

# Hysteresismessung als Schlüssel zur multiparametrischen Ermüdungscharakterisierung metallischer Werkstoffe

## InfraTec GmbH - Thermografie-Anwenderkonferenz „Thermografie in Forschung und Entwicklung“

Riko Schanzenbach, Aline Wagner, Jan-Erik Nebel, Jonas Anton Ziman,  
Viktor Lyamkin, Janina Koziol, **Fabian Weber**, Peter Starke  
Juni 2026



## Problemstellung

- Ermüdungsprozesse beginnen „**unscheinbar**“
- Rein **zerstörende Prüfverfahren** → hohe **Kosten** & lange **Versuchsdauer**



## Herausforderung

- **Mikrostrukturelle** Veränderungen sind **komplex**  
→ Einzelne Messsignale geben häufig nur unzureichende Informationen

## Lösungsansatz

- **Hysteresemessungen** zur Abbildung der **Schädigungsevolution**

## Nutzen & Potenziale

- **Umfängliche Charakterisierung** → Verringerung des **Versuchsumfangs**
- Relevanz für **Forschung & Industrie**

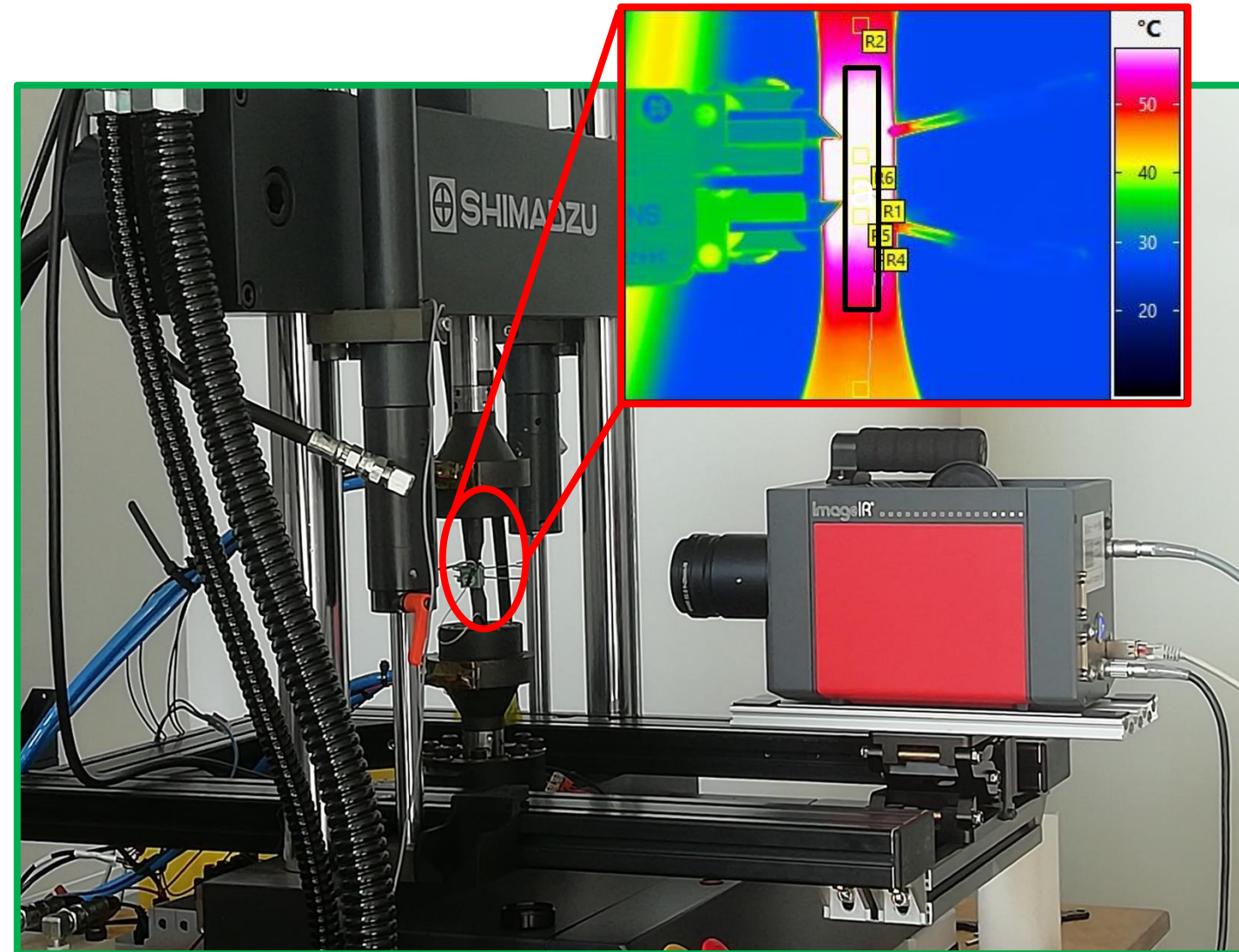
## Servohydraulisches Prüfsystem mit applizierter Messtechnik

### Beanspruchung

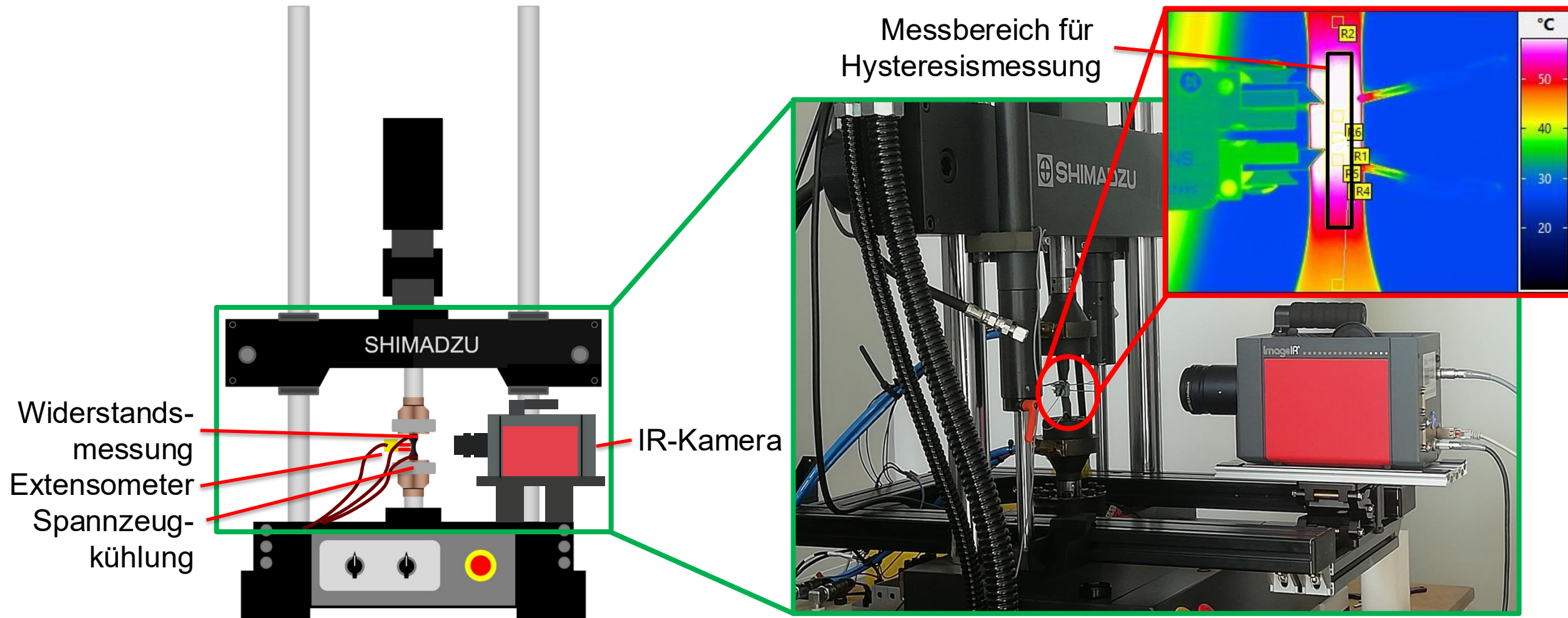
- Prüfsystem Typ EHF-L 20 kN, Fa. Shimadzu
- Spannungskontrollierte Versuchsführung
- Spannungsverhältnis:  $R = -1$
- Sinusförmige Last-Zeit-Funktion
- Frequenz:  $f = 5 \text{ Hz}$

### Messtechnik

- Extensometer 3442AVG, Fa. Epsilon
- Infrarotkamera ImageIR 8300, Fa. InfraTec
- 4-Leiter-Messtechnik mit Stromquelle TOE 7621, Fa. Toellner und integrierte Messkarte, Fa. InfraTec



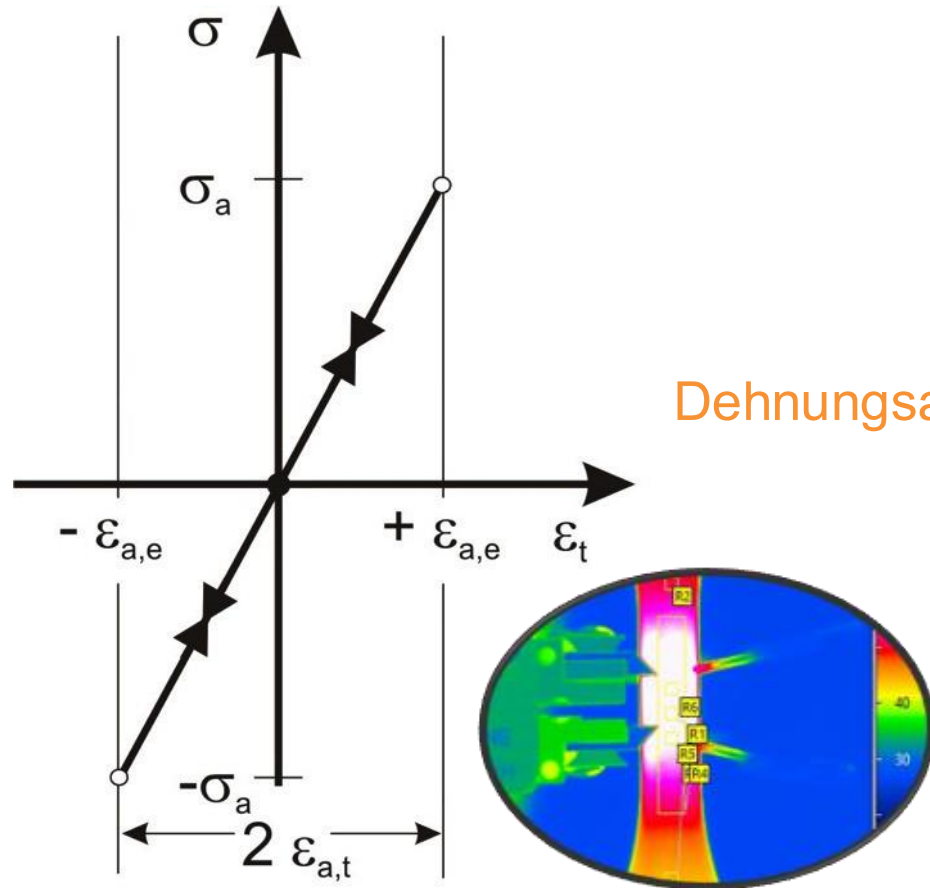
## Servohydraulisches Prüfsystem mit applizierter Messtechnik



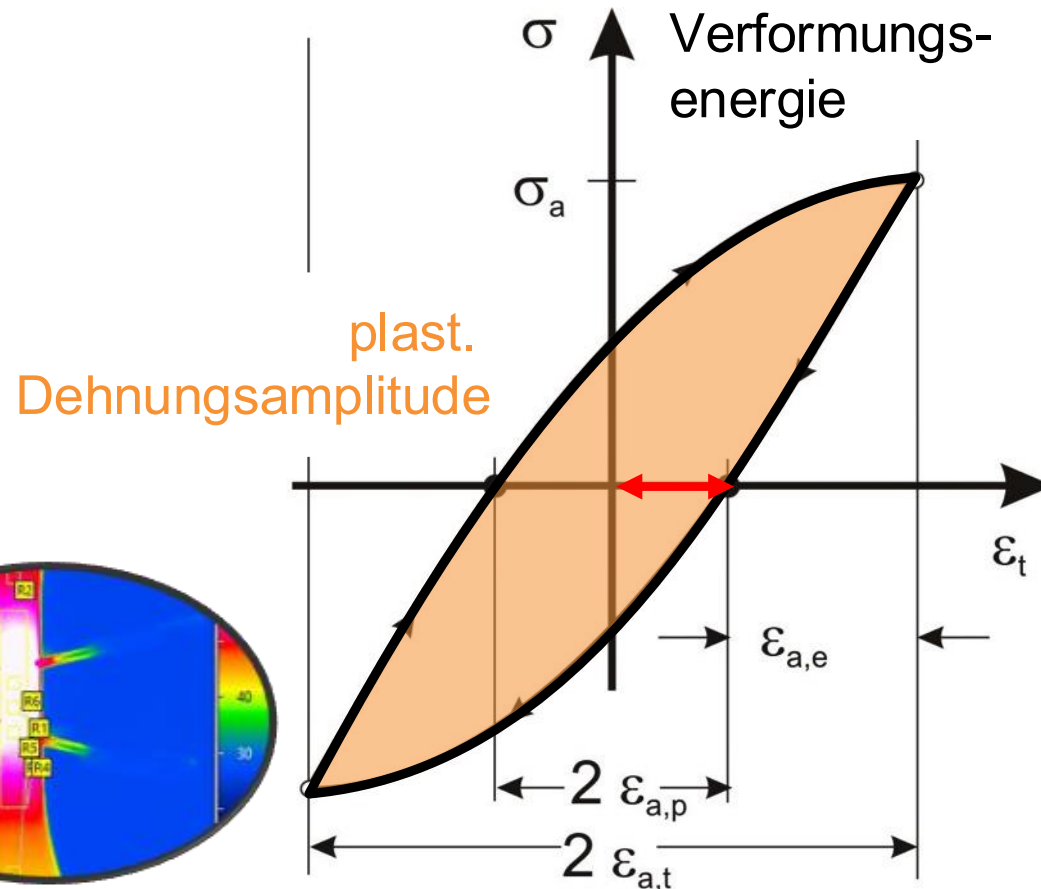


## Mechanische Spannung-Dehnung-Hysteresisschleife

rein elastische Beanspruchung



elasto-plastische Beanspruchung



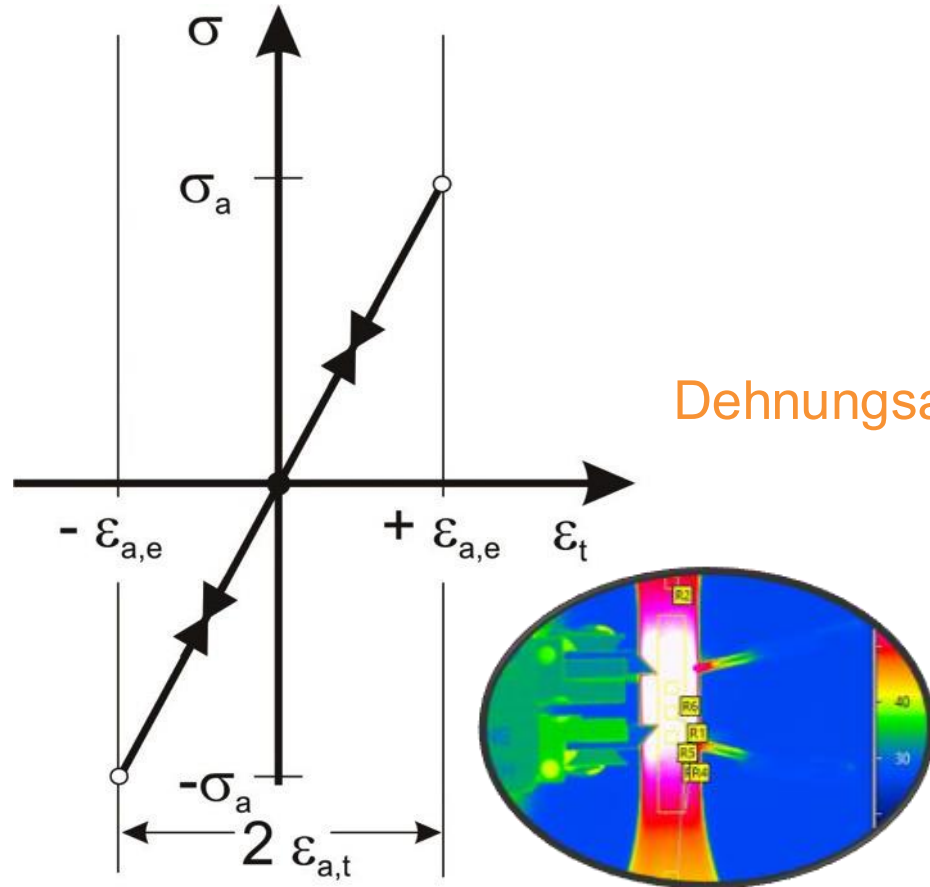
- **5-10 %:** Erhöhung der inneren Energie  
→ **mikrostrukturelle Evolution**
- **90-95 %:** Wärmeenergie  
→ Erhöhung der Probentemperatur

Einfluss auf weitere Messverfahren basierend auf:

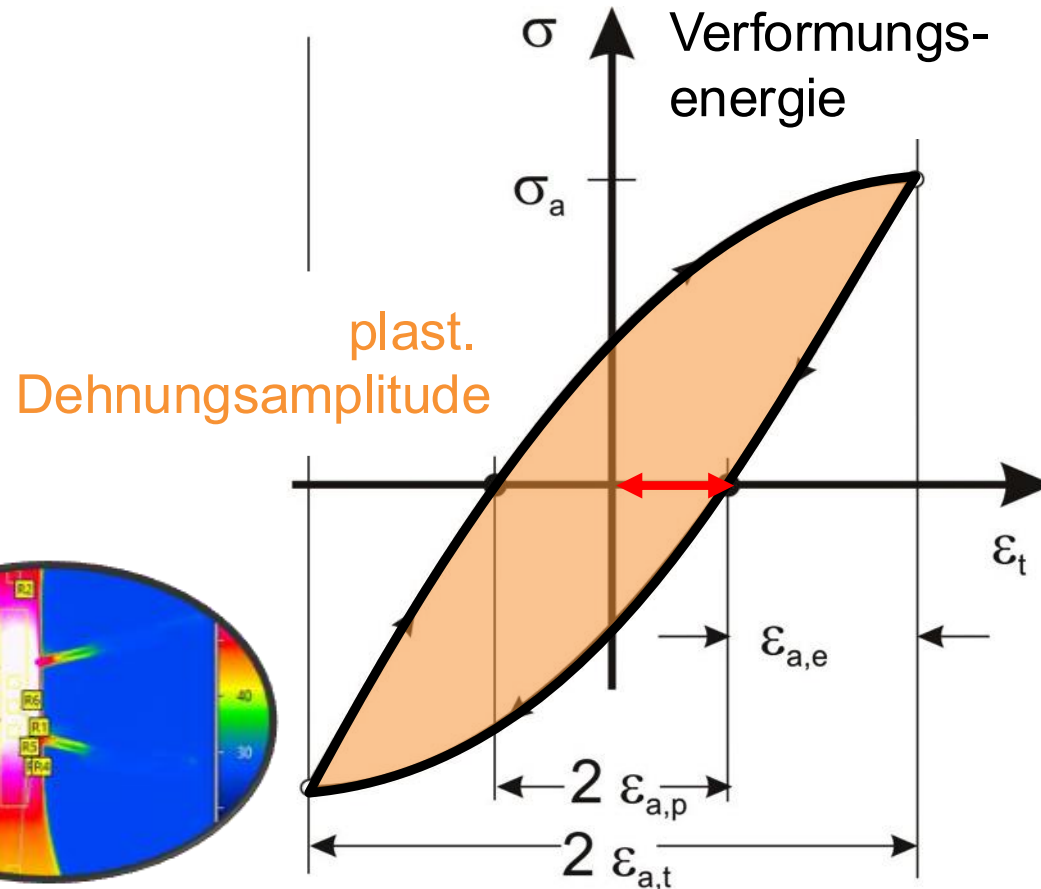
- **Temperatur**
- **Elektrischer Widerstand**
- **Magnetik**

## Mechanische Spannung-Dehnung-Hysteresisschleife

rein elastische Beanspruchung



elasto-plastische Beanspruchung



- **5-10 %:** Erhöhung der inneren Energie  
→ **mikrostrukturelle Evolution**

- **90-95 %:** Wärmeenergie  
→ Erhöhung der Probentemperatur

Einfluss auf weitere Messverfahren basierend auf:

- **Temperatur**
- **Elektrischer Widerstand**
- **Magnetik**

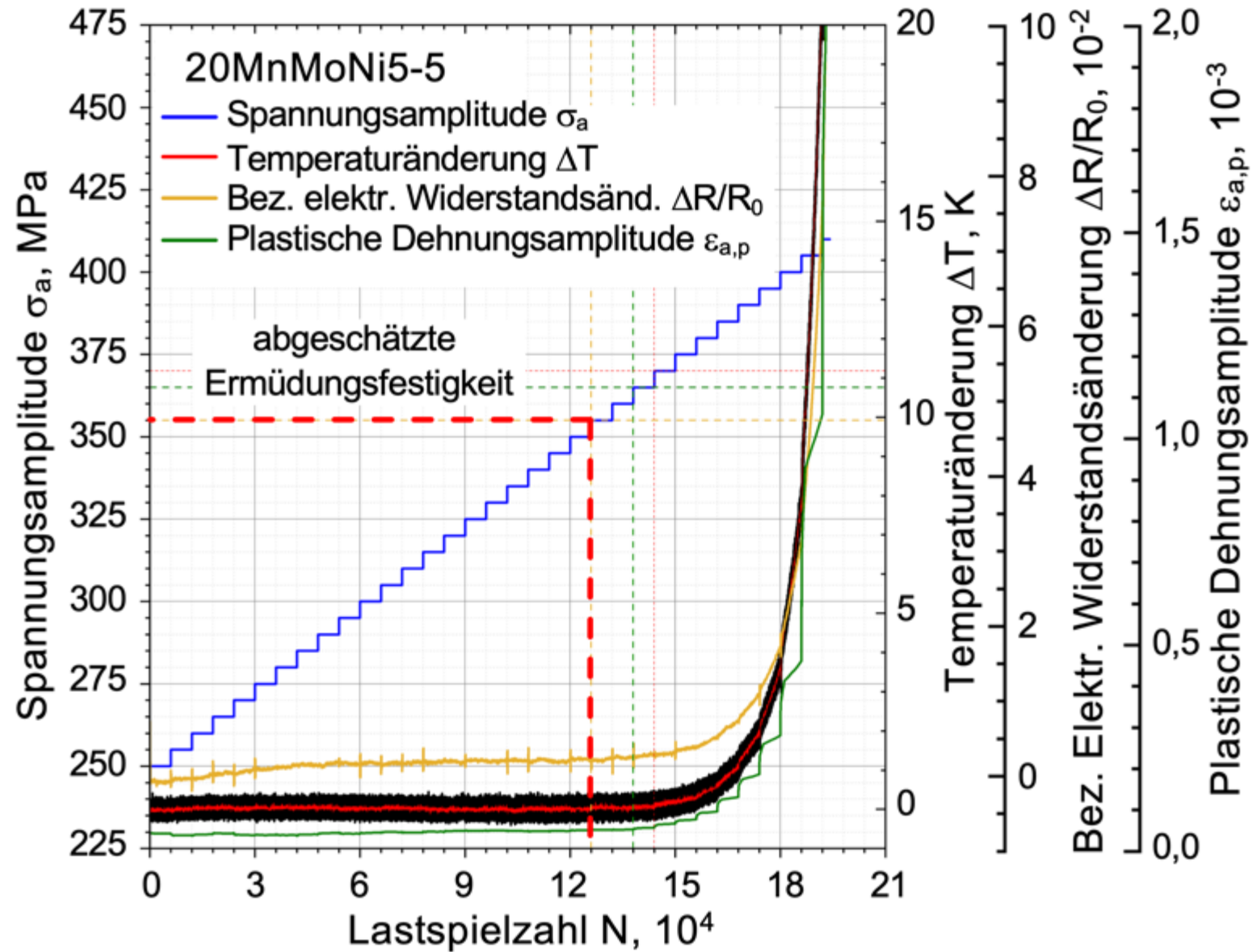
## Aufgaben von LSV

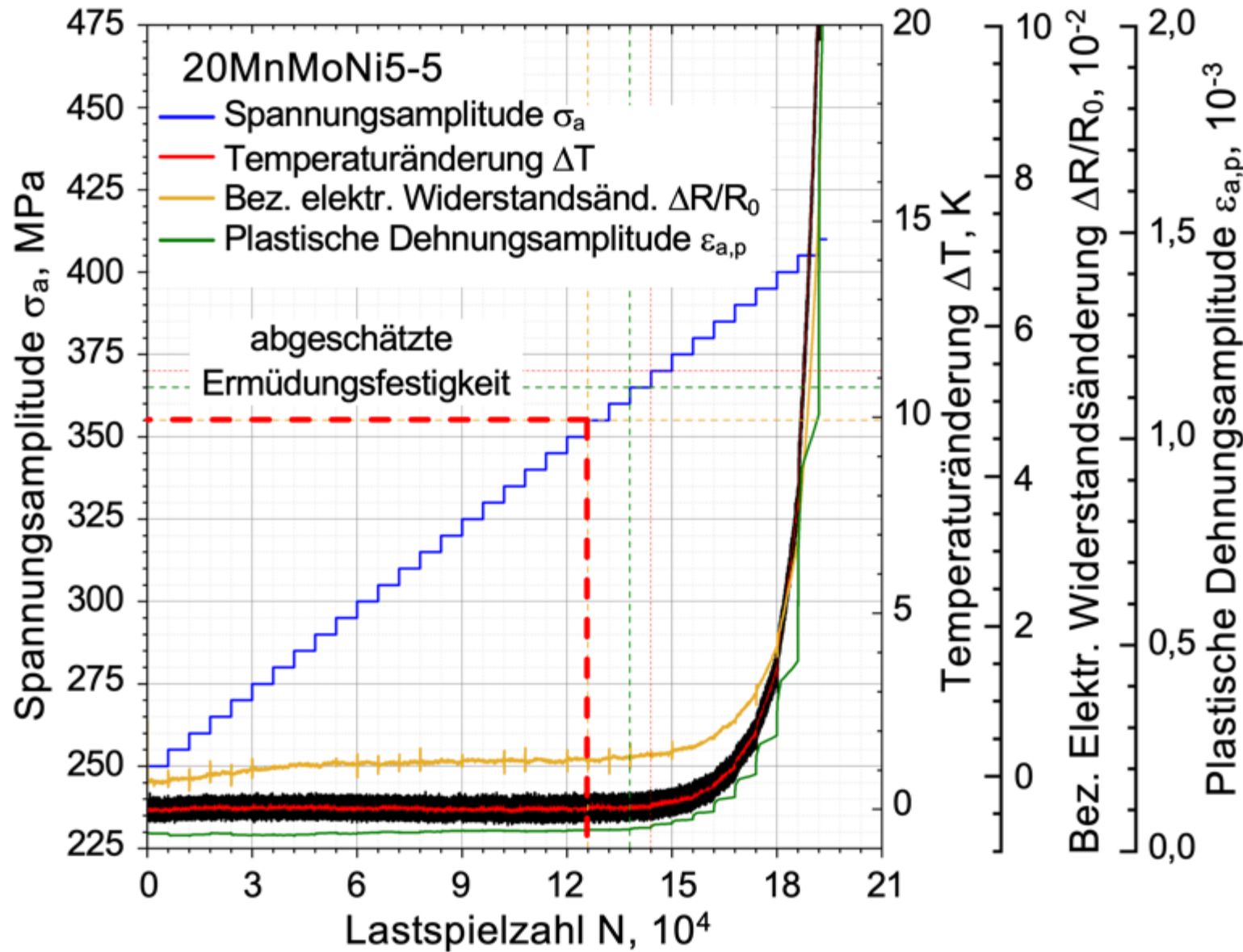
- Abschätzung der **Ermüdungsfestigkeit**
- Bereitstellung von **Eingangsgrößen** für die Lebensdauerberechnung
- **Reduktion des Zeit- und Kostenaufwands bei der Bereitstellung von Ermüdungsdaten**

## Versuchsparameter

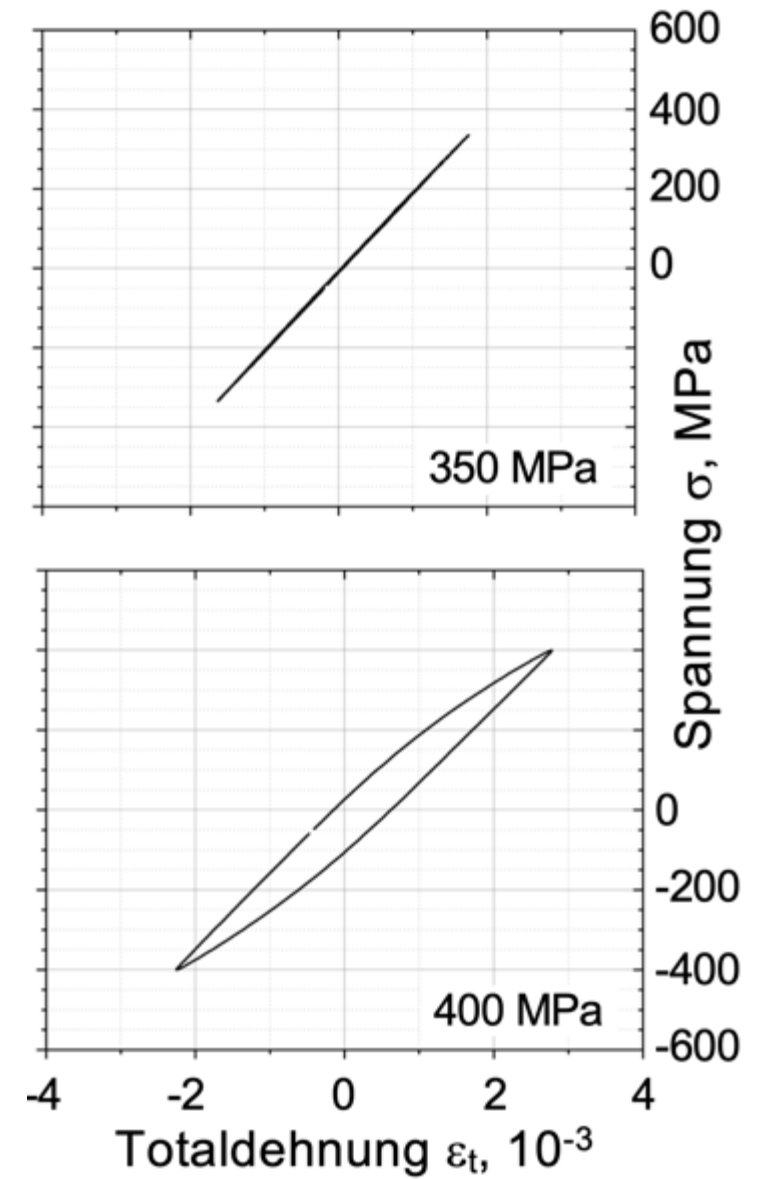
- $\sigma_{a,start} = 250 \text{ MPa}$
- $\Delta N = 6.000 \text{ Zyklen}$
- $\Delta \sigma_a = 5 \text{ MPa}$

**Zeitsynchrone Aufnahme** von **Dehnung** sowie **Temperatur** und **elektrischem Widerstand** als Indikatoren der Werkstoffreaktion im LSV



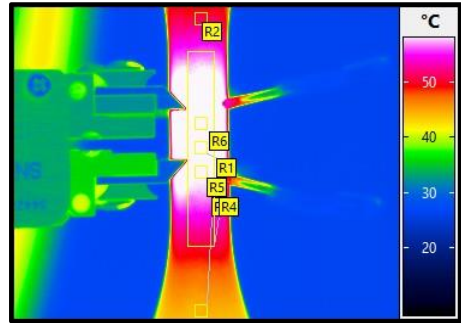


Mech. Spannung-Dehnung-Hysteresemessung

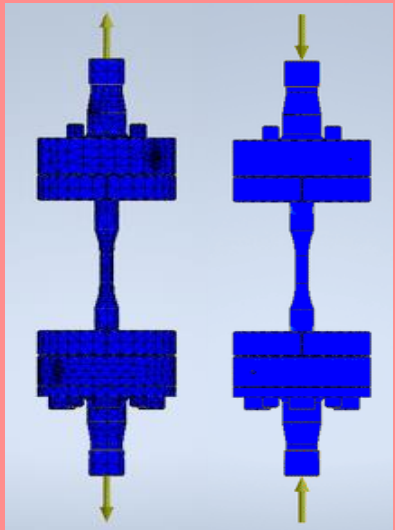




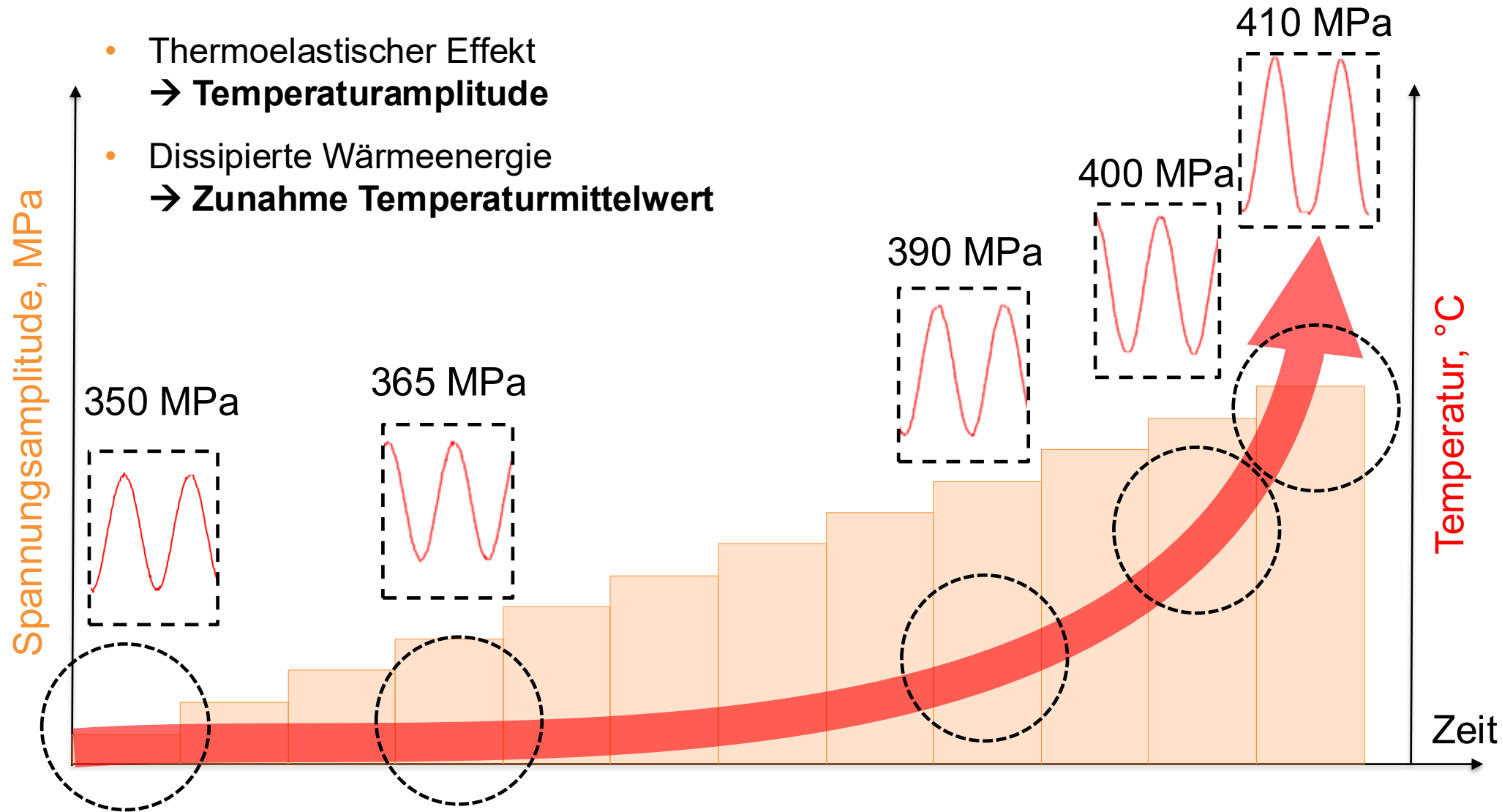
## Hochaufgelöste Temperaturmessung



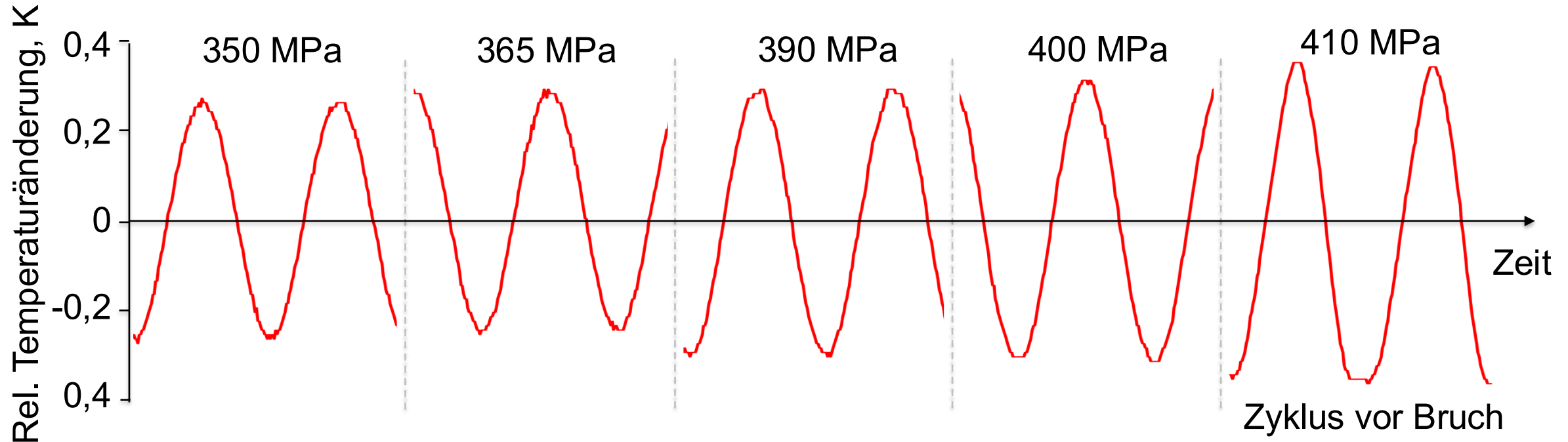
Thermoelastischer Effekt



- Thermoelastischer Effekt  
→ **Temperaturamplitude**
- Dissipierte Wärmeenergie  
→ **Zunahme Temperaturmittelwert**

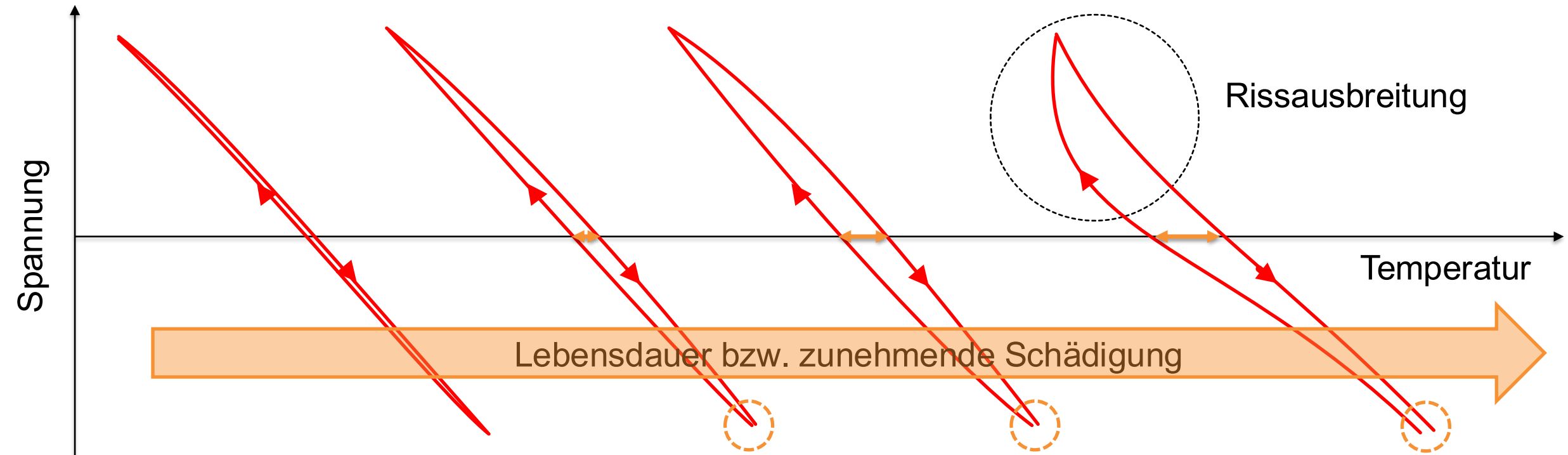


## Hochaufgelöste Temperaturmessung



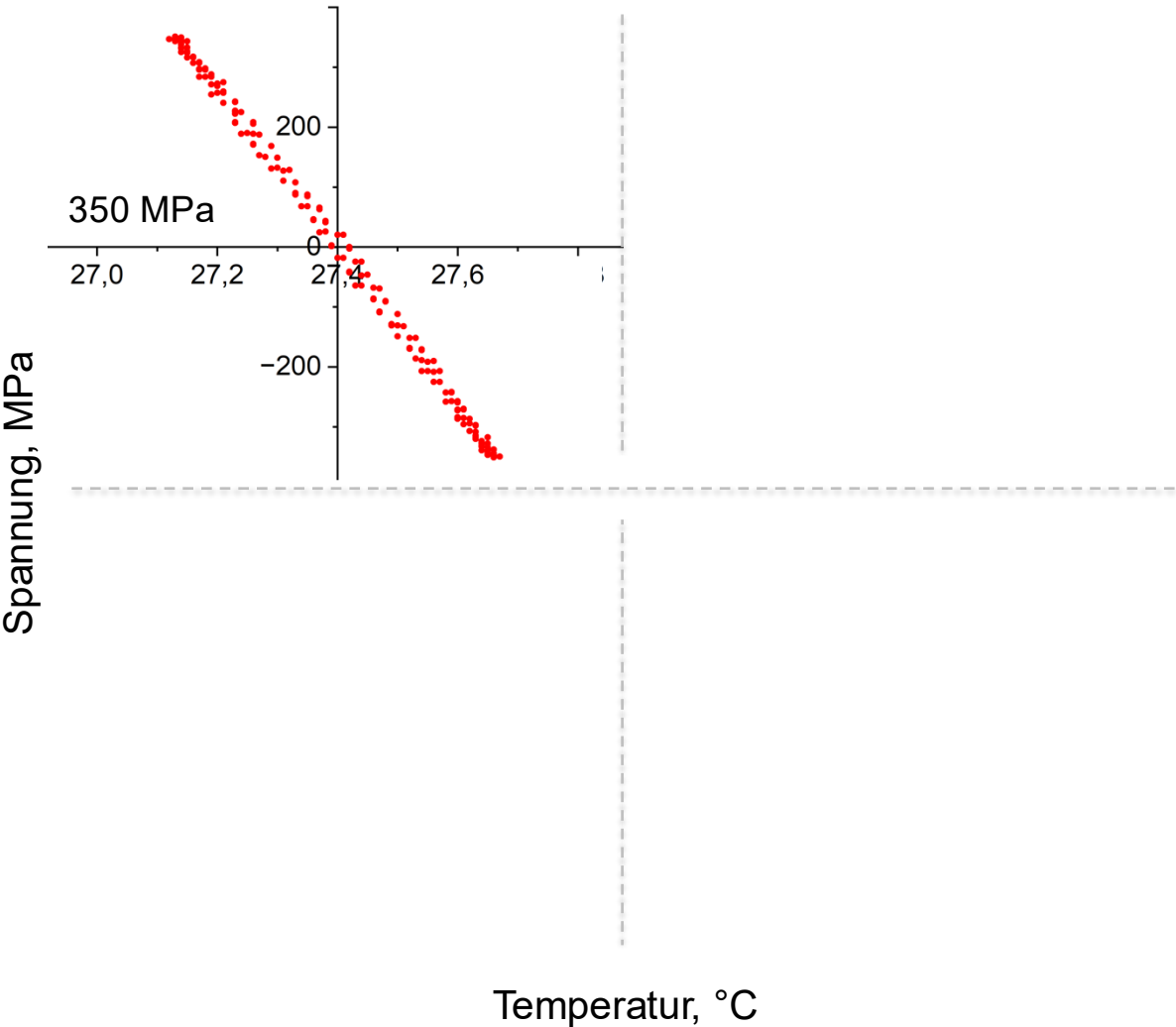
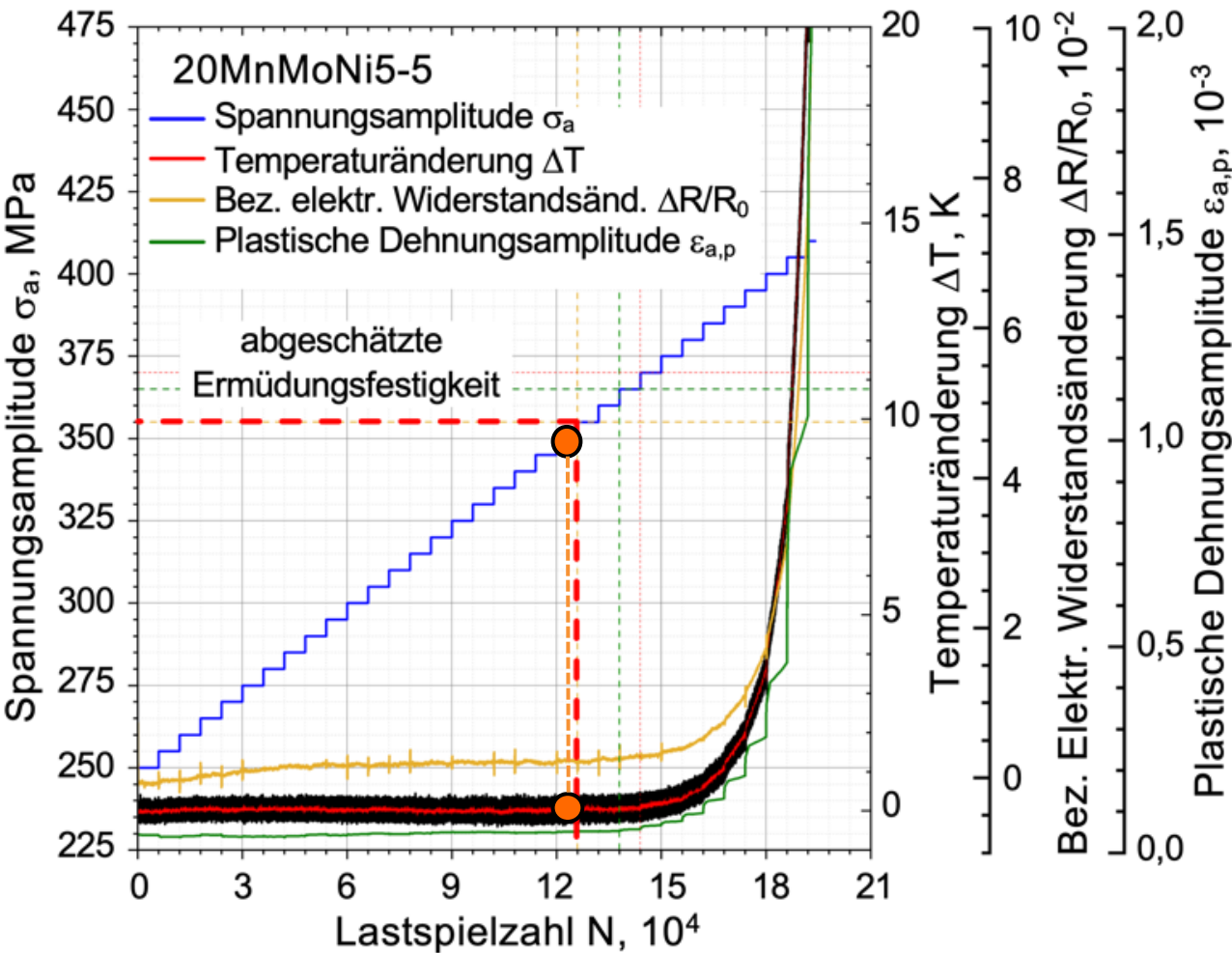
- **Thermoelastischer Effekt** spielt eine wesentliche Rolle
- Effekt beschreibt reversible Temperaturänderung unter **elastischer Zug-Druck-Beanspruchung**
- **Nicht-lineare Anteile beim Auftreten plastischer Verformungsanteile**  
→ Phasenverschiebung, Einfluss auf Temperaturamplitude, Verschiebung des Temperaturmittelwerts

## Spannung-Temperatur-Hysterese



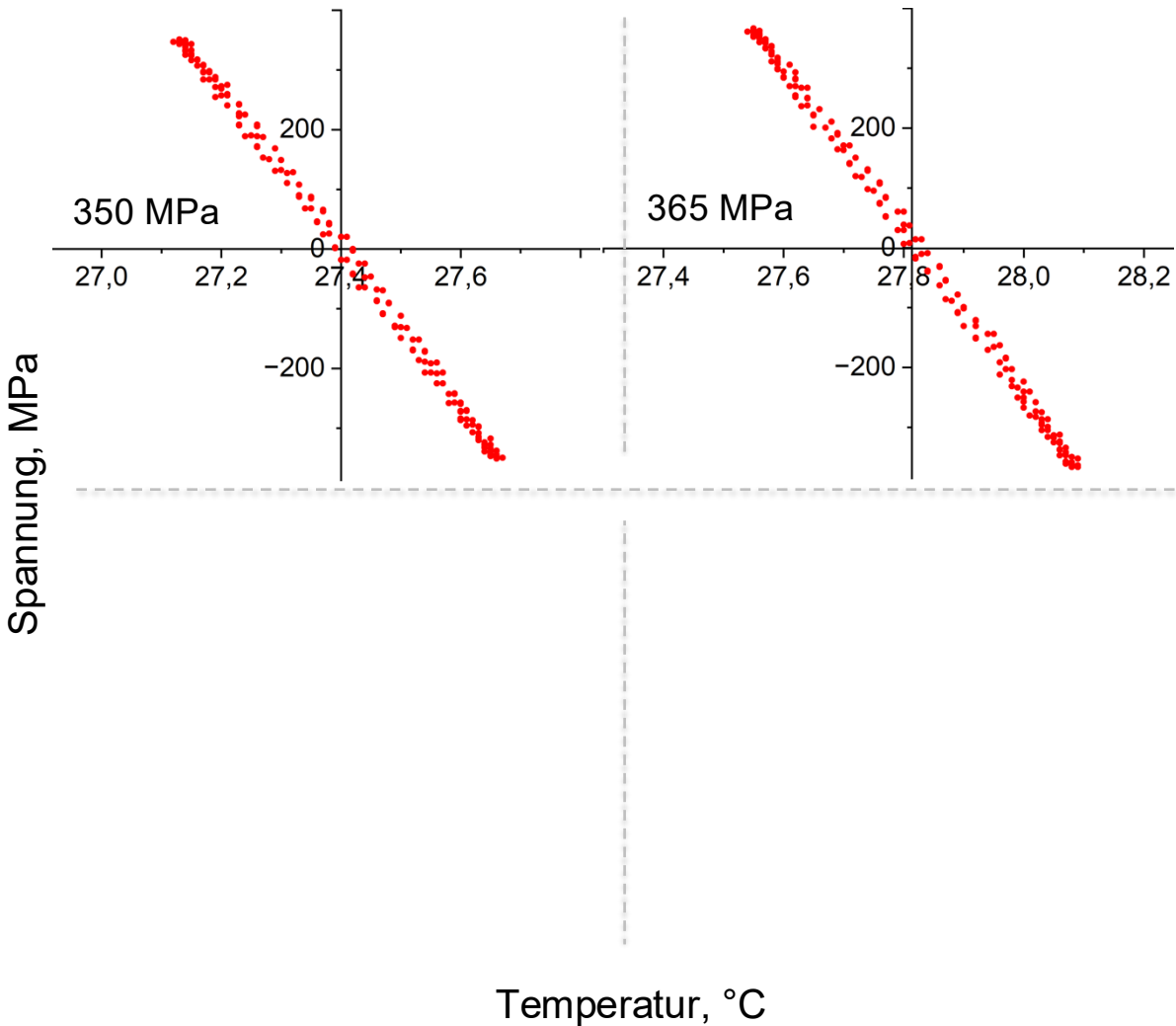
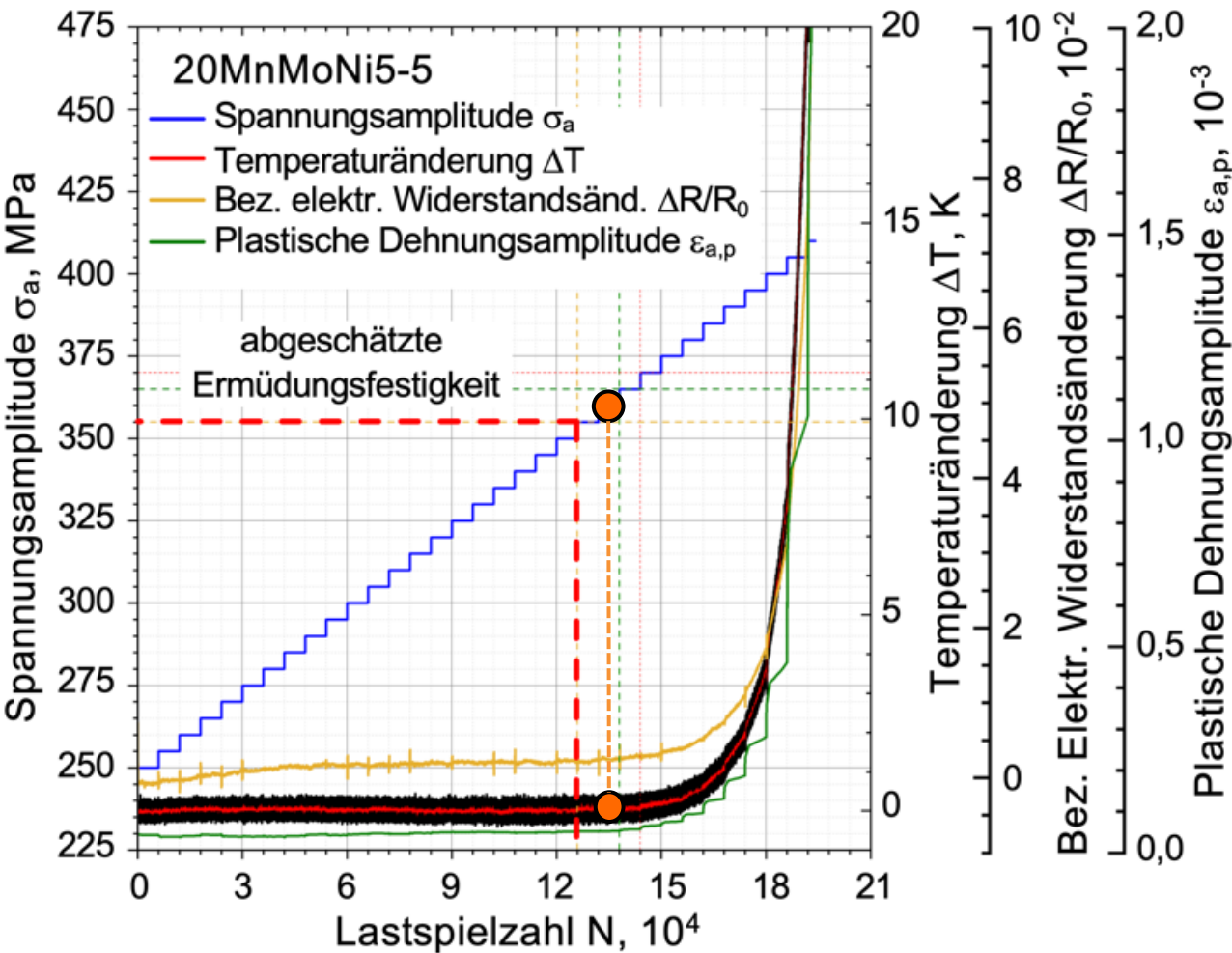
- ▶ **Asymmetrie** in der Hysterese infolge **anisotropen Verhaltens** mit **zunehmender Schädigung**
- ▶ **Verschiebung** der Hysterese entlang der **Temperaturachse** infolge zunehmender **dissipierter Energie**

## Spannung-Temperatur-Hysterese

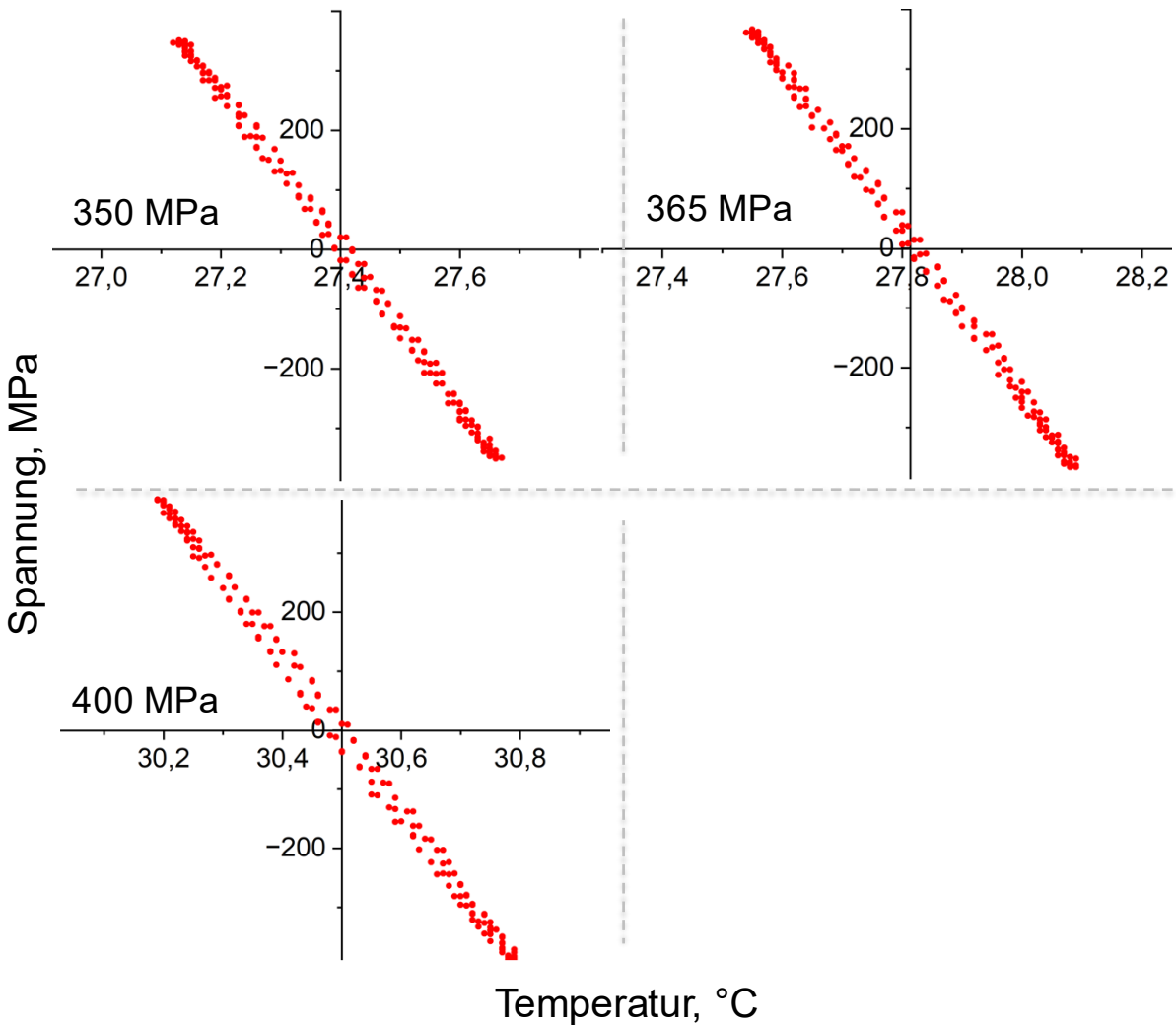
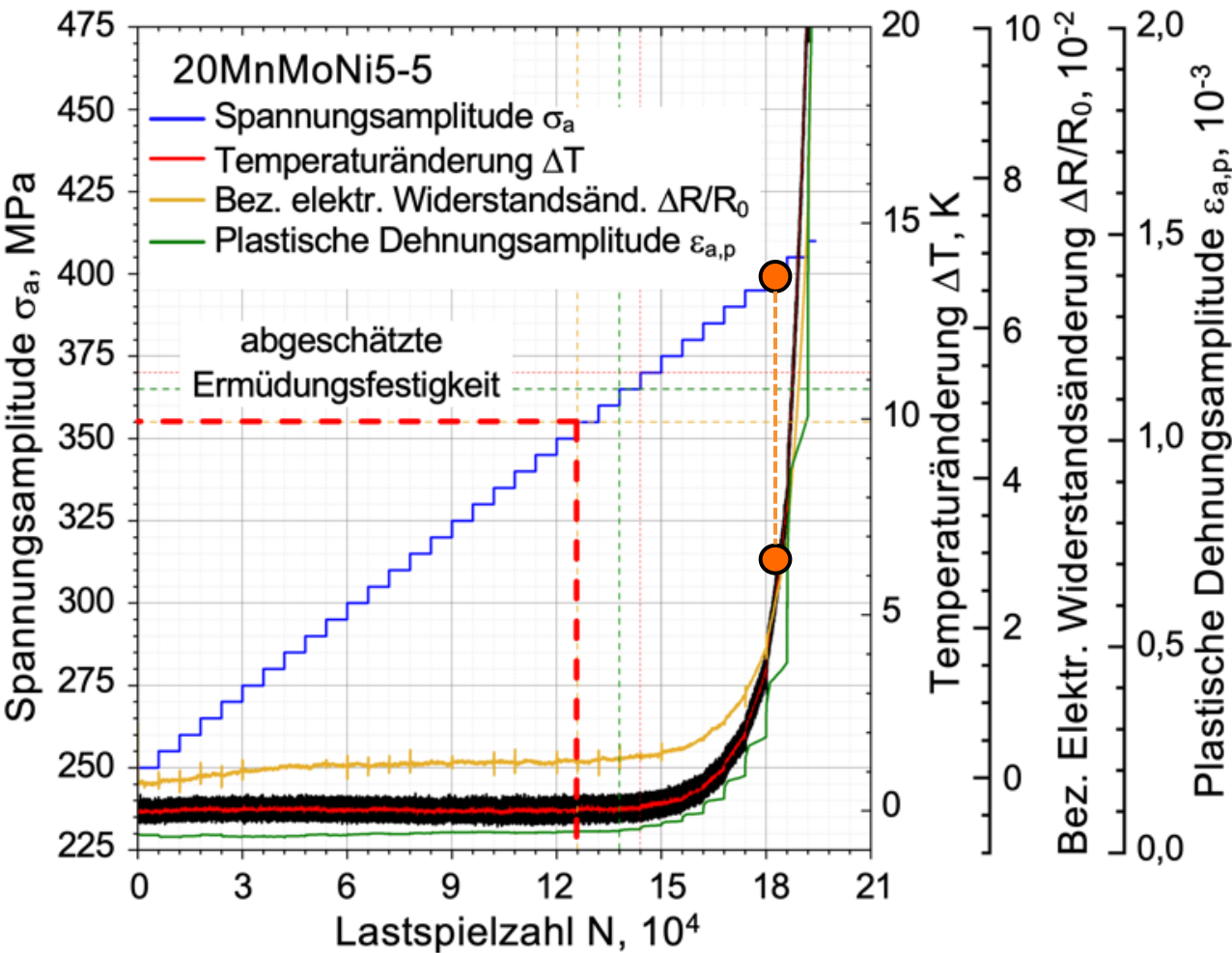




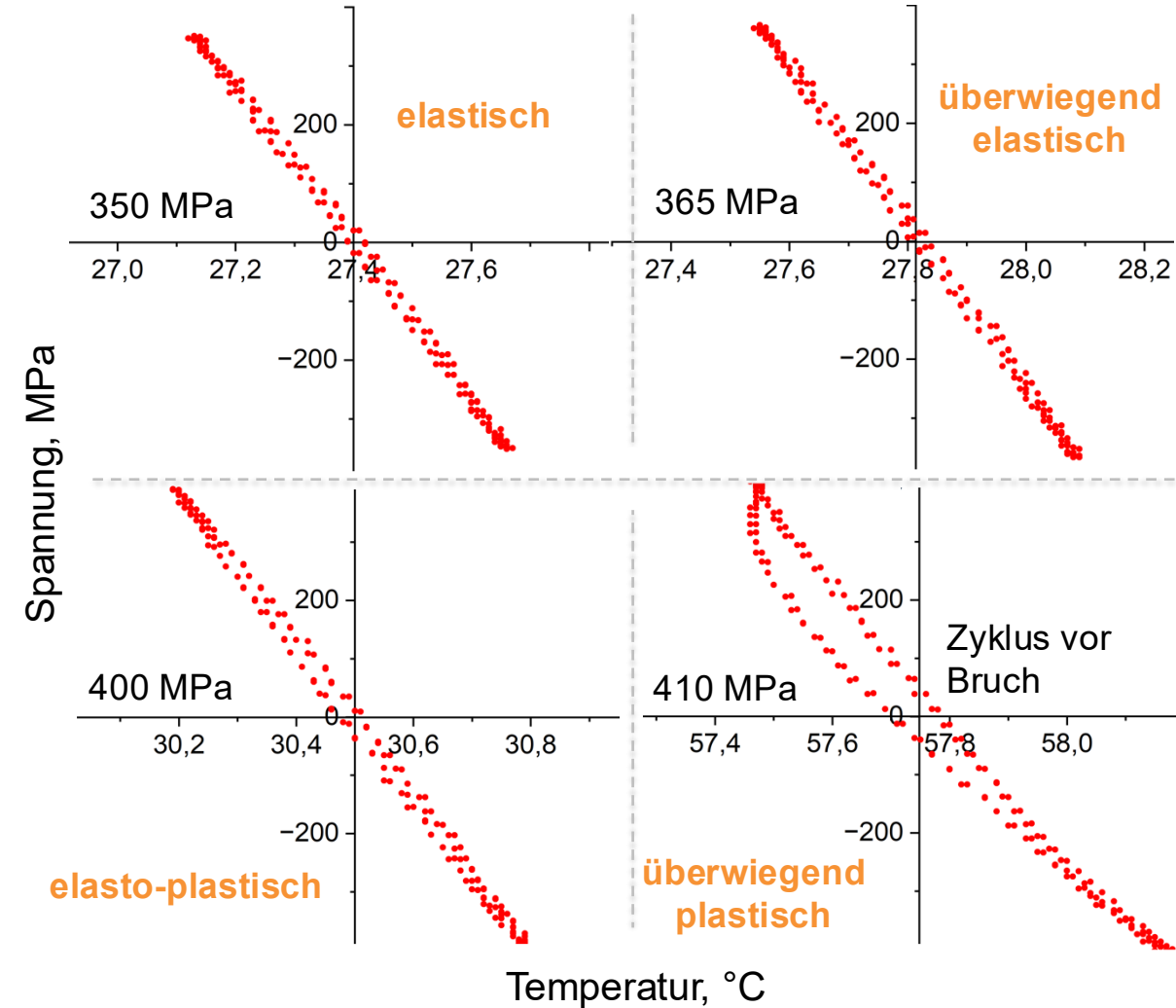
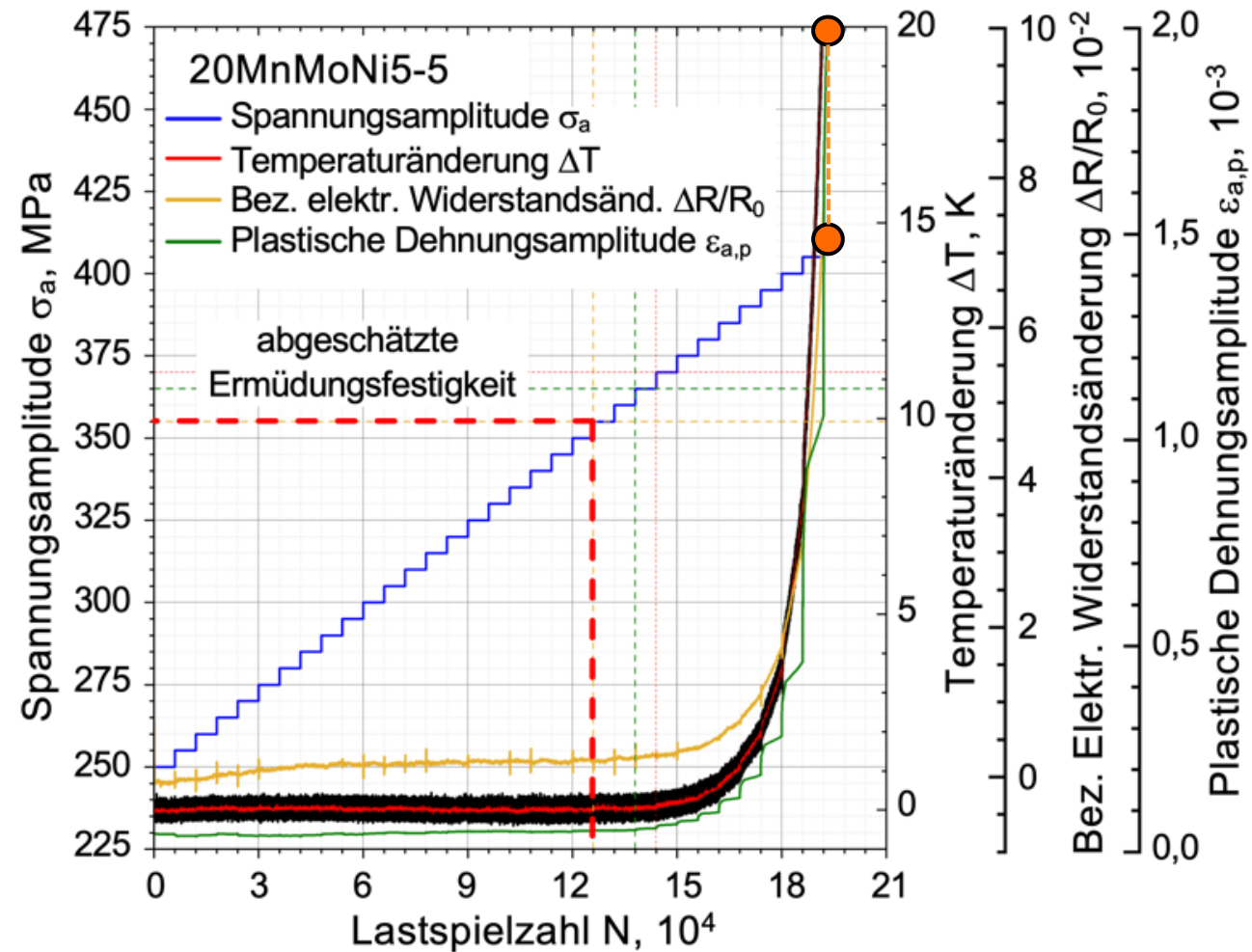
## Spannung-Temperatur-Hysterese



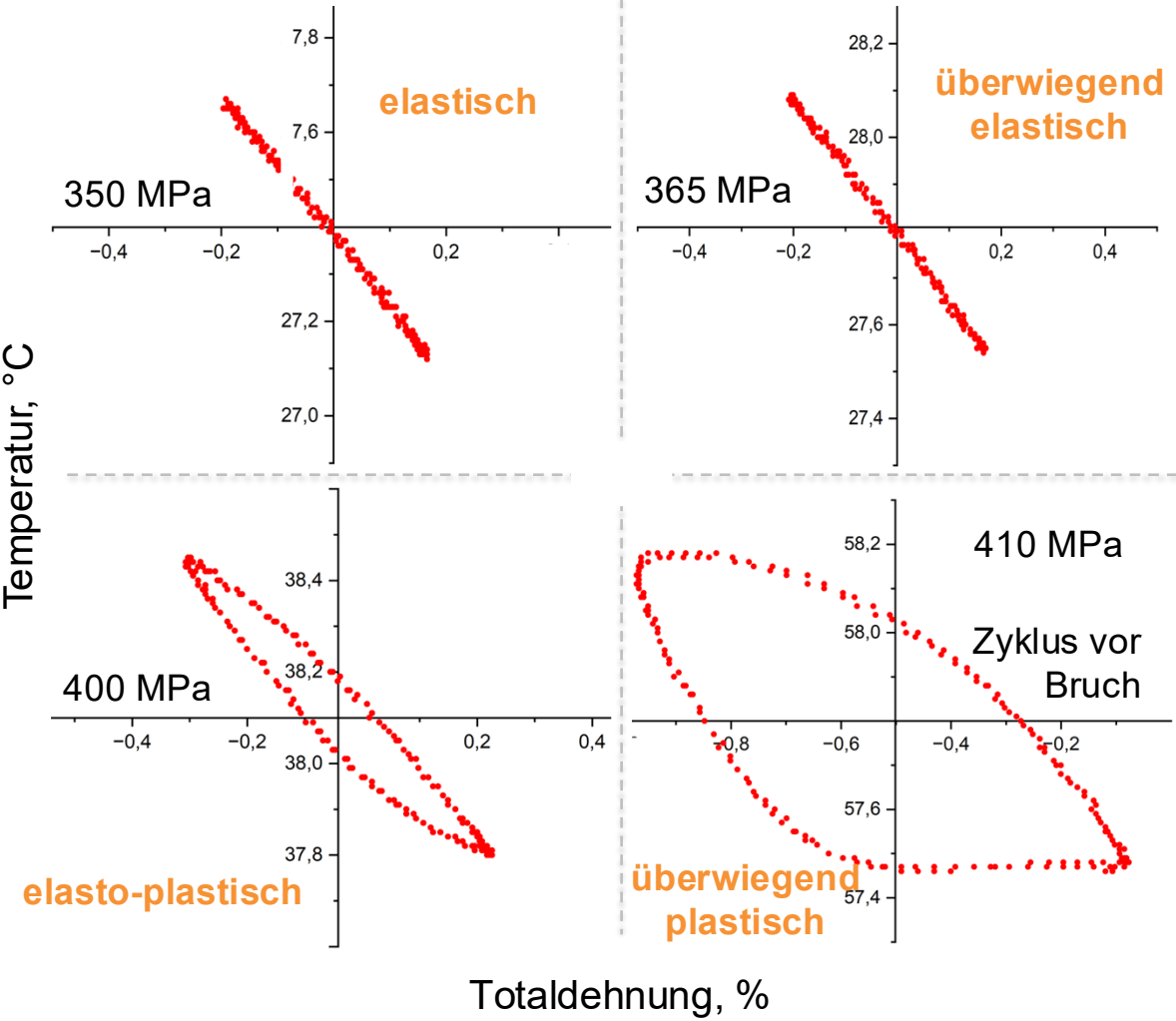
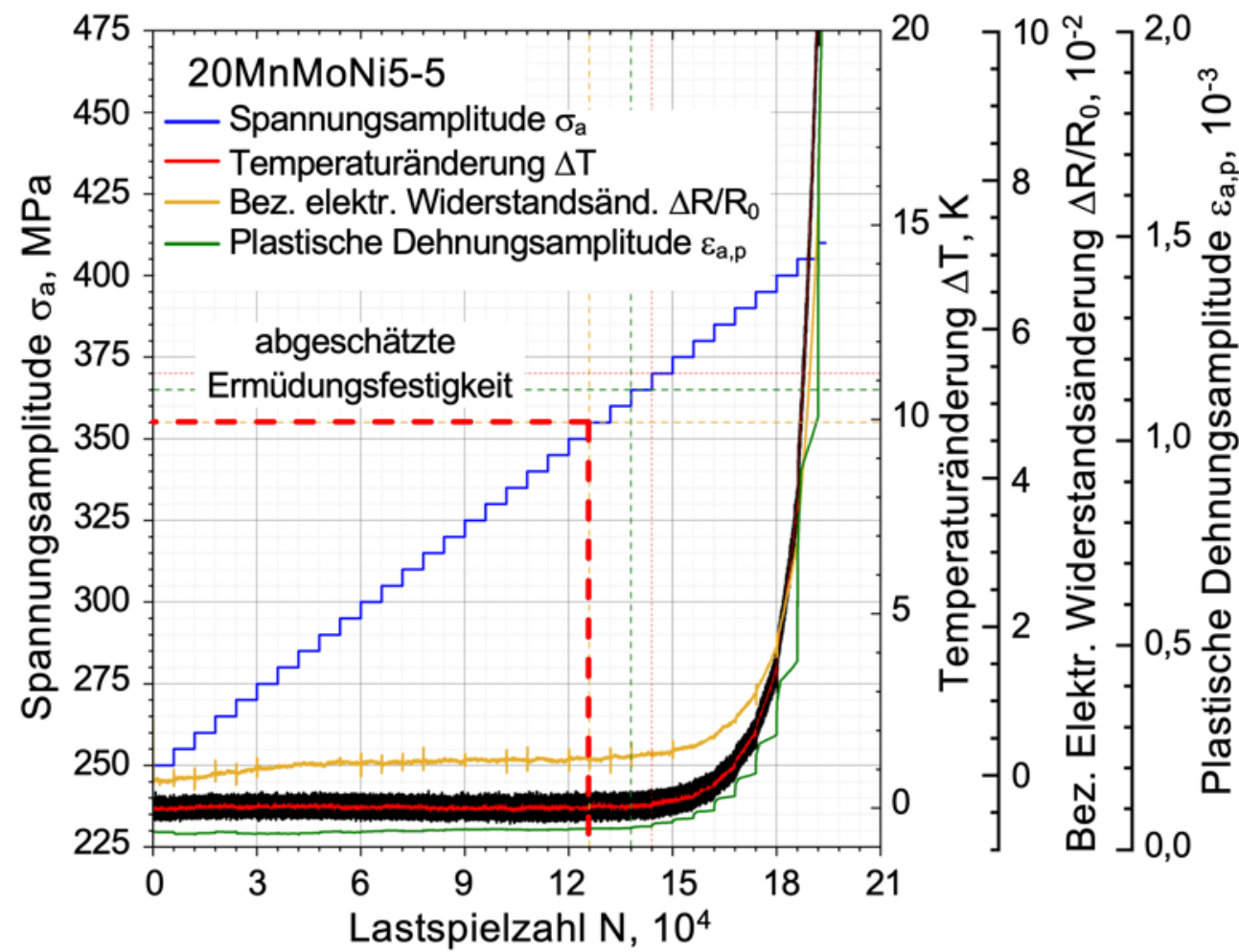
## Spannung-Temperatur-Hysterese



## Spannung-Temperatur-Hysterese

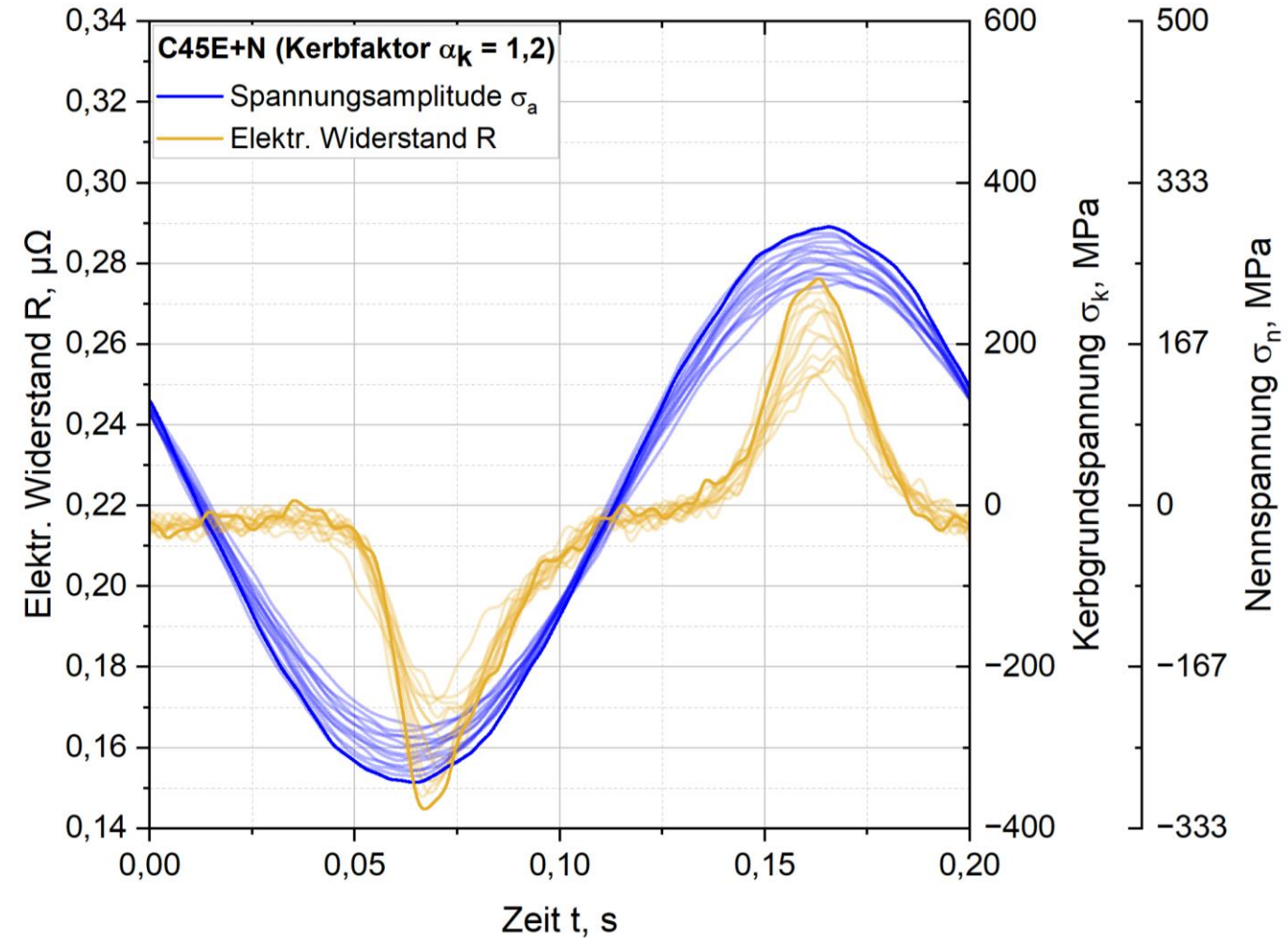
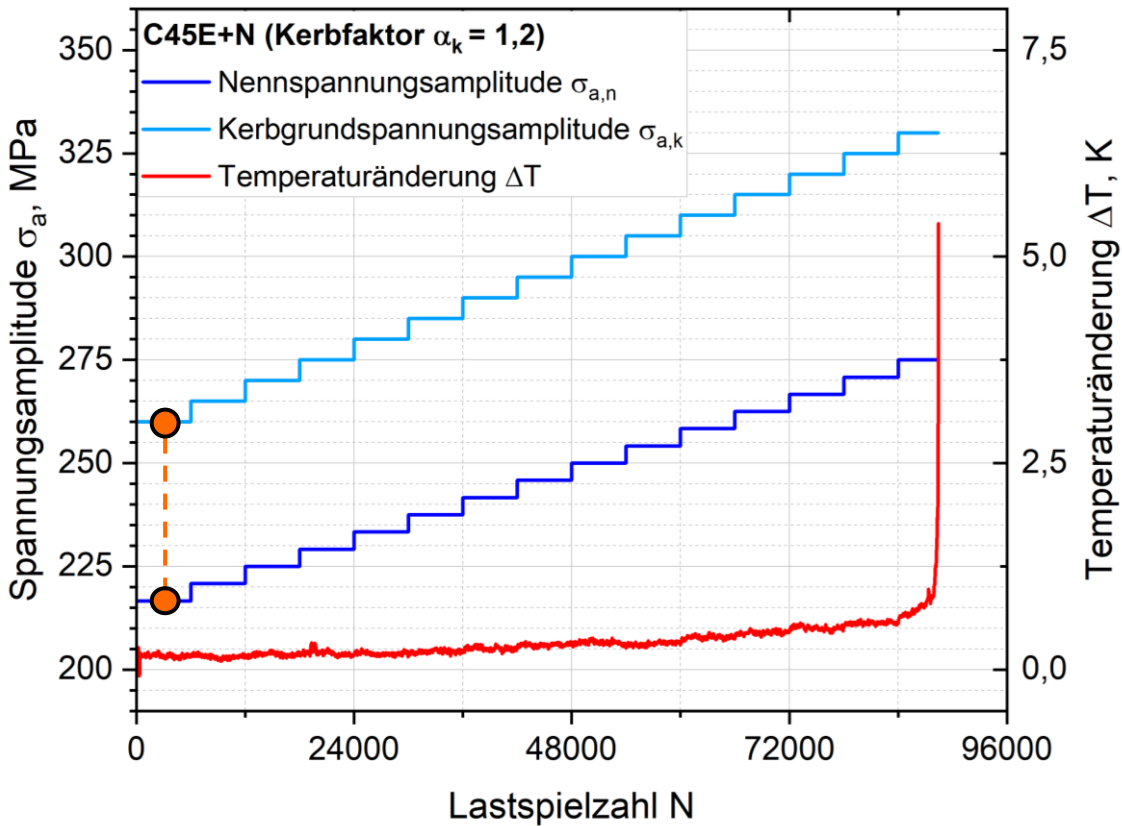


## Temperatur-Dehnung-Hysterese

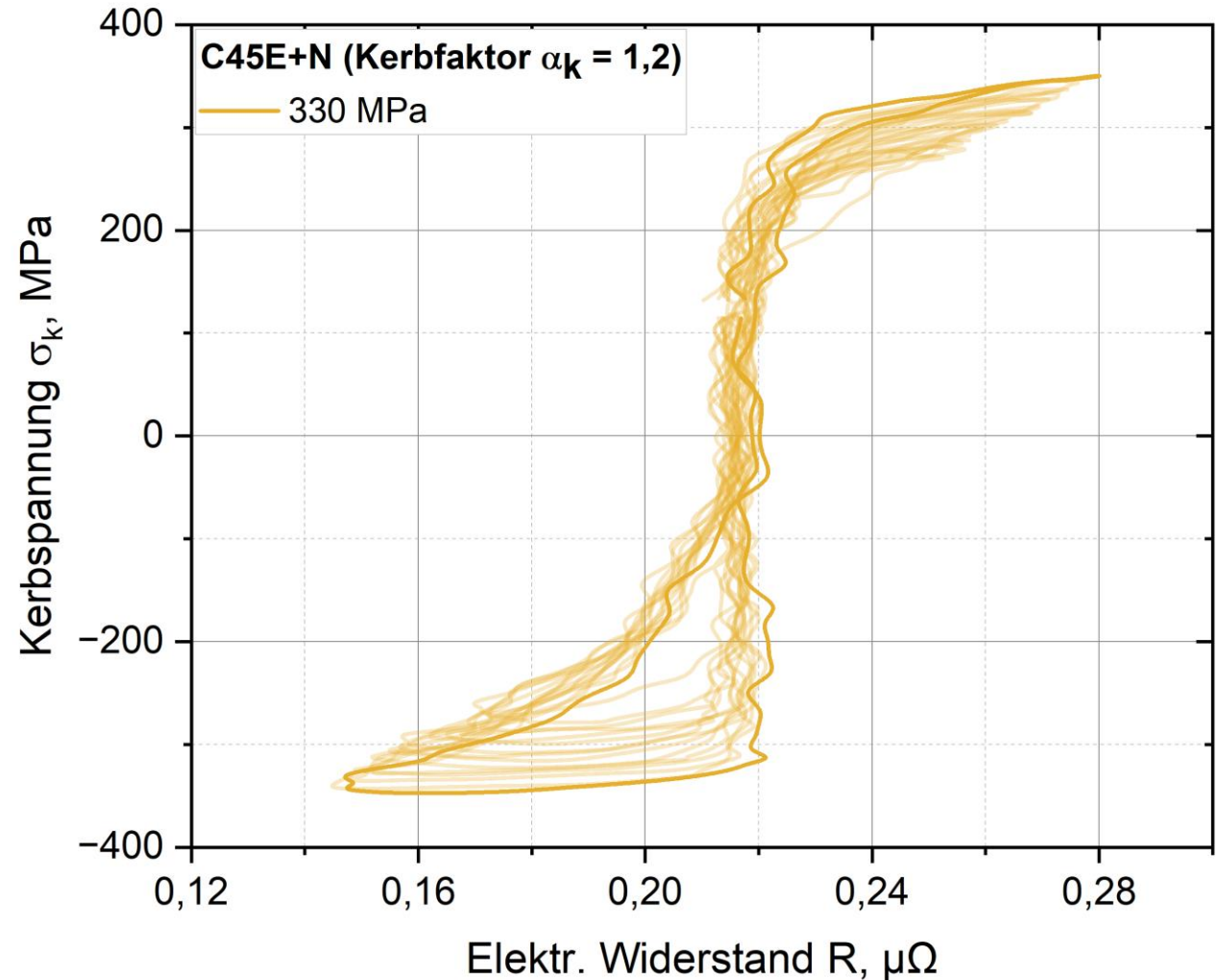
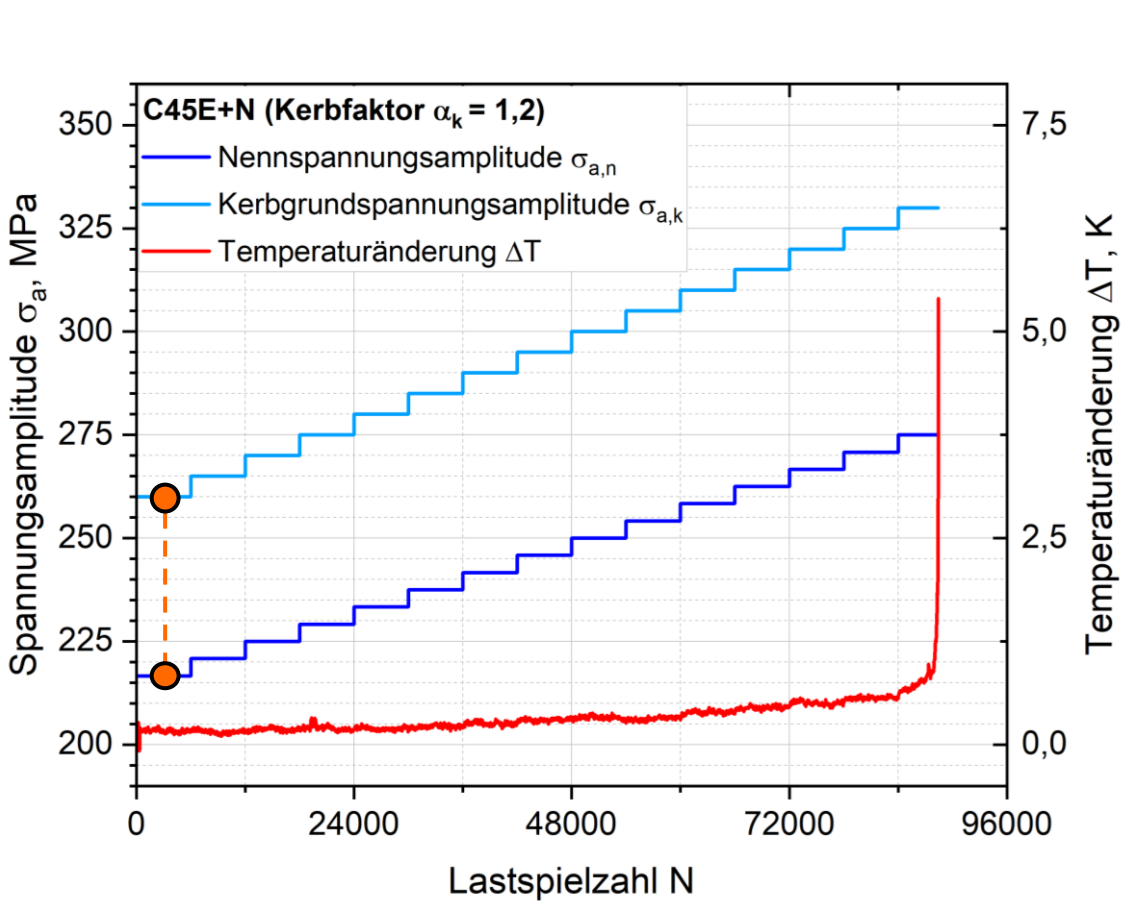




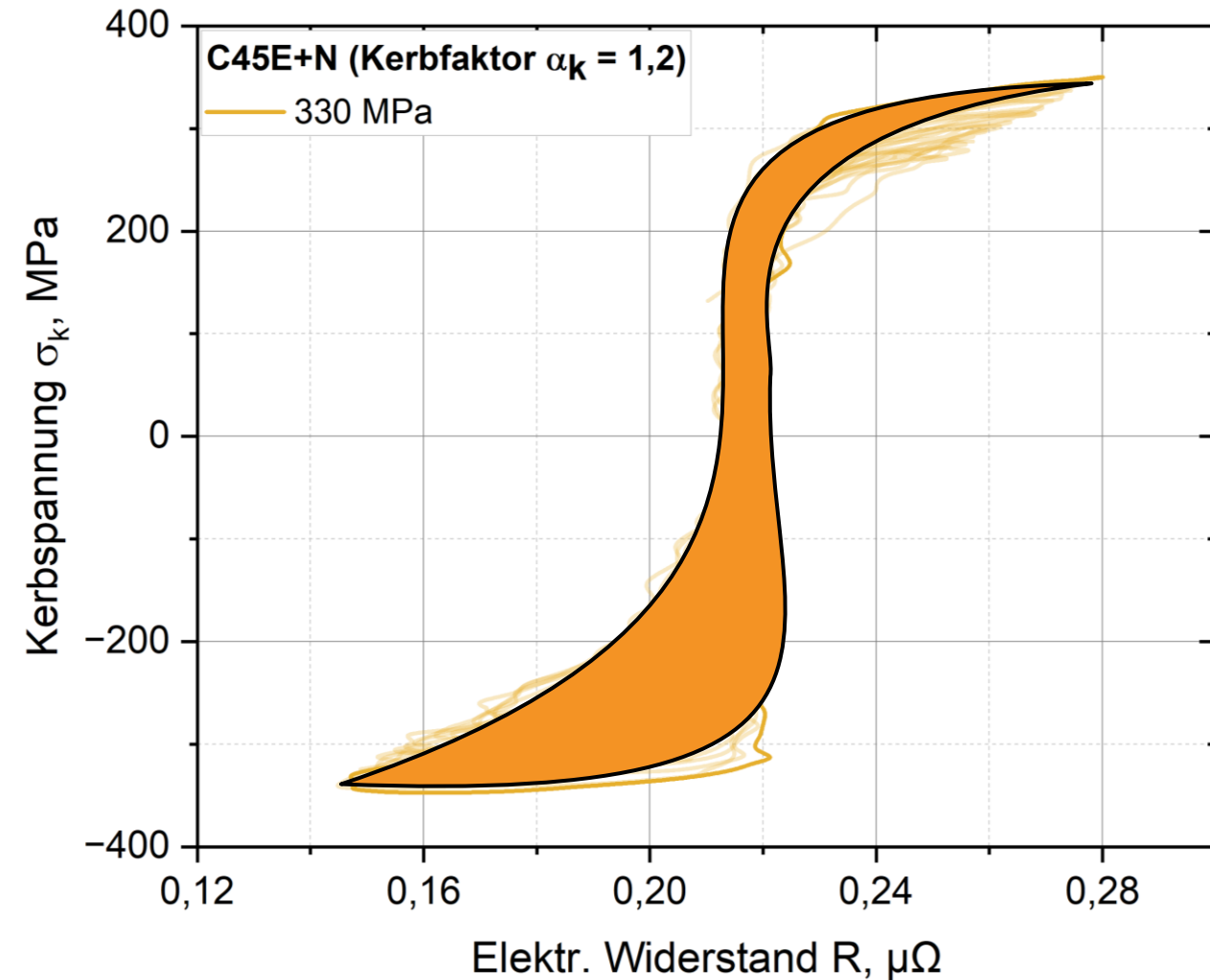
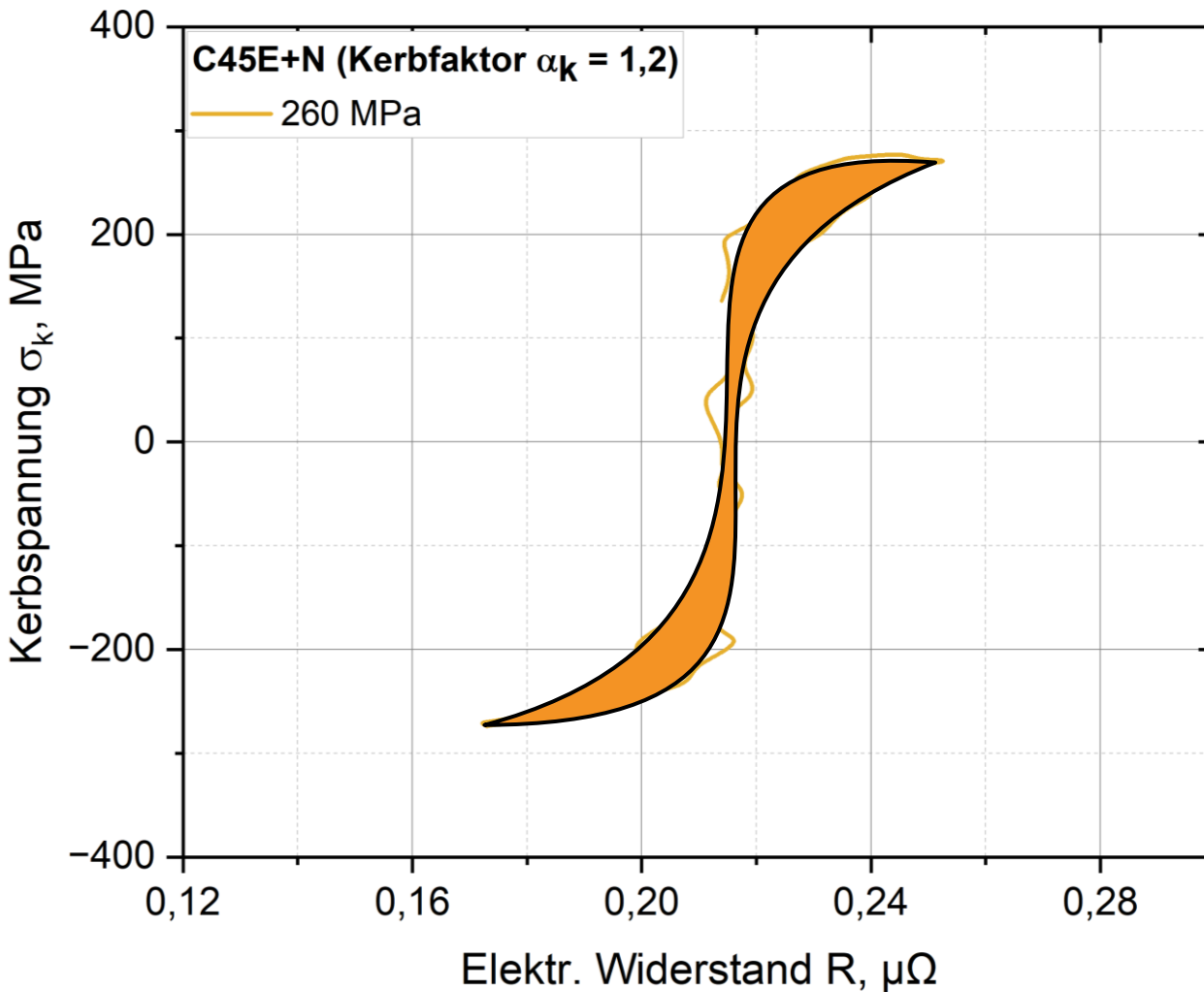
## Hochaufgelöste elektrische Widerstandsmessung



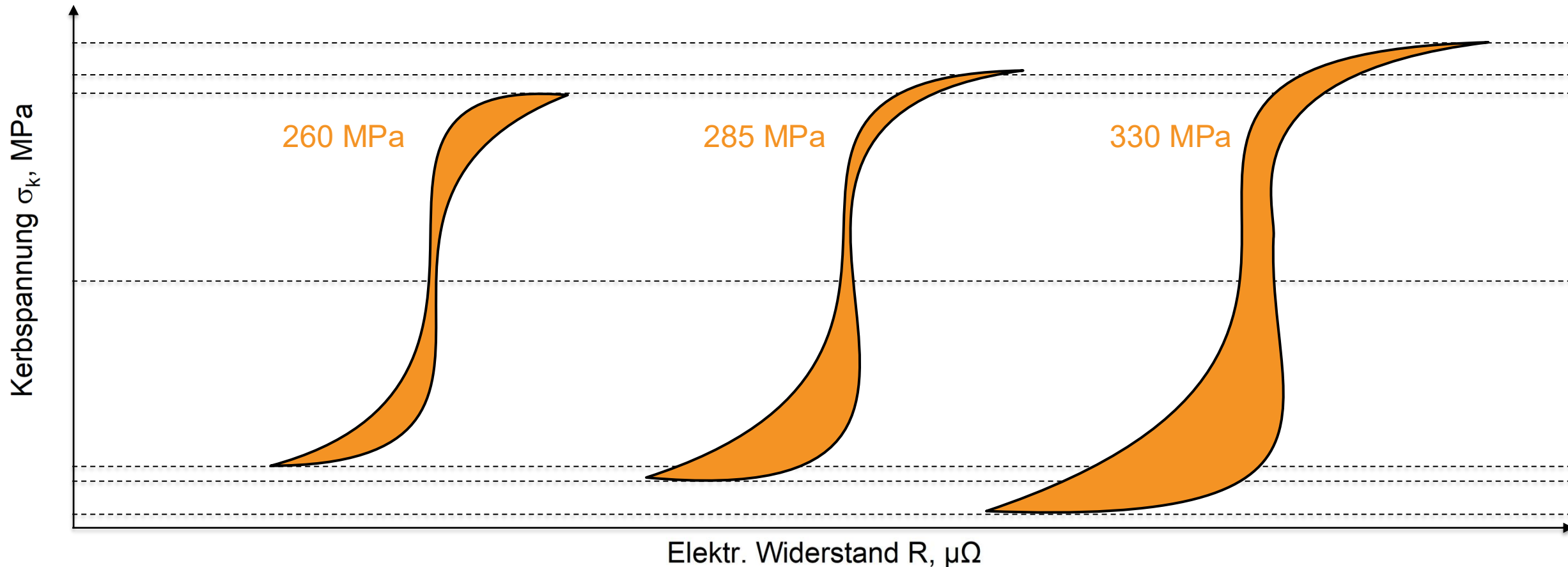
## Spannung-elektrische Widerstand-Hysterese



## Spannung-elektrische Widerstand-Hysterese



## Spannung-elektrische Widerstand-Hysterese



- ▶ ab erster **plast. Verformung zunehmende Asymmetrie** in der Hysterese im Zug- und Druckbereich
- ▶ zunehmende **Hysterese fläche** mit **Schädigungsentwicklung** → Ansatz: Differenz der Flächen



## Schlussfolgerung

- **Hysteresismessungen** ermöglichen eine **multiparametrische** Bewertung des **Ermüdungsverhaltens** metallischer Werkstoffe
- **Thermische** und **elektrische Signaturen** liefern **sensitive Indikatoren** mikrostruktureller Veränderungen
- **Temperaturhysteresen** können **thermoelastische** und **dissipative Effekte** präzise abbilden → insb. relevant in **frühen Schädigungsstadien**
- **Temperaturmessungen** liefern **ortsaufgelöste Werkstoffinformationen** mit hoher Präzision → Ergänzung zu DIC
- Die **kombinierte Auswertung** unterschiedlicher Informationen erhöht die **Genauigkeit** und **Robustheit** der **Ermüdungscharakterisierung**

## Ausblick

- Erweiterung um weitere Messgrößen und **KI-gestützte Auswerteverfahren**
- Einsatz der Hysteresismessung als **diagnostisches Systemelement** sicherheitskritischer Bauteile



## Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

VertProf. Dr.-Ing. Fabian Weber

Fachgebiet Werkstoffkunde & Werkstoffprüfung

Hochschule Kaiserslautern

Fabian.weber@hs-kl.de, [wwwhk@hs-kl.de](http://wwwhk@hs-kl.de)

**Vielen Dank für die finanzielle Unterstützung unserer Forschungsprojekte:**

