

# 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:

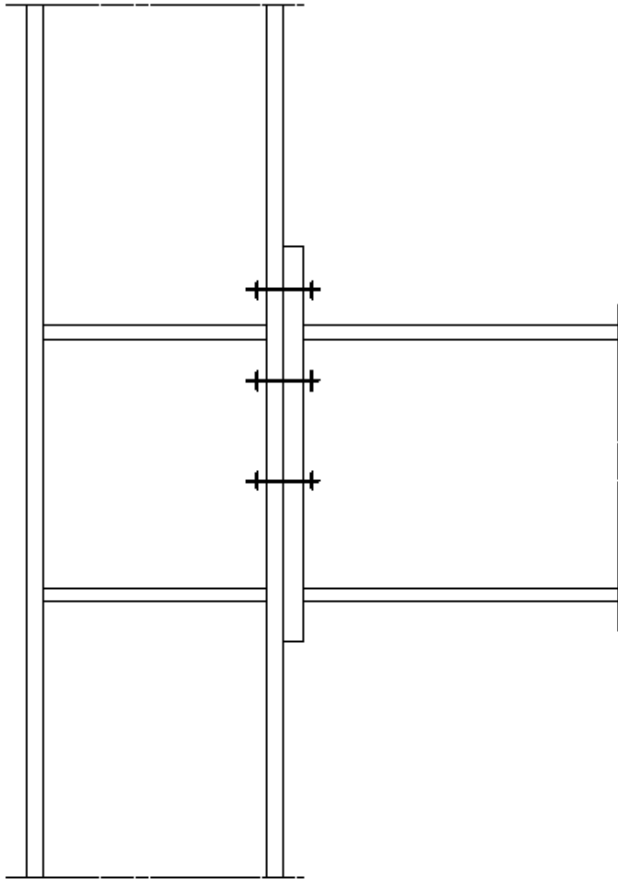
$$F_{v,t,Rd} = F_{v,Rd} k_{b,\theta} \frac{\gamma_{M2}}{\gamma_{M,fi}}$$

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

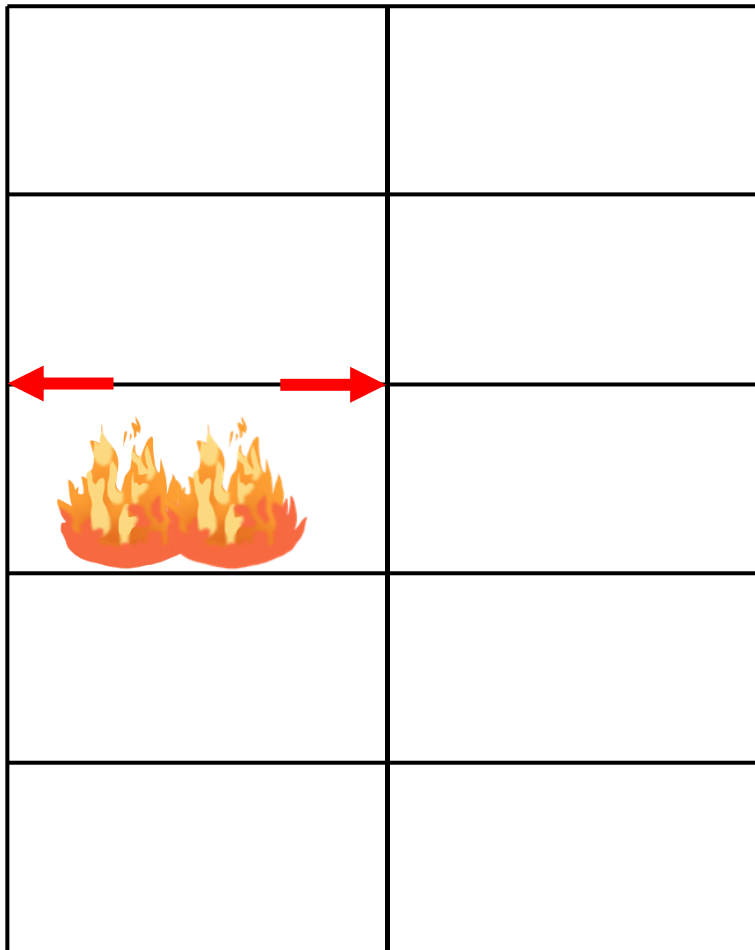


hohe Masse **→**  
Anschlüsse erwärmen sich langsamer

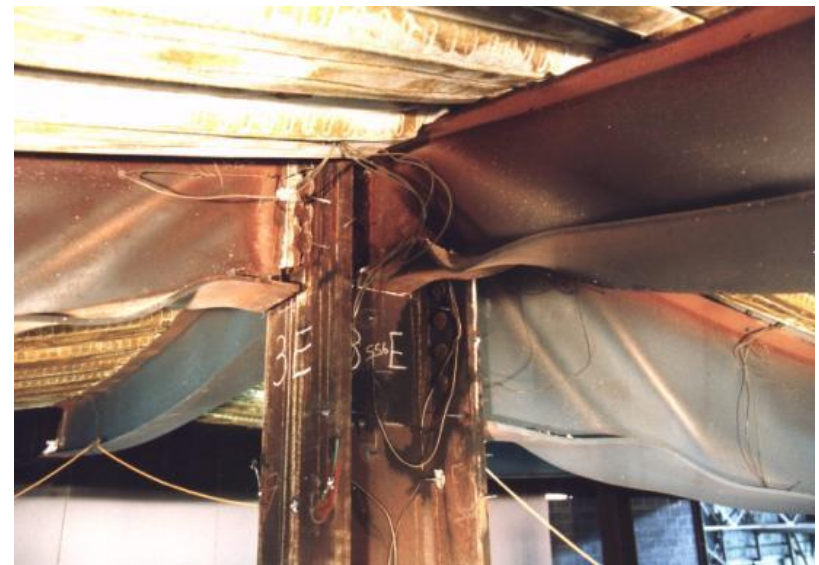
gemäß EC 3 Teil 1-2 Temperatur im  
Anschluss nur 88 % der angeschlossenen  
Bauteile

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

# Erwärmungsphase



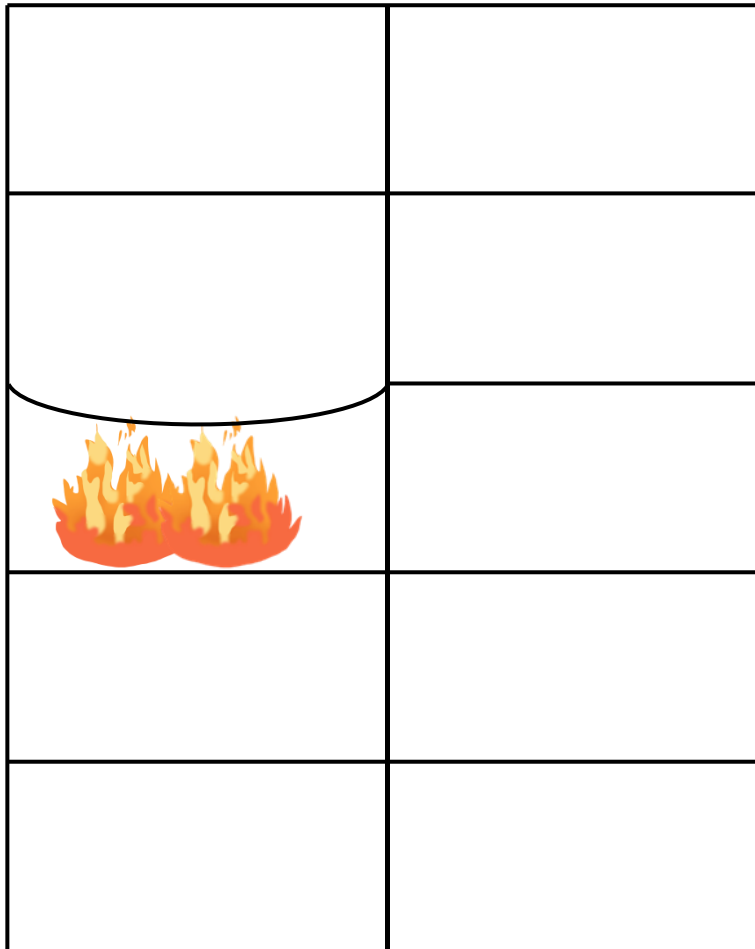
- angeschlossene Bauteile dehnen sich aus
- Anschluss muss zu Moment und Querkraft nun auch Druck abtragen
- Beulen im Steg möglich



Quelle: Newman 2006

# Hohe Temperaturen

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



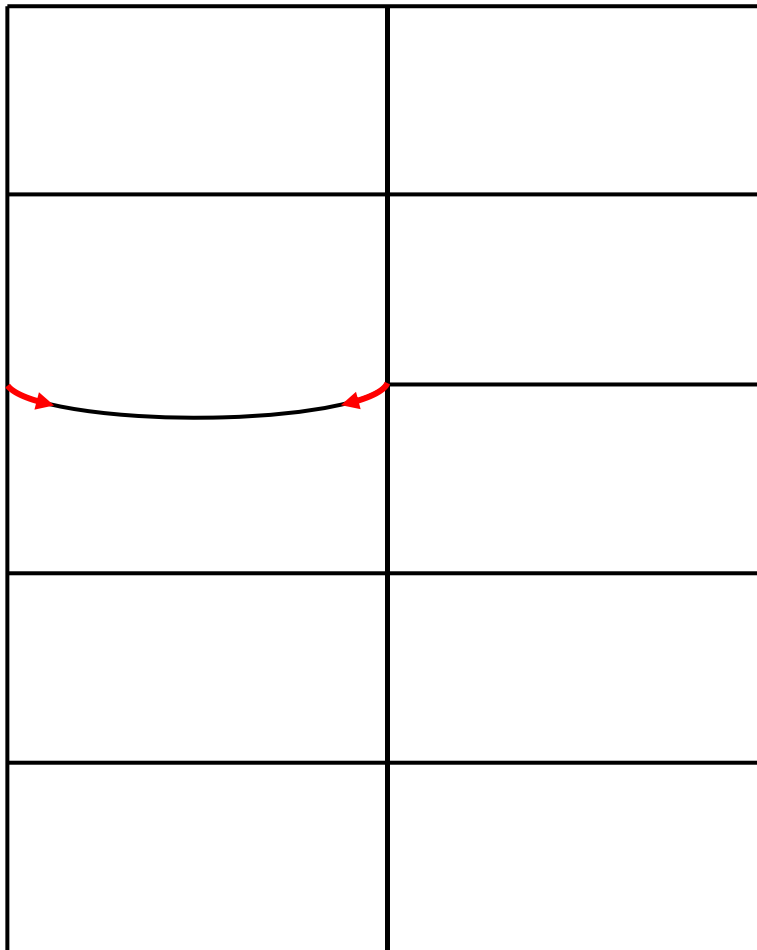
Quelle: Al Jabri 2008



Quelle: Yu 2011



# Abkühlphase

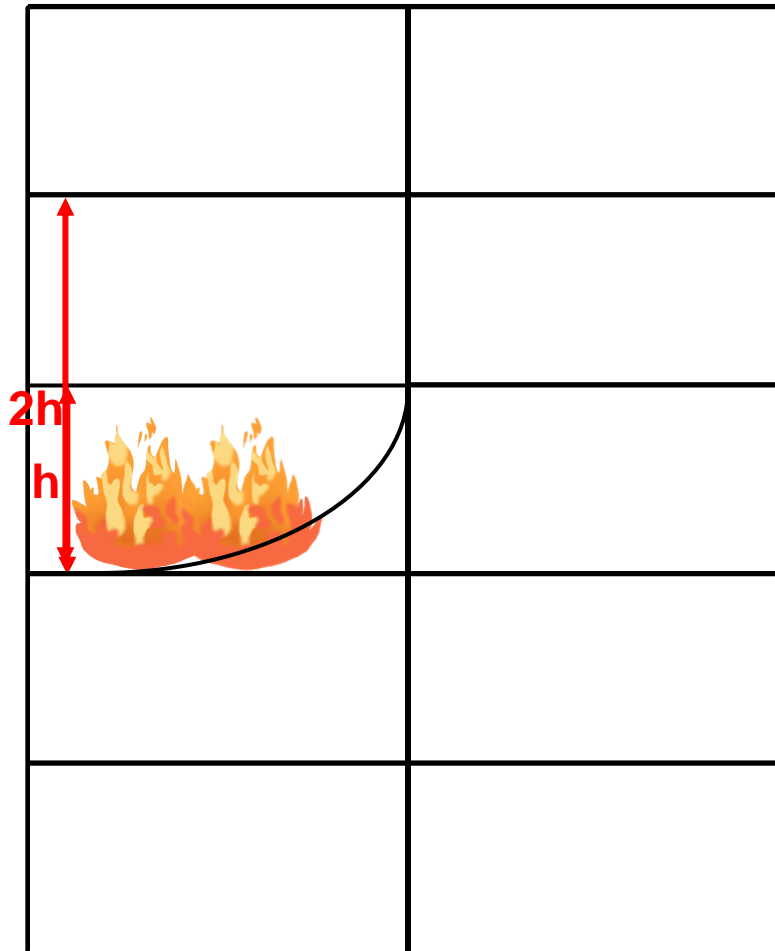


- angeschlossene Bauteile ziehen sich wieder zusammen
- Anschluss muss jetzt eine große Zugbeanspruchung aufnehmen

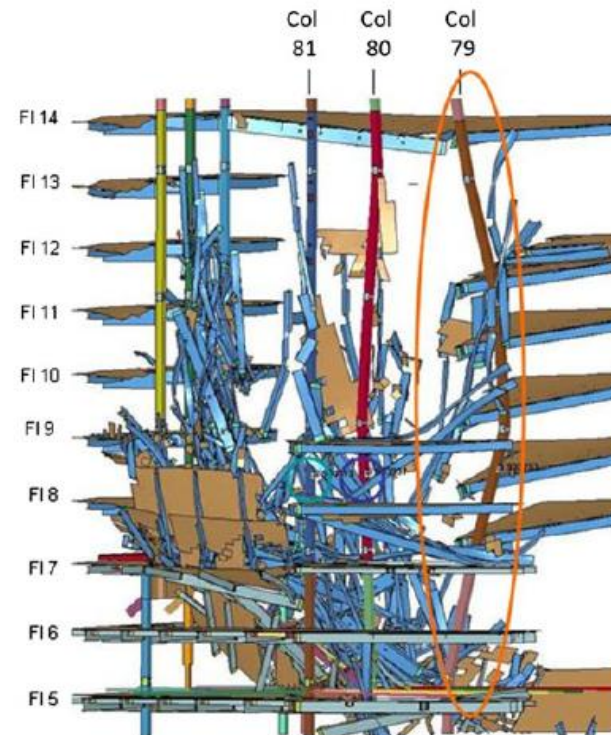


Quelle: Newman 2006

# Bedeutung für Gesamttragwerk

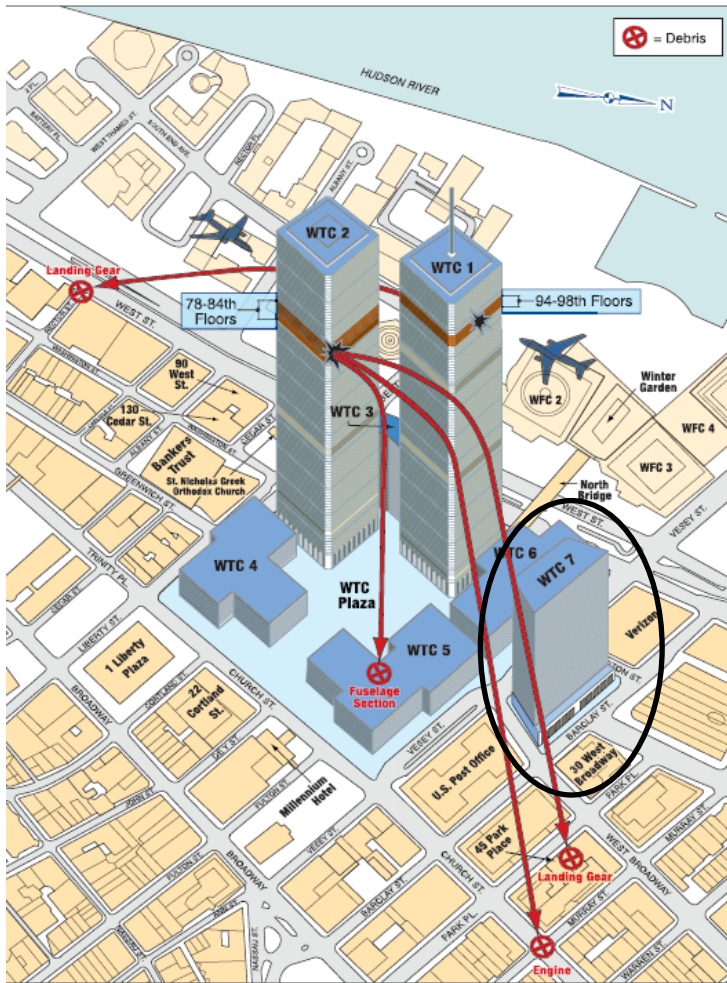


- bei Ausfall eines Anschlusses kommt es zur Umlagerung der Schnittkräfte



Quelle: McAllister 2013

# Einsturz WTC 7 2001



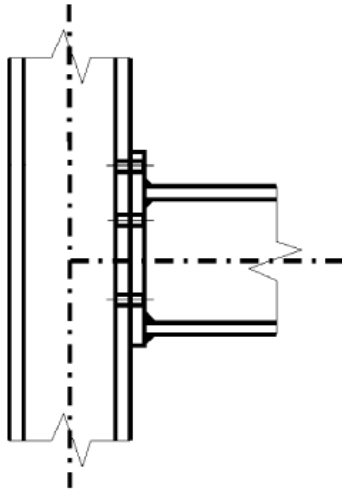
Quelle: FEMA



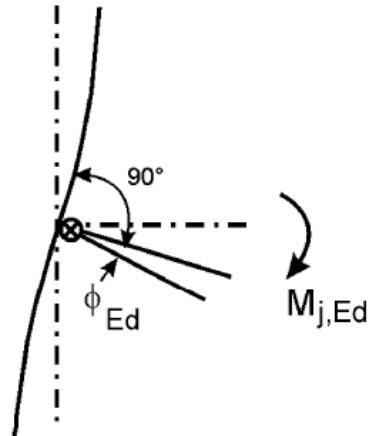
# Problemstellung

- 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

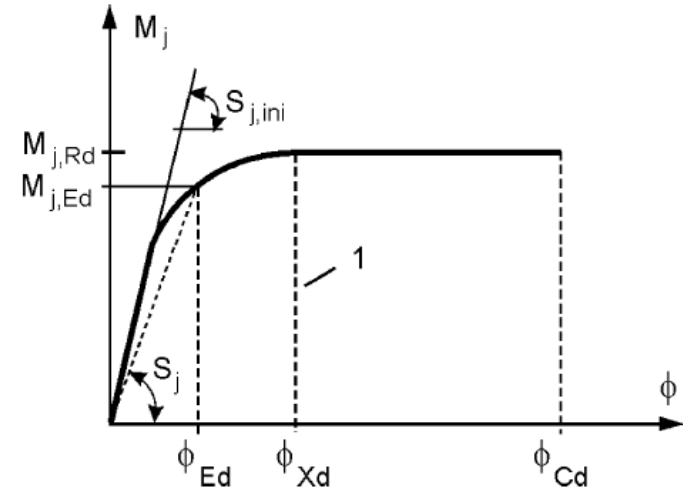
# Lösungsansatz - Komponentenmethode



a) Anschluss



b) Statisches Modell



1 Grenzwert für  $S_j$

c) Momenten-Rotations-Charakteristik

Quelle: DIN EN 1993-1-8

Kenngrößen:

- Momenten Tragfähigkeit  $M_{j,Rd}$
- Rotationssteifigkeit  $S_j$
- Rotationskapazität  $\phi_{Cd}$

# 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  $\phi_{Cd}$  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

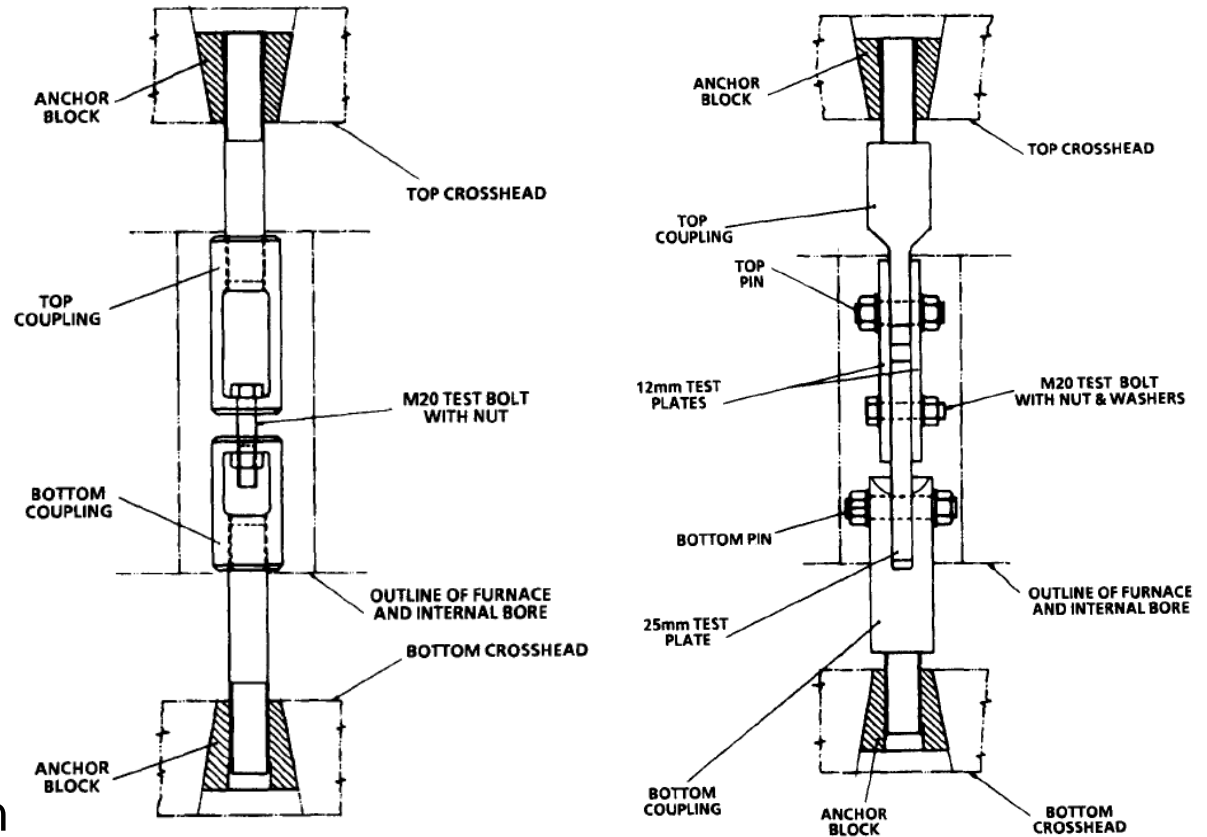
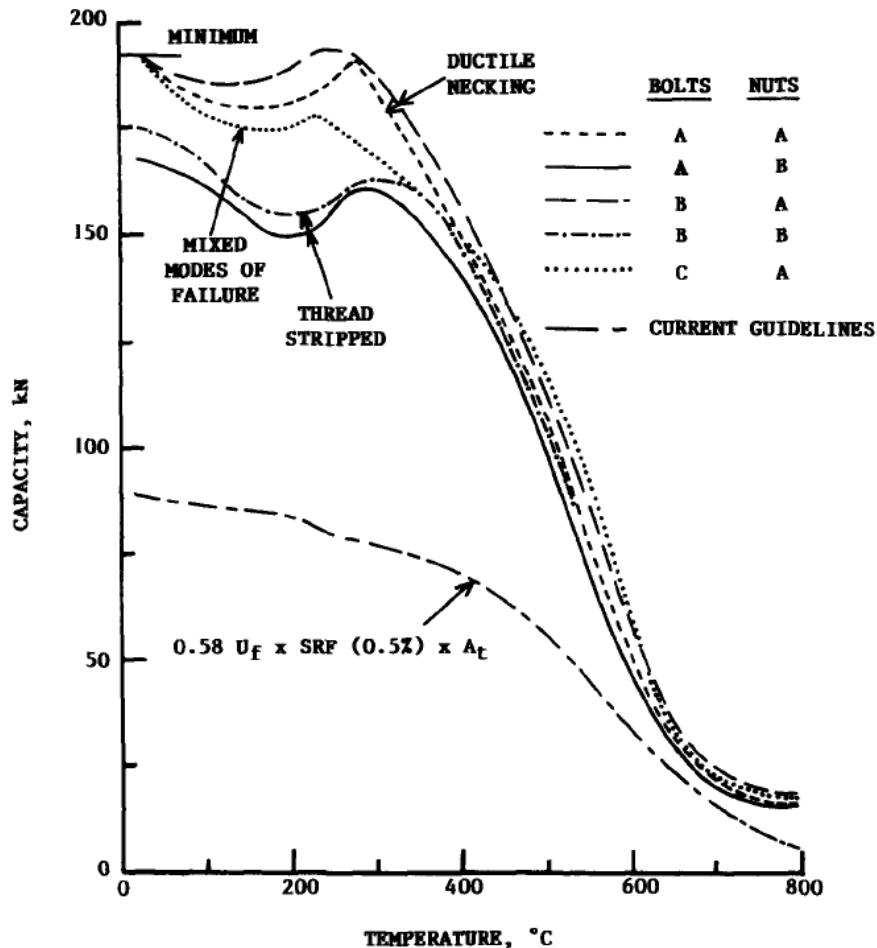


Fig. 1. Test arrangement for evaluating bolts in tension. Fig. 2. General test arrangement for evaluating bolts in double shear.

Quelle: Kirby 1995



# Versuche an 8.8 Schrauben - Kirby



Vorschlag zur Reduktion der Tragfähigkeit unter Zug und Abscheren:

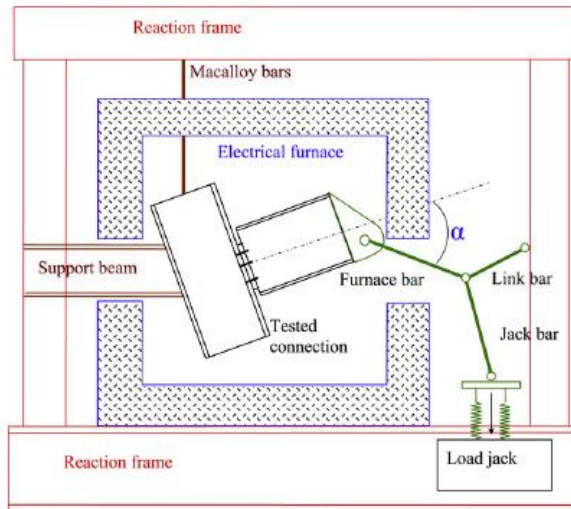
- für  $T < 300 \text{ °C}$ :  
 $SRF = 1,0$
- für  $300 \text{ °C} < T \leq 680 \text{ °C}$ :  
 $SRF = 1 - (T - 300) \cdot 0,2128 \cdot 10^{-2}$
- für  $680 \text{ °C} < T \leq 1000 \text{ °C}$ :  
 $SRF = 0,170 - (T - 680) \cdot 0,5312 \cdot 10^{-3}$

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 $\theta_a$	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  $\sigma$ - $\varepsilon$ -Beziehungen!

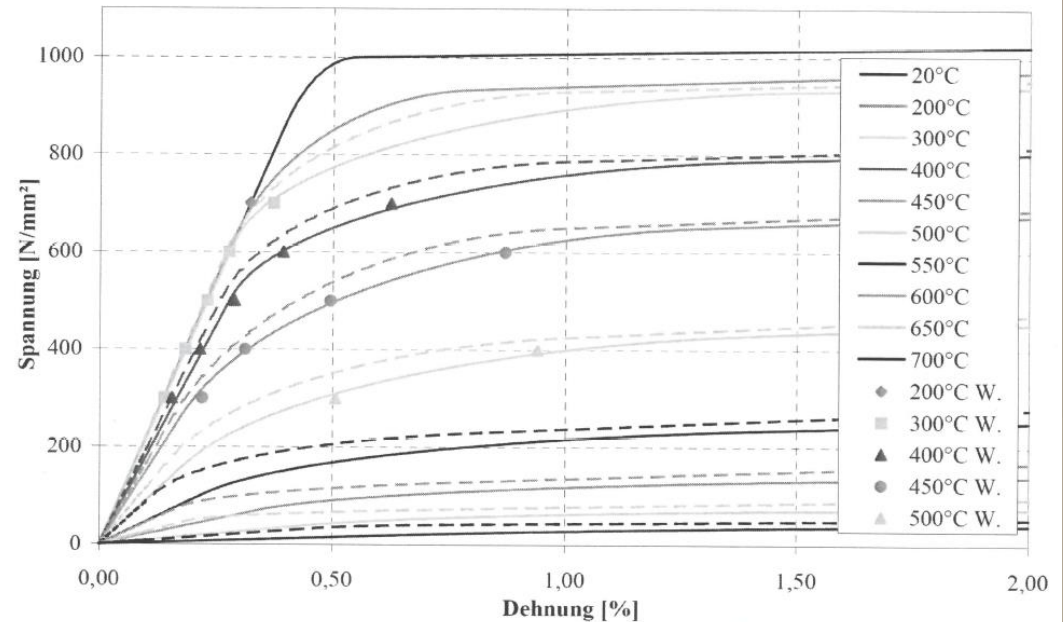
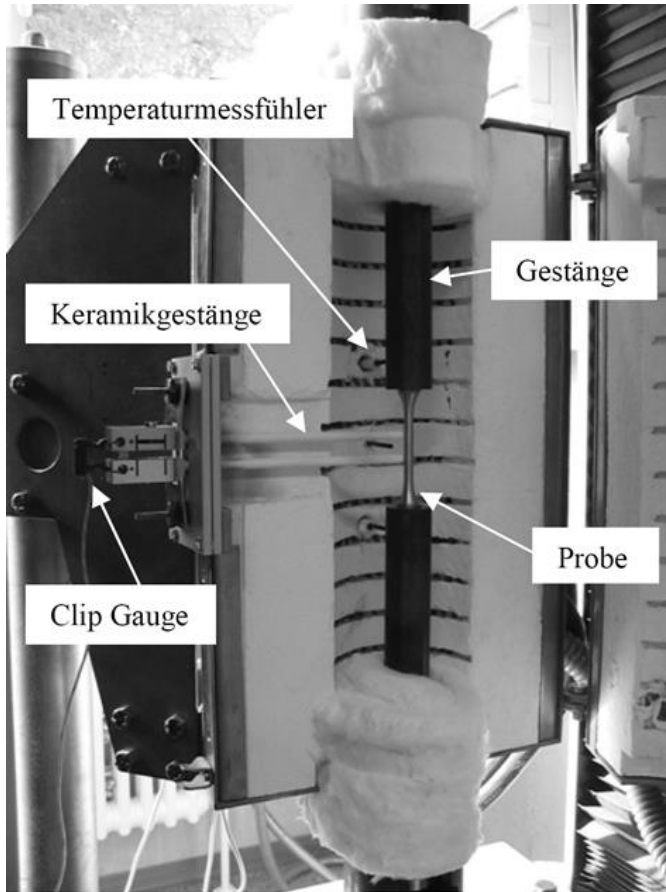
# Versuche an 10.9 Schrauben - González



- 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

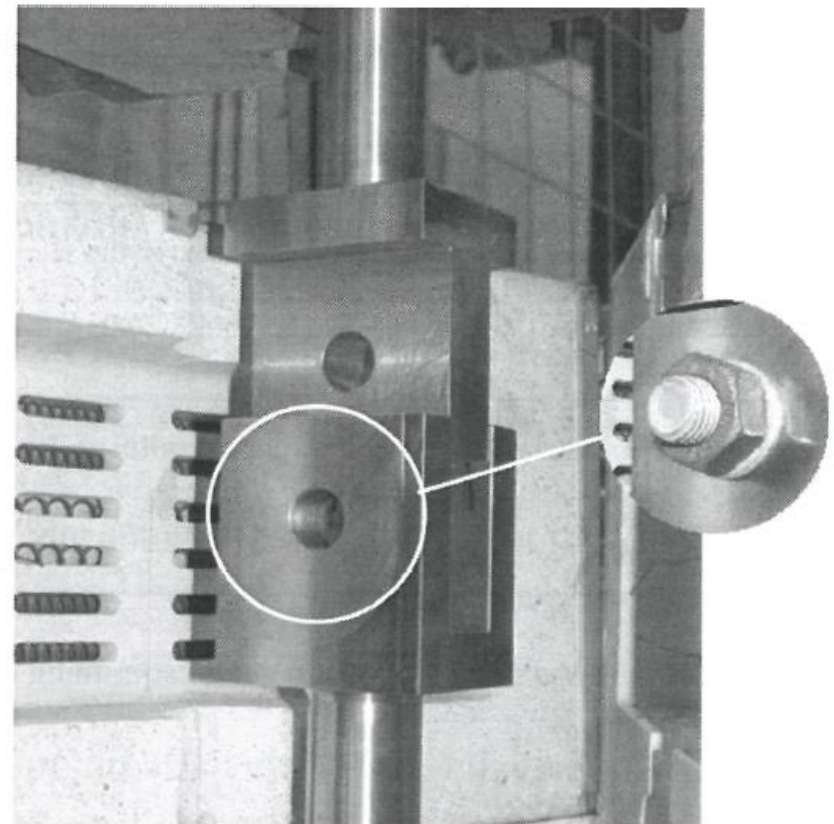
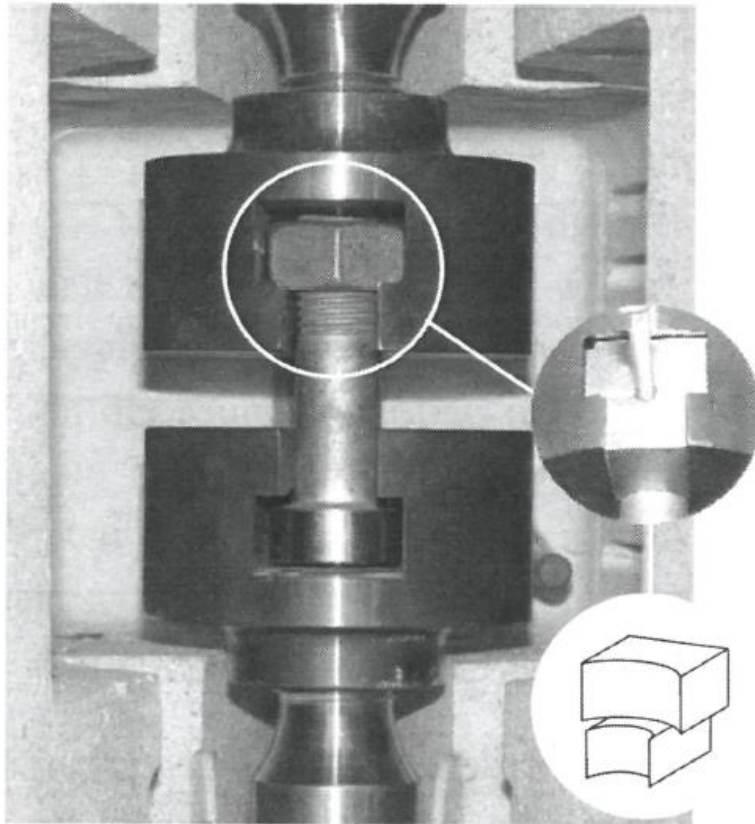


# Versuche an 10.9 Schrauben - González

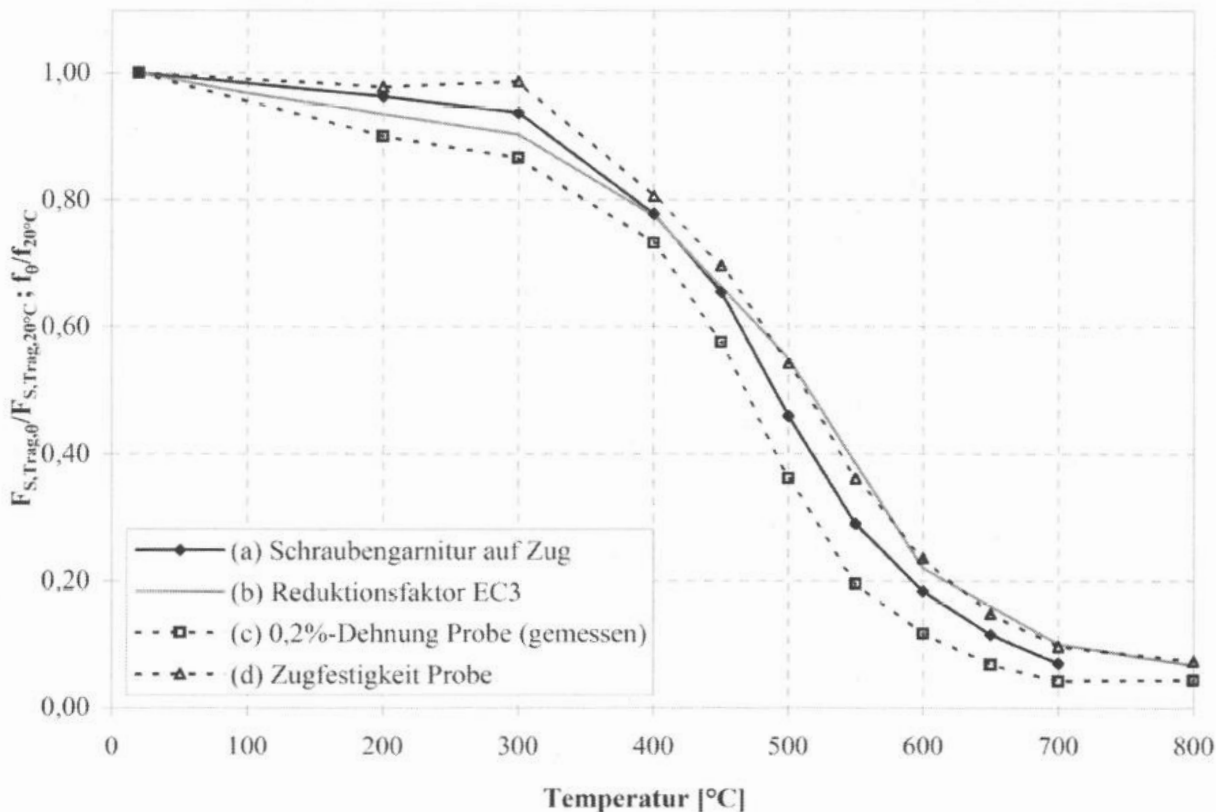


Quelle: González 2011

# Versuche an 10.9 Schrauben - González



# Versuche an 10.9 Schrauben - González

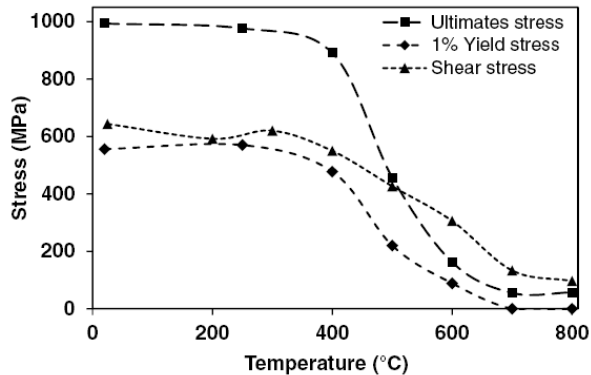
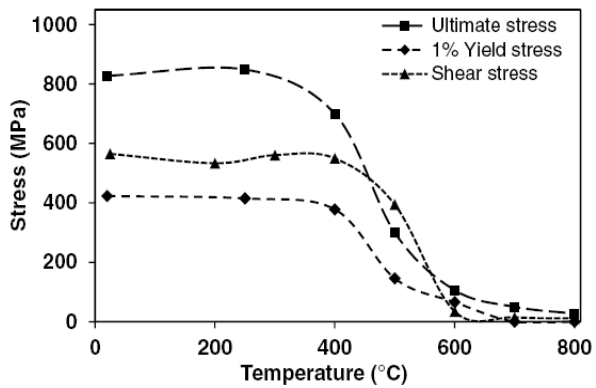


Temp.	Gonz.	EC 3
20 °C	1,0	1,0
200 °C	0,97	0,935
300 °C	0,95	0,903
400 °C	0,79	0,775
500 °C	0,49	0,550
600 °C	0,16	0,220
700 °C	0,05	0,100

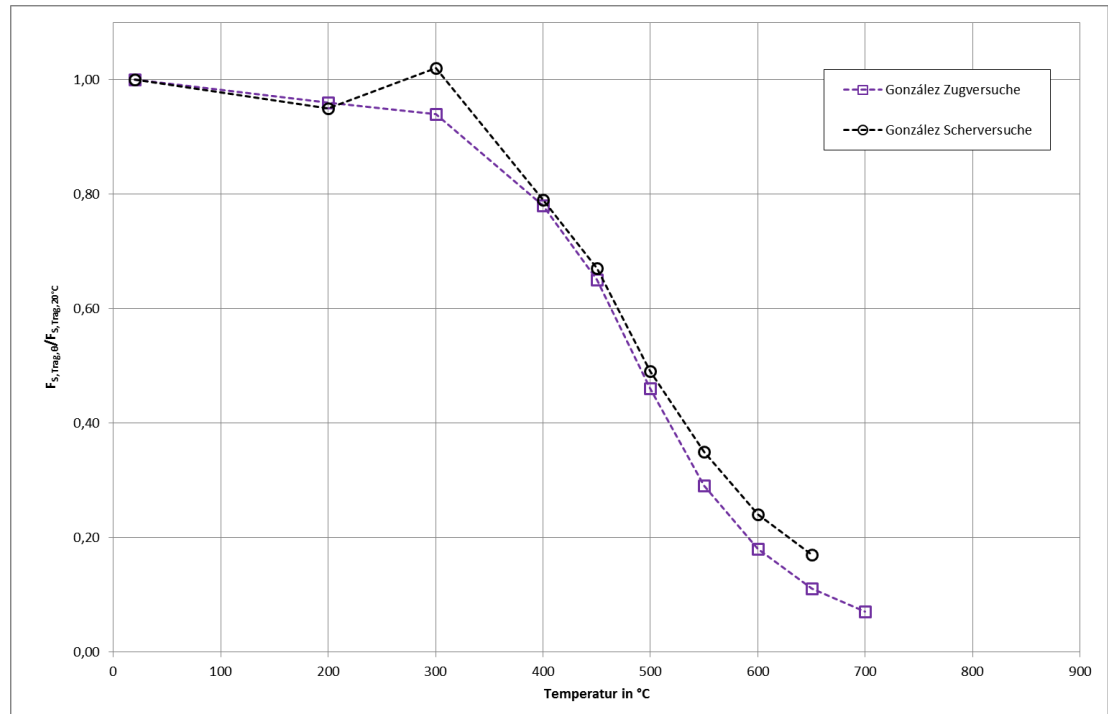
Quelle: González 2011

# Unterschiede: Zug ↔ Abscheren

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



Quelle: Kodur et al. 2012

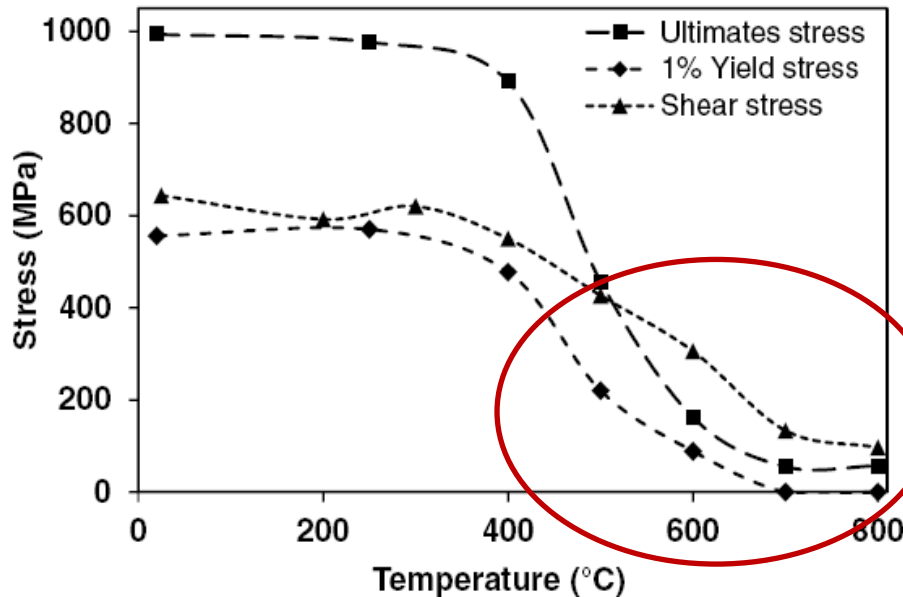


Quelle: González 2011

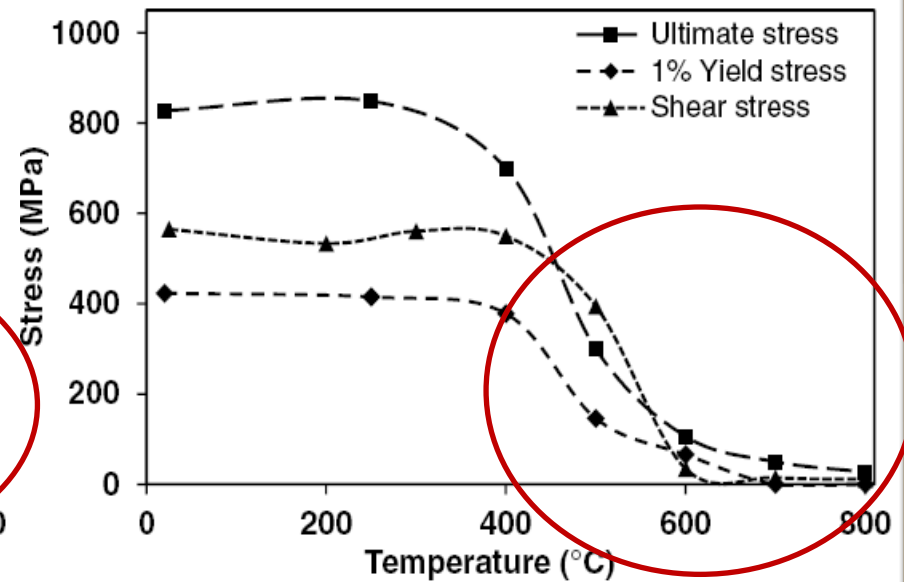


# Unterschiede: Zug ↔ Abscheren

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



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

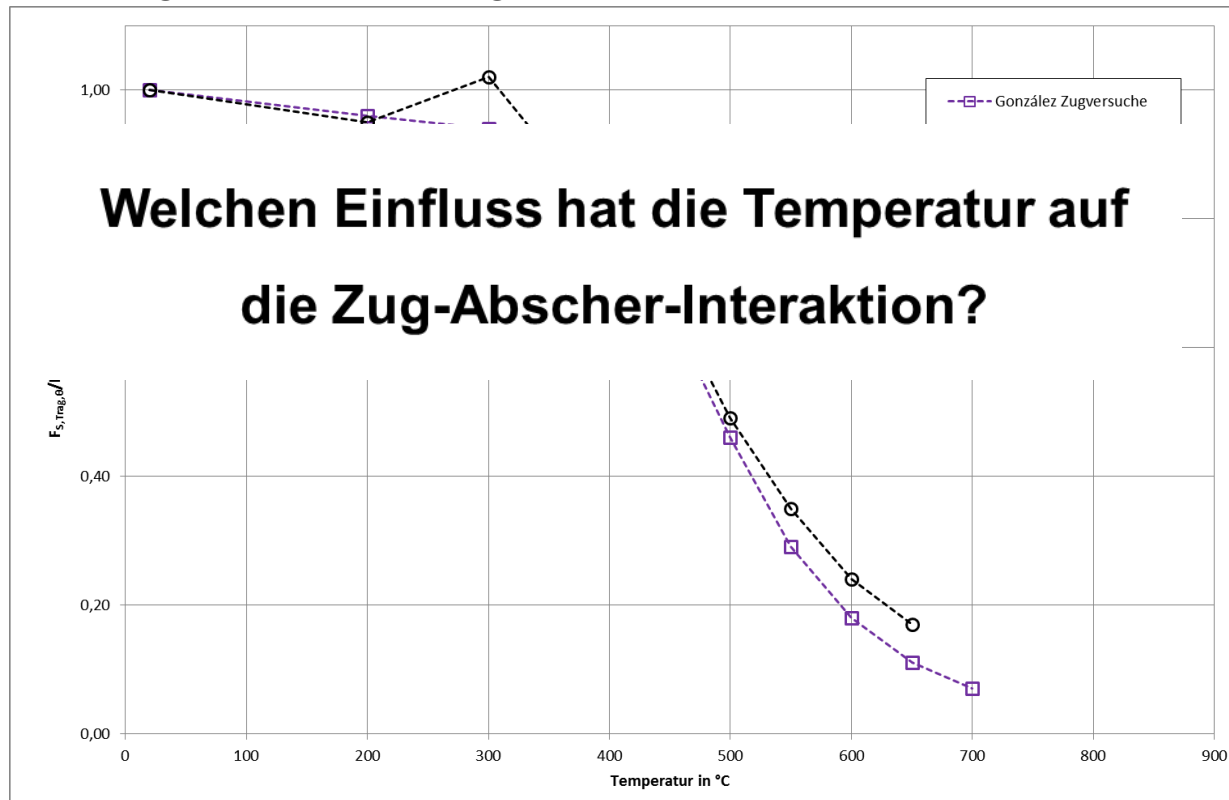


A325 Schrauben ( $f_u = 830 \text{ N/mm}^2$ )

Quelle: Kodur et al. 2012

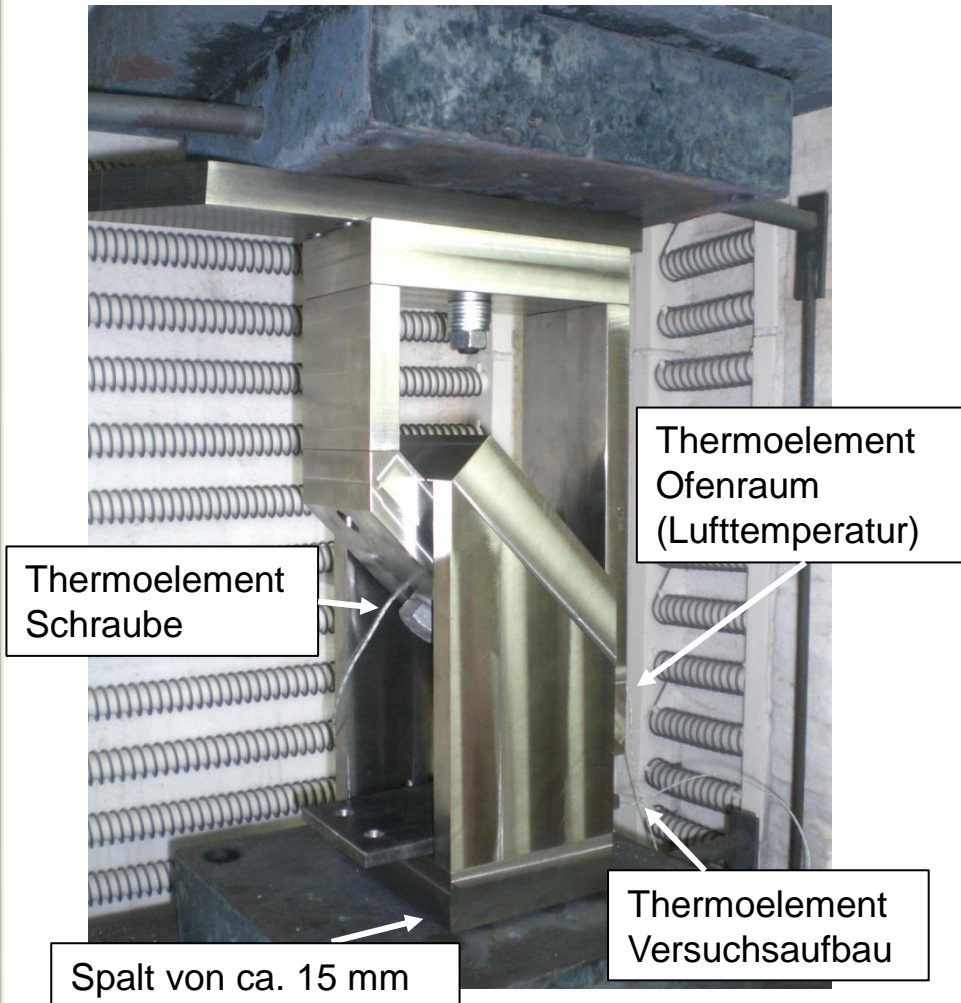
# Unterschiede: Zug $\leftrightarrow$ Abscheren

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



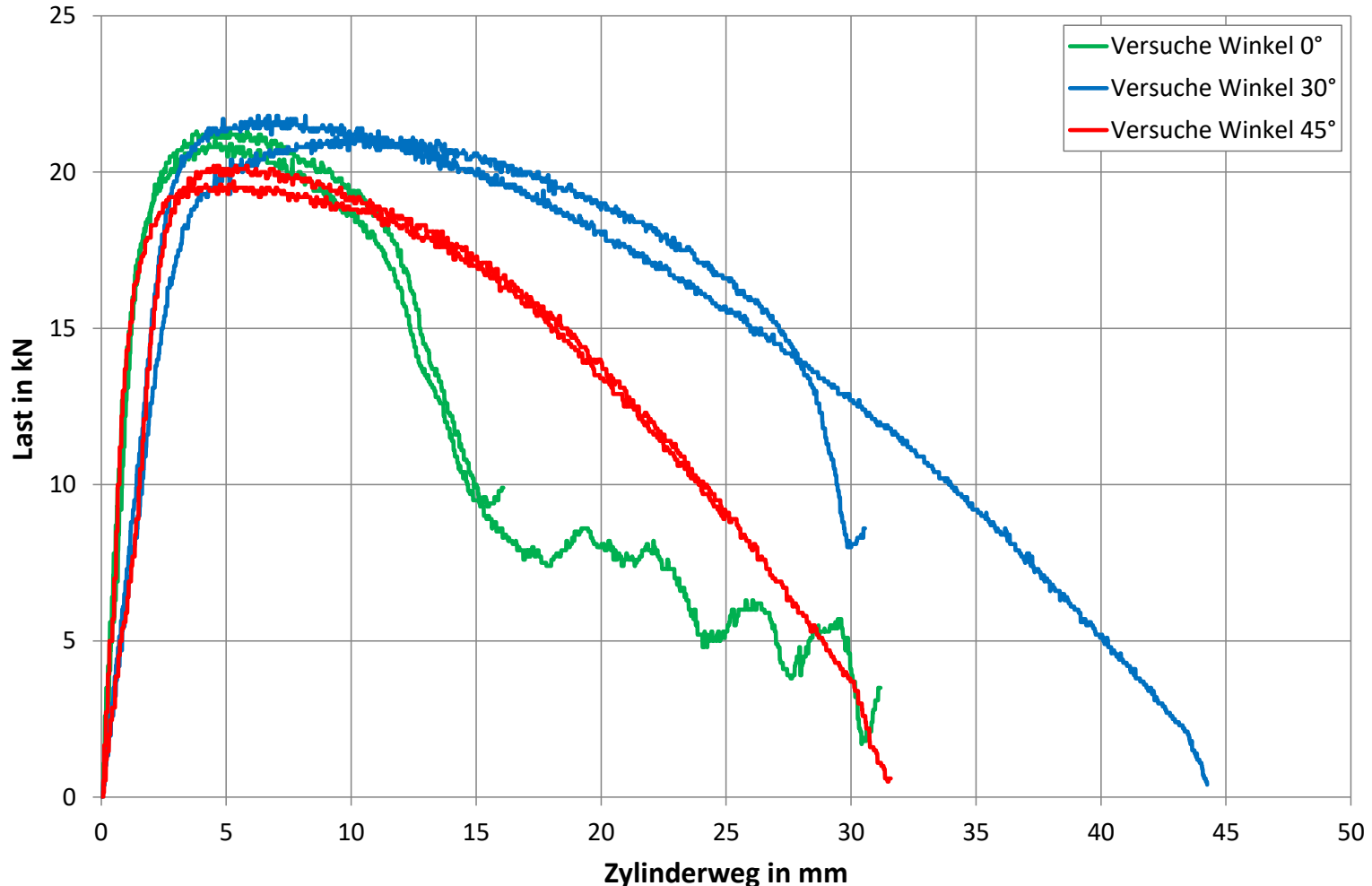
Quelle: González 2011

# Versuchsdurchführung – Versuche unter Brandbeanspruchung



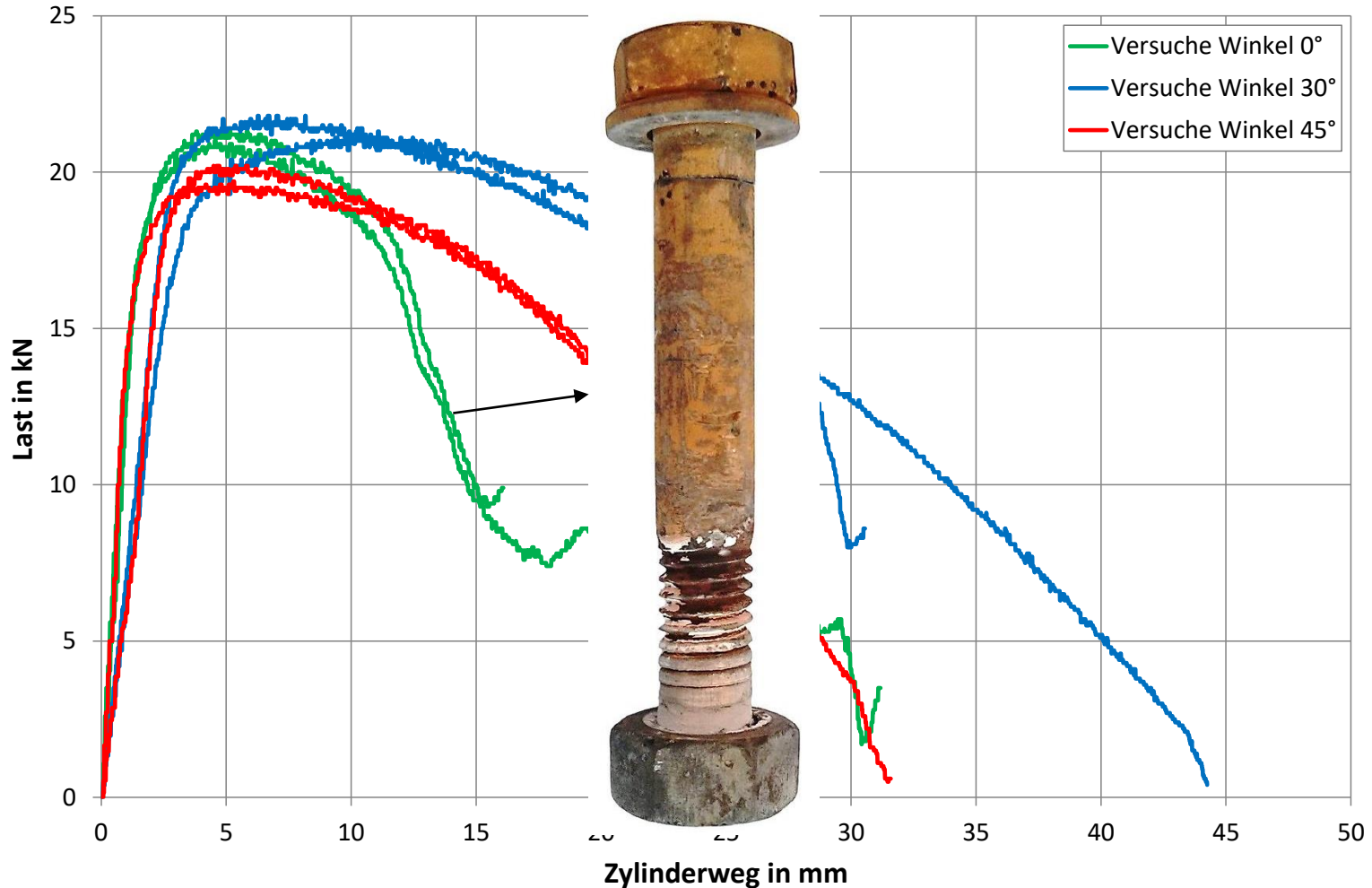
- Temperaturen: ca. 500 °C und 700 °C
- Heizrate: 5 K/min
- stationäre Versuche
- weggesteuert nach DIN EN ISO 6892-2 mit 1,5 mm/min
- Messdaten: Kraft, Zylinderweg, Temperatur
- optische Überwachung nicht möglich

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



# Versuche unter Brandbeanspruchung –

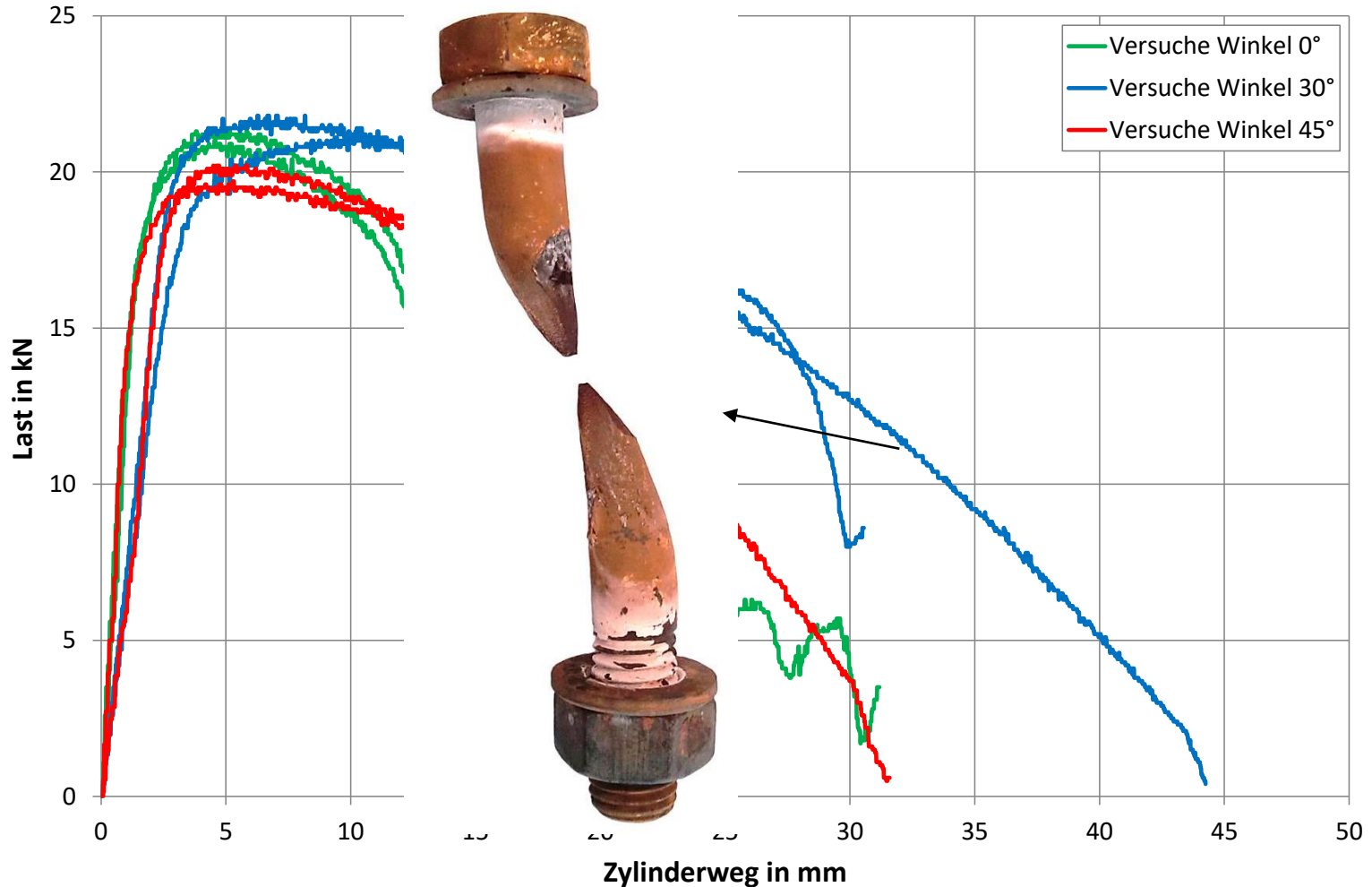
Ergebnisse: Kraft-Weg-Diagramm bei ca. 700 °C



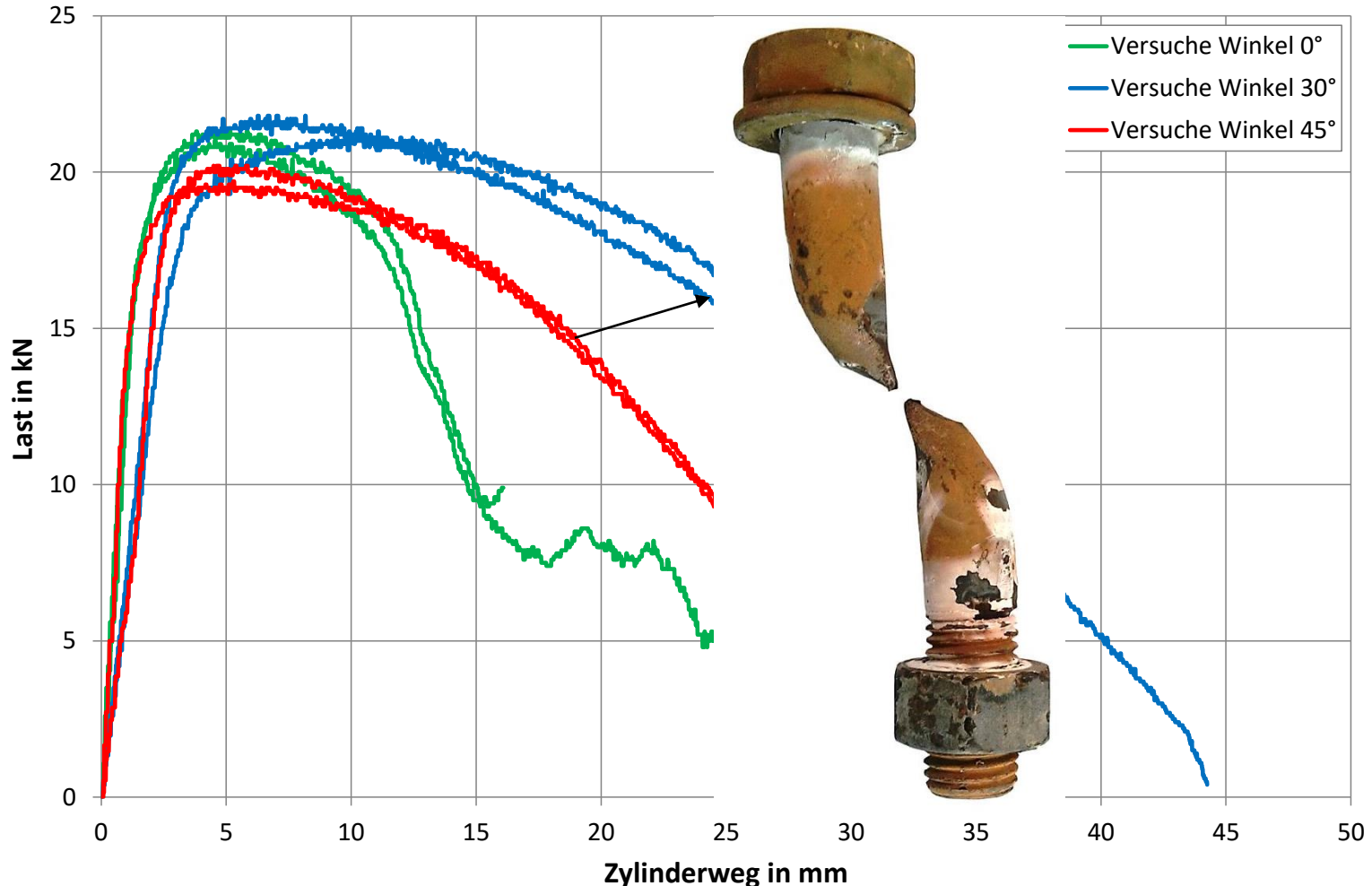


# Versuche unter Brandbeanspruchung –

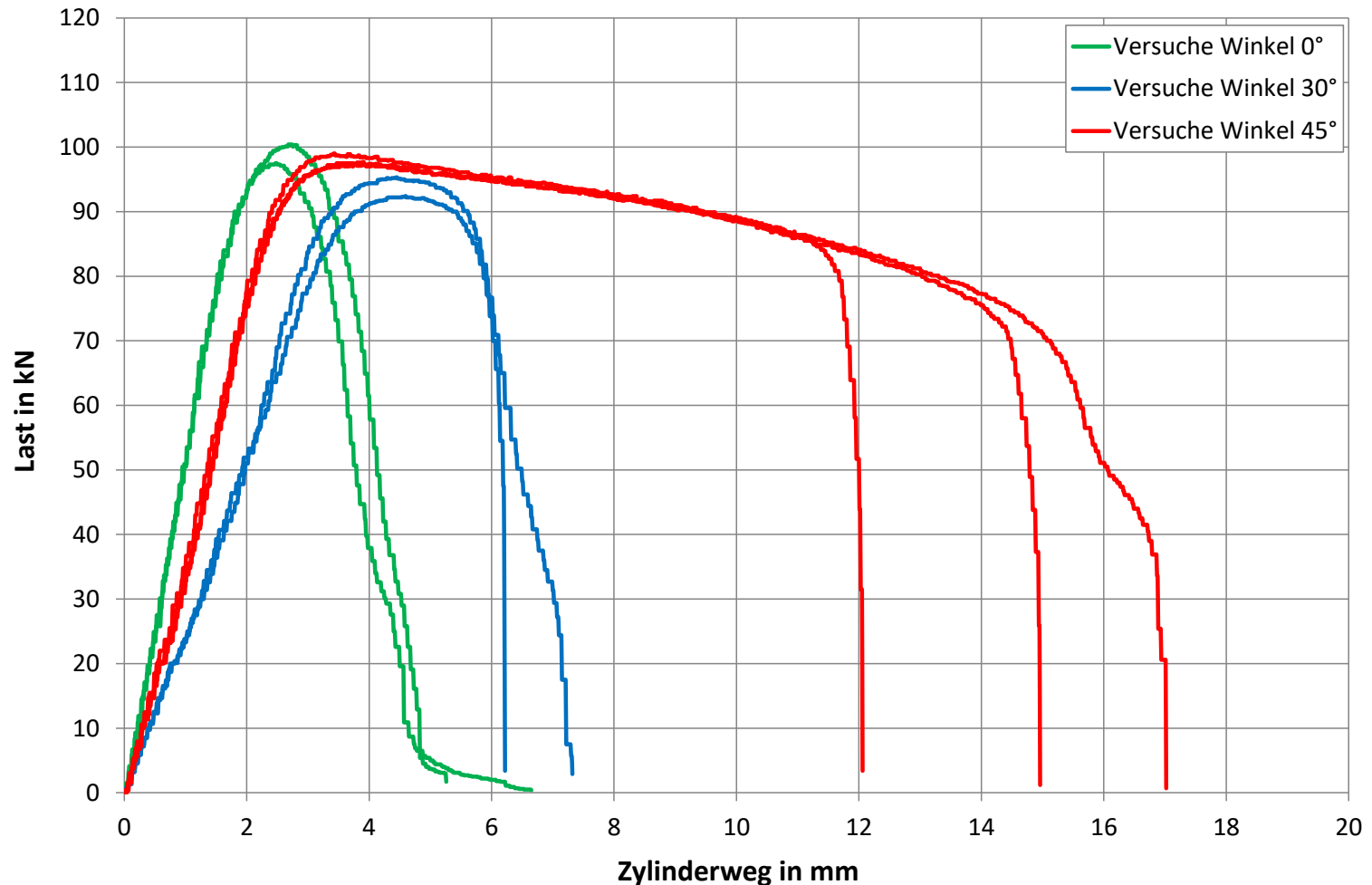
Ergebnisse: Kraft-Weg-Diagramm bei ca. 700 °C



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

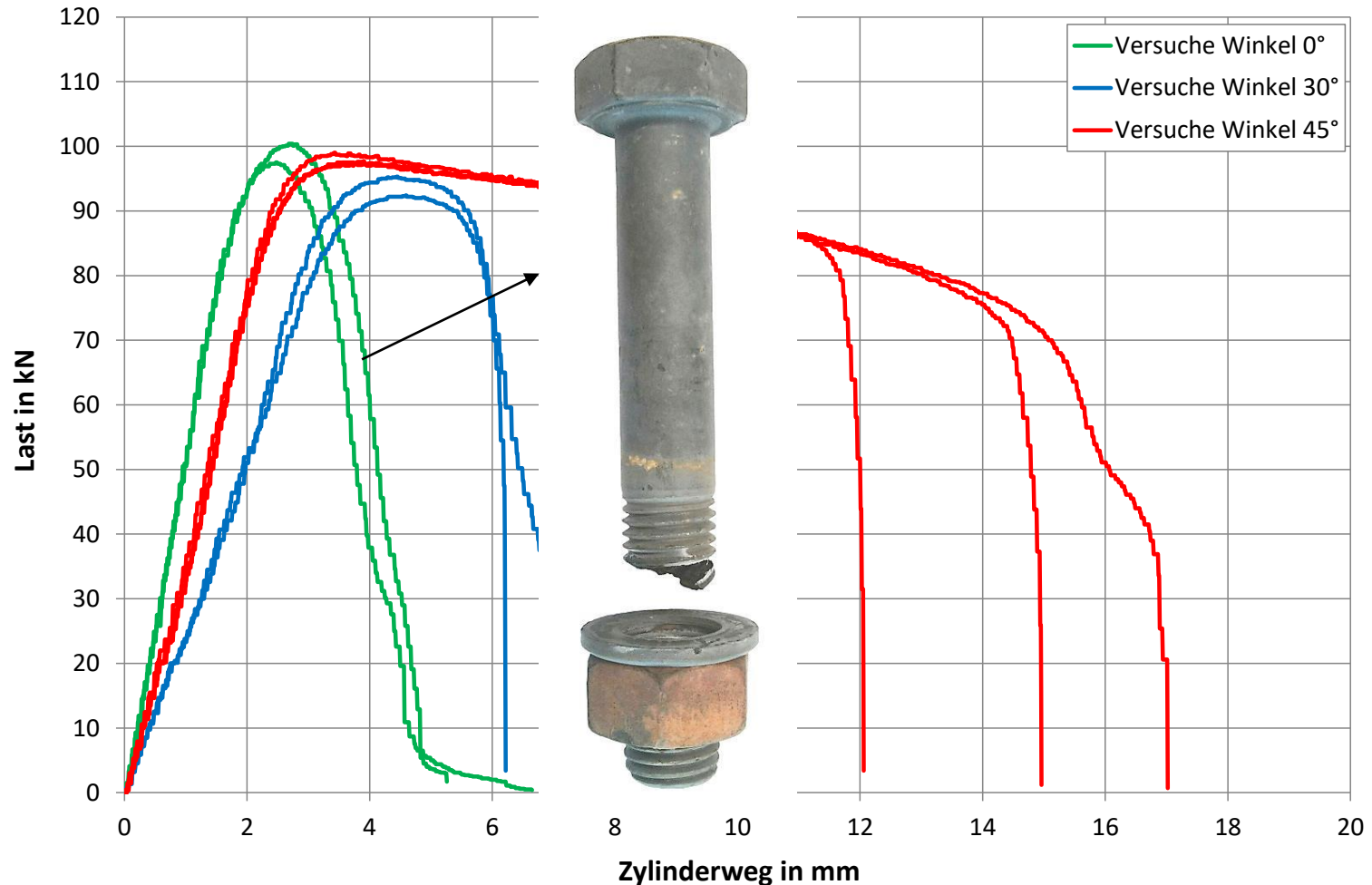


# Versuche unter Brandbeanspruchung – Ergebnisse: Kraft-Weg-Diagramm bei ca. 500 °C



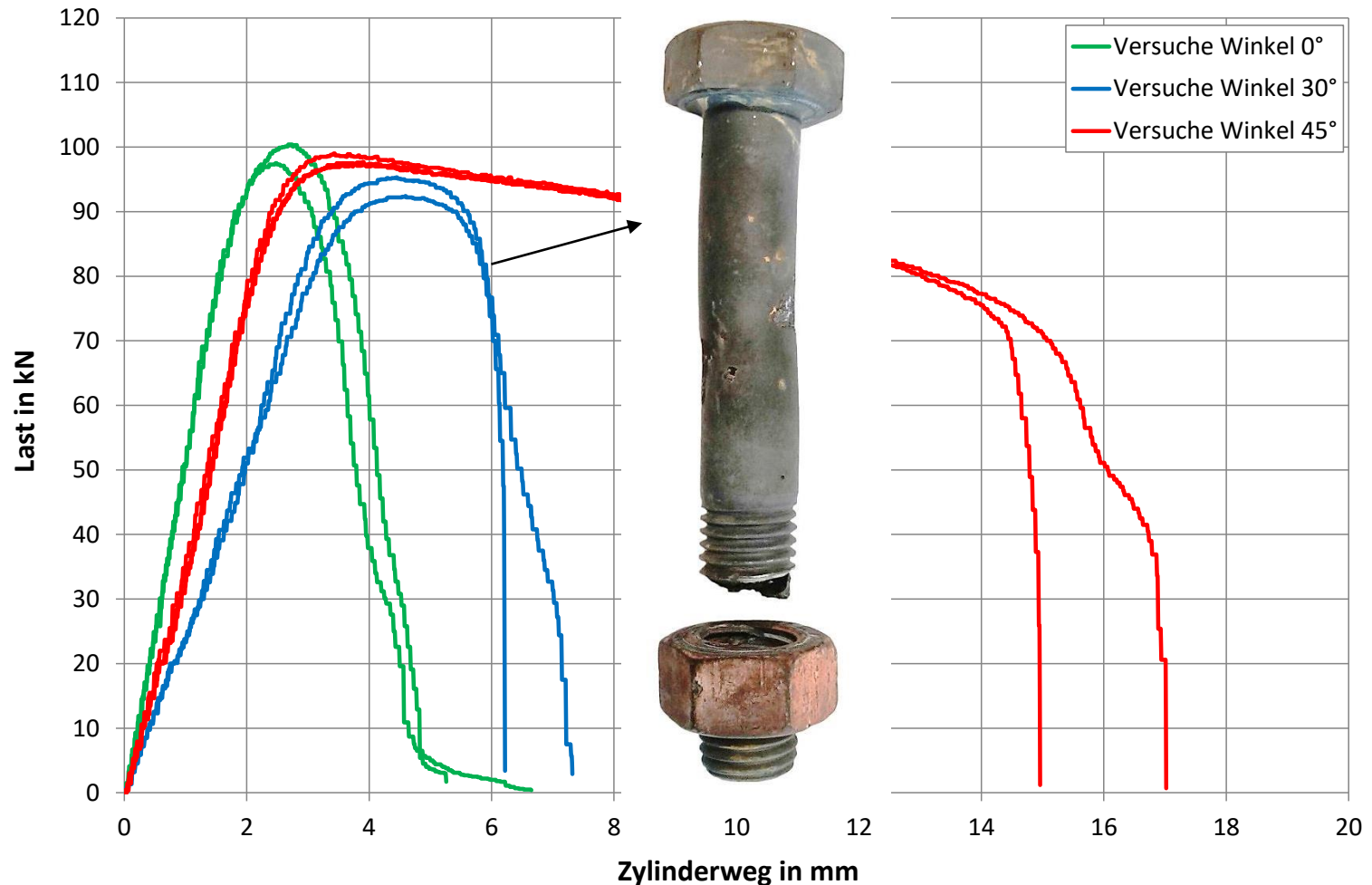
# Versuche unter Brandbeanspruchung –

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



# Versuche unter Brandbeanspruchung –

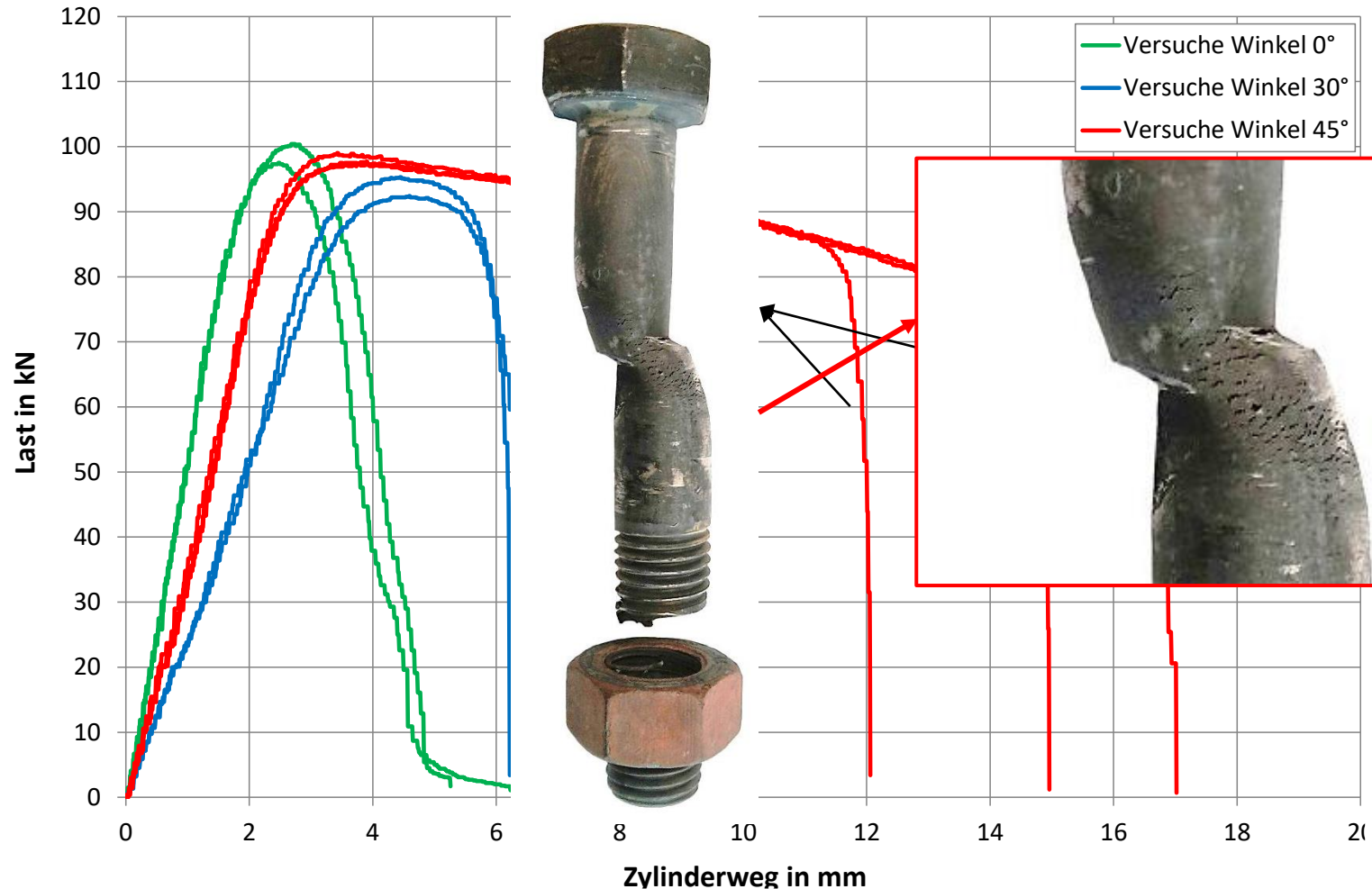
Ergebnisse: Kraft-Weg-Diagramm bei ca. 500 °C





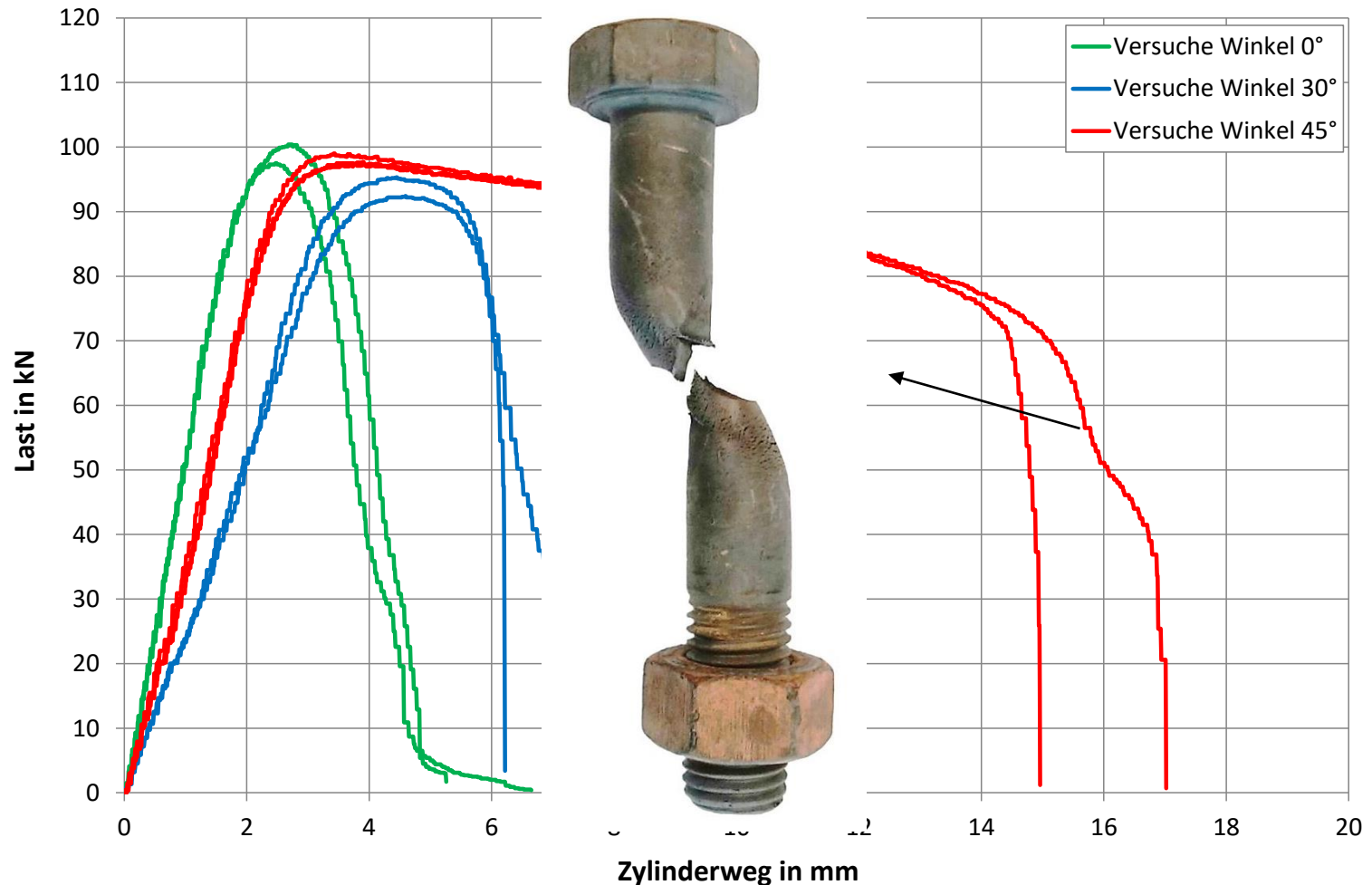
# Versuche unter Brandbeanspruchung –

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

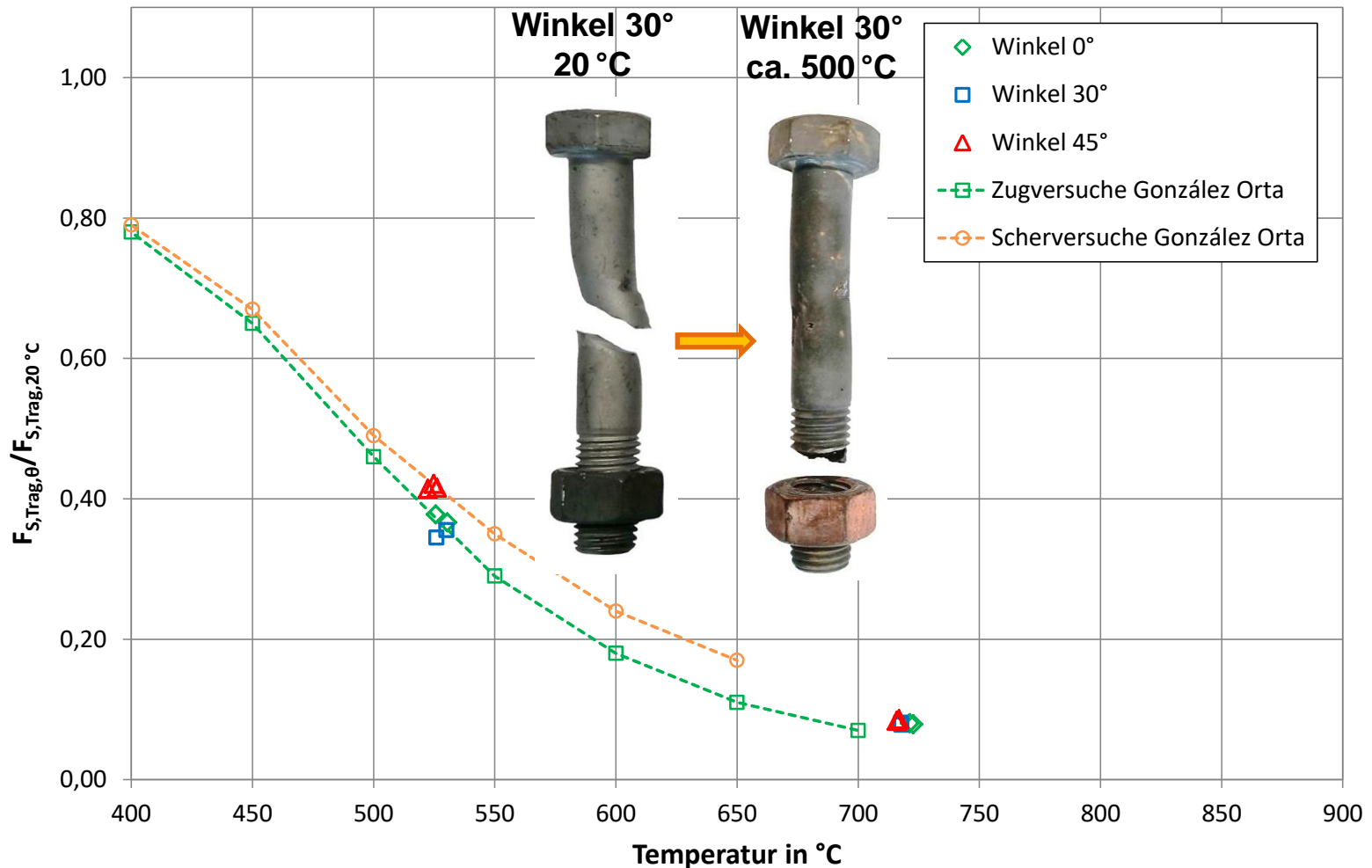


# Versuche unter Brandbeanspruchung –

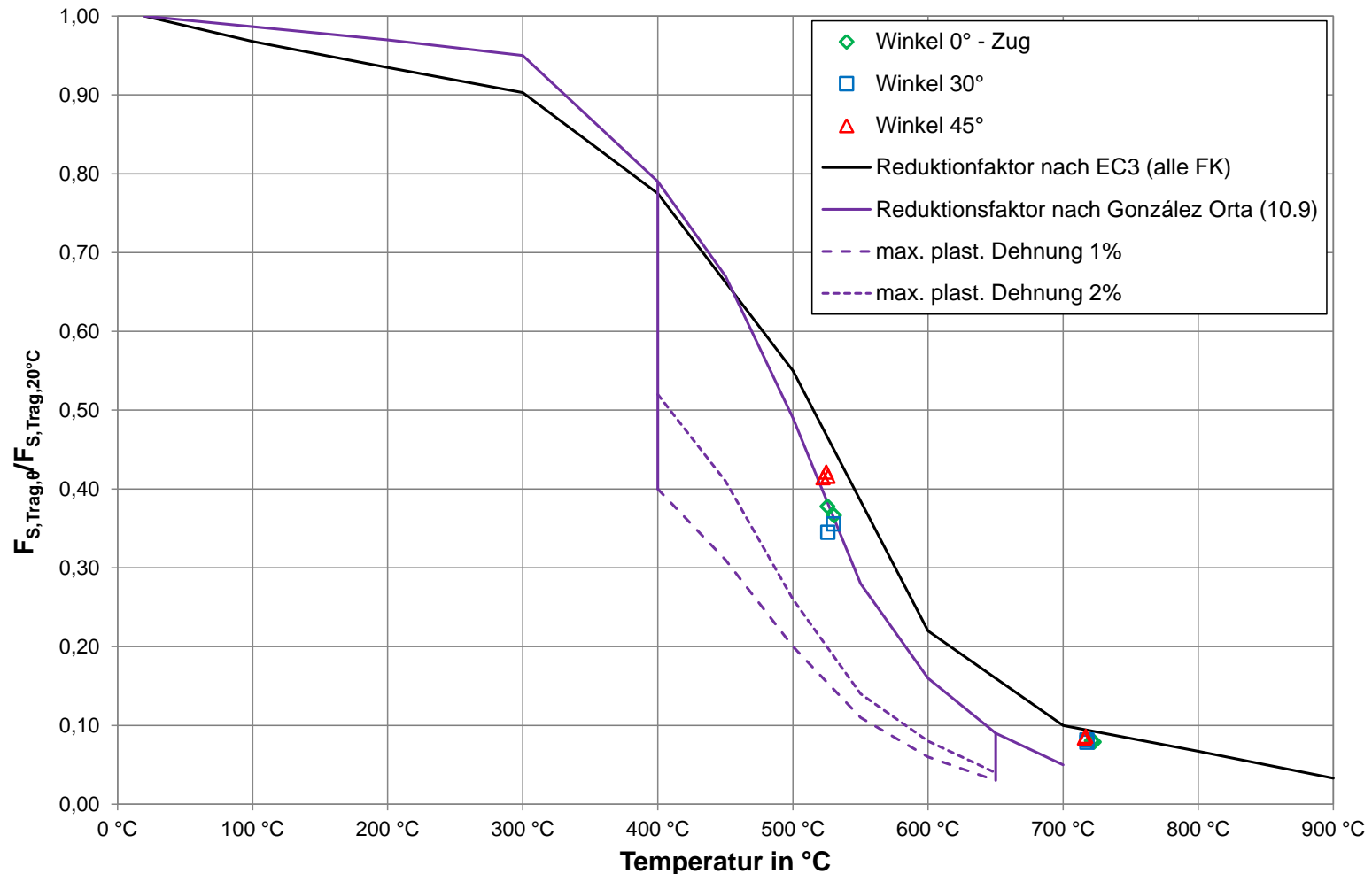
Ergebnisse: Kraft-Weg-Diagramm bei ca. 500 °C



# Versuche unter Brandbeanspruchung – Einfluss der Temperatur auf die Interaktionstragwirkung



# Versuche unter Brandbeanspruchung – Vergleich mit González Orta und EC3



# Zusammenfassung

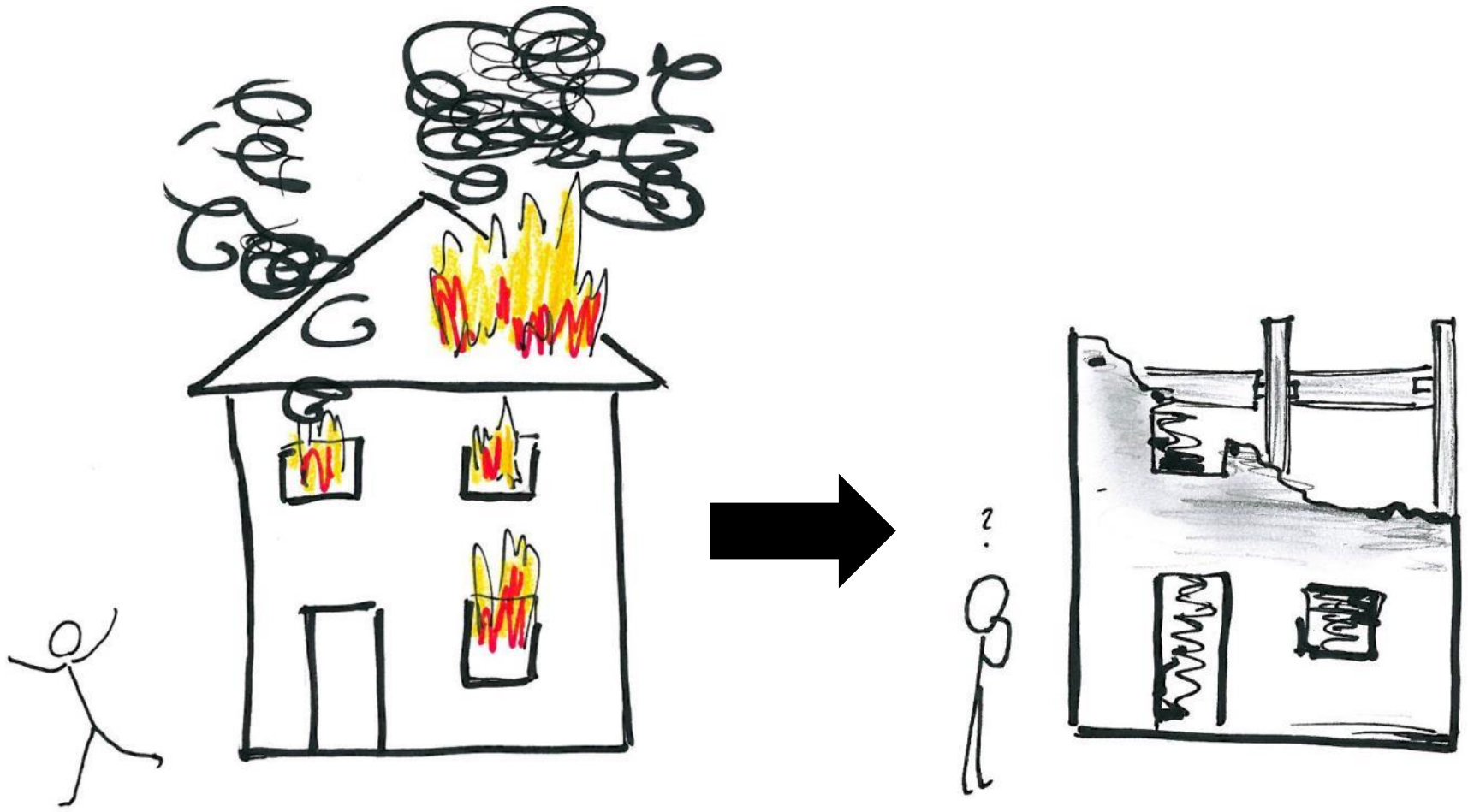
- Anschlüsse spielen im Brandfall eine Schlüsselrolle bei Stahltragwerken
- durch die Vielzahl an Komponenten und ihrem Zusammenspiel ist das Tragverhalten sehr komplex
- Komponentenmethode ist eine gute Möglichkeit das Tragverhalten von geschraubten Anschlüssen im Brandfall abzubilden
- Verwendung der 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

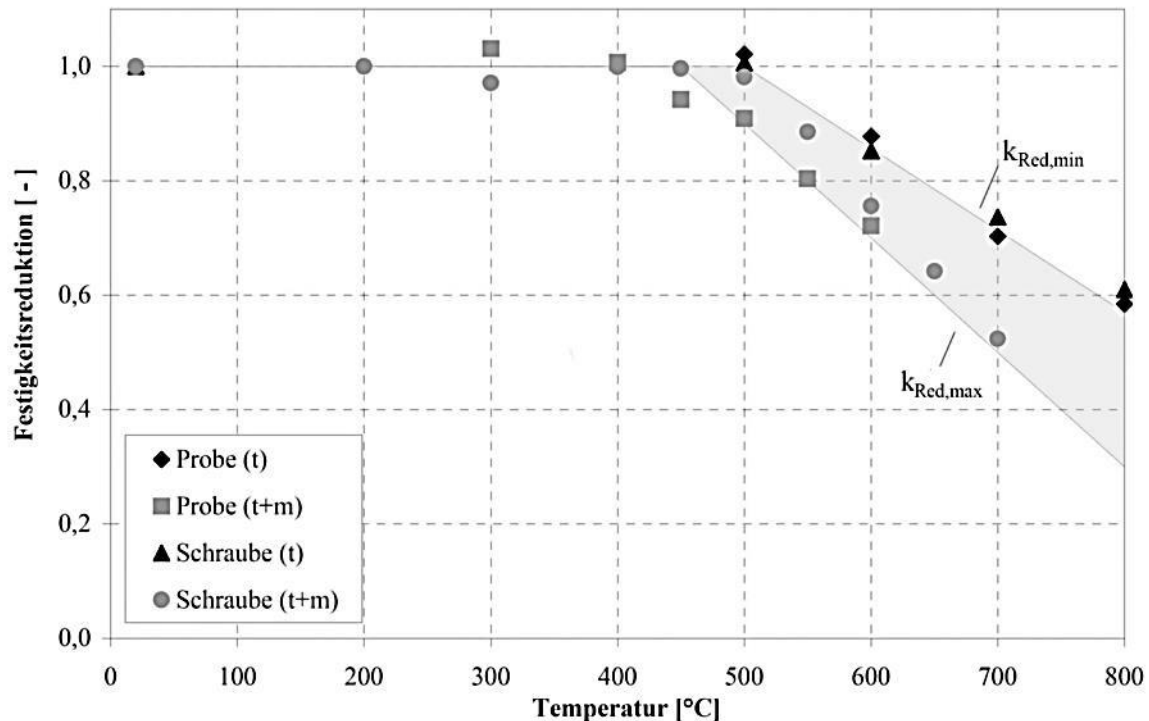
# Resttragfähigkeit



# Versuche an 10.9 Schrauben - González

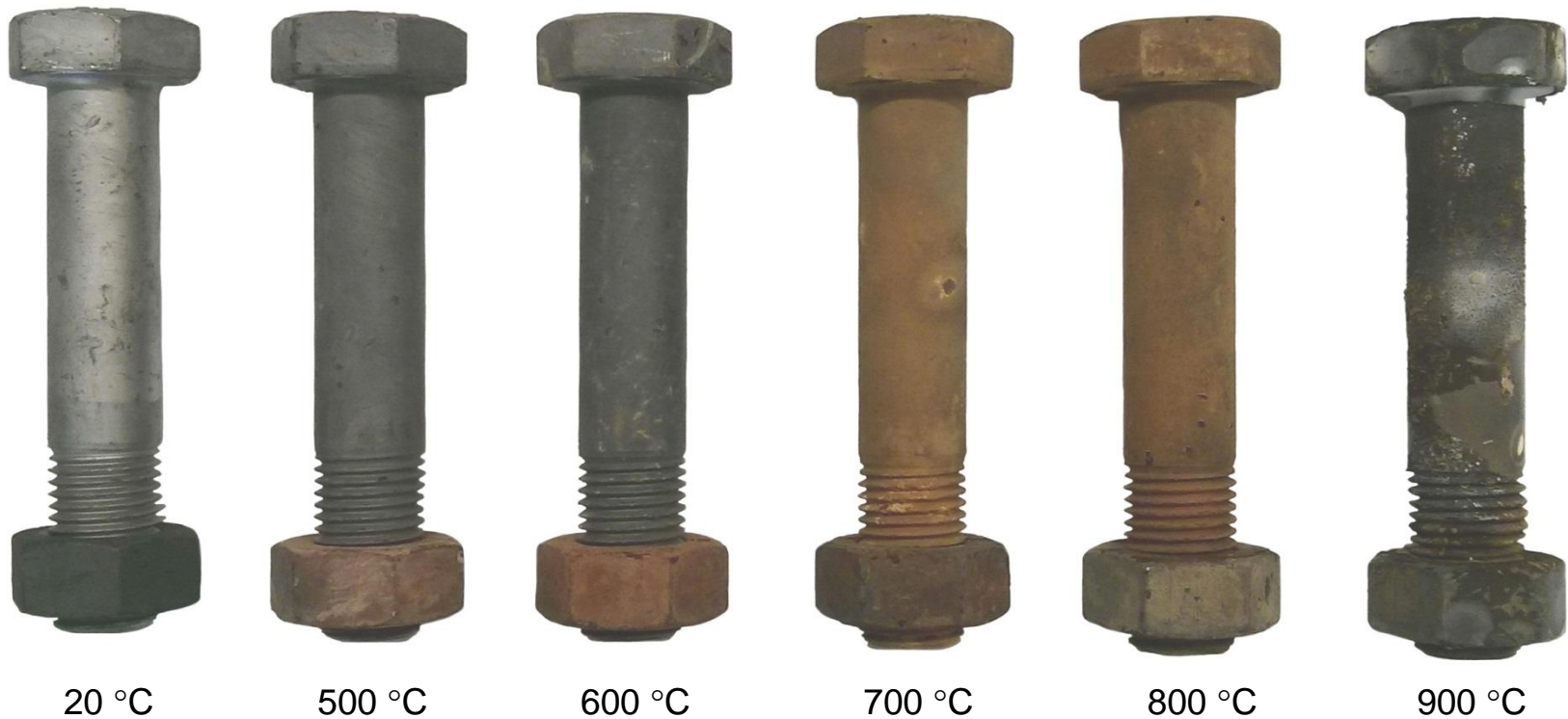
ohne zusätzliche mechanische Last :  $k_{Red,min} = \begin{cases} 1.0 & 20\text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 500\text{ }^\circ\text{C} \\ -1.434 * 10^{-3} * T + 1.717 & 500\text{ }^\circ\text{C} < T \leq 800\text{ }^\circ\text{C} \end{cases}$

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



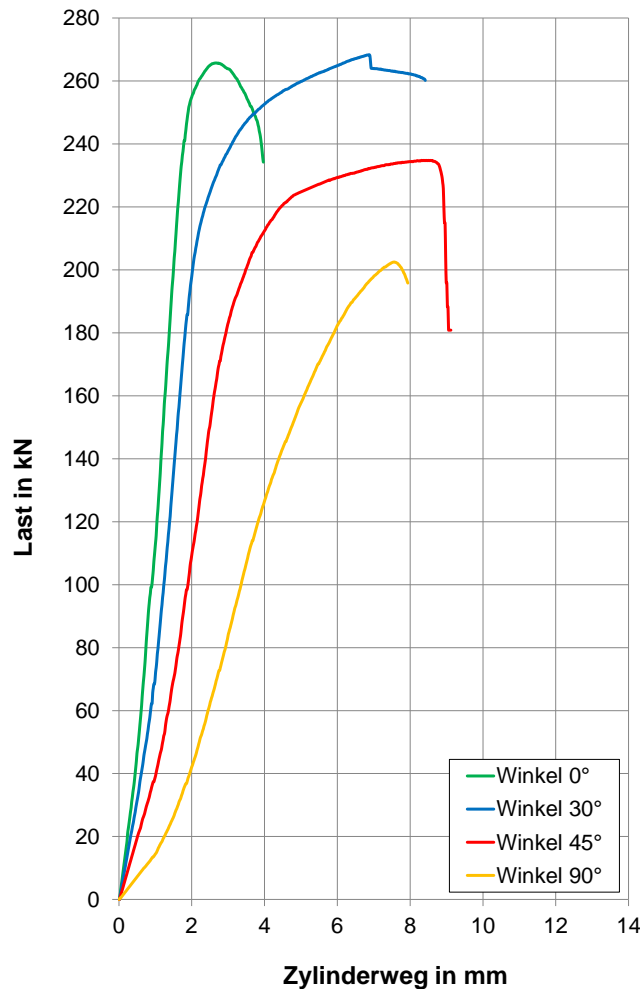
Quelle: González 2011

# Resttragfähigkeit – optische Erkennbarkeit der Temperaturbelastung

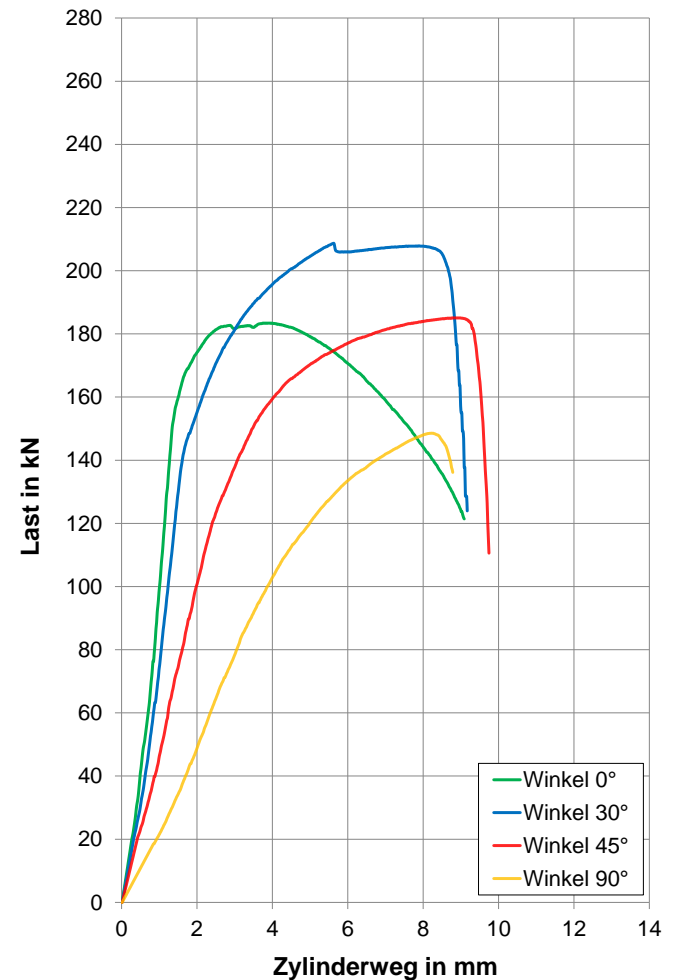


# Versuche zur Resttragfähigkeit – Einfluss der Temperatur auf die Interaktionstragwirkung

20 °C

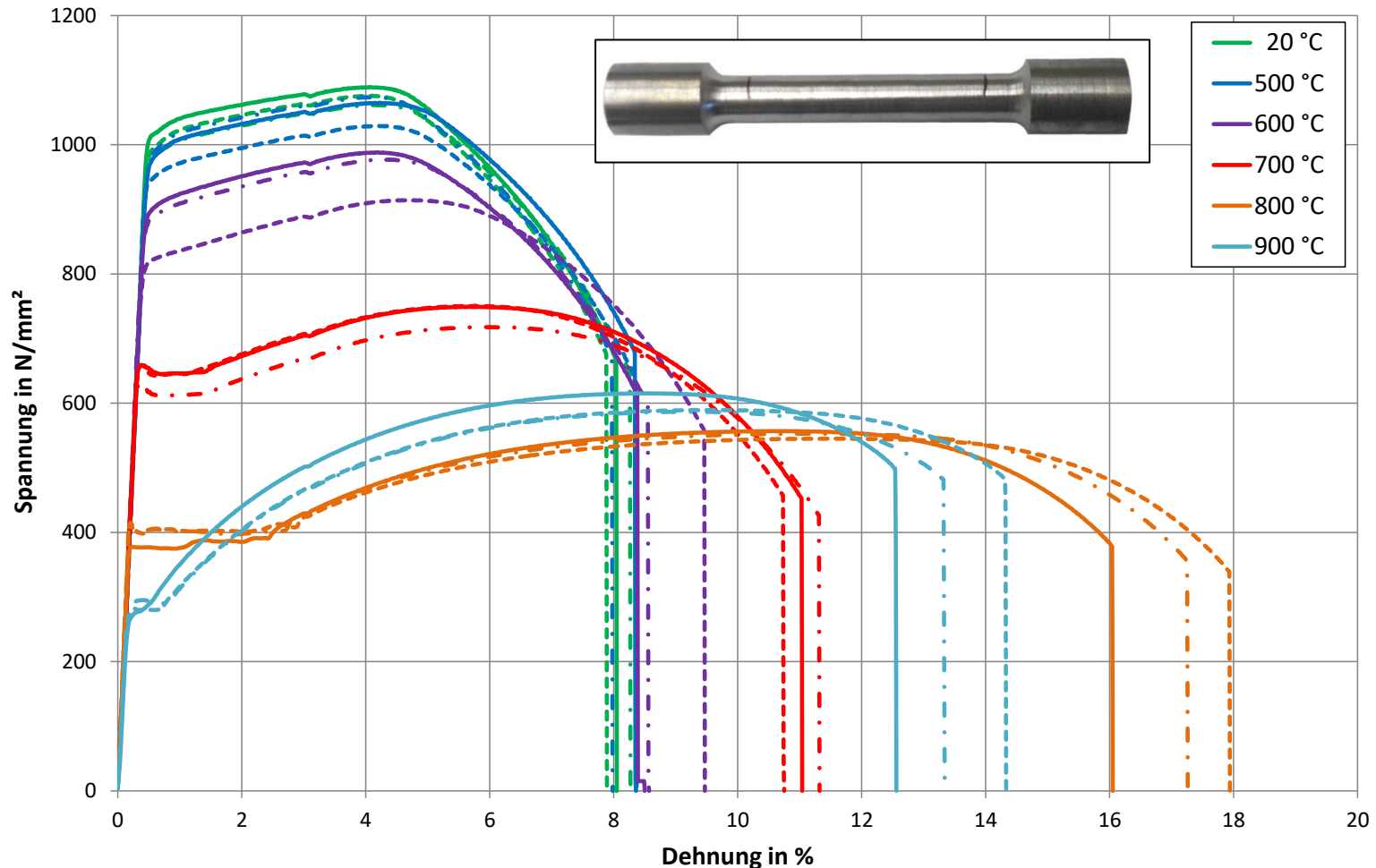


700 °C





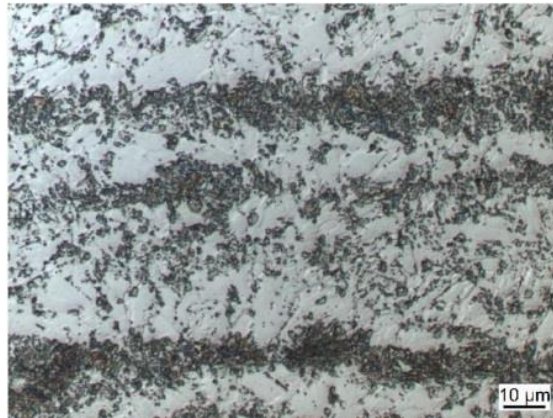
# Versuche zur Resttragfähigkeit – Ergebnisse: $\sigma$ - $\epsilon$ -Diagramme Zugproben



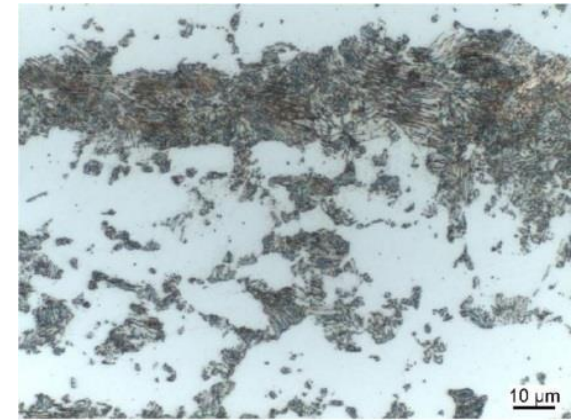
# Versuche zur Resttragfähigkeit – Veränderung der Mikrostruktur



20 °C - Martensit

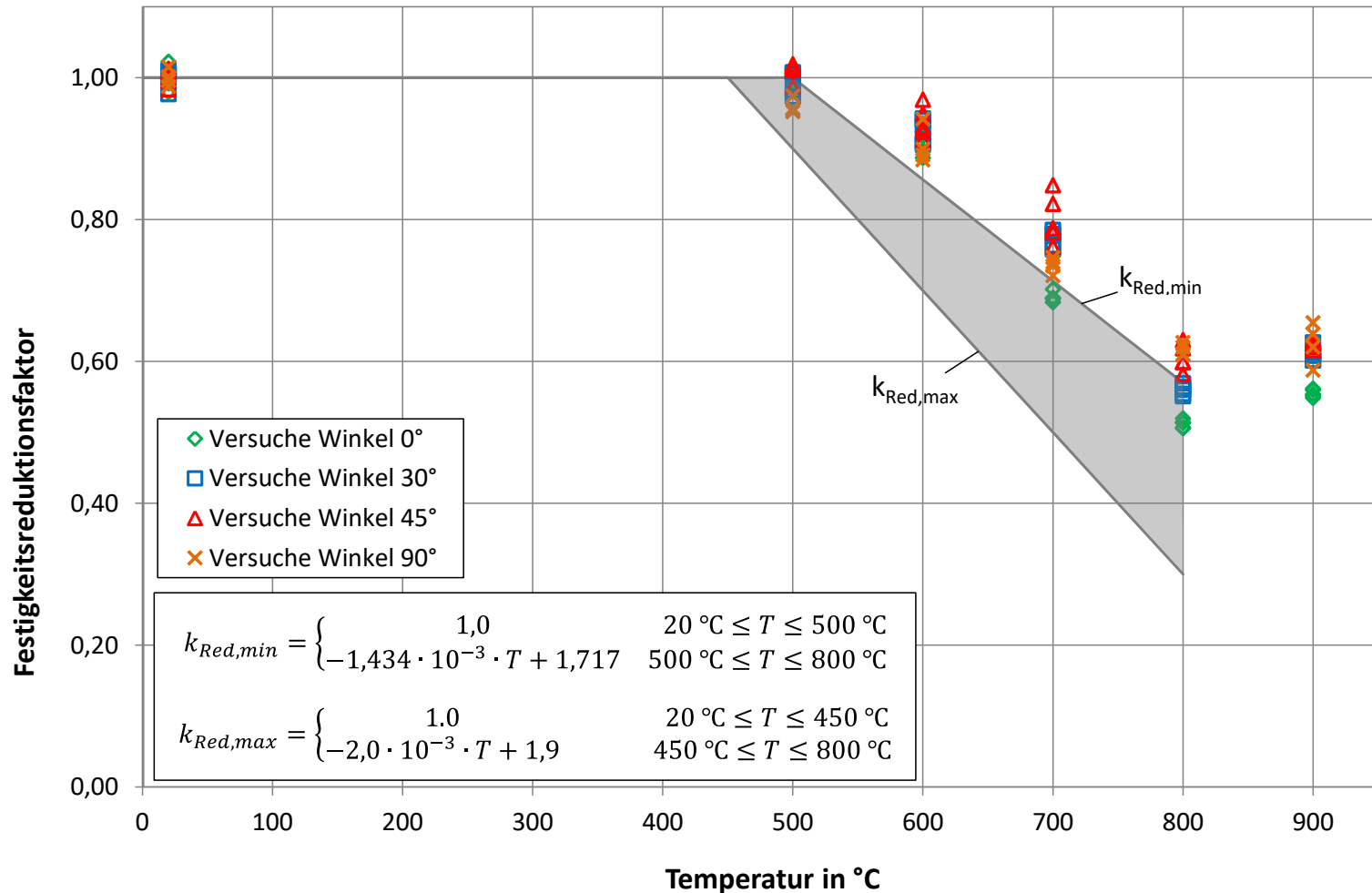


800 °C - Ferrit (hell) /  
Perlit (dunkel) kugelig  
eingeformt



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