

Haftfestigkeitsprüfungen von Verbindungselementen mit Feuerverzinkungsüberzügen

Holger Hoche

Thomas Ulrich, Steffen Six, Susanne Friedrich, Matthias Oechsner

17. Oktober 2023



Prüfung der Haftung von Zinküberzügen

Status quo

- **DIN EN ISO 10684, Anhang E und ASTM A123:** „Schneiden oder Losstemmen mittels eines Messers mit erheblichem Druck“
 - im Sinn einer reproduzierbaren Haftfestigkeitsprüfung unzureichend, weil keine definierten Randbedingungen gegeben sind
- **ASTM A123-84 Fallhammerprüfung (auch IS 2629, JIS 401)**
 - Nicht für HT-FVZ geeignet, keine Korrelation mit Haftfestigkeit ableitbar aufgrund der dynamischen Beanspruchung, wurde in ASTM gestrichen
- **DIN 50978 Schlaghammerprüfung**
 - Zurückgezogen, siehe Fallhammerprüfung. Wird aber in Richtlinien anderer Verbände in modifizierter Form weiterhin zur Haftungsprüfung aufgeführt (z.B. Nordic Galvanizers)
- **Stirnabzugversuch oder Metallographie**
 - Zu aufwändig für die produktionsbegleitende Prüfung

Status Quo

- **Knapp 1% der Jahrestonnage an feuerverzinkten Verbindungselementen weisen Haftfestigkeitsprobleme auf**, davon werden rund 40% der Haftfestigkeitsprobleme vom Schraubenhersteller festgestellt und rund 20% bei der Montage durch die Endkunden [1]
- **Aktuell existieren keine geeigneten genormten Prüfverfahren** für eine praxisgerechte und zuverlässige Beurteilung der Haftfestigkeit von Feuerverzinkungsüberzügen und der damit verbundenen Funktionseigenschaften, insbesondere während der Beanspruchungen bei Montage und im Betrieb
- **Feuerverzinkungsunternehmen und Schraubenherstellern fehlt ein Werkzeug** für eine normgerechte Prüfung der Qualität ihrer Produkte sowie zur Prozessüberwachung und –optimierung
- **Existierende Prüfansätze sind ungeeignet zur Beurteilung der Haftfestigkeit von Zinküberzügen**, da diese meist auf einer dynamischen Schlagbeanspruchung beruhen und daher allenfalls Aussagen zur Zähigkeit der Überzüge ermöglichen. Eine Korrelation mit der Haftung der Überzüge und deren Funktion ist daraus nicht ableitbar

[1] Interne Umfrage des Gemeinschaftsausschusses Verzinken e.V. (GAV), März 2019

Status Quo

Schlaghammerprüfung DIN 50978, HT-FVZ M16-Muttern

„Gutteil“



„Schlechtteil“



- Ein vom Deutschen Schraubenverband (DSV e.V.) organisierter industrieller Feldversuch mit drei proprietären Prüfmethode(n) (basierend auf Gitterschnitt, Verschraubung und Fallhammertest) - durchgeführt von Schraubenherstellern und Verzinkungsbetrieben - zeigte keine Korrelation bezüglich der erzielten Befunde [2]

- Bei HT-verzinkten Muttern M16 konnte im Schlagtest nach DIN 50978 nicht zwischen Bauteilen mit und ohne Haftungsproblemen differenziert werden, während sich im Montageversuch aufgrund der realen Beanspruchungen beide Chargen eindeutig differenzieren ließen.

[2] Feldversuch des Deutschen Schraubenverbands e.V. (DSV), intern, Protokoll vom 03.07.2019

Prüfung der Haftung von Zinküberzügen

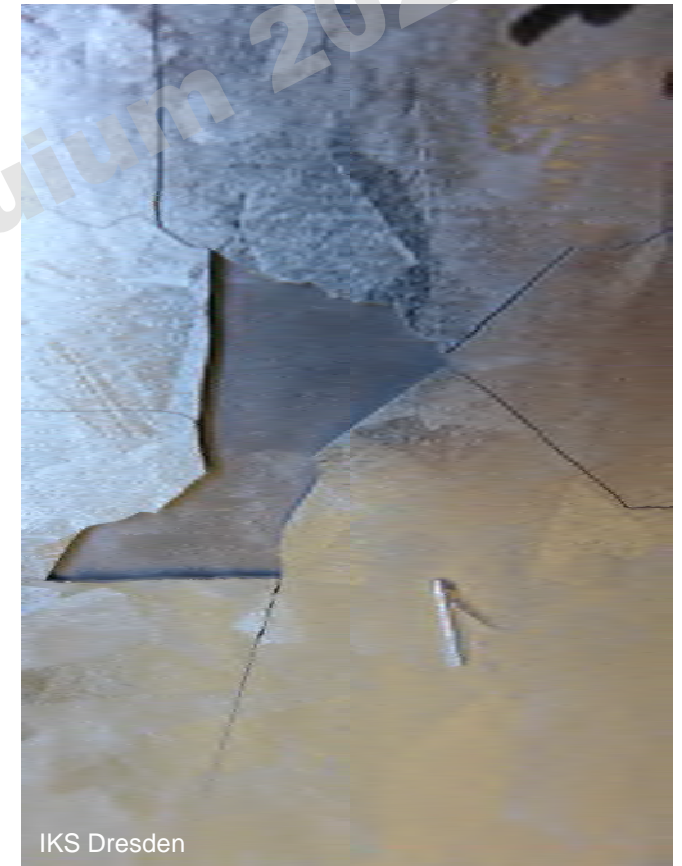
Umfrage in Verzinkungsbetrieben

Wo treten Probleme auf?

- Schwerpunkt HT-Verzinkung
- bei NT-Verzinkung bei schweren Bauteilen und großen Schichtdicken
- beim Sweepen

Eingesetzte Prüfmethoden

- keine Prüfung der Haftfestigkeit
- Schlagprüfung nach DIN 50978
- frei geführter Hammer mit abgerundetem Kopf
- gegeneinanderschlagen von Bauteilen
- Kreuzschnitt



Entwicklung einer robusten, einfach handhabbaren und aussagekräftigen Methode zur Prüfung der Haftfestigkeit von Feuerverzinkungsüberzügen auf Verbindungselementen

- **Erstellung eines Lasten- / Pflichtenhefts** bzgl. der Haftfestigkeitsanforderungen an Feuerverzinkungsüberzügen unter Berücksichtigung der Beanspruchungen während Montage und Betrieb
- **Praxis-Screening existierender Methoden** zur Haftfestigkeitsprüfung von Beschichtungen und Zinküberzügen im Allgemeinen sowie in den Betrieben praktizierter proprietärer Methoden zur Haftungsprüfung für Feuerverzinkungsüberzüge
- (Weiter-) **Entwicklung praxisgeeigneter Prüfmethode**n, Umsetzung des Pflichtenhefts
- **Sicherstellung der praktischen Anwendbarkeit** bei Verbindungselementen (Schraube, Mutter, Scheibe) unterschiedlichster Abmessungen
- Eingang der entwickelten Methode in **Normen / Richtlinien**, z.B. ISO 10684

Testmaterial

Zinküberzüge mit guter und schlechter Haftung



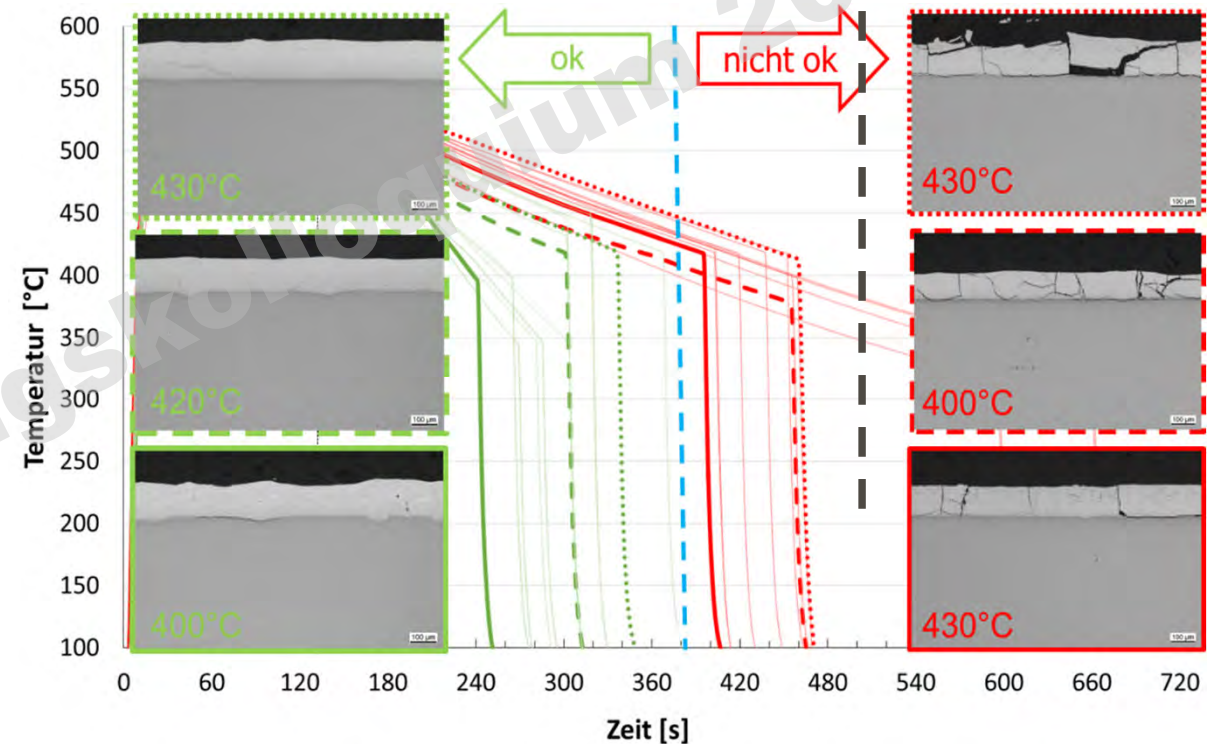
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Schwerpunkt: HT-Feuerverzinken
NT-Überzüge als Kontrollversuche

Verzinkung in Industrieanlagen:

	Bolt	Nut	Washer	Σ
HT-HDG ok	150	150	150	450
HT-HDG not ok	50	50	50	150
Σ	200	200	200	600

Verzögerung des letzten Abschreckschritts um ca. 6 Minuten soll schlecht haftende Schichten erzeugen ⇒ **IGF 18389BG**



[3] H. Hoche, M. Lander, M. Oechsner, S. Six, S. Friedrich: Examination of Influencing Factors on the Coating Quality of Hot Dip Galvanized High Strength Fasteners, Conference Proceedings Intergalva 17 – 22 June 2018, Berlin, 2018

Überzughaftung: Referenztest

Metallographischer Schliff

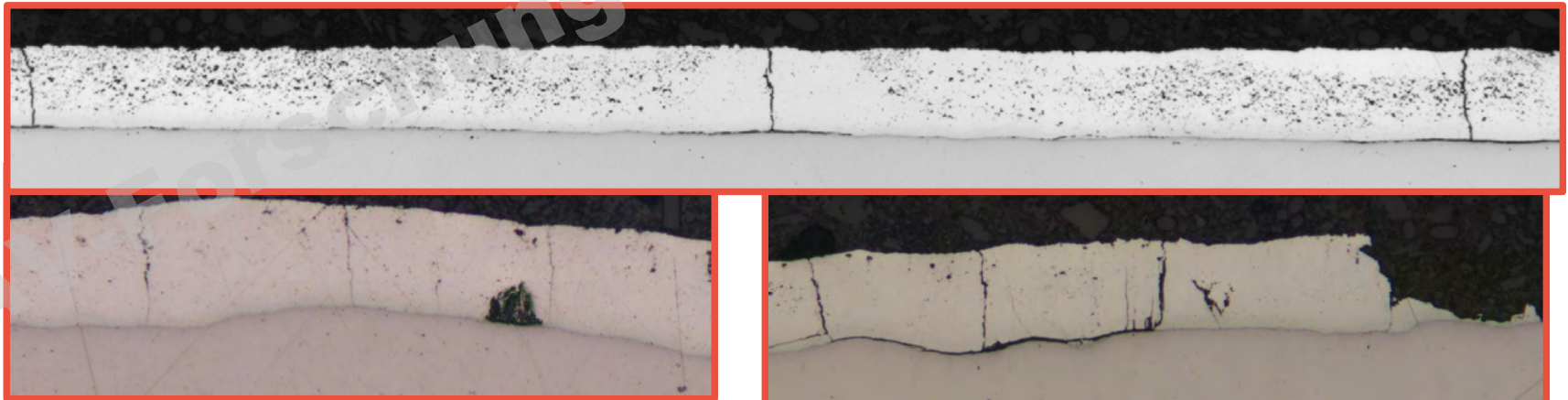


TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

gut



schlecht



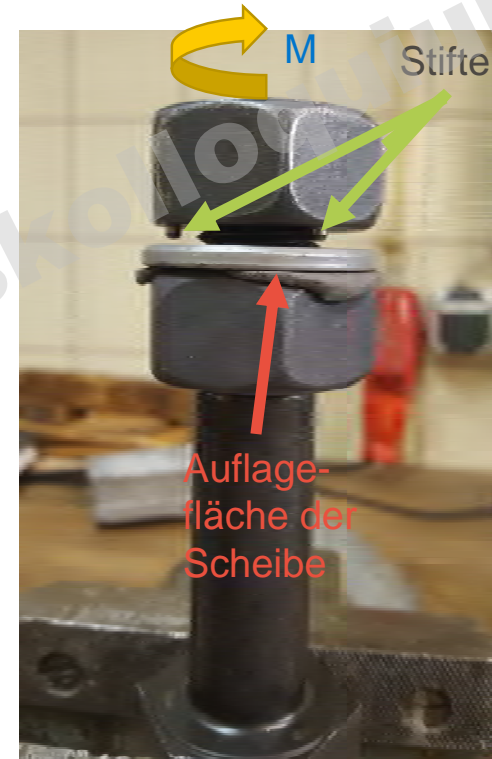
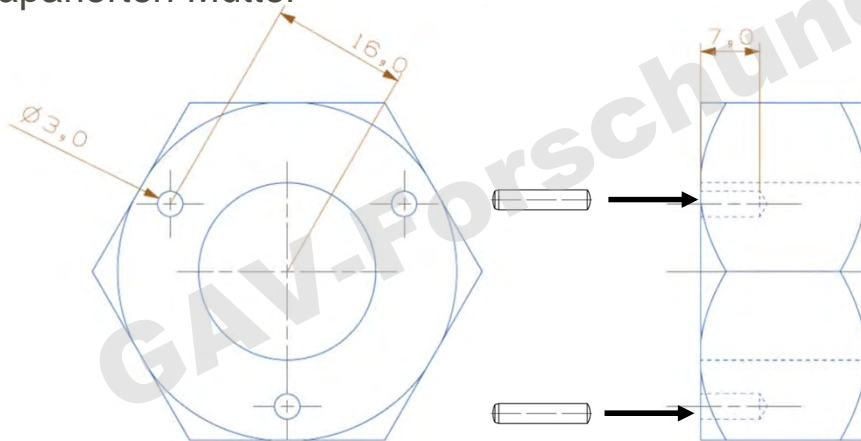
Methodenentwicklung

1. Abbildung der Montagebeanspruchungen

Ansatz: Einleitung einer Druck-Schubbeanspruchung mit zunehmender Flächenpressung

Umsetzung:

- Krafteinleitung über Zylinderstifte (DIN 7)
- Erhöhung der Beanspruchung durch Anziehen der präparierten Mutter



Methodenentwicklung

Unterscheidung gute / schlechte Haftung möglich

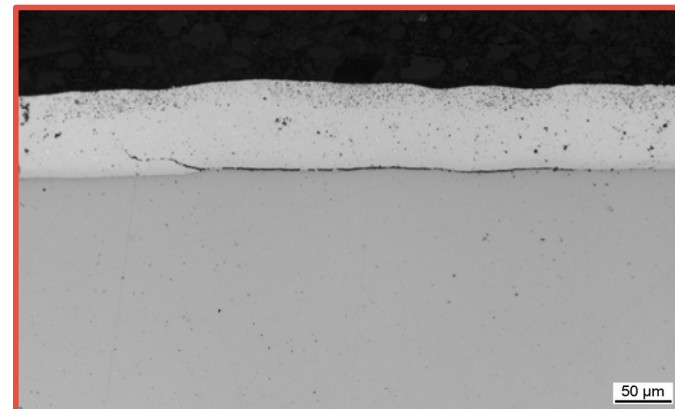


TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

gut



schlecht



Methodenentwicklung

Unterscheidung gute / schlechte Haftung möglich

- **Erfolgreiche Validierung optische Prüfung ↔ Schliff**
- Bewertungskriterien :
 - mindestens zwei abplatzungsfreie Prüfstellen
 - Morphologie der Abplatzungen
- Einflussfaktoren
 - Ruckartiges Anziehen
 - Aufkleben der Scheibe als Losdrehesicherung: Reproduzierbarkeit / Schrägstellung / Ungleichmäßige Krafteinleitung
 - Lösung: Schleifpapier

Mutter	
23	96%
0	0%
1	4%

Schraube	
12	100%
0	0%
0	0%

Scheibe (Kleber)	
15	83%
3	17%
0	0%

Scheibe (Schleifpapier)	
6	100%
0	0%
0	0%

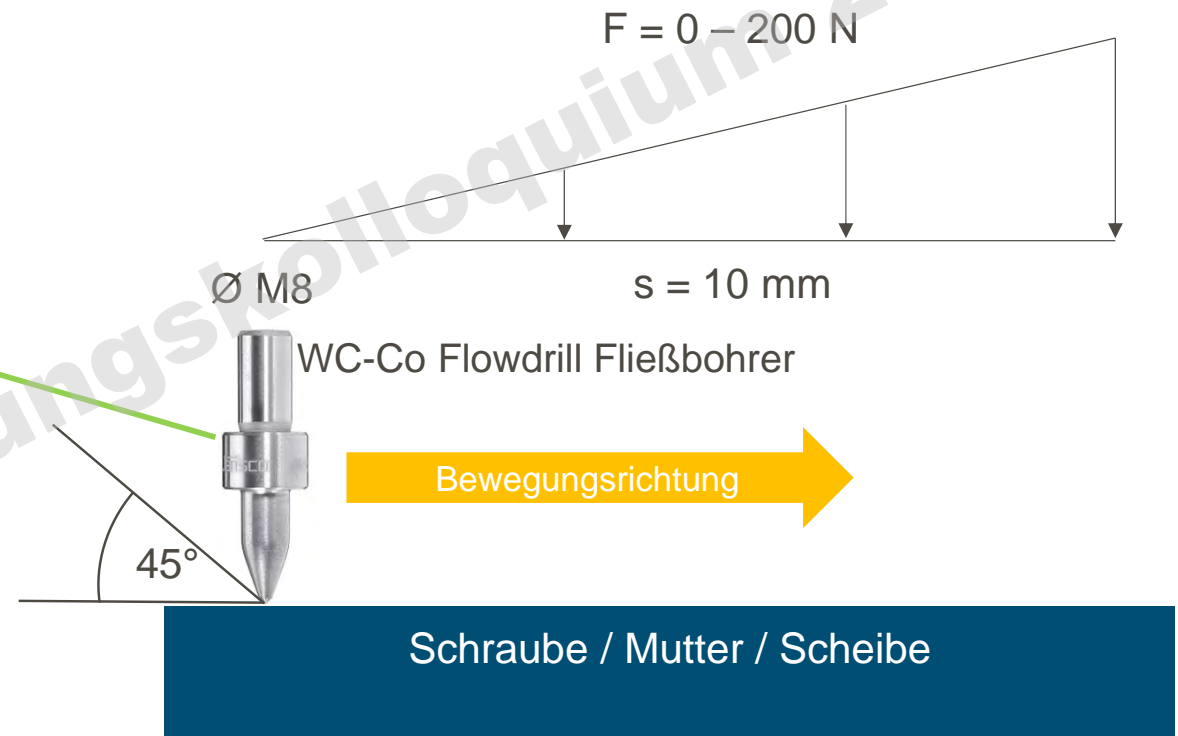
Methodenentwicklung

2. Ermittlung des Kräftebereichs



Ritztester (DIN EN ISO 20502:2016-11):

- Variation der Beanspruchung
- Sehr hohe Reproduzierbarkeit
- Verschleißbeständiger Eindringkörper



Ermittlung des Kräftebereichs

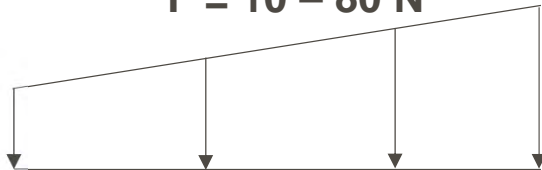
Scheibe / Schraube



Scheibe



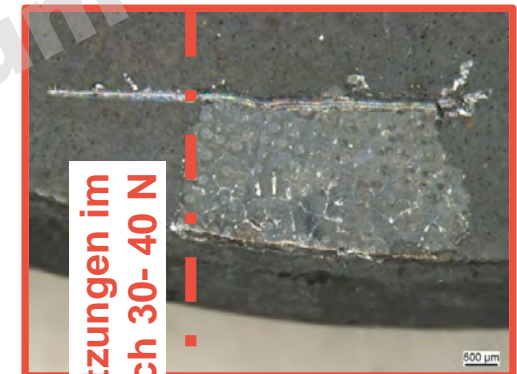
$F = 10 - 80 \text{ N}$



Gut



Schlecht



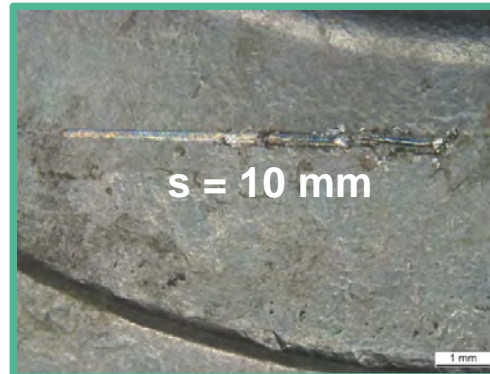
Schraube



$F = 10 - 80 \text{ N}$

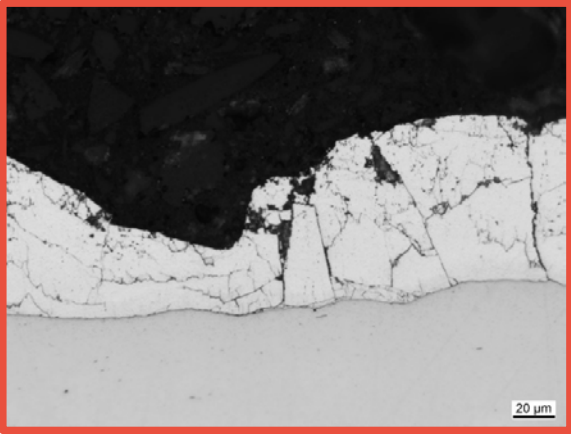
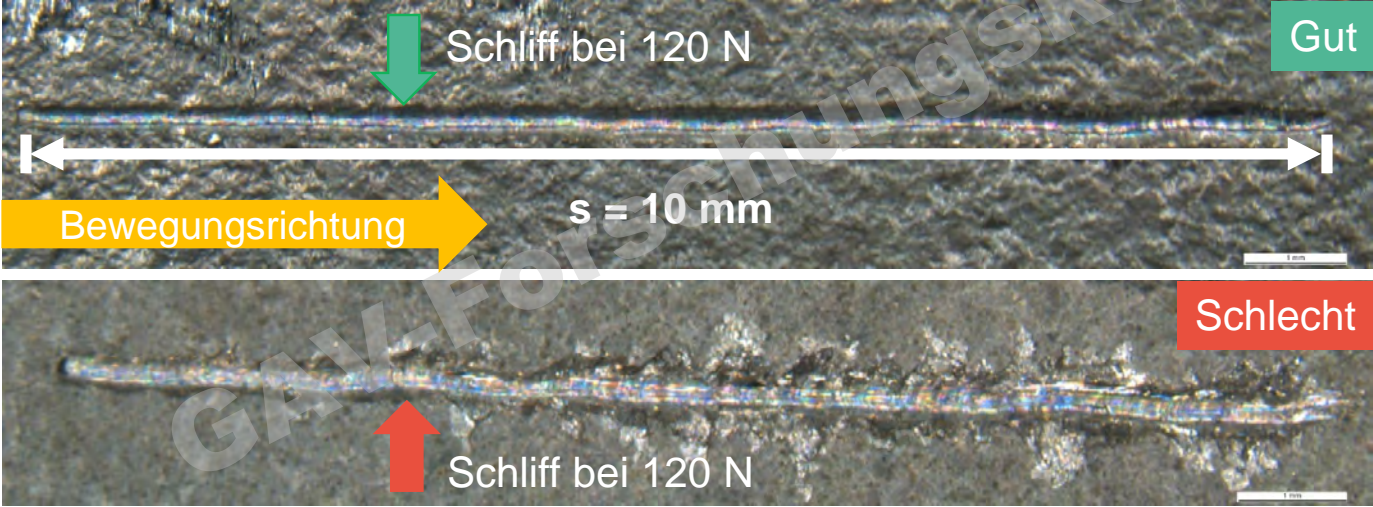
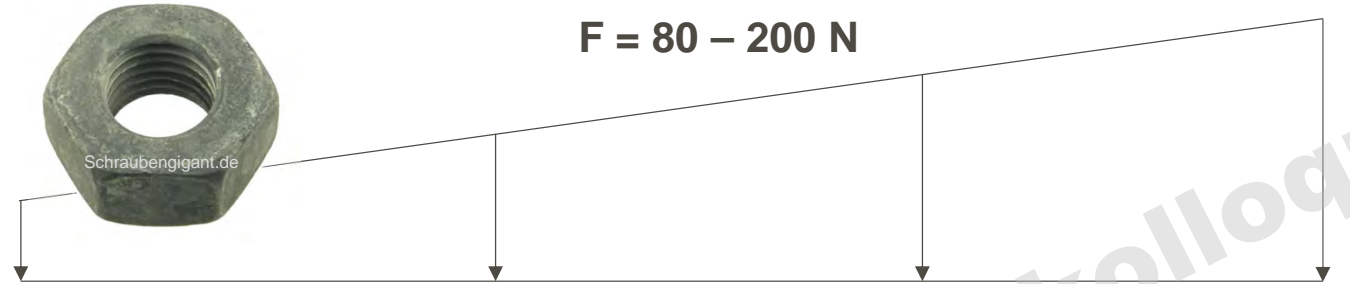


$s = 10 \text{ mm}$

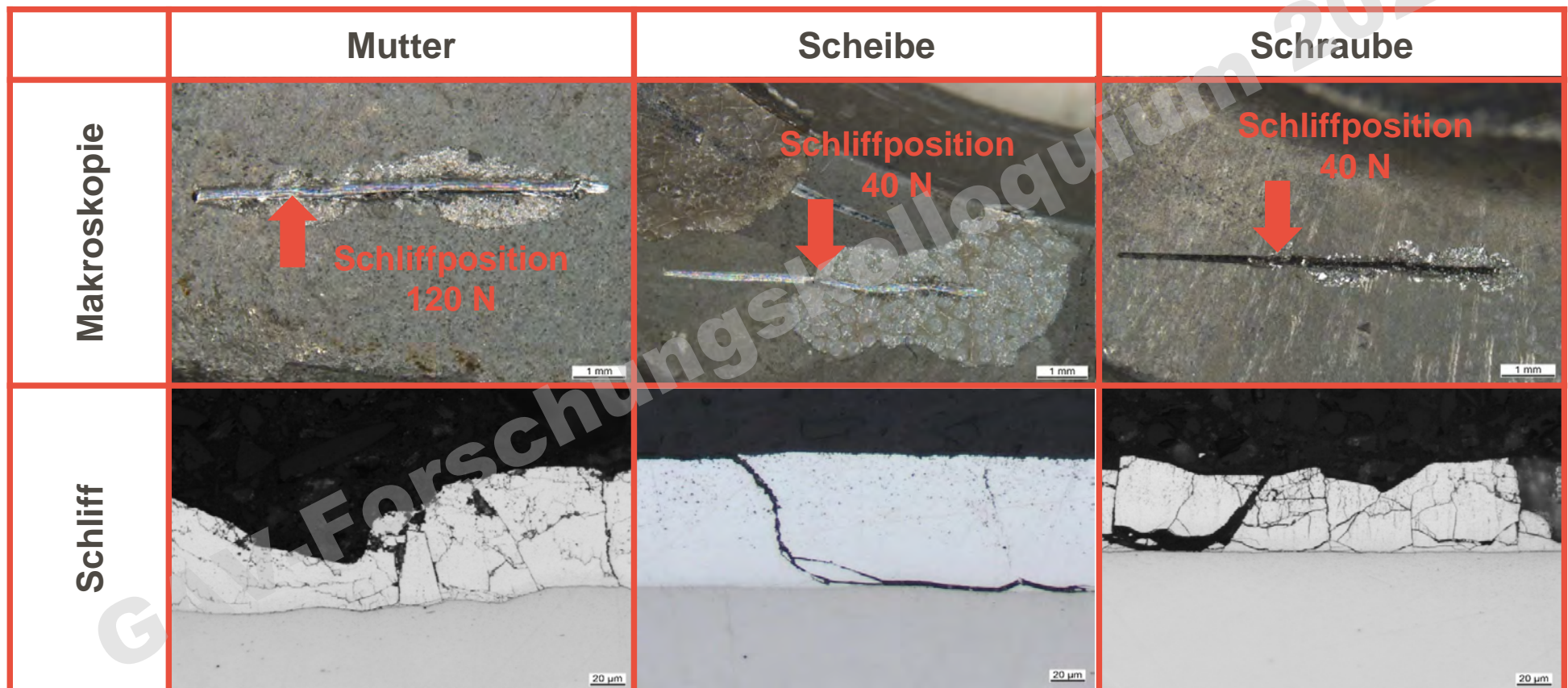


Ermittlung des Kräftebereichs

Mutter



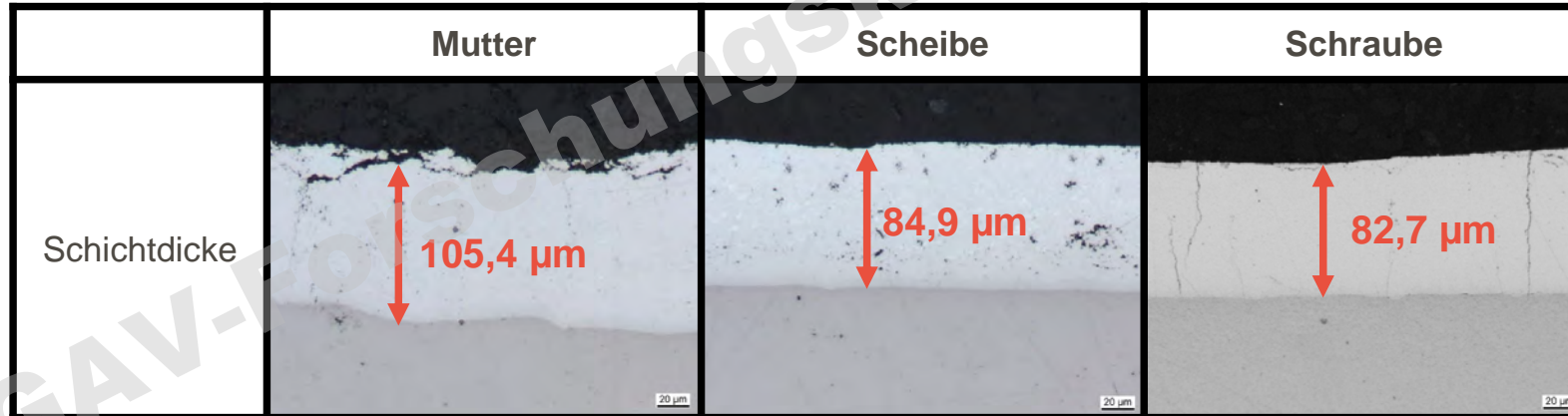
Vergleich der Abplatzungen



Einfluss von Rauheit und Schichtdicke

	R_z
Mutter	9,5 μm
Scheibe	6,4 μm
Schraube	5,9 μm

Messung der Rauheiten auf dem unbeschichteten Bauteil

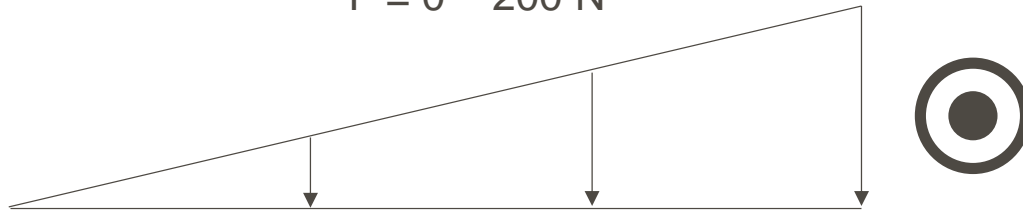


Erhöhung der kritischen Last, welche zu Schichtabplatzungen führt, durch höhere Schichtdicken der Mutter

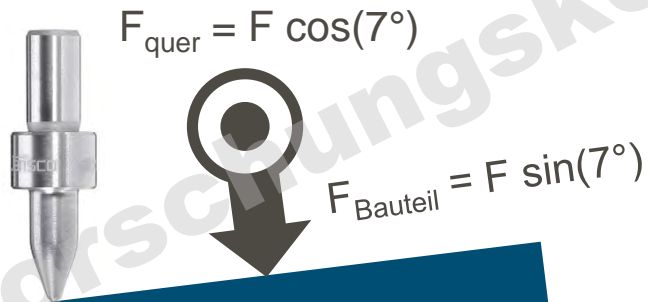
Einfluss einer Schrägstellung

7° Neigung \perp Bewegungsrichtung

$F = 0 - 200 \text{ N}$



$s = 10 \text{ mm}$



Probe: Scheibe, Mutter, Schraube

7°

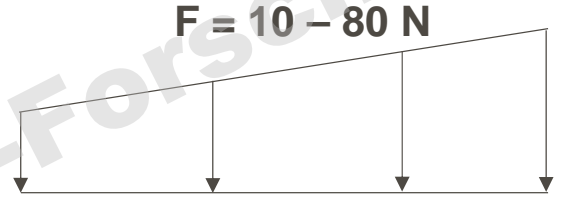
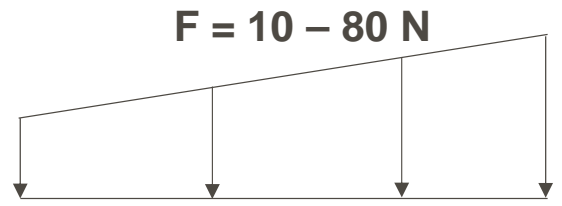


TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



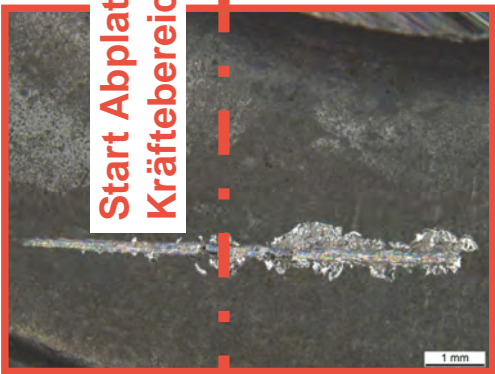
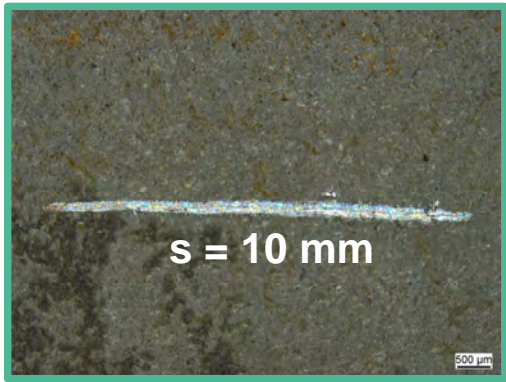
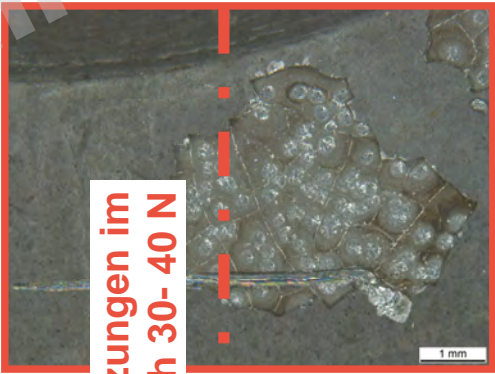
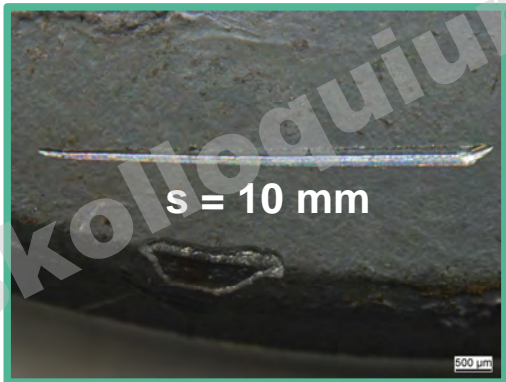
Einfluss einer Schrägstellung

Scheibe / Schraube



gut

schlecht



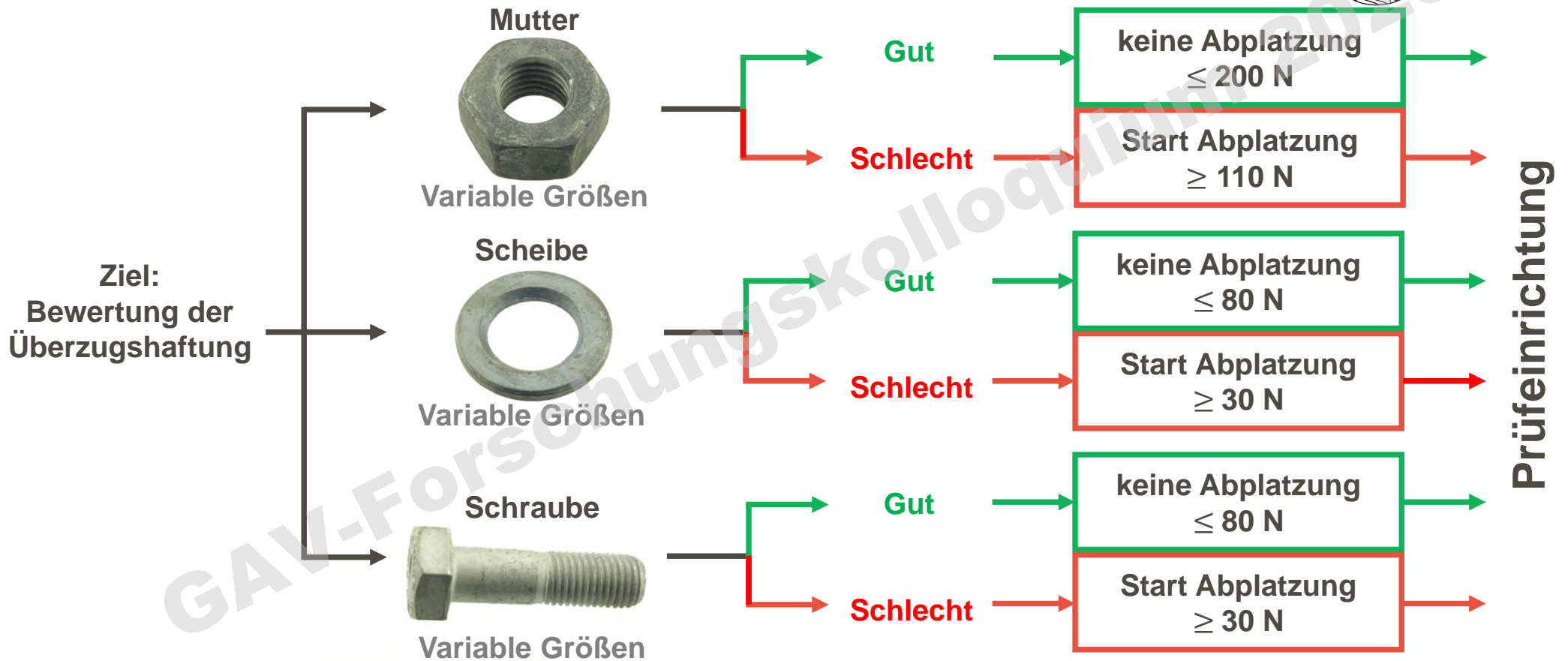
Start Abplatzungen im
Kräftebereich 30-40 N

Verschleiß des Flowdrill-Bohrers?



Selbst nach 200 Ritzen wurden keine Hinweise auf Verschleiß an der Bohrspitze festgestellt

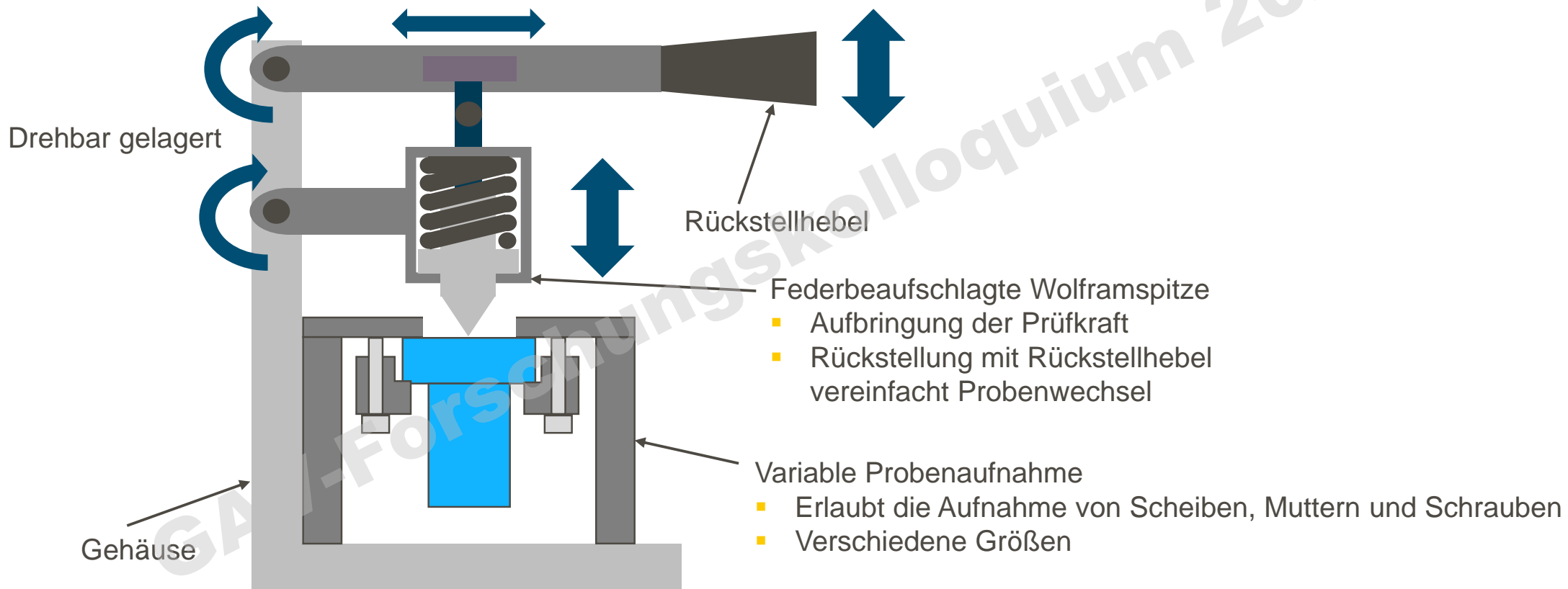
Anforderungen an die Prüfmethode



Prinzipskizze mechanische Prüfeinrichtung



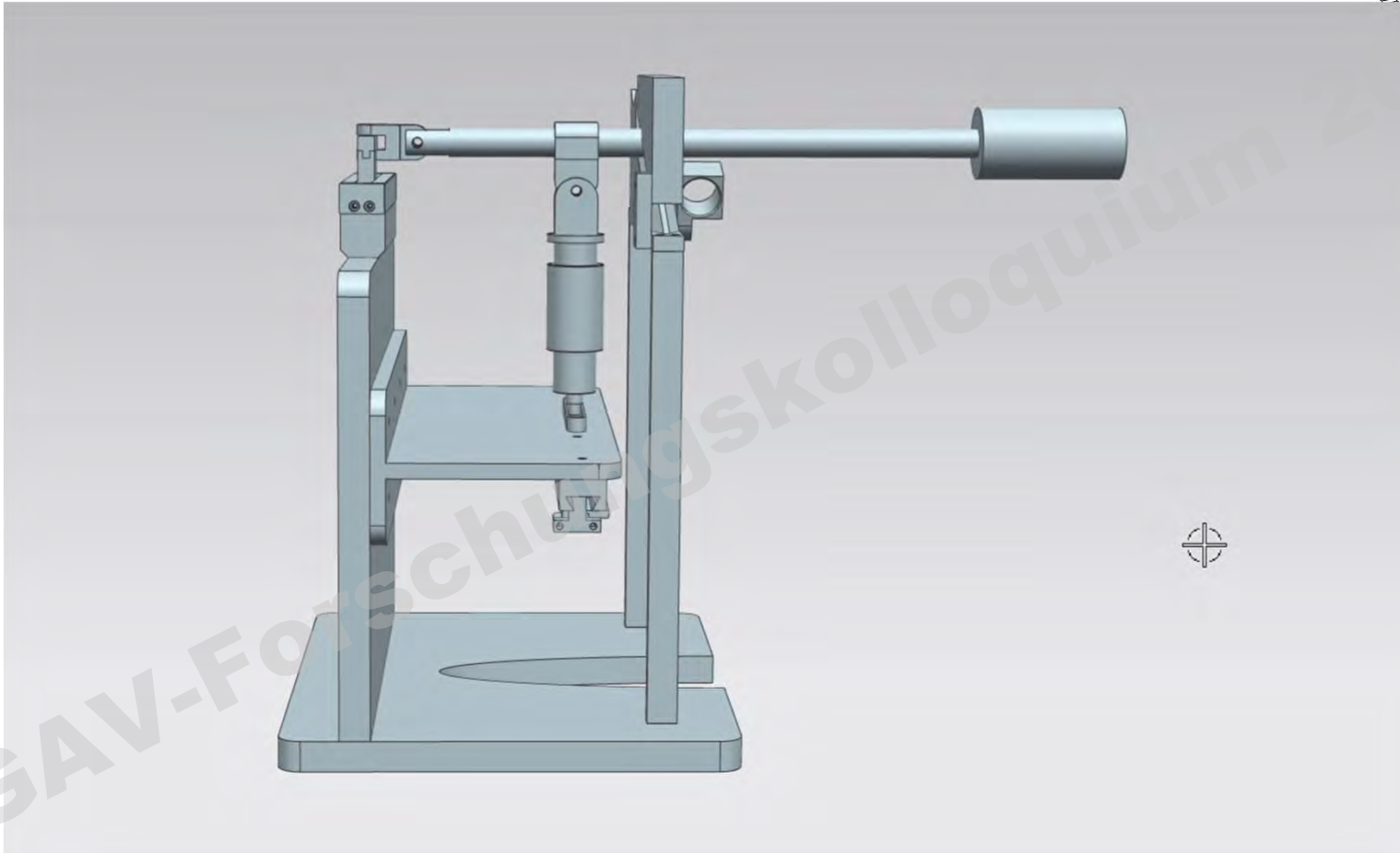
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



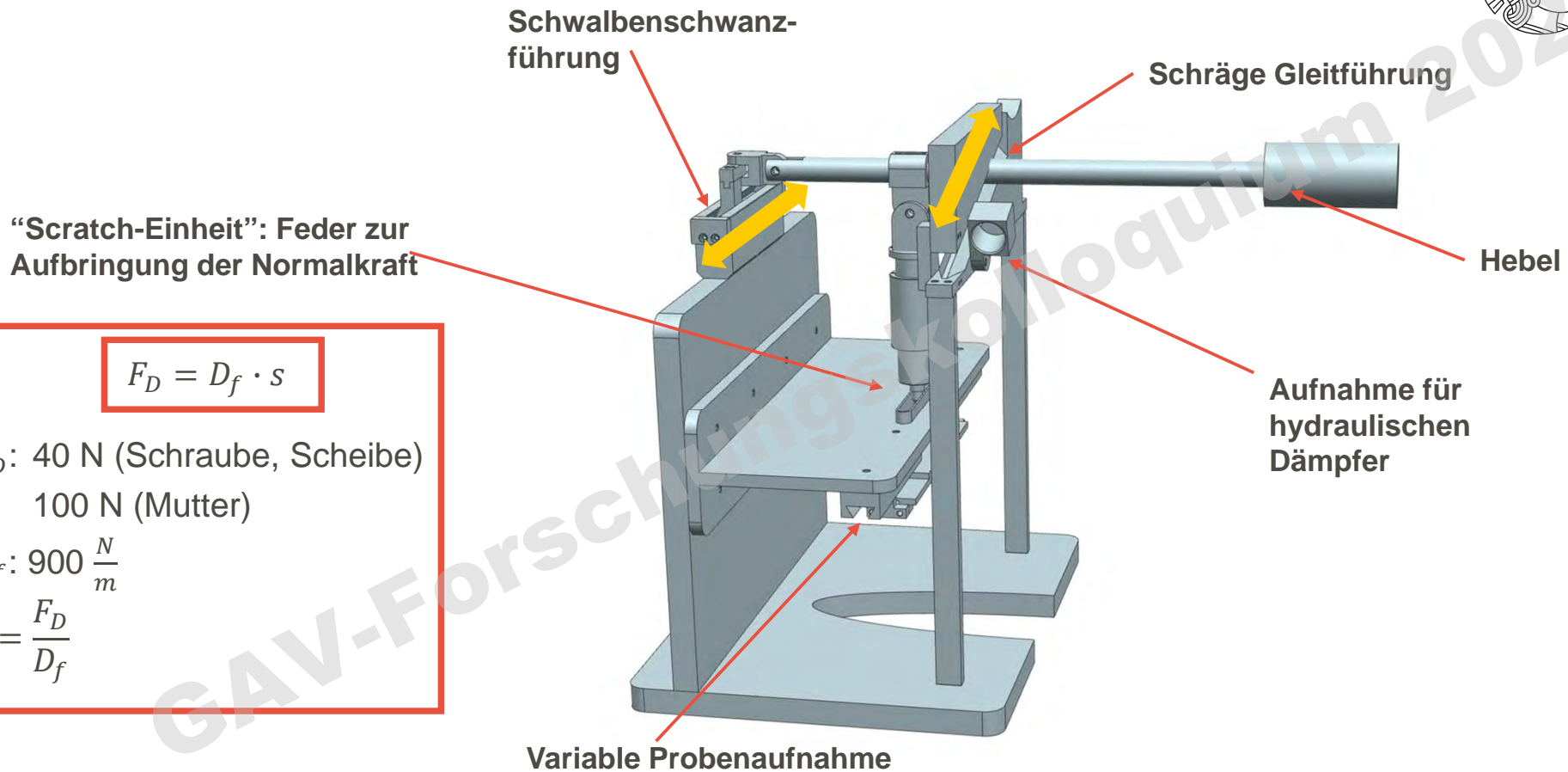
3D Modell des Prototyp



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



3D Modell des Prototyp



$$F_D = D_f \cdot s$$

F_D : 40 N (Schraube, Scheibe)
100 N (Mutter)

D_f : $900 \frac{N}{m}$

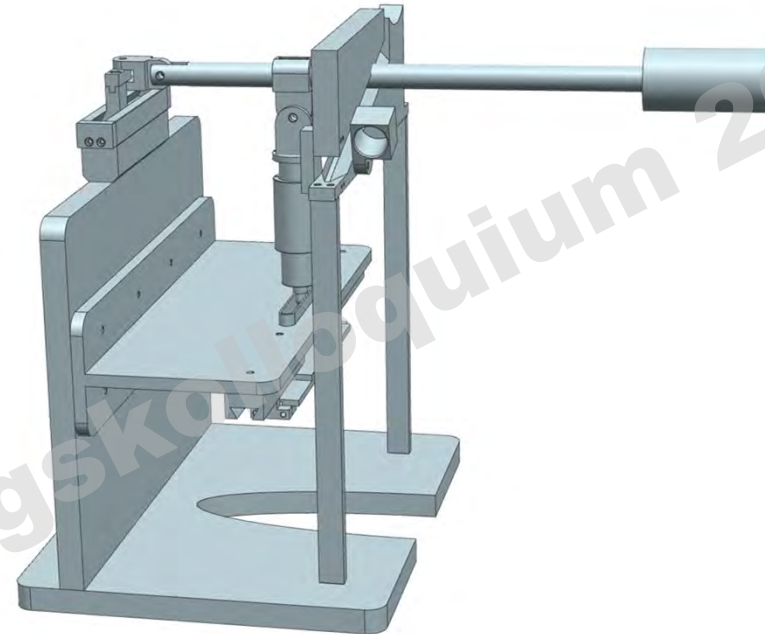
$$s = \frac{F_D}{D_f}$$

Ausblick



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

- Fertigung des Prototypen (11/23)
- Funktionsprüfung und Optimierung (12/23)
- Erprobung in der Industrie (Q1-Q2/2024)
- Überführung in Normen und Richtlinien (z.B. WIPANO)



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das IGF-Vorhaben 21160 N der Forschungsvereinigungen Gemeinschaftsausschuss Verzinken e.V. (DSV) und der Forschungsgesellschaft Stahlverformung e.V. (FSV) wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

GEMEINSCHAFTSAUSSCHUSS
VERZINKEN E.V.



DEUTSCHER SCHRAUBENVERBAND E.V.



Contact

Dr.-Ing. Holger Hoche

+49 (0) 6151 16-25 074

Zentrum für Konstruktionswerkstoffe

Staatliche Materialprüfungsanstalt Darmstadt (MPA)

Fachgebiet und Institut für Werkstoffkunde (IfW)

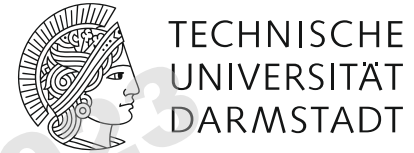
S4|02

Grafenstraße 2

64823 Darmstadt

Prüfung der Schichthaftung von Zinküberzügen

Status quo



- **DIN EN ISO 10684, Anhang E und ASTM A123:** „Schneiden oder Losstemmen mittels eines Messers mit erheblichem Druck“
 - im Sinn einer reproduzierbaren Haftfestigkeitsprüfung unzureichend, weil keine definierten Randbedingungen gegeben sind
- **ASTM A123-84 Fallhammerprüfung (auch IS 2629, JIS 401)**
 - Nicht für HT-FVZ geeignet, keine Korrelation mit Haftfestigkeit ableitbar aufgrund der dynamischen Beanspruchung, wurde in ASTM gestrichen
- **DIN 50978 Schlaghammerprüfung:**
 - Zurückgezogen, siehe Fallhammerprüfung. Wird aber in Richtlinien anderer Verbände in modifizierter Form weiterhin zur Haftungsprüfung aufgeführt (z.B. Nordic Galvanizers)
- **Stirnabzugversuch oder Metallographie**
 - Zu aufwändig für die produktionsbegleitende Prüfung

Ausgangssituation

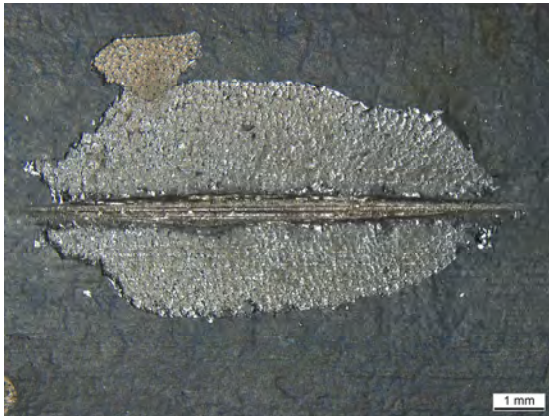
- **Kapp 1% der Jahrestonnage an feuerverzinkten Verbindungselementen weisen Haftfestigkeitsprobleme auf,** davon werden rund 40% der Haftfestigkeitsprobleme vom Schraubenhersteller festgestellt und rund 20% bei der Montage durch die Endkunden [1]
- **Aktuell existieren keine geeigneten genormten Prüfverfahren** für eine praxisgerechte und zuverlässige Beurteilung der Haftfestigkeit von Feuerverzinkungsüberzügen und der damit verbundenen Funktionseigenschaften, insbesondere während der Beanspruchungen bei Montage und im Betrieb.
- **Feuerverzinkungsunternehmen und Schraubenherstellern fehlt ein Werkzeug** für eine normgerechte Prüfung der Qualität ihrer Produkte sowie zur Prozessüberwachung und –optimierung.
- **Existierende Prüfansätze sind ungeeignet zur Beurteilung der Haftfestigkeit von Zinküberzügen,** da diese meist auf einer dynamischen Schlagbeanspruchung beruhen und daher allenfalls Aussagen zur Zähigkeit der Überzüge ermöglichen. Eine belastbare Korrelation mit der Haftung der Überzüge und deren Funktion ist daraus nicht ableitbar.

[1] Interne Umfrage des Gemeinschaftsausschusses Verzinken, März 2019

Ausgangssituation

Schlagtest nach DIN 50978 bei HT-verzinkten M16-Muttern

Gutteil



Schlechtteil



- Bei HT-verzinkten Muttern M16 konnte im Schlagtest nach DIN 50978 nicht zwischen Bauteilen mit und ohne Haftungsproblemen differenziert werden, während sich im Montageversuch aufgrund der realen Beanspruchungen beide Chargen eindeutig differenzieren ließen.

- Ein vom Deutschen Schraubenverband (DSV e.V) organisierter industrieller Feldversuch mit drei proprietären Prüfmethoden (basierend auf Gitterschnitt, Verschraubung und Falltest) - durchgeführt von Schraubenherstellern und Verzinkungsbetrieben - zeigte keine Korrelation bezüglich der erzielten Befunde [2]

[2] Feldversuch des Deutschen Schraubenverbands, intern, Protokoll vom 03.07.2019



Entwicklung einer robusten, einfach handhabbaren und aussagekräftigen Methode zur Prüfung der Haftfestigkeit von Feuerverzinkungsüberzügen auf Verbindungselementen

- **Erstellung eines Lasten- / Pflichtenhefts** bzgl. der Haftfestigkeitsanforderungen an Feuerverzinkungsüberzügen unter Berücksichtigung der Beanspruchungen während Montage und Betrieb
- **Praxis-Screening existierender Methoden** zur Haftfestigkeitsprüfung von Beschichtungen und Zinküberzügen im Allgemeinen sowie in den Betrieben praktizierter proprietärer Methoden zur Haftungsprüfung für Feuerverzinkungsüberzüge
- (Weiter-) **Entwicklung praxisgeeigneter Prüfmethoden**, Umsetzung des Pflichtenhefts
- **Sicherstellung der praktischen Anwendbarkeit** bei Verbindungselementen (Schraube, Mutter, Scheibe) unterschiedlichster Abmessungen
- Eingang der entwickelten Methode in **Normen / Richtlinien**, z.B. ISO 10684

Prüfung der Schichthaftung

Umfrage in Verzinkungsbetrieben

Wo treten Probleme auf?

- Schwerpunkt HT-Verzinkung
- bei NT-Verzinkung bei schweren Bauteilen und großen Schichtdicken
- beim Sweepen, z.T. durch Kirkendall-Effekt

Eingesetzte Prüfmethoden

- keine Prüfung der Haftfestigkeit
- Schlagprüfung nach DIN 50978
- frei geführter Hammer mit abgerundetem Kopf
- gegeneinanderschlagen von Bauteilen
- Kreuzschnitt



Abbildung der Montagebedingungen

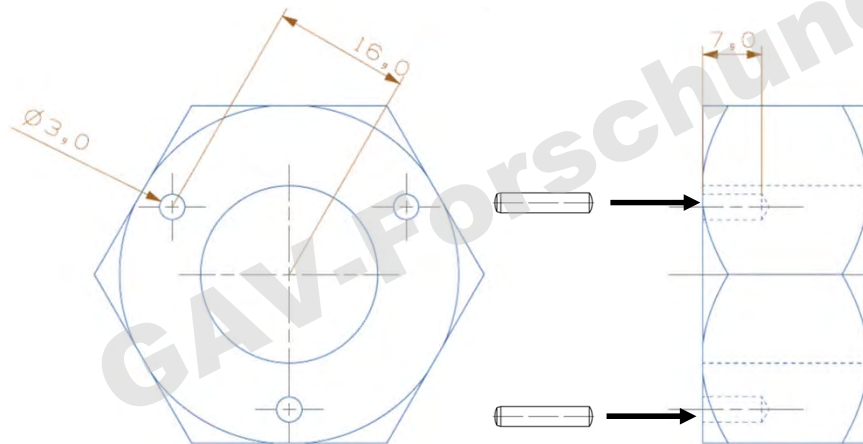
Ansatz: Druck-Schubbeanspruchung mit steigender Pressung



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Umsetzung:

- Krafteinleitung über Zylinderstifte (DIN 7)
- Erhöhung der Beanspruchung durch Anziehen der präparierten Mutter
- Berechnung der Flächenpressung



Simulation of the installation conditions

Validation by Microspecimens



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

- Unterscheidung zwischen gut/schlecht möglich
- Bewertungskriterien:
 - mindestens zwei abplatzungsfreie Prüfstellen
 - Morphologie der Abplatzungen
- Grenzfälle:
 - durch ein unsauberes Aufkleben der Unterlegscheiben und eine dadurch ungleichmäßige Belastung durch die drei Stifte
→ Kleber durch Schleifpapier ersetzt

Nuts	
23	96%
0	0%
1	4%

Bolts	
12	100%
0	0%
0	0%

Washer (Glue)	
15	83%
3	17%
0	0%

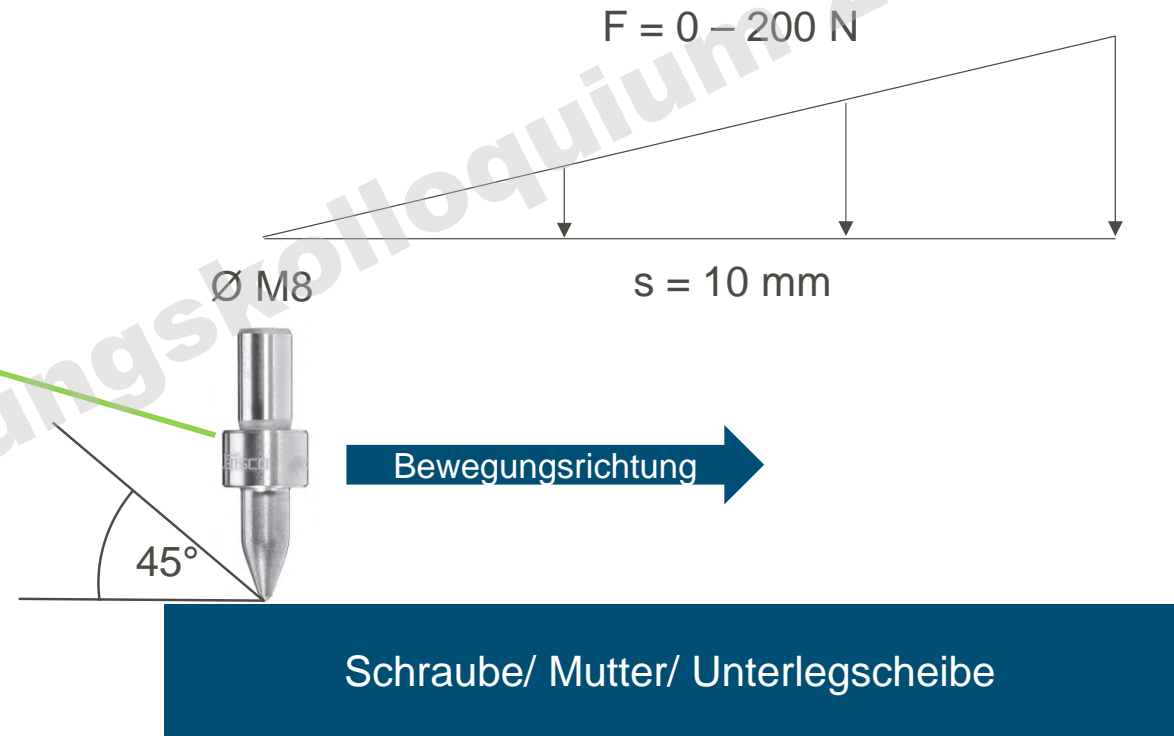
Washer (Sandpaper)	
6	100%
0	0%
0	0%

Modifizierter Scratch-Test Aufbau

Schrauben/ Unterlegscheiben/ Muttern



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Vorteil:

- Gleichmäßigere Belastung
- Kein ruckartiges Anziehen
- Verschleißbeständig



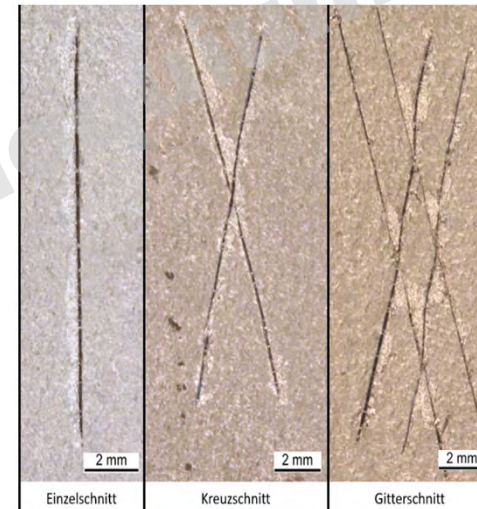
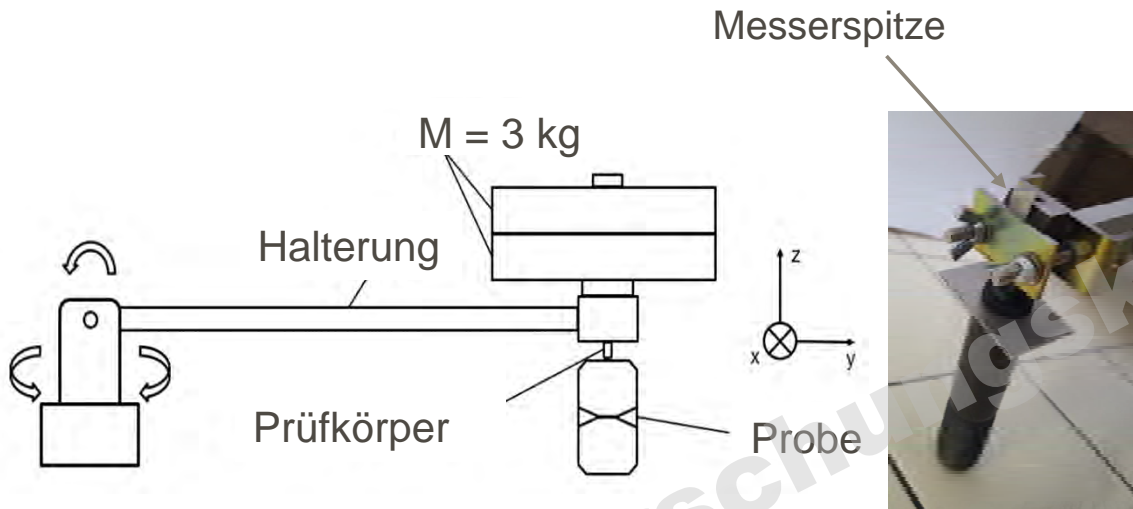
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

GAV-Forschungskolloquium 2023

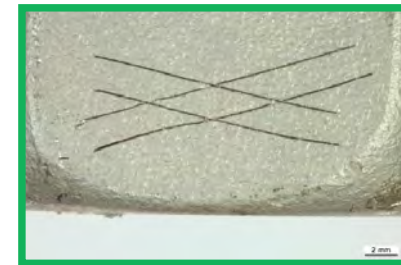


Rückblick: Ritztest mit eigenem Prüfaufbau

Schrauben/ Unterlegscheiben/ Muttern



Gut



Schlecht



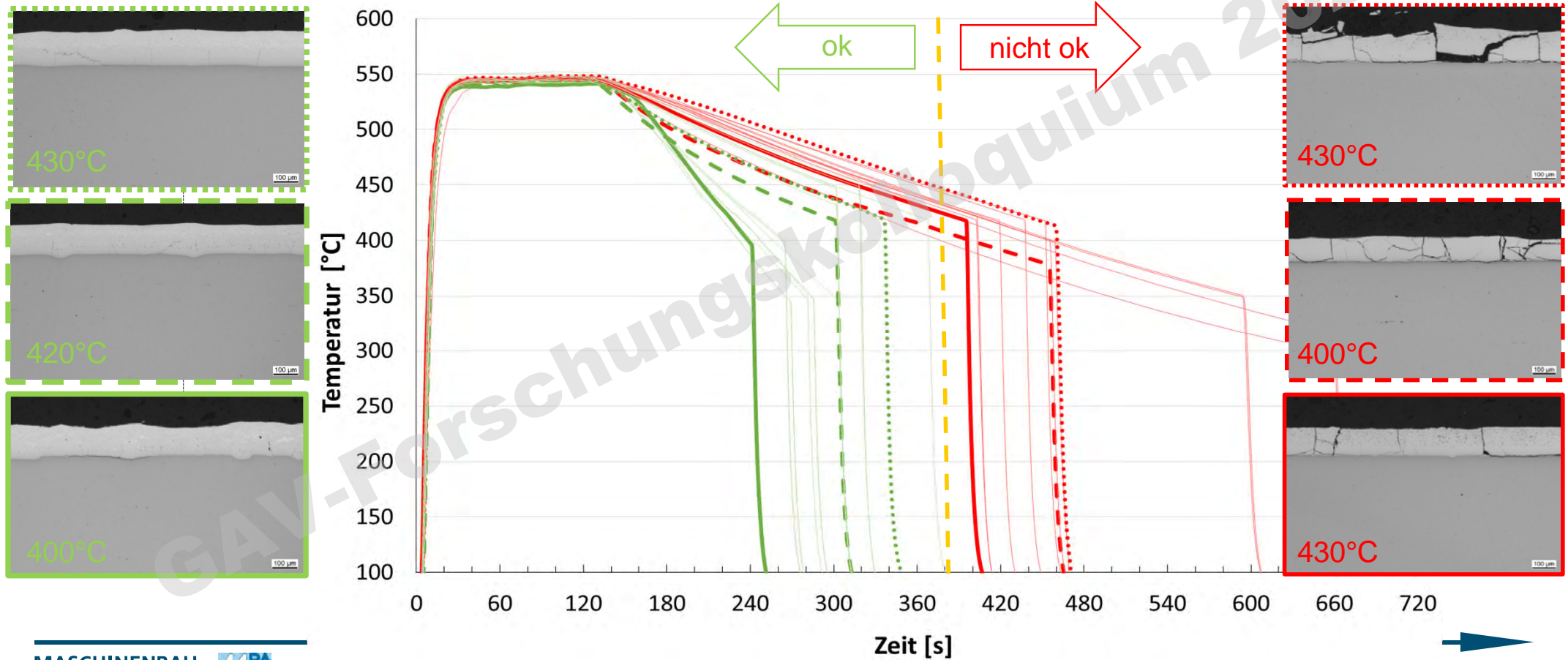
Nachteil: Hoher Verschleiß der Messerklinge/ Viele Ausreißer/ Konstante Kraftaufbringung durch Gewichte

Abkühlkurven @ 560°C

"Zeitbarriere" bezüglich der Überzugsqualität



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



AP4: Entwicklung Methode Schlagbär

Beispielhafte Prüfung an Muttern:

HT-FVZ: „schlecht“

HT-FVZ: „gut“

NT-FVZ: „schlecht“

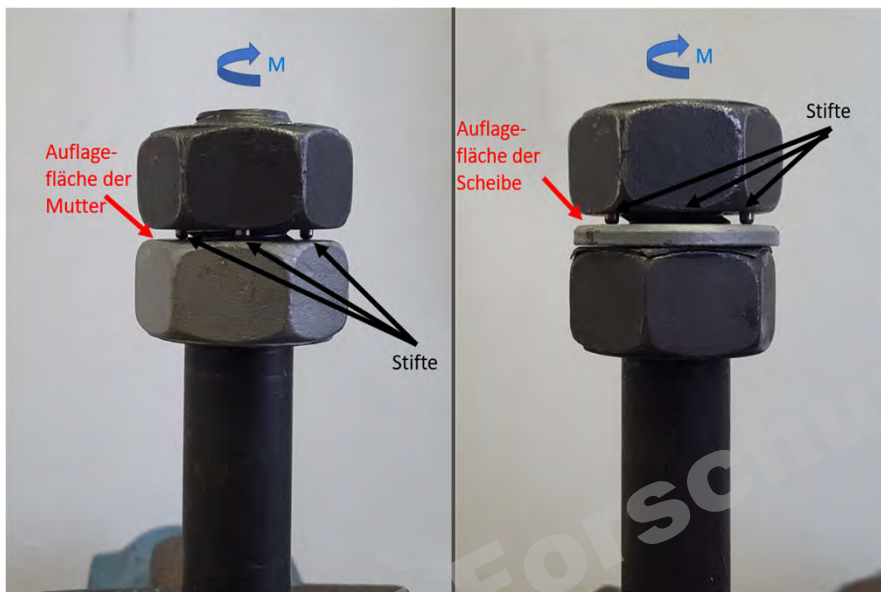


Keine Unterscheidung zwischen Gut/Schlecht möglich



Rückblick: Kratztest

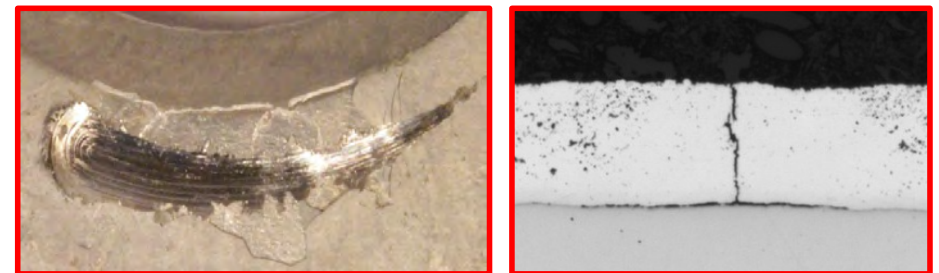
Unterlegscheiben/ Muttern



Gut



Schlecht



Nachteil: Nur Test von Muttern und Unterlegscheiben möglich/ Inhomogene Kraftaufbringung auf Testmutter