

Heißbemessung von Schrauben

3. Fachtagung

Mechanische Verbindungsmittel im Stahlbau

Online Fachtagung 25. und 26. März 2021

Bemessung der Schraubentragfähigkeit nach DIN 1993-1-2

Ermittlung der Schertragfähigkeit im Brandfall:

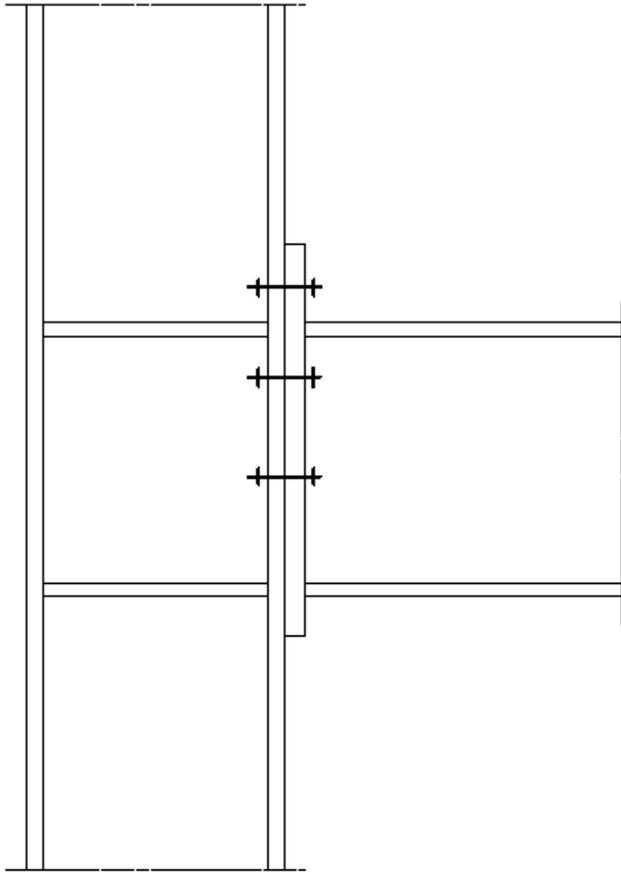
$$F_{v,t,Rd} = F_{v,Rd} k_{b,\theta} \frac{\gamma_{M2}}{\gamma_{M,fi}}$$

Ermittlung der Zugtragfähigkeit im Brandfall:

$$F_{ten,t,Rd} = F_{t,Rd} k_{b,\theta} \frac{\gamma_{M2}}{\gamma_{M,fi}}$$

$k_{b,\theta}$ ist der Abminderungsfaktor für die Festigkeit der Schrauben in
Abhängigkeit von der Stahltemperatur (Tabelle D.1 DIN EN 1993-1-2)

Ausgangssituation für die Bemessung

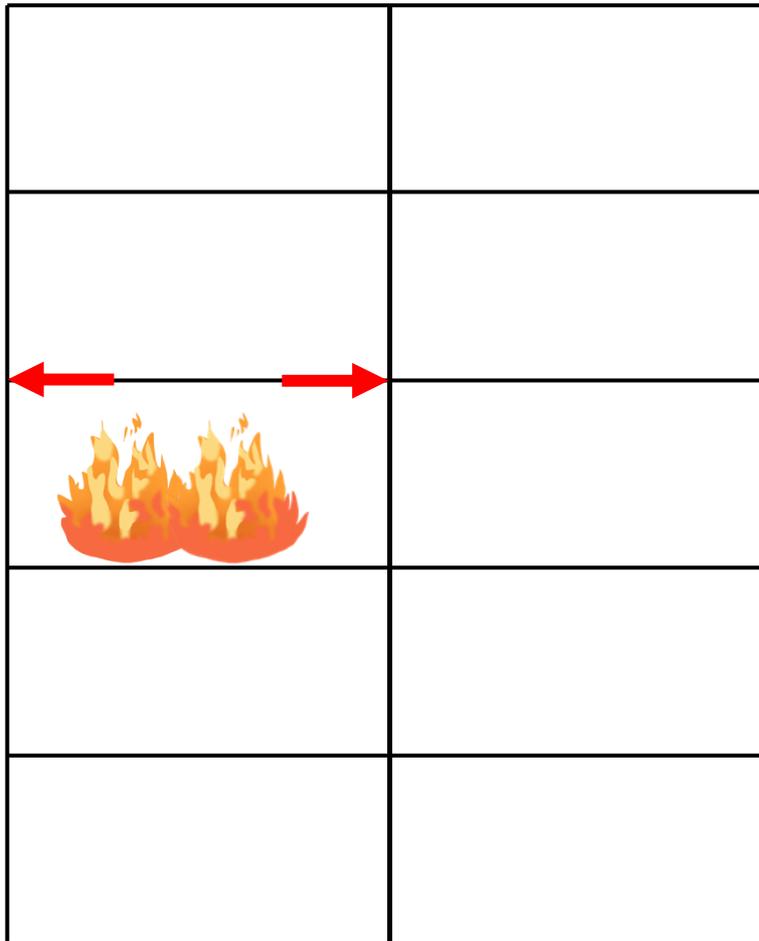


hohe Masse **→**
Anschlüsse erwärmen sich langsamer

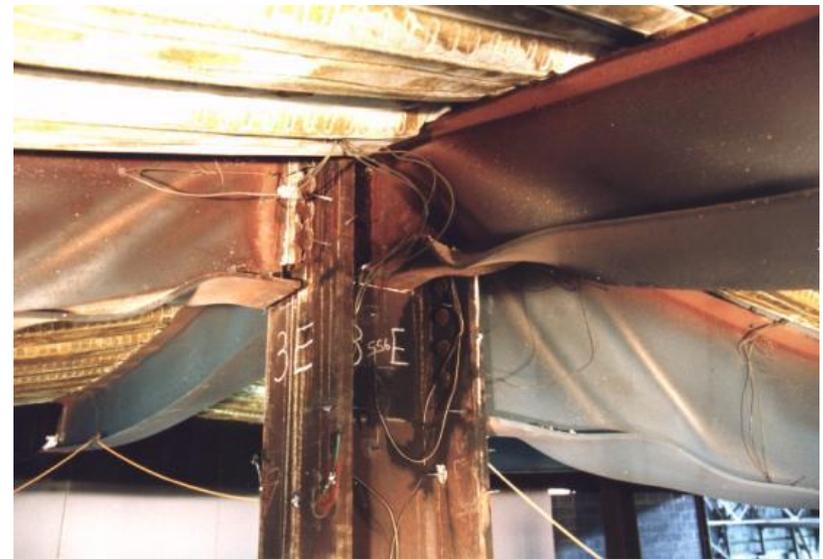
gemäß EC 3 Teil 1-2 Temperatur im
Anschluss nur 88 % der angeschlossenen
Bauteile

Anschlüsse daher für den Brandfall
nicht so von Interesse?
Genauere Betrachtung eines
Brandgeschehens erforderlich.

Erwärmungsphase



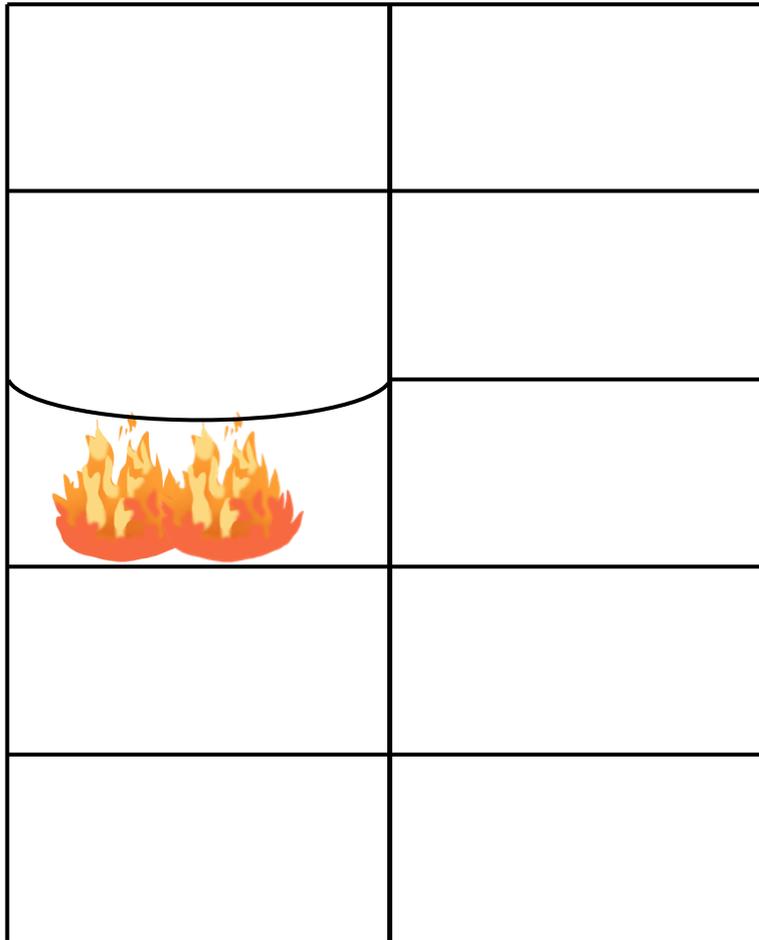
- angeschlossene Bauteile dehnen sich aus
- Anschluss muss zu Moment und Querkraft nun auch Druck abtragen
- Beulen im Steg möglich



Quelle: Newman 2006

Hohe Temperaturen

- angeschlossene Bauteile hängen durch
- Anschluss muss Scher- und Zugkräfte abtragen

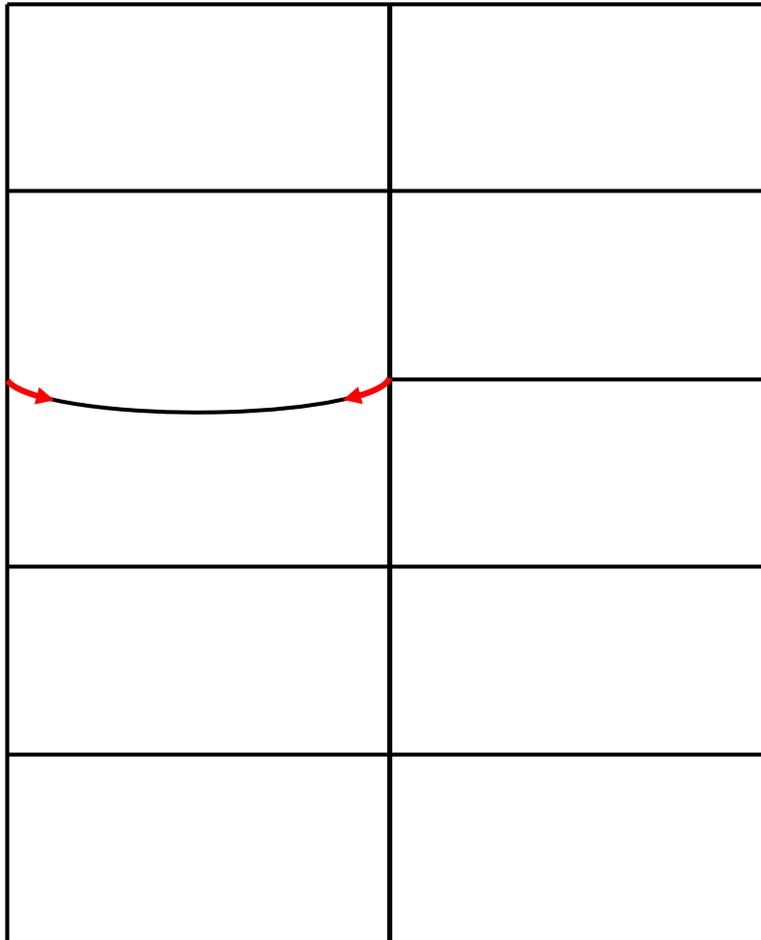


Quelle: Al Jabri 2008



Quelle: Yu 2011

Abkühlphase

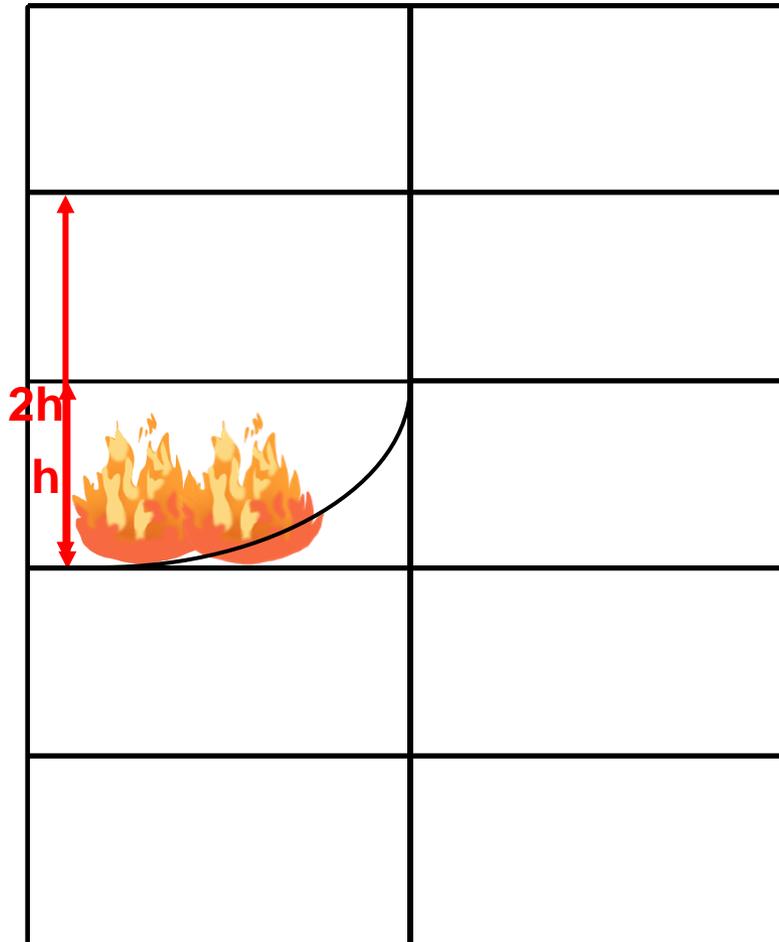


- angeschlossene Bauteile ziehen sich wieder zusammen
- Anschluss muss jetzt eine große Zugbeanspruchung aufnehmen

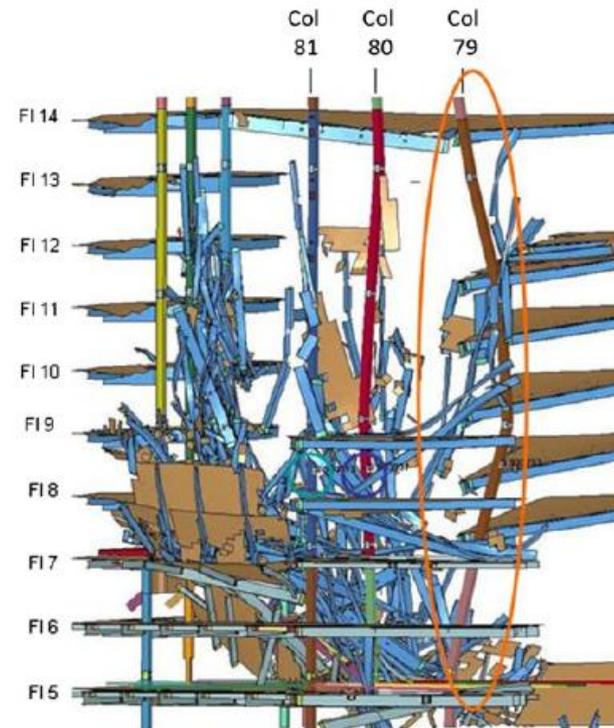


Quelle: Newman 2006

Bedeutung für Gesamttragwerk



- bei Ausfall eines Anschlusses kommt es zur Umlagerung der Schnittkräfte

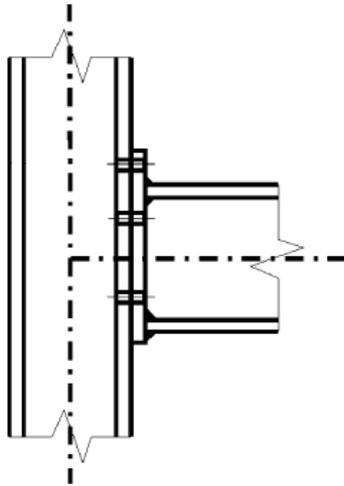


Quelle: McAllister 2013

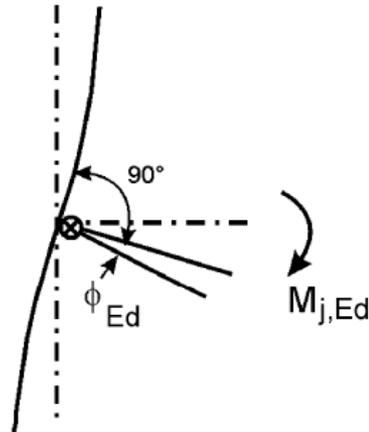
Problemstellung

- Schnittgrößenverteilung im Tragwerk von den Anschlüssen abhängig
- thermische Beanspruchung der angeschlossenen Bauteile verändert die Beanspruchung des Anschlusses
- thermische Beanspruchung des Anschlusses hat wiederum Einfluss auf die Schnittgrößenverteilung

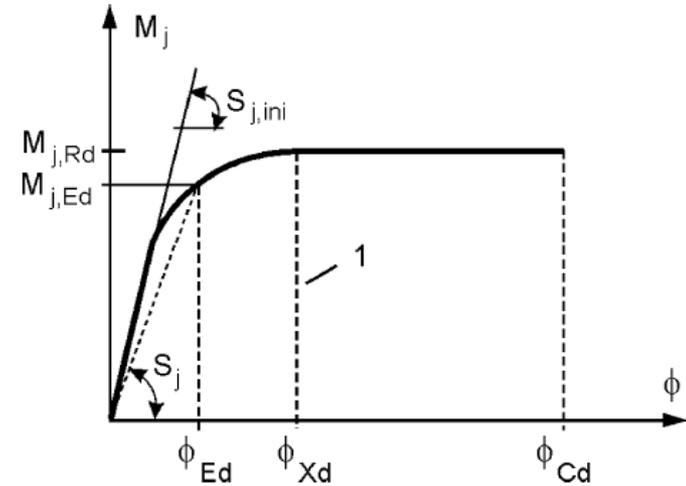
Lösungsansatz - Komponentenmethode



a) Anschluss



b) Statisches Modell



1 Grenzwert für S_j

c) Momenten-Rotations-Charakteristik

Quelle: DIN EN 1993-1-8

Kenngrößen:

- Momententragfähigkeit $M_{j,Rd}$
- Rotationssteifigkeit S_j
- Rotationskapazität ϕ_{Cd}

Lösungsansatz - Komponentenmethode

Kenngrößen:

- Momententragfähigkeit $M_{j,Rd}$ abhängig von:
 - Tragfähigkeit der Schrauben
- Rotationssteifigkeit S_j abhängig von:
 - E-Modul Stahl der angeschlossenen Bauteile sowie der Stirnplatte
 - E-Modul der Schrauben
- Rotationskapazität ϕ_{Cd} abhängig von:
 - Last-Verformungsverhalten der angeschlossenen Bauteile
 - Last-Verformungsverhalten der Stirnplatte
 - Last-Verformungsverhalten der Schweißnähte
 - Last-Verformungsverhalten der Schrauben



**Versuche zur Ermittlung der temperaturabhängigen
Werkstoffkennwerte**

Versuche an 8.8 Schrauben - Kirby

- Versuche an M20 8.8 Schrauben
- stationäre Zug- und Abscherversuche
- Temperaturbereich: 20 °C bis 800 °C
- 2 unterschiedliche Schrauben, 3 verschiedene Muttern

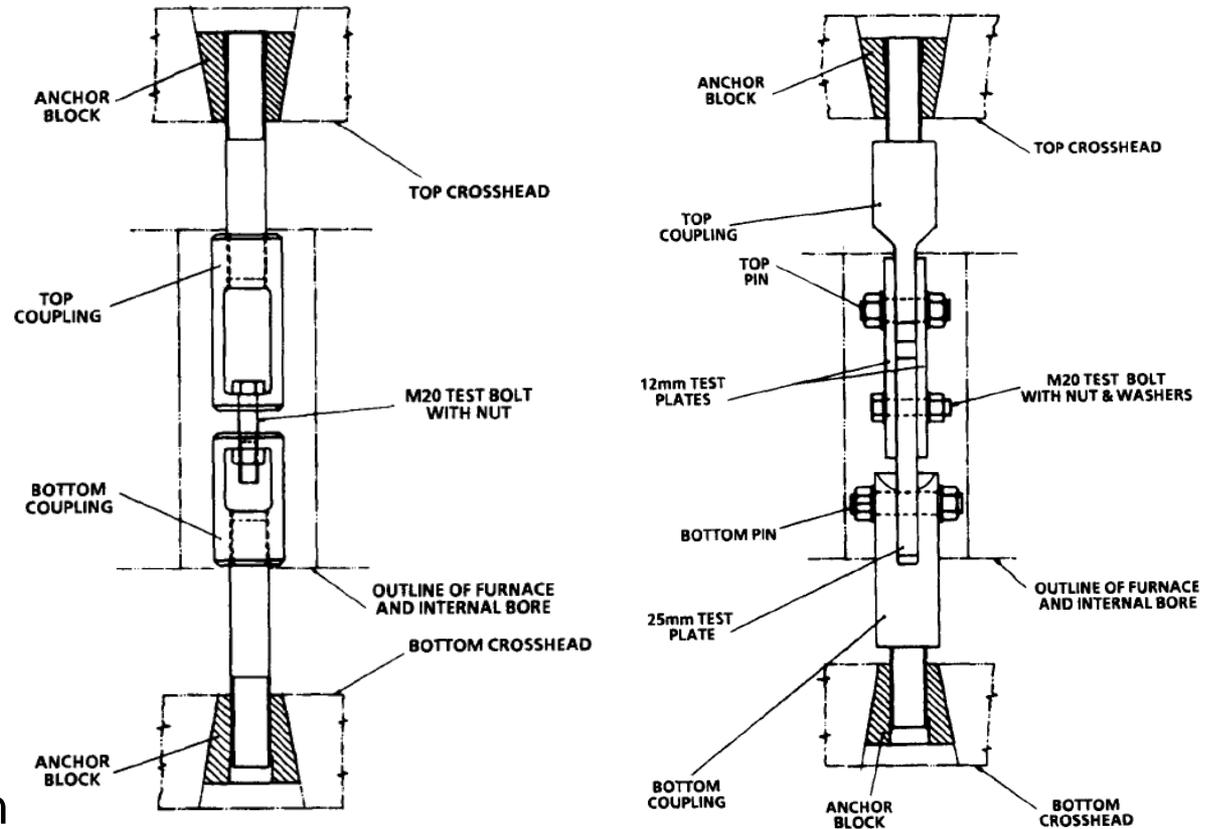
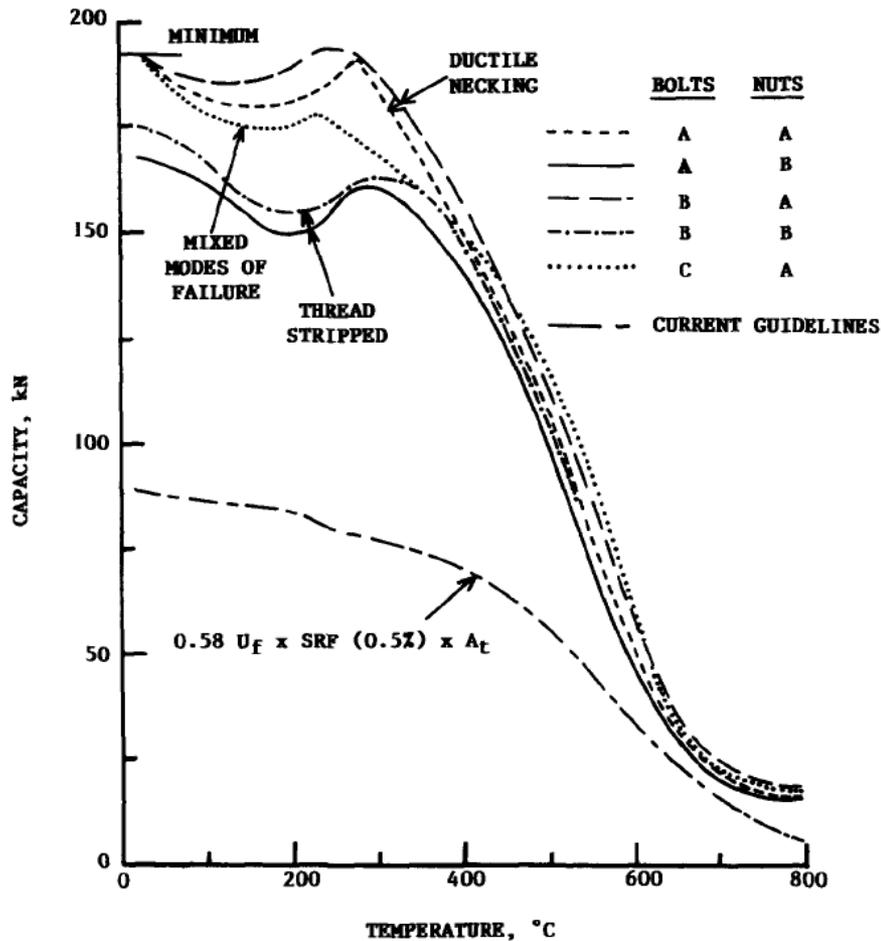


Fig. 1. Test arrangement for evaluating bolts in tension. Fig. 2. General test arrangement for evaluating bolts in double shear.

Quelle: Kirby 1995

Versuche an 8.8 Schrauben - Kirby



Vorschlag zur Reduktion der Tragfähigkeit unter Zug und Abscheren:

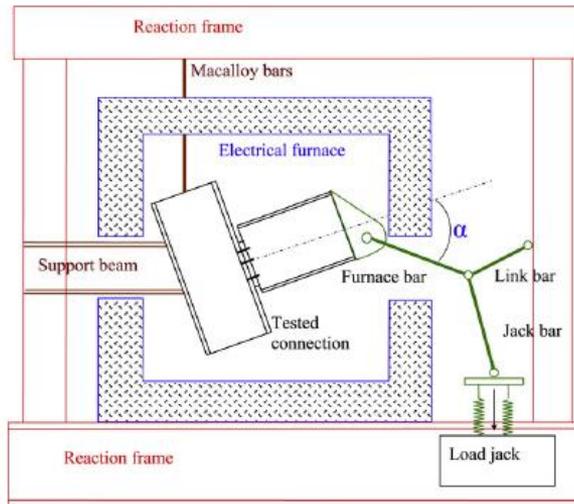
- für $T < 300 \text{ °C}$:
 $SRF = 1,0$
- für $300 \text{ °C} < T \leq 680 \text{ °C}$:
 $SRF = 1 - (T - 300) \cdot 0,2128 \cdot 10^{-2}$
- für $680 \text{ °C} < T \leq 1000 \text{ °C}$:
 $SRF = 0,170 - (T - 680) \cdot 0,5312 \cdot 10^{-3}$

Quelle: Kirby 1995

Brandversuche an Anschlüssen

Yu: Versuche an Fahnenblechanschlüssen

- Aufbringen der Last im Versuch unter einem Winkel um eine Kombination von Scher- und Zugkräften aufzubringen
- Vergleiche mit Kirby und EC brachten keine Übereinstimmung hinsichtlich der Schraubentragfähigkeit



Und viele mehr...

Quelle: Yu 2009

Angaben im EC 3 Teil 1-2

Tabelle D.1 — Abminderungsfaktor für Festigkeiten von Schrauben und Schweißnähten

Temperatur θ_a	Abminderungsfaktor für Schrauben $k_{b,\theta}$ (Zug und Schub)	Abminderungsfaktor für Schweißnähte $k_{w,\theta}$
20	1,000	1,000
100	0,968	1,000
150	0,952	1,000
200	0,935	1,000
300	0,903	1,000
400	0,775	0,876
500	0,550	0,627
600	0,220	0,378
700	0,100	0,130
800	0,067	0,074
900	0,033	0,018
1 000	0,000	0,000

Quelle: DIN EN 1993-1-2

 Keine Unterscheidung nach Festigkeitsklassen!

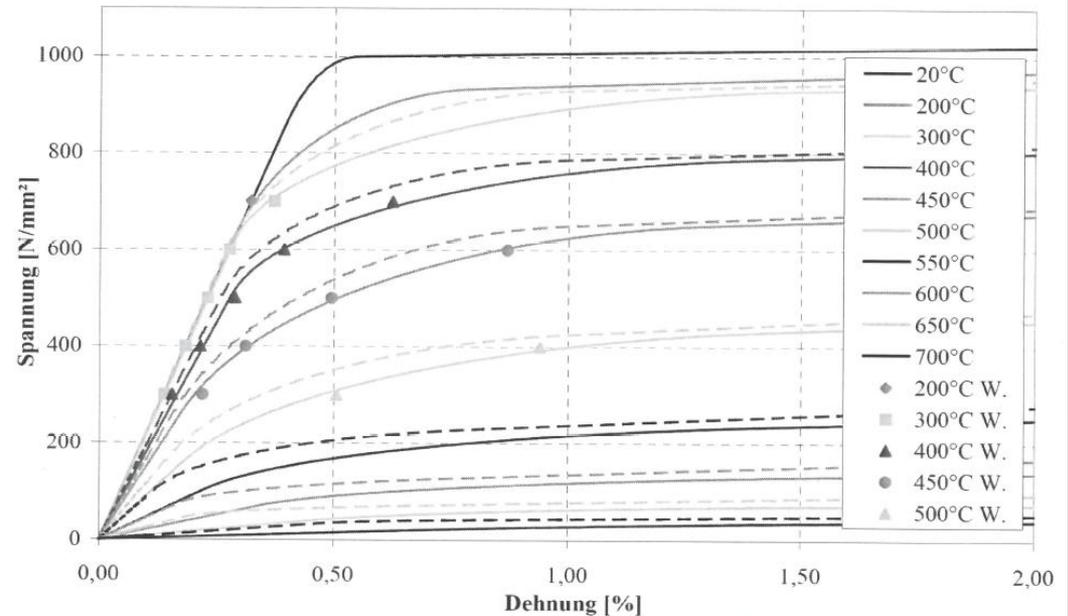
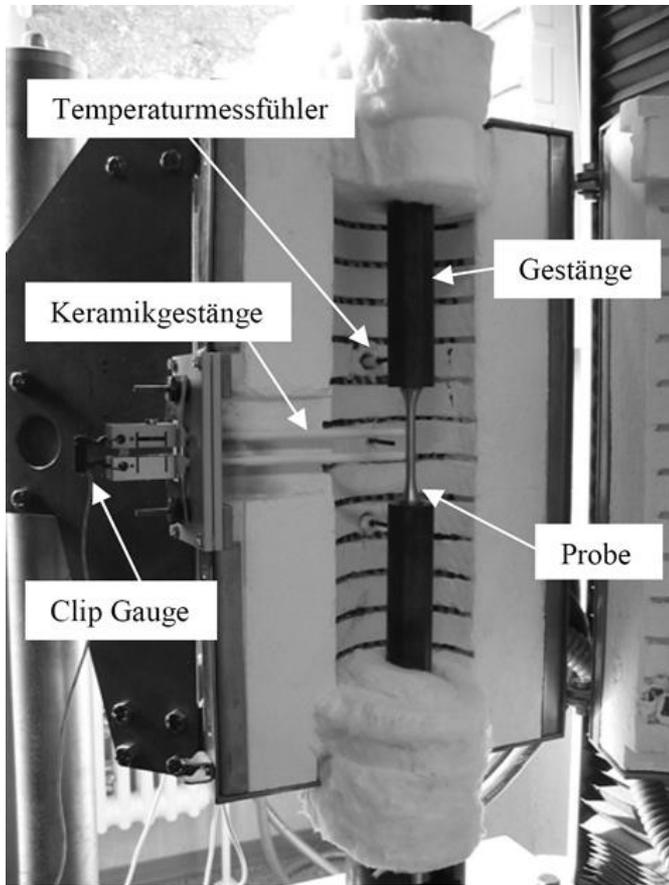
 Keine Angaben zu σ - ε -Beziehungen!

Versuche an 10.9 Schrauben - González



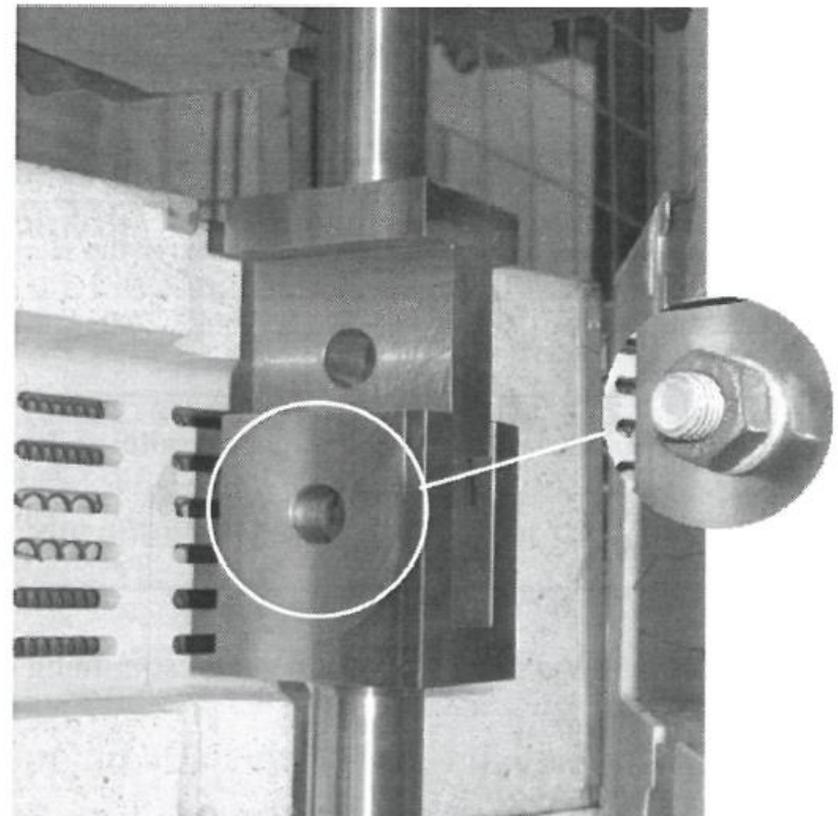
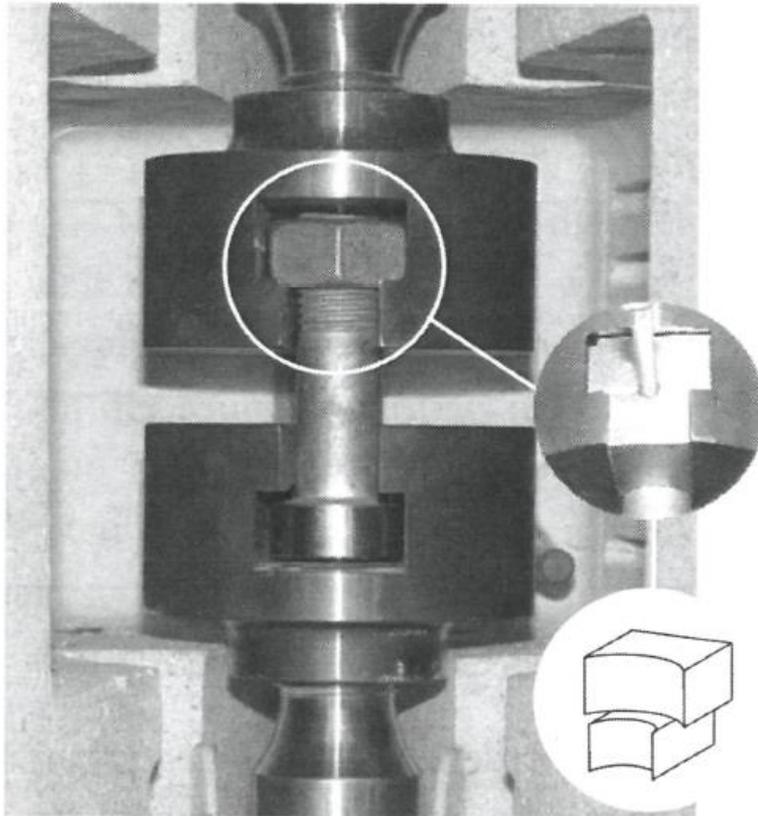
- stationäre Warmzug- und Kriechversuche an abgedrehten Schrauben
- instationäre Warmkriechversuche
 - ➔ Ermittlung temperaturabhängiges Werkstoffgesetz
- stationäre Zug- und Abscherversuche an M20 Schrauben
 - ➔ temperaturabhängige Reduktionsfaktoren für die Schraubentragfähigkeit
- Versuche zur Resttragfähigkeit (Proben + Schrauben)
 - ➔ Ermittlung von Reduktionsfaktoren für die Resttragfähigkeit

Versuche an 10.9 Schrauben - González

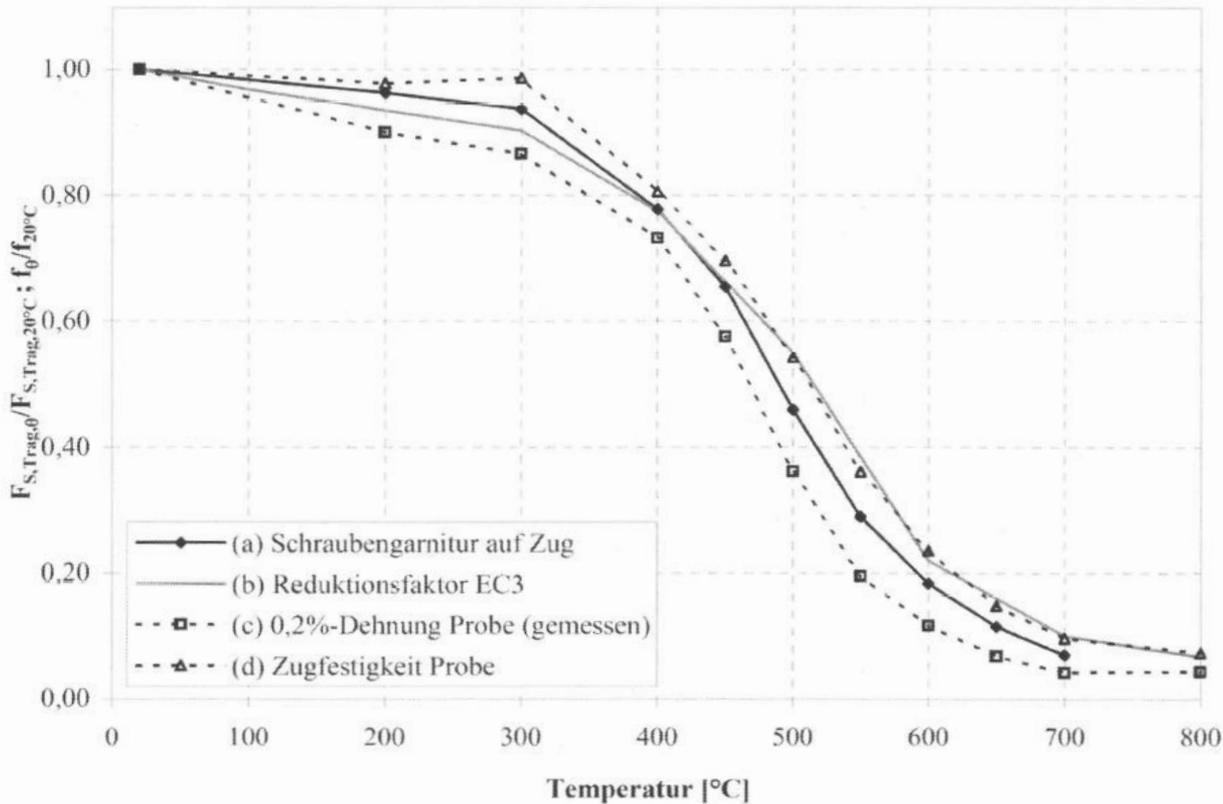


Quelle: González 2011

Versuche an 10.9 Schrauben - González



Versuche an 10.9 Schrauben - González

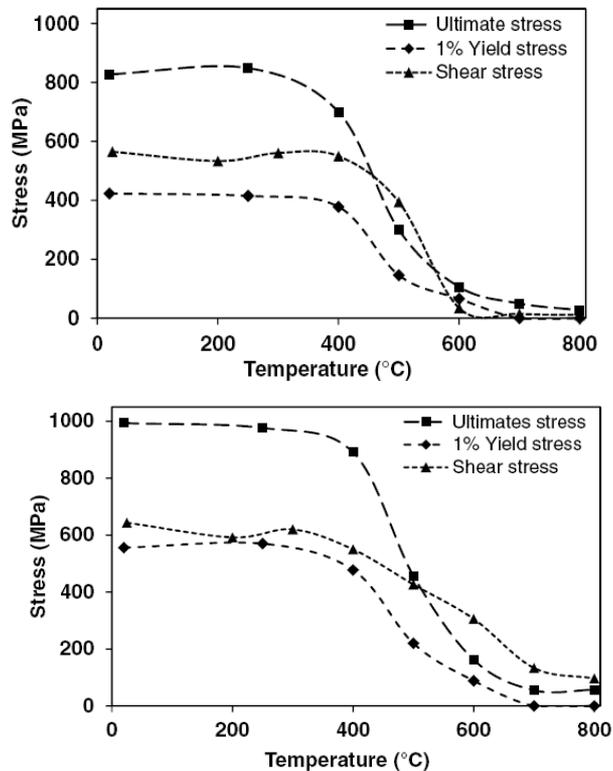


Temp.	Gonz.	EC 3
20 °C	1,0	1,0
200 °C	0,97	0,935
300 °C	0,95	0,903
400 °C	0,79	0,775
500 °C	0,49	0,550
600 °C	0,16	0,220
700 °C	0,05	0,100

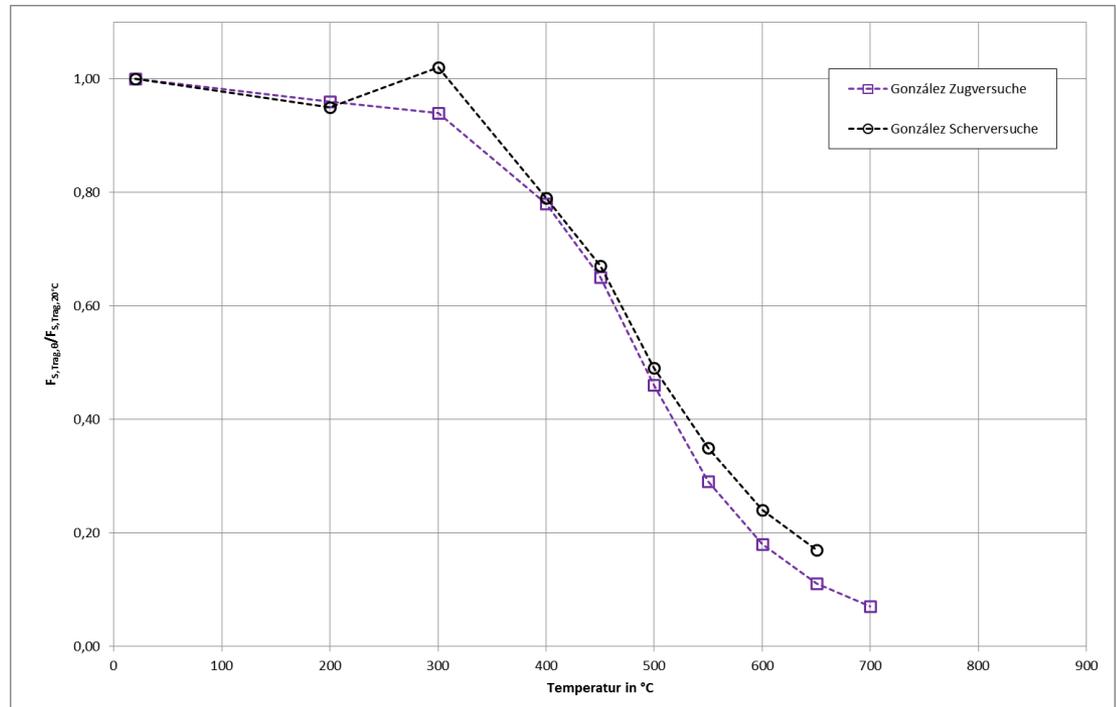
Quelle: González 2011

Unterschiede: Zug ↔ Abscheren

Versuchsreihen an hochfesten Schrauben zeigten ein unterschiedliches Verhalten unter Scher- und Zugbeanspruchung.



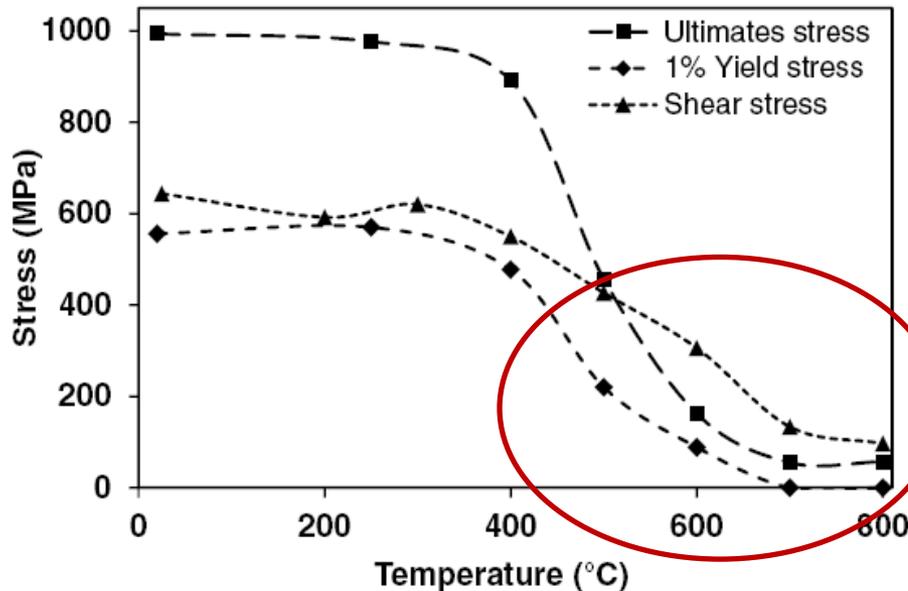
Quelle: Kodur et al. 2012



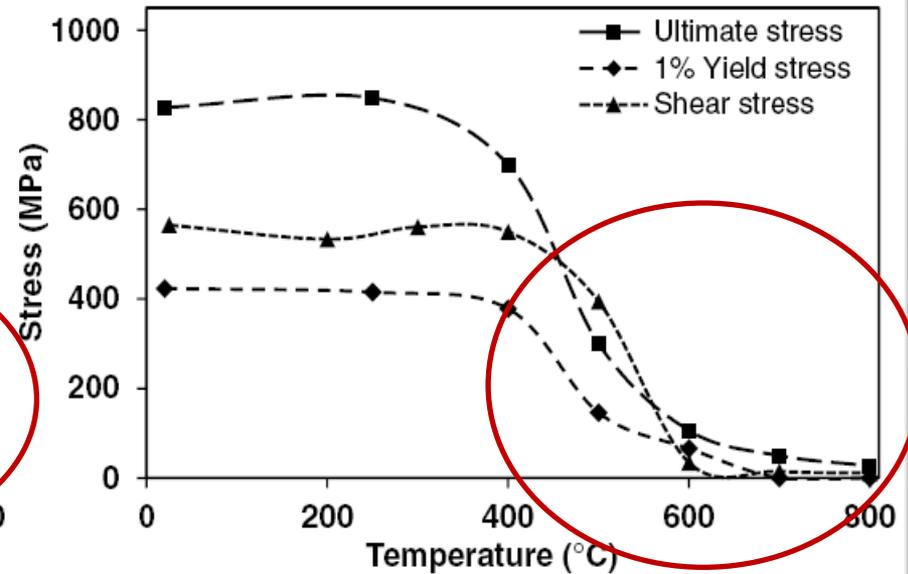
Quelle: González 2011

Unterschiede: Zug ↔ Abscheren

Versuchsreihen an hochfesten Schrauben zeigten ein unterschiedliches Verhalten unter Scher- und Zugbeanspruchung.



A490 Schrauben ($f_u = 1.030 \text{ N/mm}^2$)

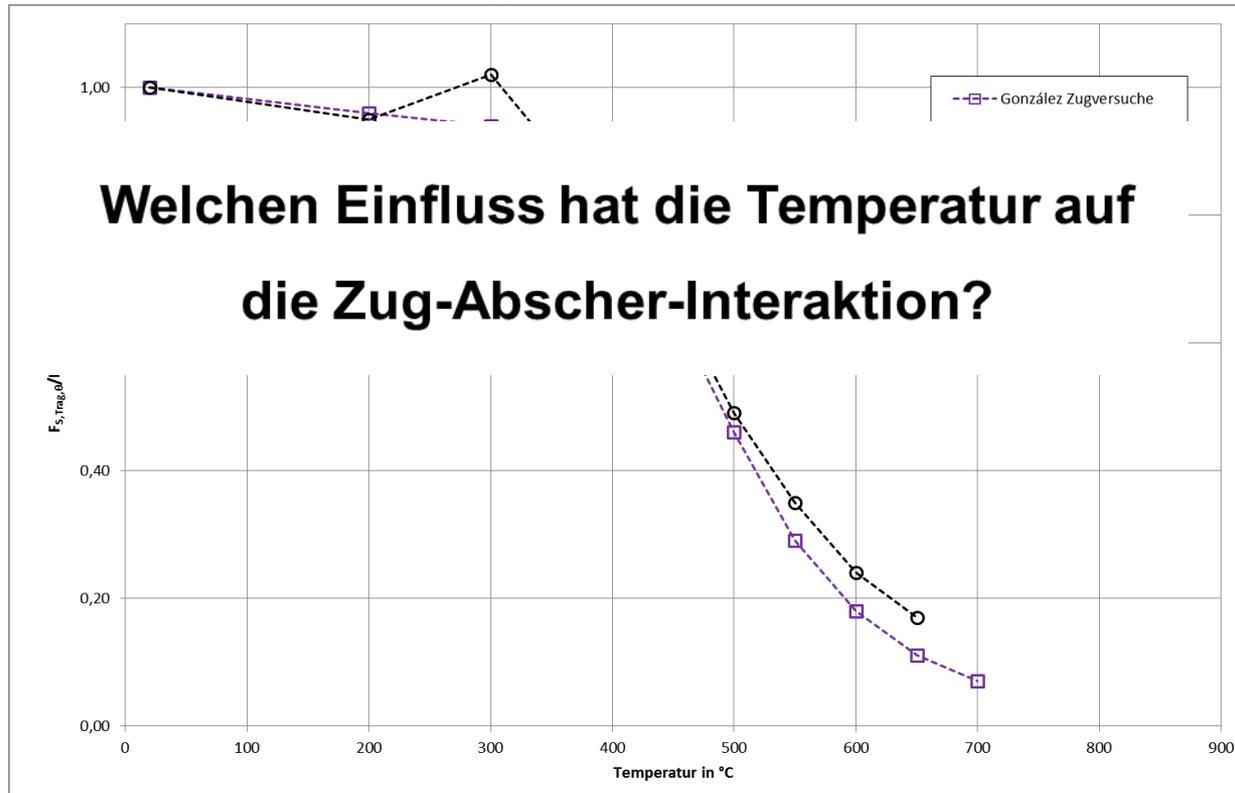


A325 Schrauben ($f_u = 830 \text{ N/mm}^2$)

Quelle: Kodur et al. 2012

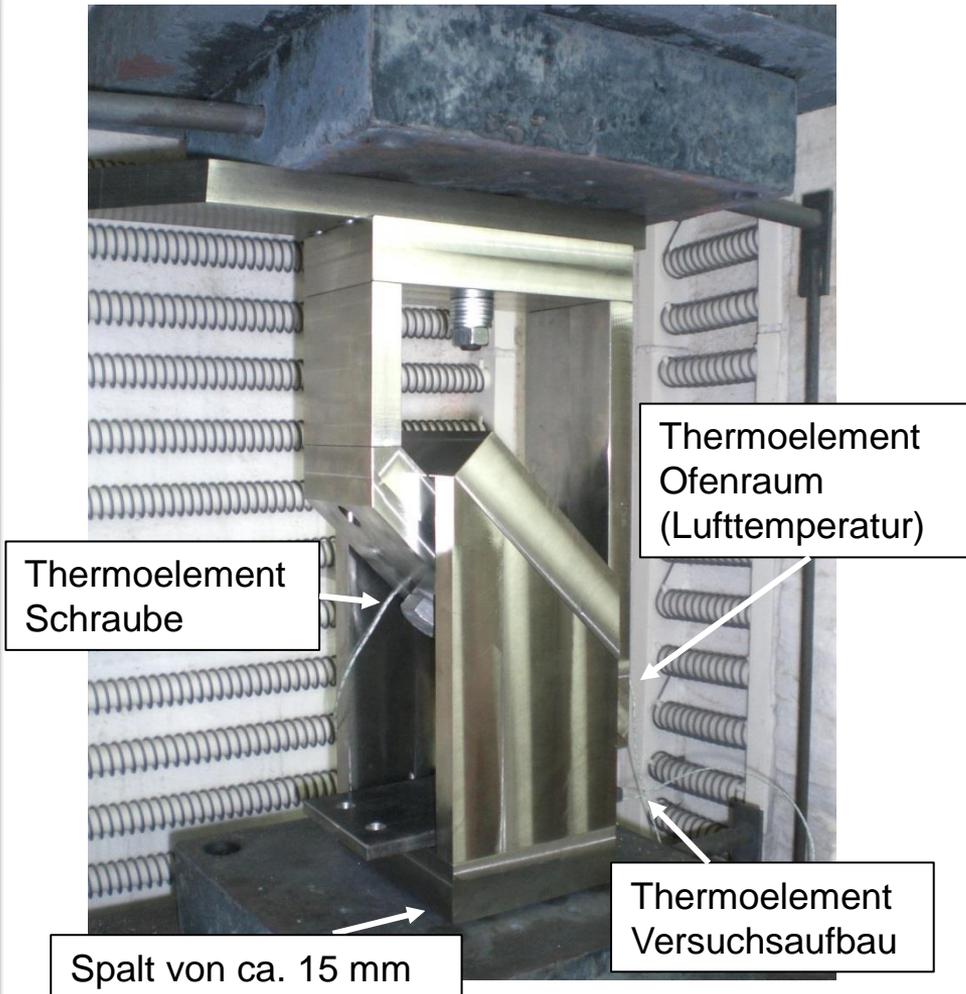
Unterschiede: Zug \leftrightarrow Abscheren

Versuchsreihen an hochfesten Schrauben zeigten ein unterschiedliches Verhalten unter Scher- und Zugbeanspruchung.



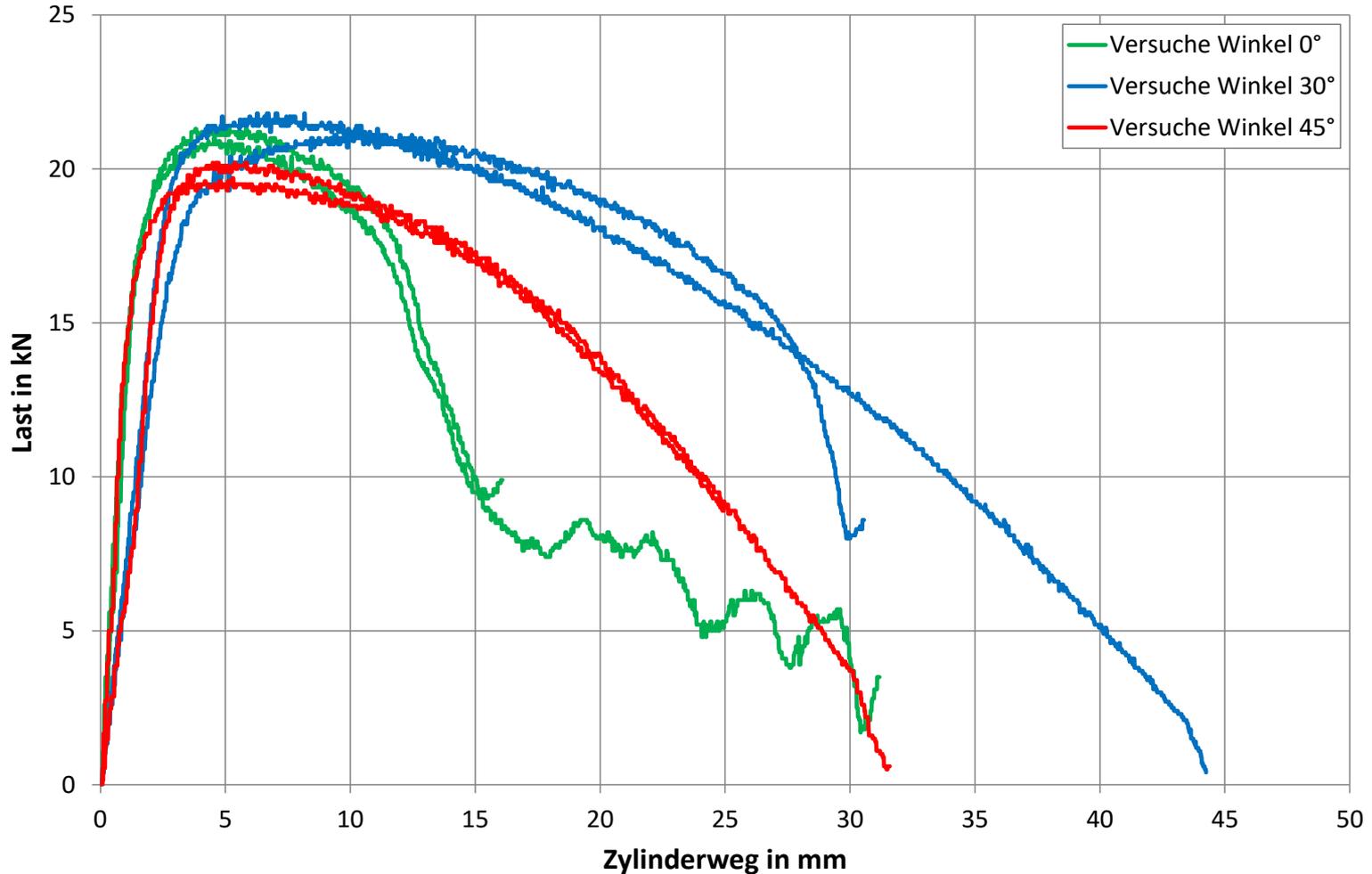
Quelle: González 2011

Versuchsdurchführung – Versuche unter Brandbeanspruchung



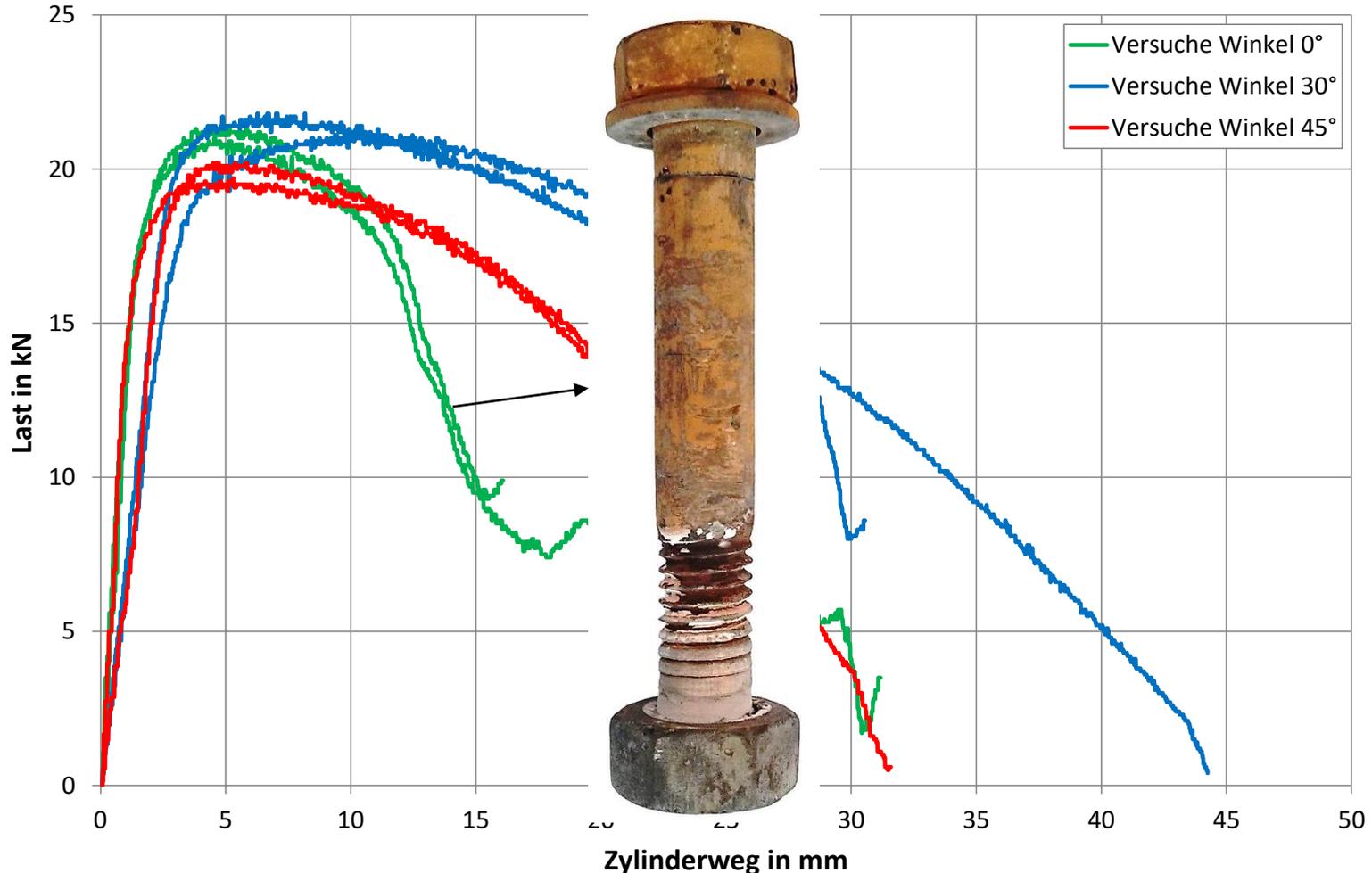
- Temperaturen: ca. 500 °C und 700 °C
- Heizrate: 5 K/min
- stationäre Versuche
- weggesteuert nach DIN EN ISO 6892-2 mit 1,5 mm/min
- Messdaten: Kraft, Zylinderweg, Temperatur
- optische Überwachung nicht möglich

Versuche unter Brandbeanspruchung – Ergebnisse: Kraft-Weg-Diagramm bei ca. 700 °C



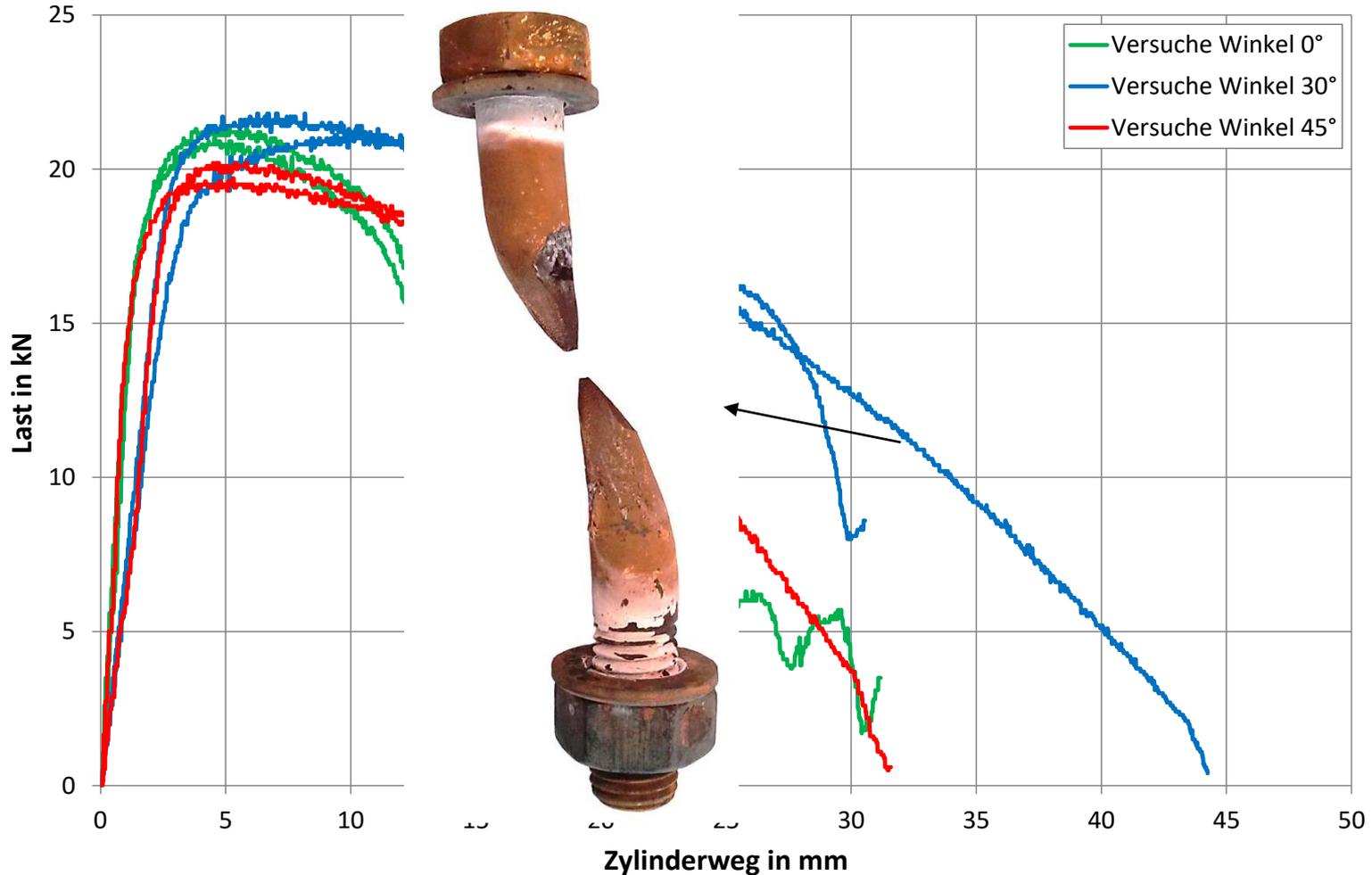
Versuche unter Brandbeanspruchung –

Ergebnisse: Kraft-Weg-Diagramm bei ca. 700 °C

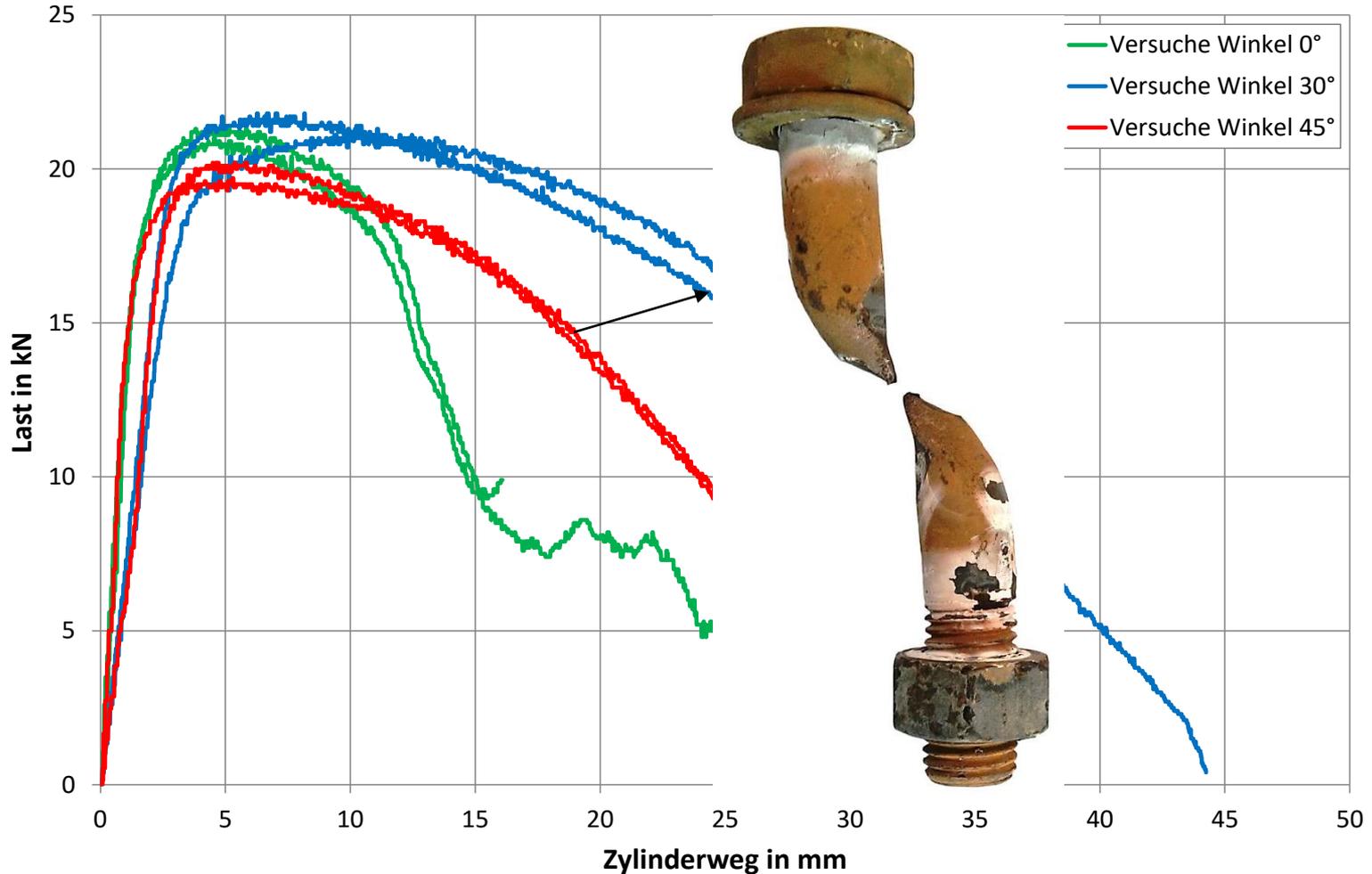


Versuche unter Brandbeanspruchung –

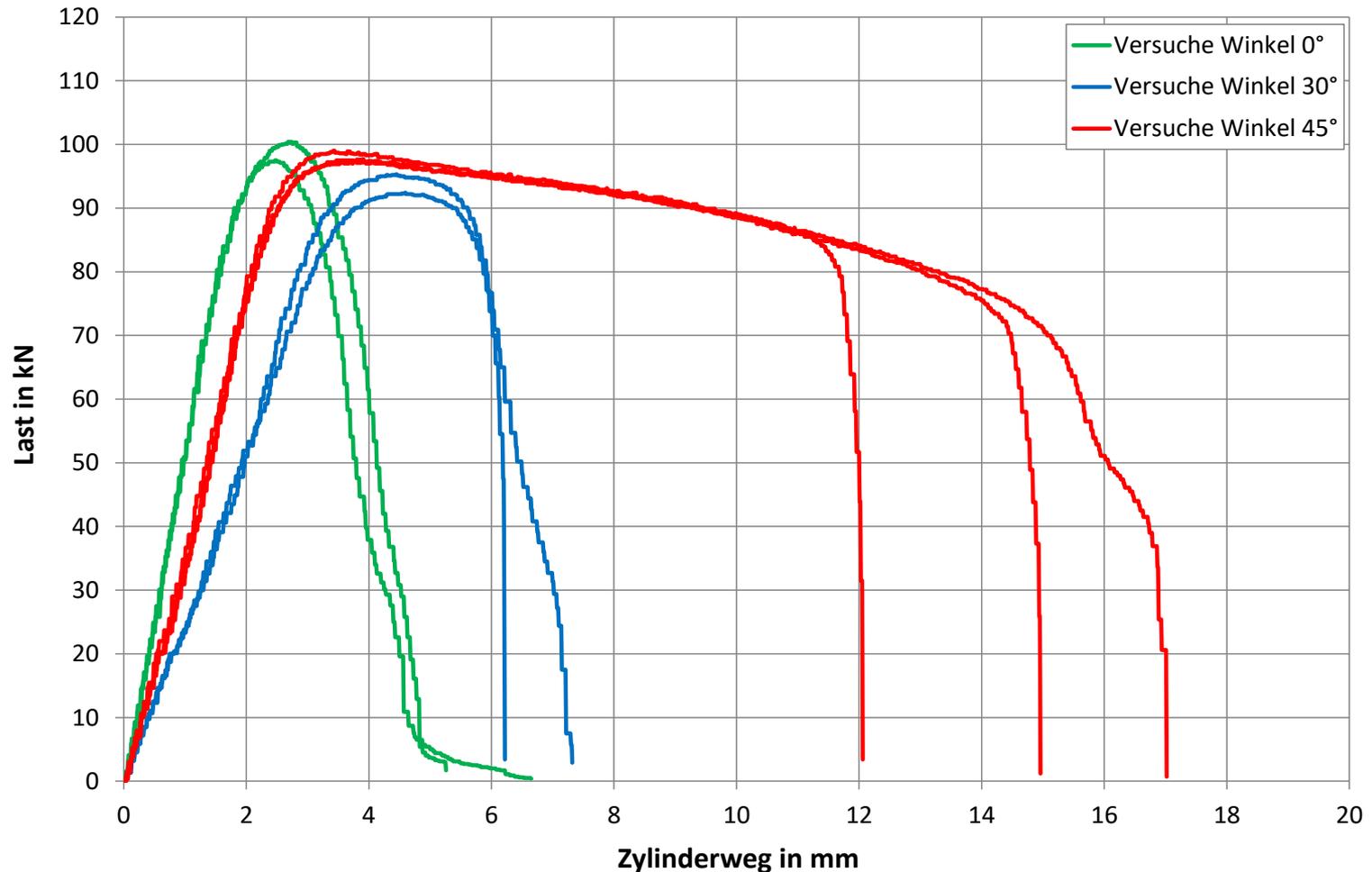
Ergebnisse: Kraft-Weg-Diagramm bei ca. 700 °C



Versuche unter Brandbeanspruchung – Ergebnisse: Kraft-Weg-Diagramm bei ca. 700 °C

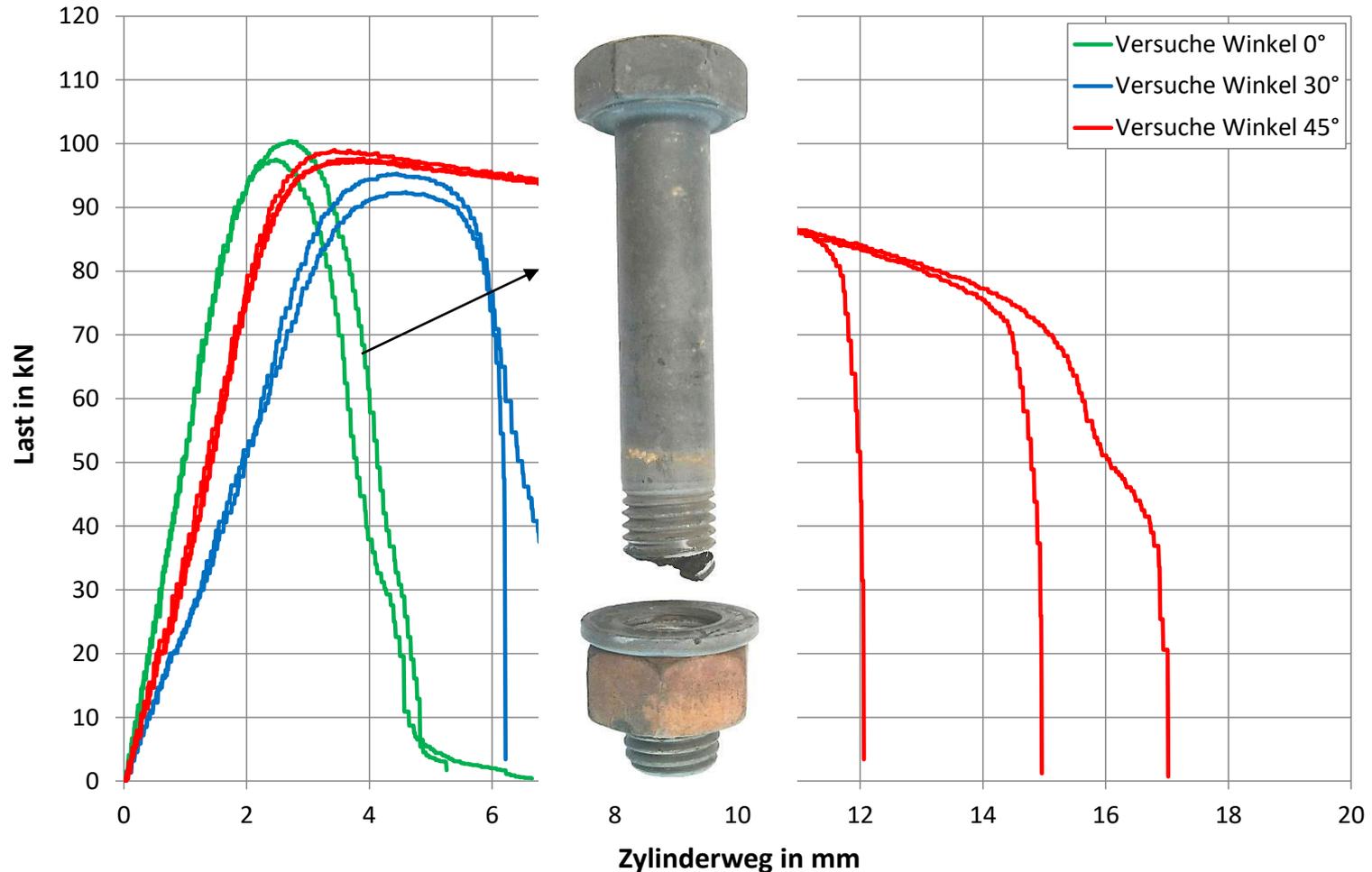


Versuche unter Brandbeanspruchung – Ergebnisse: Kraft-Weg-Diagramm bei ca. 500 °C



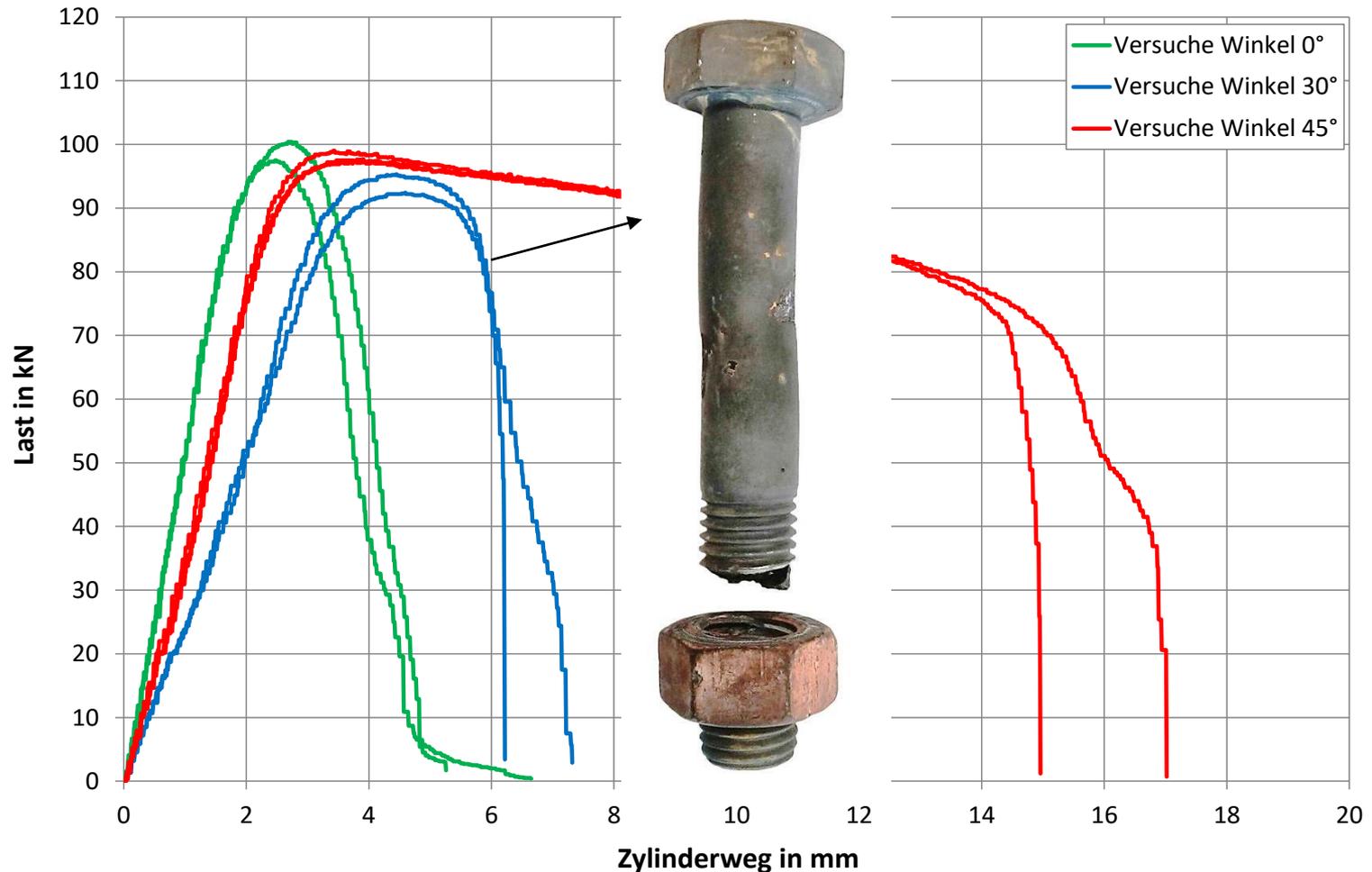
Versuche unter Brandbeanspruchung –

Ergebnisse: Kraft-Weg-Diagramm bei ca. 500 °C



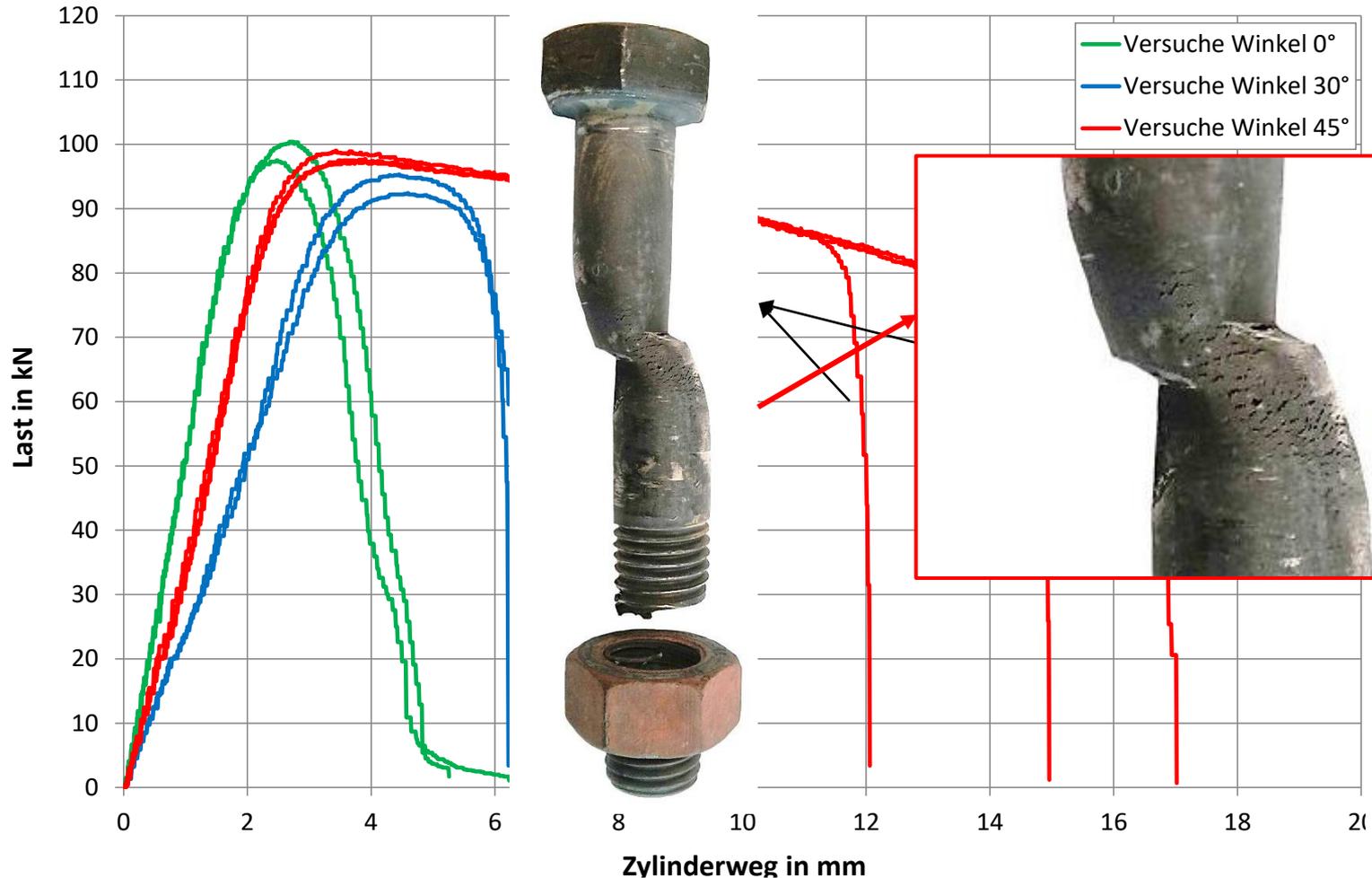
Versuche unter Brandbeanspruchung –

Ergebnisse: Kraft-Weg-Diagramm bei ca. 500 °C



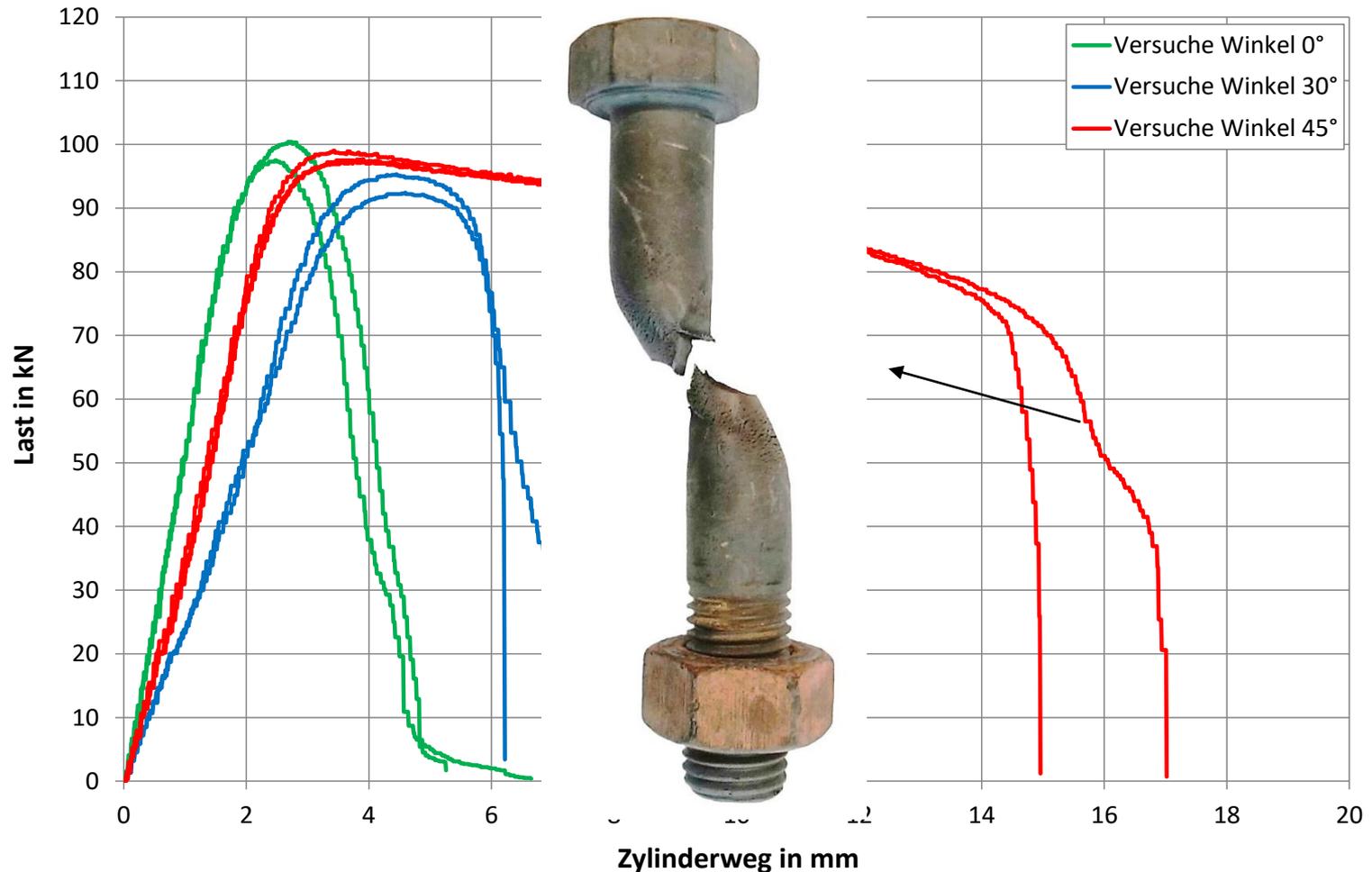
Versuche unter Brandbeanspruchung –

Ergebnisse: Kraft-Weg-Diagramm bei ca. 500 °C

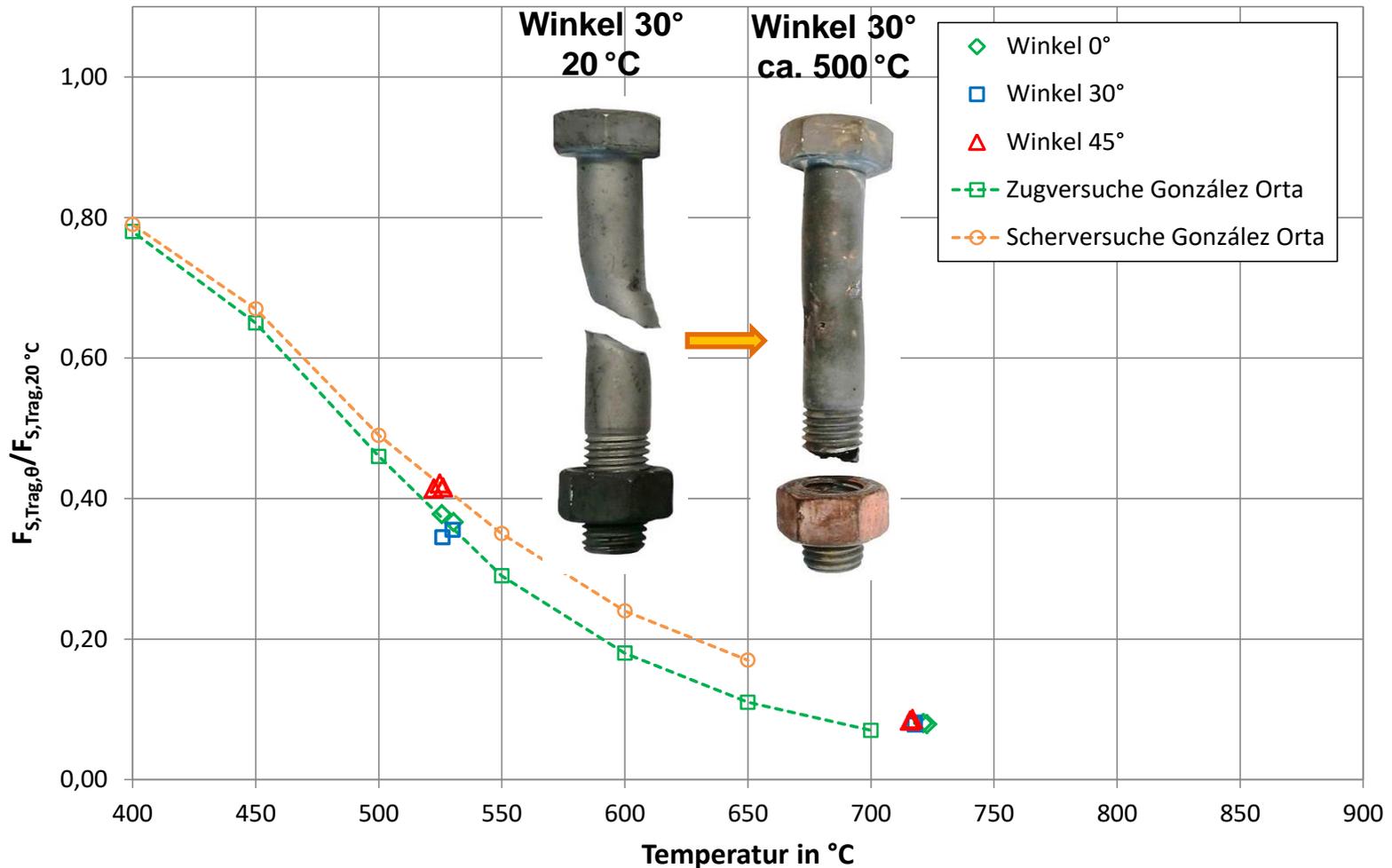


Versuche unter Brandbeanspruchung –

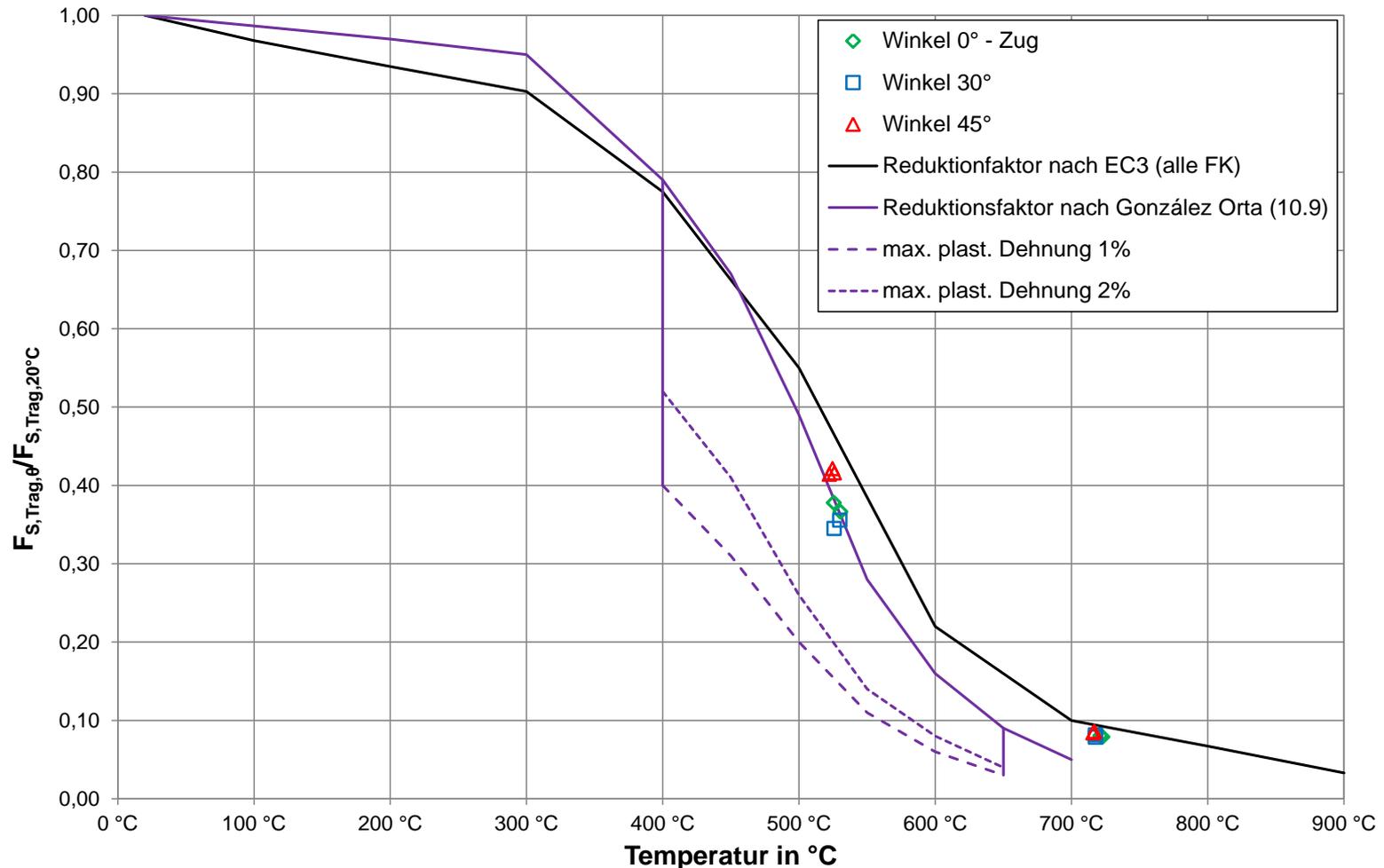
Ergebnisse: Kraft-Weg-Diagramm bei ca. 500 °C



Versuche unter Brandbeanspruchung – Einfluss der Temperatur auf die Interaktionstragwirkung



Versuche unter Brandbeanspruchung – Vergleich mit González Orta und EC3



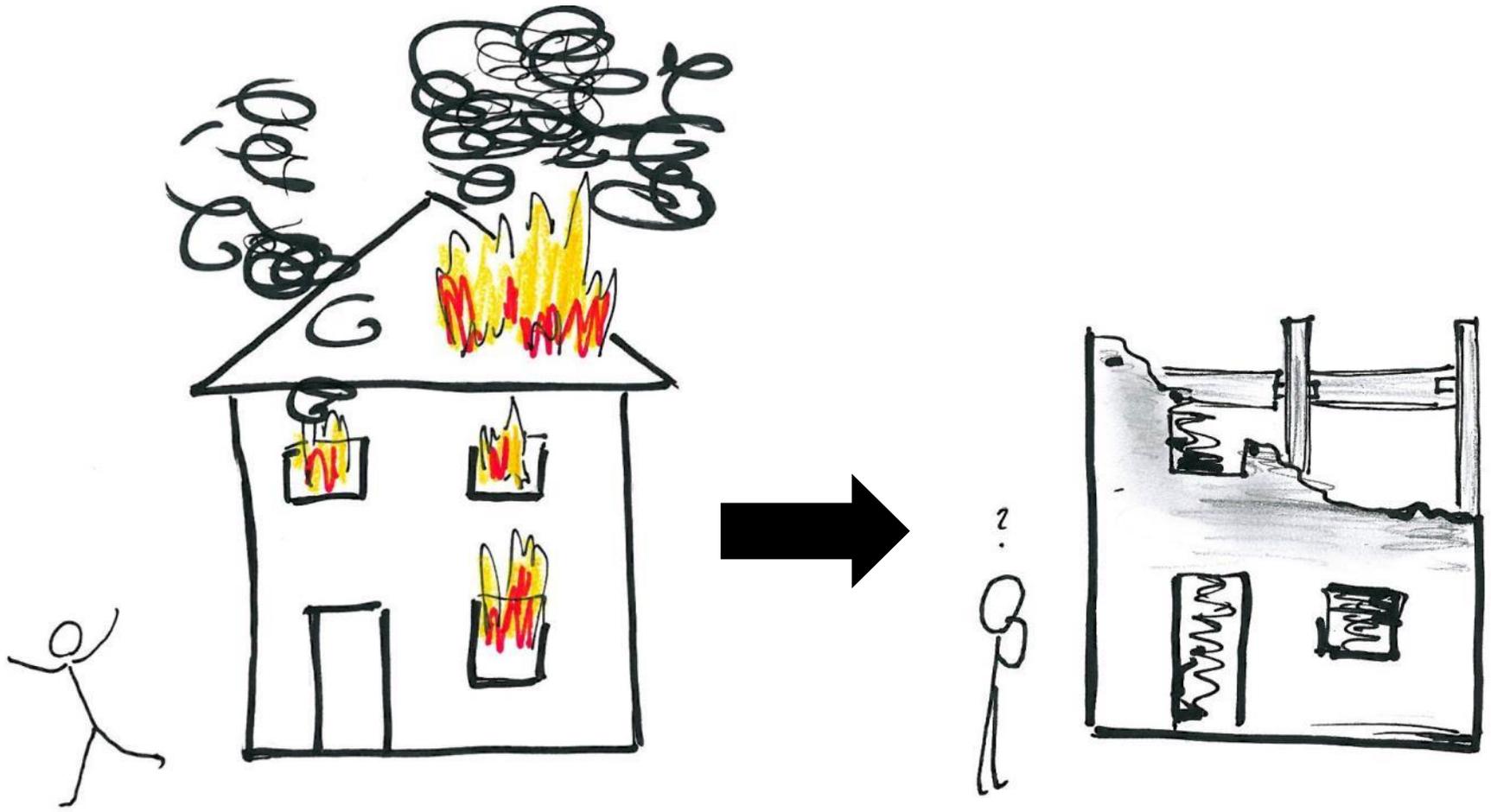
Zusammenfassung

- Anschlüsse spielen im Brandfall eine Schlüsselrolle bei Stahltragwerken
- durch die Vielzahl an Komponenten und ihrem Zusammenspiel ist das Tragverhalten sehr komplex
- Komponentenmethode ist eine gute Möglichkeit das Tragverhalten von geschraubten Anschlüssen im Brandfall abzubilden
- Verwendung der Methode bisher auf untersuchte Anschlüsse beschränkt
- Weitere Untersuchungen des Last-Verformungsverhaltens der einzelnen Komponenten und deren Zusammenspiel notwendig

Zusammenfassung

- die Reduktionsfaktoren zur Resttragfähigkeit gelten auch für Schrauben unter kombinierter Beanspruchung
- die Kombination von Scherbeanspruchung mit Zugbeanspruchung wirkt sich grundsätzlich positiv aus
- die flüssigmetallinduzierte Spannungsrisskorrosion im Brandfall erfordert weiterer Untersuchung

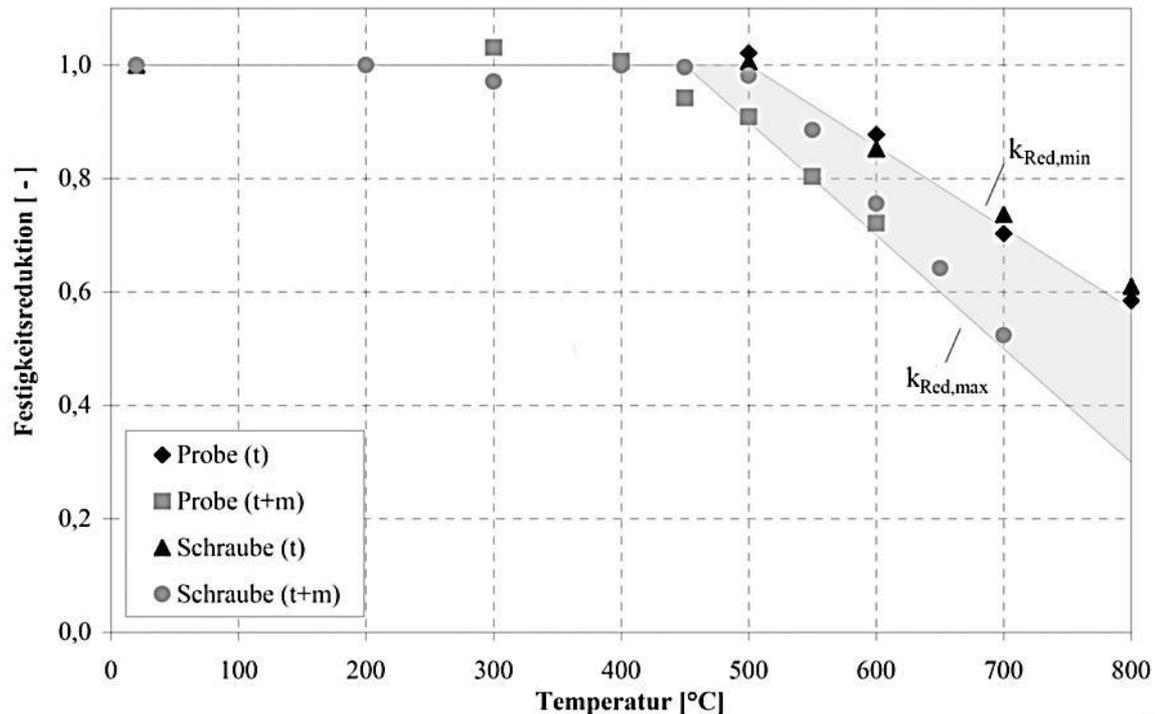
Resttragfähigkeit



Versuche an 10.9 Schrauben - González

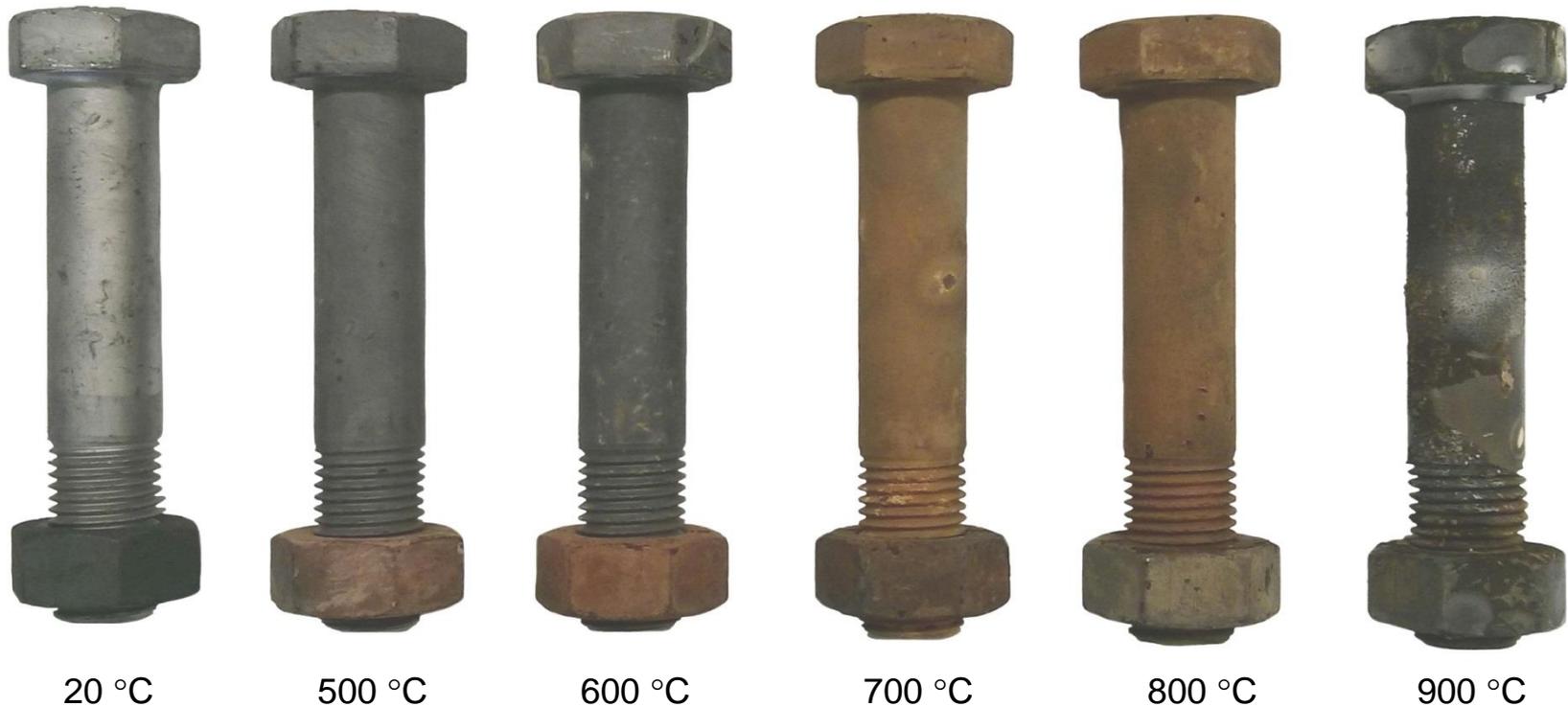
ohne zusätzliche mechanische Last : $k_{Red,min} = \begin{cases} 1.0 & 20\text{ °C} \leq T \leq 500\text{ °C} \\ -1.434 * 10^{-3} * T + 1.717 & 500\text{ °C} < T \leq 800\text{ °C} \end{cases}$

mit maximaler mechanischer Last.: $k_{Red,max} = \begin{cases} 1.0 & 20\text{ °C} \leq T \leq 450\text{ °C} \\ -2 * 10^{-3} * T + 1.9 & 450\text{ °C} < T \leq 800\text{ °C} \end{cases}$



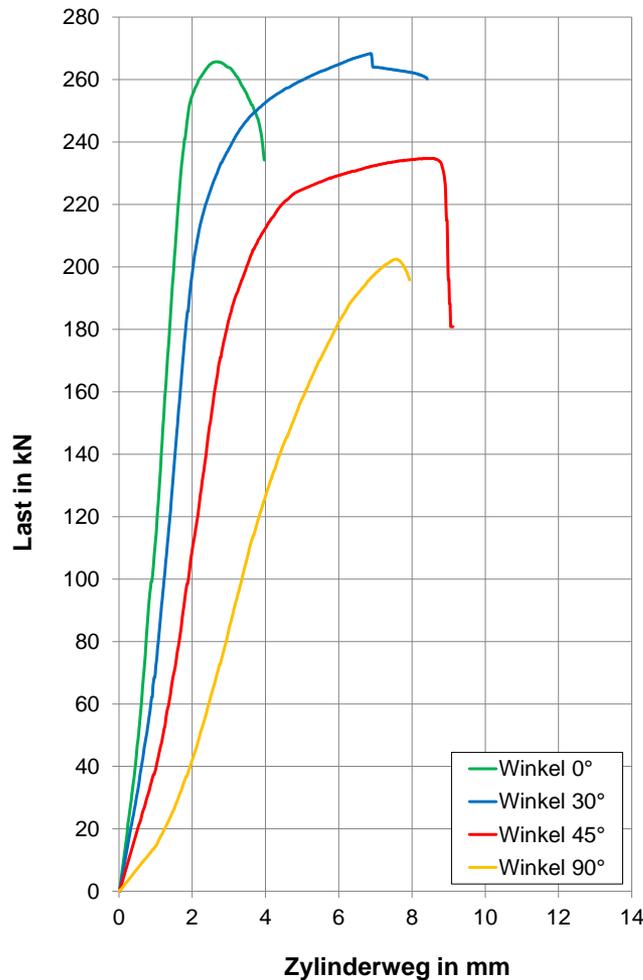
Quelle: González 2011

Resttragfähigkeit – optische Erkennbarkeit der Temperaturbelastung

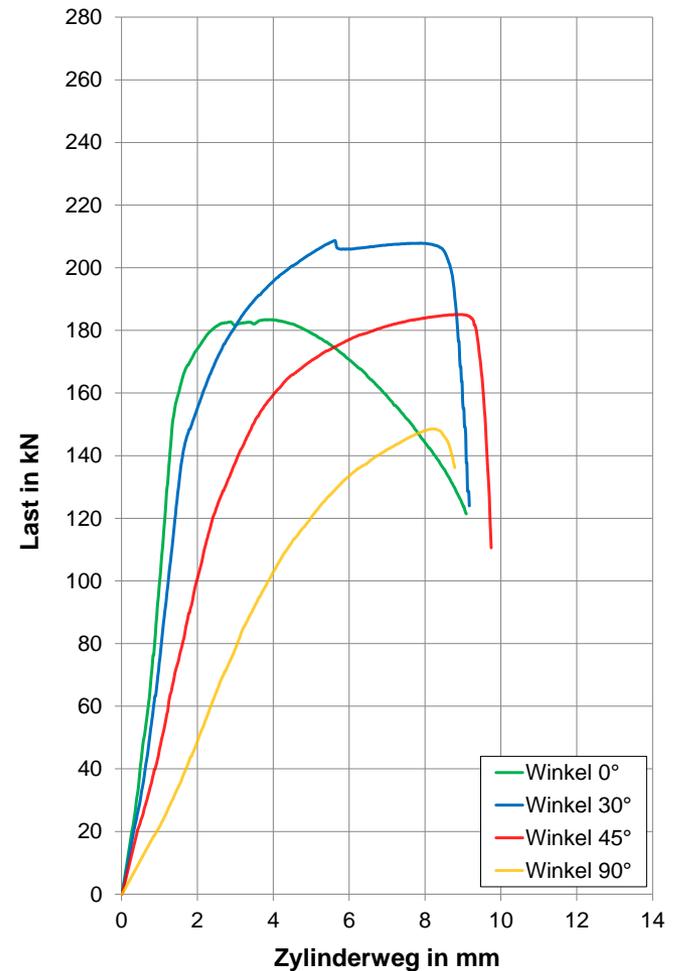


Versuche zur Resttragfähigkeit – Einfluss der Temperatur auf die Interaktionstragwirkung

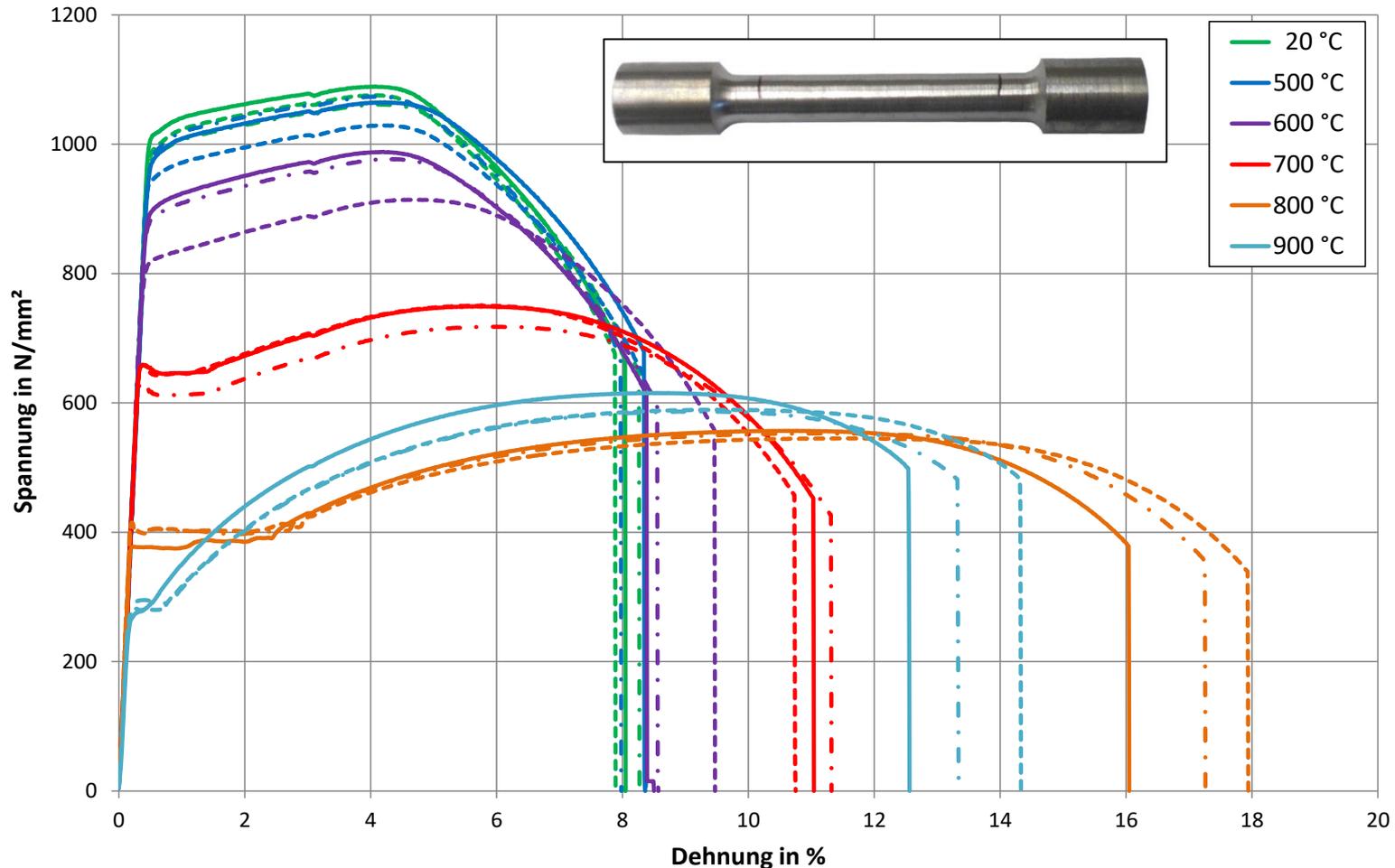
20 °C



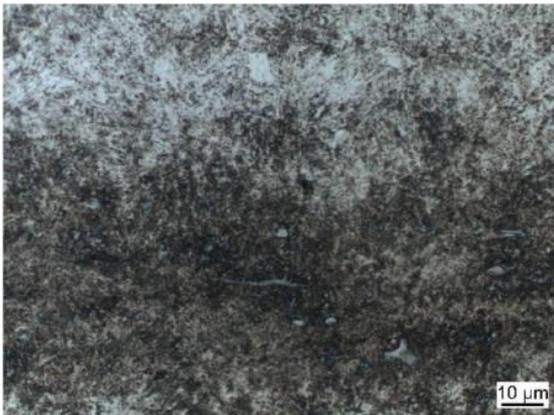
700 °C



Versuche zur Resttragfähigkeit – Ergebnisse: σ - ϵ -Diagramme Zugproben



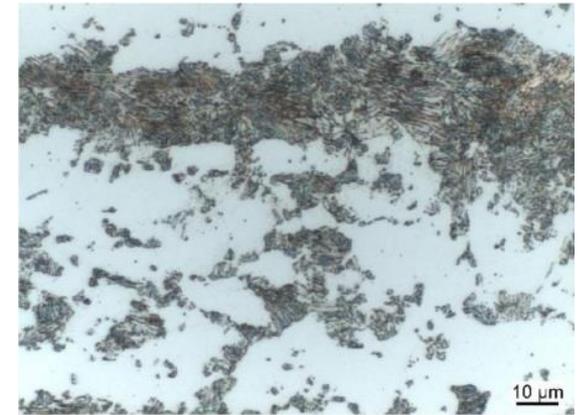
Versuche zur Resttragfähigkeit – Veränderung der Mikrostruktur



20 °C - Martensit

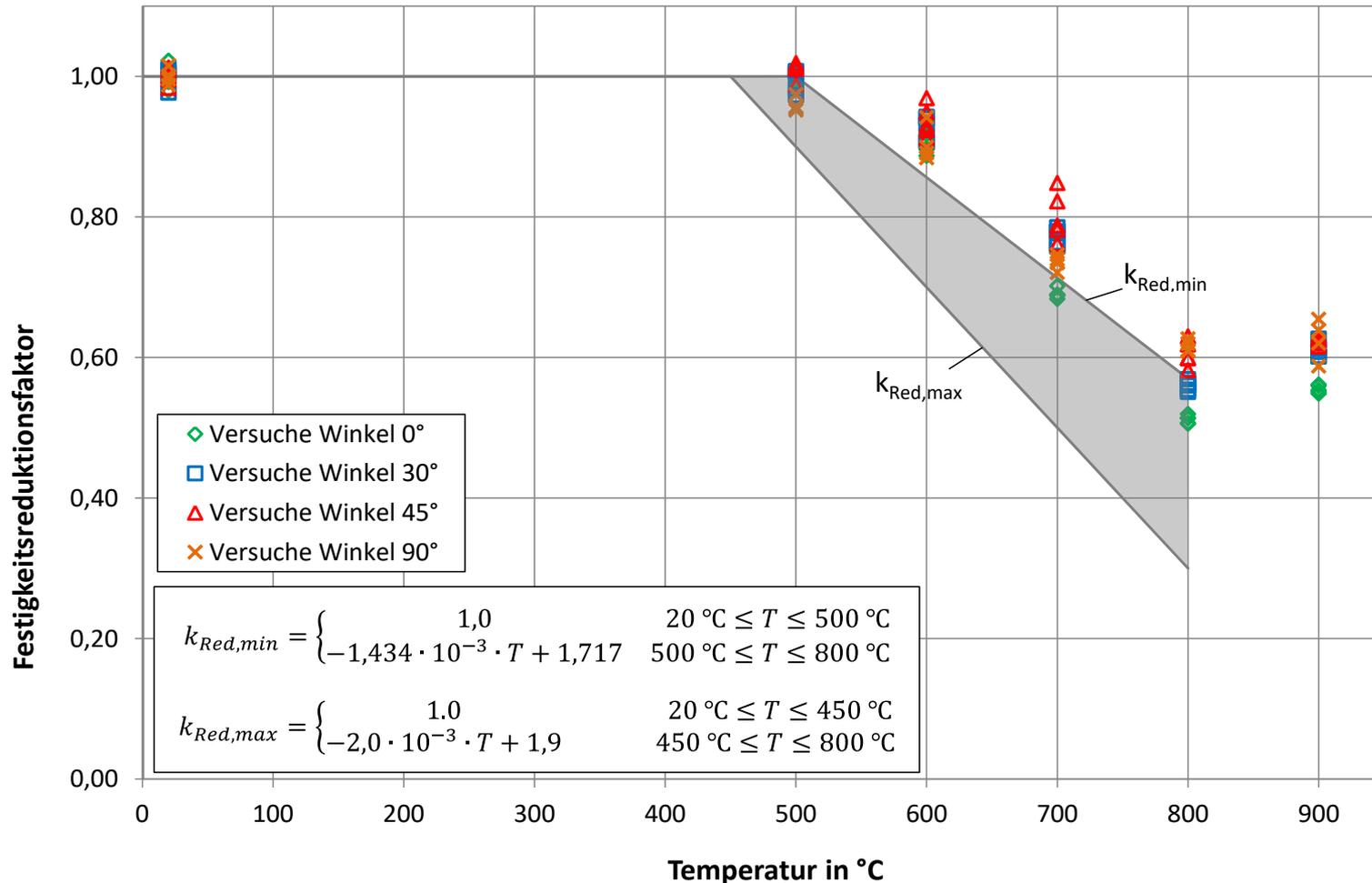


800 °C - Ferrit (hell) /
Perlit (dunkel) kugelig
eingeformt



900 °C - Ferrit (hell) /
Perlit (dunkel)

Versuche zur Resttragfähigkeit – Vergleich mit González Orta



Quellen

Al Jabri, Khalifa (1999): „The Behaviour of Steel and Composite Beam-to-Column Connections in Fire“. Dissertation. The University of Sheffield, Sheffield. Departement of Civil and Structural Engineering

González Orta, Fernando (2011): „Untersuchungen zum Material- und Tragverhalten von Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9 während und nach einem Brand.“ Dissertation. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt. Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik

Kawohl, Anne K. (2017): „Beitrag zur Zug-Abscher-Interaktion von hochfesten Schrauben während und nach einem Brand“. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt. Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik

Kirby, B. R.: „The Behaviour of High-strength Grade 8.8 Bolts in Fire“. In: *Journal of Constructional Steel Research* (33), S. 3-38

Kodur, Venkatesh; Kand, Sonali; Khaliq, Wasim (2012): „Effect of Temperature on Thermal and Mechanical Properties of Steel Bolts“. In: *Journal of Materials in Civil Engineering* 24 (6), S. 765-774

McAllister Therese P.; Gross, John L.; Sadek, Fahim; Kirkpatrick, Steven; McNeill, Robert A.; Zarghamee, Medhi et al. (2013): „Structural Response of World Trade Center Buildings 1, 2 und 7 to Impact and Fire Damage“. In: *Fire Technology* (49), S. 709-739

Newman, G. M.; Robinson, J. T.; Bailey, C. G. (2006): „Fire Safe Design: A New Approach to Multi-Storey Steel-Framed Buildings“. Ascot. The Steel Construction Institute

Yu, Hongxia; Burgess, Ian W.; Davison, J. Buick; Plank, Richard J. (2009): „Experimental investigation of the behaviour of fin plate connections in fire“. In: *Journal of Constructional Steel Research* 65 (3), S. 723-736