

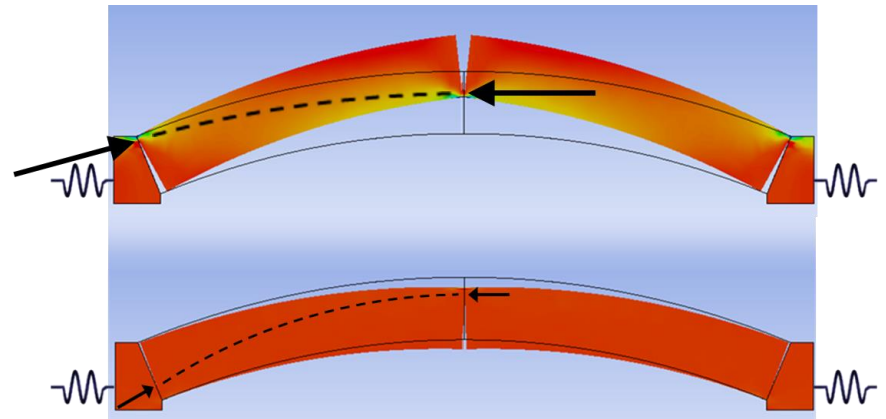
FEUERFEST | 2022

Symposium

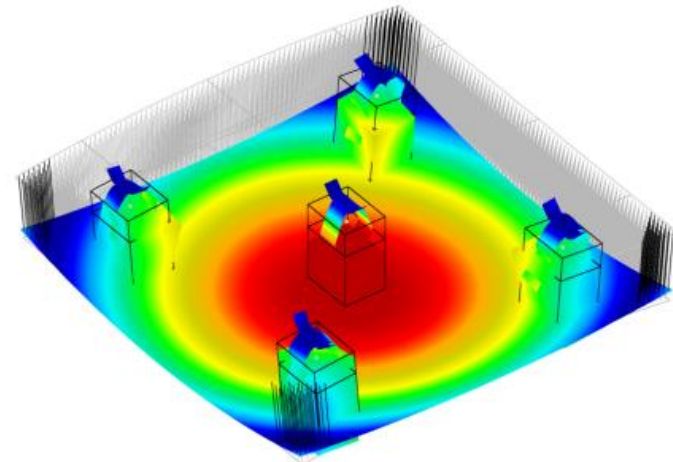
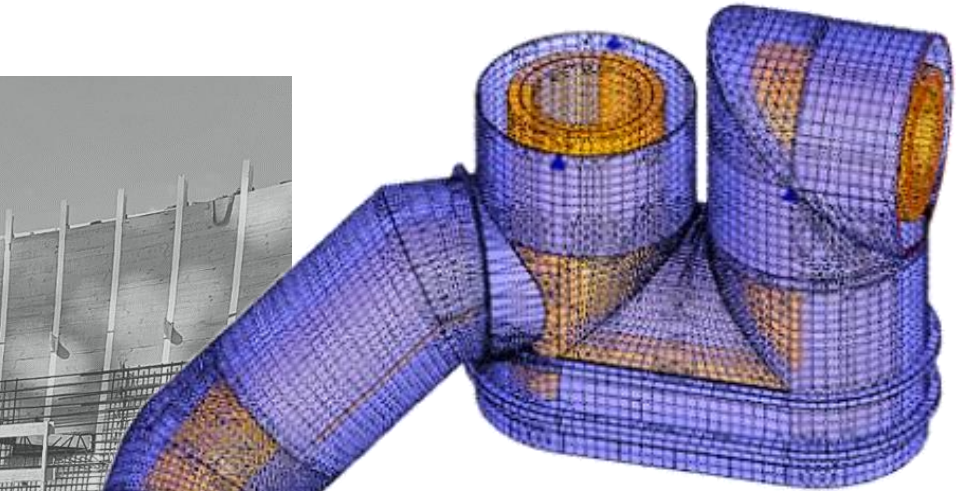
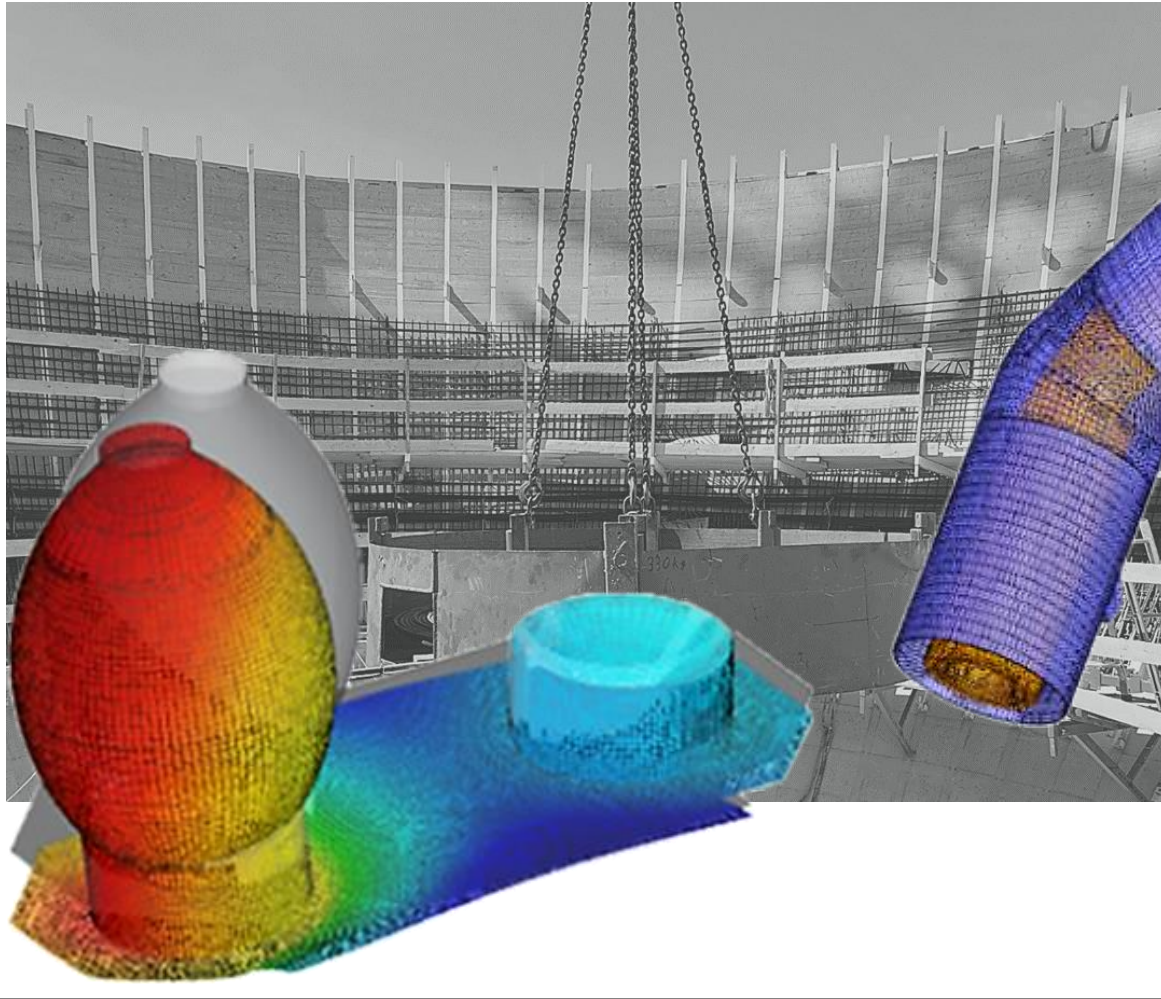
Entwicklung feuerfester Werkstoffe

Holger Leszinski

Der Einfluss mechanischer Werkstoffdaten auf die Spannungen in feuerfesten Auskleidungen



Engineering by Independent Experts



1. Von feuerfesten Lasten und Zwängen
 2. Thermomechanik – Grundprinzipien und Materialparameter
 3. Steifigkeitsparameter: E-Modul? V-Modul? Sekantenmodul?
 4. Gewölbestabilität
 5. Spannungen zylindrischer Konstruktionen
 6. Verhaltensmerkmale rückverankerter ebener Platten
 7. Zusammenfassung
-

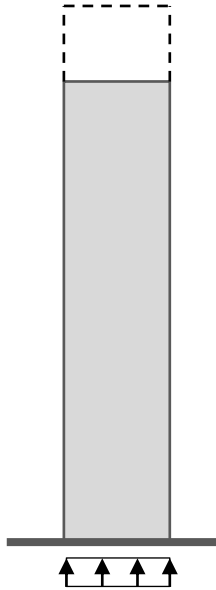
freie Ausdehnung

vollständige Behinderung

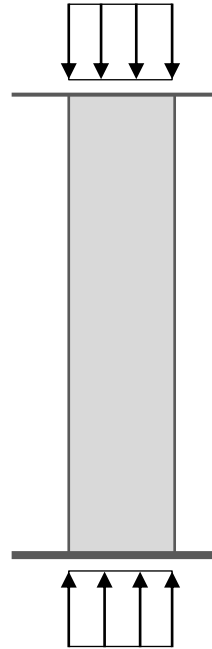
partielle Behinderung

$h = 1,0 \text{ m}$
 $b = 1,0 \text{ m}$
 $d = 0,1 \text{ m}$
 $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$
 $\alpha_T = 6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
 $E = 10\,000 \text{ MPa}$

$\Delta T_m = 1\,000 \text{ K}$

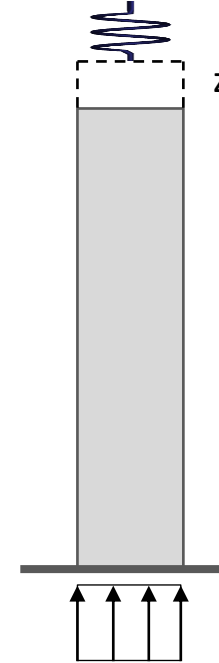


$\sigma_{\text{Last}} = 0,027 \text{ MPa}$



$\sigma_{\text{Zwang}} = 60 \text{ MPa} \sim 2200 \sigma_{\text{Last}}$

$$\sigma_{\text{Zwang}} = \alpha_T \cdot \Delta T_m \cdot E$$



z.B. 50%

$\sigma_{\text{Last}} \ll \sigma_{\text{Zwang}} < 2200 \sigma_{\text{Last}}$

Beispiel: 50% Rückstellung

$\sigma_{\text{Zwang}} = 30 \text{ MPa} \sim 1100 \sigma_{\text{Last}}$

In Öfen liegen vielfach konstruktive Zwangspunkte und damit verbundene partielle Behinderungen vor. Die daraus resultierenden Spannungen – nicht diejenigen infolge Gewichtslasten – sind entscheidend!

1. Von feuerfesten Lasten und Zwängen

instationär

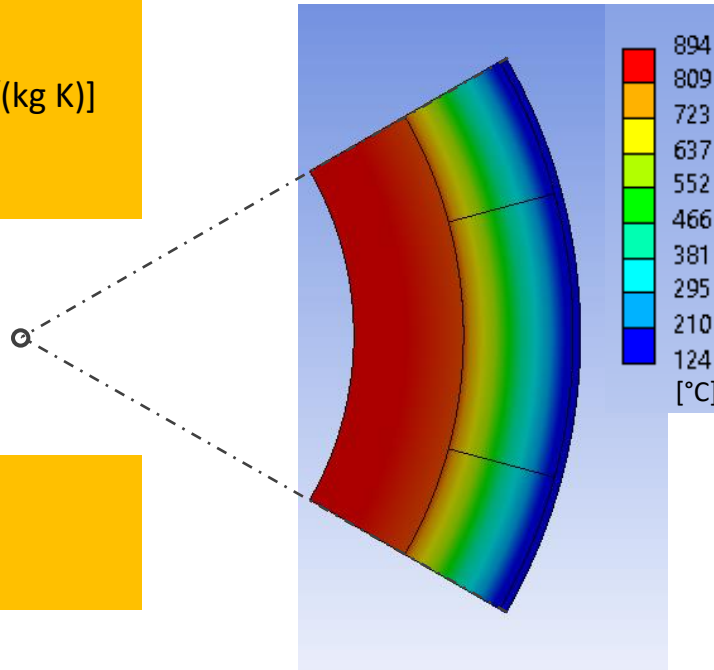
ρ – Dichte [kg/m^3]

c_p – Spezifische Wärmekapazität [$\text{J}/(\text{kg K})$]

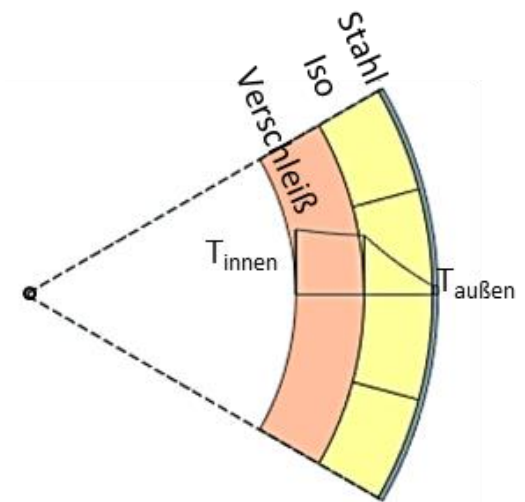
λ – Wärmeleitfähigkeit [$\text{W}/(\text{m K})$]

stationär

λ – Wärmeleitfähigkeit [$\text{W}/(\text{m K})$]



Schichten und ihre Temperaturverteilung

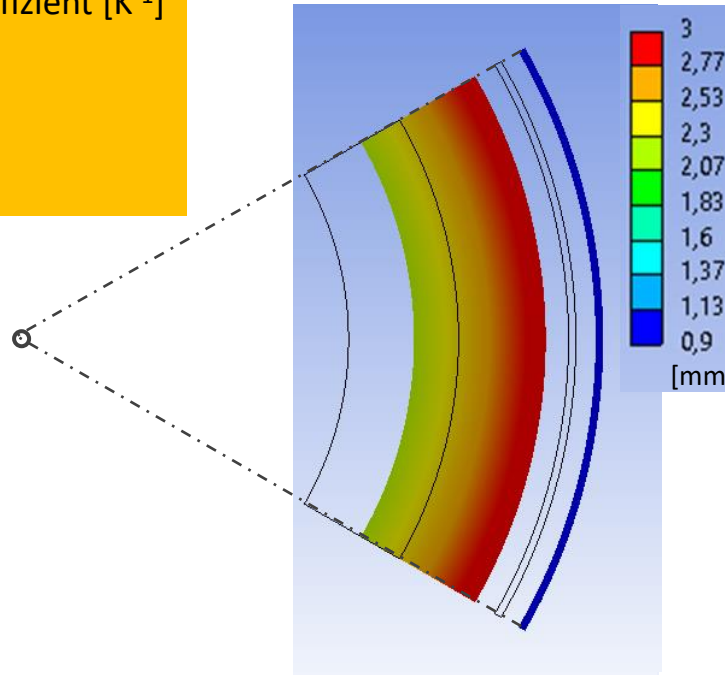
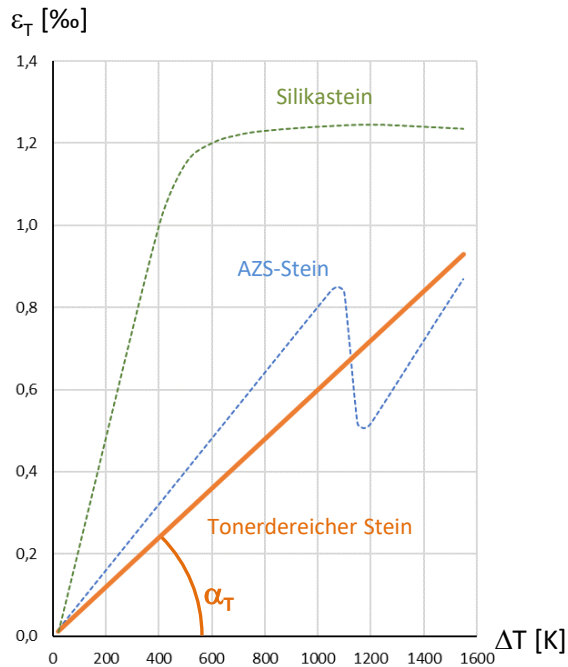


stationär / instationär

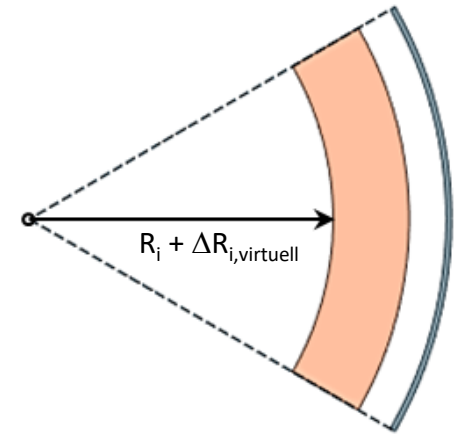
α_T – Thermischer Ausdehnungskoeffizient [K^{-1}]

Virtuelle Radialverschiebungen

$$u_{R,T} = \varepsilon_T * R = \alpha_T * \Delta T * R$$



Virtuelle Radialverschiebungen der Verschleißschicht und des Stahls ohne Widerstände

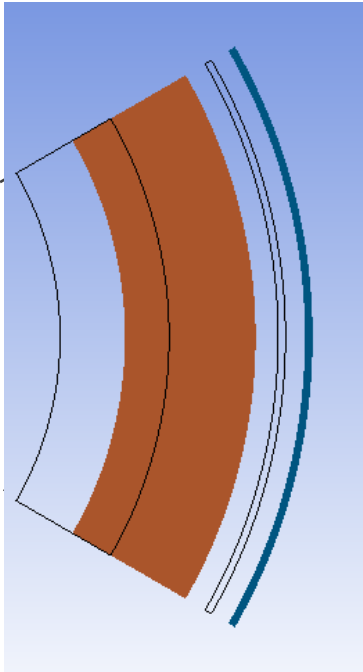


Tatsächlich sind die dargestellten freien Verschiebungen der Verschleißschicht und des Stahlmantels infolge Ausdehnungsdrang nicht möglich, solange sie durch eine oder mehrere weitere Schichten (oder auch Anker!) gekoppelt sind.

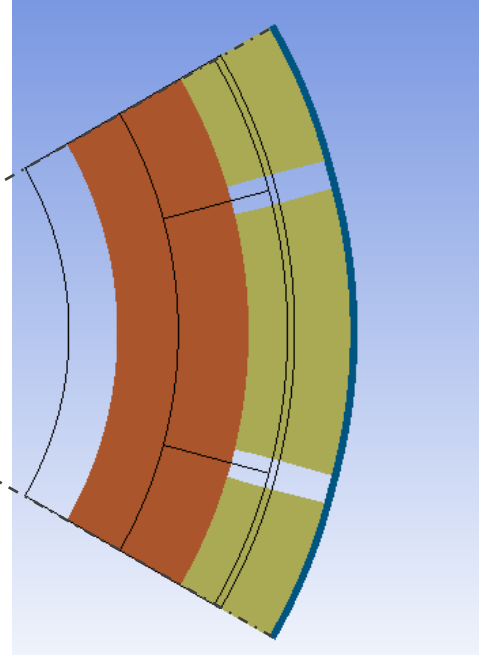
2. Thermomechanik: Grundprinzipien und Materialparameter

Ausdehnungsdrang, virtuelle Radialverschiebungen

VIRTUELL

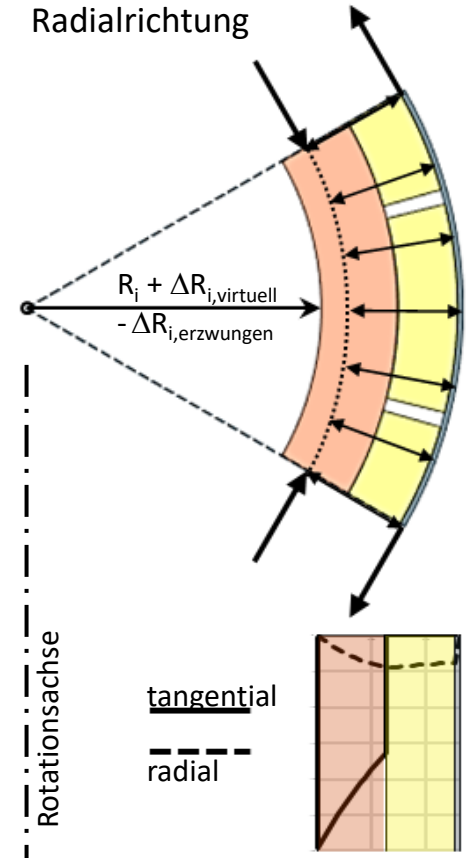


REELL



Verteilung der Ringdruck- und Radialdruckspannungen im Längsschnitt

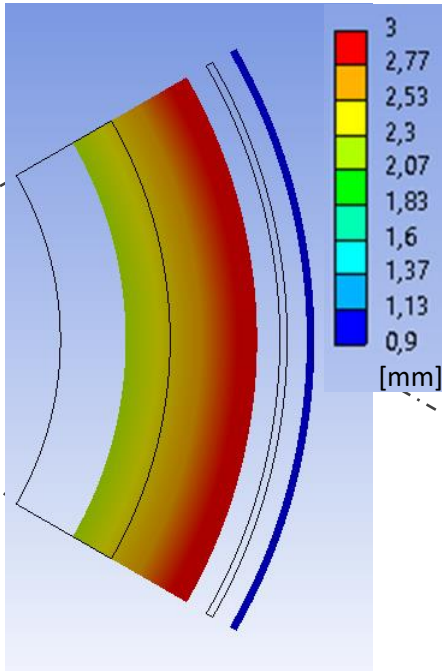
Reelle Verschiebungen und resultierende Kräfte in Ring- und Radialrichtung



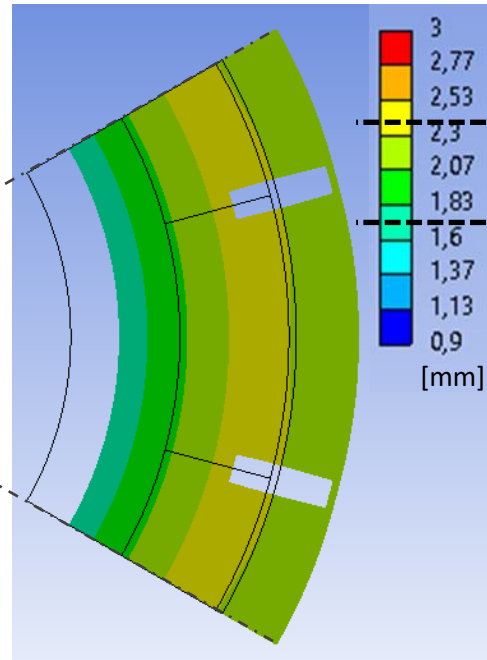
2. Thermomechanik: Grundprinzipien und Materialparameter

Erzwungene Radialverschiebungen und resultierende Kraftflüsse

VIRTUELL

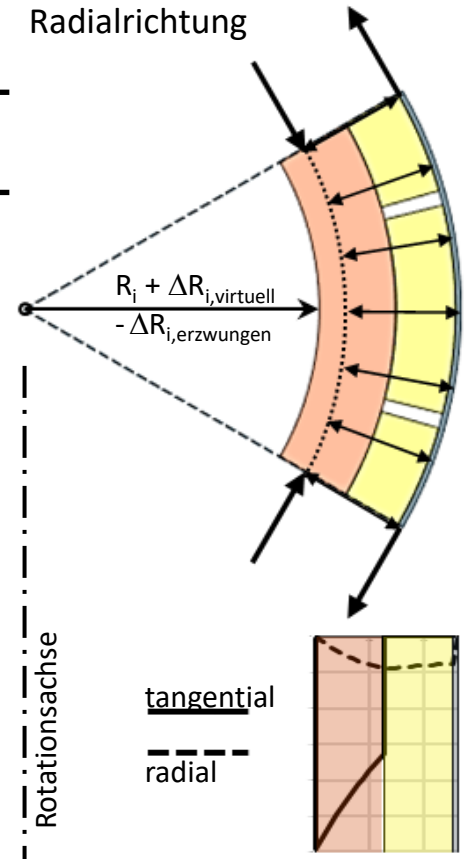


REELL



Verteilung der Ringdruck- und Radialdruckspannungen im Längsschnitt

Reelle Verschiebungen und resultierende Kräfte in Ring- und Radialrichtung



2. Thermomechanik: Grundprinzipien und Materialparameter

Erzwungene Radialverschiebungen und resultierende Kraftflüsse

Gleichgewicht

$$-\sigma_{r0} R_0 + \sigma_{r1} R_1 - 0.5 (R_1 - R_0) (\sigma_{t0} + \sigma_{t1}) = 0$$

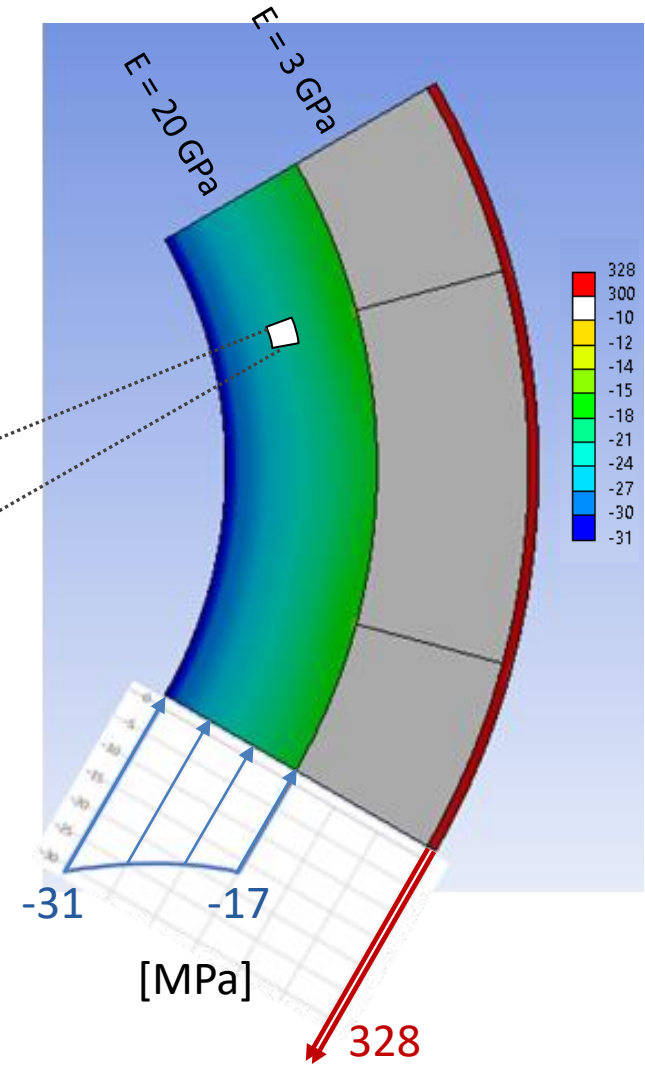
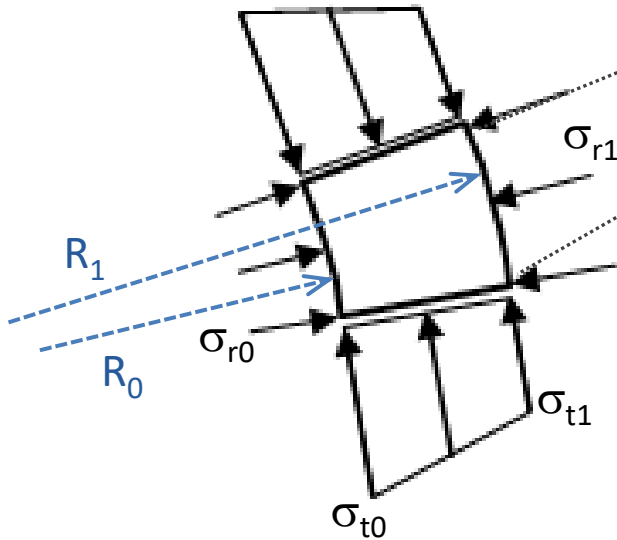
Kompatibilität der Verschiebungen

$$\varepsilon_{t1} R_1 - \varepsilon_{t0} R_0 = 0,5(\varepsilon_{r0} + \varepsilon_{r1})(R_1 - R_0)$$

Materialgesetz

$$\varepsilon_t = \sigma_t / E - \mu \sigma_r / E$$

$$\varepsilon_r = \sigma_r / E - \mu \sigma_t / E$$



2. Thermomechanik: Grundprinzipien und Materialparameter
Erzwungene Spannungen

Gleichgewicht

$$-\sigma_{r0} R_0 + \sigma_{r1} R_1 - 0.5 (R_1 - R_0) (\sigma_{t0} + \sigma_{t1}) = 0$$

Kompatibilität der Verschiebungen

$$\varepsilon_{t1} R_1 - \varepsilon_{t0} R_0 = 0,5(\varepsilon_{r0} + \varepsilon_{r1})(R_1 - R_0)$$

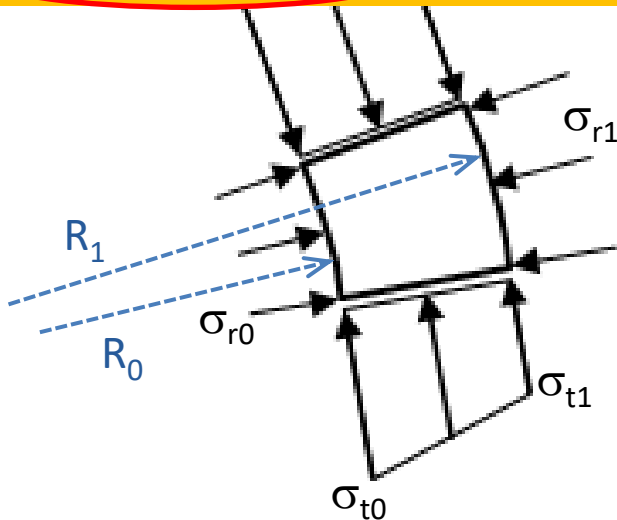
Materialgesetz

$$\varepsilon_t = \sigma_t / E - \mu \sigma_r / E$$

$$\varepsilon_r = \sigma_r / E - \mu \sigma_t / E$$

$$\Delta R_{i,virtuell} = \alpha_{T,i} \Delta T_i R_i$$

$$\Delta R_{i,erzwungen} = -\varepsilon_{t,i} R_i$$



Spannungsrelevant:

Rand-/Kontaktbedingungen (z.B. Fugen)

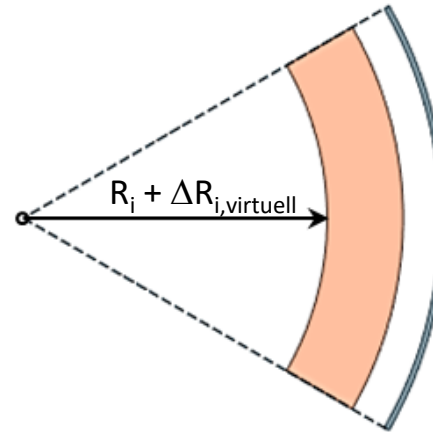
Temperaturänderung ΔT [K]

Ausdehnungskoeffizient α_T [K^{-1}]

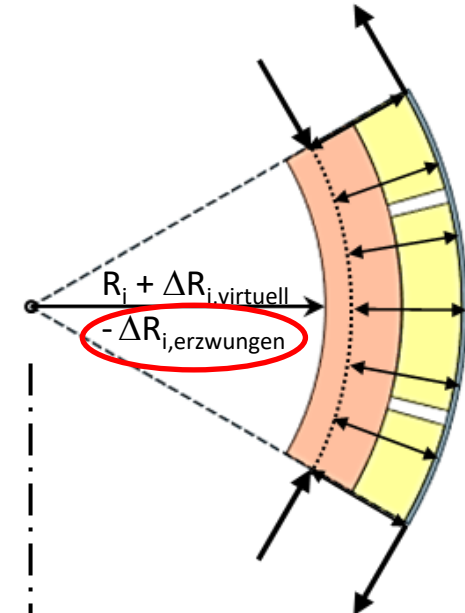
Steifigkeitsparameter E [MPa]

Querkontraktionszahl μ [-]

Virtuelle
Radialverschiebungen



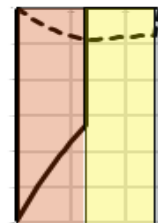
Reelle Verschiebungen und
resultierende Kräfte



Rotationsachse

tangential

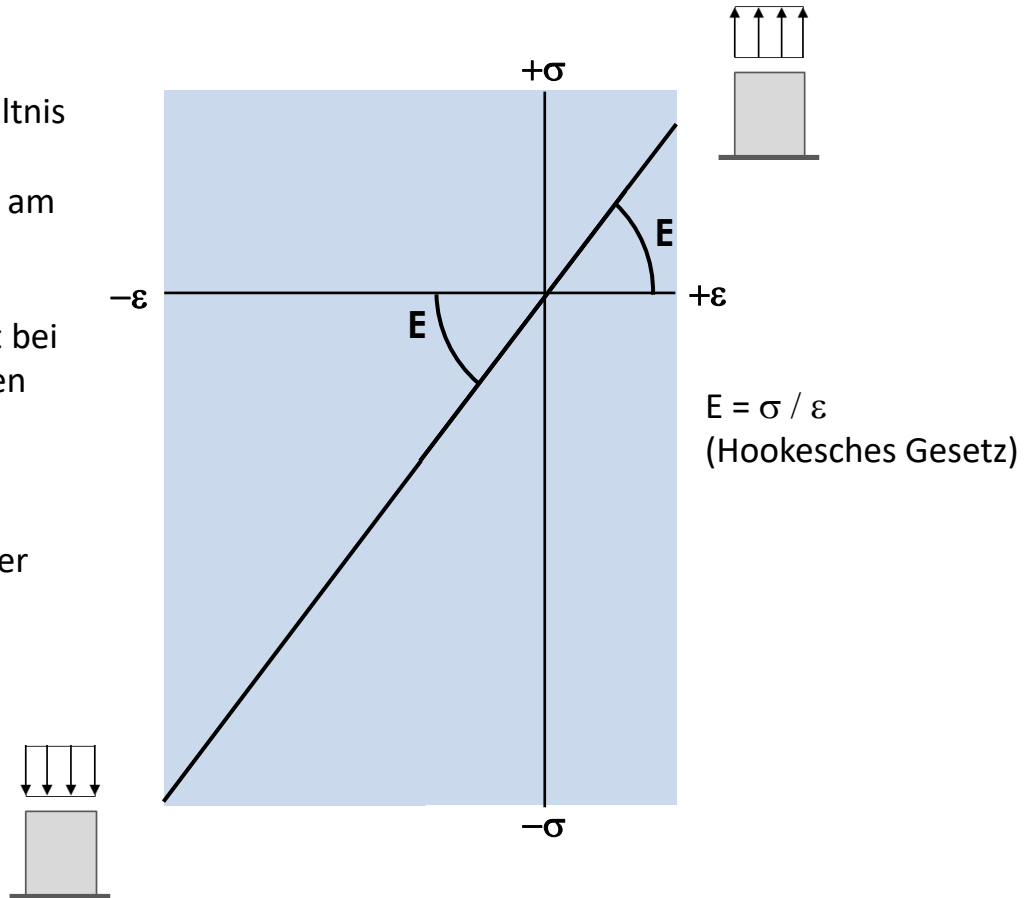
radial



Schichtspannungsverteilung

2. Thermomechanik: Grundprinzipien und Materialparameter
Erzwungene Spannungen

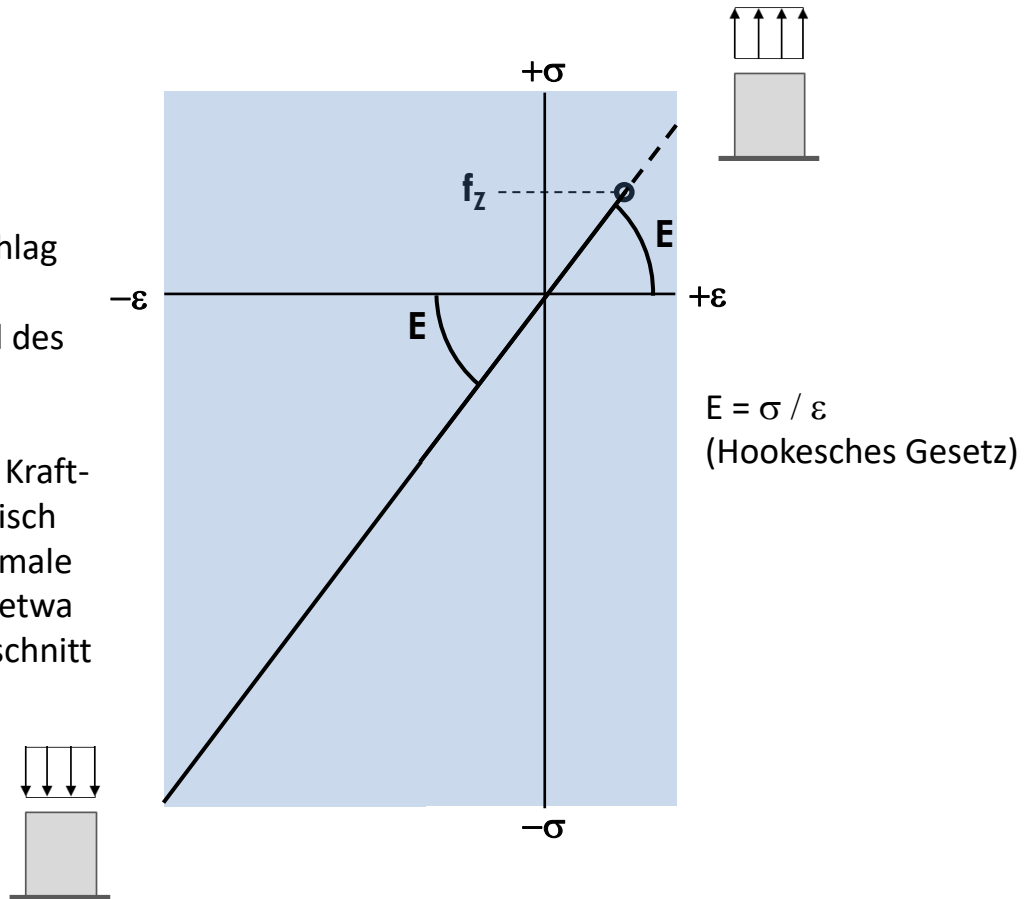
Der Elastizitätsmodul E gibt das initiale Verhältnis der Spannung zur Dehnung des Werkstoffs wieder und kann für relevante Temperaturen am einfachsten dynamisch bestimmt werden. Typische Verhaltensmerkmale feuerfester Materialien (Bruch-, Rissspannung, Plastizität bei hohen Temperaturen) können im dynamischen Versuch jedoch nicht erfasst werden. Zur Erzielung wirklichkeitsnaher Rechenergebnisse hoch druckbeanspruchter Bauteile eignen sich die Messwerte daher eher nicht.



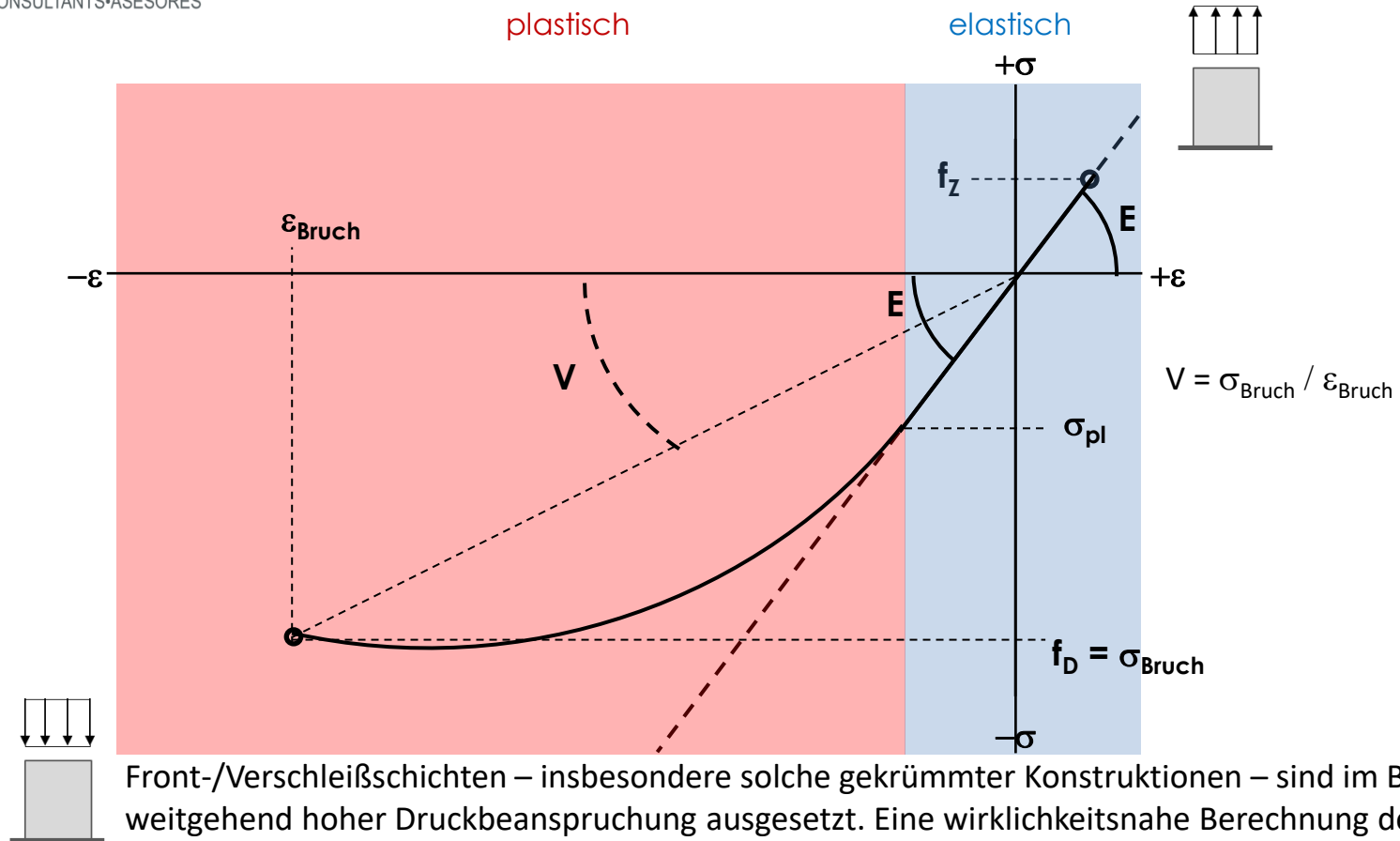
- 3. Steifigkeitsparameter: E-Modul? V-Modul? Sekantenmodul?**
Elastizität sowohl unter Druck als auch unter Zug

Die Heißbiegefestigkeit wird mittels 3-Punkt-Biegeversuch bestimmt. Bei den meisten feuerfesten Werkstoffen dürfte Versagen der gezogenen Seite, also Rissbildung, den Ausschlag geben, so dass sie als Biegezugfestigkeit interpretiert werden kann. Der gedrückte Teil des Probekörpers dürfte sich bis zum Versagen weitgehend elastisch verhalten.

Zusammen mit beim Versuch durchgeführter Kraft-Verformungs-Aufzeichnung oder dem dynamisch ermittelten E-Modul können Verhaltensmerkmale (zeitweise) biegebeanspruchter Bauteile wie etwa rückverankerte Feuerbetonplatten (siehe Abschnitt 6.) adäquat berechnet werden.



- 3. Steifigkeitsparameter: E-Modul? V-Modul? Sekantenmodul?**
Elastizität sowohl unter Druck als auch unter Zug, Zugversagen

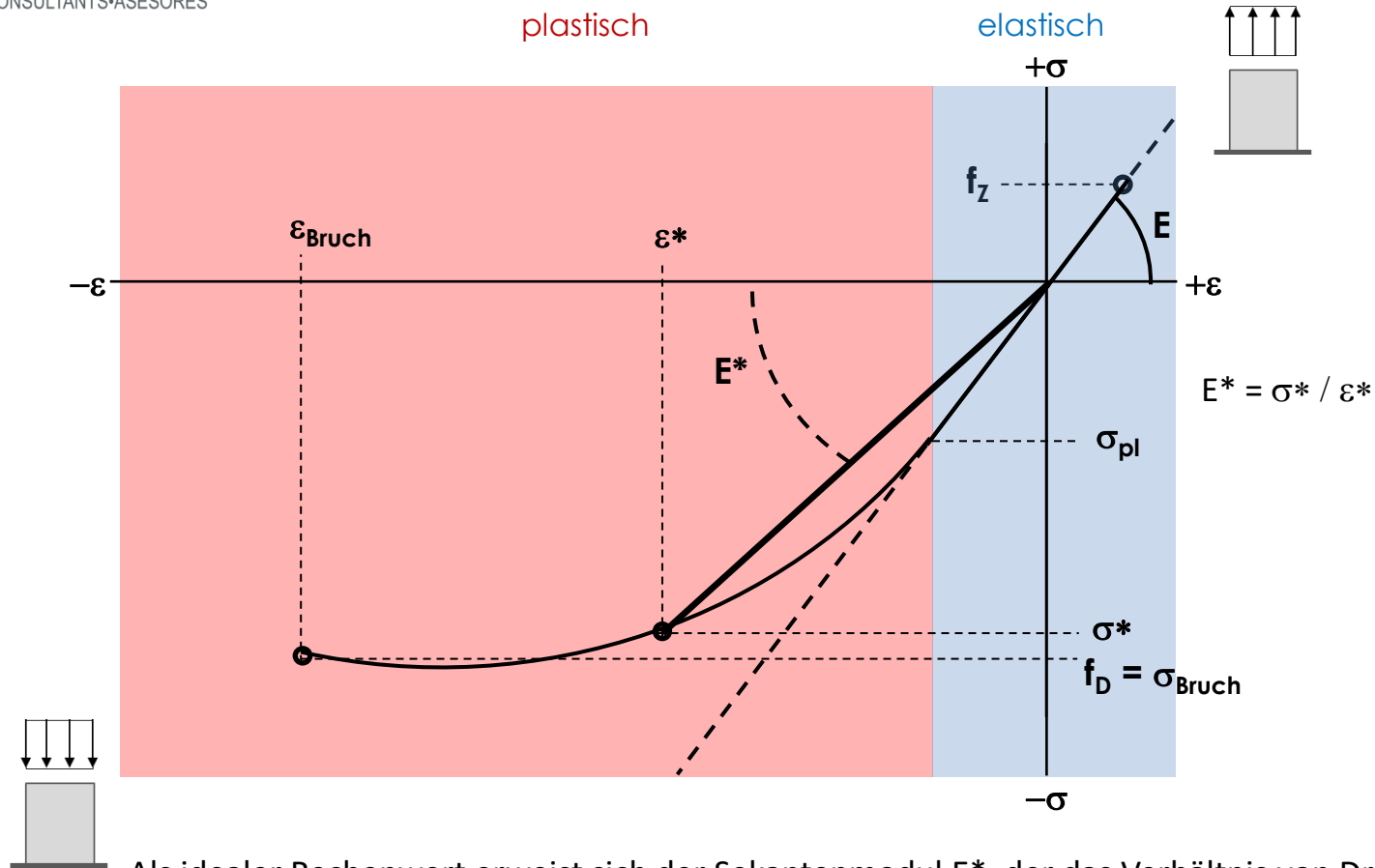


Front-/Verschleißschichten – insbesondere solche gekrümmter Konstruktionen – sind im Betrieb weitgehend hoher Druckbeanspruchung ausgesetzt. Eine wirklichkeitsnahe Berechnung der Verhaltensmerkmale erfordert daher entsprechende Druckspannungs-Stauchungs-Daten aus aufwändigen Heißdruckversuchen.

Der Verformungsmodul V , der das Verhältnis von Bruchspannung zu Bruchstauchung wiedergibt, eignet sich als Steifigkeitsparameter nicht, da er zu weiches Materialverhalten unter allen Druckspannungsgrößen „vorgaukelt“.

3. Steifigkeitsparameter: E-Modul? V-Modul? Sekantenmodul?

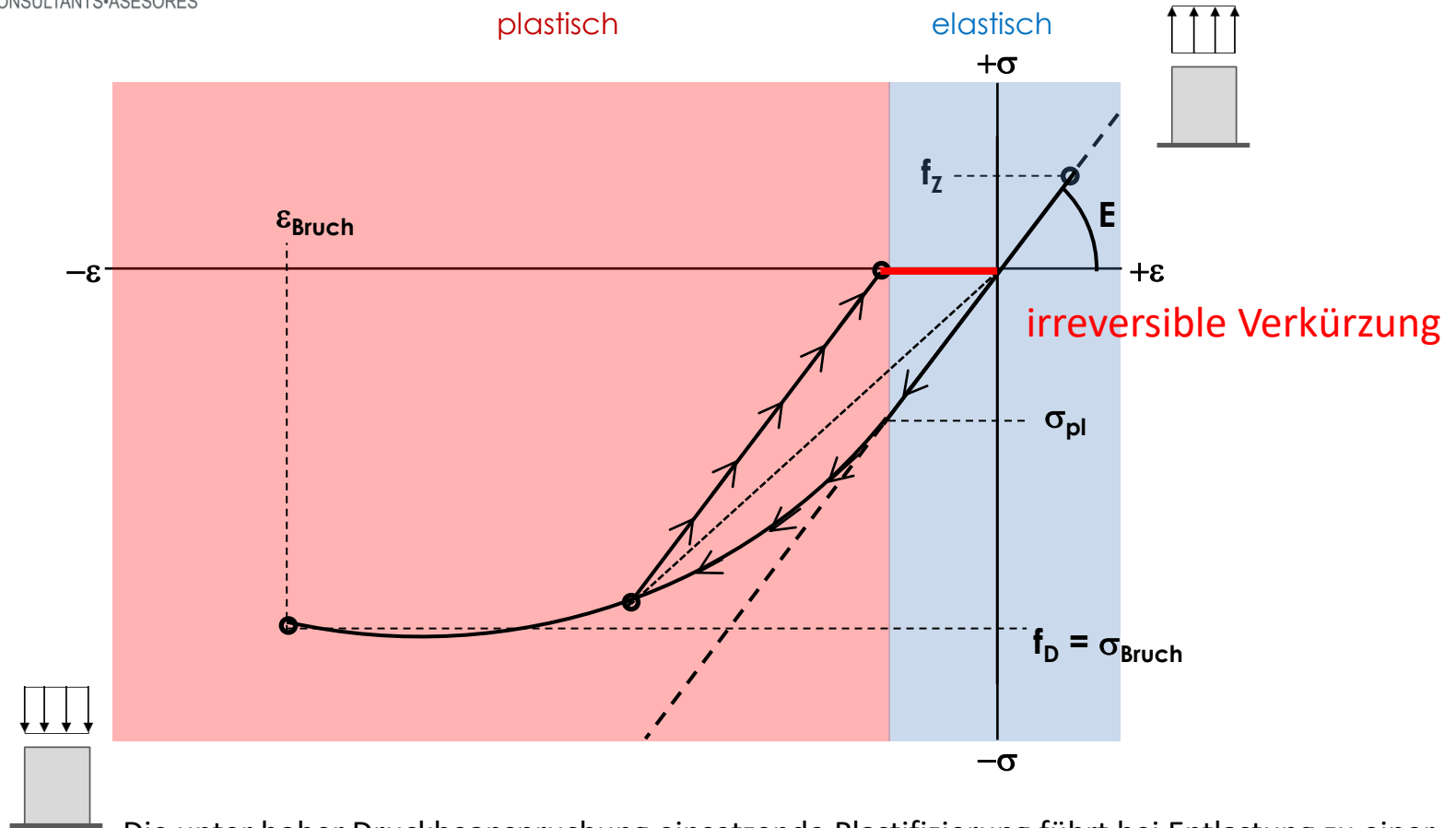
Elastisch-plastisches Verhalten unter Druck



Als idealer Rechenwert erweist sich der Sekantenmodul E^* , der das Verhältnis von Druckspannung zu Stauchung ausgehend von beliebigen Punkten der Kurve zum Ursprung des Koordinatensystems beschreibt. Er gibt die Steifigkeit des Materials unter allen Beanspruchungsgrößen sehr genau wieder.

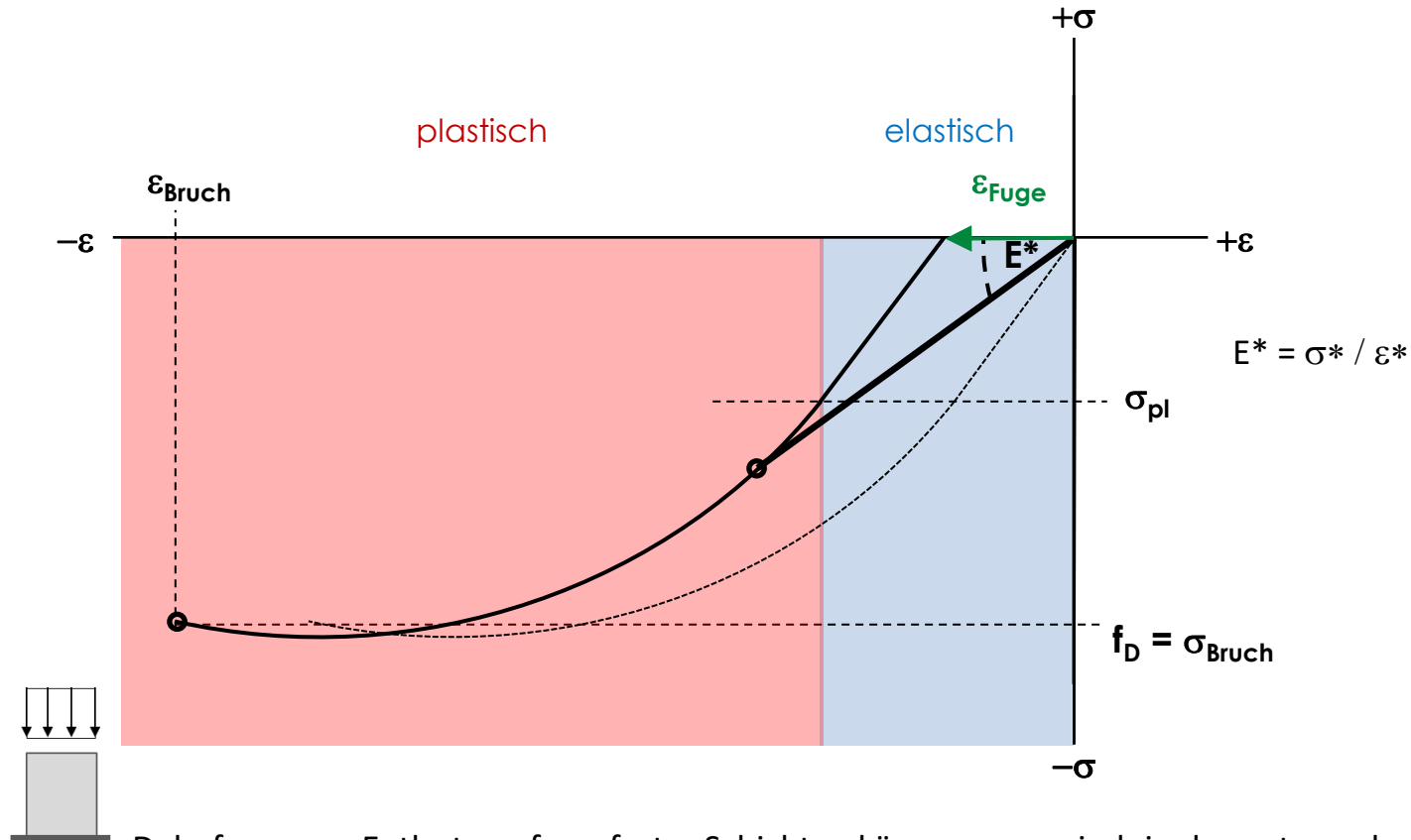
3. Steifigkeitsparameter: E-Modul? V-Modul? Sekantenmodul?

Elastisch-plastisches Verhalten unter Druck



Die unter hoher Druckbeanspruchung einsetzende Plastifizierung führt bei Entlastung zu einer bleibenden Verkürzung des Materials. Dies kann beispielsweise häufig am Absenken abgekühlter Gewölbekonstruktionen beobachtet werden (siehe Abschnitt 4.). Bei zylindrischen Zustellungen geht dieser Entspannungszustand oftmals mit ungewollter Fugenöffnung oder Rissbildung einher.

3. Steifigkeitsparameter: E-Modul? V-Modul? Sekantenmodul? Elastisch-plastisches Verhalten unter Druck

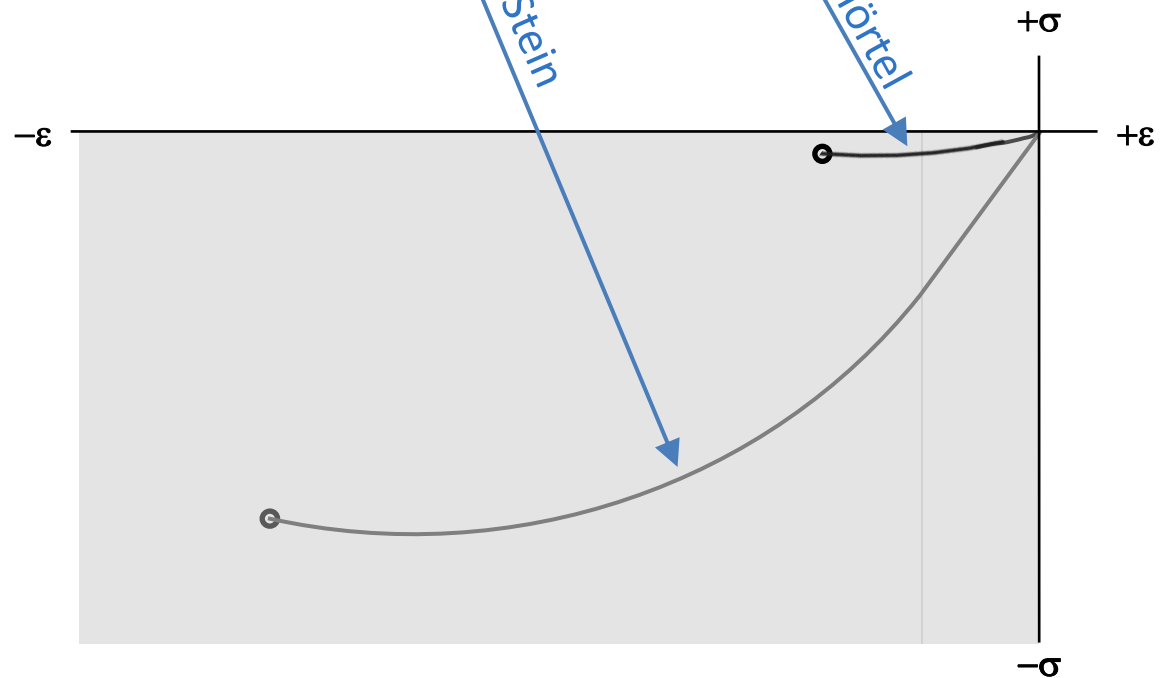


Dehnfugen zur Entlastung feuerfester Schichten können numerisch in das entsprechende Materialgesetz implementiert werden. Sobald die Dehnungskompensation überwunden ist, kann die Steifigkeit, d.h. der Sekantenmodul, anhand der nun auftretenden Drücke und Stauchungen berechnet werden.

3. Steifigkeitsparameter: E-Modul? V-Modul? Sekantenmodul? Elastisch-plastisches Verhalten unter Druck mit Dehnfuge



abgesenktes Gewölbe



In Gewölben ist die Steifigkeit des Mörtels in der Regel erheblich geringer als diejenige des Steins. Das Verhalten des Bogens, der immer unter Druck steht, wird somit vor allem von der „Weichheit“ des Mörtels geprägt.

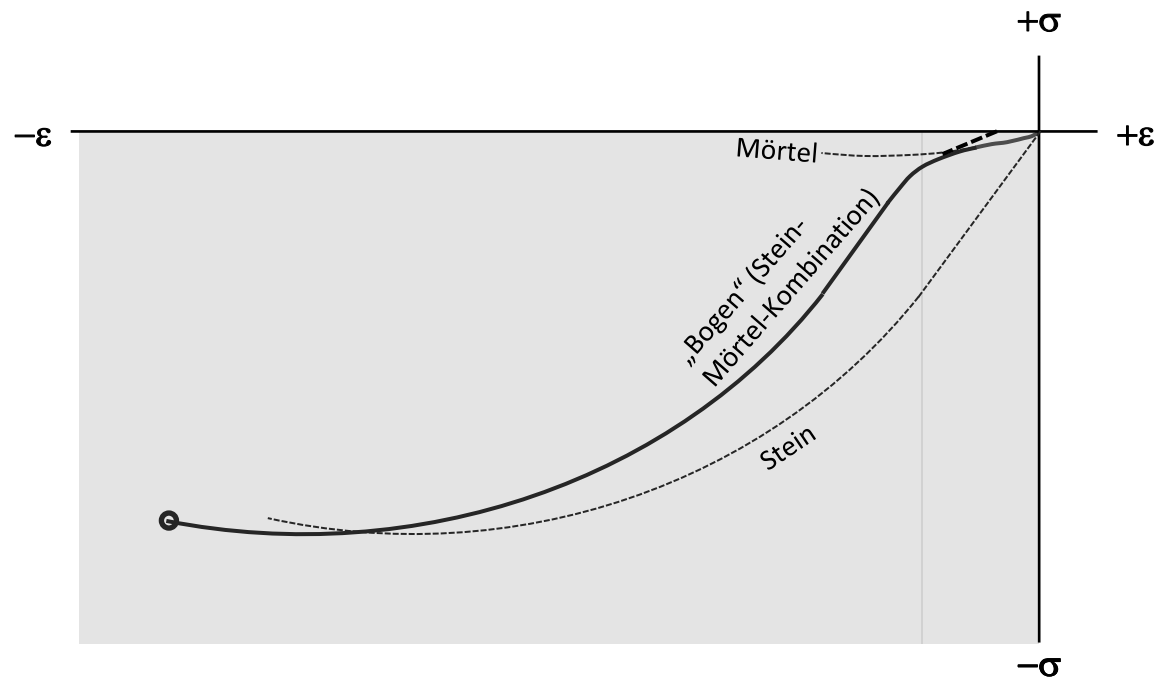
4. Gewölbestabilität

Offene Fugen eines abgekühlten Tunnelgewölbes, Steifigkeit Stein und Mörtel



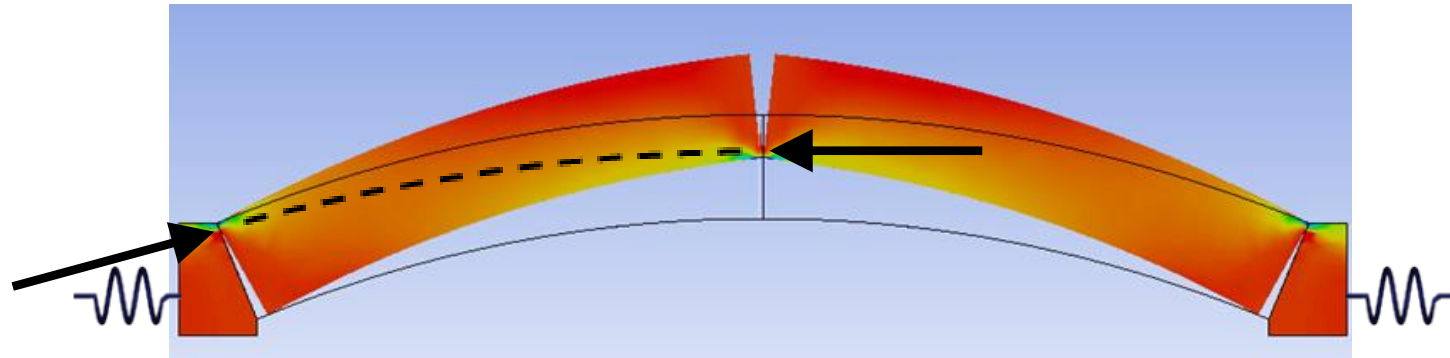
abgesenktes Gewölbe

Das Verhalten, das zur Fugenöffnung führt, kann besser anhand eines kombinierten „Bogengesetzes“ beschrieben werden.

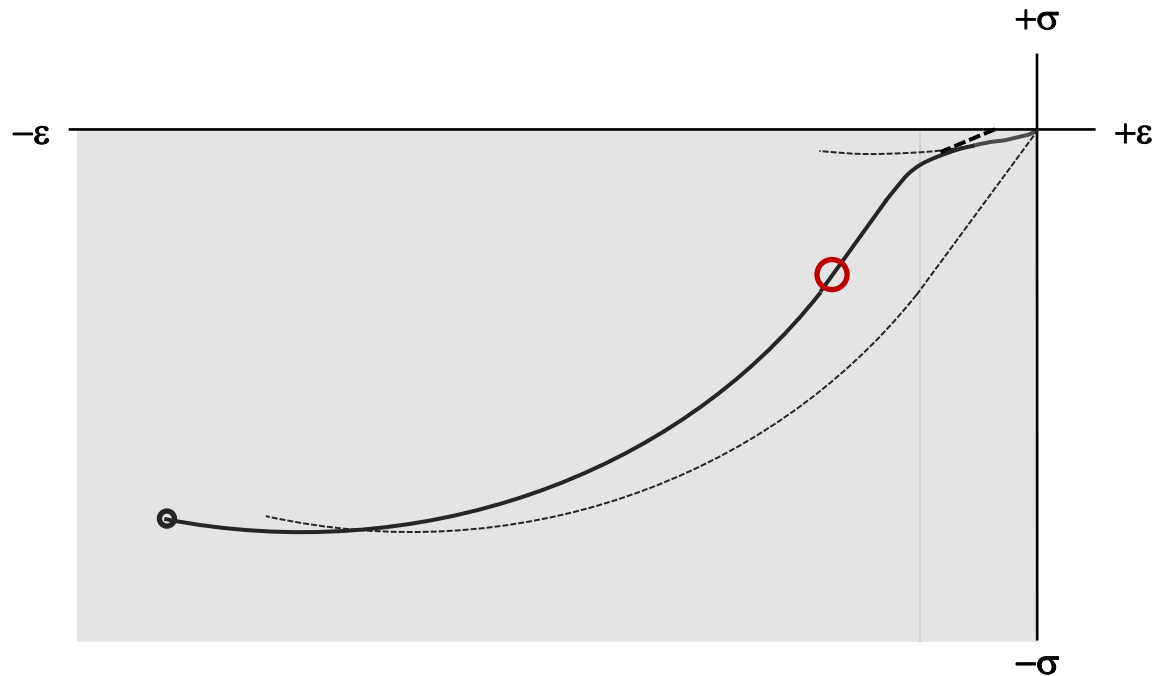


4. Gewölbestabilität

Offene Fugen eines abgekühlten Tunnelgewölbes, Kombinierte Steifigkeit

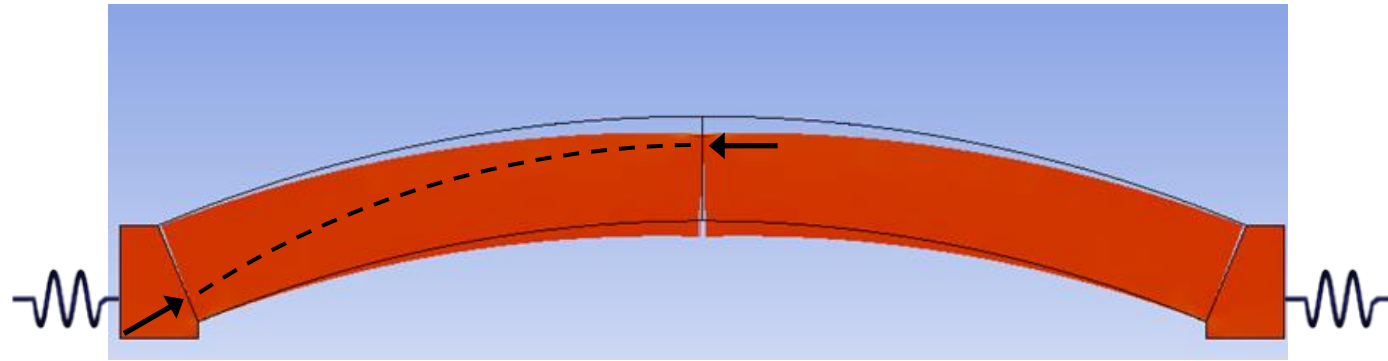


Mit steigender Temperatur dehnt sich der Bogen unter geringstmöglichem Widerstand aus. Aufgrund der in der Regel geringen Mörtelzugfestigkeit geht dies mit Fugenöffnung wie dargestellt an den neuralgischen Punkten Scheitel und Auflager, vertikalem Wachsen sowie hohen konzentrierten Druckkräften einher. Der Mörtel ist bei maximaler Beanspruchung bereits lange plastifiziert.

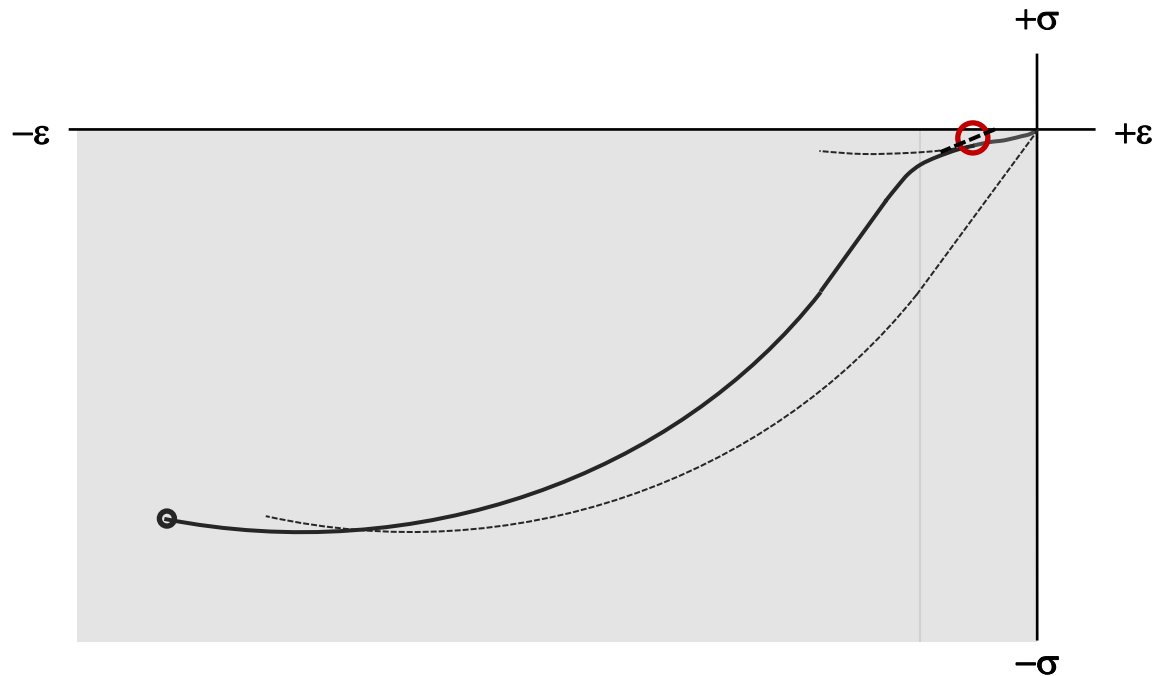


4. Gewölbestabilität

Fugenöffnung und Gewölbedruck infolge Erwärmung



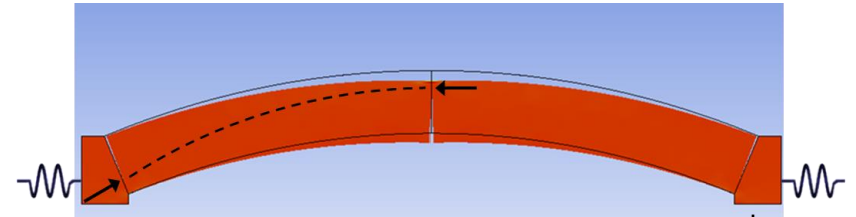
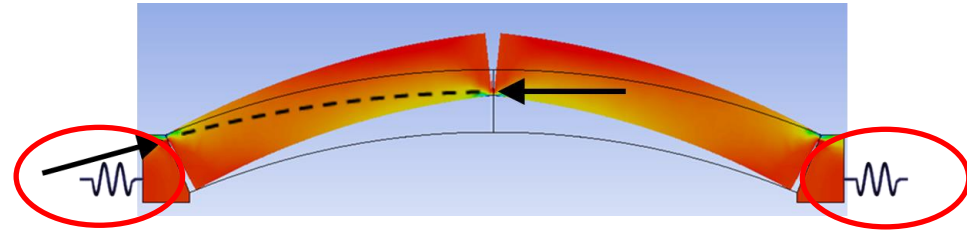
Der aufgrund des plastifizierten Mörtels verkürzte Bogen senkt sich nach Abkühlung mit nun umgekehrter Fugenöffnung gegenüber dem Ausgangszustand ab. Der restliche Druck rührt aus dem Eigengewicht des Gewölbes. Bei starker Verkürzung droht Instabilität!



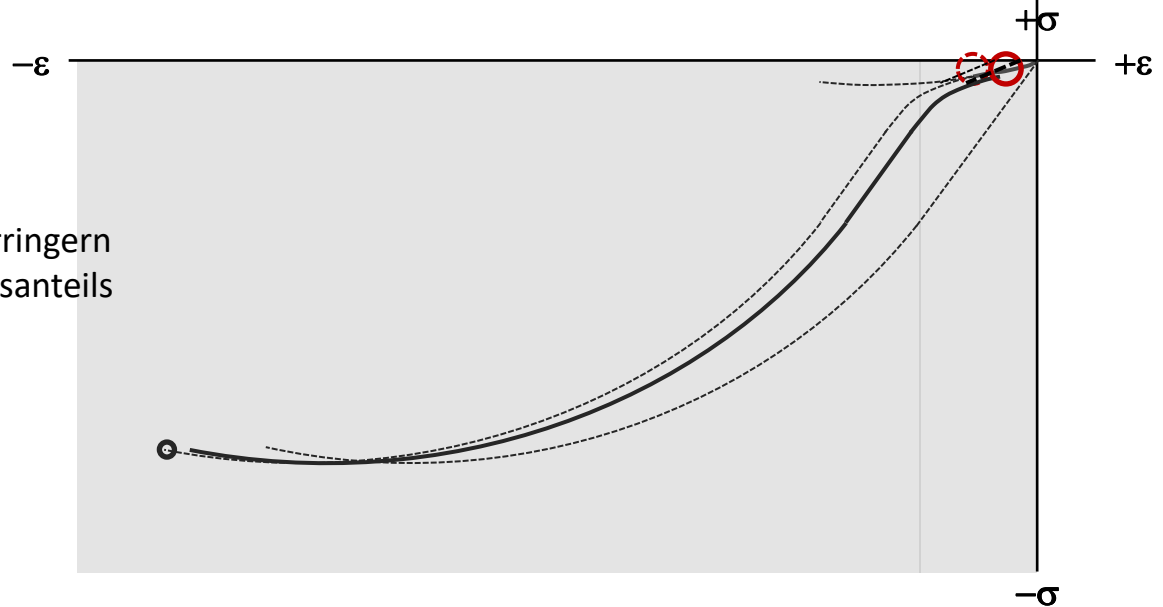
4. Gewölbestabilität

Irreversibel verkürztes Gewölbe nach dem Abkühlen

Steifigkeit der Abstützungsstruktur verringern
 zur Senkung des Horizontalschubs

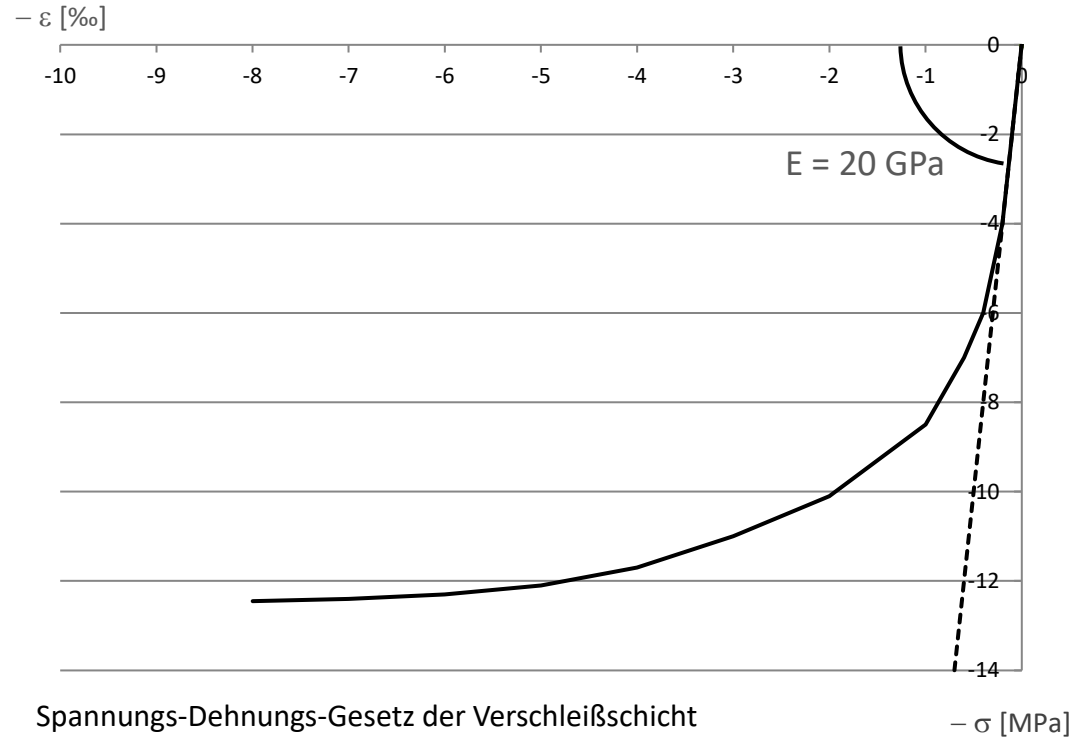
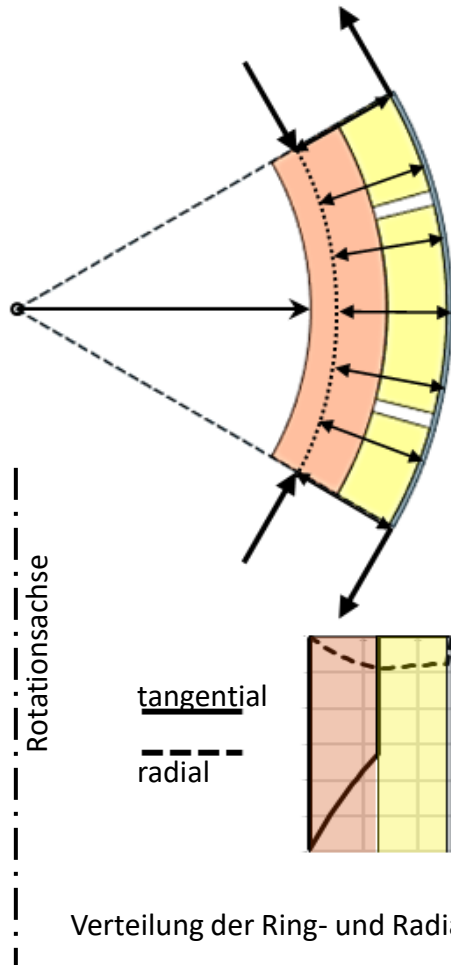


Anteil Mörtelfugenbreite zu Steinbreite verringern
 zur Minimierung des plastischen Spannungsanteils



4. Gewölbestabilität

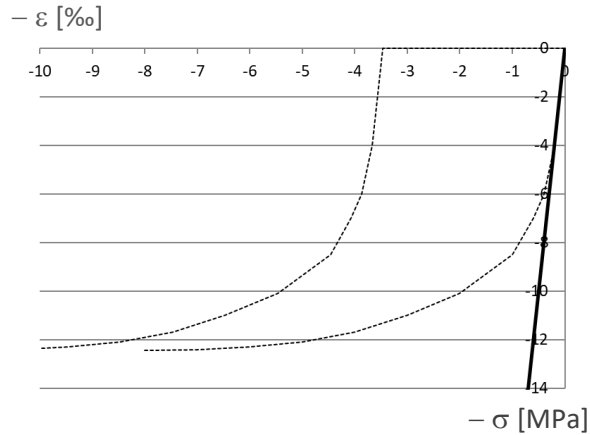
Möglichkeiten zur Verbesserung der Stabilität



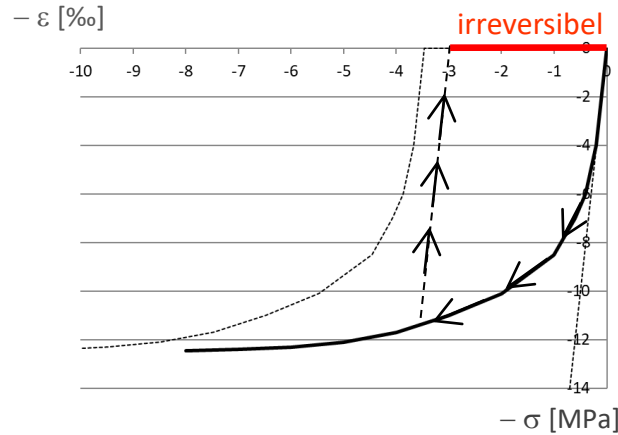
5. Spannungen zylindrischer Konstruktionen

Materialgesetz der Verschleißschicht

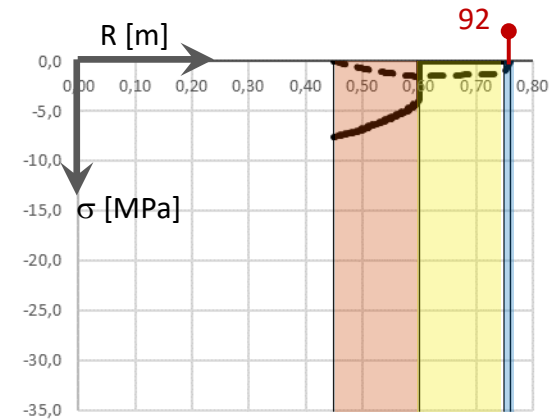
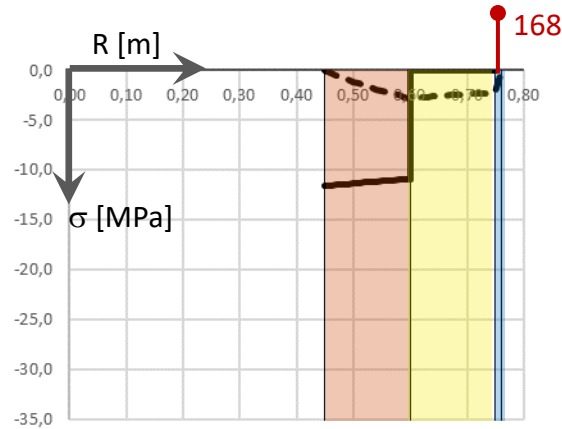
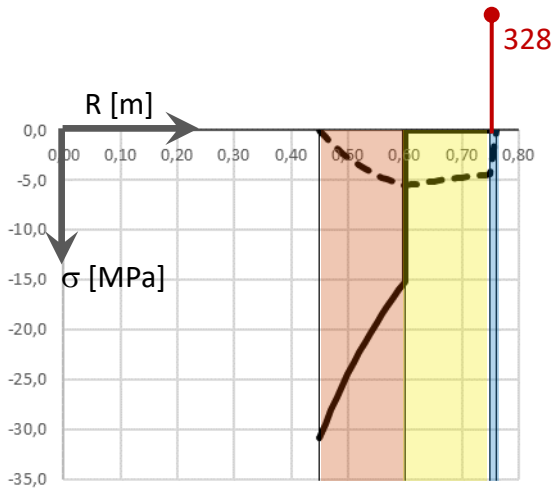
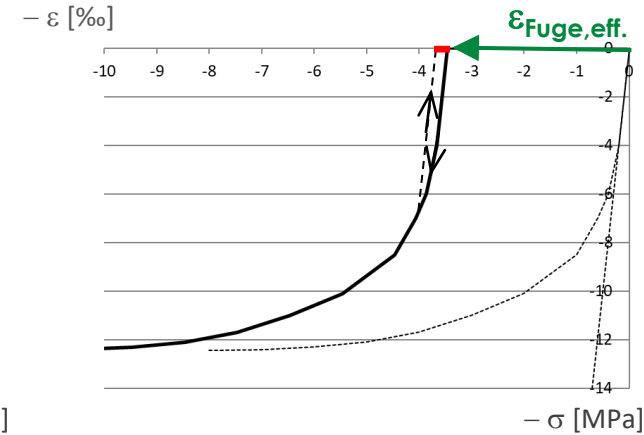
elastisch



elastisch-plastisch

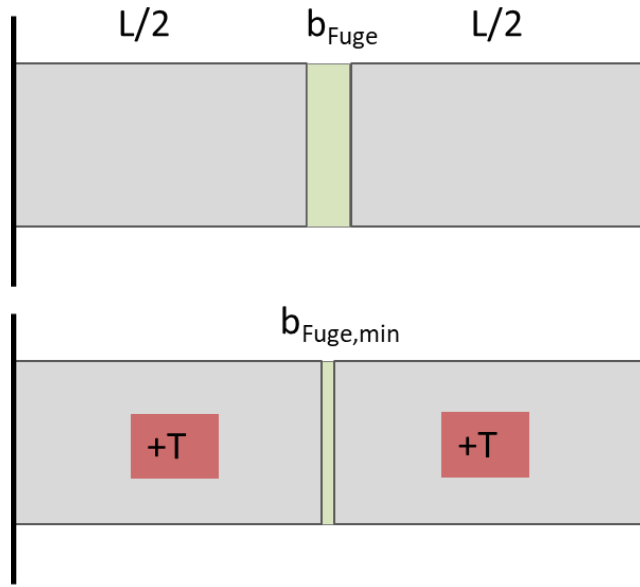


elastisch-plastisch
mit Dehnfuge



5. Spannungen zylindrischer Konstruktionen

Ring- und Radialspannungen



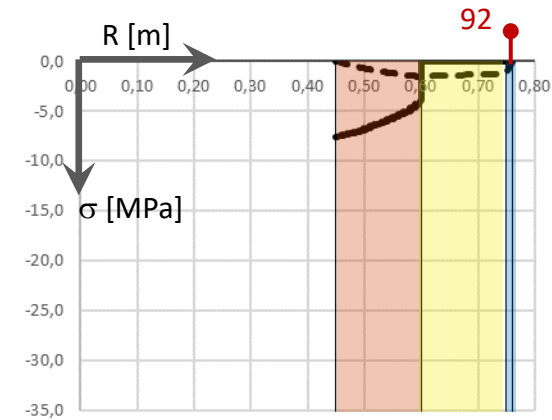
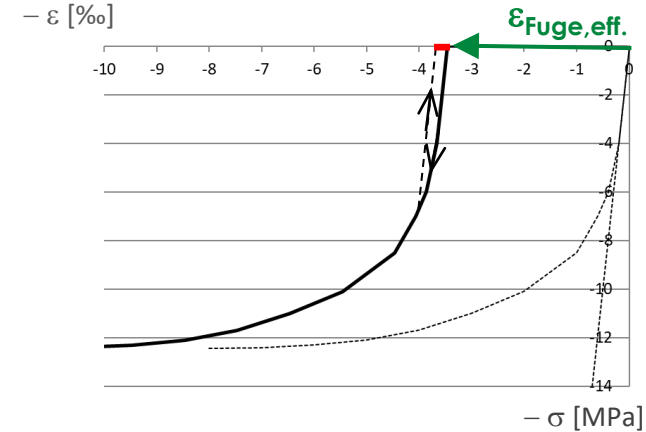
$$b_{Fuge,min} = b_{Fuge} * (100 \% - k)$$

$$\epsilon_{Fuge,eff.} = b_{Fuge,min} / L$$

k: Kompressibilität Fugenmaterial [%]

Zum effektiven Dehnfugenmaß ggf. Schwindanteil addieren und/oder Verschmutzungsgrad abziehen!

elastisch-plastisch
mit Dehnfuge



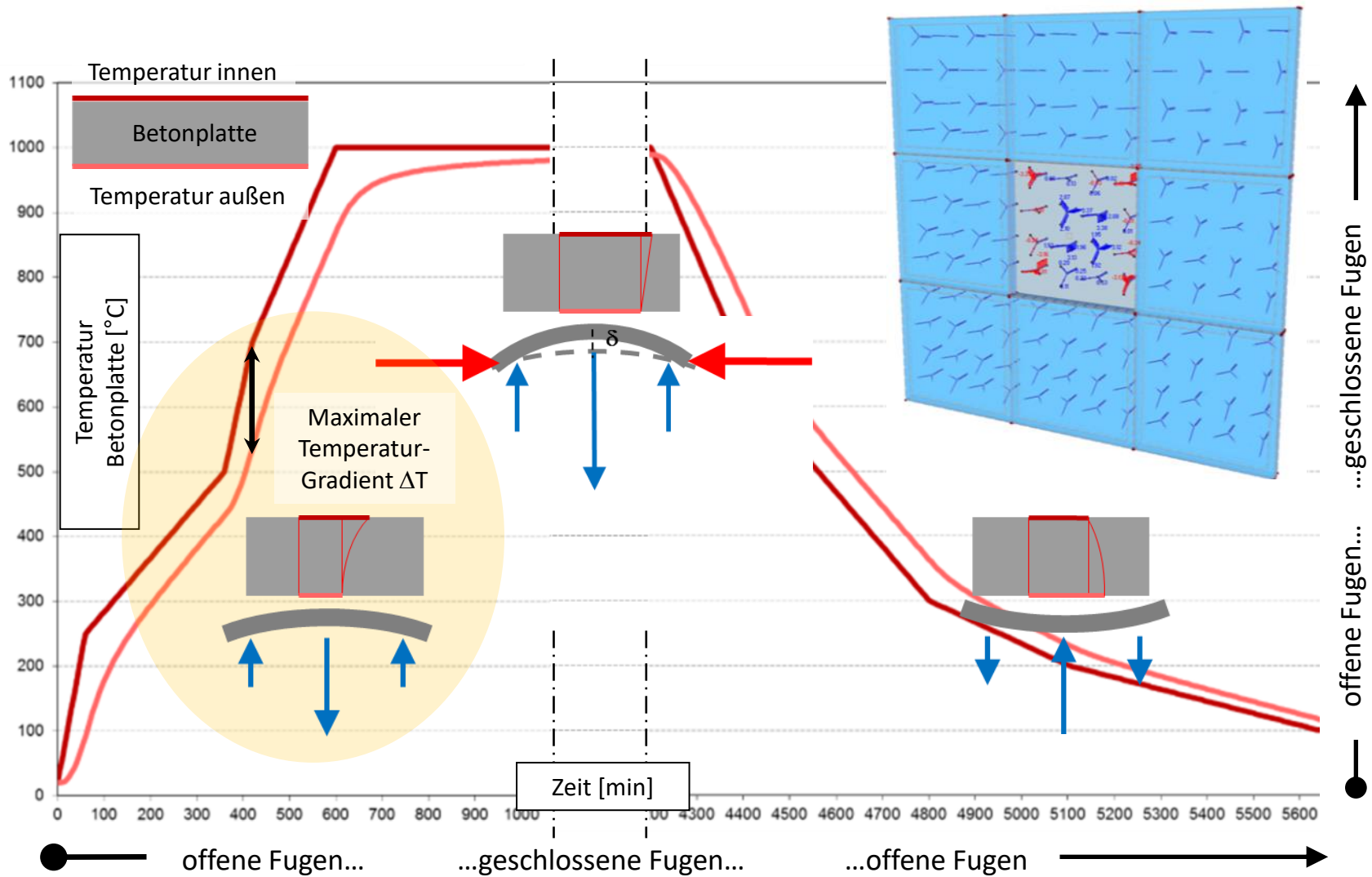
5. Spannungen zylindrischer Konstruktionen

Effektives Dehnfugenmaß



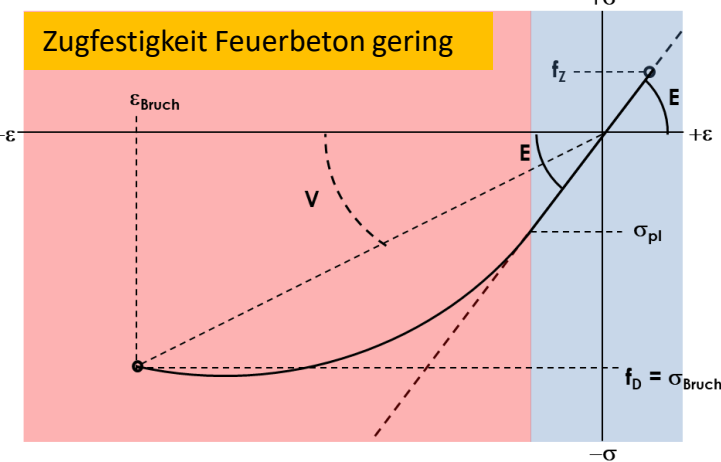
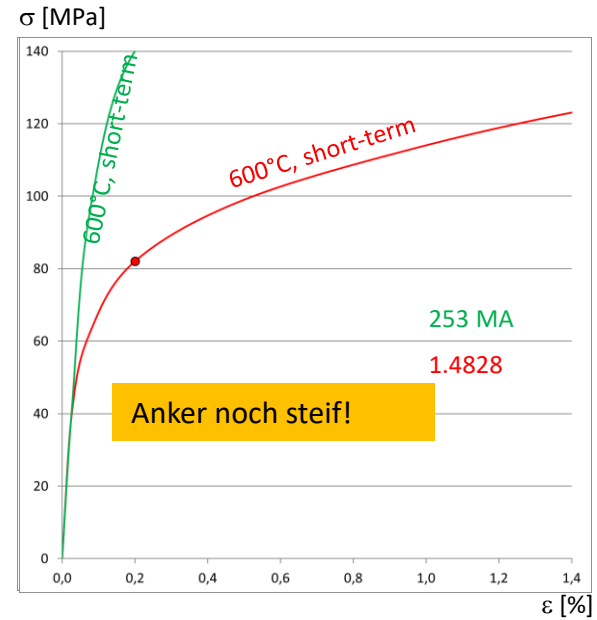
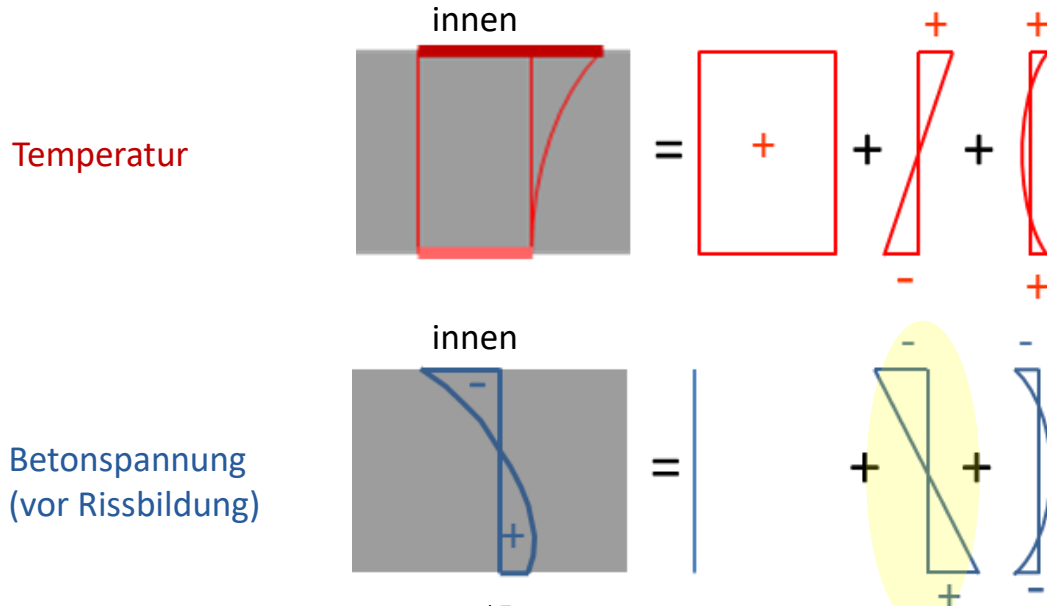
6. Verhaltensmerkmale rückverankerter ebener Platten

Ankerbruch und Plattentrennriss

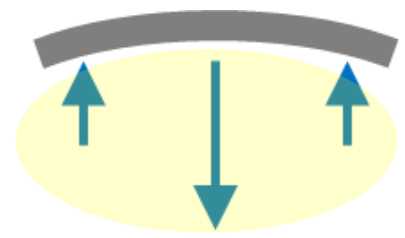


6. Verhaltensmerkmale rückverankerter ebener Platten
 Ofenreise Etappe 1 – Anheizen, Dehnfugen noch offen

Einfluss mechanischer Werkstoffdaten auf Spannungen in feuerfesten Auskleidungen



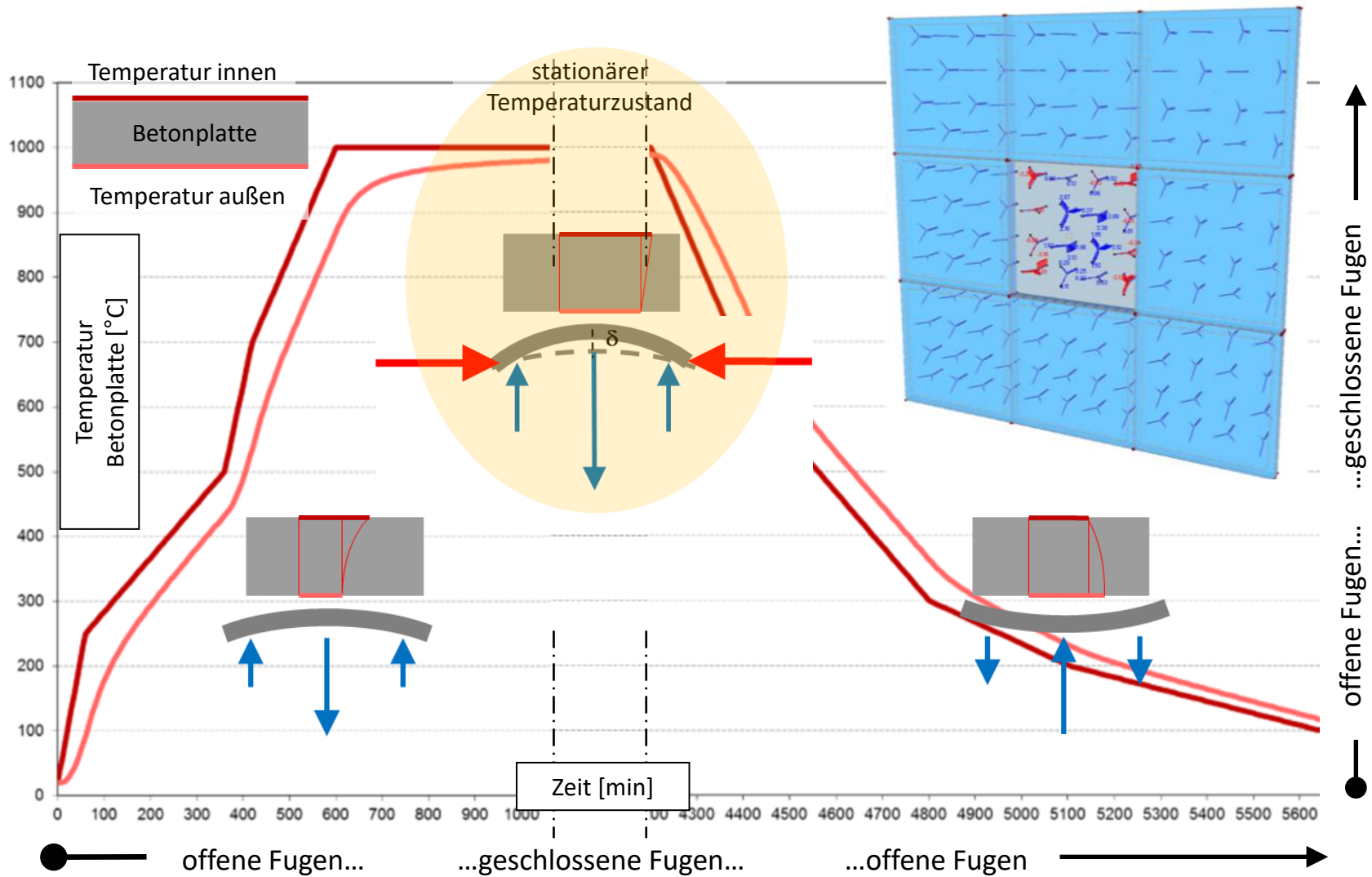
Ankerkräfte mit Biegemoment der Platte im Gleichgewicht



Mögliche Trennrissbildung

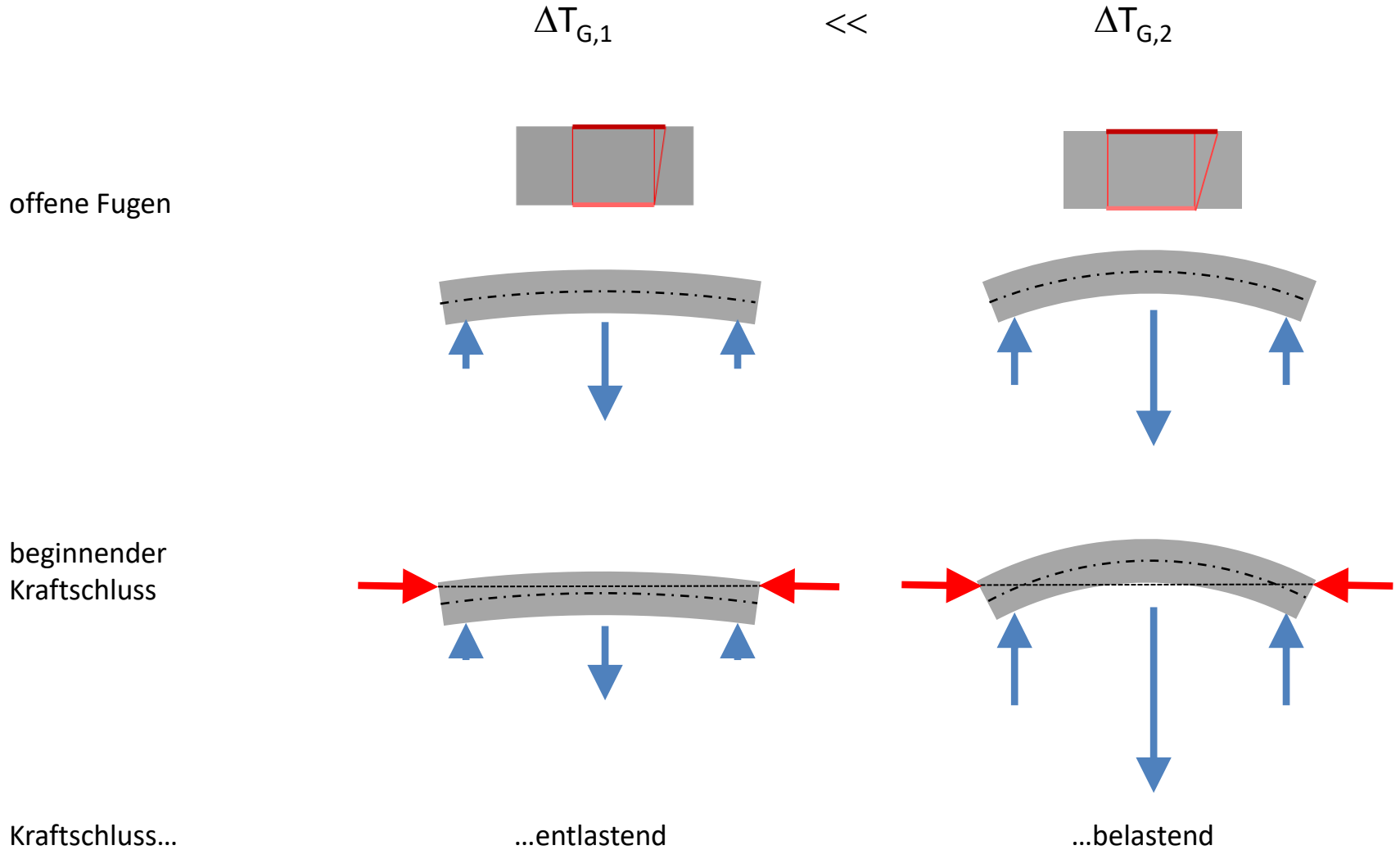


6. Verhaltensmerkmale rückverankerter ebener Platten Ofenreise Etappe 1 – Anheizen, Dehnfugen noch offen



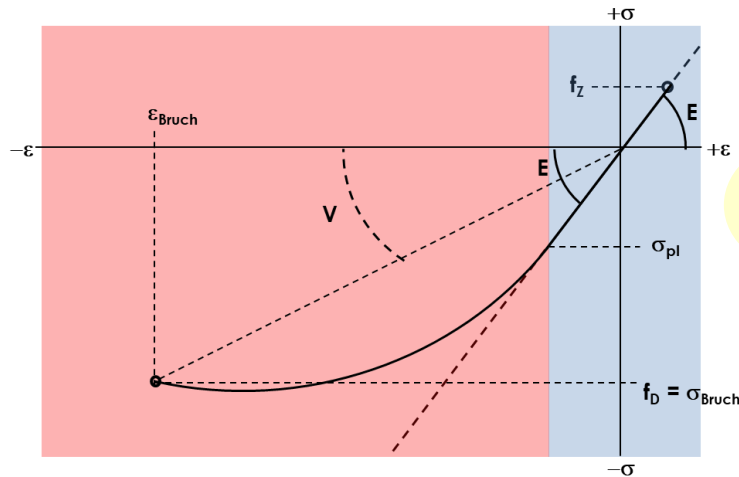
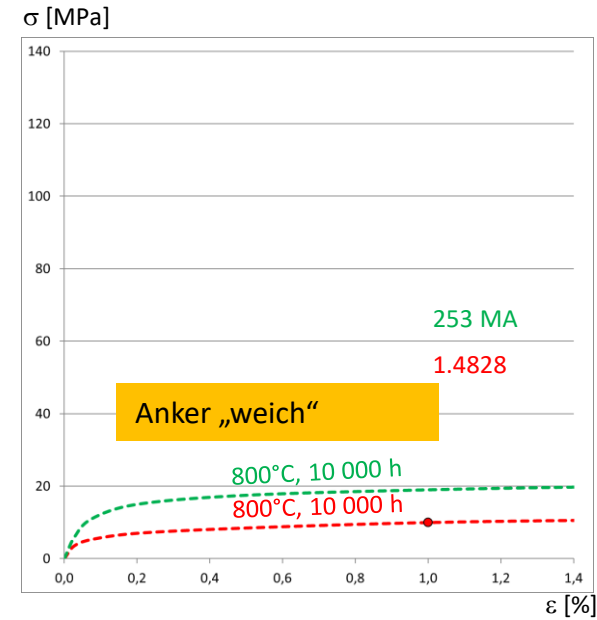
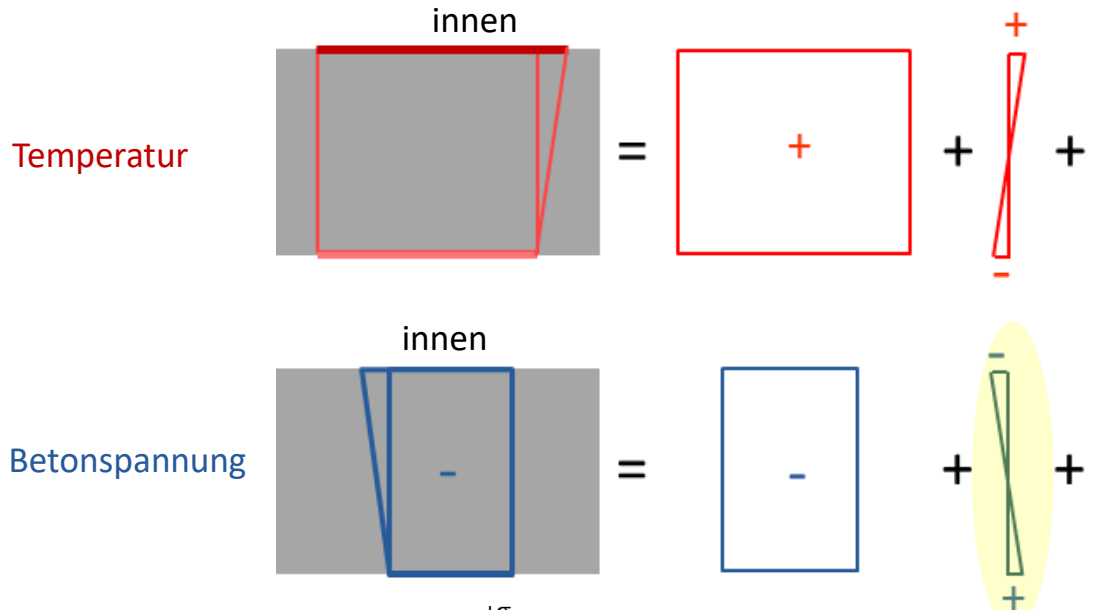
6. Verhaltensmerkmale rückverankerter ebener Platten

Ofenreise Etappe 2 – Regelbetrieb, Dehnfugen überdrückt

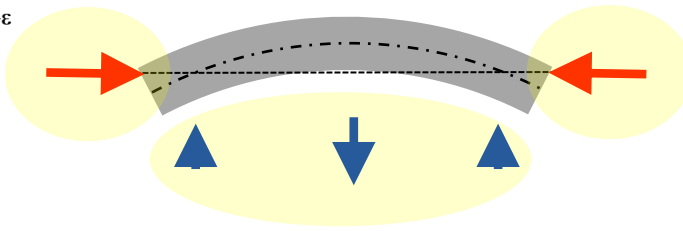


6. Verhaltensmerkmale rückverankerter ebener Platten
 Ofenreise Etappe 2 – Regelbetrieb, Dehnfugen überdrückt

Einfluss mechanischer Werkstoffdaten auf Spannungen in feuerfesten Auskleidungen



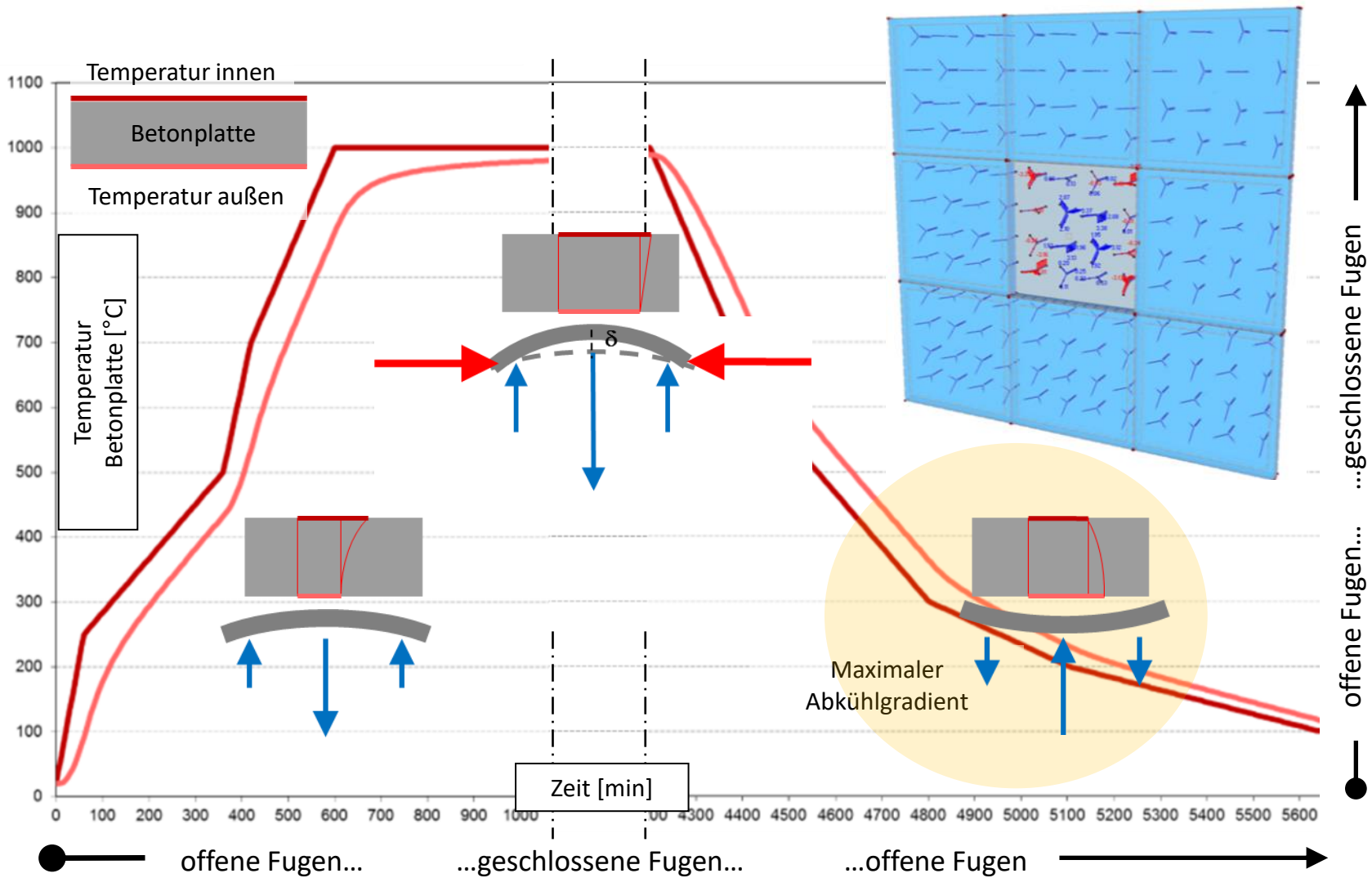
Ankerkräfte mit Biegemoment der Platte im Gleichgewicht



Mögliches Abreißen der Anker

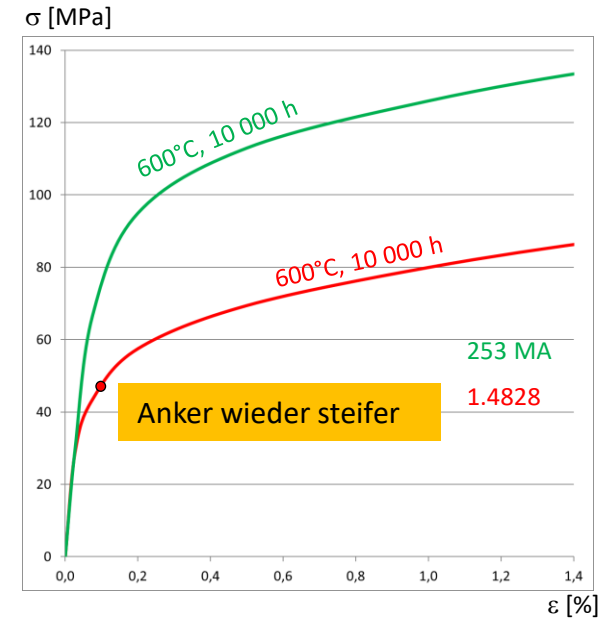
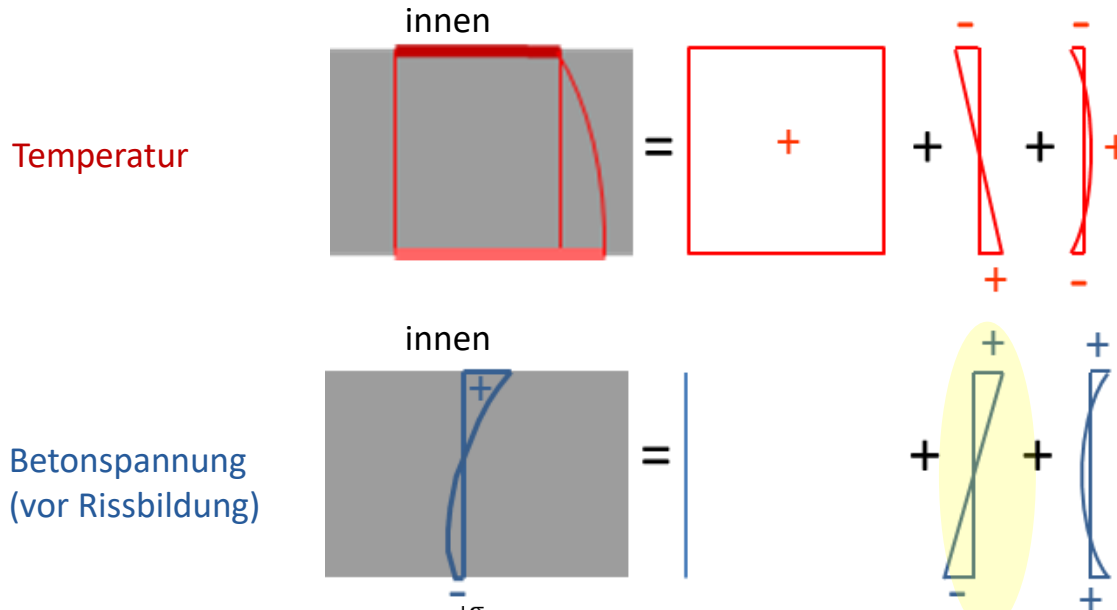


6. Verhaltensmerkmale rückverankerter ebener Platten
 Ofenreise Etappe 2 – Regelbetrieb, Dehnfugen überdrückt

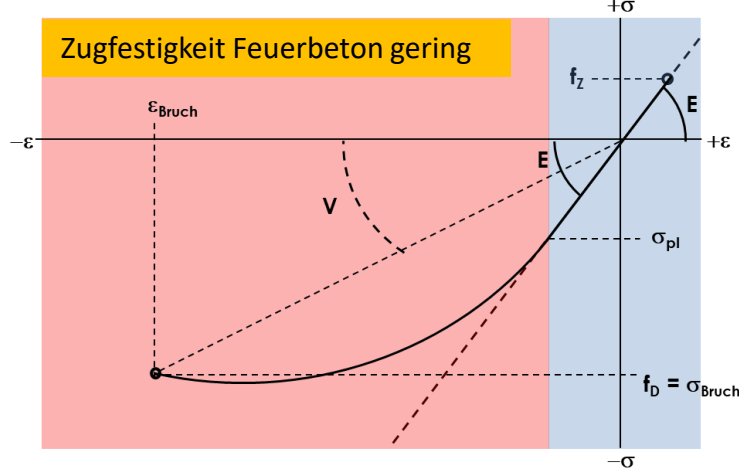


6. Verhaltensmerkmale rückverankerter ebener Platten
Ofenreise Etappe 3 – Abkühlen, Dehnfugen wieder offen

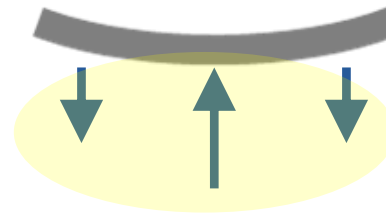
Einfluss mechanischer Werkstoffdaten auf Spannungen in feuerfesten Auskleidungen



Zugfestigkeit Feuerbeton gering



Ankerkräfte mit Biegemoment der Platte im Gleichgewicht

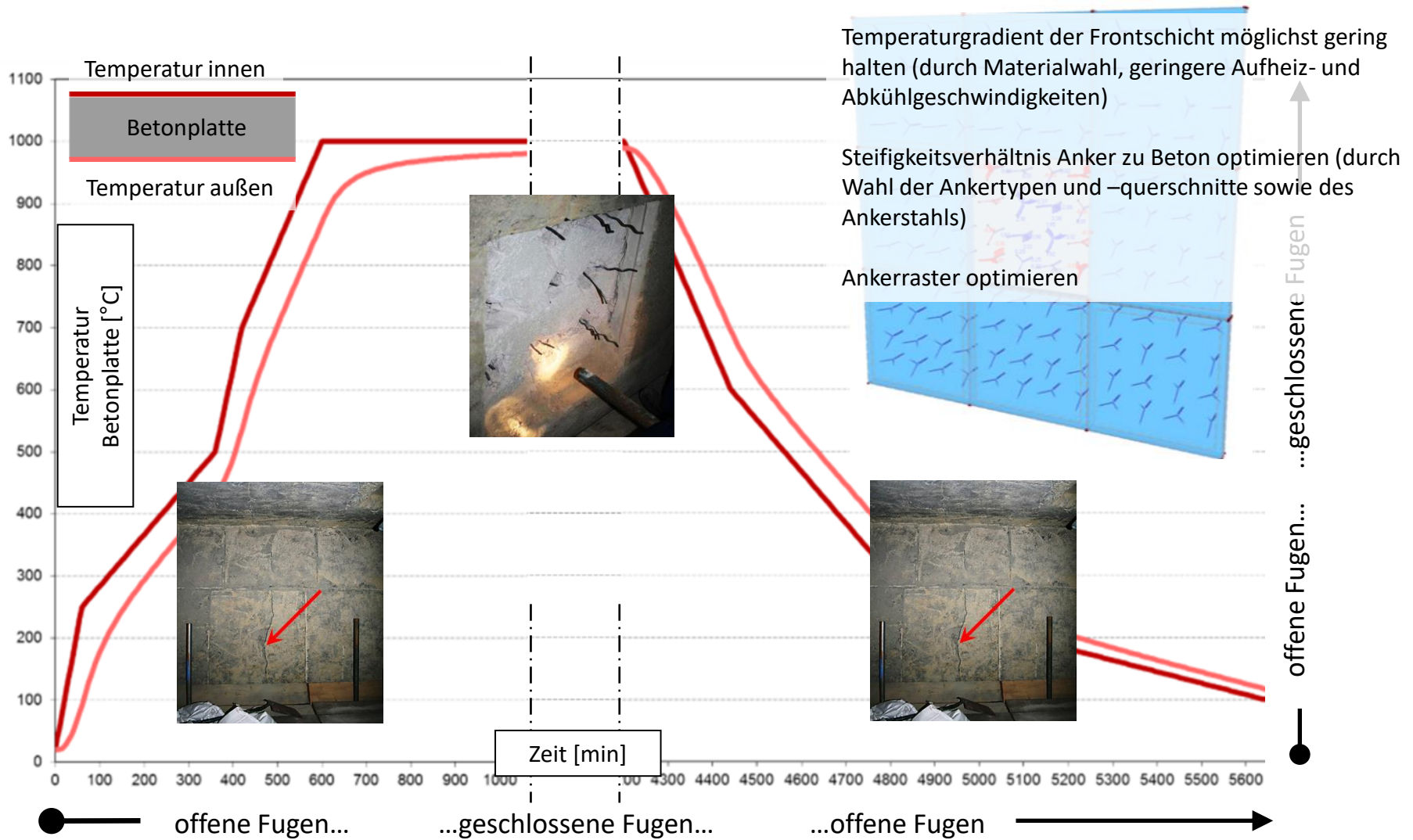


Mögliche Trennrissbildung



6. Verhaltensmerkmale rückverankerter ebener Platten Ofenreise Etappe 3 – Abkühlen, Dehnfugen wieder offen

Einfluss mechanischer Werkstoffdaten auf Spannungen in feuerfesten Auskleidungen



6. Verhaltensmerkmale rückverankerter ebener Platten Schadenspotentiale und Maßnahmen zu deren Minimierung

Gegebenheiten

- Spannungen in feuerfesten Auskleidungen werden primär durch Temperaturzwang hervorgerufen.
- Zu ihrer Bestimmung sind der durch Temperaturänderung hervorgerufene Ausdehnungsdrang der beteiligten Bauteile und ihre Steifigkeitsdaten erforderlich.
- In den meisten Fällen – etwa bei Verschleißschichten – stehen feuerfeste Zustellungen unter Druck; daher wären temperaturgebundene Druckspannungs-Dehnungs-Kurven die ideale Berechnungsgrundlage. Insbesondere Konstruktionen, bei denen es auf die Stabilität ankommt (Abschnitt 4), sollten auf Basis akkurater Materialgesetze berechnet werden.
- Häufig kann mit dem Wissen um Material sowie Betriebs-, Rand- und Kontaktbedingungen – z.B. Höhe der Betriebstemperaturen, Einfluss von Dehnfugen – von elastischem Materialverhalten ausgegangen werden; somit eignen sich auch weniger aufwändige Prüfverfahren wie etwa 3-Punkt-Biegeversuche oder dynamische E-Modul-Bestimmung für gute rechnerische Annäherungen. Biegebeanspruchte Bauteile (Abschnitt 6) seien hier als Beispiel genannt.

Möglichkeiten

- Wirklichkeitsnahe Steifigkeitsparameter erlauben, alle Elemente – Feuerfestschichten, Anker, Stahlmantel – so zu bemessen, dass Strukturstabilität und Dichtigkeit signifikant erhöht werden, was wiederum zu höherer Zuverlässigkeit der Anlagen beiträgt.
- Besonders steife Bauteile erhöhen oftmals in schädlicher Weise die Spannungen angrenzender Teile. Das Wissen um tatsächliche Materialsteifigkeit und adäquate thermomechanische Analysen geben hier viel Raum für Optimierung.

7. Zusammenfassung