Numerische Simulation von Spritzlackierung und Trocknung – Potenziale, Herausforderungen und industrielle Anwendung

Einführung

Die präzise Steuerung von Beschichtungsprozessen ist ein zentrales Element moderner industrieller Lackiertechnik. In diesem Kontext gewinnt die numerische Simulation zunehmend an Bedeutung. Sie erlaubt nicht nur ein tieferes Verständnis komplexer physikalischer Vorgänge, sondern bildet eine fundierte Basis für die Prozessoptimierung und Anlagenentwicklung. Der folgende Beitrag gibt einen Überblick über aktuelle Entwicklungen im Bereich der Simulation von Spritzlackierung und Trocknung, stellt zentrale Herausforderungen heraus und zeigt praxisnahe Lösungsansätze und Anwendungen auf.

Die numerische Simulation bietet auch für die Lackiertechnik vielfältigen Nutzen: Sie ermöglicht die Analyse schwer messbarer Prozessgrößen, unterstützt die Absicherung von Worst-Case-Szenarien, verbessert die Stabilität und Reproduzierbarkeit von Lackierprozessen und trägt zur Entwicklung neuer Applikationstechniken bei. Besonders hervorgehoben werden kann der Beitrag zur Fehleranalyse und zur Optimierung von Anlagenparametern bereits in frühen Planungsphasen.

1. Spritzlackierung

Im Bereich der Spritzlackierung liegt ein Schwerpunkt auf der Simulation der Tropfenbildung und -bewegung bei Hochrotationszerstäubern. Die klassische Partikelbahnsimulation basiert auf der Lösung der Erhaltungsgleichungen für Luft-, Partikel- und gegebenenfalls elektrischer Felder. Für eine realitätsnahe Abbildung sind genaue Anfangsbedingungen erforderlich, insbesondere Tropfengröße, -geschwindigkeit, -position und -ladung. Während die Tropfengrößenverteilung experimentell gut messbar ist, stellen genaue Daten zur Tropfenladung eine Herausforderung dar. Hier setzt ein neuer Ansatz an, der auf der sogenannten EHD (electro-hydrodynamic) Zerstäubungssimulation basiert. Diese erlaubt durch gezielte Modellierung der Tropfenaufladung eine signifikant verbesserte Beschreibung des Beschichtungsverhaltens, auch bei kleinen Tropfen unterhalb von 10 µm. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die Tropfenladung näherungsweise proportional Volumen des Tropfendurchmessers ist ($Q \propto d^3$), was in der Vergangenheit durch empirisch angenommene Modelle mit Exponenten von 1,5 oder 2 nur unzureichend abgebildet werden konnte. Zur Validierung wurden gemessene und simulierte Zielströme auf dem geerdeten Substrat verglichen. Die Ergebnisse zeigen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung. Damit kann das neu entwickelte Aufladungsmodell verlässlich in Tropfenbahnsimulationen integriert werden. Diese Simulationen ermöglichen Aussagen zur Schichtdickenverteilung und zum Auftragungswirkungsgrad. Insbesondere die Filmdickenverteilung profitiert von der verbesserten Modellierung der Tropfenladung, was sich in einer realistischeren Abbildung der dynamischen Schichtentwicklung widerspiegelt.

2. Pneumatische und Airless-Zerstäubung

Auch andere Applikationstechniken wie pneumatische oder Airless-Zerstäubung lassen sich simulativ abbilden. Hierbei kommt das VOF-to-DPM-Modell zum Einsatz, das die flüssige Phase in diskrete Tropfen überführt. Die Simulationsergebnisse wurden mit experimentell ermittelten Verteilungen validiert und zeigten ebenfalls hohe Übereinstimmung. Dadurch können Tropfeninjektionen künftig direkt an der Düse erfolgen, was die Genauigkeit der Partikelbahnsimulation bei komplexer Geometrie oder geneigtem Sprühstrahl erhöht.

3. Luftströmung in Lackierkabinen

Ein weiterer Aspekt der Simulation betrifft die Luftströmung in Lackierkabinen. Die Qualität der Beschichtung hängt entscheidend von einer gleichmäßigen und störungsfreien Kabinenströmung ab. Anhand realer Beispiele – etwa der Optimierung einer Schreinerei oder der Lackierung großer Objekte wie Hubschrauber – konnte gezeigt werden, dass durch gezielte Strömungsführung, etwa über veränderte Bodenkanäle oder die Integration von Leitblechen, sowohl die Beschichtungsqualität als auch die Energieeffizienz signifikant gesteigert werden können.

4. Simulation der Trocknung

Im Bereich der Trocknungssimulation wurde der Fokus auf instationäre Wärme- und Masseübertragung gelegt, insbesondere bei bewegten 3D-Objekten in Konvektionstrocknern. Hierbei kamen CFD-Modelle mit Strahlungsmodellen zum Einsatz. Exemplarisch wurden Aufheizvorgänge an Laborblechen, stilisierten Führerhäusern und realen Fahrzeugkarossen simuliert. Die zeitabhängige Temperatur- und Schichtdickenverteilung wurde mit hoher Genauigkeit abgebildet und durch experimentelle Messungen validiert. Auch bei der Analyse und Optimierung industrieller KTL-Trockner konnte durch Simulation eine deutliche Reduktion des Energieverlustes – in einem Fall von 2376 kW auf 600 kW – erzielt werden. Dies zeigt das große Potenzial numerischer Methoden zur energieeffizienten Prozessgestaltung.

5. Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die numerische Simulation in der industriellen Lackiertechnik ein unverzichtbares Werkzeug zur Prozessanalyse, -optimierung und -absicherung darstellt. Durch die Kombination von experimentellen Daten, physikalischen Modellen und validierten Simulationstools lassen sich sowohl Overspray- als auch Energieverluste reduzieren, die Beschichtungsqualität verbessern und neue Applikationstechniken effizient entwickeln.