen, bei der u. a. das Gewindenspiel, die Verkippung des Schraubenkopfes und die Verformung der verspannten Bauteile nicht berücksichtigt werden [7]. Weiterhin muss nach Bernoulli der Balkenquerschnitt gegenüber der Länge des Balkens klein sein,



**Bild 1.** Aufteilung der Rückrufe von Automodellen in Deutschland im Jahr 2017 auf unterschiedliche Verbindungstechniken (links) und auf Versagensgründe von Schraubenverbindungen (rechts).

**Figure 1.** Distribution of recalls from vehicle models in Germany in 2017 regarding different connection techniques (left) and failure reasons of bolted connections (right).

- Geometrie
  - Schraubendurchmesser  $d$
  - Klemmlänge  $l_K$
  - Schraube mit Schaft ( $d_S \approx d$ ,  $d_S > d$ ,  $d_S \approx d_2$ ,  $d_S < d_2$ ) oder mit Vollgewinde
  - Kopf- und Muttergeometrie
  - Gewindetoleranzen
- Reibungszahl
  - in der Kopf- und Mutternaufgabe  $\mu_b$
  - im Gewinde  $\mu_{th}$
  - in der Trennfuge  $\mu_T$
- Vorspannkraft  $F_V$
- Verschiebung  $s_1$  und  $s_{rad}$
- Querkraft  $F_Q$
- Elastizitätsmodul der Schraube  $E_S$
- Belastungsart und -richtung



**Bild 2.** Einflussgrößen auf das selbsttätige Losdrehen von Schraubenverbindungen [in Anlehnung an 4].

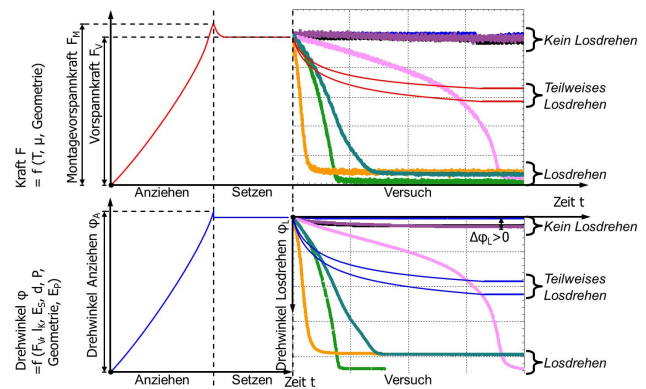
**Figure 2.** Essential variables influencing the self-loosening of bolted joints [based on 4].

somit kann diese Formel nicht auf Schraubenverbindungen kurzer Klemmlänge angewendet werden [6].

## 2 Allgemeine Betrachtung eines Versuchs zum selbsttätigen Losdrehen

Wenn eine Schraube drehmomentgesteuert angezogen wird, ergibt sich in Abhängigkeit des Anziehdrehmoments  $T$ , der Reibungszahlen im Gewinde  $\mu_{th}$  und in der Schraubenkopfaufgabe  $\mu_b$  sowie der Schraubengeometrie die Montagevorspannkraft  $F_M$ , Bild 3 linker Bereich. Der Drehwinkel  $\phi_A$ , der für den Anzug erforderlich ist, hängt maßgeblich von den Nachgiebigkeiten der Schraube und der verspannten Bauteile ab (Klemmlänge  $l_K$ , Elastizitätsmodul  $E_S$ , Nenndurchmesser  $d$ , Steigung des Gewindes  $P$  sowie der Geometrie und dem Elastizitätsmodul  $E_p$  der verspannten Teile).

Nach Wegnahme des Anziehwerkzeugs kommt es zunächst zu einem Rückfederungseffekt verbunden mit einer Drehwinkeländerung und einem dadurch bewirkten Rückgang eines Teils der Torsionsspannung in der Schraube [8], Bild 3 mittlerer Bereich. Anschließend folgt üblicherweise ein Setzen, das je nach Rauigkeit und Anzahl der Trennfugen unterschiedlich stark ausgeprägt sein kann und zu einem Abfall der Montagevorspannkraft  $F_M$  auf



**Bild 3.** Schematische Darstellung der Vorspannkraft  $F_V$  und des Drehwinkels  $\phi$  bei Versuchen zum selbsttätigen Losdrehen.

**Figure 3.** Schematic diagram of the preload  $F_V$  and the angle of rotation  $\phi$  during tests for the self-loosening of bolted joints.

die Vorspannkraft  $F_V$  führt [1]. Dieser Setzvorgang selbst bewirkt keine Drehwinkeländerung.

Anschließend werden die Vibrationsversuche durchgeführt, bei denen grundsätzlich vier verschiedene Versuchsausgänge möglich sind, Bild 3 rechter Bereich:

- Falls es zu einem „Losdrehen“ der Verbindung kommt, ergibt sich in Abhängigkeit der Größe der Wegamplitude  $s_E$  oder der Kraft  $F$  zunächst eine Drehwinkeländerung  $\phi_L$ , bevor die Vor-

spannkraft  $F_V$  merklich abfällt. Die Vorspannkraft  $F_V$  kann auf 0 kN sinken. Der maximale Drehwinkel  $\phi_{L \max}$  ergibt sich wieder in Abhängigkeit der Nachgiebigkeitsverhältnisse des Systems.

- Wenn „**Kein Losdrehen**“ eintritt, stellt sich auch stets ein geringer Drehwinkel  $\phi_L$  ein ( $\Delta\phi > 0$ ), der über der Zeit  $t$  oder der Anzahl der Schwingspiele stagniert, sobald die Schraube ihren neuen Gleichgewichtszustand gefunden hat. Dies kann mittels eines optischen Messsystems während des Versuchs registriert werden. Weiterhin kann sich dieser geringe Drehwinkel  $\phi_L$  in einem Vorspannkraftabfall bemerkbar machen. Die Größe Losdrehwinkel  $\phi_L$  ist systemabhängig. Beispielsweise ist sie bei kürzeren Klemmlängen geringer als bei längeren. Damit sind kurze Klemmlängen mit vielen Trennfugen und geringer Vorspannkraft  $F_V$  stets losdrehkritischer.
- Als dritte, eher seltenere Variante gibt es auch das „**Teilweise Losdrehen**“, bei dem die Vorspannkraft  $F_V$  stark abfällt (auf  $< 80\%$  der ursprünglichen Vorspannkraft [2]) und der Drehwinkel  $\phi_L$  zunimmt. Beide Größen stagnieren jedoch bei hinreichend hohen Schwingspielzahlen.
- Schließlich können Versuche auch vor Erreichen der Grenzwinkelzahl in einem Ermüdungsbruch enden.

### 3 Methoden der Kenngrößenermittlung für das selbsttätige Losdrehen am Vibrationsprüfstand nach Junker

In DIN 65151 ist der Vibrationsprüfstand nach Junker genormt [3]. Er kann neben der vergleichenden Prüfung von Schraubenverbindungen, deren Beschichtungen oder deren Sicherungen auch zur Ermittlung von Kenngrößen verwendet werden [2]. Folgende Methoden der Kenngrößenermittlung wurden für das selbsttätige Losdrehen von Schraubenverbindungen am Vibrationsprüfstand nach Junker entwickelt [5, 10]:

- Die maximalen Kenngrößen (Grenzverschiebung  $s_{\max}$ ; maximale Querkraft  $F_{Q \max}$ ) [5] sind erreicht, wenn der Schraubenkopf nicht mehr der vorgegebenen effektiven Amplitude (am Vibrationsprüfstand nach Junker wird eine Leerlaufamplitude  $s_0$  eingestellt, bevor die Schraubenverbindung mon-

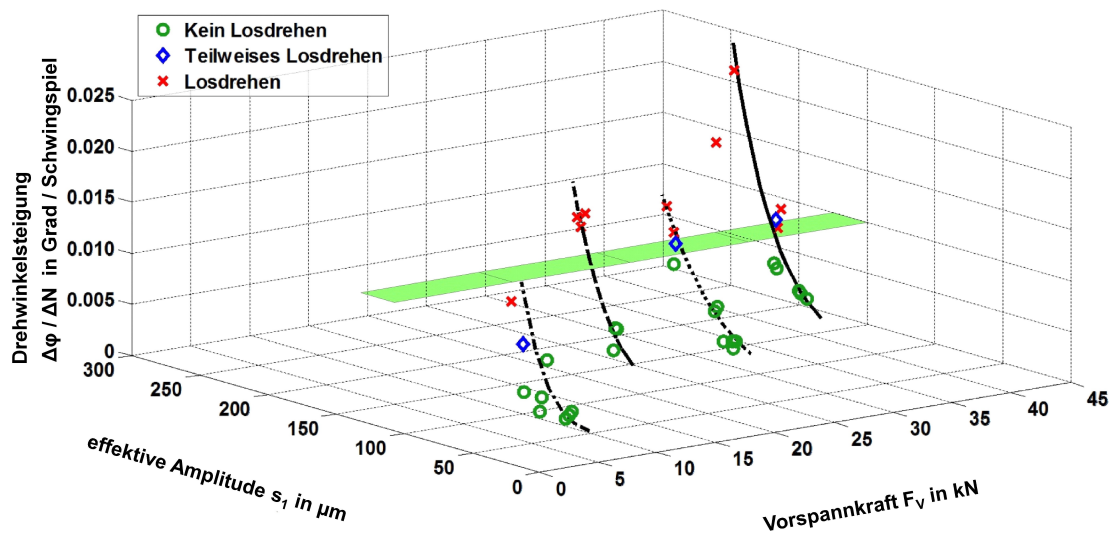
tiert wird. Nach Montage des Prüfguts ergibt sich die effektive Amplitude<sup>1</sup>  $s_1$  in Abhängigkeit von der Systemnachgiebigkeit)  $s_1$  folgen kann und komplett gleitet. Während des Gleitens des Schraubenkopfes kann sich auch die Querkraft  $F_Q$  nicht weiter erhöhen, bis die Schraube an die Bohrung anschlägt.

<sup>1</sup>Am Vibrationsprüfstand nach Junker wird eine Leerlaufamplitude  $s_0$  eingestellt, bevor die Schraubenverbindung montiert wird. Nach Montage des Prüfguts ergibt sich die effektive Amplitude  $s_1$  in Abhängigkeit von der Systemnachgiebigkeit.

- Jedoch kann es bereits unterhalb der maximalen Kenngrößen zu einem selbsttätigen Losdrehen der Verbindung kommen. Koch definiert eine kritische Grenzverschiebung  $s_{\text{krit}}$  und eine kritische Querkraft  $F_{Q \text{ krit}}$ , die erreicht sind, sobald eine Drehwinkelsteigung von  $\Delta\phi/\Delta N \approx 0,01^\circ/\text{Schwingspiel}$  vorliegt [5]. Das heißt, dass bei der Betrachtung eines Versuchs mit 500 Schwingspielen ein Drehwinkel von  $\phi_L \approx 5^\circ$  besteht [5].

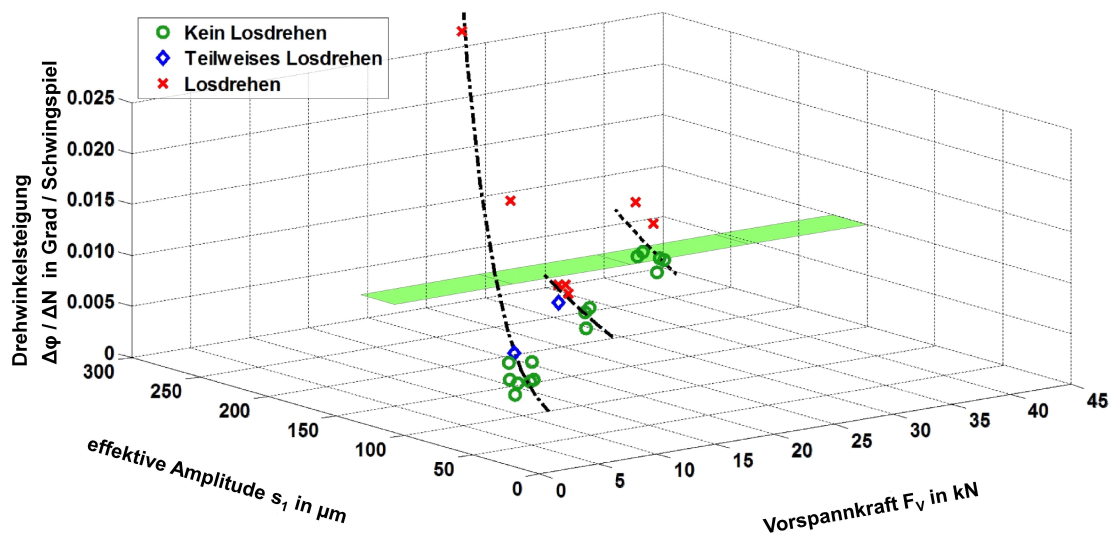
Nachteilig ist, dass die Ermittlung der effektiven Amplitude  $s_1$  für die kritische Drehwinkelsteigungsgrenze eine Vielzahl von Einzelversuchen erfordert. Weiterhin zeigen Untersuchungen am Vibrationsprüfstand nach Junker mit Verbindungen der Abmessung M10, dass eine kritische Drehwinkelsteigungsgrenze von  $\Delta\phi/\Delta N \approx 0,01^\circ/\text{Schwingspiel}$  nicht uneingeschränkt angewendet werden kann, *Bilder 4–6*. Bei den Versuchen ergibt sich nicht nur eine Abhängigkeit der Drehwinkelsteigung  $\Delta\phi/\Delta N$  von der effektiven Amplitude  $s_1$ , sondern auch von der Klemmlänge der Verbindung  $l_K$  und der Vorspannkraft  $F_V$ . Eine beispielhafte Betrachtung mit einer Klemmlänge von  $l_K = 27$  mm verdeutlicht, dass für Vorspannkraft im Bereich von  $F_V = 20$  kN bis  $F_V = 40$  kN die Grenze für die Drehwinkelsteigung  $\Delta\phi/\Delta N \approx 0,01^\circ/\text{Schwingspiel}$  gut bestätigt werden kann, *Bild 4*. Hingegen kann sie für eine Vorspannkraft von  $F_V = 10$  kN nicht herangezogen werden. Bei Klemmlängen von  $l_K = 32$  mm und  $l_K = 37$  mm muss bereits für eine Vorspannkraft von  $F_V = 20$  kN eine geringere Drehwinkelsteigungsgrenze angesetzt werden, *Bilder 5, 6*.

- Alternativ können die kritischen Kenngrößen  $s_{\text{krit}^*}$  und  $F_{Q \text{ krit}^*}$  mit einem Versuch unter komplettem Abgleiten der Verbindung bestimmt werden, *Bild 7* [10]. Hierbei wird die Steigungsänderung der relativen Verschiebung des Schraubenkopfes



**Bild 4.** Drehwinkelsteigung  $\Delta\phi/\Delta N$  in Abhängigkeit der effektiven Amplitude  $s_1$  einer Schraubenverbindung der Abmessung M10 und einer Klemmlänge von  $l_k = 27$  mm bei verschiedenen Vorspannkraften  $10 \text{ kN} \leq F_V \leq 40 \text{ kN}$  für die jeweils ersten 50 Schwingspiele eines Versuchs am Vibrationsprüfstand. Grenze für die Drehwinkelsteigung von  $\Delta\phi/\Delta N = 0,01^\circ/\text{Schwingenspiel}$  (siehe Fläche).

**Figure 4.** Angle of rotation gradient  $\Delta\phi/\Delta N$  being shown as a function of the effective amplitude  $s_1$  of bolted joints with the dimension M10 and a clamping length of  $l_k = 27$  mm at different preloads  $10 \text{ kN} \leq F_V \leq 40 \text{ kN}$  for the first 50 cycles of a test on the vibration test bench. Critical limit of the angle of rotation gradient at  $\Delta\phi/\Delta N = 0.01^\circ/\text{cycle}$  (see area).

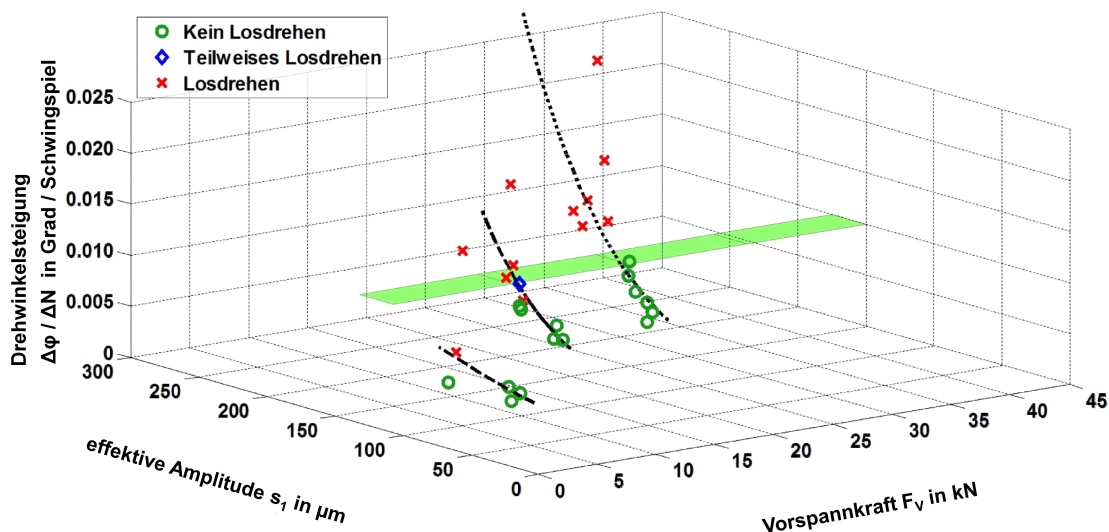


**Bild 5.** Drehwinkelsteigung  $\Delta\phi/\Delta N$  in Abhängigkeit der effektiven Amplitude  $s_1$  einer Schraubenverbindung der Abmessung M10 und einer Klemmlänge von  $l_k = 32$  mm bei verschiedenen Vorspannkraften  $10 \text{ kN} \leq F_V \leq 30 \text{ kN}$  für die jeweils die ersten 50 Schwingspiele eines Versuchs am Vibrationsprüfstand. Grenze für die Drehwinkelsteigung von  $\Delta\phi/\Delta N = 0,01^\circ/\text{Schwingenspiel}$  (siehe Fläche).

**Figure 5.** Angle of rotation gradient  $\Delta\phi/\Delta N$  being shown as a function of the effective amplitude  $s_1$  of bolted joints with the dimension M10 and a clamping length of  $l_k = 32$  mm at different preloads  $10 \text{ kN} \leq F_V \leq 30 \text{ kN}$  for the first 50 cycles of a test on the vibration test bench. Critical limit of the angle of rotation gradient at  $\Delta\phi/\Delta N = 0.01^\circ/\text{cycle}$  (see area).

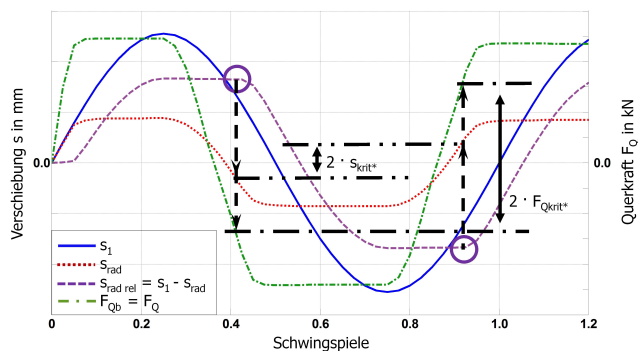
$s_{\text{rad, rel}}$  zu Hilfe genommen, wenn der Schraubenkopf vom Zustand des Haftens auf der Gegenlage zum Zustand des Gleitens übergeht. Damit verringert sich der Versuchsaufwand erheblich ge-

genüber der Ermittlung der kritischen Grenzverschiebung  $s_{\text{krit}}$  und der kritischen Querkraft  $F_{Q \text{ krit}}$  [5].



**Bild 6.** Drehwinkelsteigung  $\Delta\phi/\Delta N$  in Abhängigkeit der effektiven Amplitude  $s_1$  einer Schraubenverbindung der Abmessung M10 und einer Klemmlänge von  $l_K = 37$  mm bei verschiedenen Vorspannkraften  $10 \text{ kN} \leq F_V \leq 30 \text{ kN}$  für die jeweils die ersten 50 Schwingspiele eines Versuchs am Vibrationsprüfstand. Grenze für die Drehwinkelsteigung von  $\Delta\phi/\Delta N = 0,01^\circ/\text{Schwingenspiel}$  (siehe Fläche).

**Figure 6.** Angle of rotation gradient  $\Delta\phi/\Delta N$  being shown as a function of the effective amplitude  $s_1$  of bolted joints with the dimension M10 and a clamping length of  $l_K = 37$  mm at different preloads  $\text{kN} \leq F_V \leq 30 \text{ kN}$  for the first 50 cycles of a test on the vibration test bench. Critical limit of the angle of rotation gradient at  $\Delta\phi/\Delta N = 0.01^\circ/\text{cycle}$  (see area).



**Bild 7.** Bestimmung der kritischen Grenzverschiebung  $s_{krit^*}$  und der kritischen Querkraft  $F_{Q,krit^*}$  aus den Verläufen der effektiven Amplitude  $s_1$ , der Verschiebung des Schraubenkopfes  $s_{rad}$ , der relativen Verschiebung des Schraubenkopfes  $s_{rad,rel}$  und der Querkraft  $F_Q$  am Vibrationsprüfstand mit beweglicher Gegenlage unter dem Schraubenkopf, nach [10].

**Figure 7.** Determination of the critical displacement limit  $s_{krit^*}$  and the critical transverse force  $F_{Q,krit^*}$  from the graphs of the effective amplitude  $s_1$ , the displacement of the bolt head  $s_{rad}$ , the relative displacement of the bolt head  $s_{rad,rel}$  and the transverse force  $F_Q$  on the vibration test bench with an interchangeable counter component under the bold head, according to [10].

#### 4 Kenngrößenermittlungen für das selbsttätige Losdrehen von Einschraubenverbindungen mit kurzer Klemmlänge mittels eines neuentwickelten Prüfaufbaus unter Verwendung eines Axialpulsers

Im Folgenden wird untersucht, ob und in wieweit die bereits existierenden Methoden zur Ermittlung von kritischen Kenngrößen, definiert für Untersuchungen am Vibrationsprüfstand nach Junker (Kapitel 3), auch auf Versuche mit einem neuentwickelten Prüfaufbau in einem Axialpulsler übertragen werden können [5, 10]. Es werden Verbindungen der Abmessung M12 (Klemmlänge  $l_K = 2 \cdot d = 24$  mm, Vorspannkraft  $F_V = 50$  kN) sowie M8 (Klemmlänge  $l_K = 1 \cdot d = 8$  mm, Vorspannkraft  $F_V = 22$  kN) jeweils mit Trennfugenreibung  $\mu_T$  betrachtet. Schwerpunktmäßig wird in diesem Beitrag auf die Ergebnisse mit der Abmessung M12 eingegangen.

##### 4.1 Versuchsaufbau

Für die zyklischen Versuche werden die Verbindungen in einem Axialpulsler der Firma Carl

Schenck AG montiert. Mittels eines Extensometers der Firma SANDNER-Messtechnik GmbH (Messlänge  $l_0 = 25$  mm) werden die Versuche wegeregelt (Wegamplitude  $s_E$ ) bis zu einer Grenzwahrschwingzahl von 50.000 Schwingungen bei einer Frequenz von  $f = 1$  Hz durchgeführt, *Bild 8*. Ein vorzeitiges Versuchsende ist erreicht, sobald die Vorspannkraft einen vorgegebenen Grenzwert ( $10\% \cdot F_V$ ) unterschreitet oder eine Grenzwahrschwingkraft ( $F_{QG} = |16 \text{ kN}|$ ), die zum Schutz des Axialpulsers vorgegeben wurde, erlangt wird, Kapitel 4.3.

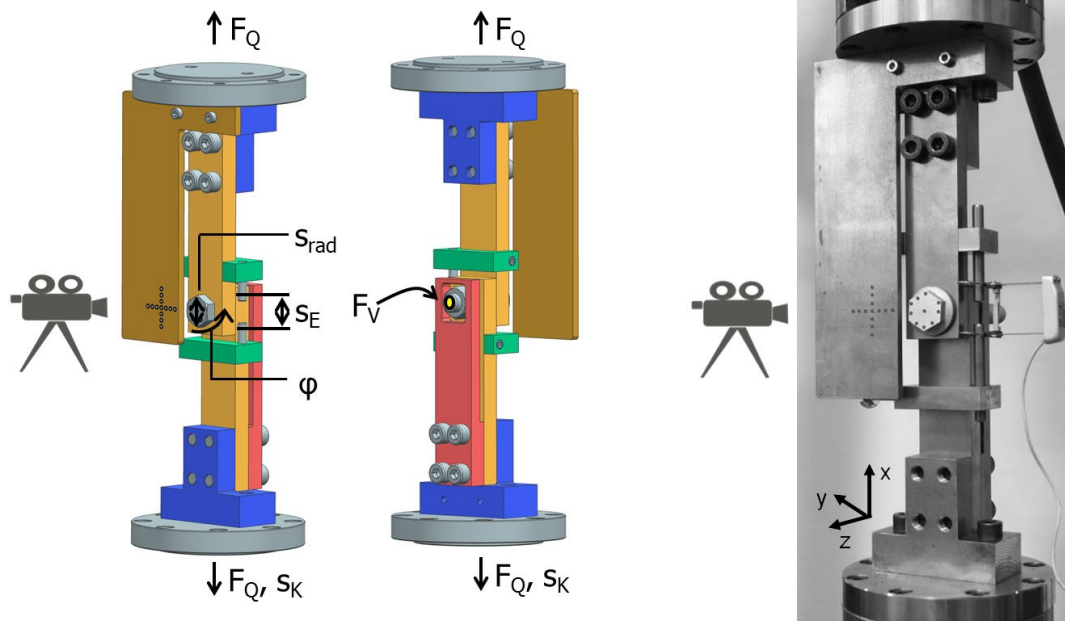
Die Wegeregung für die zyklischen Versuche gewährleistet, dass die Schraube unabhängig von schwingzahlabhängigen Reibungszahländerungen mit einer konstanten Beanspruchung beaufschlagt wird.

Über ein optisches Messsystem und Referenzpunktmarken der Firma GOM GmbH werden die Bewegungen des Schraubenkopfes in der x-, y- und z-Richtung sowie der Rollwinkel um die x-Achse, der Nickwinkel um die y-Achse  $\psi$  und der Drehwinkel  $\phi_L$  um die z-Achse aufgenommen. Für ein Referenzkoordinatensystem wird ein zusätzliches Blech, auf dem ebenfalls Referenzpunktmarken appliziert werden, an der oberen Einspannung des Axialpulsers montiert.

Auf Grund der kurzen Klemmlängen  $l_K$  der Einschraubenverbindungen im Axialpulser kann im Gegensatz zu den Verbindungen am Vibrationsprüfstand nach Junker keine Kraftmessdose zur Ermittlung der Vorspannkraft  $F_V$  eingesetzt werden. Um trotzdem die Versuche vorspannkraftgesteuert anziehen zu können, wurden Kopf und Kuppe der Schraube plangeschliffen und die Kuppe mit einem Ultraschallsensor versehen. Damit kann ein Ultraschallkopf der Firma Intellifast GmbH sowohl zur Beurteilung des Anziehvorgangs als auch zur Beobachtung eines potentiellen selbsttätigen Losdrehens während des Versuchs eingesetzt werden.

#### 4.2 Anwendung der Methode zur Ermittlung der kritischen Grenzverschiebung $s_{krit}^*$ auf den entwickelten Prüfaufbau im Axialpulser

Im Gegensatz zur Vibrationsprüfung nach Junker wird bei dem hier entwickelten Prüfaufbau im Axialpulser das Blech unter der Mutter und nicht unter dem Schraubenkopf verschoben, wobei die Drehung der Mutter um die z-Achse verhindert wird. Eine Bewegung in x-Richtung ist jedoch möglich, so dass die Mutter auf dem Blech gleiten kann. Zusätzlich liegt eine Trennfugenreibung  $\mu_T$  zwischen



**Bild 8.** Konstruierter (links und Mitte) und gefertigter (rechts) Prüfaufbau für die Losdrehversuche am Axialpulser [9].

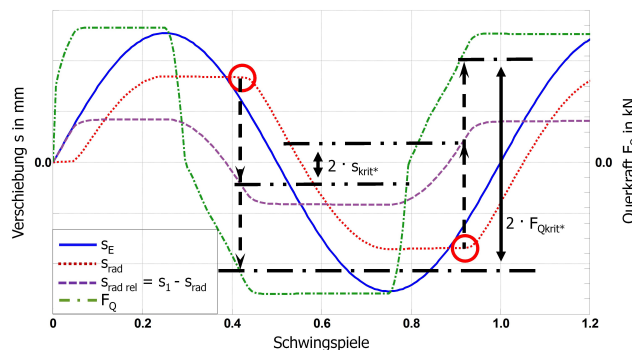
**Figure 8.** Designed (left and center) and manufactured (right) test rig for self-loosening tests on an axial test bench [9].

den Blechen vor. Wenn es zum Gleiten in der Trennfuge kommt, hat die Reibung in der Trennfuge einen Einfluss auf die Höhe und den Verlauf der Querkraft  $F_Q$ , nicht aber auf die Verschiebung des Schraubenkopfes  $s_{rad}$  selbst, wenn die Reibungsbedingungen im Gewinde und unter dem Schraubenkopf gleich sind. Globale Betrachtungen der Schraubenverbindung am Axialpulsler hatten gezeigt, dass die Schraubenabmessung M12 nur in x-Richtung vom Weg  $s_E$  abhängig ist [9]. Daher wird im Folgenden der Ansatz verfolgt, die Kenngröße der kritischen Grenzverschiebung  $s_{krit^*}$  auf die Verbindung am Axialpulsler anzuwenden. Durch die Richtungsumkehr der feststehenden und beweglichen Bleche muss zur Bestimmung der kritischen Grenzverschiebung  $s_{krit^*}$  die Auswertesystematik angepasst werden:

Wird beim Vibrationsprüfstand nach Junker die Gegenlage unter dem Schraubenkopf verschoben, folgt der Schraubenkopf zunächst der effektiven Amplitude  $s_1$ , bis es zum kompletten Abgleiten des Kopfes kommt, Bild 7. Die Schraubenkopfverschiebung  $s_{rad}$  stagniert bei weiterer Erhöhung der effektiven Amplitude  $s_1$ . Der Verlauf der Querkraft  $F_Q$  und der Verschiebung des Schraubenkopfes  $s_{rad}$  erfolgt in Phase.

Wenn im Axialpulsler die Gegenlage unter der Mutter verschoben wird, kommt es zunächst zu keiner Bewegung des Schraubenkopfes  $s_{rad,x}$ , Bild 9. Sobald ein komplettes Gleiten unter dem Schraubenkopf eintritt, erhöht sich die Verschiebung  $s_{rad,x}$  mit dem weiteren Anstieg der Wegamplitude  $s_E$ . Die Querkraft  $F_Q$  stellt nun die Gesamtquerkraft aus der Querkraft in der Schraubenkopfauflage  $F_{Qb}$  und der Querkraft in der Trennfuge  $F_{QT}$  dar. Sie bewegt sich nicht in Phase mit der Verschiebung des Schraubenkopfes  $s_{rad,x}$ . Über die Bildung einer Differenz aus der Wegamplitude  $s_E$  und der Verschiebung des Schraubenkopfes  $s_{rad}$  ergibt sich die relative Verschiebung des Schraubenkopfes  $s_{rad,rel}$ .

Wenn das Blech unter der Mutter verschoben wird, statt dem Blech unter dem Schraubenkopf, bedeutet dies nur einen Wechsel des Bezugssystems. Durch diesen Wechsel müssen bei sonst gleichen Randbedingungen (Schraubenverbindung, Reibungsbedingungen) lediglich die Benennungen der charakteristischen Verläufe der Verschiebung des Schraubenkopfes  $s_{rad}$  und der relativen Verschiebung des Schraubenkopfes  $s_{rad,rel}$  getauscht werden.

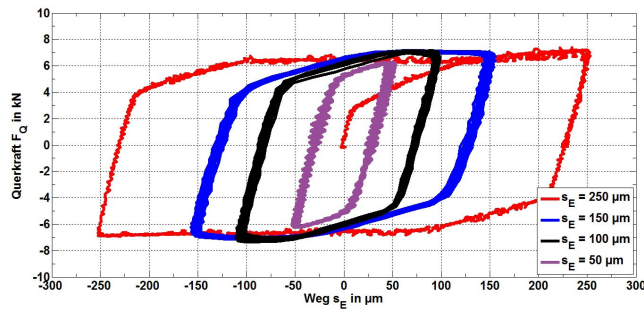


**Bild 9.** Bestimmung der kritischen Grenzverschiebung  $s_{krit^*}$  und der kritischen Querkraft  $F_{Q,krit^*}$  aus den Verläufen der Wegamplitude  $s_E$ , der Verschiebung des Schraubenkopfes  $s_{rad,x}$ , der relativen Verschiebung des Schraubenkopfes  $s_{rad,rel}$  und der Querkraft  $F_Q$  bei einem entwickelten Prüfaufbau in einem Axialpulsler mit feststehendem Blech unter dem Schraubenkopf und Trennfugenreibung  $\mu_T$ .

**Figure 9.** Determination of the critical displacement  $s_{krit^*}$  and the critical transverse force  $F_{Q,krit^*}$  from the graphs of the displacement amplitude  $s_E$ , the displacement of the bolt head  $s_{rad}$ , the relative displacement of the bolt head  $s_{rad,rel}$  and the transverse force  $F_Q$  with a developed test setup using an axial test bench and fixed plate under the bolt head as well as the coefficient of friction in the interface  $\mu_T$ .

Für die Bestimmung der kritischen Grenzverschiebung  $s_{krit^*}$  werden am Axialpulsler mit der Abmessung M12 Versuche durchgeführt, bei denen es zum kompletten Gleiten in der Trennfuge und unter dem Schraubenkopf kommt, Vorgehen wie in Kapitel 3. Alternativ zu den Versuchen mit einer Frequenz von  $f = 1$  Hz wird auch eine sehr niedrige Frequenz von  $f = 0,0033$  Hz gewählt, um bei diesen Versuchen am Axialpulsler die Verschiebungen höher auflösen zu können. Es besteht eine gute Vergleichbarkeit zwischen der Hysterese bei einer Wegamplitude von  $s_E = 250 \mu m$  ( $f = 0,0033$  Hz) und den Hysteresen bei Wegamplituden von  $s_E = 50 \mu m$ ,  $100 \mu m$  und  $150 \mu m$  ( $f = 1$  Hz) bei der Schraubenabmessung M12, Bild 10. Je größer die Wegamplitude  $s_E$  ist, desto größer ist auch die von der Hysterese umschlossene Fläche. Mit Ausnahme der Wegamplitude  $s_E = 50 \mu m$  stellt sich bei allen anderen Verläufen eine maximale Querkraft von  $F_{Q,max} = 7$  kN ein, bei der es zum kompletten Gleiten der Verbindung kommt und somit im weiteren Verlauf auch zum selbsttätigen Losdrehen. Bei einer Wegamplitude von  $s_E = 50 \mu m$  kommt es innerhalb von 50.000 Schwingspielen nicht zum selbsttätigen Losdrehen.





**Bild 10.** Vergleich eines Versuchs mit einer Frequenz von  $f = 0,0033$  Hz bei einer Wegamplitude  $s_E = 250 \mu\text{m}$  (mit Erstbelastung) und Versuchen mit einer Frequenz von  $f = 1$  Hz bei Wegamplituden von  $s_E = 50 \mu\text{m}$ ,  $100 \mu\text{m}$  und  $150 \mu\text{m}$  (ohne Aufblendbereich<sup>2</sup>) am Versuchsbeginn für Schrauben der Abmessung M12 [9].

**Figure 10.** Comparison of a test at a frequency of  $f = 0.0033$  Hz and a displacement amplitude of  $s_E = 250 \mu\text{m}$  (with initial loading) with tests at a frequency of  $f = 1$  Hz and displacement amplitudes of  $s_E = 50 \mu\text{m}$ ,  $100 \mu\text{m}$  as well as  $150 \mu\text{m}$  (without ramp-up area) at the beginning of a test for bolted joints with the dimension M12 [9].  
<sup>2</sup>Bei den zyklischen Versuchen wird die Wegamplitude  $s_E$  innerhalb einer Aufblendzeit von ca.  $t = 6.6$  s auf die Sollamplitude erhöht.

Die Auswertung der Versuche am Axialpulsler mit einer Frequenz von  $f = 0,0033$  Hz und bei kompletten Gleiten unter dem Schraubenkopf ergibt für

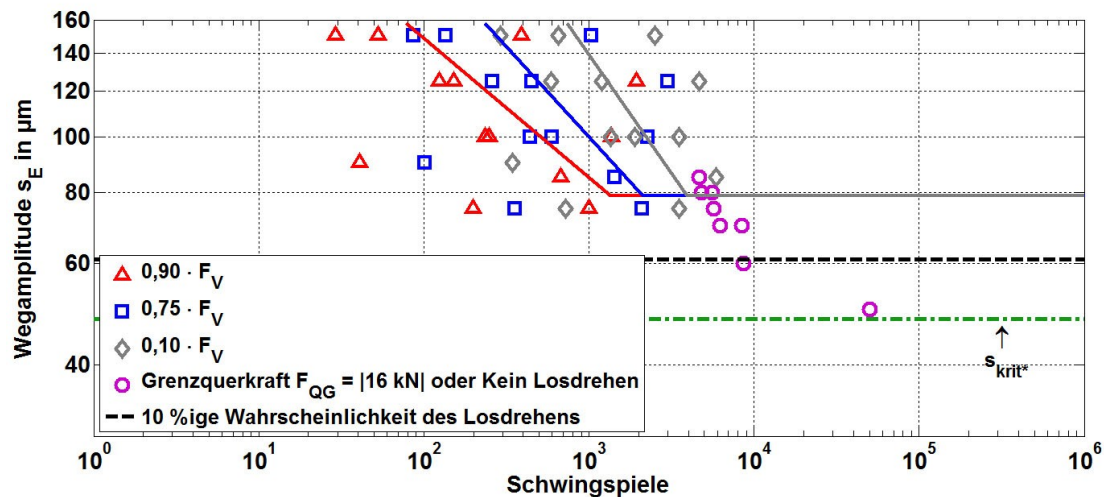
die Schraubenabmessung M12 eine gemittelte kritische Grenzverschiebung von  $s_{\text{krit}^*} = 48 \mu\text{m}$  und eine gemittelte kritische Querkraft von  $F_{Q \text{ krit}^*} = 5,9$  kN.

#### 4.3 Vergleich der kritischen Grenzverschiebung $s_{\text{krit}^*}$ mit den Grenzkurven aus zyklischen Versuchen am Axialpulsler

In Anlehnung an die Auswertesystematik von Axialschwingversuchen an Schrauben nach DIN 969 werden für die Versuche der Schraubenabmessung M12 am Axialpulsler zyklische Grenzkurven für das selbsttätige Losdrehen erstellt [11], Bild 11.

Der Versuchsausgang „Kein Losdrehen“ liegt vor, wenn 50.000 Schwingspiele mit einer Restvorspannkraft von  $> 0,90 \cdot F_V$  und stagnierendem Drehwinkel  $\phi_L$  erreicht werden. Gleichartig wird der Versuchsausgang bewertet, wenn statt der 50.000 Schwingspiele die Grenzquerkraft  $F_{QG} = |16 \text{ kN}|$  erreicht wird bei einer Restvorspannkraft von  $> 0,90 \cdot F_V$  und stagnierendem Drehwinkel  $\phi_L$ .

Als Auswertekriterium für „Losdrehen“ werden jeweils drei Restvorspannkraftniveaus:  $0,90 \cdot F_V$ ,  $0,75 \cdot F_V$  und  $0,10 \cdot F_V$  verwendet. Zur Bestimmung der Losdrehneigung wird das Treppenstufenverfahren angewendet (Stufensprung von  $\Delta s_E = 5 \mu\text{m}$ )



**Bild 11.** Grenzkurven für die 50 %ige Losdrehwahrscheinlichkeit bei verschiedenen Restvorspannkraften ( $0,90 \cdot F_V$ ,  $0,75 \cdot F_V$  und  $0,10 \cdot F_V$ ) an einer Verbindung der Abmessung M12, ergänzt um die Gerade für eine 10 %ige Wahrscheinlichkeit des selbsttätigen Losdrehens, nach [9].

**Figure 11.** Limiting curves with 50 % probability of self-loosening for different residual preloads ( $0,90 \cdot F_V$ ,  $0,75 \cdot F_V$  and  $0,10 \cdot F_V$ ) on a connection of bolted joints with the dimension M12, supplemented by a dotted line for the limiting curve with 10 % probability of self-loosening, according to [9].

[11]. Es ergibt sich eine fünfzigprozentige Losdrehneigung mit  $s_{E50} = 79 \mu\text{m}$ .

In die zyklischen Grenzkurven wurde zur Orientierung die rechnerische zehnpromtente Losdrehneigung bei  $61 \mu\text{m}$  eingetragen, die mit Hilfe der fünfzigprozentigen Losdrehneigung und der erwarteten Standardabweichung bestimmt wurde [11], Bild 11. Ein Vergleich mit der ermittelten kritischen Grenzverschiebung  $s_{\text{krit}^*}$  (Kapitel 4.3) ergibt, dass sich diese unterhalb der zehnpromtente Losdrehneigung befindet.

Somit stellt die ermittelte Kenngröße der kritischen Grenzverschiebung  $s_{\text{krit}^*}$  für die Verbindung am Axialpulser eine gute konservative Abschätzung der Grenzkurve für zyklische Beanspruchung dar und kann für die Vorhersage des selbsttätigen Losdrehens bei Schraubenverbindung herangezogen werden. Insbesondere lässt sich die kritische Grenzverschiebung  $s_{\text{krit}^*}$  mit einer geringen Anzahl an Versuchen bestimmen, um eine solide Einschätzung des selbsttätigen Losdrehens zu erhalten.

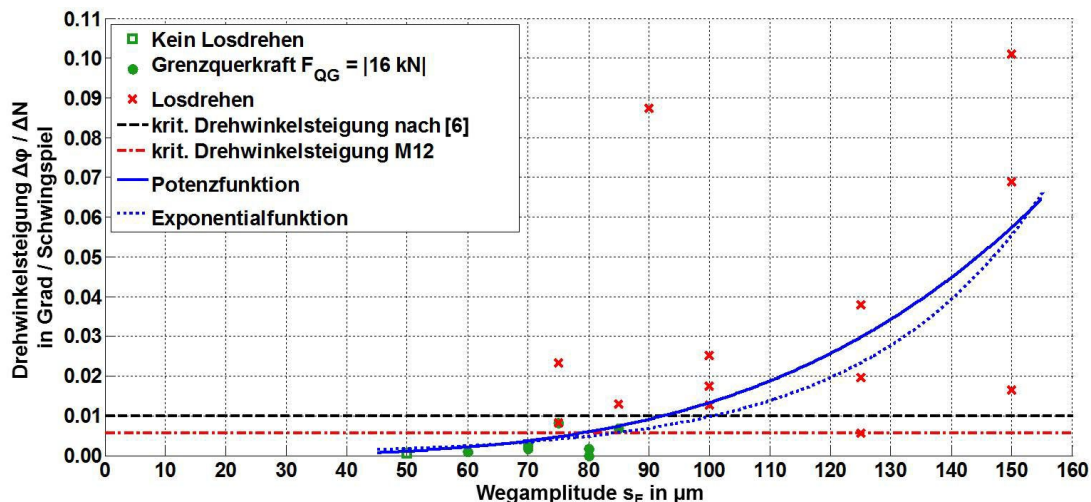
#### 4.4 Drehwinkelsteigung aus zyklischen Versuchen am Axialpulser

Für die Ermittlung der Drehwinkelsteigung  $\Delta\phi/\Delta N$  wurden jeweils die ersten 50 Schwingspiele aus den

zyklischen Versuchen bei einer Frequenz von  $f = 1 \text{ Hz}$  linearisiert, Kapitel 4.3, und die Ergebnisse zur besseren Darstellung durch eine Potenz- sowie eine Exponentialfunktion angenähert, Bild 12. Grundsätzlich zeigt sich, dass es Wegamplituden  $s_E$  gibt, bei denen es sowohl zum Ergebnis „Losdrehen“, aber auch zum Ergebnis „Kein Losdrehen“ kommen kann. Die entsprechenden Amplituden befinden sich im Übergangsbereich der zyklischen Versuche. Es wird eine starke Abhängigkeit der Drehwinkelsteigung  $\Delta\phi/\Delta N$  von der Wegamplitude  $s_E$  ersichtlich.

Die für den Vibrationsprüfstand aufgestellte Grenze einer kritischen Drehwinkelsteigung von  $\Delta\phi/\Delta N \approx 0,01^\circ/\text{Schwingspiel}$  (Kapitel 3) kann nicht zur Beurteilung der zyklischen Versuche am Axialpulser herangezogen werden, da die Grenze oberhalb der sich in den zyklischen Versuchen am Axialpulser ergebenden kritischen Drehwinkelsteigung liegt [5]. Es ist mit einem selbsttätigen Losdrehen ab einer Drehwinkelsteigung von  $\Delta\phi/\Delta N = 0,006^\circ/\text{Schwingspiel}$  zu rechnen.

Die Auswertung verdeutlicht, dass die Analyse der ersten Schwingspiele schon ausreicht, um eine Aussage zum selbsttätigen Losdrehen treffen zu können, Bild 12.



**Bild 12.** Drehwinkelsteigung  $\Delta\phi/\Delta N$  für die ersten 50 Schwingspiele über der Wegamplitude  $s_E$  bei Losdrehversuchen der Verbindung mit der Abmessung M12, zur Orientierung mit Potenz- und Exponentialfunktion, mit Daten aus [9].

**Figure 12.** Angle of rotation gradient  $\Delta\phi/\Delta N$  in the course of the first 50 cycles as a function of the displacement amplitude  $s_E$  during self-loosening tests of the connection of bolted joints with the dimension M12, for orientation with both a power and an exponential function, using data from [9].

## 5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Am Vibrationsprüfstand nach Junker wurden bereits verschiedene Methoden zur Ermittlung von kritischen Kenngrößen (kritische Grenzverschiebung, kritische Querkraft und kritische Drehwinkelsteigung) für das selbsttätige Losdrehen definiert. Einer der Unterschiede zwischen dem Vibrationsprüfstand nach Junker und dem hier vorgestellten Prüfaufbau im Axialpulser besteht in der Anzahl der Freiheitsgrade für die Belastung der Schraubenverbindung: Gegenüber der vorwiegend transversalen Verschiebung beim Vibrationsprüfstand nach Junker kommen bei der Einschraubenverbindung am Axialpulser weitere Freiheitsgrade in Abhängigkeit der Plattennachbiegigkeit hinzu. So kam es auf Grund der geringen Blechdicken von jeweils 4 mm bei der Schraubenabmessung M8 zu einer starken Verformung der Struktur, wenn eine Verschiebung in x-Richtung eingeleitet wurde. Die Verformungen bei der Schraubenabmessung M12 waren auf Grund der größeren Steifigkeit (Blechdicke jeweils 12 mm) für das optische Messsystem vernachlässigbar gering.

Die Methoden zur Ermittlung der Kenngrößen lassen sich erfolgreich auf eine Einschraubenverbindung der Abmessungen M12 und M8 am Axialpulser übertragen:

1. In Kombination mit einem optischen Messsystem ist es möglich, sowohl die globale Bewegung der Verbindung als auch die des Schraubenkopfes während des Versuchs zu erfassen und zu analysieren. Wenn keine Verformung der Verbindung vorliegt, kann durch Auswertung der Verschiebung des Schraubenkopfes  $s_{\text{rad}}$  mittels des optischen Messsystems, dem geregelten Weg  $s_E$  und der Querkraft  $F_Q$  über eine geringe Anzahl an Versuchen unmittelbar die Kenngröße der kritischen Grenzverschiebung  $s_{\text{krit}^*}$  und der kritischen Querkraft  $F_{Q \text{ krit}^*}$  ermittelt werden.
2. Die Auswertemethode für die linearisierte Drehwinkelsteigung  $\Delta\phi/\Delta N$  lässt sich mittels des optischen Messsystems auch bei Verbindungen anwenden, bei denen es zu einem Verformen der Struktur kommt.
3. Es kann zu einer Unterschätzung der Losdrehneigung kommen, wenn pauschal eine kritische Drehwinkelsteigung von  $\Delta\phi/\Delta N \approx 0,01^\circ$ /Schwingspiel angesetzt wird.

4. Alternativ ist es stets möglich, über den Weg  $s_E$ , die Querkraft  $F_Q$  und die Vorspannkraft  $F_V$  Grenzkurven an Originalbauteilen zu bestimmen, wobei hierfür eine große Anzahl an Versuchen (mehr Prüfzut) und mehr Zeitaufwand für die Versuchsdurchführung eingeplant werden müssen.

## Symbole

$E_S$	GPa	Elastizitätsmodul der Schraube
$E_P$	GPa	Elastizitätsmodul der verspannten Teile
$F$	kN	Kraft
$F_M$	kN	Montagevorspannkraft
$F_Q$	kN	Querkraft
$F_{Qb}$	kN	Querkraft in der Schraubenkopfaufgabe
$F_{QG}$	kN	Grenzquerkraft
$F_{Q \text{ krit}}$	kN	kritische Querkraft
$F_{Q \text{ krit}^*}$	kN	kritische Querkraft
$F_{Q \text{ max}}$	kN	maximale Querkraft
$F_{QT}$	kN	Querkraft in der Trennfuge
$F_V$	kN	Vorspannkraft
$I_S$	m <sup>4</sup>	Flächenträgheitsmoment
$P$	mm	Steigung des Gewindes
$T$	Nm	Anziehdrehmoment
$d$	mm	Nenn Durchmesser
$d_2$	mm	Flankendurchmesser
$d_S$	mm	Schaftdurchmesser
$l_0$	mm	Messlänge des Extensometers
$l_K$	mm	Klemmlänge
$k_{0,10 \cdot F_V}$	µm	Geradenneigung für eine Restvorspannkraft von $0,10 \cdot F_V$
$k_{0,30 \cdot F_V}$	µm	Geradenneigung für eine Restvorspannkraft von $0,30 \cdot F_V$
$k_{0,75 \cdot F_V}$	µm	Geradenneigung für eine Restvorspannkraft von $0,75 \cdot F_V$
$k_{0,90 \cdot F_V}$	µm	Geradenneigung für eine Restvorspannkraft von $0,90 \cdot F_V$
$k_{sk}$	-	Steifigkeitsfaktor
$s$	µm	Verschiebung
$s_0$	µm	Leerlaufamplitude am Vibrationsprüfstand nach Junker
$s_1$	µm	effektive Amplitude am Vibrationsprüfstand nach Junker
$s_E$	µm	Weg, der vom Extensometer vorgegeben wird
$s_{E50}$	µm	fünfzigprozentige Losdrehneigung
$s_{G \text{ th}}$	mm	theoretische Grenzverschiebung
$s_{\text{krit}^*}$	µm	kritische Grenzverschiebung

$s_{\max}$	$\mu\text{m}$ maximale Grenzverschiebung
$s_{\text{rad}}$	$\mu\text{m}$ Verschiebung des Schraubenkopfes
$s_{\text{rad, rel}}$	$\mu\text{m}$ relative Verschiebung des Schraubenkopfes
$s_{\text{rad x}}$	$\mu\text{m}$ Verschiebung des Schraubenkopfes in x-Richtung
$s_z$	$\mu\text{m}$ Verschiebung des Schraubenkopfes in z-Richtung
$t$	s Zeit
$\mu$	- Reibungszahl
$\mu_b$	- Reibungszahl in der Schraubenkopfauf- lage
$\mu_T$	- Reibungszahl in der Trennfuge
$\mu_{\text{th}}$	- Reibungszahl im Gewinde
$\phi$	$^\circ$ Drehwinkel um die z-Achse
$\phi_A$	$^\circ$ Drehwinkel beim Anziehen um die z- Achse
$\phi_L$	$^\circ$ Drehwinkel beim Losdrehen um die z- Achse
$\psi$	$^\circ$ Nickwinkel um die y-Achse
$\Delta s_E$	$\mu\text{m}$ Stufensprung

## Danksagung

Dieser Beitrag enthält Ergebnisse des Projekts „Experimentelle und numerische Identifikation der Schraubenkopfverschiebung als Eingangsgröße für eine Bewertung des selbsttätigen Losdrehens von Schraubenverbindungen“, das von der Forschungsvereinigung Automobiltechnik (FAT) gefördert wurde [9]. An dieser Stelle wird der Forschungsvereinigung Automobiltechnik herzlich dafür gedankt, dieses Vorhaben unterstützt zu haben und die Ergebnisse in diesem Beitrag veröffentlichen zu dürfen. Open Access Veröffentlichung ermöglicht und organisiert durch Projekt DEAL.

## 6 Literaturverzeichnis

- [1] Verein Deutscher Ingenieure, *VDI-Richtlinie 2230 Blatt 1*, November 2015.

- [2] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., *zurückgezogener Entwurf DIN 25201-4*, März 2010.
- [3] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., *DIN 65151*, August 2002.
- [4] K.-H. Kloos, W. Thomala, *Schraubenverbindungen*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [5] D. Koch, *Ph.D. Thesis*, Universität Siegen, Germany, 2011.
- [6] D. Gross, W. Hauger, J. Schröder, W. Wall, *Technische Mechanik 2 Elastostatik*, Springer-Verlag Berlin, 2017.
- [7] D. Koch, C. Friedrich, G. Dinger, *Erweiterte Bewertung des Ausfallrisikos von Schraubenverbindungen im Leichtbau*, 4. Landshuter Leichtbau-Colloquium (LLC), Landshut, 2009.
- [8] W. Schneider, *Ph.D. Thesis*, TH Darmstadt, Germany, 1992.
- [9] A. Eberhard, D. Neufeld, M. Klein, J. Baumgartner, M. Oechsner, T. Melz, *Experimentelle und numerische Identifikation der Schraubenkopfverschiebung als Eingangsgröße für eine Bewertung des selbsttätigen Losdrehens von Schraubenverbindungen*, Forschungsvereinigung Automobiltechnik, FAT-Schriftenreihe 311, ISSN 2192-7863, 2018.
- [10] A. Eberhard, G. Dinger, M. Oechsner, C. Friedrich, J. Beyer, *Bewertung des selbsttätigen Losdrehens hochbeanspruchter Schraubenverbindungen unter zyklisch wirkender Beanspruchung*, Vorhaben AiF IGF 16807N, IfW/MPA TU Darmstadt und Universität Siegen, 2014.
- [11] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., *DIN 969*, Beuth Verlag, Berlin, Dezember 1997.

Received in final form: May 29<sup>th</sup> 2020