

BÁLINT PUDLEINER

MASTERARBEIT

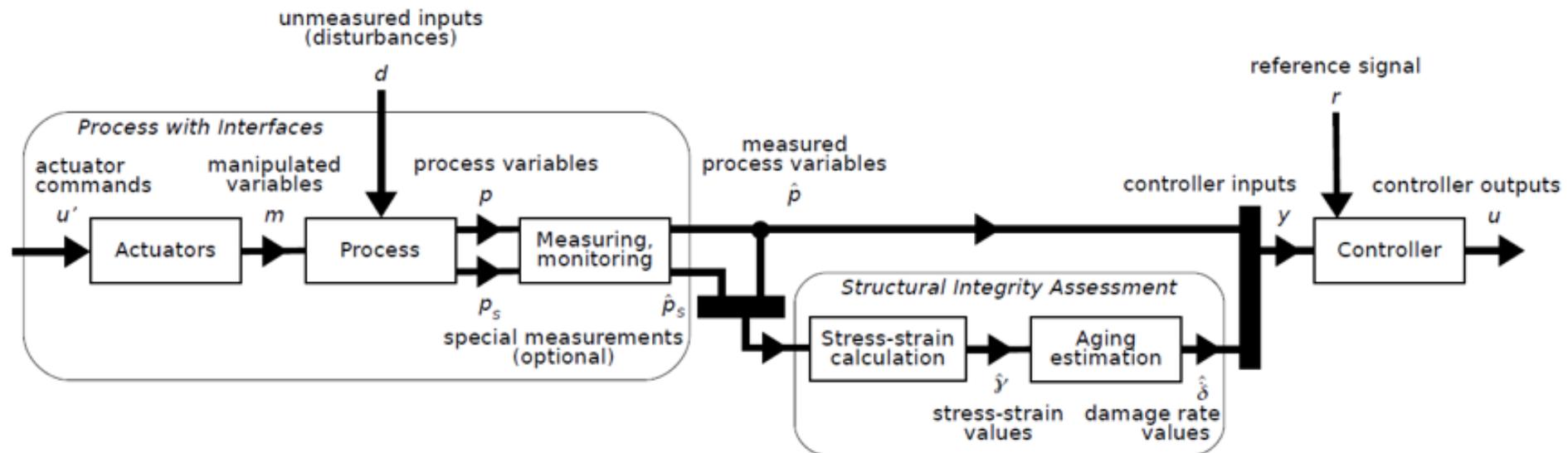
Verbesserung der Leistungsregelung des Kernkraftwerks mit Berücksichtigung der Folgen
des Belastungsverhaltens und der Alterung

Betreuer am Institut: Pál Szentannai Zweitbetreuer: Miklós Prodán

Abteilung: Institut für Energietechnik

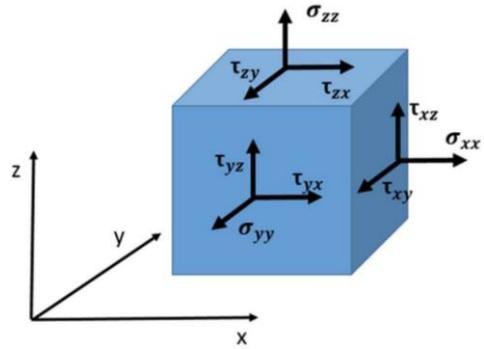
Vorgeschlagene Konfiguration zur Berücksichtigung der Festigkeits- und Alterungsfolgen bei der Leistungsregelung von PWR-Reaktoren

- Bedarf an der Leistungsänderung
- sich ändernde Temperatur und Spannung
- wichtige Rolle der Strukturintegrität



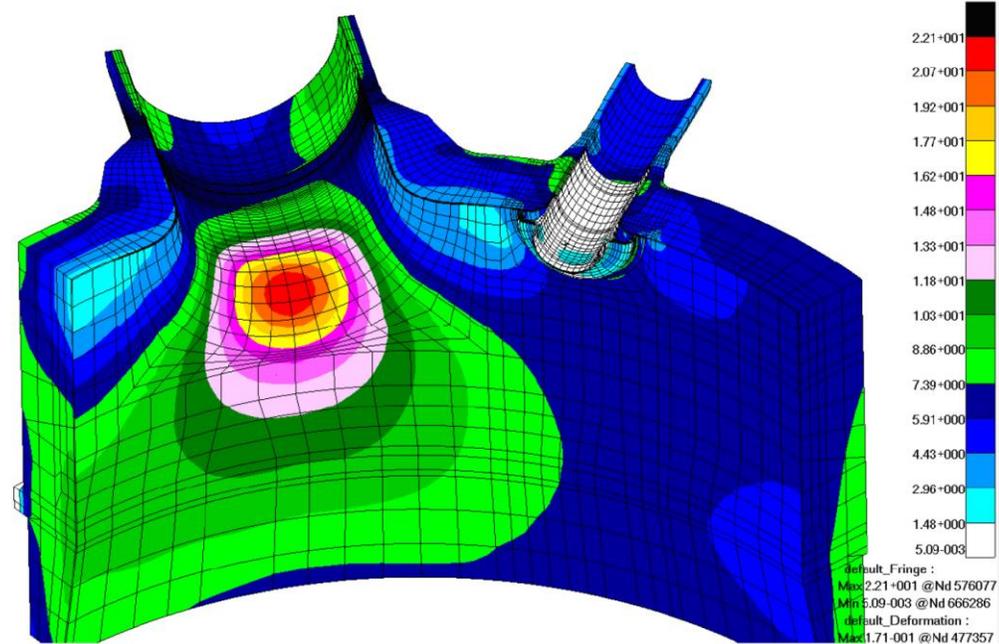
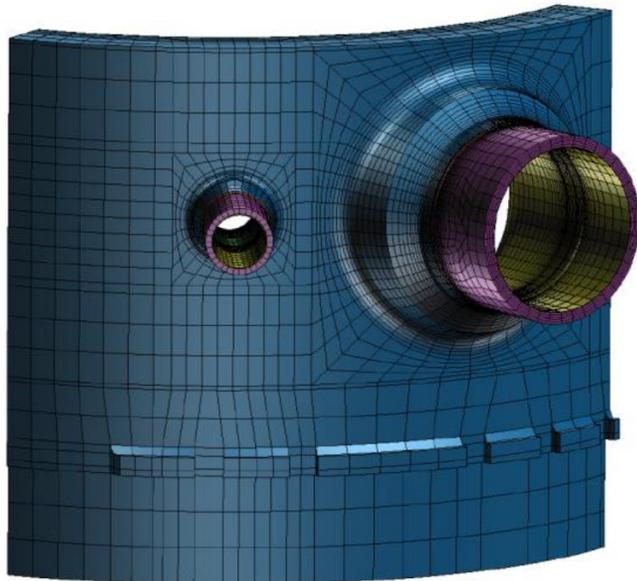
Konfiguration der Prozessregelung mit der Lebensdauerbetrachtung [1]

Spannungsberechnung



$$\sigma(x, y, z) = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix}$$

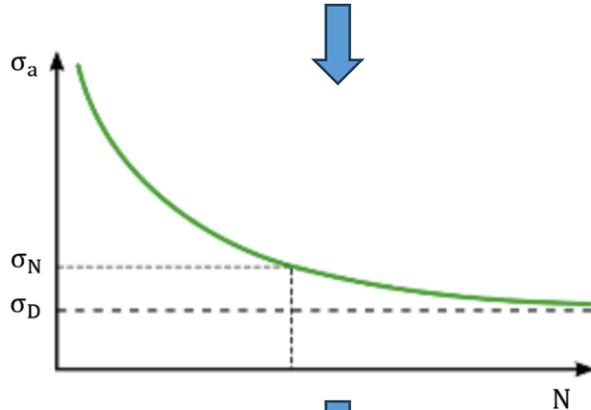
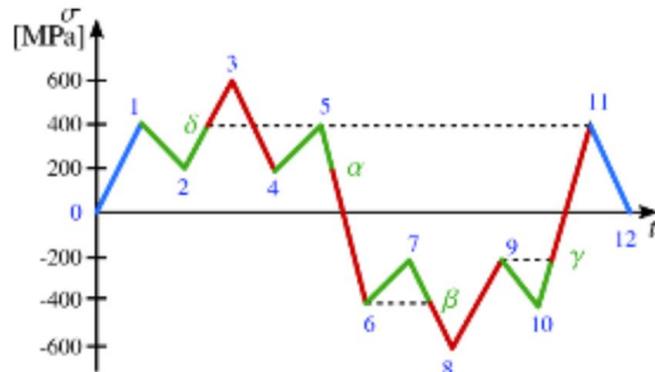
$$\sigma_{V}^{HMH} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]}$$



Das Netz und das Spannungsbild der Rohrstützenzone von VVER 1000 [2]

Ermüdungsberechnung

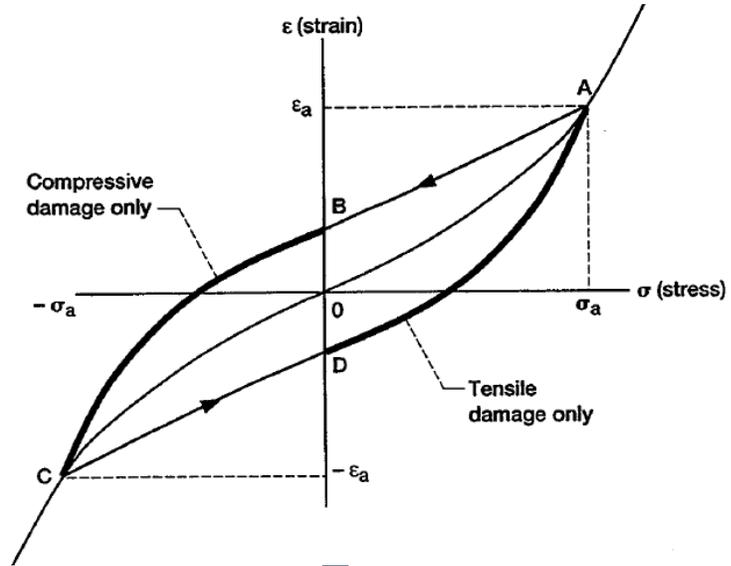
Rainflow Methode [3]



$$D = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i}$$

kumulative Schädigungsfaktor

Lorenzo-Ray Methode [4]



$$\delta = 2 \cdot \left(\frac{|\sigma - \sigma_r|}{2(\sigma_f' - \sigma_m)} \right)^{-\frac{1}{b}} \rightarrow \frac{d\delta}{dt} = 2 \cdot \frac{d}{d\sigma} \left(\left(\frac{|\sigma - \sigma_r|}{2(\sigma_f' - \sigma_m)} \right)^{-\frac{1}{b}} \right) \cdot \frac{d\sigma}{dt}$$

$$D = \int \frac{d\delta}{dt}$$

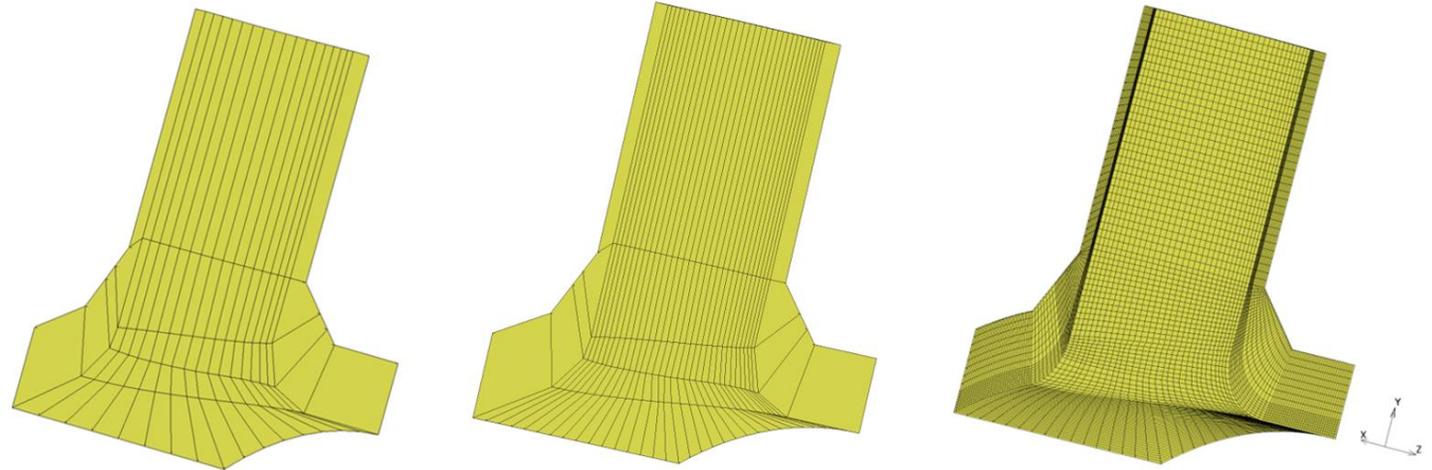
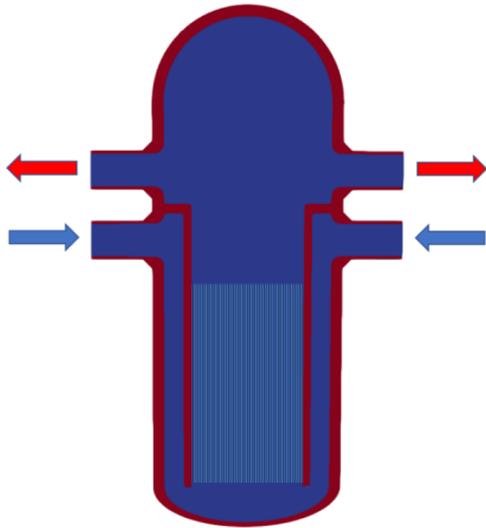
Zeitabhängig!

[3] Kovács Á.: Szilárdsági méretezés - 5. Méretezés kifáradásra - MeRSZ, https://mersz.hu/dokumentum/m753szm_54/.

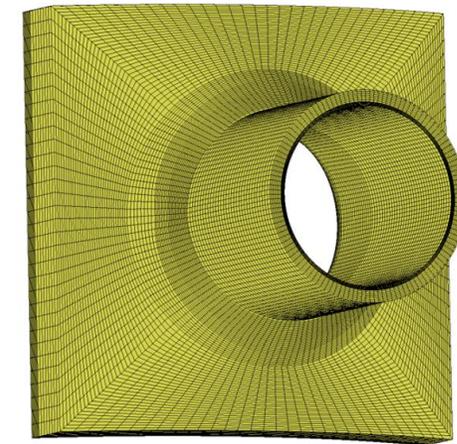
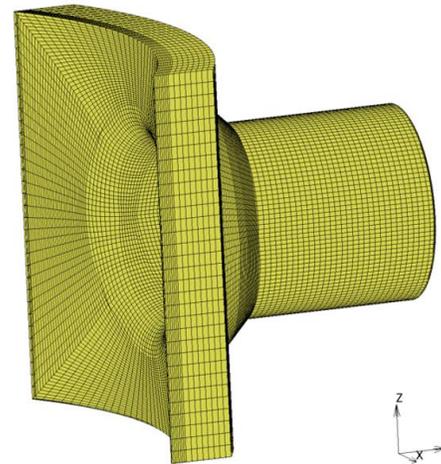
[4] Ray, A.; Wu, M.-K.; Carpino, M. and Lorenzo, C.F.: Damage-Mitigating Control of Mechanical Systems: Part I—Conceptual Development and Model Formulation, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 116 (1994), no. 3, pp. 437–447, <https://doi.org/10.1115/1.2899239>.

FEM-Modell des Rohrstutzens von VVER 1200 – Geometrie, Netz

- Aus der Ermüdungssicht ist der kritische Bereich die Stutzenzone [2, 5]
- Ein im MSC MARC Finite-Elemente-Software erstelltes Modell



- Hexaederelement: 196 608 Stk.
- Knotenpunkt: 211 072 Stk.



FEM-Modell des Rohrstutzens von VVER 1200 – Anfangs- und Randbedingungen

➤ Innendruck: 13-16 MPa [6]

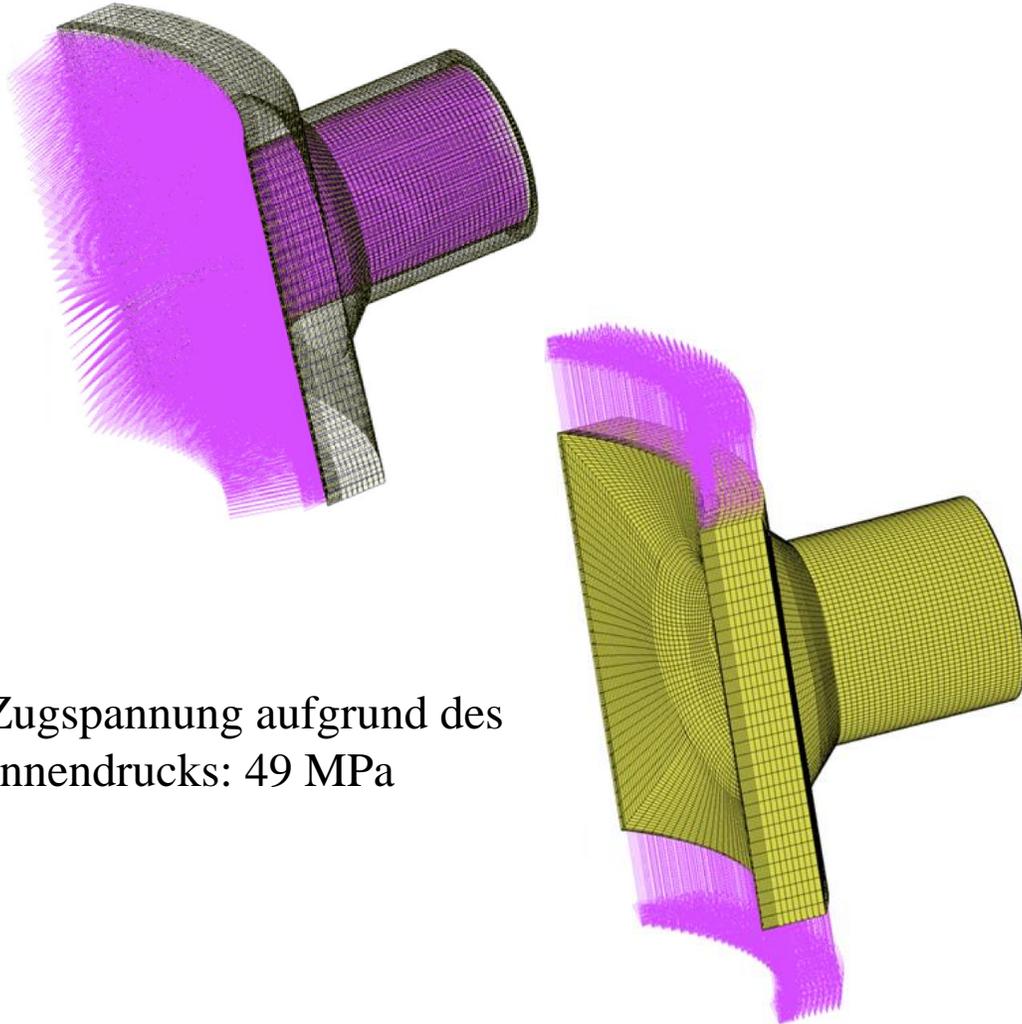


15 MPa

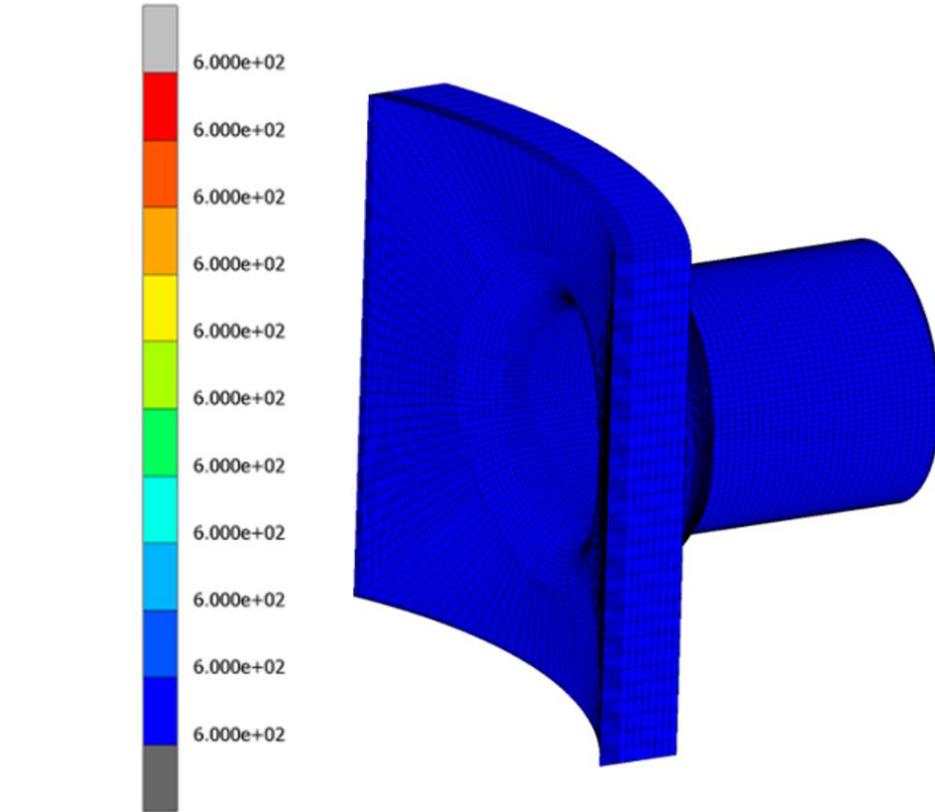
➤ Temperatur: 560-630 K [6]



600 K



➤ Zugspannung aufgrund des Innendrucks: 49 MPa

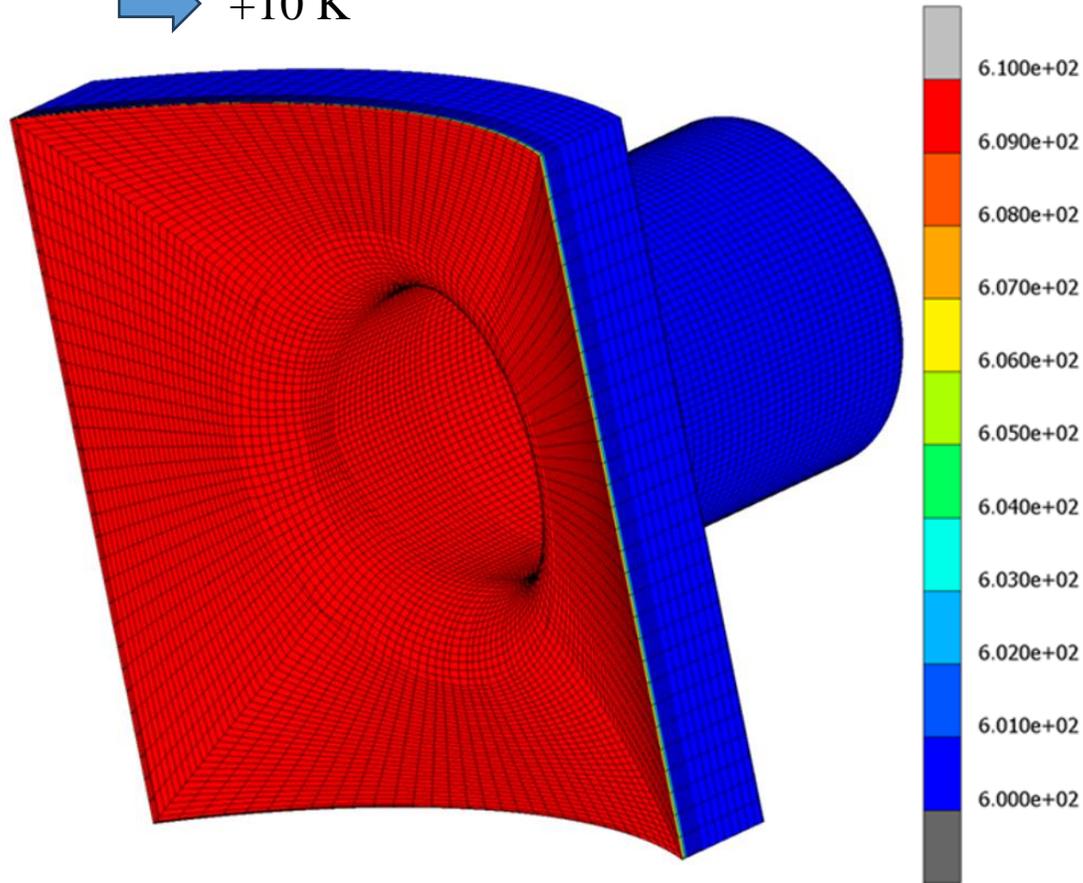


➤ Randbedingungen: Zulassung oder Einschränkung der Verschiebungen in einer bestimmten Richtung auf ebenen Flächen (Typ I - Dirichlet)

FEM-Modell des Rohrstutzens von VVER 1200 – Untersuchungsmethode

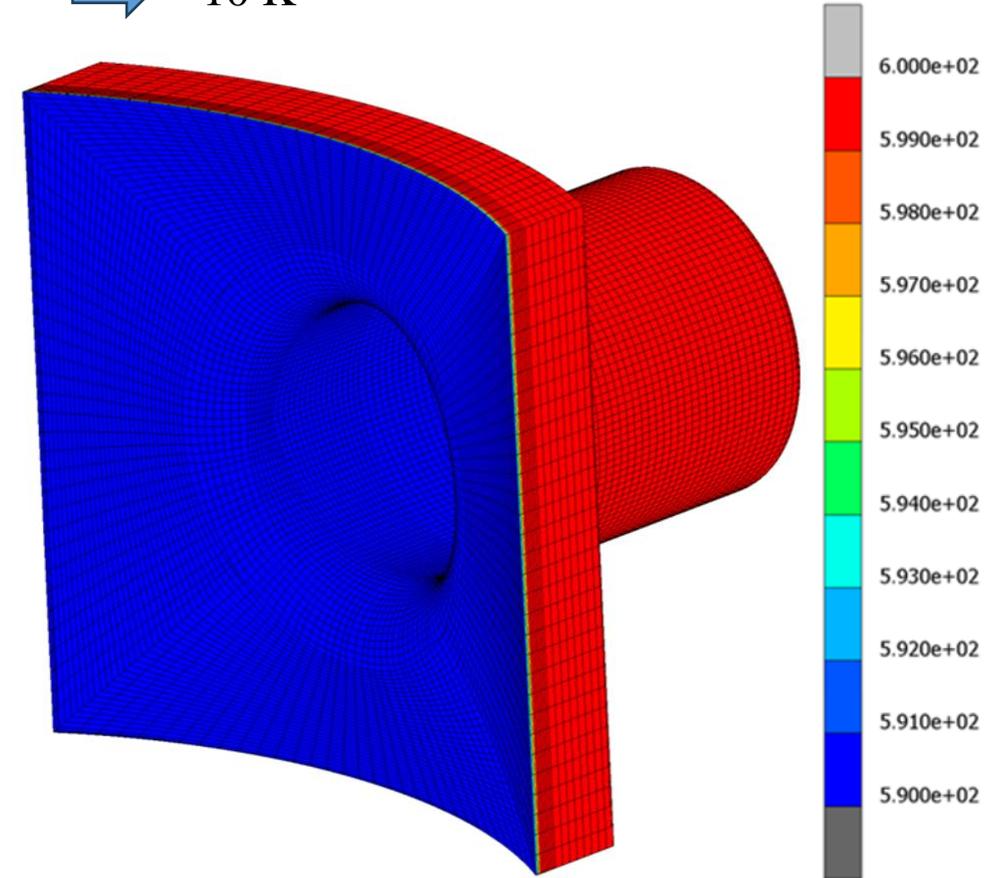
- Aufwärmung, Temperaturanstieg: von 600 auf 610 K

➔ +10 K



- Abkühlung, Temperaturabnahme: von 600 auf 590 K

➔ -10 K



- Untersuchung der Spannungsantwort auf sprunghafte Anregung, Bestimmung der kritischen Stelle
- Berechnung der Schädigung aufgrund des Spannungsverlaufs an der kritischen Stelle.

FEM-Modell des Rohrstutzens von VVER 1200 – Simulationsergebnisse I.

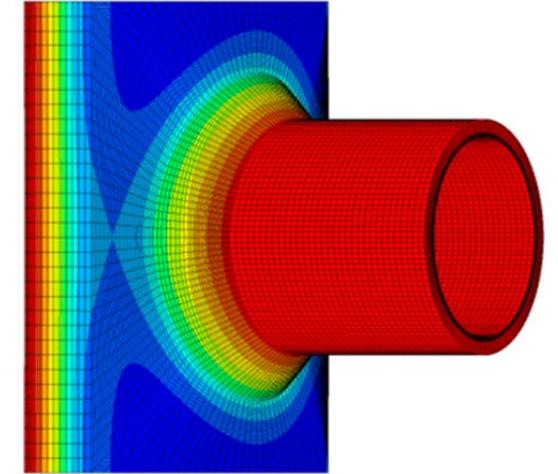
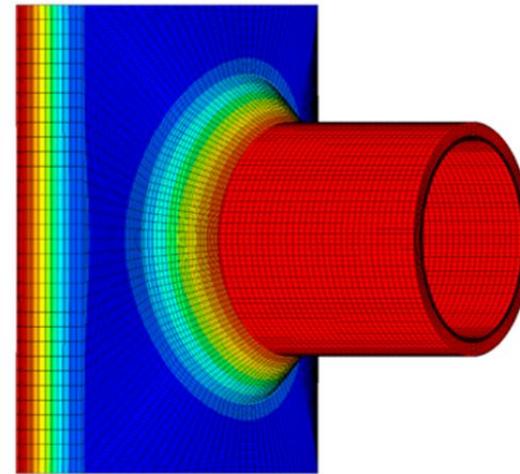
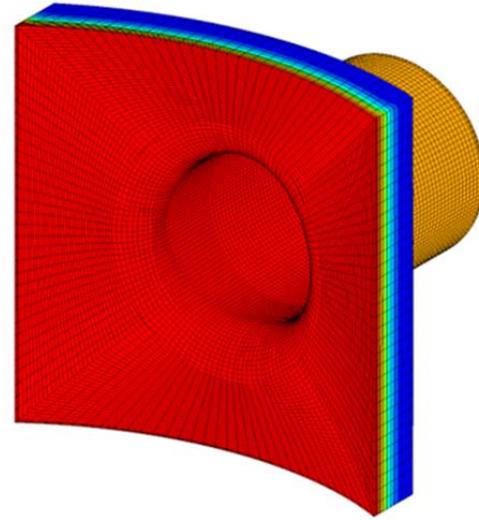
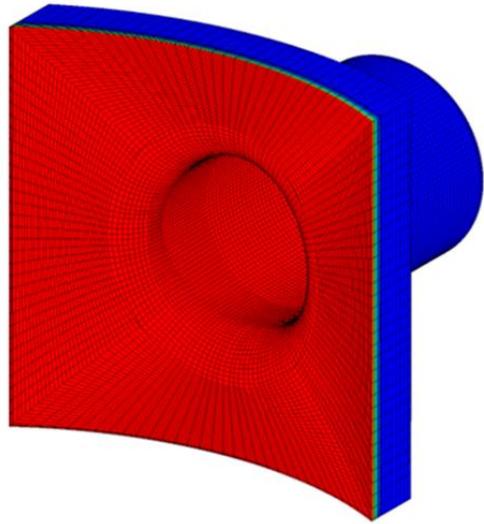
3 s

300 s

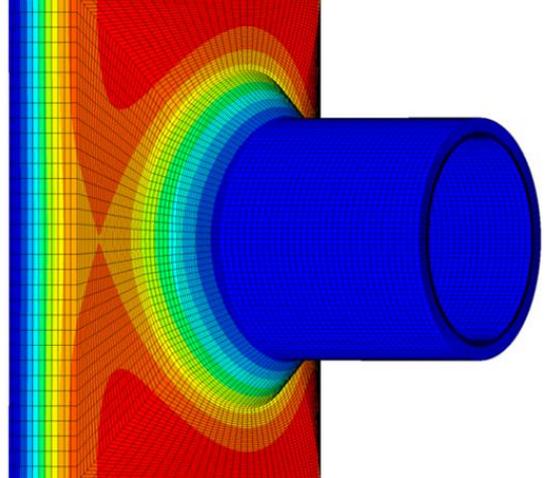
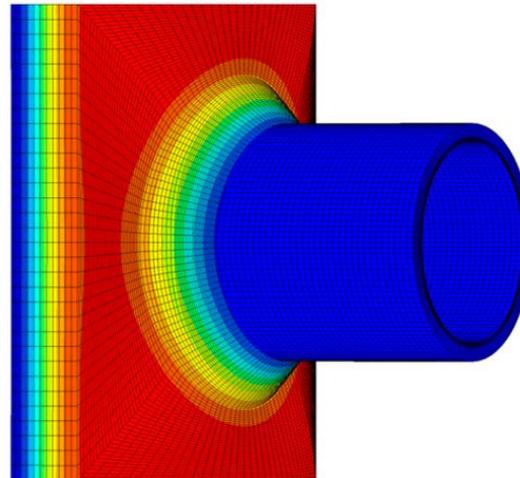
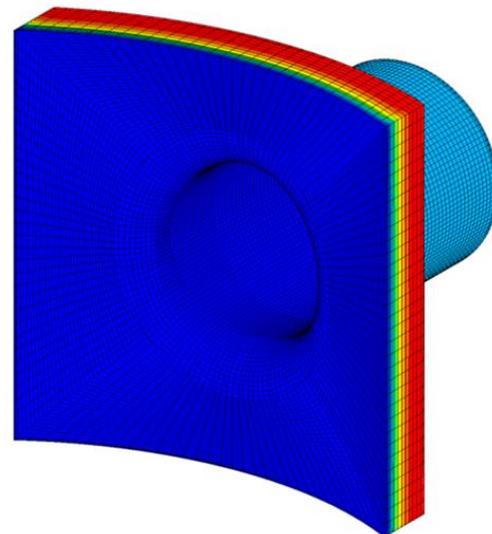
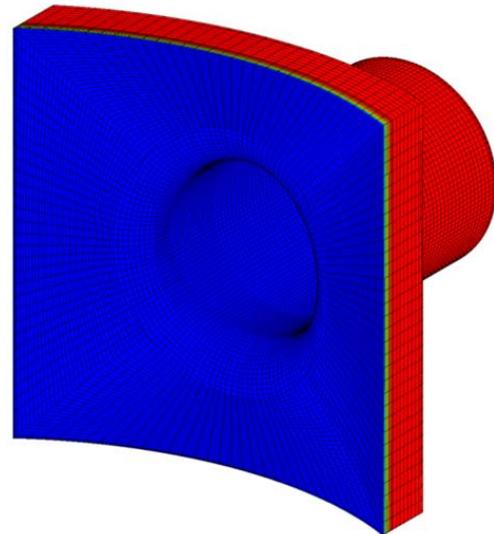
1500 s

3000 s

+10 K

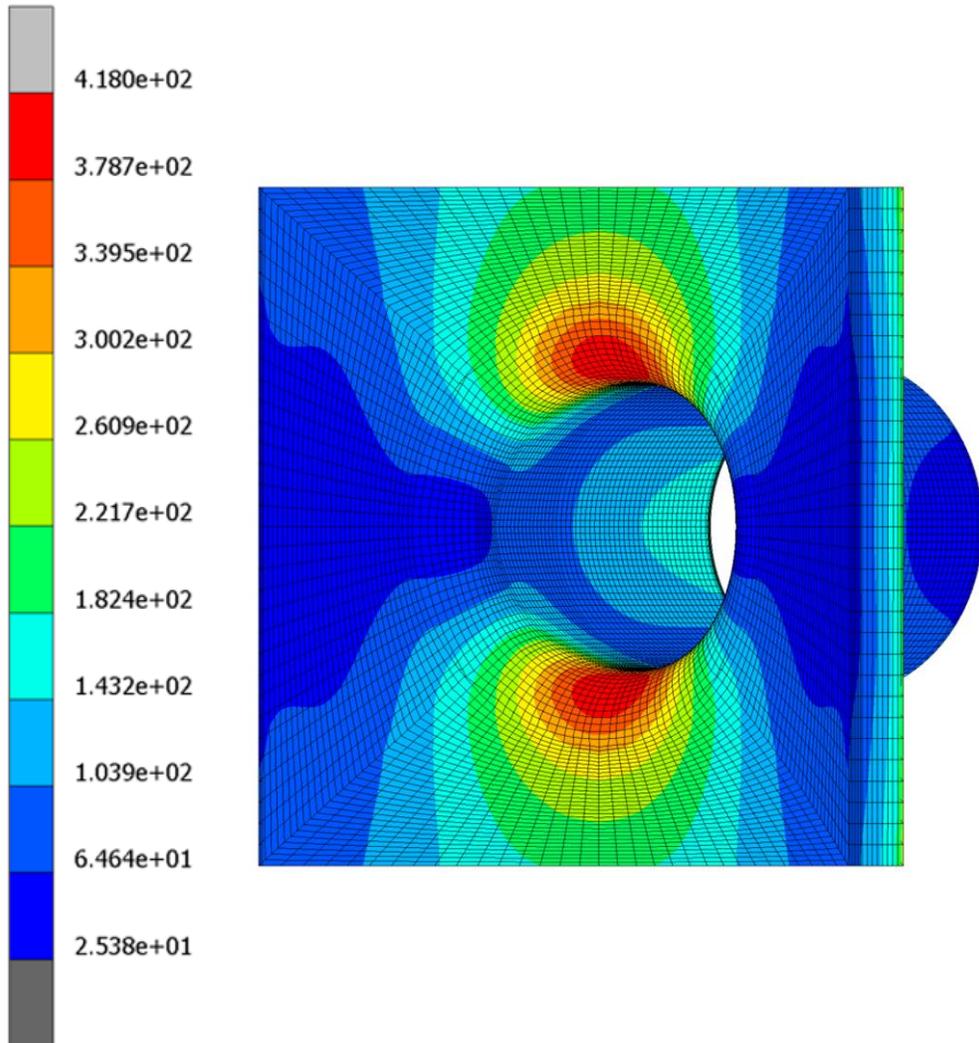


-10 K

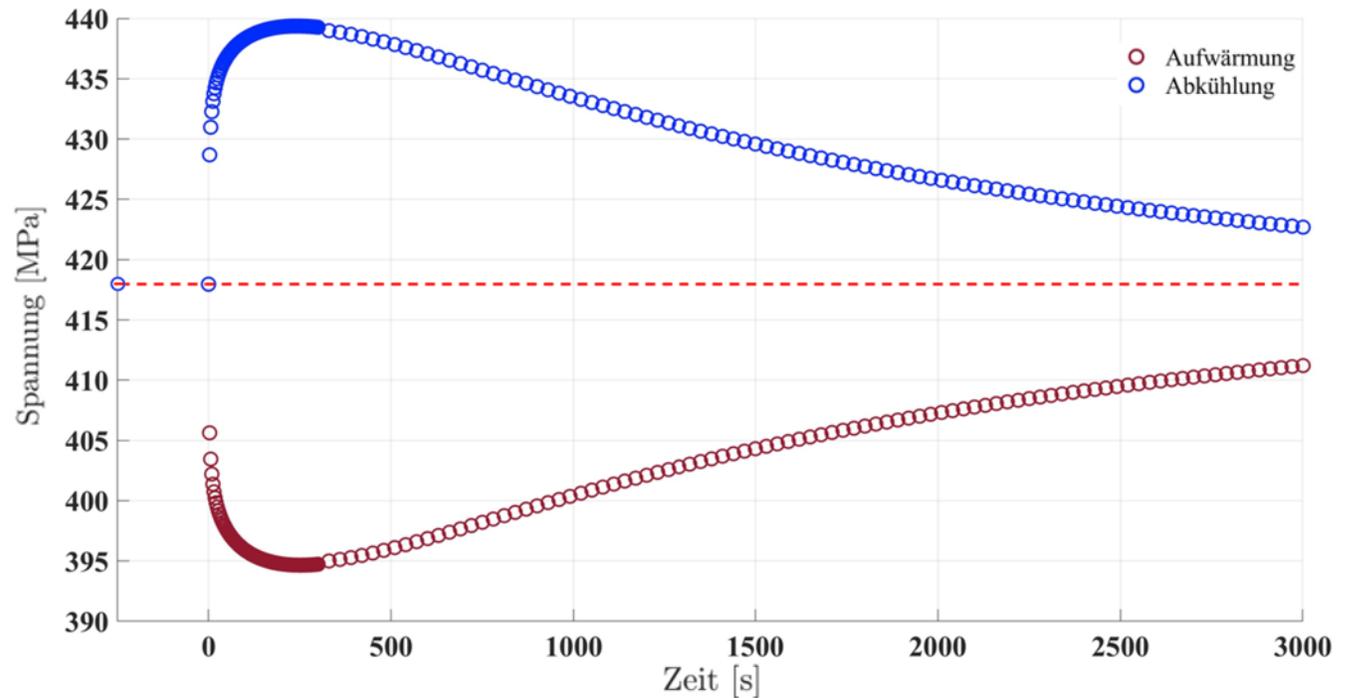


FEM-Modell des Rohrstutzens von VVER 1200 – Simulationsergebnisse II.

- Spannungsbild wird durch die mechanische Spannung aufgrund des Innendrucks bestimmt
- kritische Stelle befindet sich an der Übergangsfläche

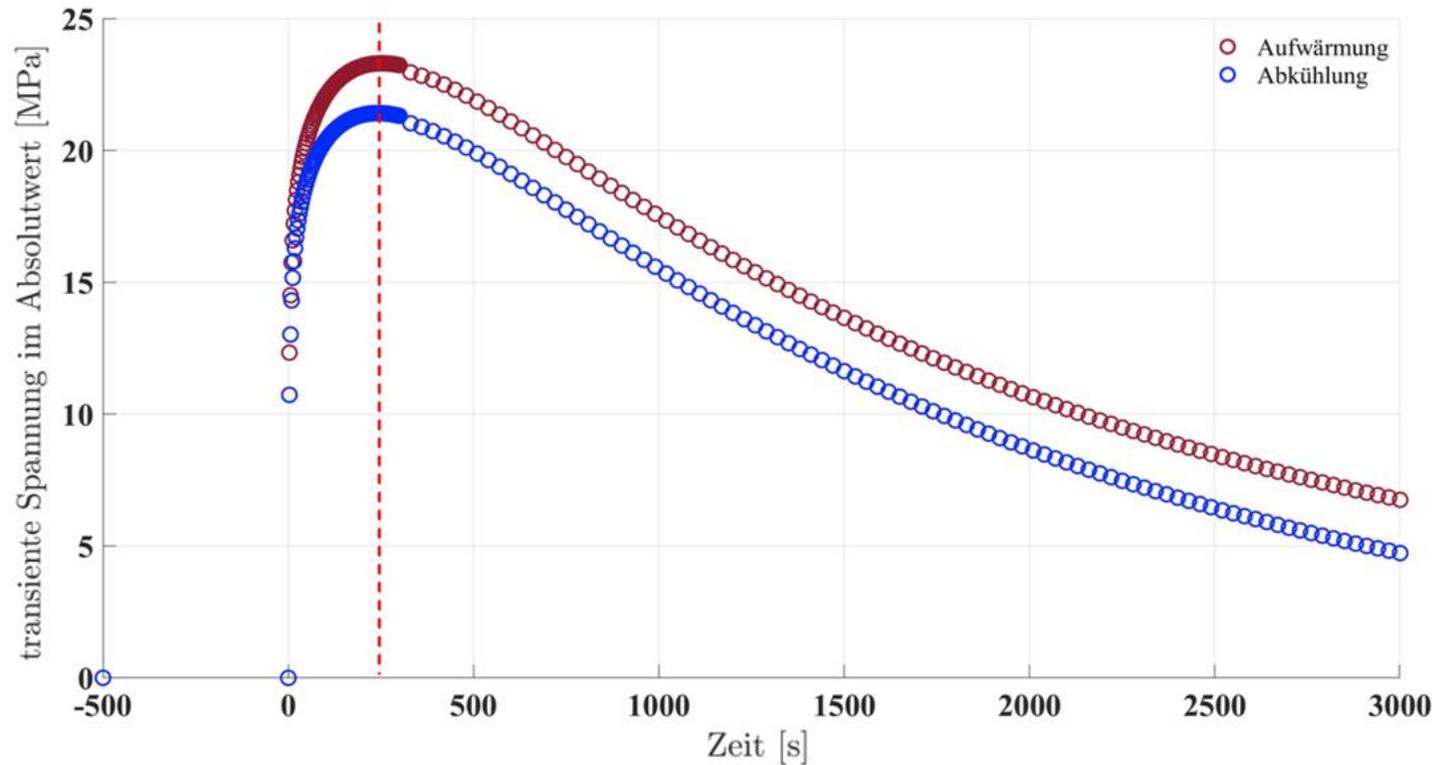
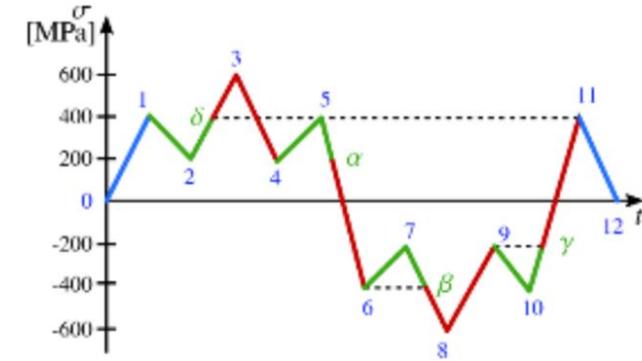


$$\sigma = \frac{E}{1 + \nu} \left[\varepsilon + \frac{\nu}{1 - 2\nu} \varepsilon_I \mathbf{E} \right] - \frac{E}{1 - 2\nu} \alpha (T - T_{\text{ref}}) \mathbf{E}$$



Bestimmung der Schädigung

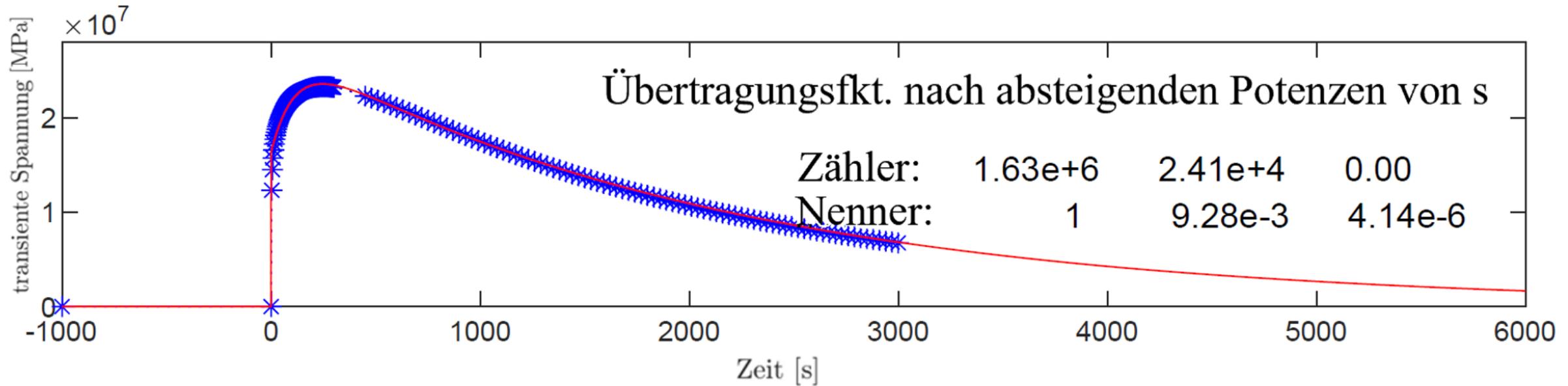
- Die Größe der Spannungsamplitude zählt, nicht deren Richtung → $\delta = 2 \cdot \left(\frac{|\sigma - \sigma_r|}{2(\sigma_f' - \sigma_m)} \right)^{-\frac{1}{b}}$
- Die Rainflow Methode ist konservativer
- Die Lorenzo-Ray Methode berücksichtigt nur den Belastungsabschnitt



		<i>D</i> -Wert
Aufwärmung	Rainflow	$2,89 \cdot 10^{-6}$
	Lorenzo-Ray	$3,62 \cdot 10^{-7}$
Abkühlung	Rainflow	$2,14 \cdot 10^{-6}$
	Lorenzo-Ray	$1,59 \cdot 10^{-7}$

Leistungsregelungsmodell I.

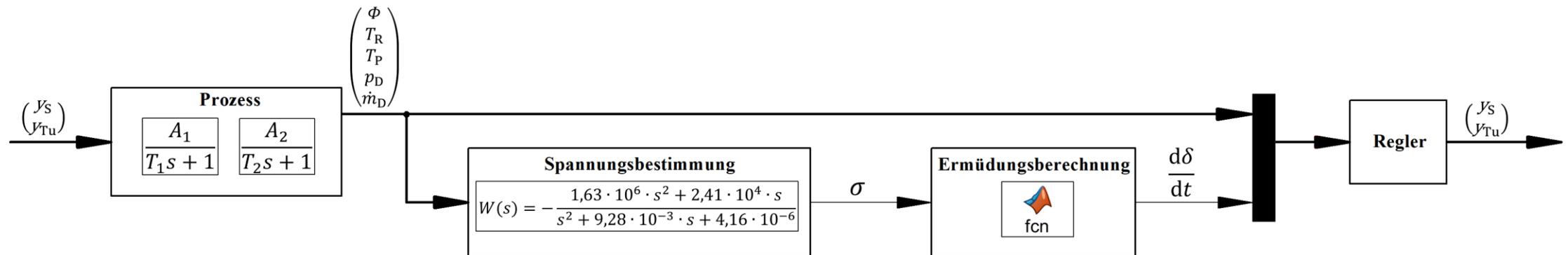
- Lorenzo-Ray-Methode kann aufgrund der zeitabhängigen Beschreibung einfach implementiert werden
- Annäherung des Spannungsverlaufs mit der Übertragungsfunktion



$$W(s) = \frac{1,63 \cdot 10^6 \cdot s^2 + 2,41 \cdot 10^4 \cdot s}{s^2 + 9,28 \cdot 10^{-3} \cdot s + 4,14 \cdot 10^{-6}}$$

Leistungsregelungsmodell II.

- gemessene Variablen: Neutronenfluss, Reaktortemperatur, durchschnittliche Primärkreistemperatur, Dampfdruck, Dampf-Massenstrom
- berechnete Variable: Schädigungsrate
- geregelte Parameter: Stabposition, Turbinenventilposition
- dominante Speichereffekte: Wassermasse des Primärkreises (Energiespeicher), Dampfvolumen des Sekundärkreises (Materialspeicher)



Danke für die Aufmerksamkeit!

