

Verknüpfte optische und thermische Simulationen von Infrarot-Heizöfen für Pulverbeschichtungs-Prozesse

Monika Kroneberger*, Eva Stanik**, *** , Thorsten Döhring***

* digitX GbR, 83052 Bruckmühl, Deutschland

** Technologietransferzentrum NETZ der Technischen Hochschule Aschaffenburg, Alzenau, Deutschland

*** Fakultät Ingenieurwissenschaften und Informatik, Technische Hochschule Aschaffenburg, Deutschland

<mailto:monika.kroneberger@digitx.de>

Infrarot-Heizöfen zum Aufschmelzen von Pulverlacken sind eine nachhaltige Alternative zu mit fossilen Brennstoffen betriebenen Öfen. Die aus optischen Simulationen gewonnenen Bestrahlungsstärken auf den Proben wurden als Eingabeparameter für thermische Simulationen verwendet und mit Messungen im Prototyp-Infrarotofen unter gleichen Randbedingungen verglichen.

1 Einführung

Bisher werden Industrieöfen für das Aufschmelzen und die Aushärtung von Pulverlacken meist mit Erdgas oder Erdöl betrieben. Als nachhaltige Alternative bieten sich Infrarot-Heizöfen an, da sie die nötige Prozesswärme sehr effizient übertragen und Strom aus erneuerbaren Quellen nutzen können. Um eine individuelle Steuerung der Infrarot-Strahler zu verwirklichen, müssen die kritischen Prozessparameter erfasst und verstanden werden.

In früheren Arbeiten wurde gezeigt, dass eine homogene Bestrahlungsstärke innerhalb einer hochreflektierenden oktagonalen Kammer auch bei komplexen Geometrien der zu erwärmenden Teile erreicht werden kann [1], [2]. Optische Simulationen bilden die Temperaturverteilungen auf dem Bauteil qualitativ schon gut ab. Wärmeleitung innerhalb des Bauteils führt jedoch zu Abweichungen im Detail [3]. Durch die Verknüpfung von optischen und thermischen Simulationen wurde ein Simulationsmodell erstellt, welches schnelle und präzise Vorhersagen für die Steuerung einer späteren Produktionsanlage ermöglicht [4].

2 NAPUBEST Prototypen-Anlage

Der im Projekt NAPUBEST (**N**achhaltige **P**ulver**B**E-schichtungs-**T**echnologie) aufgebaute Prototyp-Ofen enthält vier Infrarot-Emitter bei 1,4 μm Wellenlänge mit je bis zu 1,5 kW regelbarer Leistung. Die Temperaturmessung erfolgt hier mit einer Wärmebildkamera (Testo 883).[2], [5]



Abb. 1 Oktagonaler Prototyp-Infrarotofen mit der zur Temperaturmessung verwendeten Wärmebildkamera. [5]

3 Optik-Simulationsmodell und Thermalmodell

Als Grundlage für die Optik-Simulation erfolgte die Messung der hemisphärischen Reflexion mit (HDR) und ohne (DDR) spekularem Anteil an einer weißen und einer schwarzen Pulverlackoberfläche mit einer Ulbricht-Kugel. Die Messwerte (s. Abb. 2) geben das Verhältnis von lambertscher zu spiegelnder Reflexion an, sowie den Total Scatter und damit die nötigen Parameter für eine vereinfachte BSDF. Beide Pulverbeschichtungen sind im ausgehärteten Zustand lambertsch.

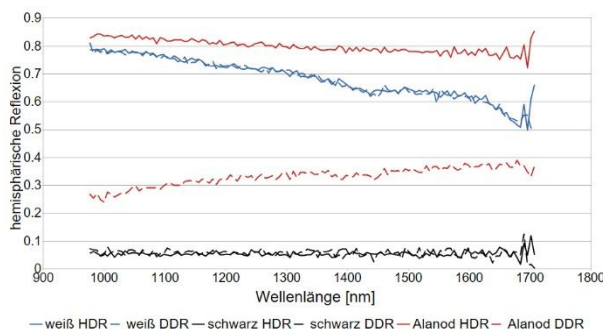


Abb. 2 Messung der hemisphärischen Reflexion mit (HDR) und ohne (DDR) spekularem Anteil mittels einer Ulbricht-Kugel, vgl. [3], [4].

Allerdings weichen die Messungen der Oberflächentemperatur aufgrund von Wärmeleitung innerhalb des Bauteils teilweise von den bisher simulierten Temperaturverteilungen ab. Das Simulationsmodell des Prototyp-Ofens zeigt Abb. 3 (links).

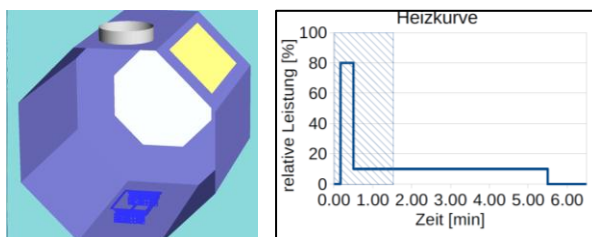


Abb. 3 Optik-Simulationsmodell (links) und die in Versuch und Simulation verwendete Heizkurve (rechts)

Um die Wärmeleitung zu berücksichtigen, wurden die jeweils aus der optischen Simulation gewonnenen Verteilungen der Bestrahlungsstärke auf den Oberflächen einer weißen und einer schwarzen Probe als Eingabeparameter einer thermischen Simulation verwendet. Die Konvektion wurde ebenfalls in die Berechnungen einbezogen, Wärmestrahlung wurde vernachlässigt. Mit diesem Modell wurden unterschiedliche Heiz- und Haltezeiten simuliert und im NAPUBEST Prototyp-Infrarotofen an realen Proben unter gleichen Bedingungen gemessen.



Abb. 4 Bestrahlungsstärke-Verteilung aus der Optik-Simulation (links) und vernetztes Thermalmodell (rechts).

Die optischen und thermischen Parameter der thermischen Simulation werden soweit vereinfacht bzw. reduziert, dass die Ergebnisse noch ausreichende Übereinstimmung mit den Messergebnissen zeigen. Die simulierte Bestrahlungsstärke-Verteilung auf der Oberfläche (s. Abb. 4, links) wird für die großen, in Abb. 4 rechts rot dargestellten Flächen gemittelt und geht als Wärmefluss in die thermische Simulation ein. Gewichtet wird dieser nach der Heizkurve, die im Experiment gefahren wurde. [4]

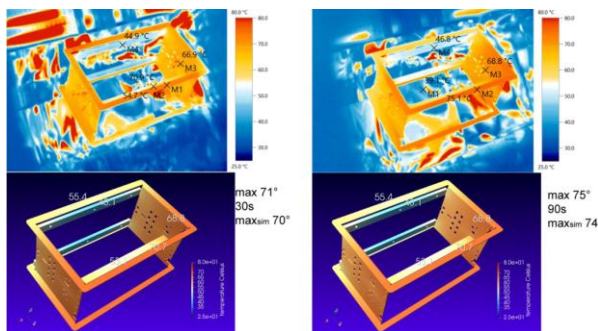


Abb. 5 Vergleich von Messung (oben) und Simulation (unten) für die weiße Probe.

Simulationen mit voller Leistung aller Lampen ergeben etwa die doppelte Bestrahlungsstärke auf der schwarzen Probe (s. Abb. 6) im Vergleich zur weißen Probe (s. Abb. 5) mit einer etwas stärkeren Inhomogenität. Die beiden Abbildungen vergleichen die gemessenen mit den simulierten Temperaturverteilungen, jeweils am Ende der Aufheizphase und am Beginn der Stabilisationsphase (nach 30 s bzw. 90 s, entsprechend dem schraffierten Bereich in der Heizkurve in Abb. 3).

Temperaturen und Temperaturverläufe in den Bauteilen werden in der vereinfachten Simulation gut

wiedergegeben. In beiden Teilen findet in der Stabilisierungsphase ein Angleichen der minimalen und maximalen Temperaturen statt. Der Wärmefluss innerhalb des Bauteils trägt damit zur Homogenisierung der Temperatur bei, was eine etwas ungleichmäßigere Beleuchtung erlauben dürfte.

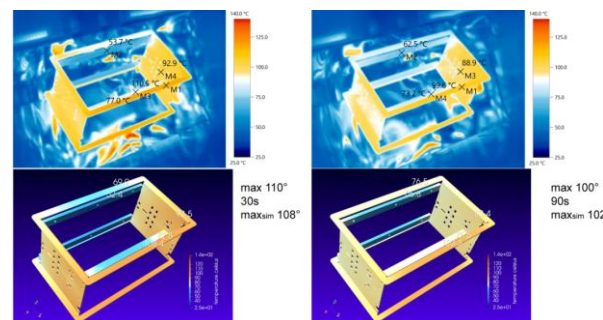


Abb. 6 Vergleich von Messung (oben) und Simulation (unten) für die schwarze Probe

4 Ergebnis und Ausblick

Die Kombination aus Ray-Tracing und thermischer Simulation unter Verwendung der vereinfachten Modelle liefert mit Abweichungen um maximal 5 °C gute Übereinstimmungen mit den Messwerten. Dies liegt deutlich innerhalb des Prozessfensters und erfüllt somit die Voraussetzung für die Prozessplanung.

Die nächsten Schritte sind die Untersuchung der optischen Parameter des Pulverlacks während des Aushärtungsprozesses und die Optimierung der Beleuchtung an den Geometrien der von einem Industriepartner bereitgestellten Teile. Der Prototyp des IR-Ofens wird zukünftig mit einem Befestigungssystem für eine Aufhängung ausgestattet, das auch eine Drehung der Proben ermöglicht.

Danksagung

Das Technologietransferzentrum NETZ wird durch eine Anschubfinanzierung des Bayerischen Staatsministeriums für Wissenschaft und Kunst gefördert.

Literatur

- [1] M. Kroneberger et al.: „Optik-Simulation für die Energiewende am Beispiel eines industriellen Infrarot-Heizofens, DGaO-Proceedings (2025)
- [2] E. Stanik et al.: "Infrared heating for a sustainable powder coating technology", DGaO-Proceedings (2025)
- [3] M. Kroneberger et al.: „Verifying optical simulations for infrared curing of powder coatings", J. Eur. Opt. Society-Rapid Publ. 22, 41 (2026)
- [4] M. Kroneberger et al.: "Optical and thermal simulations for infrared powder coating processes", Proc. SPIE 14109, 14109-01 (2026)
- [5] E. Stanik et al.: "Prototype facility for an industrial infrared powder coating process", Proc. SPIE 14109, 14109-0E (2026)