

Quantitative Bewertung von Randeffekten bei einer einfachen thermografischen Transmissionsmessung mittels FEM

Rainer KRANKENHAGEN¹, Ester D'ACCARDI²

¹ Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

² 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.



Sicherheit in Technik und Chemie



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



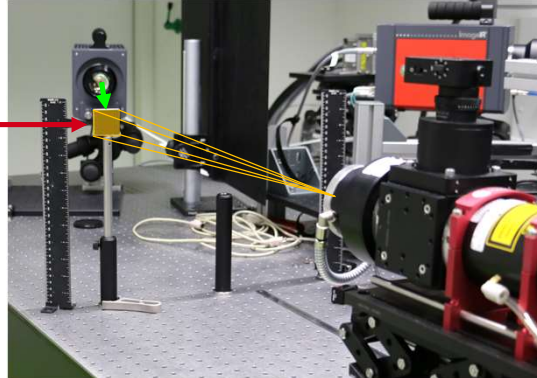
Ziel:

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)



3

Einführung



Ziel: Bestimmung der Diffusivität nach Parker

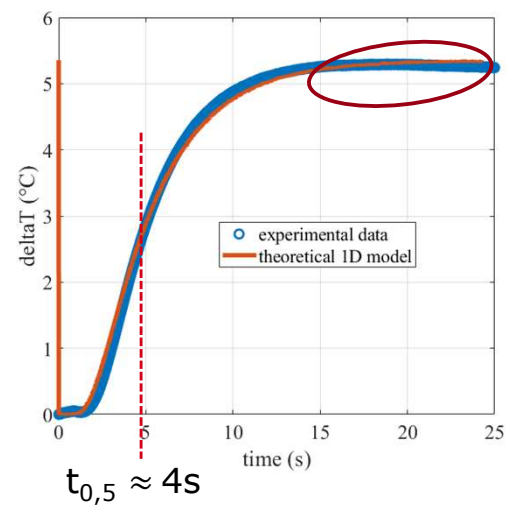
Standardverfahren gemäß DIN EN 821-2

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.



4

Einführung



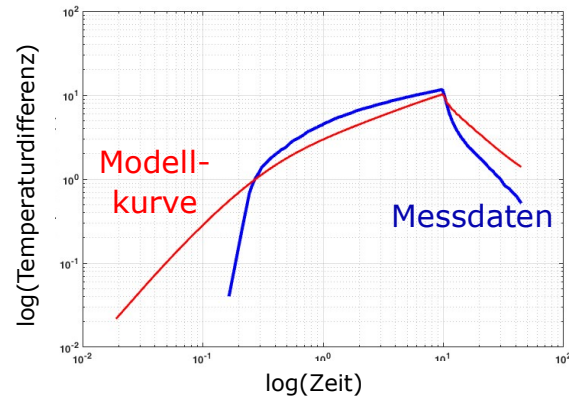
Ziel: Bestimmung der Diffusivität mit Quadrupol-Methode

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



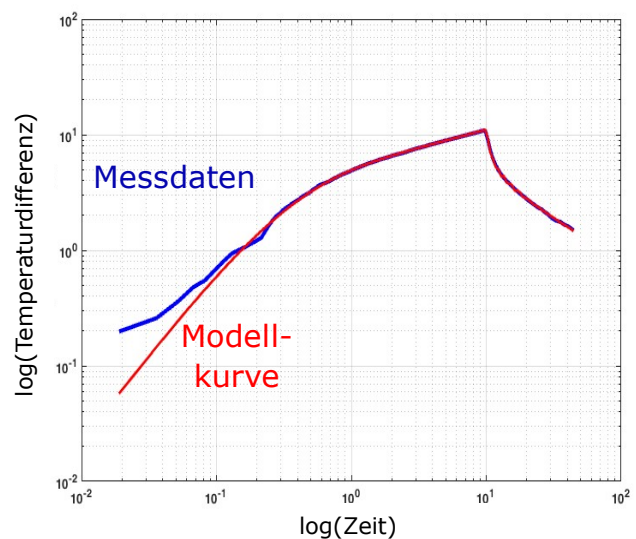
Ziel: Bestimmung der Diffusivität mit Quadrupol-Methode

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

Dicke
Diffusivität

therm.
Verluste

Pulsform



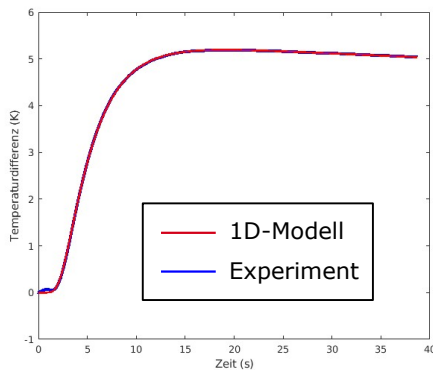
6

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

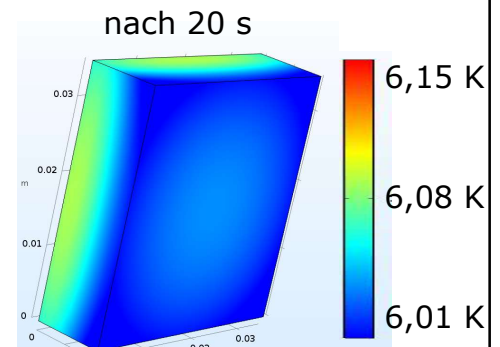
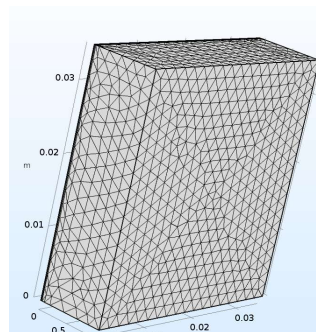


Ziel: Simulation des Experiments

Keine freien Parameter

außer Emissivität im IR + Reflektivität der Beschichtung bei λ_{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

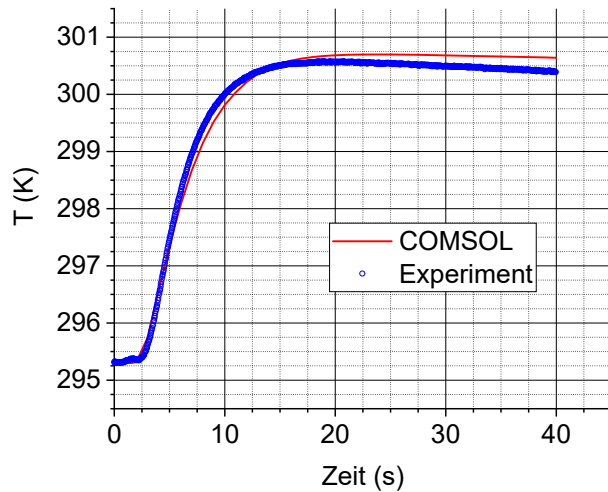


8

COMSOL-Modell



Vergleich mit Experiment:



Drei Abweichungen:

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

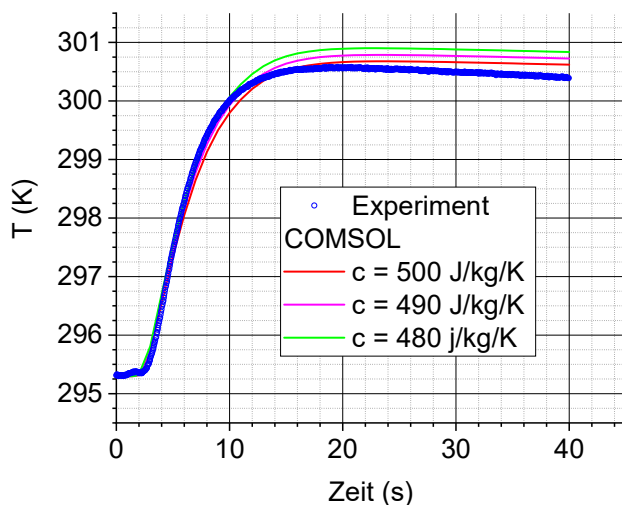
Könnte mit verringerter spezifischer Wärmekapazität erklärt werden

9

COMSOL-Modell



Vergleich mit Experiment:



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

Geringerer Wert verbessert
Anpassung bis 10 s

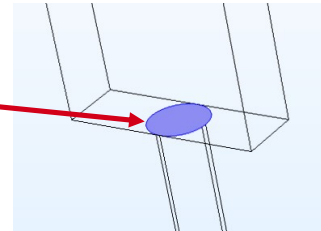
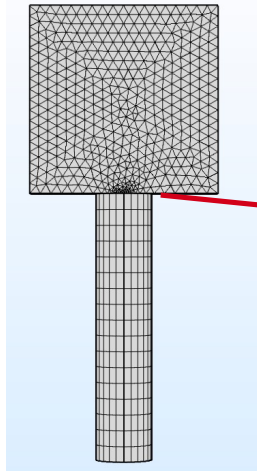
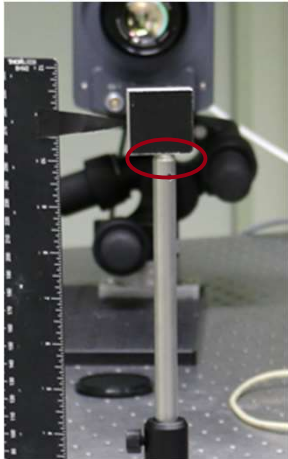
Zu schnelle Abkühlung bleibt
(≈ 10 mK/s)
→ Verluste im COMSOL Modell
zu gering

10

Erweitertes COMSOL-Modell



Einfluss Probenauflage?
Erweiterung des COMSOL Modells



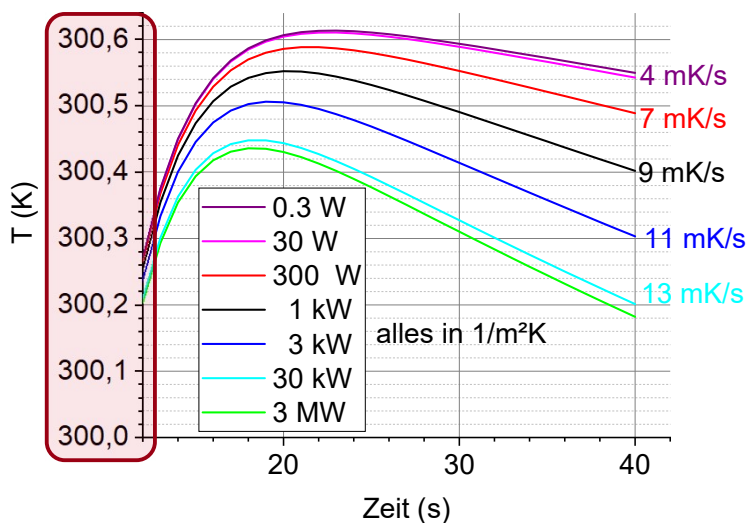
Thermischer Kontaktwiderstand
Wert unbekannt

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

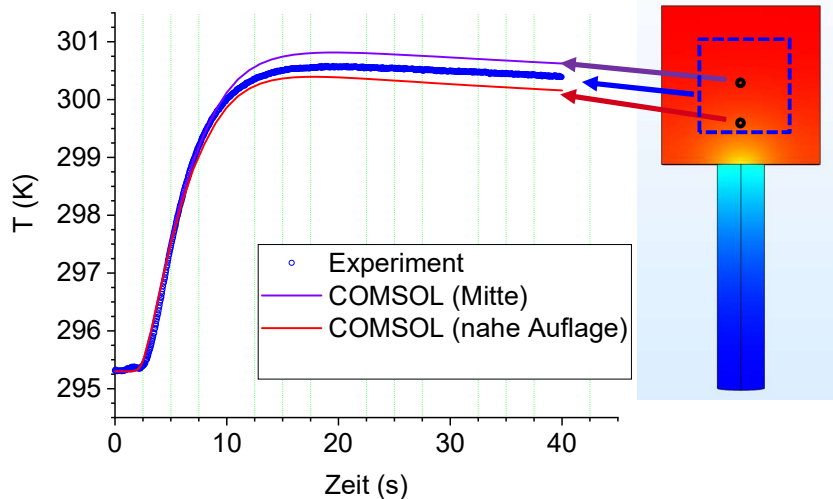
➔ Größenordnung stimmt!

12

Erweitertes COMSOL-Modell



Simulation mit optimiertem Parametersatz:



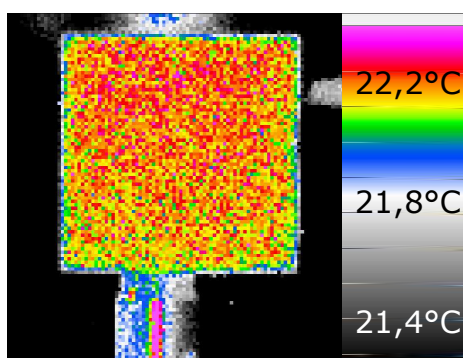
Berücksichtigung der Wärmeverluste durch Auflage führt zu einer starken Ortsabhängigkeit des Temperaturverlaufs

13

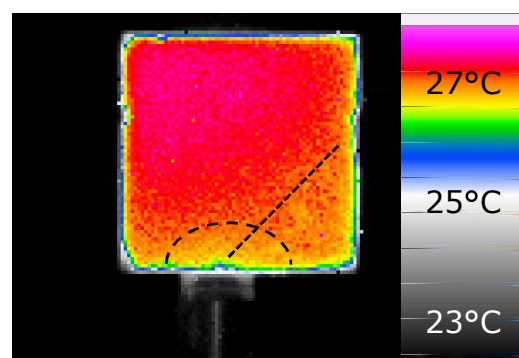
Experimentelle Verifikation



Ist der Wärmeabfluss auch im Experiment nachweisbar?



Nullbild vor Erwärmung
Hintergrund ca. 1,3 K kühler



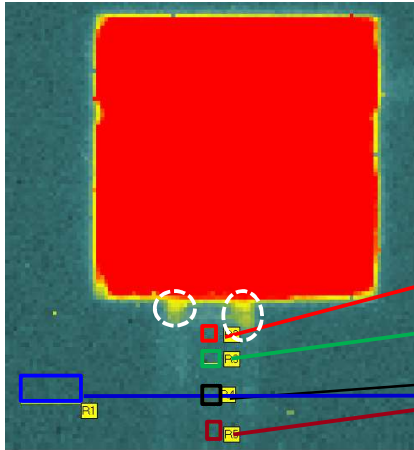
Thermogramm nach 40 s
Kontaktkühlung erahnbar,
aber von anderem Effekt überlagert

14

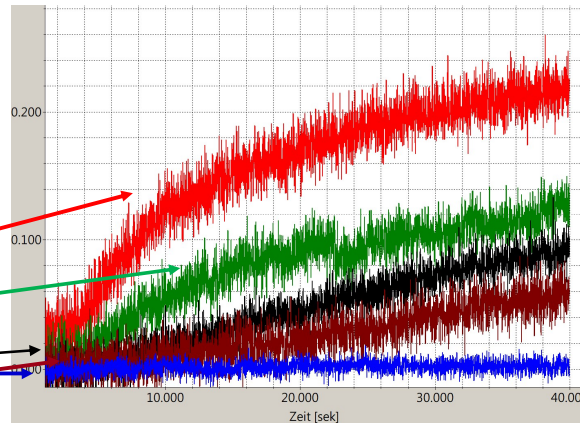
Experimentelle Verifikation



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