

Optimierung der Temperaturregelung eines Diffusionsofens

BACHELORARBEIT ABSCHLUSSPRÄSENTATION VON TOBIAS EICHBERGER



In Kooperation mit der Firma Vishay



Motivation

Herstellungsprozesse von Halbleitern:

- **Oxidation**

- Fotolithographie

- Ätzen

- **Diffusion**

- ...



Thermisch aktivierte Diffusionsprozesse, welche einer präzisen Temperaturführung bedürfen

Anforderungen:

- Geringe Streuung der Bauteilparameter

- Homogene Eindringtiefen der Dotierstoffe

Ziel: möglichst konstante Wafertemperatur bei Diffusionsprozessen

Der Diffusionsofen

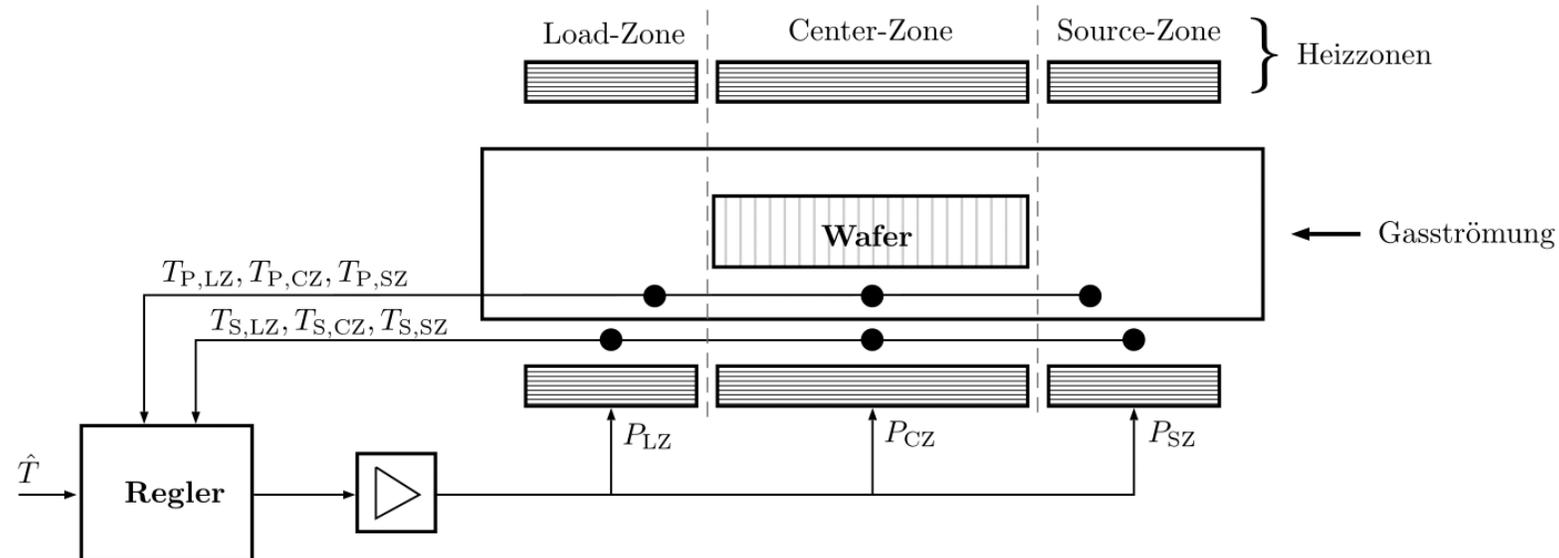
3 Zonen

- Load Zone
- Center Zone
- Source Zone

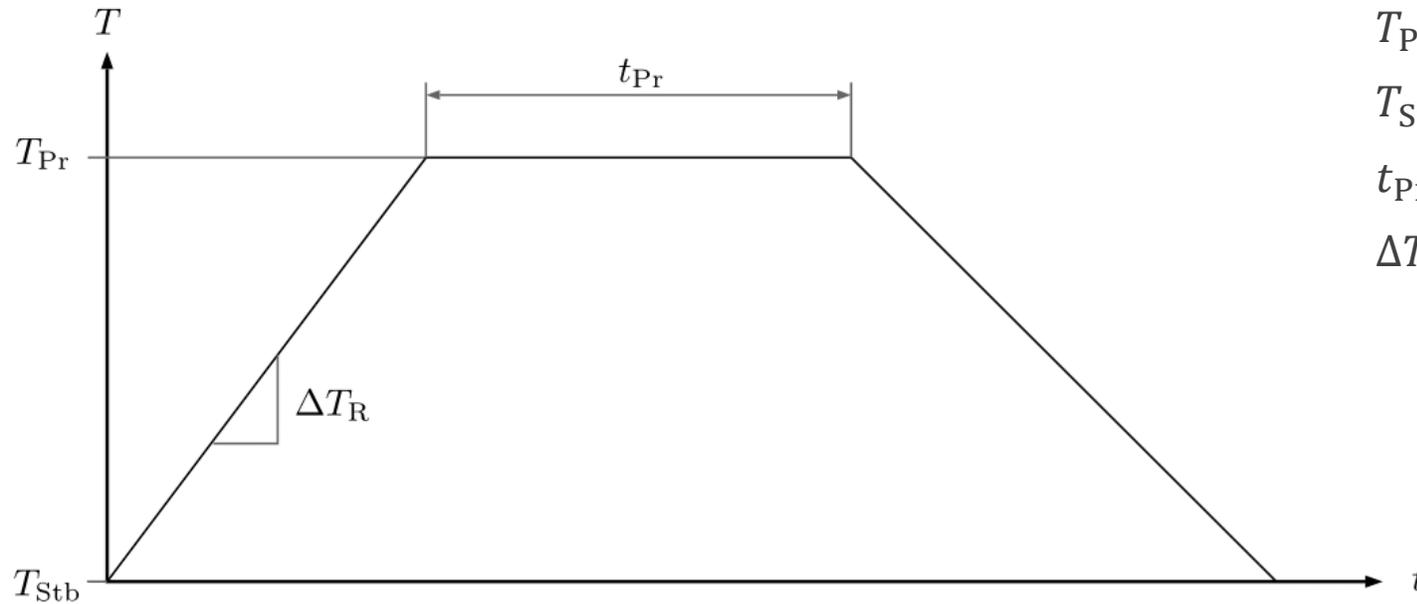
Ein Heizelement pro Zone

6 Messpunkte

- ein Messpunkte pro Zone nahe Wafer(Profile)
- ein Messpunkte pro Zone nahe Heizwendel(Spike)



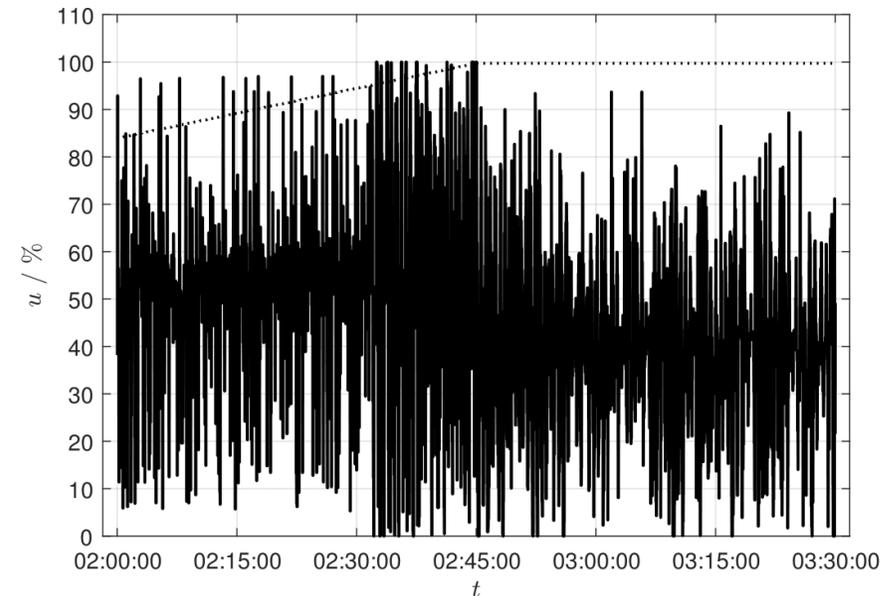
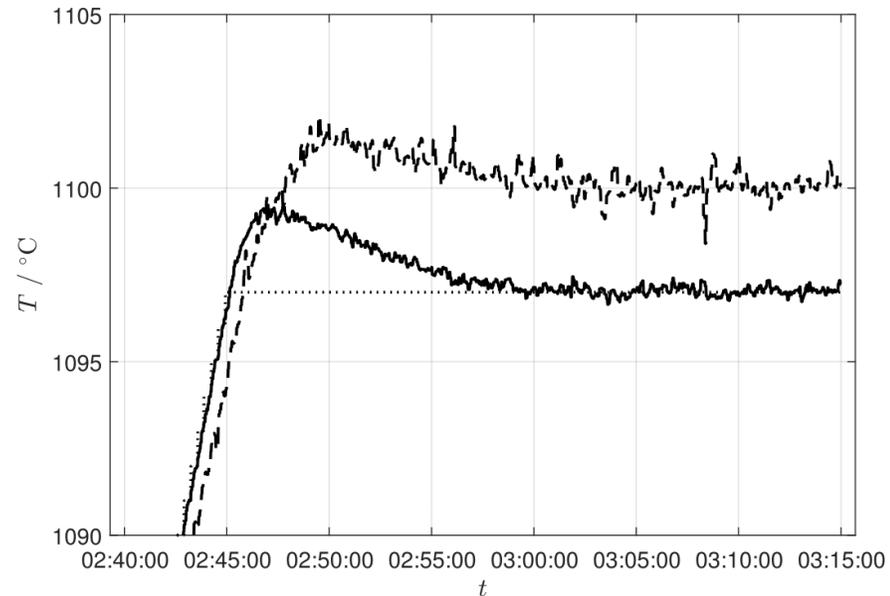
Typischer Prozessverlauf



T_{Pr} ... Prozesstemperatur
 T_{Stb} ... Standby-Temperatur
 t_{Pr} ... Prozessdauer
 ΔT_{R} ... Heizrate

Problemstellungen

- Überschwingen
- Temperaturschwankungen
- Schwankungen der Stellgröße



Modellierung

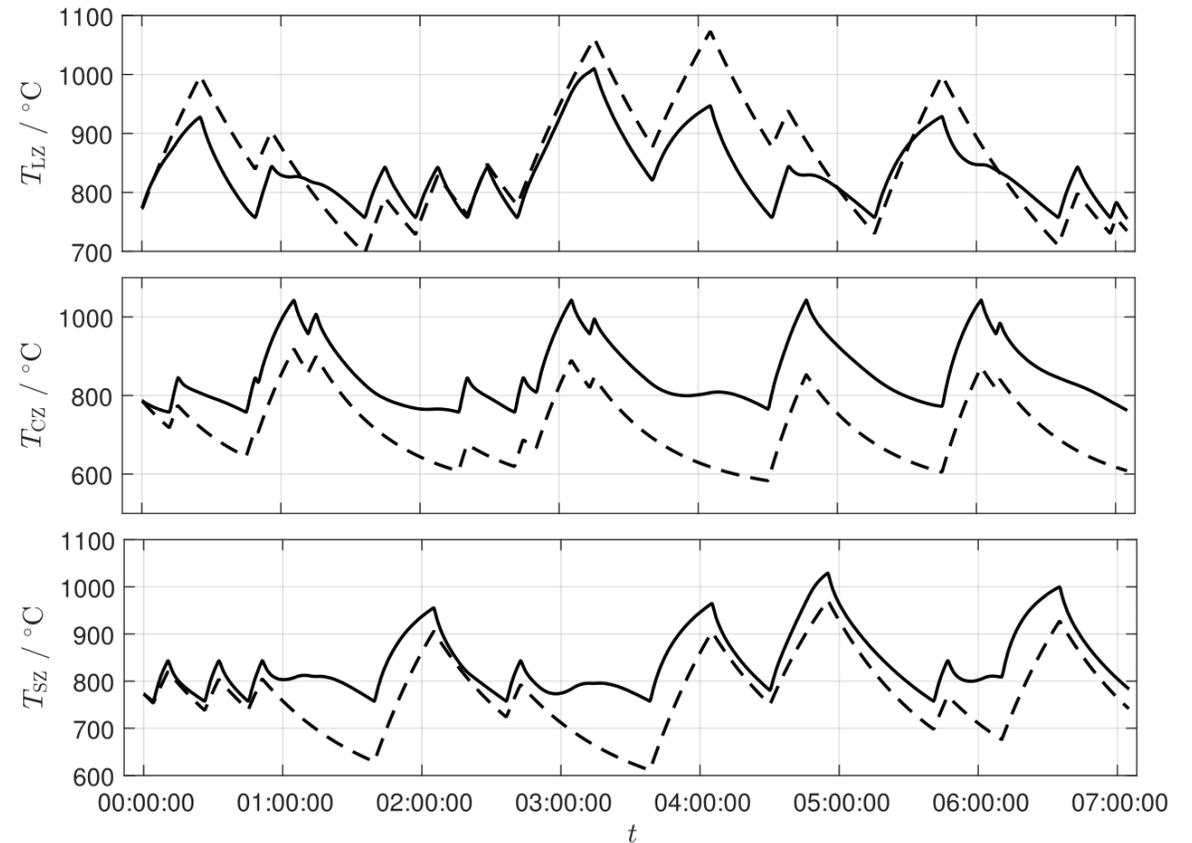
Entkoppelte lineare Einzonenmodelle:

$$G(s) = \frac{b}{s + a} \cdot e^{-sT_t}$$

T_t ... Totzeit

a, b ... freie Koeffizienten

Temperatur / °C	FIT Wert / %		
	LZ	CZ	SZ
650-800	-5,1	-135,4	-59,1
800-1000	-3,3	-82,7	-24,3
1000-1100	-965,8	-66,0	-176,7



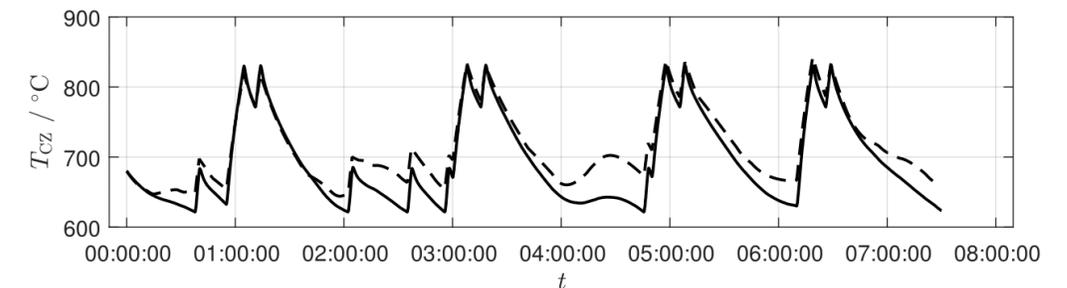
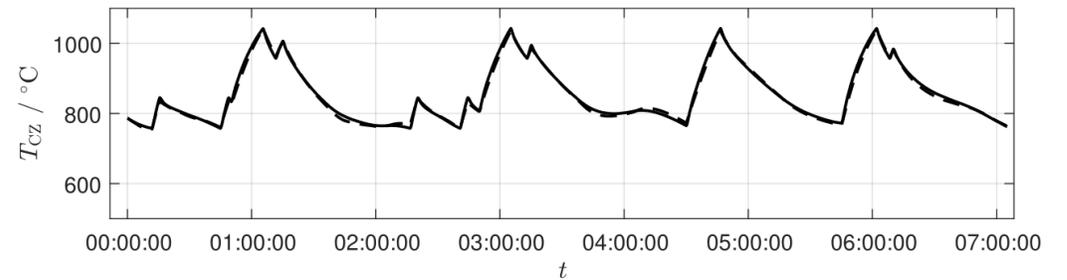
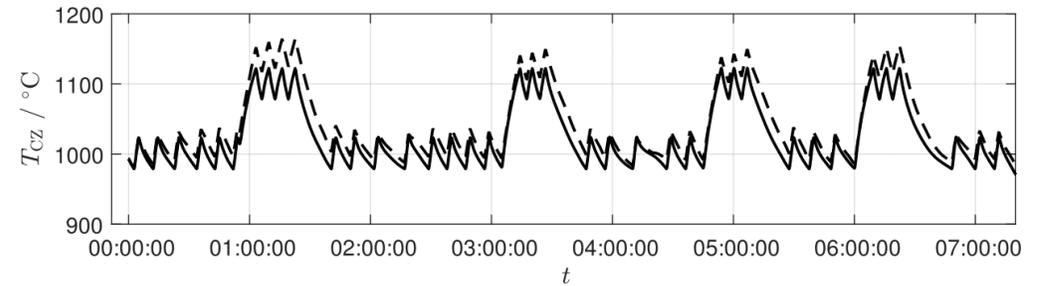
Modellierung

Lineares Mehrzonenmodell:

$$\dot{\mathbf{T}} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{T} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}$$

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_{LZ} \\ u_{CZ} \\ u_{SZ} \end{bmatrix} \quad \mathbf{T} = \begin{bmatrix} T_{LZ} \\ T_{CZ} \\ T_{SZ} \end{bmatrix}$$

Temperatur / °C	FIT Wert / %		
	LZ	CZ	SZ
650-800	53,4	58,1	53,9
800-1000	89,6	91,6	85,5
1000-1100	46,7	51,1	62,9



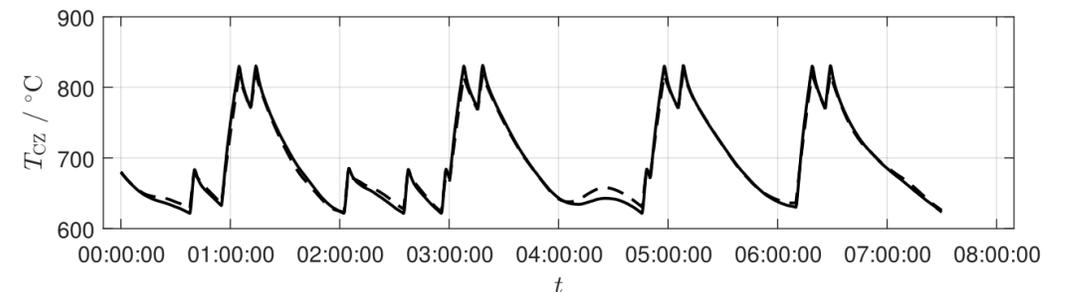
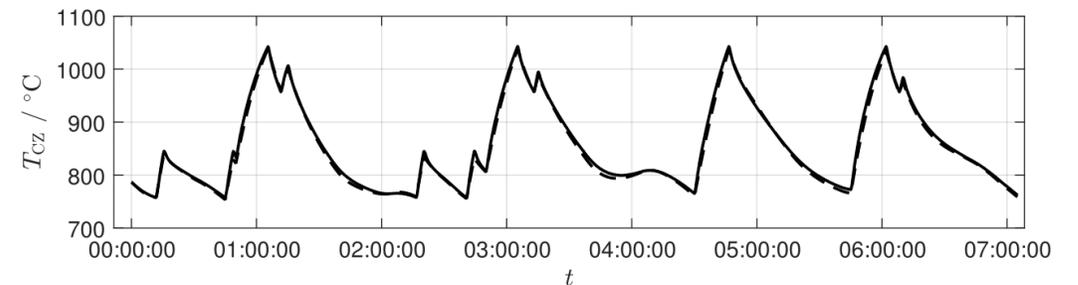
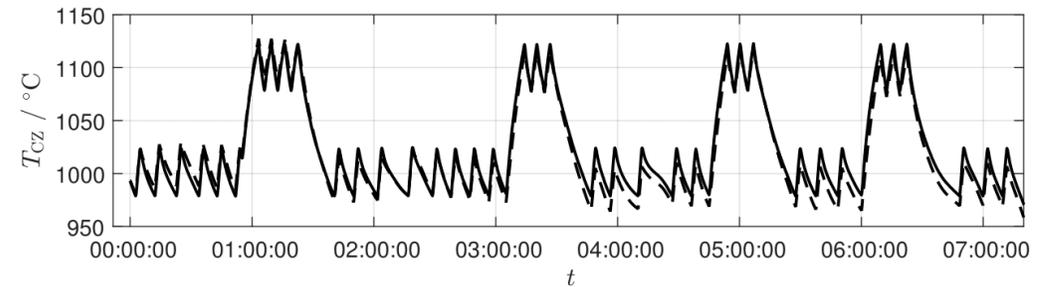
Modellierung

Nichtlineares Mehrzonenmodell:

$$\dot{\mathbf{T}} = A \cdot \mathbf{T} + S \cdot \mathbf{T}^4 + \mathbf{k}_U + B \cdot \mathbf{u}$$

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_{LZ} \\ u_{CZ} \\ u_{SZ} \end{bmatrix} \quad \mathbf{T} = \begin{bmatrix} T_{LZ} \\ T_{CZ} \\ T_{SZ} \end{bmatrix}$$

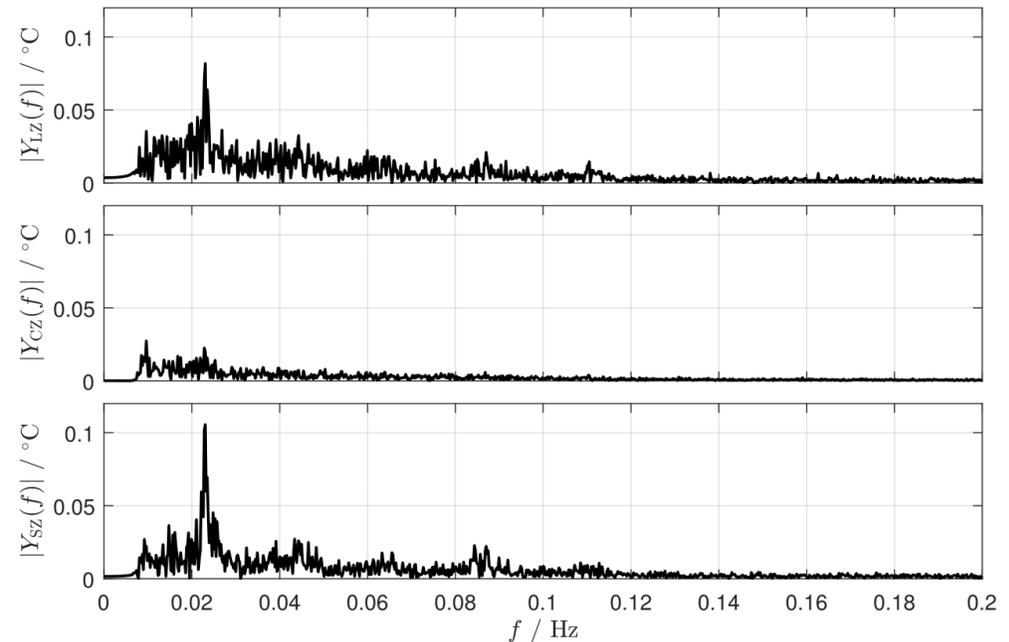
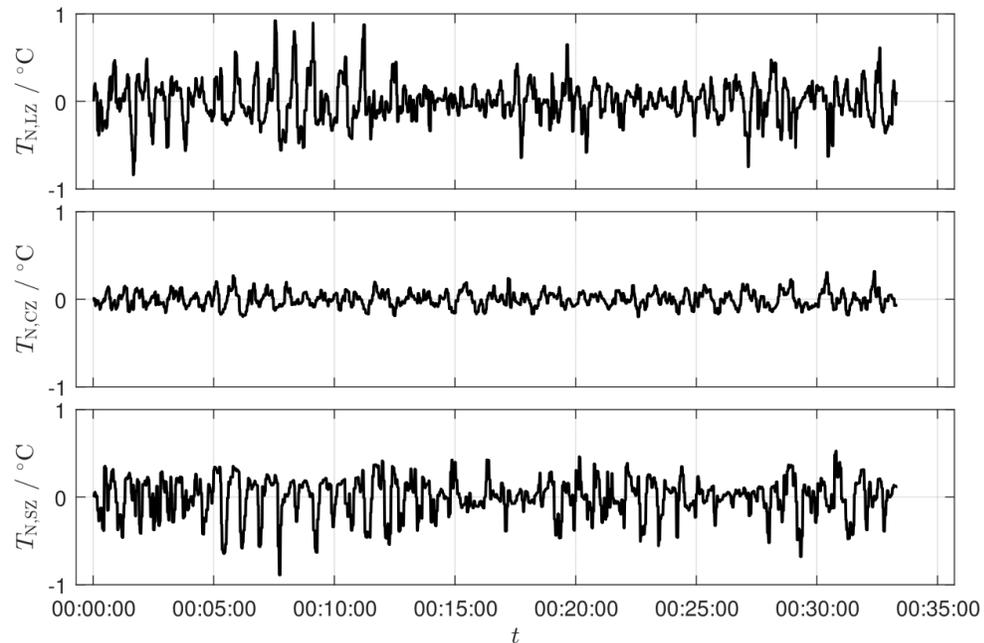
Temperatur / °C	FIT Wert / %		
	LZ	CZ	SZ
650-800	91,1	90,1	84,8
800-1000	86,9	92,2	83,7
1000-1100	66,2	79	66



Analyse der Prozessstörung

Monofrequente Störung mit $f \approx 0,023$ Hz

- Kein Einfluss des Reglers
- Kein Einfluss einer Gasströmung



Regelparametertuning durch Optimierung

Definition der Kostenfunktion:

$$J(\theta) = \left\| \sigma_{\ddot{U}} \cdot \sum_{n=N_1}^{N_2} \mathbf{e}_n^2 + \sigma_E \cdot \sum_{n=N_2}^{N_3} \mathbf{e}_n^2 + \sigma_U \cdot \sqrt{\frac{1}{N_3 - N_2 - 1} \sum_{n=N_2}^{N_3} (\mathbf{u}_n - \bar{\mathbf{u}})^2} \right\|$$

mit

$$\theta = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_P \\ \mathbf{T}_N \end{bmatrix} \quad \bar{\mathbf{u}}(\theta) = \frac{1}{N_3 - N_2} \cdot \sum_{n=N_2}^{N_3} \mathbf{u}_n$$

$$\mathbf{e}_n(\theta) = \tilde{\mathbf{T}}_n(\theta) - \mathbf{T}_n$$

Das Optimierungsproblem:

$$\begin{array}{ll} \min_{\theta} & \mathbf{J}(\theta) \\ \text{s.t.} & \theta > 0 \end{array}$$

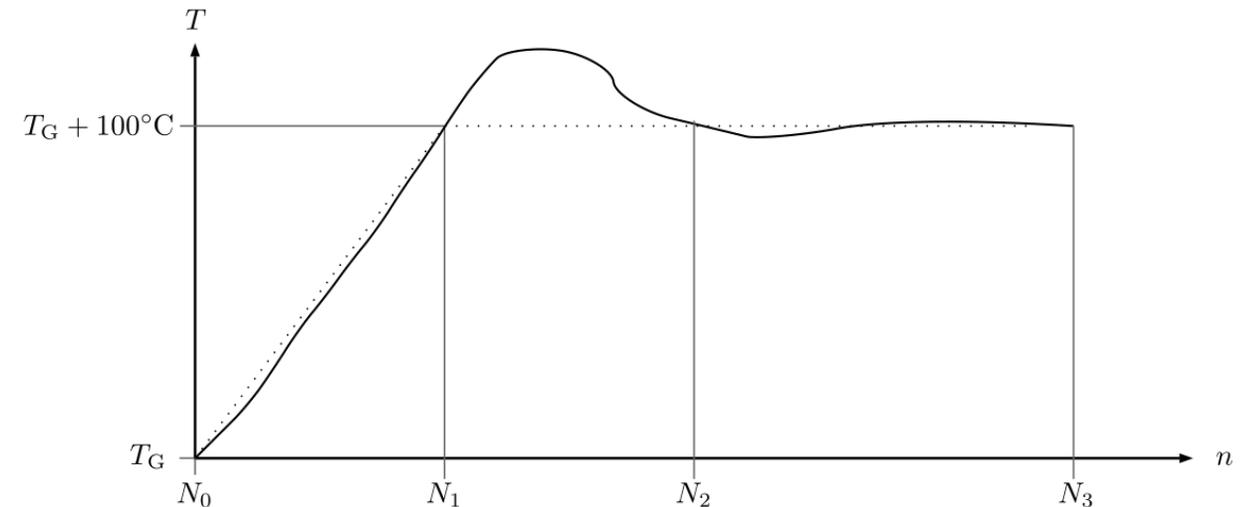
θ ... Parametervektor

$\sigma_{\ddot{U}}, \sigma_E, \sigma_U$... Gewichtungsfaktoren

$\tilde{\mathbf{T}}_n$... simulierte Temperatur zum Zeitschritt n

\mathbf{T}_n ... Solltemperatur zum Zeitschritt n

\mathbf{u}_n ... Stellgröße zum Zeitschritt n

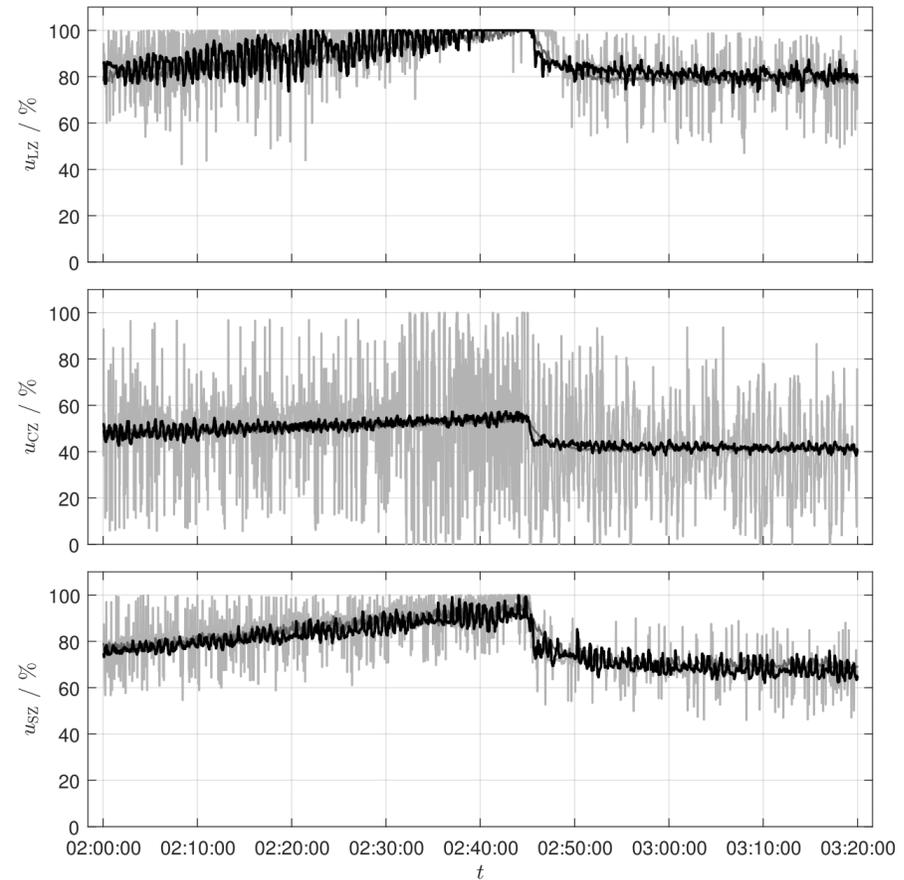
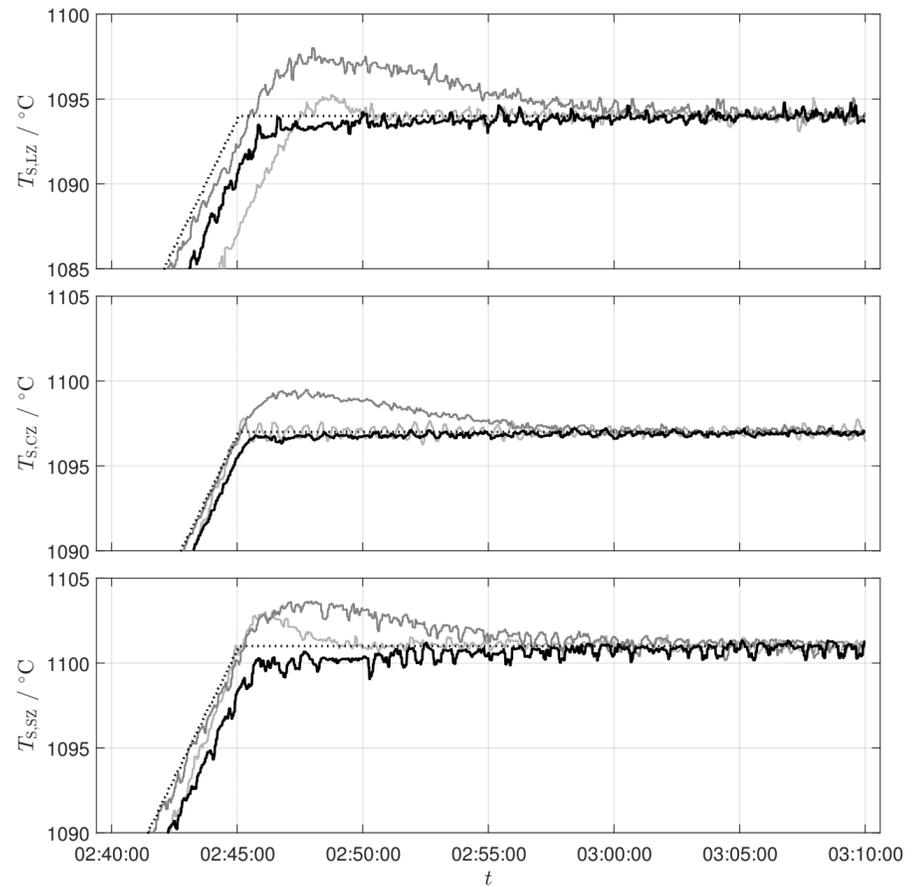


Regelparameterertuning durch Optimierung

Vergleich der optimierten Parameter mit den bestehenden der PID- und PI Einstellungen für den Temperaturbereich 1050 °C bis 1150°C:

	LZ			CZ			SZ		
	X_P	T_N	T_V	X_P	T_N	T_V	X_P	T_N	T_V
	%	s	s	%	s	s	%	s	s
PID	0,8	52	8,7	0,1	23	3,8	1,1	55	9,2
PI	2,5	250	0	2,5	250	0	2	200	0
PI optimiert	0,7	3030	0	0,9	4550	0	0,8	3160	0

Regelparametertuning durch Optimierung



Verbesserung durch eine Vorsteuerung

Stellgröße zum Aufheizen wird vorgegeben durch

$$\mathbf{u}_V = \mathbf{B}^{-1} \cdot \dot{\mathbf{T}}$$

- Entlastung des Reglers
- Genaue Folge der Solltrajektore beim Aufheizen möglich
- Zeitgewinn im Vergleich zur Prozessdauer gering

