



# Untersuchung zur Steigerung der Dauerfestigkeit von Wellen durch Festwalzen

Stefanie Günther<sup>1</sup> · Benjamin Muhammedi<sup>2</sup> · Thomas Werner<sup>3</sup> · Carsten Ulrich<sup>1</sup> · Berthold Schlecht<sup>1</sup> · Alexander Hasse<sup>2</sup> · Alexander Brosius<sup>3</sup>

Eingegangen: 13. November 2023 / Angenommen: 26. März 2024  
© The Author(s) 2024

## Zusammenfassung

In der Antriebstechnik bilden die Ressourceneffizienz, die Kostenreduzierung sowie die Leistungssteigerung die Hauptanforderungen. Auf Bauteilebene bedeutet dies, die Tragfähigkeit in den am stärksten beanspruchten Bereichen zu verbessern. Durch die mechanische Oberflächenverfestigung werden die Randzoneneigenschaften beeinflusst, allerdings bestehen derzeit Wissenslücken hinsichtlich der Auswirkung der Bearbeitung auf die resultierende Tragfähigkeit. Derzeit ist keine Methode bekannt, wie der Einfluss der Fertigungsprozessparameter im Tragfähigkeitsnachweis berücksichtigt werden kann. An dieser Stelle setzt ein derzeit laufendes Forschungsvorhaben an. Im experimentellen Teil werden Treppenstufenversuche an unverfestigten und festgewalzten Bauteilen durchgeführt. Das Versuchsprogramm umfasst Kleinproben, Wellen und Pressverbindungen. Verschiedene Kerbformen, Festwalzparameter und Werkstoffe spannen ein umfangreiches Prüfprogramm auf. Um die Tragfähigkeitssteigerung durch Festwalzen vollumfänglich bewerten zu können, werden neben den zyklischen Ermüdungsversuchen folgende Einflussfaktoren untersucht:

- Oberflächenrauheit, welche durch Festwalzen in der Regel verringert wird
- Eigenspannungen aus dem Walzprozess
- Verfestigungseffekte des Materials aus der Kaltumformung

Die erzielten experimentellen Dauerfestigkeitssteigerungen betragen bis zu 63 %. In Kombination mit den Erkenntnissen aus den Zusatzuntersuchungen zeigt sich, dass die Verwendung eines pauschalen Verfestigungsfaktors nicht zufriedenstellend ist. Ein Vergleich der Verfestigungsfaktoren nach DIN 743 und FKM-Richtlinie zeigt die Unsicherheiten in der Auslegung. Da Eigenspannungen in den Nennspannungskonzepten DIN 743 und FKM-Richtlinie nicht berücksichtigt werden, ist das Ergebnis der linear-elastischen Vergleichsspannungsamplitude von 1392 MPa in der Kerbe nicht erfassbar. Hierbei wird das Potenzial des Festwalzens deutlich.

---

✉ Stefanie Günther  
stefanie.guenther@tu-dresden.de

Benjamin Muhammedi  
benjamin.muhammedi@mb.tu-chemnitz.de

Thomas Werner  
thomas.werner1@tu-dresden.de

Carsten Ulrich  
carsten.ulrich@tu-dresden.de

Berthold Schlecht  
berthold.schlecht@tu-dresden.de

Alexander Hasse  
alexander.hasse@mb.tu-chemnitz.de

Alexander Brosius  
alexander.brosius@tu-dresden.de

<sup>1</sup> Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion, Fakultät Maschinenwesen, Technische Universität Dresden, Münchner Platz 3, 01187 Dresden, Deutschland

<sup>2</sup> Institut für Konstruktions- und Antriebstechnik, Fakultät für Maschinenbau, Technische Universität Chemnitz, Reichenhainer Straße 70, 09126 Chemnitz, Deutschland

<sup>3</sup> Institut für Fertigungstechnik, Fakultät Maschinenwesen, Technische Universität Dresden, George-Bähr-Straße 3c, 01069 Dresden, Deutschland

## Investigations into increasing the fatigue strength of shafts by deep rolling

### Abstract

In drive technology, resource efficiency, cost reduction and increased performance are the main requirements. At component level, this means strengthening the fatigue strength in the critical areas. Mechanical surface hardening influences the boundary layer properties, but there are currently gaps in knowledge regarding the effect of machining on the resulting load capacity. There is currently no known method of how the influence of the manufacturing process parameters can be taken into account in the fatigue strength assessment. This is where an ongoing research project comes in. In the experimental part, staircase tests according to Hück are being carried out on unhardened and deep-rolled components. The test program includes small specimens, shafts and press fits. Different notch shapes, deep rolling parameters and materials form a comprehensive test program. In order to be able to fully evaluate the increase in fatigue strength by deep rolling, the following influencing factors are analysed in addition to the cyclic fatigue tests

- Surface roughness, which is generally reduced by deep rolling
- Residual stresses from the rolling process
- Hardening effects of the material from cold forming

The experimental fatigue strength increases achieved were up to 63%. In combination with the findings from the additional tests, it is clear that the use of a generalised hardening factor is not satisfactory. A comparison of the strengthening factors according to DIN 743 and the FKM guideline shows the uncertainties in the design. As residual stresses are not taken into account in the nominal stress concepts of DIN 743 and FKM guideline, the result of the linear elastic equivalent stress amplitude of 1392MPa in the notch cannot be determined. The potential of deep rolling becomes clear here.

## 1 Einleitung und Problemstellung

In der Antriebstechnik stellen Wellen das zentrale Maschinenelement dar, welches die Leistungübertragung sicherstellt und hinsichtlich Masse, Fertigungs- und Auslegungsaufwand einen der größten Anteile des Gesamtgetriebes darstellt. Dadurch können Weiterentwicklungen in der Vorhersage der Tragfähigkeit einen großen Beitrag zur Kos-

tenreduzierung, Ressourcenschonung und CO<sub>2</sub>-Bilanz leisten. Durch eine Dauerfestigkeitssteigerung sind günstigere Werkstoffe, ein geringerer Materialeinsatz und demnach ein geringeres Zerspanungsvolumen realisierbar. Um diese Effekte auch in der Praxis umzusetzen, ist neben der Grundlagenforschung und zugehörigen umfangreichen Versuchen auch ein wirkungsvoller Transfer in die Auslegungspraxis der Konstrukteure notwendig. Bei Verfahren der mechanischen Oberflächenverfestigung müssen somit sowohl wissenschaftliche Grundlagen gelegt, als auch der zugehörige Fertigungsprozess beschrieben, abgesichert und in einen handhabbaren Tragfähigkeitsnachweis eingebracht werden.

Im vorliegenden Beitrag werden am Beispiel von Kleinproben aus C45+QT die Potenziale der Tragfähigkeitssteigerung unter Umlaufbiege- und Torsionsbeanspruchung aufgezeigt und Einflüsse wie Geometrie, Eigenspannungen und Härteverlauf detailliert analysiert. Die Versuchsdaten werden interpretiert und mit den Sicherheiten bzw. Auslastungsgraden verschiedener Auslegungsrichtlinien abgeglichen. Die hieraus gewonnenen Erkenntnisse dienen der Verbesserung der Abschätzung der Tragfähigkeitsreserven. In weiteren Schritten sind diese Zusammenhänge in den Tragfähigkeitsnachweis von Wellen und Welle-Nabe-Verbindungen zu integrieren (Abb. 1).

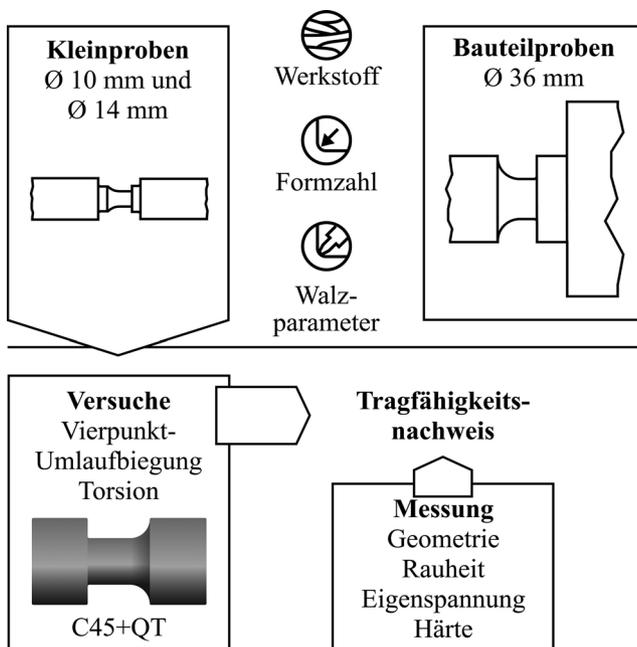
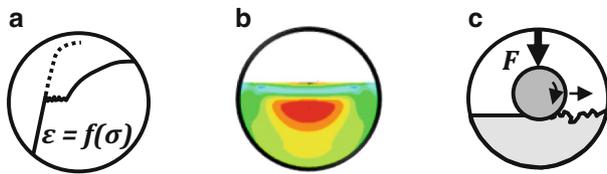


Abb. 1 Projektumfang und Präzisierung Versuchsgegenstand



**Abb. 2** Einflussgrößen auf den Effekt mechanischer Oberflächenverfestigung: **a** Verfestigung, **b** Eigenspannung, **c** Aufrauung/Einebnung [19]

## 2 Grundlagen

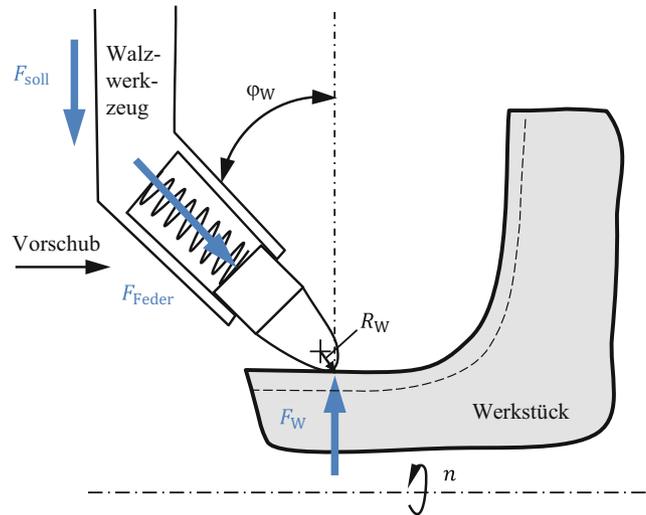
### 2.1 Einflussfaktoren

Die Tragfähigkeitssteigerung durch Festwalzen entsteht durch die mechanische Verfestigung der Randschicht [10, 11]. Ihr Effekt auf die Tragfähigkeit ist dabei maßgeblich auf die drei in Wechselwirkung miteinander stehenden Einflussgrößen nach Abb. 2 zurückzuführen. Durch die Verfestigung in der Randschicht wird die Festigkeit lokal gesteigert und die zyklische Spannungs-Dehnungskurve verändert. Die Einbringung von Druckeigenspannungen bewirkt eine Tragfähigkeitssteigerung. Eine Aufrauung der Oberfläche wirkt sich eher tragfähigkeitsmindernd aus, wohingegen eine Glättung der Oberfläche zur Steigerung der Tragfähigkeit beiträgt [19].

### 2.2 Prozesskinematik

Nachdem die Drehbearbeitung abgeschlossen ist, schließt sich in der gleichen Aufspannung das Festwalzen an, um etwaige zusätzliche Rundlauffehler bzw. Abweichungen der Walzkraft zu vermeiden. Die mechanische Verfestigung wird mittels eines rollenförmigen Werkzeuges durchgeführt. Die Rolle ist im Werkzeughalter gelagert, welcher gerade ( $\varphi_W = 0^\circ$ ) oder im Winkel  $\varphi_W = 45^\circ$  angestellt ist. Zuerst wird das Werkstück in eine Drehbewegung mit der an der Drehmaschine eingestellten Drehzahl  $n$  versetzt. Anschließend wird das Walzwerkzeug zu dem Werkstück zugestellt. Abschließend wird der eingestellte Vorschub  $f$  und die eingestellte Festwalzkraft  $F_{soll}$  aufgebracht. Bei gekerbten Geometrien beginnt die Walzbearbeitung im ungekerbten Bereich und endet an der Außenkante des Wellenabsatzes, siehe Abb. 3.

Durch die geometrischen und kinematischen Bedingungen ändert sich während der Bearbeitung in der Kerbe das Kontaktellipsoid bzw. der Anschmiegungsgrad zwischen Walzrolle und Werkstück. Die wirkende Kraft im Kerbgrund wird zeitgleich reduziert. Im glatten Bereich wird die Walzkraft vollständig aufgebracht und die Kontaktfläche bildet sich entsprechend der lokalen Verformung aus. Bei



**Abb. 3** Schema der Kinematik und Prozessgrößen im Walzkontakt

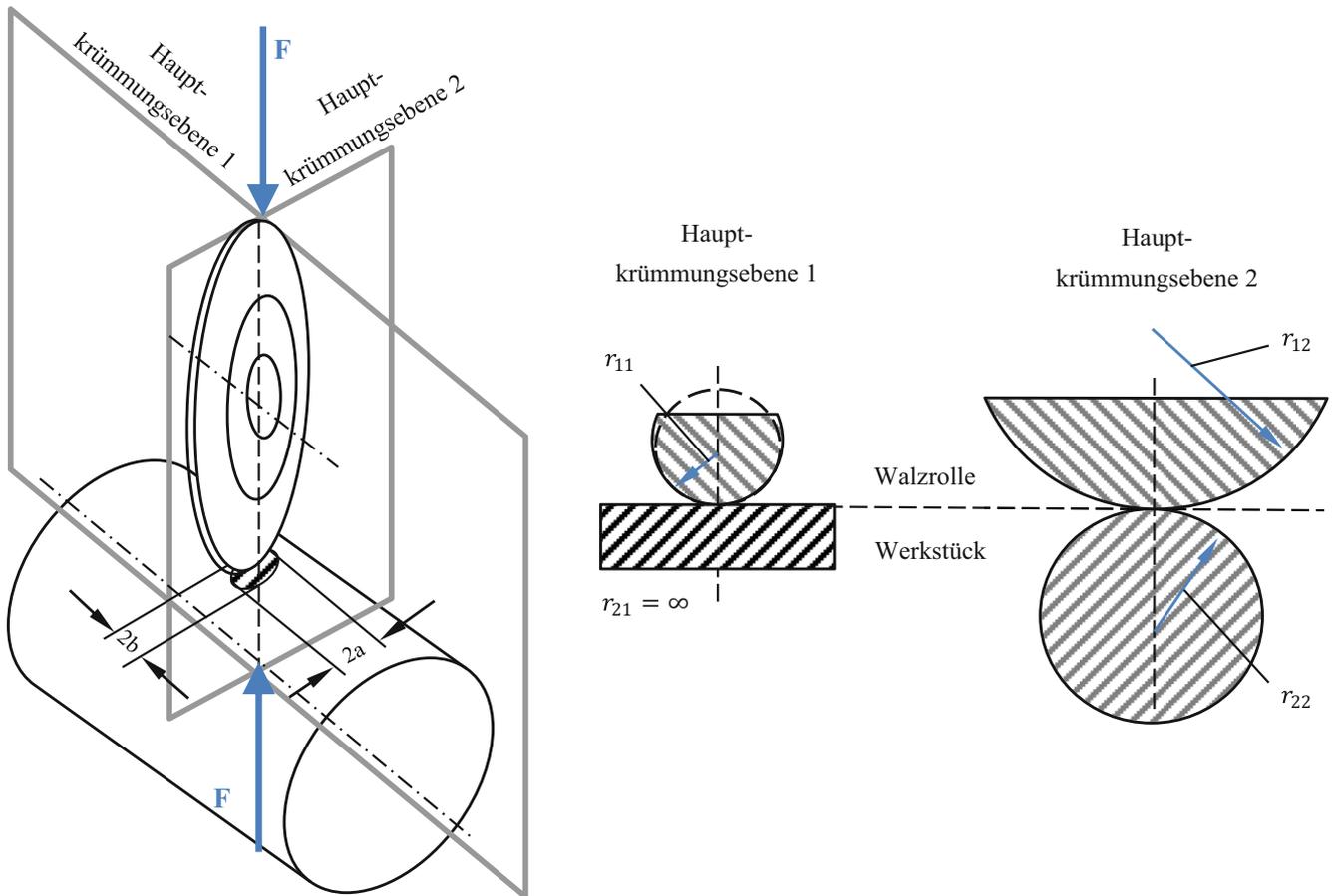
Bearbeitung der Kerbe vergrößert sich die Kontaktfläche und die wirkende Walzkraft wird minimiert:

$$F_W = \frac{F_{Feder}}{\cos(\varphi_W)} \tag{1}$$

### 2.3 Hertzische Pressung im Kontakt zwischen Walzwerkzeug und Werkstück

Die sich für den Kontaktfall ergebende Hertzische Pressung ist von den spezifischen Prozessgrößen Walzkraft  $F_W$ , Vorschub  $f$  sowie den Elastizitätsmoduln (E-Moduln) des Werkzeuges und des Werkstückes abhängig. Der Kontakt beim Festwalzen des rollenförmigen Werkzeuges als Torus mit der Welle kann auf das Modell Fläche – Ellipsoid approximiert werden. Das Kontaktellipsoid erscheint im Grundriss elliptisch und weist einen ersten Halbmesser  $b$  und einen zweiten Halbmesser  $a$  auf. Abb. 4 stellt die geometrischen Verhältnisse der Kontaktsituation schematisch dar.

In der Hauptkrümmungsebene 1 wird der Radius des ungekerbten Bereiches der Welle in axialer Richtung als unendlich groß betrachtet. In der Kerbe ist der konkave Radius gleich dem Kerbradius. Der konvexe Radius des Werkzeuges entspricht dem Rollenradius  $r_{11} = R_W$  (in den beschriebenen Versuchen beträgt  $R_W = 0,3 \text{ mm}$ ). Hauptkrümmungsebene 2 bildet die Kontaktsituation in Umfangsrichtung der Welle ab. Hierbei ist der Wellenradius und der Radius der Walzrolle maßgebend, wobei diese sowohl im Falle der schräg auf der Welle aufliegenden torusförmigen Walzrolle (vgl. auch Abb. 3) als auch im Kerbradius beide entsprechend der momentanen Kontaktverhältnisse korrigiert werden müssen. Die entstandene Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Welle entspricht im Hertzischen Ersatzmodell einer Ellipse mit den Halbachsen  $a$  und  $b$ . Bei



**Abb. 4** Kontakt von Werkstück (Welle) und Werkzeug (Rolle) mit den Hauptkrümmungsebenen und Krümmungsradien

unterschiedlichen Werkstoffen mit unterschiedlichem Materialverhalten, sind zudem ein reduzierter Ersatz-E-Modul  $E$ , die Querkontraktionszahl  $\nu_i$ , die Hertzschen Beiwerte  $\xi, \eta, \frac{2k}{\pi\xi}$  und die Ersatzkrümmung  $\sum \rho$  zu verwenden:

$$\frac{1 - \nu^2}{E} = \frac{1 - \nu_1^2}{2 \cdot E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{2 \cdot E_2} \tag{2}$$

$$\sum \rho = \frac{1}{r_{11}} + \frac{1}{r_{12}} + \frac{1}{r_{21}} + \frac{1}{r_{22}} \tag{3}$$

$$2 \cdot a = 2 \cdot \xi \cdot \sqrt[3]{\frac{3 \cdot F_W \cdot (1 - \nu^2)}{E \cdot \sum \rho}} \tag{4}$$

$$2 \cdot b = 2 \cdot \eta \cdot \sqrt[3]{\frac{3 \cdot F_W \cdot (1 - \nu^2)}{E \cdot \sum \rho}} \tag{5}$$

Die Kontaktfläche bei Punktberührung in Form einer Ellipse hat folgenden Flächeninhalt  $A_P$ :

$$A_P = \pi \cdot a \cdot b = \pi \cdot \xi \cdot \eta \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{3 \cdot F_W \cdot (1 - \nu^2)}{E \cdot \sum \rho}\right)^2} \tag{6}$$

Die Punktberührung führt zur Annäherung bzw. Verformung der beiden Körper:

$$\delta = 1,5 \cdot \frac{2 \cdot k}{\pi \cdot \xi} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{F_W^2 \cdot (1 - \nu^2)^2 \cdot \sum \rho}{3 \cdot E^2}\right)} \tag{7}$$

Die maximale Flächenpressung bei Punktberührung liegt in der Mitte der Druckellipse und beträgt das 1,5-fache der mittleren Pressung [15].

$$p_{\max} = \frac{1,5 \cdot F_W}{A_P} \tag{8}$$

Für den glatten Bereich der Welle und dem Zweck einer ersten Abschätzung, ist es ausreichend gemäß Gl. 7 die

**Tab. 1** Ergebnisse der Zugversuche zum Werkstoff C45+QT

$R_m$ [MPa]	$R_{p0.2}$ [MPa]	$A_g$ [%]	$E$ [GPa]
780	673	8,8	211

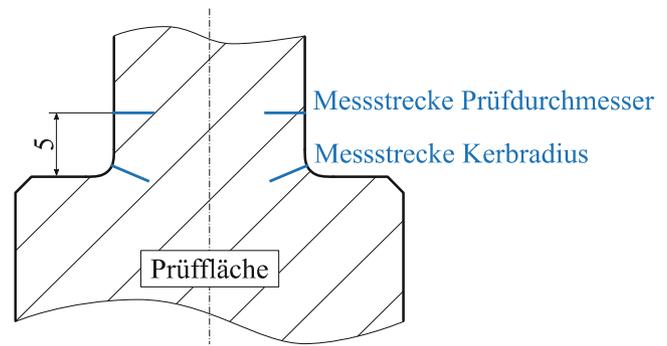
Technische Spannung/Dehnung; Mittelwerte von acht Zugversuchen (DIN 50125:2016 – A8×40), Entnahmeort: Mitte, längs [5]

maximale (theoretische) Hertzsche Pressung zu ermitteln, insbesondere wenn zulässige Beanspruchbarkeitskennwerte zum Vergleich vorliegen [15]. Demnach sind auch Eigenstressungen mit diesem Modell nicht realistisch abschätzbar.

### 3 Experimentelle Untersuchungen

In Bezug auf das umfangreiche Versuchsprogramm, vgl. Abb. 1, wird der Fokus in diesem Beitrag zunächst auf den Werkstoff C45+QT an Proben mit 10 und 14mm Durchmesser gelegt, an denen die experimentellen Untersuchungen bereits vollständig abgeschlossen sind. Zur Ermittlung der Dauerfestigkeit wurden Treppenstufenversuche mit einer Grenzlastspielzahl von  $6 \cdot 10^6$  bei einem Spannungsverhältnis von  $R = -1$  durchgeführt. Die Auswertung gemäß DIN 50100 basiert auf der logarithmischen Normalverteilung [4]. Die Ergebnisse der Zugversuche sind in Tab. 1 aufgeführt.

Jede Probe wurde vor dem Versuch vermessen. Die Mittelwerte der gemessenen Geometrieparameter sowie die daraus mittels der Finite-Elemente-Methode ermittelten Formzahlen und die werkstoffspezifisch für C45+QT genutzten Prozessdaten Walzkraft  $F_w$  und Vorschub  $f$  sind in Tab. 2 aufgeführt. Es wurde eine Walzrolle aus gehärtetem Stahl verwendet. Die taktil vermessenen Rauheiten auf dem Prüfdurchmesser vor und an der Stirnfläche oberhalb des Kerbradius sind näherungsweise gleich. Es wird daher angenommen, dass der gemessene Rauheitswert auch für den Kerbgrund gilt. Beim Festwalzen ist die Einebnung oder Aufrauhung ein prozessbegleitendes Ergebnis. Im vorliegenden Anwendungsfall werden beim Festwalzen die Rauheitsspitzen aus der Drehbearbeitung durch



**Abb. 5** Kennzeichnung der Messstrecken zur Mikrohärtemessung am Längsschliff

das Festwalzen eingeebnet. Es verbessert sich die Oberflächenqualität, welche im Tragfähigkeitsnachweis bspw. nach DIN 743 durch den Oberflächeneinflussfaktor  $K_{F_0}$  widergespiegelt wird [3]. Die Härtemessung ist über HV 10 (Prüfkraft= 10kp) als Wareneingangsprüfung für die grobe Unterscheidung des Verfestigungszustandes eines Bauteiles hinreichend. Soll jedoch der detaillierte Bereich der Verfestigung in der Randzone beschrieben werden, so ist eine Mikrohärtemessung HV 0,005 (Prüfkraft=0,005 kp) notwendig.

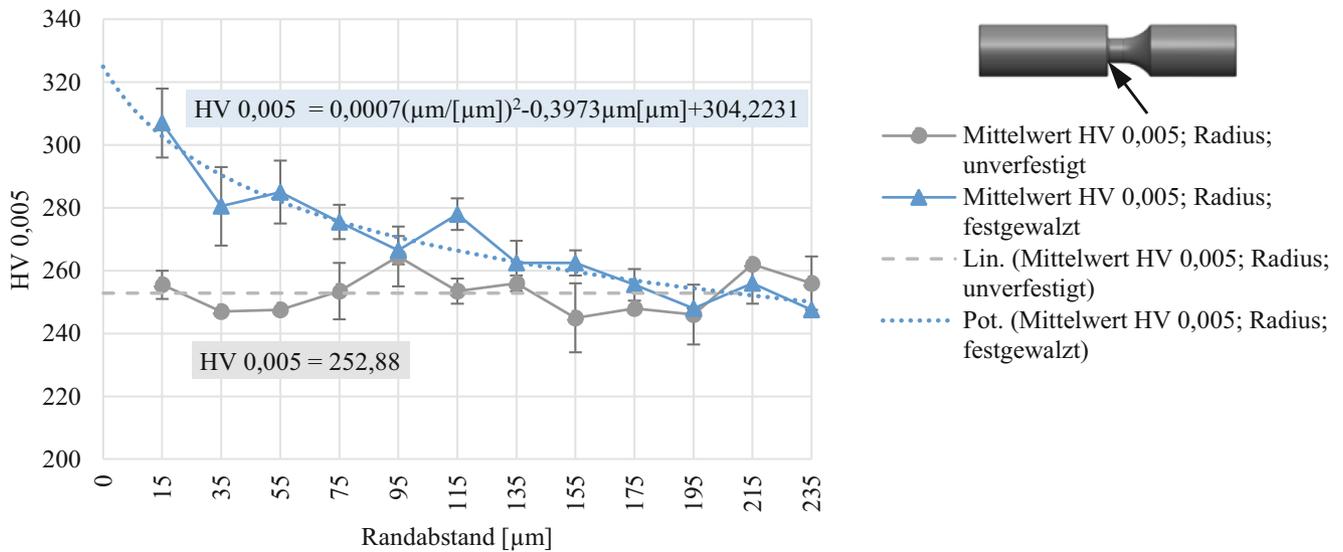
#### 3.1 Mikrohärt

Festwalzen kann eine Steigerung der Härte in der Randzone bewirken, wobei der Einfluss der Prozessstellgrößen dem auf die Eigenspannungen gleicht [14]. Für eine umfassende Härteuntersuchung in und außerhalb der Kerbe werden die Proben im Längsschliff, nach Abb. 5 präpariert. Je Längsschliff werden vier Messstrecken erzeugt: Zwei davon am Prüfdurchmesser und zwei in der Kerbe am möglichen Anrissort. Zur statistischen Absicherung der Ergebnisse wurden drei Härteverläufe entlang einer Richtung je Zustand gemessen. Die Prüfkraft wird so gering gewählt, damit der erste Messpunkt in der Randzone so dicht wie möglich eingebracht werden kann und somit die Bereiche der Randzone unmittelbar unter der Oberfläche mit einbezogen werden können. Die Messungen sind nach Vickers HV 0,005 nach

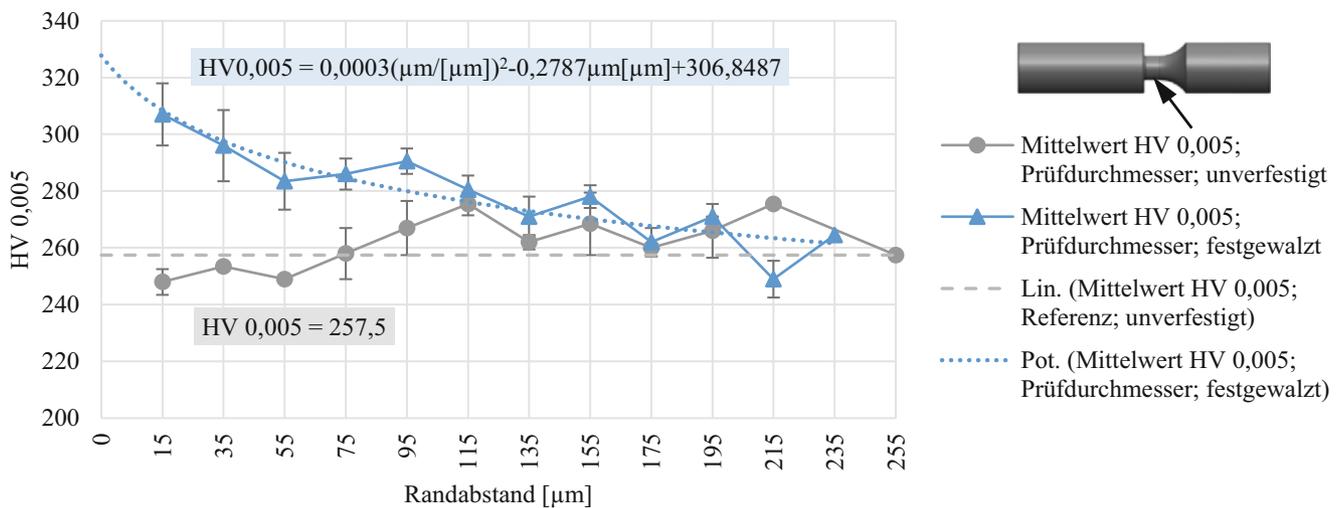
**Tab. 2** Geometrie, Rauheit und Prozessdaten zum Festwalzen der Kleinprobe C45+QT,  $d = 14$  mm

Vierpunkt-Umlaufbiegung und Torsion													
	$\bar{d}$	$\bar{D}$	$\bar{r}$	$\alpha_{\sigma_z}$	$\alpha_{\sigma_\varphi}$	$\alpha_\tau$	$\bar{R}_Z$	Vickers-Härte	$F_w$	$f$	$r_{11}$	$r_{12}$	$\varphi_w$
	[mm]	[mm]	[mm]				[ $\mu$ m]	$\bar{H}_{HV}$	[N]	[ $\mu$ m/U]	[mm]	[mm]	
Unverfestigt	14,0042	29,9874	0,4142	2,85	0,79	1,9	3,73	246 HV 10	–	–	–	–	–
Festgewalzt	14,0033	29,9863	0,4532	2,75	0,75	1,85	2,2	307 HV 0,005 (Rand) 255 HV 0,005 (Kern)	204	35	0,3	20	45°

Die Formzahlen für Biegung ( $\alpha_{\sigma_z}, \alpha_{\sigma_\varphi}$ ) und für Torsion ( $\alpha_\tau$ ) wurden mit Hilfe der FEM für die gemessenen Durchmesser ermittelt.



**Abb. 6** Gemessene Mikrohärt von unverfestigter und festgewalzter Probe des Werkstoffes C45+QT, Messstelle: Kerbe, Messung an 2 Kleinproben mit 4 Messstellen



**Abb. 7** Gemessene Mikrohärt von unverfestigter und festgewalzter Probe des Werkstoffes C45+QT, Messstelle: Prüfdurchmesser, Messung an 2 Kleinproben mit 4 Messstellen

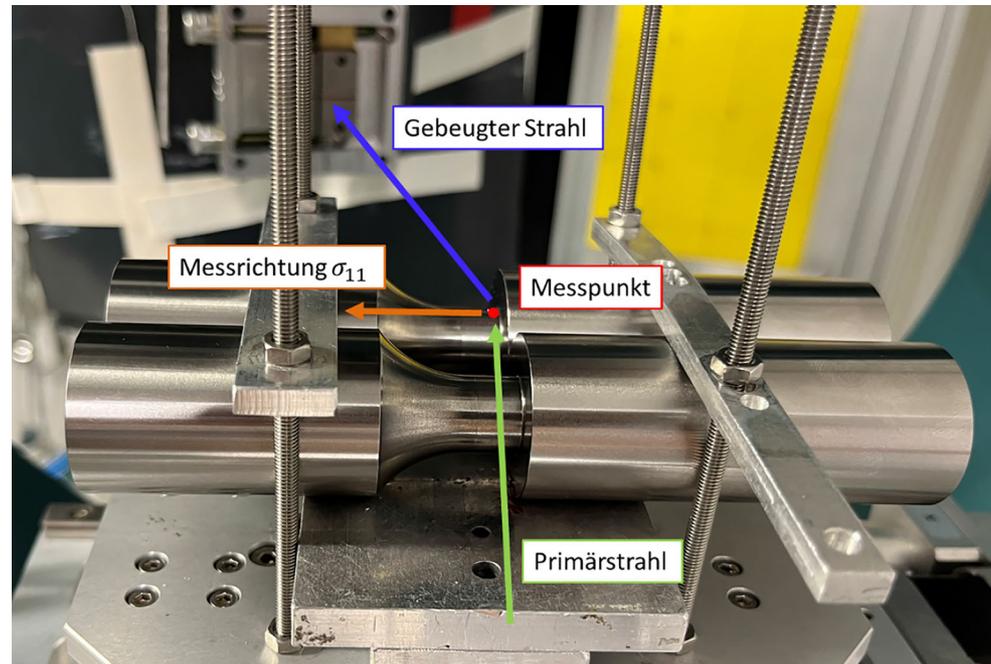
DIN EN ISO 6507 [6] mit einem Randabstand von 15 μm und einem Messpunkt Abstand von 20 μm ausgeführt. Die maximale Eindruckdiagonale am Prüfkörper beträgt 6 μm.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Mikrohärtmessungen für den Werkstoff C45+QT im unverfestigten und festgewalzten Zustand erläutert. Bei oberflächennahen Mikrohärtmessungen ist zu beachten, dass je größer der Randabstand nach Eindruckdiagonale gewählt werden muss, desto schlechter ist der Effekt der Härtesteigerung nachweisbar. Die Größe der Eindruckdiagonale ist werkstoffabhängig. Die Prüfkraft sollte so klein wie möglich gewählt werden, um Verformungen des Eindruckes in

der Randzone zu vermeiden und eine Auswertbarkeit zu gewährleisten.

Abb. 6 zeigt die Ergebnisse an der Messstelle im Kerbradius. Die Randzonenhärt der unverfestigten Probe beträgt im Mittel 253 HV 0,005. Der Tiefenverlauf der Mikrohärt im unverfestigten Zustand wird als näherungsweise homogen betrachtet, wohingegen durch das Festwalzen ein deutlicher Härteabfall in Tiefenrichtung vorliegt. Dies ist für die Belastbarkeit im Einsatz förderlich, da das Bauteil hierdurch einen duktilen Kern und eine hohe Härte in der Randzone aufweist. Die Messwerte für die festgewalzte Probe wurden als Potenzfunktion mit einem Bestimmtheitsgrad von 0,8898 regressiert. Der extrapolierte Oberflächen-

**Abb. 8** Kennzeichnung des Messpunktes mit Beugungsgeometrie und Wirkrichtung der Eigenspannungskomponente (Axialrichtung) [7]



härtewert fließt in den Tragfähigkeitsnachweis ein, da der Nachweisort an der Oberfläche liegt. Die Härte an der Bauteilaußenseite beträgt 304 HV 0,005. Im randzonennahen Bereich wird demnach eine Härtesteigerung von 20 % erzielt.

An der Messstelle des Prüfdurchmessers ( $d = 14$  mm) wird eine ähnliche Härtesteigerung im oberflächennahen Bereich von 19 % erzielt, siehe Abb. 7. Die unverfestigte Probe weist im Mittel eine Härte von 258 HV 0,005 auf. Die Regressionsformeln sind gleich gewählt. An der festgewalzten Probe beträgt die Mikrohärtigkeit in der Randzone 307 HV 0,005.

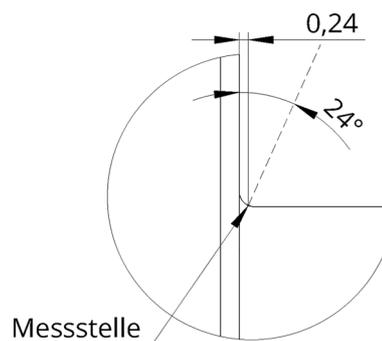
### 3.2 Eigenspannungen

Ein Ziel des Festwalzens ist die Einbringung von Druckeigenspannungen in die Randzone zur Steigerung der Dauerfestigkeit. Der Messaufbau zur röntgenografischen Aufnahme der Eigenspannungen in Axialrichtung ist in Abb. 8 dargestellt.

Detaillierter zeigt Abb. 9 den Messpunkt im Kerbradius  $r = 0,4$  mm. Die Grundlage zur Ermittlung des Messpunktes für Eigenspannungen bilden Finite Elemente Analysen, um die kritische Stelle in der Kerbe zu lokalisieren.

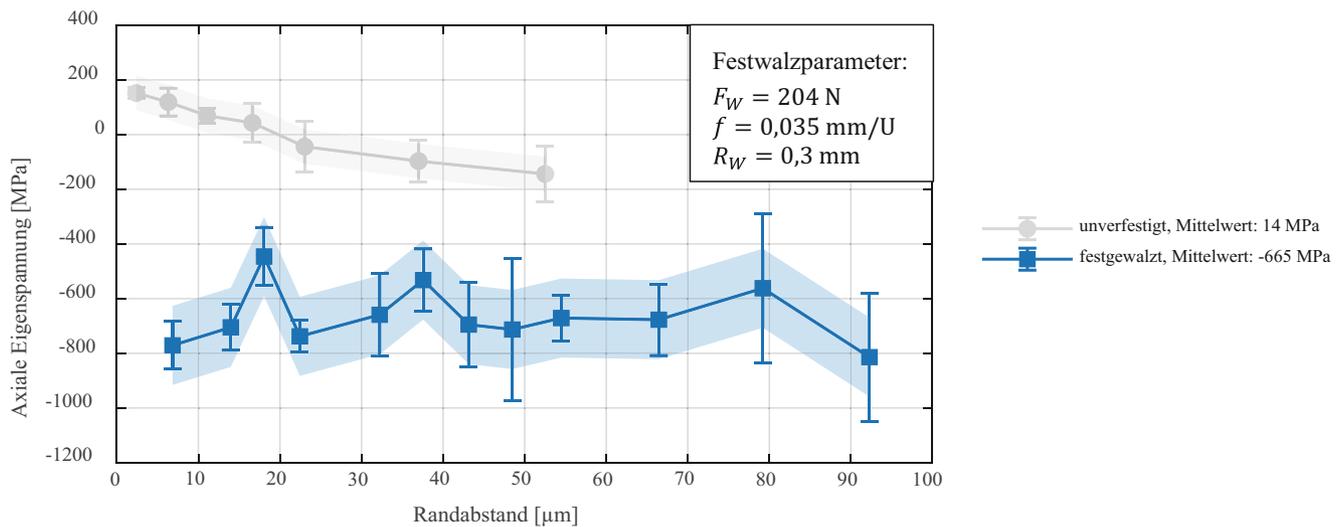
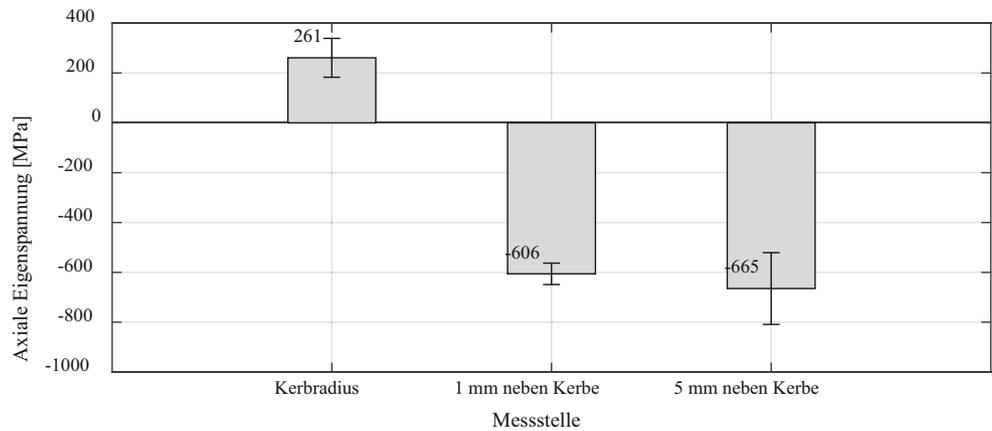
Abb. 10 zeigt die Ergebnisse der röntgenografischen Messungen in schrittweiser Annäherung an den Kerbradius anhand der festgewalzten C45+QT Kleinprobe. An der Messstelle bei 5 mm Abstand von der Kerbe wird im Mittel eine axiale Eigenspannung von  $-665$  MPa bei einer Standardabweichung von 144 MPa gemessen. An der Messstelle bei 1 mm Abstand zur Kerbe liegen  $-606$  MPa axiale

Eigenspannungen vor. Direkt im Kerbradius ( $r = 0,4$  mm), gemäß Abb. 9, liegen Zugeigenspannungen vor. Es wurde ein 0,3 mm Kollimator verwendet [7]. Breidenstein stellt fest, dass durch den Wellenabsatz der gekippte Röntgenstrahl abgeschattet wird und die Messung als ungültig zu werten ist. Dies zeigen vor allem zerstörende Zusatzmessungen gekerbter Bauteile: Die betragsmäßig größten Eigenspannungen liegen auf dem Prüfdurchmesser vor (Messstelle Abstand 5 mm) und bei Annäherung an den Kerbgrund verringern sich die axialen Druckeigenspannungen [2]. Je nach verwendetem Kollimatordurchmesser sind nur noch geringe Druckeigenspannungen bis hin zur Spannungsfreiheit in der Kerbe vorhanden. Da die zerstörungsfreie Messung im Kerbradius ungültig ist, wird für die folgenden Berechnungen der Eigenspannungswert bei 5 mm Abstand von der Kerbe verwendet. Unter Berücksichtigung der Prozesskinematik und der resultierenden



**Abb. 9** Messstelle der axialen Eigenspannungen im Kerbradius  $r = 0,4$  mm am Anrissort, zerstörungsfrei

**Abb. 10** Eigenspannungsmessung in schrittweiser Annäherung an die Kerbe, Kleinprobe C45+QT,  $d = 14$  mm,  $r = 0,4$  mm [7]



**Abb. 11** Axialer Eigenspannungstiefenverlauf einer Kleinprobe C45+QT,  $d = 14$  mm, festgewalzt, Messstelle: 5 mm neben Kerbe

Verringerung der Walzkraft vom ungekerbten Bereich bis zum Kerbradius tritt unvermeidlich eine Unschärfe im Tragfähigkeitsnachweis auf.

In Abb. 11 ist der Eigenspannungstiefenverlauf der Kleinprobe C45+QT im unverfestigten und festgewalzten Zustand dargestellt. Im unverfestigten Zustand beträgt die axiale Eigenspannung im Mittel 14 MPa unter Annahme einer Normalverteilung bei einer Standardabweichung von 63 MPa. Durch das Festwalzen werden Druckeigenspannungen im Mittelwert von  $-665$  MPa (Standardabweichung: 144 MPa) in die Randzone eingebracht. Ähnliche Tendenzen zeigen sich für die hier nicht im Detail vorgestellten Klein- und Bauteilproben.

Neben den umfangreichen Eigenspannungsmessungen an der Kleinprobe C45+QT mit Kerbradius  $r = 0,4$  mm, wurden weitere Proben (Werkstoff: 42CrMo4+QT) mit größerem Kerbradius  $r = 1$  mm zerstörungsfrei untersucht. In Abb. 12 sind die Ergebnisse für die Messpunkte 5 mm neben der Kerbe und des Kerbradius dargestellt. Bei größeren Kerbradien sind keine Abschattungseffekte durch den Wel-

lenabsatz zu erwarten und die Messung kann störungsfrei durchgeführt werden. Am Messpunkt 5 mm neben der Kerbe treten betragsmäßig deutlich höhere Eigenspannungen ( $-1343$  MPa) als in der Kerbe ( $-625$  MPa) auf. Die unterschiedlichen Werte sind auf die Prozesskinematik bzw. die Änderung des Überdeckungsgrades zurückzuführen. Der Überdeckungsgrad beschreibt den prozentualen Anteil der Oberfläche, der nach einer Umdrehung erneut festgewalzt wird. Demnach würde sich bei einem Überdeckungsgrad von 100 % die Rolle ohne Vorschub auf der Oberfläche drehen. Für den Überdeckungsgrad von 0 % wird kein Teil der Oberfläche bei der darauffolgenden Umdrehung wiederholt gewalzt. Im vorliegenden Anwendungsfall sind die Kraft- und Überdeckungsverhältnisse im ungekerbten Bereich optimal eingestellt. Beim Eintauchen der Festwalzrolle in den Kerbgrund wirkt das federgelagerte Werkzeug eine geringere Walzkraft auf die zu bearbeitende Oberfläche aus, da der Prozess weggesteuert ist. Daraus resultiert in der Kerbe eine geringere Pressung und demnach Eigenspannung.

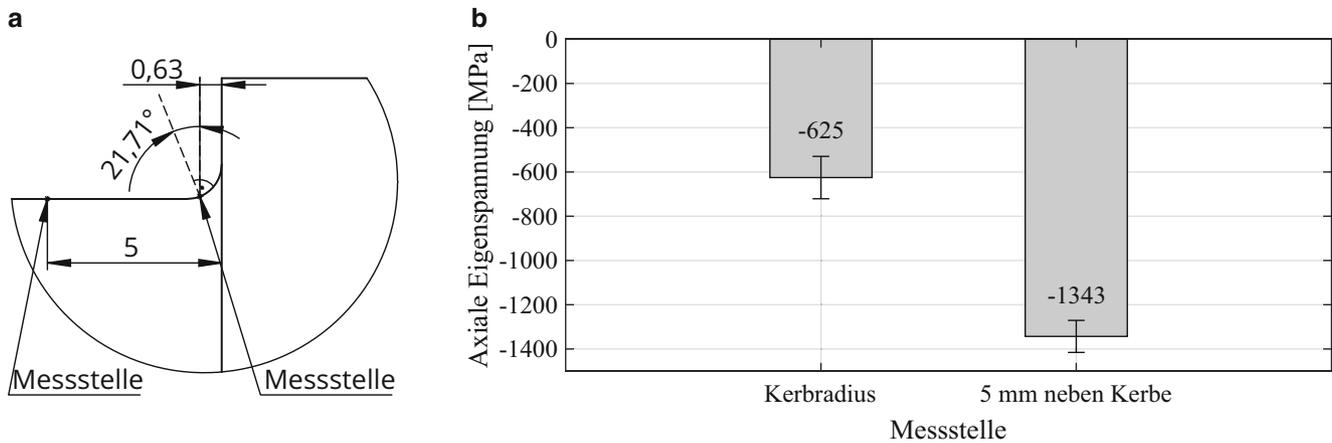


Abb. 12 Eigenspannungsmessung Kleinprobe 42CrMo4+QT,  $d = 10$  mm,  $r = 1$  mm, **a** Messstellen, **b** Ergebnisse [8]

Für Kleinproben wird festgestellt, dass röntgenografische Messungen an kleinen Kerbradien nicht abschattungsfrei durchgeführt werden können. Demnach muss für den Tragfähigkeitsnachweis der Messwert von 5 mm Abstand der Kerbe eingesetzt werden. Für größere Kerbradien sind Eigenspannungsmessungen im Kerbradius störungsfrei möglich. Aus dem Vergleich zwischen den Messstellen, kann rein simulativ auf den Eigenspannungswert im kleinen Kerbradius geschlossen werden.

Weiterhin ist zu erkennen, dass die Verläufe der Eigenspannungen und Härte nicht miteinander korrelieren. Dieser Effekt wird am Vergütungsstahl C45+QT demonstriert. Die Härte wird im Tiefenverlauf deutlich gemindert, während die Eigenspannung im Messbereich weitgehend konstant ist. Bei wesentlich härteren Werkstoffen, wie z. B. einem Einsatzstahl, wird jedoch die Mikrohärtigkeit in der Randschicht weniger gesteigert und es kann ein deutlich höherer Gradient der Eigenspannung eingebracht werden. Zudem stellt der Messbereich der Eigenspannung eine technologische Grenze dar.

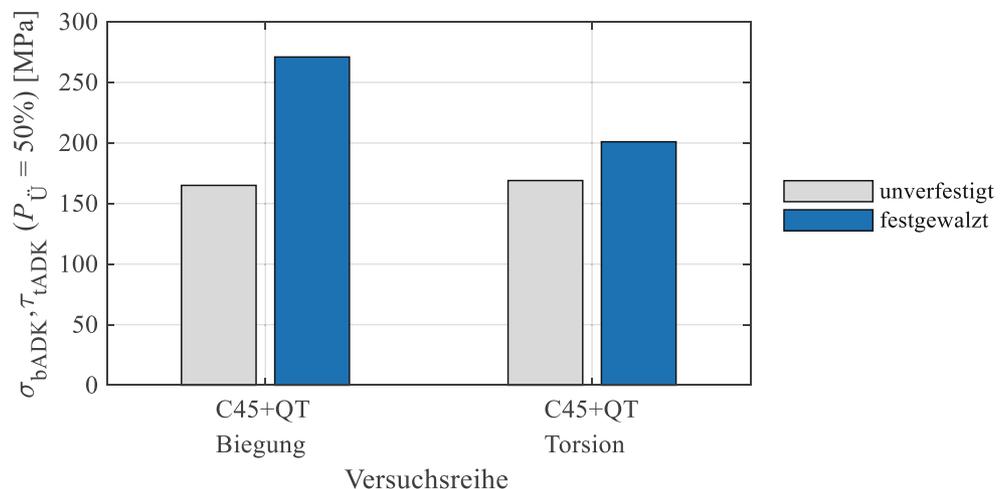
### 3.3 Prüfmaschinen

Für die Durchführung der Prüfläufe der Kleinproben werden zwei Prüfstände genutzt. Die Torsionsversuche werden an einem servohydraulischen Schwenkmotorprüfstand durchgeführt, bei dem das Torsionsmoment durch einen Schwenkmotor in den Laststrang eingeleitet wird. Balgkupplungen an den Spannsätzen dienen dazu, Ausrichtungsfehler auszugleichen und somit eine reine Torsionsbelastung sicherzustellen. Die vertikale Ausrichtung des Laststrangs und das rotationssymmetrische Gehäuse minimieren die Einleitung von Querkräften und Biegemomenten in den Laststrang. Die Vierpunkt-Umlaufbiegeversuche werden unter Verwendung einer Sincotec Power Torben Rotation 400Nm Umlaufbiegeresonanzmaschine durchgeführt.

### 4 Auswertung der Treppenstufenversuche

Abb. 13 zeigt die Ergebnisse der Ermüdungsversuche von Vierpunkt-Umlaufbiegung und wechselnder Torsion der

Abb. 13 Ergebnisse der Ermüdungsversuche für Umlaufbiegung und Torsion, gekerbte Kleinproben C45+QT,  $d = 14$  mm, Kerbradius  $r = 0,4$  mm, unverfestigter und festgewalzter Zustand



Kleinprobe C45+QT im unverfestigten und festgewalzten Zustand.

Folgende Tragfähigkeitssteigerungen konnten für die Umlaufbiege- und Torsionsversuche der festgewalzten gekerbten Kleinproben ermittelt werden [9]:

- C45+QT, Umlaufbiegung: +64 %
- C45+QT, Torsion: +19 %

### 5 Bedeutung für die Auslegung von Wellen und Welle-Nabe-Verbindungen sowie Nachrechnung der Versuche mit aktuellen Berechnungsvorschriften

Die dargestellten Ergebnisse ordnen sich sehr gut in Erfahrungen aus der Literatur ein, welche grundlegend bereits seit Jahrzehnten bekannt sind [1, 16, 17]. Demnach können durch Festwalzen und Kugelstrahlen teils Tragfähigkeitssteigerungen erzielt werden, welche in der Lage sind, die Kerbwirkung quasi zu egalisieren. Wie eine Umfrage in der FVA unter Anwendern aus der Industrie sowie viele Expertengespräche im Zuge des Forschungsvorhabens FVA 840 I zeigen, wird dies in der Praxis zwar durchaus aktiv genutzt, jedoch wird das Potenzial mechanischer Oberflächenverfestigung fast nie gezielt in der Auslegung von Bauteilen berücksichtigt. Die Anwendung im Bereich von Wellen und Welle-Nabe-Verbindungen beschränkt sich vielmehr meist auf die nachträgliche Integration in die Fertigungsfolge, wenn Probleme in Bezug auf die Tragfähigkeit eines Bauteils auftreten. Die einhellige Rückmeldung der Anwender ist, dass die Bauteile nach der Behandlung standhalten, jedoch ist meist nicht bekannt, wie viel Tragfähigkeitssteigerung tatsächlich erzielt wurde [19].

Ziel der Forschungsanstrengungen ist daher insbesondere, die mechanische Oberflächenverfestigung für den Anwender in dem Sinne besser zugänglich zu machen, als dass klare werkstoff- und geometrieabhängige Empfehlungen für einen optimalen Festwalzprozess getroffen und die mögliche Tragfähigkeitssteigerung bereits bei der Auslegung berücksichtigt werden kann. Neben der Abschätzung der grundlegenden Verfestigungseffekte entsprechend Abb. 2 ist jedoch insbesondere auch deren zielführende Verwendbarkeit im Tragfähigkeitsnachweis von größter Bedeutung. Die folgenden Darstellungen geben einen ersten Ausblick auf die möglichen Ergebnisse des Forschungsvorhabens, indem gezeigt wird, wie treffsicher mechanisch oberflächenverfestigte Wellen schon heute mit aktuellen Berechnungsvorschriften ausgelegt werden können. Berücksichtigt werden dabei die Norm DIN 743 [3], die FKM-Richtlinie „Rechnerischer Festigkeitsnachweis“ [13] sowie die neue FVA-Richtlinie zur Dauerfestigkeitsberechnung von Wellen [18]. Abb. 14 zeigt die Nachrechnung der experimentellen Ergebnisse mit den entsprechenden Konzepten. Um die Treffsicherheit der Berechnungskonzepte zielführend analysieren zu können, findet der gesamte Vergleich bei 50% Überlebenswahrscheinlichkeit statt. Das heißt, die Versuche werden mit mittleren Festigkeitswerten entsprechend Tab. 1, mit mittleren geometrischen Kennwerten entsprechend Tab. 2 sowie bei deaktiviertem Sicherheitskonzept ( $j_D = 1$ ) bei genau der Last nachgerechnet, welche die Wellen im Versuch mit 50% Überlebenswahrscheinlichkeit dauerhaft ertragen haben.

Weiterhin ist zu beachten, dass nicht alle vorliegenden Daten in allen Nachweisen berücksichtigt werden können. Wie in Tab. 3 in einer Übersicht dargestellt ist, kann der gemessene Mittelwert der Oberflächenrauheit in allen Nachweiskonzepten eingesetzt werden. Die gemessenen Ei-

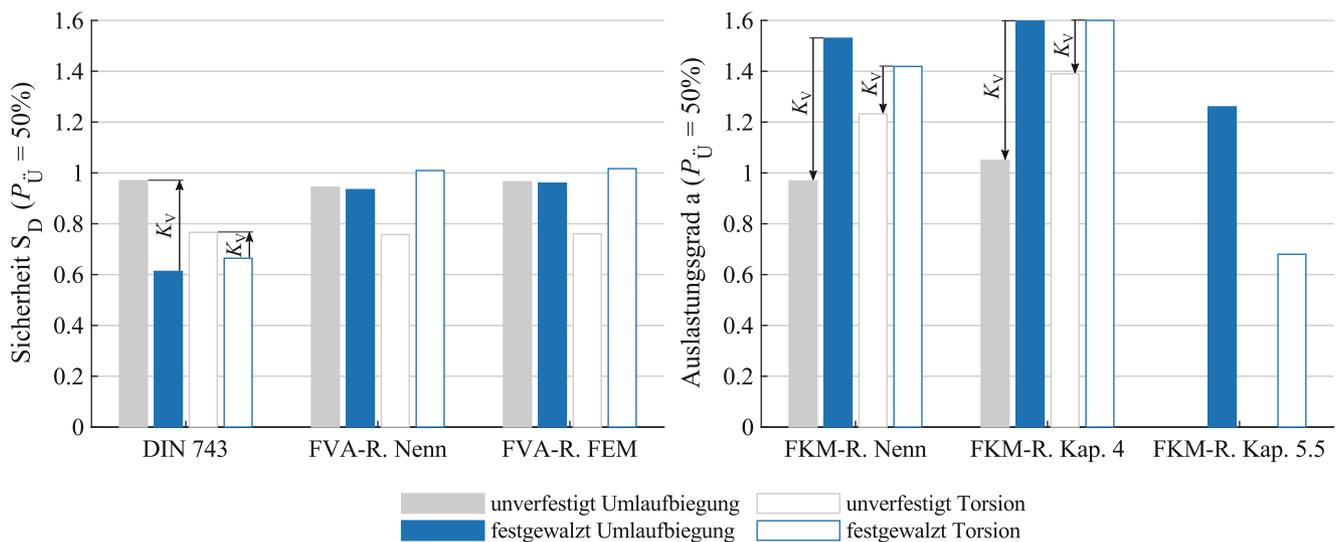


Abb. 14 Rechnerische Sicherheiten und Auslastungsgrade für die Proben aus C45+QT

**Tab. 3** Übersicht zur Berücksichtigung der messbaren Einflussfaktoren der mechanischen Oberflächenverfestigung in die Tragfähigkeitsnachweise

	Aufrauung/Einebnung	Verfestigung	Eigenspannungen
DIN 743	$R_z$	Verfestigungsfaktor $K_V$	
FKM-R. (Nenn/örtl.)	$R_z$		
FKM-R. (Kapitel 5.5)	$R_z$	HV bzw. $\sigma_w$	$\sigma_E$
FVA-R	$R_z$	HV bzw. $\sigma_w$	$\sigma_E$

genspannungen sowie Mikrohärtesteigerungen in der Randschicht können in DIN 743 sowie dem Nennspannungskonzept und örtlichen Konzept der FKM-Richtlinie jedoch nicht direkt berücksichtigt werden, sondern werden formal durch den Oberflächenverfestigungsfaktor  $K_V$  erfasst. Da sich dieser Faktor in keiner der Berechnungsvorschriften basierend auf den Walzparametern, gemessenen Eigenspannungen und/oder Härtesteigerungen sinnvoll abschätzen lässt, wurden die Nachweise zunächst mit  $K_V = 1$  geführt. Der Vergleich mit den entsprechenden ungewalzten Festigkeiten zeigt, welches  $K_V$  im Tragfähigkeitsnachweis im Idealfall hätte benutzt werden müssen. In der FVA-Richtlinie sowie dem Nachweis verfestigter Randschichten nach FKM-Richtlinie (Kapitel 5.5) können die lokale Härte(steigerung) sowie Eigenspannungen direkt berücksichtigt werden.

Die rechnerischen Sicherheiten gegen Dauerbruch  $S_D$  für die im Versuch ertragenen Lasten ergeben sich im Fall von DIN 743 und FVA-Richtlinie durchweg im Bereich um oder unter 1,0. Im Fall der FKM-Richtlinien ergibt sich der Auslastungsgrad  $a$  (welcher *ohne* Sicherheitsbeiwert berechnet wurde) im Bereich um oder über 1,0. Somit wird die Tragfähigkeit der Wellen durch die Berechnungskonzepte wie erwartet eher unterschätzt. D.h., die Konzepte arbeiten konservativ und ermöglichen aus Sicht des Berechnungsingenieurs eine sichere Auslegung. Eine Ausnahme bildet die festgewalzte Welle unter Torsion in der Nachrechnung durch Kapitel 5.5 der FKM-Richtlinie. Der rechnerische Auslastungsgrad bei 50 % Überlebenswahrscheinlichkeit beträgt hier 0,68. Das bedeutet, die Tragfähigkeit der Welle wird auch mit Nutzung der Grundsicherheit  $j_D = 1,2$  ( $\rightarrow a = 0,82$ ) um 18 % unterschätzt. Die FVA-Richtlinie, welche sowohl nennspannungsbasiert als auch äquivalent zum örtlichen Konzept der FKM-Richtlinie FEM-gestützt angewendet wurde, liefert insgesamt die besten Ergebnisse. Obwohl die Tragfähigkeit der ungewalzten Welle unter Torsion um etwa 20 % unterschätzt wird, liegt die FVA-Richtlinie insgesamt sehr treffsicher im konservativen Bereich. Trotz der starken Unterschätzung der Werkstofffestigkeit, werden nicht zu viele Tragfähigkeitsreserven verschenkt. Die  $K_V$ -basierten Konzepte (DIN 743 sowie das Nennspannungskonzept und das örtliche Konzept der FKM-Richtlinie) ermöglichen eine konservative Auslegung, jedoch werden dabei Tragfähigkeitsreserven teils deutlich unterschätzt. Selbst wenn eine optimale Abschätzung der Oberflächen-

verfestigungsfaktoren  $K_V$  a priori möglich wäre (1,58 für Biegung und 1,15 für Torsion), wird insbesondere die Tragfähigkeit unter wechselnder Torsion eher unterschätzt.

## 6 Fazit und Ausblick

Es wurden erhebliche Tragfähigkeitspotenziale am Beispiel der C45+QT Kleinprobe aufgezeigt. Dabei konnte unter Biegebeanspruchung eine Tragfähigkeitssteigerung von 64 % und bei Torsionsbeanspruchung eine Steigerung von 19 % von festgewalzten Proben gegenüber unverfestigten Proben erzielt werden. Gleichzeitig wurden die Ursachen für die Tragfähigkeitssteigerung systematisch analysiert und dargestellt. Die Einebnung der Oberfläche und die Einbringung von Druckeigenspannungen sowie die Härtesteigerung durch das Festwalzen sind wesentliche Ursachen der Tragfähigkeitssteigerung. Die FVA-Richtlinie mittels FEM-Unterstützung konnte die beste Prognose der Tragfähigkeit sowohl im unverfestigten als auch im verfestigten Probenzustand sowohl für Umlaufbiegeprüfung als auch für die Torsionsprüfung erzielen. Für den unverfestigten Zustand konnten alle Richtlinien die Tragfähigkeit bei Umlaufbiegung zielgenau abschätzen, jedoch wird die Tragfähigkeit für torsionsbeanspruchte Proben konsequent unterschätzt. Es fällt auf, dass für festgewalzte Proben die DIN 743 und die FKM-Richtlinie Kapitel 4 (örtlicher Nachweis) konservative Prognosen der Tragfähigkeit liefern. Durch den Nachweis randschichtgehärteter Bauteile nach FKM-Richtlinie Kapitel 5.5 ergibt sich für umlaufbiegebeanspruchte verfestigte Bauteile eine konservative und für torsionsbeanspruchte verfestigte Bauteile eine progressive Bewertung des Auslastungsgrades. Für die Interpretation der Ergebnisse unter Torsionsbeanspruchung zeigt sich weiterer Forschungsbedarf. Im weiteren Verlauf wird eine verbesserte Formulierung des Verfestigungsfaktors  $K_V$ , welcher den verschiedenen untersuchten Einflüssen gerecht wird, angestrebt, um so die Auslegung mittels Nennspannungskonzepten zu verbessern. Die beobachteten Zusammenhänge zur Tragfähigkeitssteigerung an einer C45+QT Werkstoffprobe unter Biege- und Torsionsbeanspruchung stellen die Grundlage für Untersuchungen weiterer Werkstoffe unter verschiedenen Beanspruchungen dar. Weiterhin erfolgt eine Prüfung an Wellen und Welle-Nabe-Verbindungen mit bauteilnahen Abmessungen, um den Transfer in die Praxis zu gewährleisten.

Die hier dargestellten Ergebnisse sind lediglich ein kleiner Teil der Untersuchungen im Forschungsvorhaben. Noch laufende Versuchsreihen zeigen ebenso für niedrigfeste (normalisierte) Stähle, jedoch insbesondere auch für höchstfeste Stähle ein erhebliches Potenzial. So zeichnet sich beispielsweise im derzeit laufenden Treppenstufenversuch mit einatzgehärtetem Einsatzstahl 18CrNiMo7-6 und scharfer Kerbe eine Steigerung der Ermüdungsfestigkeit um ca. 70 % ab, sodass sich die lokal ertragbare Spannungsamplitude durch Festwalzen auf bis zu 1490 MPa steigern lässt. Die Autoren laden herzlich ein, dieses Forschungsvorhaben weiter zu verfolgen und Tragfähigkeitsreserven zu erschließen.

**Danksagung** Die Autoren bedanken sich bei der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V. (FVA) für die Förderung des in dieser Arbeit zugrundeliegenden Forschungsprojektes (FVA 840 II - Mechanische Oberflächenverfestigung II).

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

**Interessenkonflikt** S. Günther, B. Muhammedi, T. Werner, C. Ulrich, B. Schlecht, A. Hasse und A. Brosius 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 betreffende 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

- Berstein G, Fuchsauer B (1982) Festwalzen und Schwingfestigkeit. In: Z. Werkstofftech. 13:103–109
- Breidenstein B (2023) Bestimmung der Eigenspannung in festgewalzter Kerbe. Interner Kurzbericht. Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
- DIN 743:2012–12. Tragfähigkeitsberechnung von Wellen und Achsen. Teil 1–4
- DIN 50100:2022-12. Schwingfestigkeitsversuch – Durchführung und Auswertung von zyklischen Versuchen mit konstanter Lastamplitude für metallische Werkstoffproben und Bauteile

- DIN 50125:2022-08. Prüfung metallischer Werkstoffe – Zugproben
- DIN EN ISO 650:2022. Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Vickers. Teil 1–4
- Genzel C, Apel D, Klaus M (2023-06) Ergebnisbericht Eigenspannungsanalyse im Kerbbereich verschiedener Proben mittels energie-dispersiver Beugung. Helmholtz-Zentrum Berlin
- Genzel C, Apel D, Klaus M (2023-10) Ergebnisbericht Eigenspannungsanalyse im Kerbbereich verschiedener Proben mittels energie-dispersiver Beugung. Helmholtz-Zentrum Berlin
- Hück M (1983) Ein verbessertes Verfahren für die Auswertung von Treppenstufenversuchen. In: Z. Werkstofftech. 14:406–417, Verlag Chemie GmbH
- Kloos KH, Adelman J (1988) Schwingfestigkeitssteigerung durch Festwalzen. In: Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 19:15–23
- Maiß O (2019) Lebensdauererhöhung von Wälzlagern durch mechanische Bearbeitung. Dissertation, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
- Neikes K, Vetter S, Schlecht B, Leidich E (2019) Studie zur Überlebenswahrscheinlichkeit von Wellen und Achsen. FVA, Bd. 802 I, FVA-Heft 1322, Frankfurt am Main
- Rennert R, Kullig E, Vormwald M, Esderts A, Luke M (2020) Forschungskuratorium Maschinenbau: Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile. FKM-Richtlinie, 7. Aufl., VDMA-Verlag, Frankfurt am Main
- Röttger K (2002) Walzen hartgedrehter Oberflächen. Dissertation, RWTH Aachen
- Schlecht B (2015) Maschinenelemente Band 1 – Festigkeit, Wellen, Verbindungen, Federn, Kupplungen. Pearson Studium, München
- Strigens P (1971) Zum Einfluss der Oberflächenverfestigung auf die Dauerfestigkeit von Stählen. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt
- Traiser H, Kloos KH (1985) Einfluß einer Oberflächenkaltverfestigung auf die Schwingfestigkeit und das Wechselverformungsverhalten der normalisierten Kohlenstoffstähle Ck 15 und Ck 45 unter Zugdruck- und Umlaufbiegebeanspruchung. In: Z. Werkstofftech. 16:135–143, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim
- Ulrich C, Suchý L (2023) FVA-Richtlinie Dauerfestigkeitsberechnung von Wellen. FVA-Forschungsvorhaben Nr. 321 VII, Richtlinie, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Frankfurt am Main
- Ulrich C (2020) Mechanische Oberflächenverfestigung bei Wellen und Achsen – Weiterentwicklung der Berechnung nach DIN 743 und FKM-Richtlinie. FVA-Forschungsvorhaben Nr. 840 I, FVA-Heft Nr. 1413, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V., Frankfurt am Main

## Weiterführende Literatur

- Vetter S, Becker N, Leidich E, Hasse A, Schlecht B (2022) Abschlussbericht: Überlebenswahrscheinlichkeit II. Überlebenswahrscheinlichkeit von Wellen und wellenartigen Bauteilen, FVA-Forschungsvorhaben Nr. 802 II, FVA-Heft Nr. 1530, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V., Frankfurt am Main

**Hinweis des Verlags** Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.