

Optik-Simulation für die Energiewende am Beispiel eines industriellen Infrarot-Heizofens

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

*digitX GbR, Östlicher Dammweg 36, D-83052 Bruckmühl

**Technische Hochschule Aschaffenburg, D 63743 Aschaffenburg

***NETZ Technologietransferzentrum für nachhaltige Energien, D 63755 Alzenau

<mailto:monika.kroneberger@digitx.de>

Um fossile Brennstoffe in der industriellen Pulverlackbeschichtung zu ersetzen, kann Infrarottrocknung eingesetzt werden. Für komplexe Geometrien, bei denen eine Verschattung die Effizienz der Infrarot-Aushärtung mindert, sind die Anordnung der Infrarotstrahler in der reflektierenden Heizkammer, deren Geometrie und die Verweilzeit der Bauteile die Schlüssel für erfolgreiche Prozesse.

1 Einführung

In der Stahlindustrie ist die Infrarottrocknung von ebenen Stahlband-Oberflächen ein bereits seit Jahren bewährtes Verfahren [1]. Pulverlack-Beschichtungen werden jedoch oft auf komplexe Geometrien aufgetragen, bei denen eine Verschattung die Effizienz der Infrarot-Aushärtung mindert. Zur Verfahrensoptimierung müssen zudem die optischen Parameter der Pulverlacke während des Prozesses bekannt sein, um die nötige Strahlungsleistung an Bauteile und unterschiedliche Lacke anpassen zu können. Messungen in der NAPU-BEST-Prototypanlage werden daher mit optischen Simulationen des Aufbaus abgeglichen, um die Simulationsparameter an die Messergebnisse anzupassen [2] und damit die Grundlage für die Auslegung von industriellen Prozessen zu gewährleisten. In Zukunft soll hierbei auch Infrarotstrahlung mehrerer Wellenlängen berücksichtigt werden, um in unterschiedlichen Ofenzonen benötigte Aufheiz- und Haltephasen zu verwirklichen [3].

2 Simulationsmodell der Anlage

Die Testanlage [4] ist mit 4 NIR Emittern mit einer Maximumwellenlänge von $1.4 \mu\text{m}$ und je 1.5 kW maximaler elektrischer Leistung ausgestattet („schnelle Kurzwelle“). Innenbleche, Strahlermodul und Türen werden in FRED (Photon Engineering) nachgebildet. Die Reflektivitäten der verwendeten Materialien und der Anteil der diffusen Reflektivität wurden bestimmt, um die Streufunktionen erstellen zu können [5]. Abb. 1 zeigt das Simulationsmodell von außen und mit einer Probe in der Strahlkammer. Die Position und Rotation der Probe kann beliebig gewählt werden. Für jede Probenposition erhält man die Bestrahlungsstärkeverteilung auf der Probenoberfläche, die proportional zur Wärmeverteilung ist.

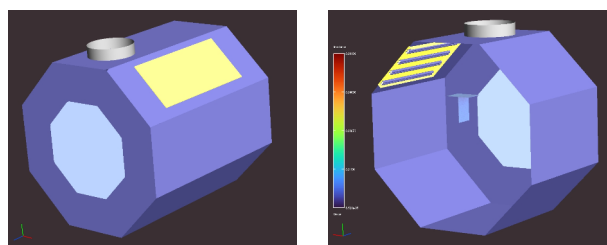


Abb. 1 Testanlage als Simulationsmodell, rechts mit T-förmiger Probe im Strahlungsraum.

3 Messung der optischen Eigenschaften der Oberflächen

Reflektivitäten von Alanod und Coating Proben wurden an der Wrexham Glyndwr Universität vermessen. Für vier Farbmuster ergaben sich die Reflektivitäten in Abb. 2. Im Gegensatz zum Verhalten im sichtbaren Licht, absorbieren alle vier Farben sehr stark.

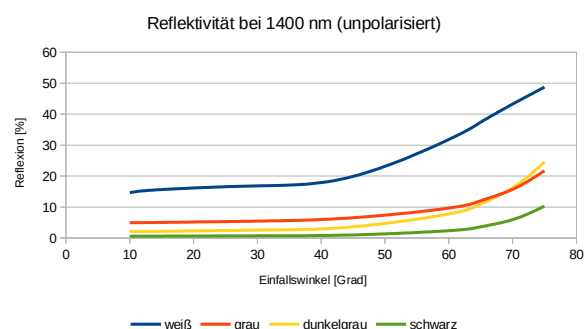


Abb. 2 Gemessene Reflexion für vier verschiedene Proben bei $1.4 \mu\text{m}$.

Mittels AFM Messungen wurde die Oberflächenrauigkeit der vier Proben bestimmt. Die sich daraus ergebende Streufunktion wurde auf die der Farbe aufaddiert, um die Gesamtstreuung zu erhalten. Für die weiße Probe ergibt sich damit die Streufunktion in Abb. 3.

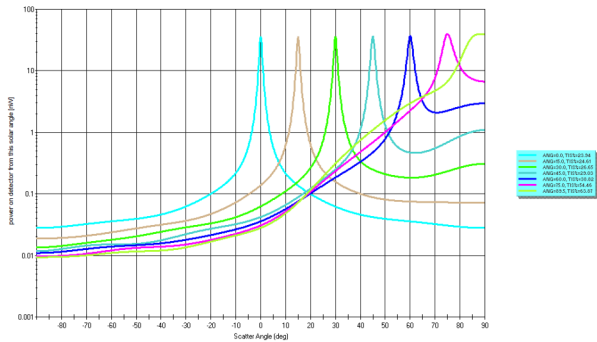


Abb. 3 Streufunktion für die weiße Probe bei 1.4μm.

4 Simulation zur Prozessvorhersage

Ziel der Simulationen ist es, eine möglichst genaue Vorhersage des Energieeintrages in einer Härungsanlage mit NIR-Strahlern treffen zu können, um eine Auslegung solcher Anlagen für nicht plane Bauteile zu ermöglichen. Dafür muss das Simulationsmodell möglichst genau an die Bedingungen in der Testanlage angepasst werden. Im ersten Schritt wurden die Simulationen mit den gemessenen und aus Messwerten erstellten Modellfunktionen durchgeführt. Die Ergebnisse sollen dann mit realen Messungen in der Testanlage verifiziert werden. In einem iterativen Prozess werden dann die Parameter der Simulation an die Messergebnisse der Testanlage angepasst.

5 Simulationsergebnisse

Erstes Testobjekt ist eine T-förmige Probe, die mit den optischen Eigenschaften eines schwarzen bzw. weißen Pulverlackes belegt wird. Abb. 4 zeigt die Bestrahlungsstärkeverteilung auf den beiden Proben.

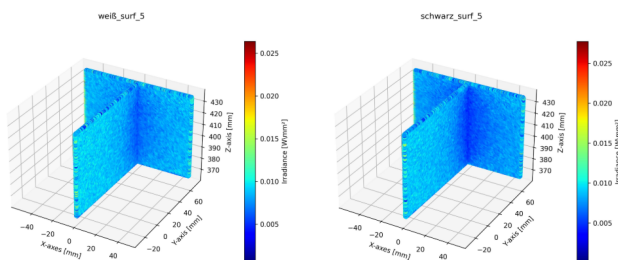


Abb. 4 Bestrahlungsstärke auf der Probenoberfläche links weißer Lack, rechts schwarzer Lack. Der weiße Lack wird durch stärkere Streuung auf der Oberfläche gleichmäßiger bestrahlt, die stärkere Absorption auf dunklen Oberflächen führt zu stärkerer Abschattung.

Verschiedene Positionen und Drehungen im Strahlraum werden simuliert, um unterschiedliche Bestrahlungsszenarien darstellen zu können. So kann z.B. durch Drehen der Probe eine Kammer mit zwei Strahlermodulen aus zwei Simulationen zusammengesetzt werden. Auf diese Weise wurde für die T-förmige Probe eine Kammer mit zwei Strahlermodulen und einer sich drehenden Probe simuliert (Abb. 5).

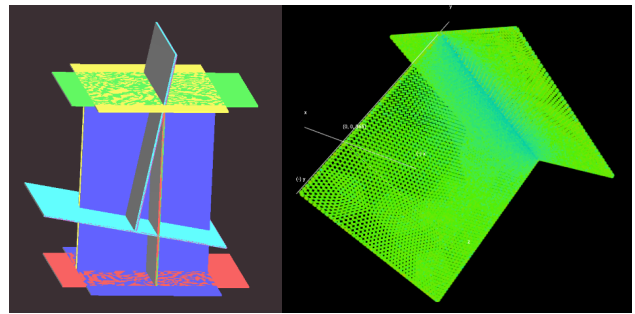


Abb. 5 Links: mögliche Positionen der Probe, die Ergebnisse der Simulationen ohne die verkippte Probe (türkis) ist im rechten Bild gezeigt. Eine fast homogene Bestrahlungsstärkeverteilung wird erreicht.

Durch Kombination verschiedener Drehungen und Kippungen der Probe kann die Ausleuchtung auf allen Flächen optimiert werden. Das beste erreichte Verhältnis über die gesamte Oberfläche liegt knapp unter 2. In einem Industriellen Ofen kann dies durch die Verteilung der Emitter und eine Rotation der Probe verwirklicht werden (Tab. 1).

Beleuchtung	Verhältnis max-min auf Innenseite T
4 Emitter von oben	4.21
ein Emitter schräg von der Seite	2.73
ein Emitter schräg von der Seite, beleuchtete Seite	1.58
4 Emitter von oben, unten je rechts und vorne	1.91

Tab. 1 Verhältnis Maximalwert/Minimalwert auf der Probenoberfläche für verschiedene Beleuchtungsszenarien.

6 Conclusion

Die Simulation zeigt Möglichkeiten auf, auch nicht plane Proben mit NIR-Emittlern gleichmäßig zu bestrahlen. Der nächste Schritt ist die Verifikation mit ortsaufgelösten Temperaturmessungen an Proben, die in der Testanlage erhitzt werden, um die Simulationsparameter an die realen Gegebenheiten anzupassen.

Literatur

- [1] A.L. Stewart, et al., „Characterization of infrared absorption by powder coatings on steel panels“ in Jour. Coat. Technol. 71:71-84 (1999). doi: 10.1007/BF02697891
- [2] M. Barletta, „Flash IR pre-curing of the decorative layer in metal-flake powder coatings“ in: Jour. Progress in Organic Coatings 72(3), 498-510 (2011), doi: 10.1016/j.porgcoat.2011.06.009
- [3] M.-W. von Horstig et al., „A Perspective on Innovative Drying Methods for Energy-Efficient Solvent-Based Production of Lithium-Ion Battery Electrodes“, Energy Technology. 10 (2022). 2200689. doi:10.1002/ente.202200689
- [4] E. Stanik et al., „Infrared heating for a sustainable powder coating technology“, DgaO Proceedings 2025
- [5] Fest, E.C.. (2013). Stray light analysis and control. Doi:10.1117/3.1000980.