

# Quantitative Bewertung von Randeffekten bei einer einfachen thermografischen Transmissionsmessung mittels FEM

Rainer KRANKENHAGEN<sup>1</sup>, Ester D'ACCARDI<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

<sup>2</sup> Politecnico Di Bari, Bari, Italien

Kontakt E-Mail: rainer.kranchenhagen@bam.de

## Kurzfassung

Der Einsatz von Simulationen mit FEM (Finite Element Method) ermöglicht die quantitative Beschreibung von Wärmeleitungsprozessen in komplexen Geometrien, bei denen analytische Ansätze nicht angewandt werden können, weil die zugrunde liegenden Vereinfachungen nicht gelten. Bei der genauen Modellierung eines kompletten thermografischen Experiments sieht sich der Modellierer einer ganzen Reihe von technischen und physikalischen Parametern gegenüber, die nicht immer bekannt sind und daher geschätzt werden müssen.

Im konkreten Fall wurde ein relativ einfaches Experiment mit einfachen Geometrien betrachtet: ein durch Additive Manufacturing gefertigter Metallblock wurde mit einem Laserpuls homogen erwärmt. Aus dem Zeitverlauf der Oberflächentemperatur an der nicht erwärmten Rückseite des gleichmäßig dicken Blocks sollte die thermische Diffusivität des Volumenmaterials ermittelt werden. Bei dem Versuch, die experimentellen Daten durch eine passende Simulation zu beschreiben, ergab sich zunächst eine deutliche Abweichung: die gemessenen Temperaturen waren generell zu niedrig, was auf einen zusätzlichen Wärmeverlustmechanismus hinwies. Es erwies sich, dass die freie Auflage des Materialblocks auf einem flachen Bolzen zur Probenfixierung bei der Simulation des Experiments zu berücksichtigen ist, um eine gute Übereinstimmung zwischen Experiment und thermischer Simulation zu erzielen. Der Beitrag illustriert damit die Möglichkeiten und Potentiale von FEM-Simulationen bei der quantitativen Bewertung von thermografischen Inspektionen zur zerstörungsfreien Prüfung.



28.-29.9.2022: Thermographie-Kolloquium 2022

---

## Quantitative Bewertung von Randeffekten bei einer einfachen thermografischen Transmissionsmessung mittels FEM

Rainer Krankenhagen (Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung)

Ester D'Accardi (Politecnico di Bari)

---

1

### Gliederung

---

1. Einführung
  2. FEM COMSOL Modell
  3. Erweiterung
  4. Experimentelle Verifikation
  5. Zusammenfassung
- 

2

2

## Einführung



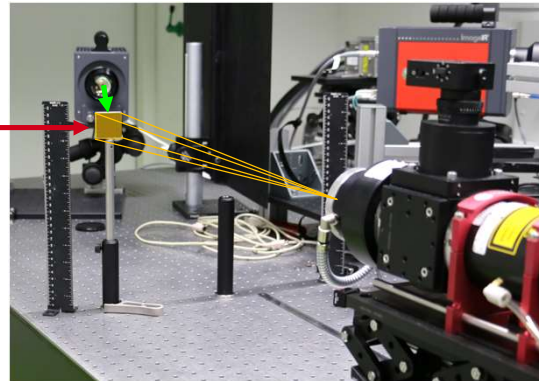
Ziel:

Untersuchung der Materialeigenschaften von AM-gefertigtem AISI 316 Stahl  
(Pulverbett-Verfahren)

Laserflash-Methode ( $\lambda=940\text{ nm}$ )  
zur Bestimmung der thermischen Diffusivität  
(schwarze Beschichtung an Vorder- und Rückseite)



3,5 x 3,5 x 1 (in cm)



29.8.2022 Quantitative Bewertung von Randeckten mittels FEM

3

3

## Einführung



Ziel: Bestimmung der Diffusivität nach Parker

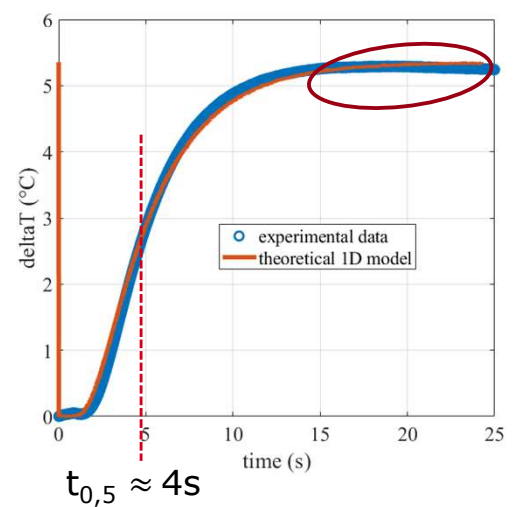
Standardverfahren gemäß DIN EN 821-2

Parker-Fit gemäß Anhang A der Norm  
mit folgenden Vereinfachungen:

- 1 D Modell
- keine Wärmeverluste
- Gleichmäßige Erwärmung
- Pulslänge  $\leq 2\%$  von  $t_{0,5}$   
hier 25%

Not i.O.

Not i.O.



29.8.2022 Quantitative Bewertung von Randeckten mittels FEM

4

4

## Einführung



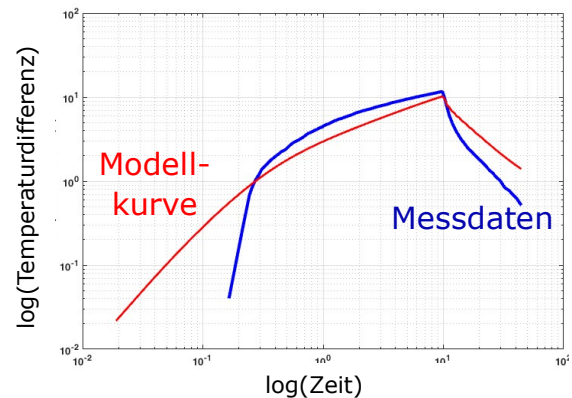
Ziel: Bestimmung der Diffusivität mit Quadrupol-Methode

Prinzip:

Analytische Lösung der kompletten Wärmeleitungsgleichung im Laplace-Raum in 1 D

(berücksichtigt Pulsform und Wärmeverluste)

Parameter der Lösung werden durch Anpassung von **Modellkurven** an die Messdaten bestimmt



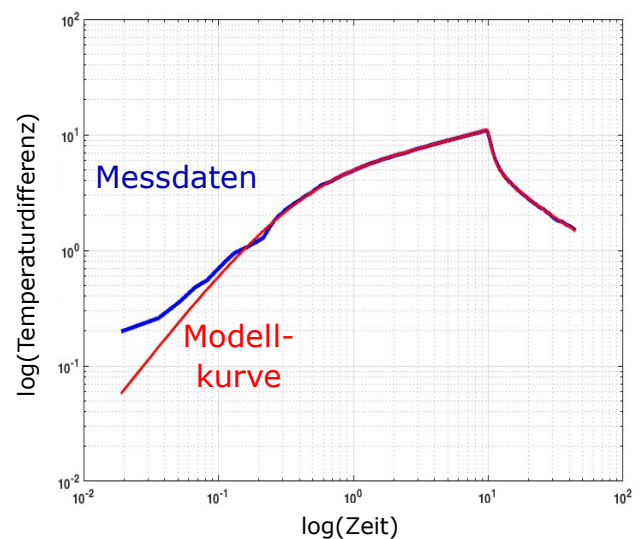
5

## Einführung



Ziel: Bestimmung der Diffusivität mit Quadrupol-Methode

(Start-) Wert	Fit	
0.002	<input type="checkbox"/> L1 (m)	Dicke
35224	<input type="checkbox"/> alpha1 (1/m)	Diffusivität
1.94e-07	<input type="checkbox"/> D1 (m <sup>2</sup> /s)	
0	<input type="checkbox"/> R	
970	<input type="checkbox"/> e1 (Ws <sup>0.5</sup> K/m <sup>2</sup> )	therm.
2300	<input type="checkbox"/> e2 (Ws <sup>0.5</sup> K/m <sup>2</sup> )	Verluste
10	<input type="checkbox"/> h (W/m <sup>2</sup> )	
30000	<input type="checkbox"/> Q (W/m <sup>2</sup> )	
10 0 0 0	<input type="checkbox"/> tau (s)	Pulsform
Exp1Exp2-HalogenPulse	Pulsform	
3e-1	Startzeit (s)	
1e10	Endzeit (s)	
0	Delayzeit	
16	Inversionsparameter	



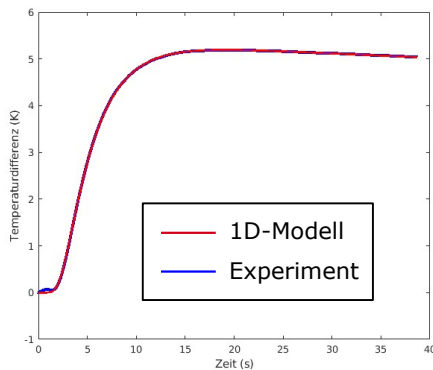
6

## Einführung



Ziel: Bestimmung der Diffusivität mit Quadrupol-Methode

Ergebnis des Fits:



Perfekter Fit  
aber:

Relativ starke Wärmeverluste:  $h \approx 45 \text{ W/m}^2/\text{K}$   
(typischer Wert ist  $10 \text{ W/m}^2/\text{K}$ )

Daten nicht konsistent:

Fit vs. Materialkennwerte (Dichte und spez.  
Wärmekapazität)

→ COMSOL Modell zur besseren Quantifizierung  
der Verluste

7

## COMSOL-Modell

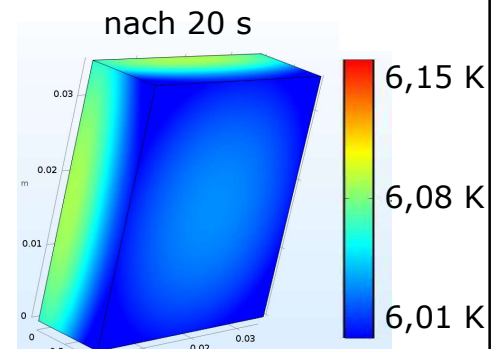
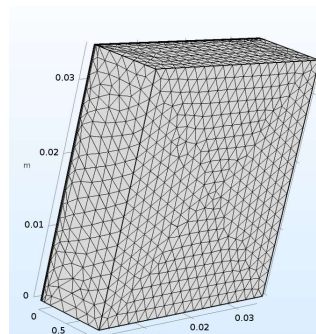


Ziel: Simulation des Experiments

Keine freien Parameter

außer Emissivität im IR + Reflektivität der Beschichtung bei  $\lambda_{\text{Laser}}$   
>0,98 (nicht messbar)    0,048 (gemessen an anderer Probe)

- 3 D Modell auf Tetraeder-Gitter mit ca. 10 Lagen
- Strahlungs- und Konvektionsverluste
- Temperaturdifferenz zur Umgebung 1,3 K
- Homogene Erwärmung
- P-Korrektur=0,94

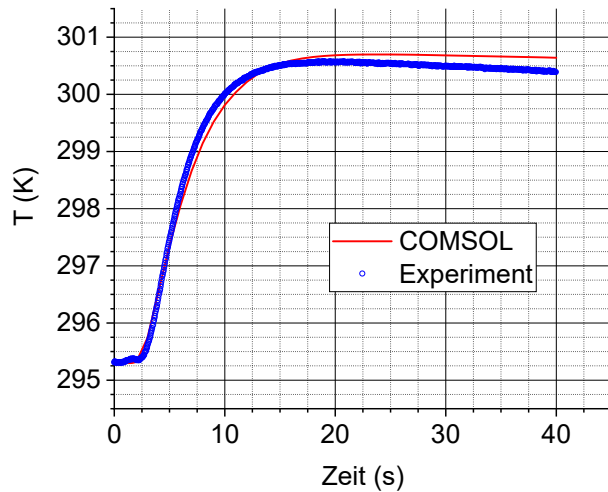


8

## COMSOL-Modell



Vergleich mit Experiment:



Drei Abweichungen:

1. Durchwärmung zu langsam
2. Energieeintrag zu hoch
3. zu langsame Abkühlung

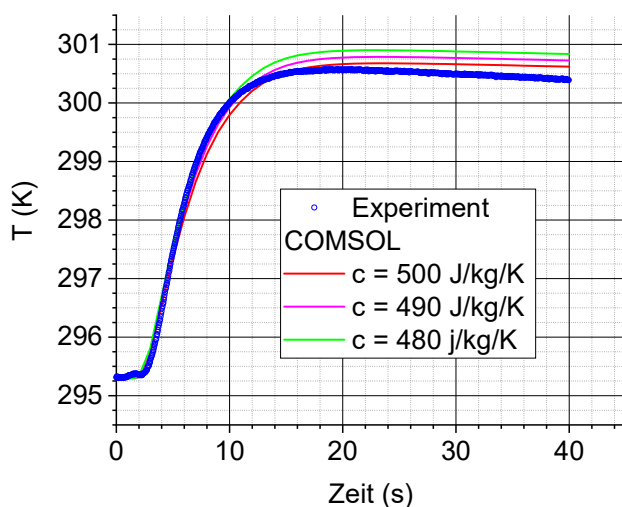
Könnte mit verringerter spezifischer Wärmekapazität erklärt werden

9

## COMSOL-Modell



Vergleich mit Experiment:



Einfluss spez. Wärmekapazität  $c$ :  
500 J/kg/K entspricht  
herkömmlichem Material

Geringerer Wert verbessert  
Anpassung bis 10 s

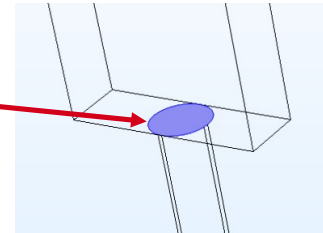
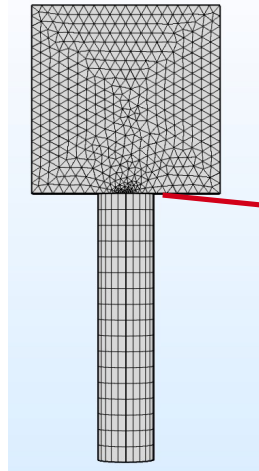
Zu schnelle Abkühlung bleibt  
( $\approx 10$  mK/s)  
→ Verluste im COMSOL Modell  
zu gering

10

## Erweitertes COMSOL-Modell



Einfluss Probenaufgabe?  
Erweiterung des COMSOL Modells



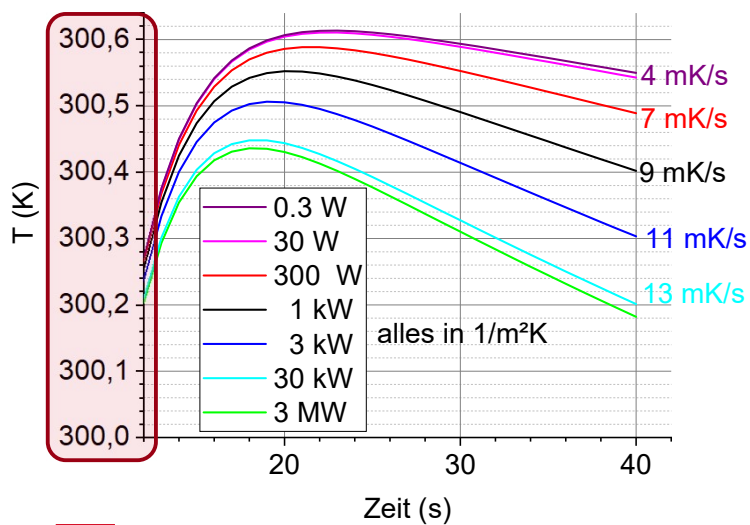
Thermischer Kontaktwiderstand  
Wert unbekannt

11

## Erweitertes COMSOL-Modell



Einfluss des thermischen Kontaktleitwerts im Modell:



Experiment: 10 mK/s

Entspricht etwa 2kW/(m²K)

Quellenvergleich:  
AutoFEM gibt für den Kontakt  
stainless steel auf stainless  
steel 2000 ... 3700 an

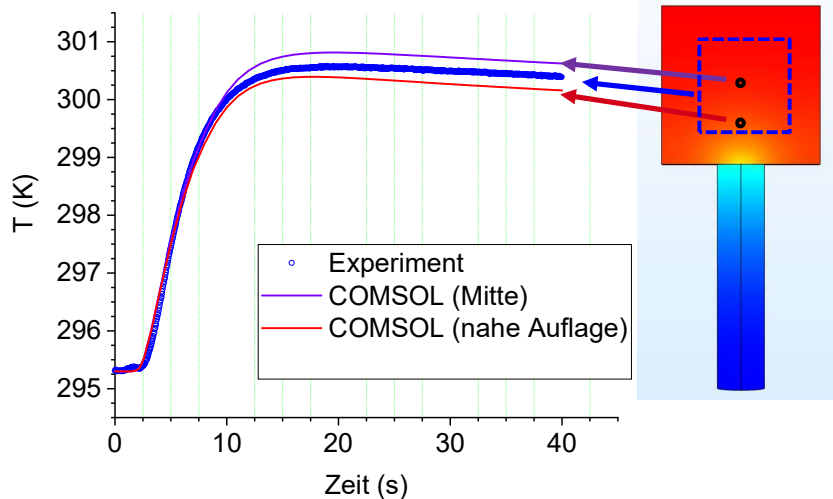
→ Größenordnung stimmt!

12

## Erweitertes COMSOL-Modell



Simulation mit optimiertem Parametersatz:



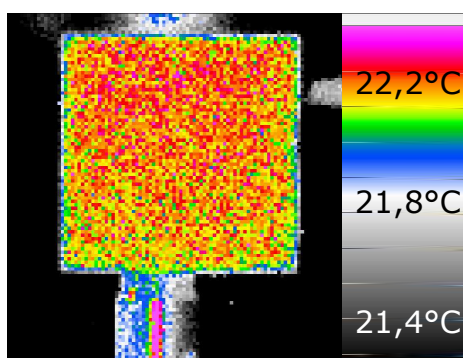
Berücksichtigung der Wärmeverluste durch Auflage führt zu einer starken Ortsabhängigkeit des Temperaturverlaufs

13

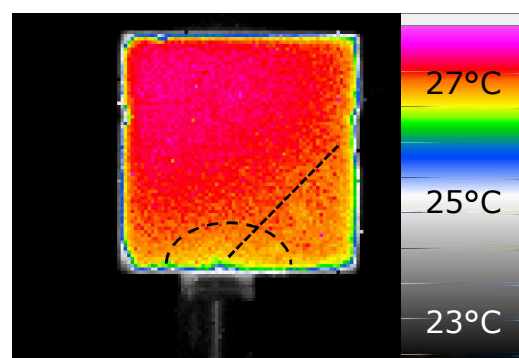
## Experimentelle Verifikation



Ist der Wärmeabfluss auch im Experiment nachweisbar?



Nullbild vor Erwärmung  
Hintergrund ca. 1,3 K kühler



Thermogramm nach 40 s  
Kontaktkühlung erahnbar,  
aber von anderem Effekt überlagert

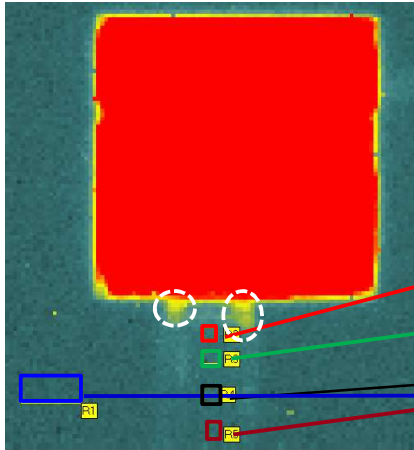
14



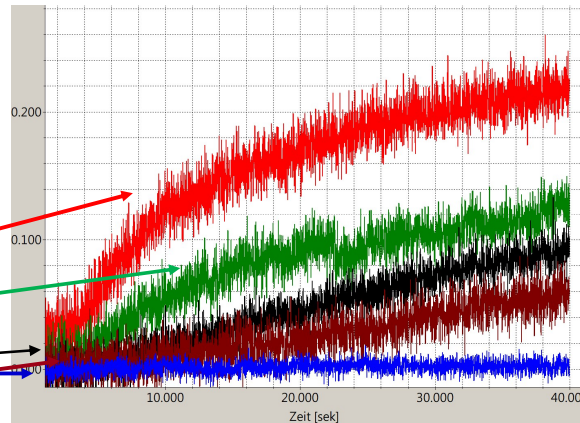
## Experimentelle Verifikation



Ist der Wärmeabfluss auch im Experiment nachweisbar?



Messung der Signalintensität  
- an Stange



Erwärmung verringert sich mit  
zunehmendem Abstand

29.8.2022 Quantitative Bewertung von Randeffekten mittels FEM

15

15

## Zusammenfassung



- Einfaches Transmissionsexperiment (Laserflash) ergab ungewöhnlich hohe Abkühlungsgeschwindigkeit an Rückseite
- FEM Simulation als Block konnte das nicht beschreiben
- Einbeziehung der Probenauflage in die Simulation konnte die Abkühlgeschwindigkeit erklären
- Ermittelter Kontaktleitwert entspricht einer Literaturangabe
- Einfluss dieser experimentellen Unzulänglichkeit auf die ermittelte Diffusivität mit der Quadrupol-Methode betrug etwa 5%.

29.8.2022 Quantitative Bewertung von Randeffekten mittels FEM

16

16