

Wie Simulation und Experiment Hand in Hand gehen

Digitale Vorhersage verbessert Infrarot-Temperaturbehandlung bei der Lackaushärtung

Infrarot Strahler erfreuen sich als Ersatz oder Ergänzung konventioneller Konvektionsöfen großer Beliebtheit. Neue Experimente in Deutschland und Schweden validieren derzeit Simulationsdaten mit Experimenten, um diese Technologie besser zu verstehen.

VON MELANIE QUAST

Gemeinsam mit dem Fraunhofer-Chalmers Research Centre for Industrial Mathematics in Göteborg, Schweden hat das Fraunhofer IPA die IR-Strahlungserwärmung am Fallbeispiel eines elektrisch betriebenen, mittelwelligen Strahler-Arrays hinsichtlich des Temperatureintrags in ein Modellsubstrat untersucht. Die experimentell ermittelten Temperaturdaten dienen als Referenz, um das Simulationsmodell „IPS Virtual Paint – Oven Simulation“ zu validieren. So entsteht ein Vorhersagetool, das zu einem besseren Verständnis und höherer Effizienz von IR-Prozessen führen.

Versuchsaufbau und Parameter

Vergangene Untersuchungen haben gezeigt, dass sich insbesondere mittelwellige Strahlertypen für die Temperaturbehandlung von Lackschichten gut eignen. Denn einerseits lassen sich bei entsprechender Auslegung hohe Leistungsdichten erzielen, andererseits ist der Farbton noch nicht so relevant wie bei kurzwelligen Strahlern. Ein Heizmodul der Firma IBT GmbH (Modell: STIR-Trockenofen für ThermoLine-Dry) dient als Basis der Untersuchungen. Die Grundcharakterisierung erfolgt über die Nutzung eines einzelnen Strahlers des Strahler-Arrays mit einem parabolähnlich geformten Reflektor mit einer maximalen Leistung von 808 W. Die Leistung des Strahlers wurde in Stufen zwischen 10 % und 100 % mittels der von IBT implementierten Pulsbreitensteuerung variiert. Als Modellwerkstück diente ein kathodisch tauchlackiertes Stahlblech mit den Maßen 200 x 500 x 1 mm, welches in einem konstanten Abstand von 56 mm über dem Strahler angeordnet wurde.

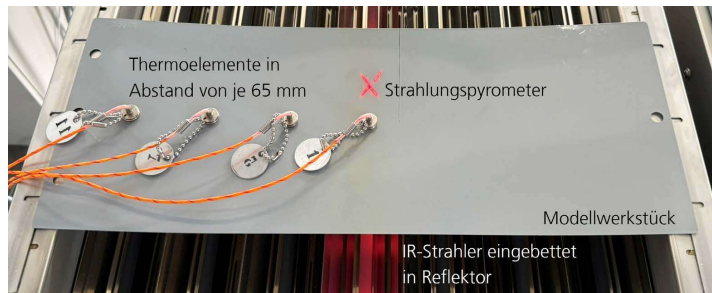


Abb. 1: Experimenteller Versuchsaufbau zur Messung der Temperaturverläufe auf einem Modellwerkstück über einem IR-Strahler mittels Strahlungspyrometer und vier Thermoelementen.

Fotos und Grafiken: Fraunhofer IPA

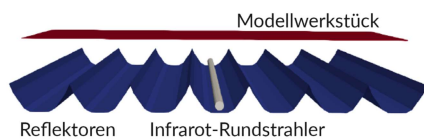


Abb. 2: Simulationsmodell des Versuchsaufbaus mit einem IR-Strahler (grau) eingebettet in Reflektoren (blau) und das Modellwerkstück (rot)

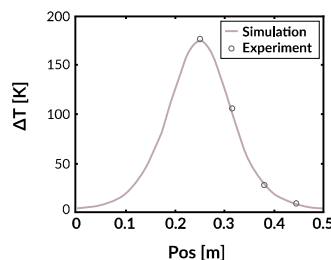


Abb. 3: Stationäres Temperaturprofil längs der Breite eines Modellwerkstücks bei maximaler Strahlerleistung und erreichtem Maximalwert der Temperatur. Dargestellt ist die simulierte Temperaturkurve (blaue Linie) im Vergleich zu den Thermoelement-Messwerten (Kreise).

Zur Messung der Temperatur kommen Strahlungspyrometer zum Einsatz, mit denen die Strahleroberfläche sowie die Ober- und Unterseite der Modellwerkstücke überwacht werden. Zusätzlich werden Thermoelemente in verschiedenen Abständen auf dem Werkstück angebracht, um die Temperaturverteilung sowie das Aufheizverhalten zu protokollieren (Abb. 1).

Aufheizverhalten und Strahlerleistung

Basierend auf der eingestellten Leistung des Strahlers wurde die Stefan-Boltzmann-Gleichung aufgelöst nach der Temperatur, um die Strahlertemperatur zu berechnen und mit den gemessenen Werten zu korrelieren. Ab einer Strahlertemperatur von circa 500 °C beginnend ab circa 60 % Strahlerleistung beginnt

der Strahler rot zu leuchten. Bei maximaler Leistung des Strahlers (100 % Sollwerteneinstellung) liefert er eine Oberflächentemperatur von rund 643 °C. Daraus resultiert laut Wien'schem Verschiebungsgesetz eine maximale Emissionswellenlänge von etwa $\lambda_{\text{max}} = 3,2 \mu\text{m}$. Die gemessenen Temperaturkurven zeigen innerhalb der ersten Sekunden einen schnellen Temperaturanstieg, bevor die Temperatur sich asymptotisch einem Sättigungswert annähert. Bei Temperaturmessungen am Modellwerkstück direkt über dem Strahler wird ein Temperaturanstieg von $\Delta T = 177,7^\circ\text{C}$ erreicht.

Temperaturanstieg und Homogenität

Ein Aspekt der Untersuchung ist die Temperaturverteilung über der Fläche des Modell-

werkstücks. Die Messung an vier definierten Punkten (jeweils ein Abstand von 65 mm versetzt zum Strahler) zeigen einen signifikanten Temperaturgradienten auf. Bei einer Strahlerleistung von 100 % erreicht der Messpunkt auf dem Werkstück direkt über dem Strahler eine Temperatur von $\Delta T = 177,7^\circ\text{C}$, während der vierte Messpunkt (195 mm Abstand zum Strahlermittelpunkt) lediglich eine Temperatur von $\Delta T = 9,5^\circ\text{C}$ erreicht. Selbst bei engerer Messanordnung auf dem Werkstück mit einem Abstand der vier Messsonden von je 10 mm zum Strahlermittelpunkt ist ein Temperaturabfall erkennbar, der eine Temperaturabnahme von rund 10 K je 10 mm Entfernung aufweist. Hierbei wird die Notwendigkeit einer zukünftig zonengesteuerten Anordnung mehrerer Strahler oder adaptierte Reflektoren für eine homogene Temperaturbehandlung deutlich.

Simulationsergebnisse

Das Simulationswerkzeug „IPS Oven Simulation“ des Fraunhofer-Chalmers Centre unterstützt bislang nur konvektive Ofentechniken und erfasst dabei nur das Substrat und nicht die applizierte Lacksschicht selbst. In Kooperation mit dem Fraunhofer IPA wird das Simulationsmodul um die Infrarot-Temperaturbehandlung erweitert. Die Infrarot-Quelle wird als stationäres Objekt mit einer festen, aus der eingebrachten Leistung abgeleiteten Radiosität (Verfahren zum Berechnen der Verteilung von Strahlung innerhalb eines virtuellen Modells) modelliert (Abb. 2). Die Wellenlänge wird bestimmt und die wellenlängenabhängige Emissivität

des Substrats berücksichtigt, wobei in der ersten Implementierung zunächst nur die Peak-Wellenlänge im Fokus steht. Im Simulationsprogramm ist es möglich, virtuell Reflektoren hinzuzufügen, welche die einfallende Strahlung diffus reflektieren. Die vom Werkstück ausgehende diffuse Strahlung wird ebenfalls im Simulationsmodell berücksichtigt. Darüber hinaus ermöglicht das Simulationsmodell die Kombination von Infrarot- und konvektiven Wärmequellen, wobei die natürliche Konvektion durch einen Wärmeübergangskoeffizienten angeglichen wird. Die Ergebnisse der Simulation zeigen eine ausgezeichnete Übereinstimmung mit den im Labor experimentell ermittelten Daten und bestätigen damit die Validität des entwickelten Modells (Abb. 3).

ZUM NETZWERKEN:
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart

Dr. Oliver Tiedje,
Tel.: +49 711 970-1773,
oliver.tiedje@ipa.fraunhofer.de,

Markus Cudazzo,
Tel.: +49 711 970-1761,
markus.cudazzo@ipa.fraunhofer.de,

Melanie Quast,
Tel.: +49 711 970-1702,
melanie.quast@ipa.fraunhofer.de,

www.ipa.fraunhofer.de/
beschichtung

Fraunhofer-Chalmers
Research Centre for Industrial Mathematics, Göteborg (Schweden)

Prof. Fredrik Edelvik,
Tel.: +46 730 794 220,
fredrik.edelvik@fcc.chalmers.se

Dr. Tomas Johnson,
Tel.: +49 711 450 225,
tomas.johnson@fcc.chalmers.se

https://www.fcc.chalmers.se

https://industrialpathsolutions.se/ips-oven-simulation

Fraunhofer
IPA

Sponsored by

Webseminar mit Excelitas Noblelight

Mythen der Lacktrocknung – und was unsere Praxistests wirklich zeigen

29. September 10:00 Uhr

Jetzt zum Online-Seminar anmelden!

How Simulation and Experimentation Go Hand in Hand

Digital Prediction Improves Infrared Heat Treatment for Paint Curing

Infrared heaters are gaining popularity as a replacement for or supplement to conventional convection ovens. New experiments in Germany and Sweden are currently validating simulation data with experiments to better understand this technology.

BY MELANIE QUAST

In collaboration with the Fraunhofer-Chalmers Research Center for Industrial Mathematics in Gothenburg, Sweden, the Fraunhofer IPA investigated IR radiation heating using the case study of an electrically powered, medium-wave emitter array with regard to heat input into a model substrate.

The experimentally determined temperature data serve as a reference for validating the "IPS Virtual Paint – Oven Simulation" model. This results in a prediction tool that leads to a better understanding and greater efficiency of IR processes.

Experimental Setup and Parameters

Previous studies have shown that medium-wave emitter types, in particular, are well-suited for the thermal treatment of paint coatings. This is because, on the one hand, high power densities can be achieved with the appropriate design, and on the other hand, the color tone is not yet as relevant as it is with short-wave emitters. A heating module from IBT GmbH (model: STIR drying oven for ThermoLine-Dry) serves as the basis for the investigations. The basic characterization was performed using a single emitter from the emitter array, which features a parabolic-shaped reflector with a maximum power of 808 W. The emitter's power was varied in steps between 10% and 100% using the pulse width control implemented by IBT. A cathodic dip-coated steel sheet measuring 200 x 500 x 1 mm served as the model workpiece; it was positioned at a constant distance of 56 mm above the emitter.

Radiation pyrometers were used to measure temperature, monitoring the emitter surface as well as the top and bottom

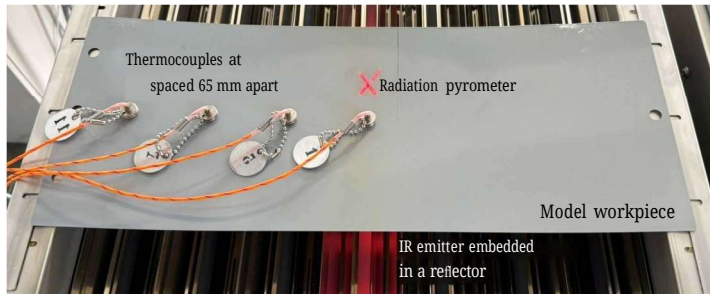


Fig. 1: Experimental setup for measuring temperature profiles on a model workpiece above an IR emitter using a radiation pyrometer and four thermocouples.

Photos and graphics: Fraunhofer IPA

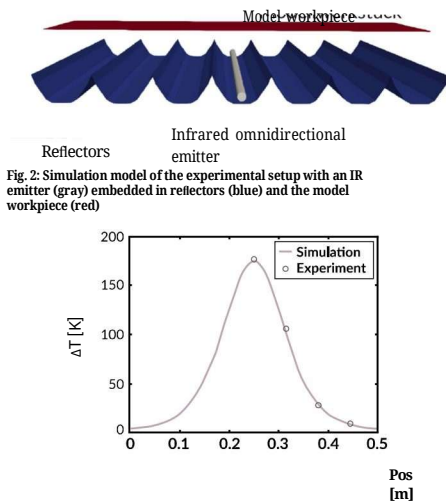


Fig. 2: Simulation model of the experimental setup with an IR emitter (gray) embedded in reflectors (blue) and the model workpiece (red).

surfaces of the test specimens. Additionally, thermocouples were attached to the specimen at various intervals to record the temperature distribution and heating behavior (Fig. 1).

Heating Behavior and Radiator Power

Based on the set power of the emitter, the Stefan-Boltzmann equation was solved for temperature to calculate the emitter temperature and correlate it with the measured values. Starting at an emitter temperature of approximately 500 °C and an emitter power of approximately 60%, the emitter begins to glow red. At maximum emitter power (100% setpoint), it produces a surface temperature of approximately 643 °C. According to Wien's displacement law, this results in a maximum emission

wavelength of approximately $\lambda_{\text{max}} = 3.2 \mu\text{m}$. The measured temperature curves show a rapid rise in temperature within the first few seconds before the temperature asymptotically approaches a saturation value. Temperature measurements taken on the model workpiece directly above the emitter show a temperature increase of $\Delta T = 177.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Temperature Rise and Homogeneity

One aspect of the investigation is the temperature distribution across the surface of the model.

Measurements at four defined points (each offset by 65 mm from the emitter center) reveal a significant temperature gradient. At 100% emitter power, the measurement point on the workpiece directly above the emitter reaches a temperature of $\Delta T = 177.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$, while the fourth measurement point (195 mm from the emitter center) reaches a temperature of only $\Delta T = 9.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Even with a closer measurement arrangement on the workpiece, where the four measurement probes are each 10 mm from the center of the emitter, a temperature drop is observable, showing a temperature decrease of approximately 10 K per 10 mm of distance. This clearly highlights the need for a future zone-controlled arrangement of multiple emitters or adapted reflectors to achieve homogeneous temperature treatment.

Simulation Results

The "IPS Oven Simulation" tool from the Fraunhofer-Chalmers Centre currently supports only convective oven techniques and captures only the substrate, not the applied coating itself. In cooperation with Fraunhofer IPA, the simulation module is being expanded to include infrared heat treatment. The infrared source is modeled as a stationary object with a fixed radiance derived from the input power (a method for calculating the distribution of radiation within a virtual model) (Fig. 2). The wavelength is determined, and the wavelength-dependent emissivity

of the substrate is taken into account, although the initial implementation focuses solely on the peak wavelength. The simulation program allows for the virtual addition of reflectors that diffusely reflect the incident radiation. The diffuse radiation emitted by the workpiece is also accounted for in the simulation model. Furthermore, the simulation model allows for the combination of infrared and convective heat sources, with natural convection being accounted for by a heat transfer coefficient. The simulation results show excellent agreement with the data experimentally determined in the laboratory, thereby confirming the validity of the developed model (Fig. 3).

Markus Cudazzo,
Tel.: +49 711 970-1761,
markus.cudazzo@ipa.fraunhofer.de,

Melanie Quast,
Tel.: +49 711 970-1702,
melanie.quast@ipa.fraunhofer.de,

www.ipa.fraunhofer.de/
coating

Fraunhofer-Chalmers

Research Center for
Industrial
Mathematics,
Gothenburg (Sweden)

Prof. Fredrik Edelvik,
Tel.: +46 730 794 220,
fredrik.edelvik@fcc.chalmers.se

Dr. Tomas Johnson,
Tel.: +46 731 450 225,
tomas.johnson@fcc.chalmers.se

https://www.fcc.chalmers.se

https://industrialpathsolutions.se/
ips-oven-simulation

FOR NETWORKING:

Fraunhofer Institute for
Manufacturing Engineering and
Automation IPA, Stuttgart

Dr. Oliver Tiedje,
Tel.: +49 711 970-1773,
oliver.tiedje@ipa.fraunhofer.de,

Fraunhofer
IPA

Sponsored by
excelitas®

**Webinar with
Excelsitas Noblight**

Myths About Paint Drying—and What
Our Practical Tests Really Show

September 29 1:00 a.m.

Register now for the
online seminar