

## Abschlussbericht

GEFÖRDERT VOM



Simulation Lackrockner



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

# Simulation der instationären Lackrocknung bei dreidimensionalen Objekten

**Zuwendungsgeber:** BMBF (Projektträger: DLR)

**Förderkennzeichen:** 01 RI 05 190 – 01 RI 05 195

**Laufzeit:** 01.08.2006 – 31.07.2009

**Koordinierende Stelle:** Universität Stuttgart,  
Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb

**Projektkoordinator:** Dr.-Ing. Andreas Scheibe

### **Zuwendungsempfänger:**

Universität Stuttgart, Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF)  
Technische Universität Darmstadt, Institut für Technische Thermodynamik (TTD)  
Hochschule Esslingen, Fakultät Angewandte Naturwissenschaften (AN)  
Deutsche Forschungsgesellschaft für Oberflächenbehandlung (DFO), Düsseldorf  
ANSYS Deutschland GmbH, Darmstadt  
CAD-FEM GmbH, Grafing

### **Projektpartner:**

Daimler AG, Sindelfingen  
Volkswagen AG, Wolfsburg  
Bayerische Motoren Werke AG, München  
Adam Opel GmbH, Rüsselsheim  
BASF Lacke und Farben AG, Münster  
DuPont Performance Coatings GmbH, Wuppertal  
Karl Wörwag Lack- und Farbenfabrik GmbH, Stuttgart  
Dürr Systems GmbH, Stuttgart

Stuttgart, im Januar 2010

## Inhaltsverzeichnis

1.	Zusammenfassende Kurzdarstellung.....	2
1.1	Grundlegendes Ziel und Aufgabenstellung des Vorhabens.....	2
1.2	Ausgangssituation und damaliger Stand der Technik.....	4
1.3	Voraussetzungen für das Vorhaben .....	9
1.4	Planung und Ablauf .....	9
1.5	Erzielte Ergebnisse.....	14
1.6	Nutzen, Verwertung und Ausblick.....	15
1.7	Literatur und eigene Veröffentlichungen.....	16
2.	Einzelberichte der Zuwendungsempfänger.....	21
2.1	Bericht des IFF .....	21
2.1.1	Zielsetzung und Aufgabenstellung .....	21
2.1.2	Arbeitspakete und Zeitschiene.....	22
2.1.3	Erzielte Ergebnisse .....	23
2.1.4	Nutzen und Verwertung der Ergebnisse .....	41
2.2	Bericht des TTD.....	43
2.2.1	Zielsetzung und Aufgabenstellung .....	43
2.2.2	Arbeitspakete und Zeitschiene.....	43
2.2.3	Erzielte Ergebnisse .....	44
2.2.4	Nutzen und Verwertung der Ergebnisse .....	60
2.3	Bericht der Hochschule Esslingen.....	61
2.3.1	Zielsetzung und Aufgabenstellung .....	61
2.3.2	Arbeitspakete und Zeitschiene.....	61
2.3.3	Erzielte Ergebnisse .....	62
2.3.4	Nutzen und Verwertung der Ergebnisse .....	81
2.4	Bericht der DFO.....	82
2.4.1	Zielsetzung und Aufgabenstellung .....	82
2.4.2	Arbeitspakete und Zeitschiene.....	82
2.4.3	Erzielte Ergebnisse .....	82
2.4.4	Nutzen und Verwertung der Ergebnisse .....	83
2.5	Bericht der ANSYS Deutschland GmbH.....	84
2.5.1	Zielsetzung und Aufgabenstellung .....	84
2.5.2	Arbeitspakete und Zeitschiene.....	85
2.5.3	Erzielte Ergebnisse .....	88
2.5.4	Nutzen und Verwertung der Ergebnisse .....	98
2.6	Bericht der CAD-FEM GmbH .....	100
2.6.1	Zielsetzung und Aufgabenstellung .....	100
2.6.2	Arbeitspakete und Zeitschiene.....	100
2.6.3	Erzielte Ergebnisse .....	101
2.6.4	Nutzen und Verwertung der Ergebnisse .....	106

## 1. Zusammenfassende Kurzdarstellung

Die Abtrocknung bzw. Aushärtung von aufgetragenen Lackschichten geschieht durch die äußere Einwirkung von Wärme in Form von geheizter Luft oder Strahlung in einem speziellen Trockner. Die Dauer der Trocknung bzw. die Einstellung der Wärmeleistung sind dabei eine Funktion des Lackmaterials, der Schichtdicke, des Schichtaufbaus sowie der Wärmekapazität des Substrates bzw. des lackierten Gegenstandes.

Bislang erfolgte die Auslegung von Trocknern in aller Regel rein empirisch auf der Basis der Berechnung des integralen Wärmebedarfes, wobei man die lokal sehr unterschiedlichen Trocknungsgeschwindigkeiten lediglich durch entsprechende Sicherheitszuschläge berücksichtigte. Um stets auf der sicheren Seite zu sein, führt dies letztendlich zu einer Überdimensionierung der Anlagen.

Da die örtlichen Wärme- und Stoffübergangskoeffizienten sowie die Ursachen sich bildender Trocknungsfehler in erster Linie von der Geschwindigkeit, Feuchte und Temperatur der Luft abhängen, ist eine Optimierung der Trockner im Hinblick auf den Raumbedarf, die Verweilzeit der Objekte und eine Fehlerminimierung nur dann möglich, wenn genauere Kenntnisse des sich im Trockner ausbildenden dreidimensionalen Strömungsfeldes vorliegen.

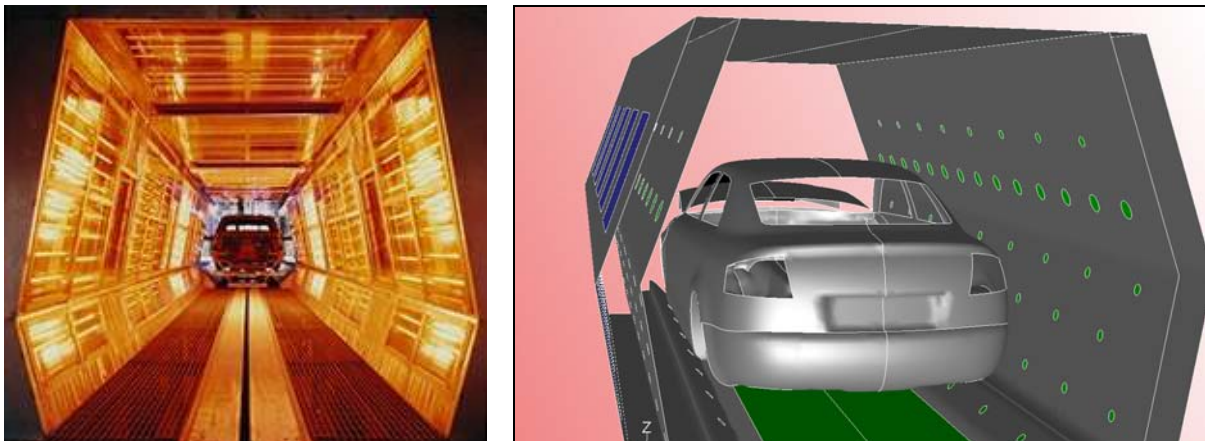


Abb. 1.1: Realer Durchlauftrockner (links) und virtueller Trockner (rechts)

### 1.1 Grundlegendes Ziel und Aufgabenstellung des Vorhabens

Das Ziel des hier beschriebenen Forschungsvorhabens bestand in der Entwicklung eines experimentell verifizierten Simulationsprogramms zur Vorhersage der dominant konvektiven instationären Lackfilmtrocknung auf komplexen, dreidimensionalen Bauteilen. Hierfür wurde ein kommerzielles numerisches Rechenprogramm mit Hilfe spezifischer Modelle für die Kinetik der Lösemittelverdunstung und Lacktrocknung so erweitert, dass der komplexe Trocknungsprozess in Durchlauftrocknern einschließlich der Entstehung von Trocknungsfehlern berechnet werden kann. Zur Erreichung dieses Ziels mussten vor allem folgende Teilaufgaben bearbeitet werden:

- Recherche zum Stand der Technik (auch außerhalb der Lackiertechnik)
- Systematische Durchführung experimenteller Untersuchungen zur Physik der Lacktrocknung und Entstehung von Trocknungsfehlern
- Entwicklung unterschiedlicher lackspezifischer Rechenmodelle für die hoch aufgelöste, instationäre Berechnung des gekoppelten dreidimensionalen Strömungs- und Temperaturfeldes
- Auswahl geeigneter Rechenmodelle für die Instationäre Berechnung der Temperaturverteilung im Werkstück, einschließlich der Möglichkeit, über geeignete Schnittstellen, in späteren, externen Simulationsprogrammen die Bauteilspannungen bzw. den Bauteilverzug vorherzusagen
- Entwicklung lackspezifischer Filmaufheiz- und Verdunstungsmodelle für den Stofftransport in der Schicht
- Entwicklung empirischer Rechenmodelle zur Vorhersage der von den Prozessparametern abhängigen trockenungsbedingten Lackierfehler wie Kocher oder Nadelstiche
- Erstellung des Anwendungsprogramms zur Trocknersimulation, Implementierung der entwickelten Modelle und Verifikation anhand industrierelevanter Beispiele
- Erstellung von Anwendertipps und Handlungsvorschriften zur Vorgehensweise bei der Durchführung von Simulationen

Vom Ansatz her wurde der radiative Wärmeeintrag zwar berücksichtigt, stellte aber keinen besonderen Arbeitsschwerpunkt dar. Die Problemstellung wurde ganz bewusst anhand der Trocknung von Wasserlackschichten auf Automobilkarossen bearbeitet, da dies in Bezug auf die Randbedingungen (Komplexität des Werkstückes, kontinuierliche Bewegung durch den Trockner, Trocknergeometrie) vermutlich den schwierigsten Simulationsfall darstellt. Im Fokus standen dabei neben den so genannten Decklacktrocknern, in denen die endgültige chemische Lackfilmmernetzung vonstattengeht, auch Abdunstzonen oder Zwischentrockner, in denen eine rein physikalische Trocknung der Lackfilme abläuft. Die Ansätze und Modelle wurden bewusst so gewählt, dass das nunmehr entstandene Simulationsprogramm einen weiten industrierelevanten Anwendungsbereich abdecken kann.

Eine sehr wichtige Komponente des Projektes war das komplementäre Vorgehen und Erstellen von experimentellen und numerischen Methoden. In jeder Projektphase erfolgte eine sofortige, umfangreiche experimentelle Verifikation der bis dahin entwickelten Simulationsmodelle.

Da es sich bei diesem Forschungsvorhabens um eine komplexe und schwierige Aufgaben- und Fragestellung handelte, bestand ein weiteres Ziel darin ein effizientes Forschungskonsortium zu bilden. Daher wurde dieses Vorhaben unter direkter oder indirekter Mitwirkung aller Institute und Firmen durchgeführt, die bereits vor dem

Projektsart signifikante Beiträge zur Simulation lackiertechnischer Prozesse geleistet und entsprechende Erfahrungen gesammelt hatten.

## 1.2 Ausgangssituation und damaliger Stand der Technik

Seitens der Deutschen Forschungsgemeinschaft wird die skalenübergreifende Modellierung in „Perspektiven der Forschung und ihrer Förderung“, 2002-2006, als eines der herausragenden Zukunftsthemen identifiziert. In diesem Zusammenhang wird vor allem auch die skalenübergreifende Modellierung und Simulation von Beschichtungs- und Trocknungsprozessen als eine der zentralen Herausforderungen der Forschung in der Produktionstechnik angesehen. Im Zuge der Entwicklung von Visionen und Szenarien speziell für die Forschung auf dem Gebiet der Oberflächentechnik wurde in der vom BMBF geförderten „Forschungsagenda Oberfläche“ von den Experten der branchenspezifische Bedarf an Simulationswerkzeugen ermittelt.

Vor Beginn des Projektes wurden der damalige Stand der Technik sowie bereits verfügbare Simulationswerkzeuge zur Lacktrocknung abgeschätzt und mit Projektbeginn in den Arbeitspaketen AP1 und AP2 vertiefend ermittelt. Die bis dato durchgeführten Vorarbeiten der Projektpartner mit folgendem Vorgehen festgehalten:

- Zusammenstellung von weltweit durchgeführten und für die Lacktrocknung relevanten Arbeiten in Form einer Literaturrecherche
- Zusammenstellung der bei den Projektteilnehmern durchgeführten Vorarbeiten in Form eines Fragebogens

Die Literaturrecherche zur Ermittlung des Standes der Technik zur konvektiven Trocknung wurde mithilfe von Stichworten wie z.B. „*heat transfer and mass transfer and drying process and coating*“ durchgeführt. Mit den einschlägig in Frage kommenden technischen und naturwissenschaftlichen Datenbanken TEMA und INSPEC wurden mehr als 300 Quellen aus Hochschulschriften, Konferenzberichten, Fachbüchern und Zeitschriften gesichtet. Aufgrund der Recherche kann folgendes Fazit gezogen werden:

Im Wesentlichen werden lediglich die physikalisch-technischen Grundlagen des Wärmetransports mithilfe des „Fourierschen Gesetzes“ sowie des Stofftransports mithilfe des „Fickschen Gesetzes“ beschrieben. Die ermittelten praxisbezogenen Arbeiten, die relevante Teilaspekte der industriellen Lacktrocknung enthalten, wurden allesamt von den in diesem Forschungsverbund vereinigten Projektpartnern vorgelegt.

Die Auswertung der Recherche zeigt allerdings auch deutlich, dass bis dato noch keine umfassenden Lösungsansätze für die nachfolgenden Aspekte existierten:

- Sehr dünne Schichten
- Komplexe, mehrkomponentige Fluide (Suspensionen)
- Zeitlich variable Stoffwerte (Diffusionskoeffizienten, Wärmeleitfähigkeiten etc.)
- Sehr niedrige Lösemittelkonzentrationen in der Luft (→ messtechnisches Problem)

In den meist grundlagenorientierten Arbeiten werden weitgehend vereinfachte Annahmen getroffen. Beispielsweise gelten die meisten Rechenmodelle für die Konvektion nur für laminare Strömungen und einfache Objektgeometrien wie ebene Platten. Des Weiteren sind die Stoffmodelle stark vereinfacht; komplexe Lacksysteme lassen sich damit nicht beschreiben. Die Zielstellungen der analysierten lackspezifischen Arbeiten beziehen sich meist nur auf prozesstechnische Fragestellungen, wie z.B. auf die Abhängigkeiten verschiedener Umgebungsparameter (Luftgeschwindigkeit, Temperatur und Feuchte). Im Vordergrund stehen dabei vor allem praxisbezogene Fragen, wie z.B. Energieeinsparung oder Vermeidung von Lackfehlern bei der Trocknung [01] - [06].

Bei den bisherigen Arbeiten zur Modellierung des Wärmetransportes nach dem Fourierschen Gesetz werden weitgehend vereinfachte Annahmen getroffen, wie z.B. laminare Strömungen, einfache Objektgeometrie oder einfache Prozess- und Umgebungsbedingungen [07] - [11] und [21] - [30].

Bei den bisherigen Arbeiten zur Modellierung der Diffusionsgesetze, dem so genannten Fickschen Gesetz, ist besonders auf die Stoffeigenschaften zu achten. Zahlreiche Literatur beschreibt sehr ausführlich die Diffusion bei Lackmaterialien auf experimenteller und theoretischer Basis. Das Lackmaterial wird dabei jedoch jeweils als vereinfachtes Lacksystem (binäres System: „Wasser + Feststoff“ oder ternäres System: „Wasser + Feststoff + Lösemittel“) betrachtet. Untersucht werden dabei teilweise auch Diffusionseffekte, die zu Lackfehlern führen können (z.B. Schrumpfung oder Blasenbildung). Die Untersuchungen beschränken sich weitgehend auf den eindimensionalen Bereich [02] - [05] und [12] - [18].

Die Simulation der Lacktrocknung steht noch ganz am Anfang. Die bisher durchgeführten Arbeiten betrachten lediglich Teilaspekte und Einzelprozesse des Trocknungsprozesses. So werden z.B. Trocknungsvorgänge an Karossen simuliert, ohne dabei die turbulente Luftströmung und den nassen Lackfilm zu berücksichtigen. Komplexere Betrachtungen dagegen werden bisher meist halbempirisch gelöst, d.h. neben der Simulation müssen noch wesentliche Prozessdaten durch Versuche erfasst werden [19] und [20].

Im zweiten Teil der Recherche zum Stand der Technik wurden die Projektteilnehmer, die bereits auf dem Gebiet der Trocknungssimulation aktiv waren, in Form eines Fragebogens bezüglich ihrer Arbeiten auf dem Gebiet der Trocknungssimulation u.a. zu folgenden Themenschwerpunkten befragt:

1. Ziel und Zweck der Rechnungen
2. Art des Berechnungsprogramms
3. Art und Größe des Rechengebietes
4. Zeitaufwand der Simulation
5. Eingangs- Randbedingungen
6. Turbulenz- und Wärmeübertragungsmodelle
7. Berücksichtigung der Lackschicht in der Simulation
8. Erfahrungen mit Experimenten und Simulationen.

Die Auswertung der fünf Anwenderbefragungen (meist Automobilfirmen) zeigte, dass der wesentliche Einsatz der Trocknungssimulation in der Berechnung der Temperaturverteilung bzw. des Aufheiz- und Abkühlverhaltens von Objekten zu finden ist. Das Vorgehen der Befragten bei der Simulation war jeweils ähnlich. Nach einer aufwändigen CAD-Aufbereitung erfolgten die Netzgenerierung des Modells mit hoher Auflösung und anschließend die Simulation. Die dazu verwendeten Berechnungsprogramme der Befragten basierten weitgehend auf numerische Lösungsverfahren wie z.B. der Finiten Differenzen Methode (FDM), der Finiten Elemente Methode (FEM) oder der Finiten Volumen Methode (FVM). Die Rechnungen wurden überwiegend an handelsüblichen Desktopcomputern oder auf Workstations durchgeführt. Die Rechenzeit betrug von der CAD-Aufbereitung, Gittergenerierung, Durchführung der Simulation bis zur Nacharbeit und Interpretation mehrere Wochen, in Einzelfällen auch Monate.

Die Anwenderbefragung zeigte zudem, ähnlich wie die Auswertung der Literaturrecherche, dass zwar Simulationen in den Bereichen der KTL- und Decklacktrocknung durchgeführt werden, jedoch nur bestimmte Teilaspekte berücksichtigt werden. Beispiele hierfür sind die Simulation des Temperaturverlaufs ohne Luftströmung oder Simulationen von Trocknungsvorgängen an Objekten ohne Lackmaterial. Generell jedoch fehlte in den damaligen Simulationsansätzen der gekoppelte Zusammenhang zwischen der konvektiven, turbulenten Luftströmung bei hohen Temperaturen und der Betrachtung einer vorhandenen Nasslackschicht auf komplexen Geometrien. Aus damaliger Sicht konnte daher folgendes Fazit gezogen werden:

- Der konvektive Wärmeübergang mit herkömmlicher Nusselt-Beziehung ist nur für eine parallel, laminar angeströmte Platte gültig
- Für den Wärmeübergang mit komplexer Turbulenzströmung und beliebigen 3-D-Objekten müssen die existierende Turbulenz- und Wandmodelle weiterentwickelt werden
- Zwei- oder Drei-Schichten-Wandmodelle könnten eventuell eine bessere Vorhersage der lokalen Nusselt-Zahl ergeben

- Eine dynamische Anpassung der Nusselt-Zahl an die Reynolds-Zahl ist nötig
- Bei Aufprallströmungen können die lokalen Wärmeübertragungskoeffizienten mit V2F-Modellen gegenüber den herkömmlichen k-e-Modellen besser berechnet werden, allerdings gibt es evtl. Unstimmigkeiten in den Strömungseigenschaften
- Speziell für die Lackmaterialien müssen neue, spezifische Modelle für den Energie- und Stofftransport sowie für das Abdunstverhalten entwickelt werden

Die Umsetzung dieser Forderungen wurde daraufhin zu einem wesentlichen Bestandteil des hier beschriebenen Forschungsvorhabens. Wie bereits erwähnt, wurde dieses Vorhaben unter direkter oder indirekter Mitwirkung von Projektpartnern durchgeführt, die bereits zuvor signifikante Vorarbeiten zur Simulation lackiertechnischer Prozesse geleistet hatten. Diese Vorarbeiten und der generelle Stand der Technik werden nachfolgend beschrieben.

Das Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart als koordinierende Forschungsstelle beschäftigt sich seit langem mit den verschiedensten Fragestellungen der Lackiertechnik [31-34]. In der Arbeitsgruppe, die durch insgesamt mehr als 30 fest angestellte Mitarbeiter gebildet wird, wurden in der Vergangenheit bereits mehrfach erfolgreich große Forschungsprojekte durchgeführt. Um die praktische Relevanz der Arbeiten sicherzustellen, sind verschiedene Labor- und Technikumsanlagen vorhanden, die bezüglich der äußeren und inneren Randbedingungen der Praxis nahezu vollständig entsprechen. Die numerische Strömungssimulation wird am IFF im Bereich der Lackiertechnik seit etwa 11 Jahren eingesetzt, wobei bewusst auf das kommerzielle Programmpaket FLUENT zurückgegriffen wurde. Dadurch ist es möglich, die Aktivitäten auf das zu behandelnde physikalische Problem zu konzentrieren und somit eine schnelle Umsetzung der Ergebnisse zu erreichen. Dies konnte bereits anhand der beispielhaften Berechnung des Beschichtungsvorganges mit Pulversprühorganen [39] und der Strömung in großen Lackierkabinen [40] gezeigt werden. Die in [40] vorgestellten Ergebnisse zeigen darüber hinaus den komplementären Charakter der vorhandenen experimentellen Einrichtungen auf.

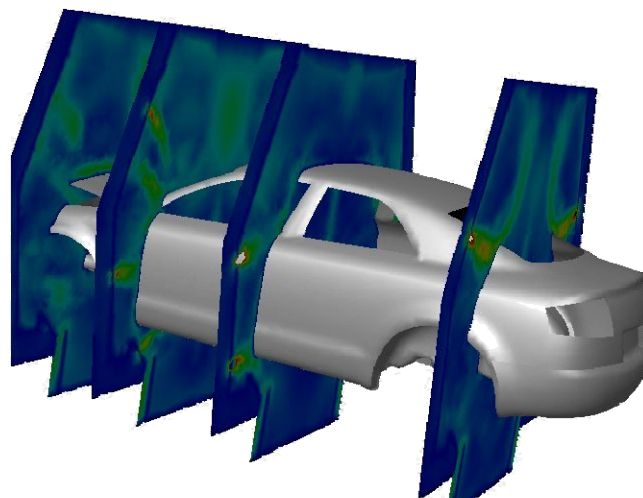


Abb. 1.2: Dreidimensionales Strömungsfeld in einem Durchlauftrockner



Dieses Forschungsvorhaben baute u.a. auch auf Vorarbeiten des Instituts für Technische Thermodynamik der TU Darmstadt (TTD) und des Fraunhofer Instituts IPA auf. Beide Institute verfügten bereits über unterschiedlich konfigurierte Labortrockner zur experimentellen Verifikation von Modellen für einzelne Abdunst- und Trocknungsprozessschritte. Das TTD entwickelte ein 1-dimensionales Modell zur Berechnung des gekoppelten Wärme- und Stofftransports in ein- und mehrschichtigen wässrigen Lacksystemen [36 - 38]. Mit diesem experimentell validierten Modell können die instationären Temperatur- und Konzentrationsprofile im Lackfilm sowie die abnehmende Filmdicke in Abhängigkeit von den klimatischen und strömungstechnischen Bedingungen in den Abdunst- und Trocknerzonen einer Lackieranlage numerisch berechnet werden. Von besonderer Bedeutung waren auch die Erkenntnisse des TTD in Bezug auf die konzentrations- und temperaturabhängigen Diffusionskoeffizienten für komplexe Mehrkomponentensysteme, die anhand der Verdampfung von Lacktropfen gewonnen werden konnten [39].

Fick'sche Diffusion von Wasser und org. Lösemitteln in Lackschichten:

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho w_i)}{\partial \tau}}_{\text{zeitl. Änderung der Konzentration}} - \underbrace{\frac{\partial(\rho w_i)}{\partial \eta} \frac{\eta}{X} \frac{\partial X}{\partial \tau}}_{\text{zeitl. Filmdickenabnahme}} = \underbrace{\frac{1}{X^2} \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \rho D_i \frac{\partial w_i}{\partial \eta} \right)}_{\text{Diffusion aufgrund örtlichem Konzentrationsgradient}}$$

$\eta$  Höhe über Substrat  
 $X$  dimensionslose Schichtdicke  
 $\tau$  Zeit  
 $\rho$  Dichte  
 $w_i$  Massenanteil Komponente  $i$   
 $D_i$  Diffusionskoeffizient

Wärmeleitung im Substrat und in Lackschichten

$$\underbrace{\frac{\partial T}{\partial \tau}}_{\text{zeitl. Temp.-änderung}} - \underbrace{\frac{\partial T}{\partial \eta} \frac{\eta}{X} \frac{\partial X}{\partial \tau}}_{\text{zeitl. Filmdickenabnahme}} = \underbrace{\frac{1}{\rho c_p X^2} \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial \eta} \right)}_{\text{Wärmeleitung}} + \underbrace{\frac{\dot{q}}{\rho c_p}}_{\text{Vernetzungswärme}}$$

$\lambda$  Wärmeleitfähigkeit  
 $c_p$  Wärmekapazität  
 $T$  Temperatur  
 $q$  Vernetzungswärme

Abb. 1.3: Eindimensionales Lackfilm-Modell des TTD

An der Hochschule Esslingen (HE) wurde damals gerade eine neue Arbeitsgruppe aufgebaut, die sich mit der Simulation in der Lackiertechnik beschäftigte. Leiter der Arbeitsgruppe war und ist Prof. Dr. J. Domnick, der in seiner Zeit am IPA wichtige grundlegende Beiträge zur Forcierung der virtuellen Lackierung geleistet hat.

Fluent Deutschland war und ist als Partner für die Entwicklung und die Implementierung zusätzlicher Modelle in das Programm FLUENT anerkannt und äußerst hilfreich.

Die CADFEM GmbH entwickelt seit 1997 und vertreibt seit 2002 die Software VirtualPaintShop (VPS). Zu dieser Software gehören inzwischen Module zur Trocknungssimulation (VPS/DRY), kathodischen Tauchlackierung (VPS/EDC), Hohlraumversiegelung (VPS/CP), Tauchsimulation (VPS/DIP) und semiautomatischen Modellgenerierung (CATIA Toolkit). Die Module basieren teilweise auf empirischen Ansätzen in Kombination mit der Methode der Finiten Elemente. Das Modul zur Trocknungssimulation VPS/DRY konnte bereits, wie in Abb. 1.4 dargestellt, zur

Berechnung von Aufheizkurven, Haltezeiten sowie zur Verformung einer Karosserie eingesetzt werden [35]. Die Strömungsverhältnisse sowie die eigentliche Filmbildung und Lackrocknung konnten mit diesem Tool jedoch noch nicht direkt berechnet werden.

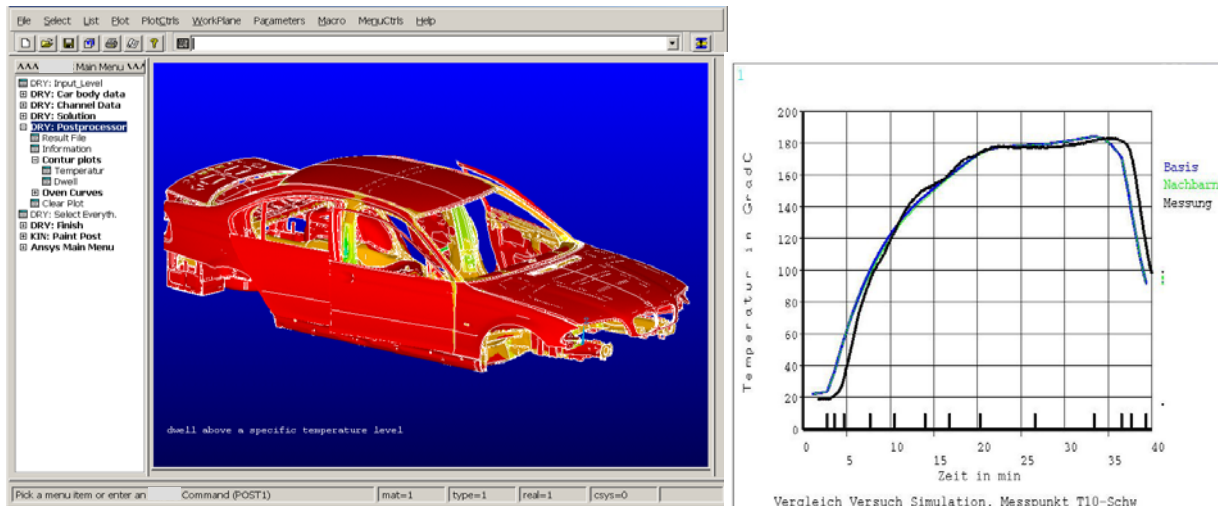


Abb. 1.4: Anwendungsbeispiel von VPS/DRY zur Berechnung der Aufheizkurve

### 1.3 Voraussetzungen für das Vorhaben

Bei der Zielsetzung des Forschungsvorhaben handelte es sich um eine äußerst komplexe und schwierige Aufgaben- und Fragestellung, die nur im Rahmen eines großen Forschungskonsortiums gelöst werden konnte, in dem verschiedene kompetente Forschungsinstitutionen, Softwarehersteller und Anwender im Rahmen eines Verbundes interdisziplinär zusammenarbeiteten. Dementsprechend wurde dieses Vorhaben unter direkter oder indirekter Mitwirkung aller Einrichtungen durchgeführt, die bereits vor dem Projektstart signifikante Beiträge zur Simulation lackiertechnischer Prozesse geleistet und entsprechende Erfahrungen gesammelt hatten.

Eine weitere Voraussetzung für das Gelingen des Forschungsvorhabens war auch die umfangreiche, zum Großteil bereits vorhandene Technika-Ausstattung des IFF, des TTD und der HS-Esslingen.

### 1.4 Planung und Ablauf

Zur Strukturierung und Planung des Projektes sowie zur Überwachung des ordnungsgemäßen Ablaufs wurde das gesamte Arbeitsprogramm in insgesamt 15 Arbeitspakete (AP) aufgeteilt und jedem Arbeitspaket ein „verantwortlicher und federführender“ Projektpartner zugeordnet.

Eine ausführliche Beschreibung der Arbeitspakete findet sich in dem eingereichten Forschungsantrag sowie in den Zwischenberichten und in den nachfolgenden

Unterkapiteln der einzelnen Projektpartner. An dieser Stelle sollen lediglich die Gesamtdarstellung sowie während der Projektlaufzeit entstandene Abweichungen von der Zeitschiene erläutert werden. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Grobstruktur des Projektes sowie tabellarisch die einzelnen Arbeitspakete mit den „verantwortlichen“ Projektpartnern und mit den geplanten Zeitspannen für die Bearbeitung. In Grau sind die ursprünglichen Zeitschienen dargestellt. Diese konnten auch weitgehend eingehalten werden. Eine inhaltliche Änderung der einzelnen Arbeitspakete und Ziele wurde nicht vorgenommen.

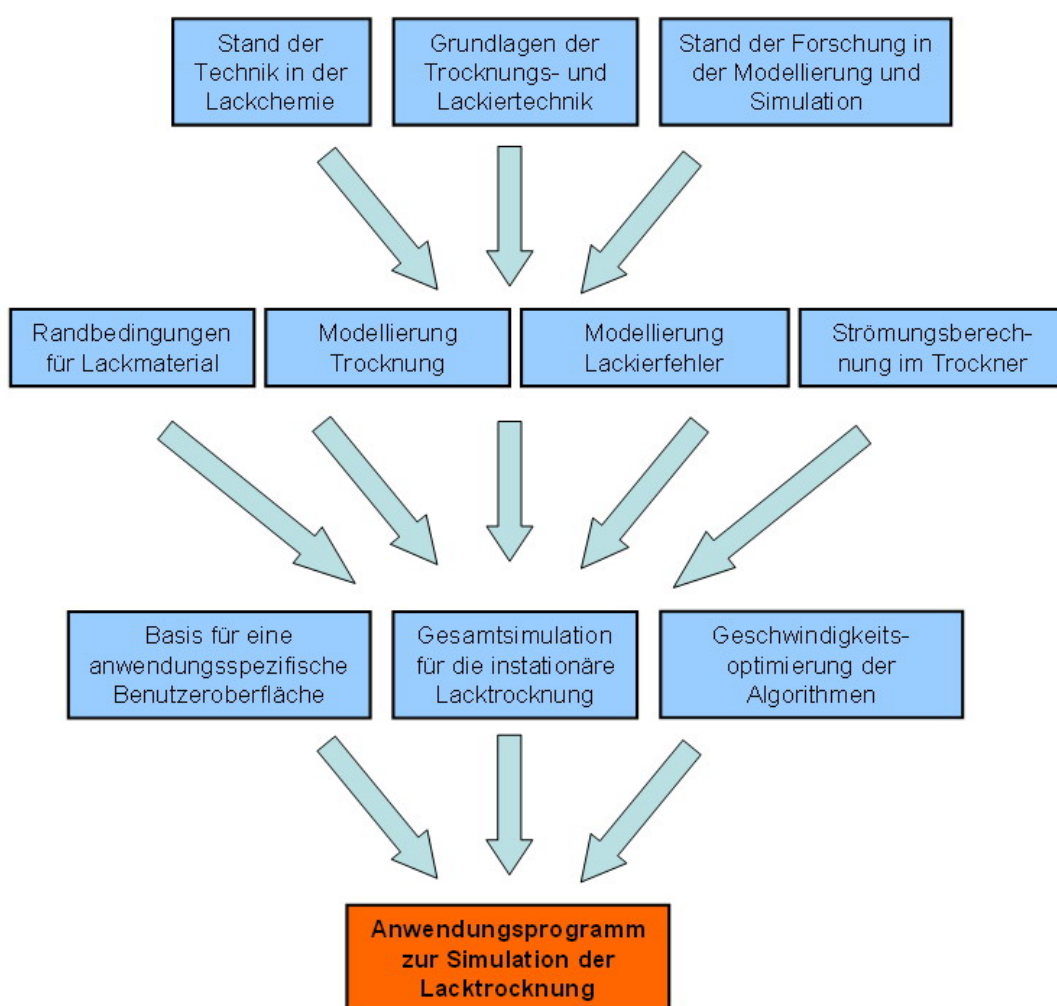


Abb. 1.5: Grobstruktur des Projektvorhabens. Zu erkennen ist, ausgehend von grundlegenden Aspekten, die zielgerichtete Fokussierung auf ein praxisgerechtes Anwendungsprogramm

Während der Bearbeitung der in Abb. 1.5 angegebenen Grobstruktur ergaben sich partielle Schwierigkeiten bei der Entwicklung und Programmierung des Quellcodes zum Trocknungsmodell sowie bei der Überlassung der CAD-Daten durch die Automobilbauer und die Aufbereitung der CAD-Daten. Hieraus resultierte gegenüber

dem ursprünglichen Arbeitsplan eine Erweiterung der zu betrachtenden Aspekte (vgl. Abb. 1.8) sowie eine zeitliche Verschiebung einzelner Arbeitspakete von 2 – 6 Monaten.

Der sich während der Laufzeit bei einzelnen Arbeitspaketen ergebende, zeitliche Verzug ist in der nachfolgenden Abbildung in rot und die benötigte Verlängerung in gelb dargestellt. Es wird deutlich, dass alle Verzögerungen noch während der regulären Projektlaufzeit aufgeholt werden konnten. Lediglich die Hochschule Esslingen beantragte aus organisatorischen Gründen eine zweimonatige Verlängerung. Hierdurch wurde aber der reguläre Projektablauf nicht beeinträchtigt.

Jahr		2006				2007				2008				2009			
Quartal		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
AP 1	Grundlagen																
IFF					M1												
AP 2	Stand der Technik																
CADFEM					M2												
AP 3	Simulation Strömung/Aufheizung																
IFF						M3											
AP 4	Stoffdaten																
FHTE																	
AP 5	Modellierung Trocknung																
TTD																	
AP 6	Modellintegration Trocknung																
Fluent																	
AP 7	Verifikation Trocknungsmodell																
IFF												M4					
AP 8	Experimente Lackierfehler																
FHTE																	
AP 9	Integration Lackierfehlermodell																
Fluent																	
AP 10	Verifikation Lackierfehlermodell																
IFF														M5			
AP 11	Industrielle Verifikation																
IFF																M6	
AP 12	Analyse und Umsetzung																
DFO																	
AP 13	Koordination																
IFF																	

Abb. 1.6: Arbeitspakete und Zeitschiene

Zur Erfolgskontrolle und Überwachung des Vorhabens wurden die nachfolgenden Milestones eingeführt und zur gegebenen Zeit verifiziert. Wie bereits erwähnt, war dabei keine inhaltliche oder fachliche Änderung oder Anpassung der Arbeitspakete nötig.

M1: Zusammenstellung der vorhandenen Grundlagen, Definition der zu betrachtenden Anwendungsfälle

M2: Darstellung des Standes der Technik

- M3: Verfügbarkeit eines anwendungsgerechten, verifizierten Programms zur Simulation der Strömung und der Werkstückaufheizung
- M4: Verfügbarkeit eines implementierten Modells für die Lackrocknung
- M5: Verfügbarkeit eines implementierten Modells zur Beschreibung wichtiger, durch die Trocknung verursachter Lackfilmfehler
- M6: Fertigstellung des Programms zur Simulation der Lackrocknung

Das Vorhaben wurde in enger Zusammenarbeit mit den beteiligten Partnern aus der Industrie durchgeführt. Zur Diskussion der Ergebnisse und Abstimmung des weiteren Vorgehens wurde daher ein projektbegleitender Expertenkreis gegründet und ca. alle drei Monate ein Arbeitskreis unter Beteiligung aller Projektpartner und Experten aus den jeweiligen Firmen einberufen. Insgesamt waren es 11 Sitzungen, die überwiegend am IFF in Stuttgart stattfanden. Darüber hinaus gab es eine Vielzahl kleinerer Projekttreffen und Workshops mit speziellen Inhalten wie „Numerik“ und „CAD und Vernetzung“. Um die Gesamtorganisation des Projektes und den Dialog zwischen den einzelnen Partnern zu erleichtern, wurde vom IFF eine internetbasierte (Abb. 1.7), kostenfreie Arbeitsumgebung eingerichtet. In dem passwortgeschützten Bereich dieser Workspace werden unter „<http://workspace.iff.uni-stuttgart.de/SiLat>“ alle projektrelevanten Dokumente, Berichte und Daten gespeichert, Aufgaben zugewiesen sowie aktuelle Veranstaltungstermine bekannt gegeben. Diese Plattform bleibt auch nach Projektende bestehen und dient u.a. noch der Sammlung von Veröffentlichungen und Anwendungsbeispielen.

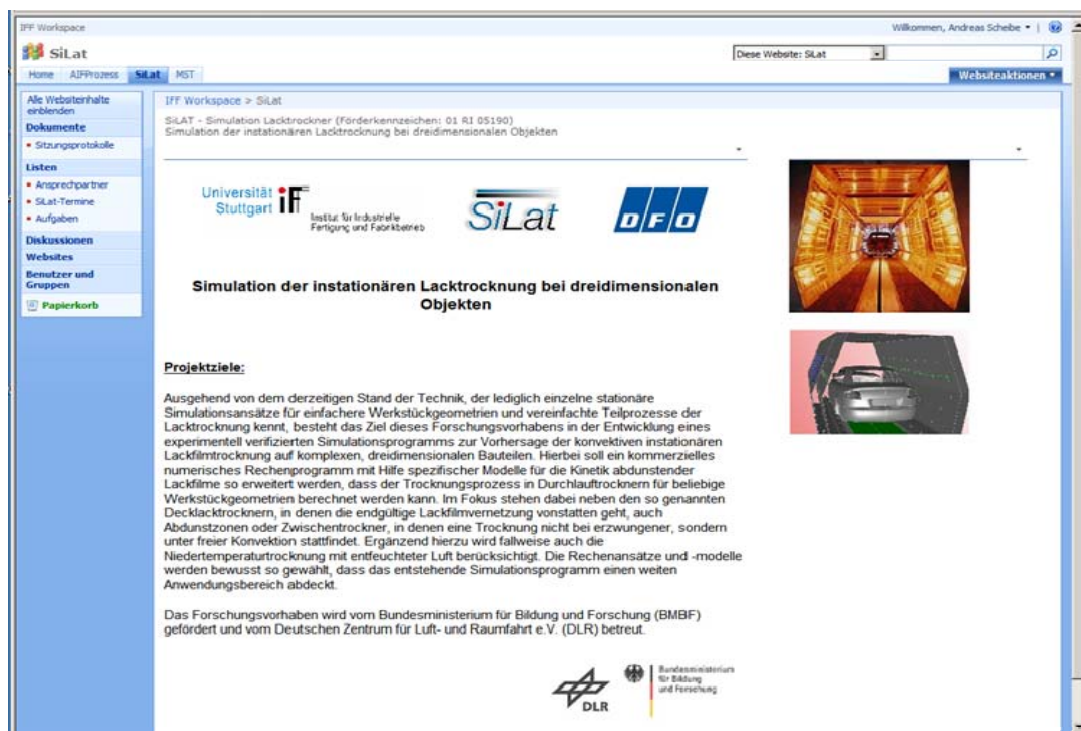


Abb. 1.7: Oberfläche der internetbasierten „Workspace SiLat“



Wie bereits erwähnt, wurde die ursprüngliche Grobstruktur (vgl. Abb. 1.8, rechts) um verschiedene Aspekte (vgl. Abb. 1.8, links) erweitert. Dies geschah vor allem vor dem Hintergrund, dass die CAD-Datenaufarbeitung und Rechenetzterstellung für industrierelevante Trocknersimulationen besondere Ansprüche beinhalten und sich stark auf die Qualität der Simulation auswirken. Obwohl die hieraus resultierenden Arbeitspakete nicht im ursprünglichen Projektantrag vorgesehen waren, mussten sie zum Nachweis der Industrietauglichkeit des Simulationsprogramms dennoch erbracht werden. Insbesondere waren dies Arbeiten zur:

- Organisatorischen Verfügbarkeit industrierelevanter CAD-Daten im Projektkreis
- CAD-Datenaufbereitung am Beispiel der Golf 5-Karosse
- Erarbeitung effizienter, bauteilbezogener Vernetzungsstrategien
- Experimentellen Ermittlung bauteilspezifischer Materialwerte
- Erstellung und Verifizierung großer numerischer Rechnetze
- Bereitstellung der erforderlichen, zusätzlichen Rechenleistung

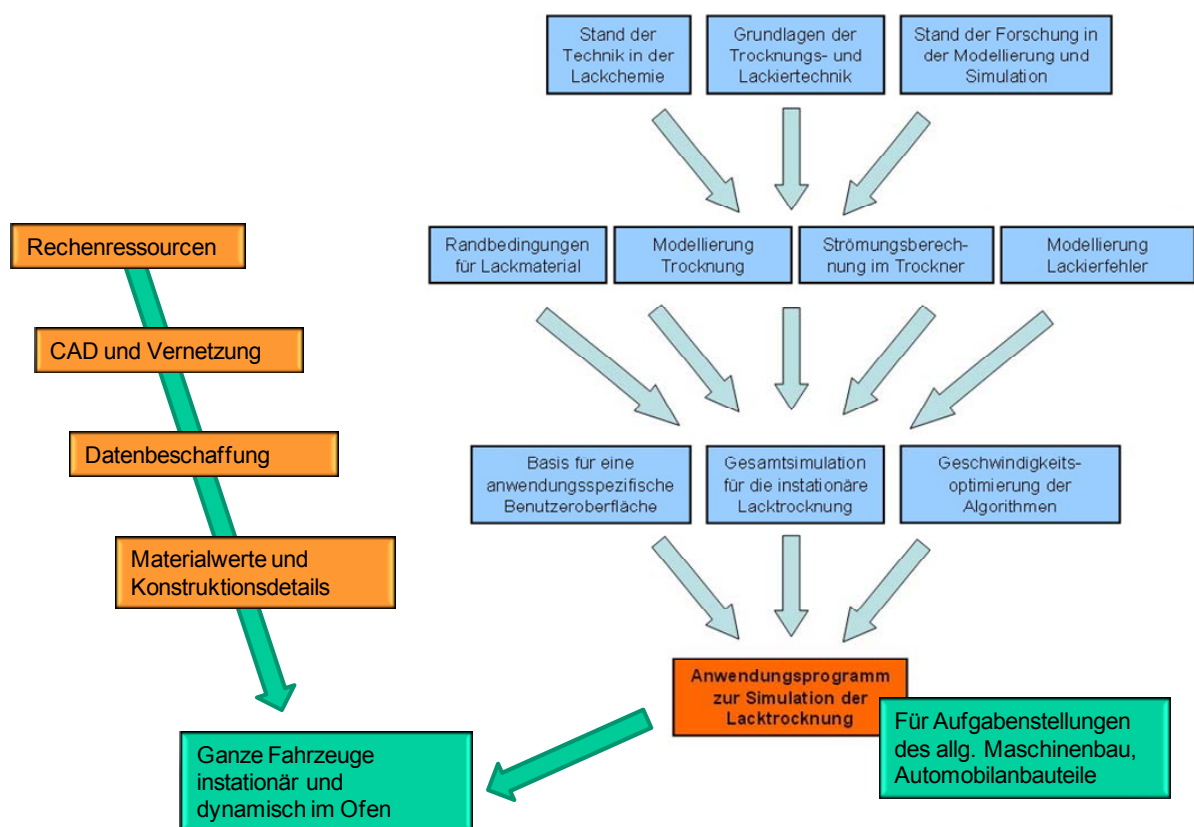


Abb. 1.8: Erweiterte Projektstruktur und Arbeitspakete

Mit diesen, teilweise neu definierten Arbeitsinhalten ergab sich die nachfolgende Zeitschiene zur Erstellung der Simulationsmodule und zur Überprüfung der Milestones. Das Vorgehen baut sich systematisch auf von einfachen zweidimensionalen Anwendungsfällen über dreidimensionale Automobil-Anbauteile bis hin zu vollständigen, komplexen Fahrzeugkarossen.

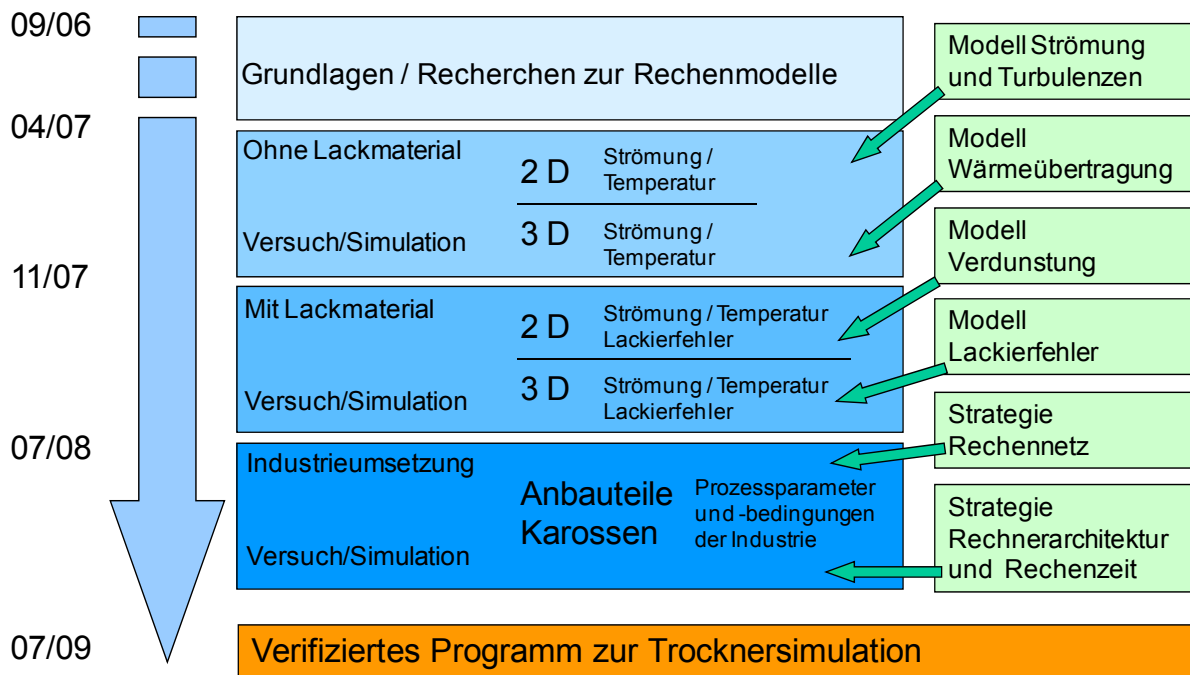


Abb. 1.9: Korrigierte Zeitschiene und Umsetzung der Milestones

### 1.5 Erzielte Ergebnisse

Als Endprodukt dieses Forschungsvorhabens entstanden die prototypische Anwendung sowie die Basis für ein industriegerechtes Simulationspaket zur Vorhersage industrierelevanter Trocknungsprozesse und damit verbundener Produkt-Qualitätsfragen. Alle dem Projekt angeschlossenen Projektpartner haben einen direkten Zugriff auf die programmierte Simulationserweiterungen (UDF), die Handlungsvorschriften zur „best-practice“, die Anwendungsbeispiele sowie die erarbeiteten Grundlagenkenntnisse.

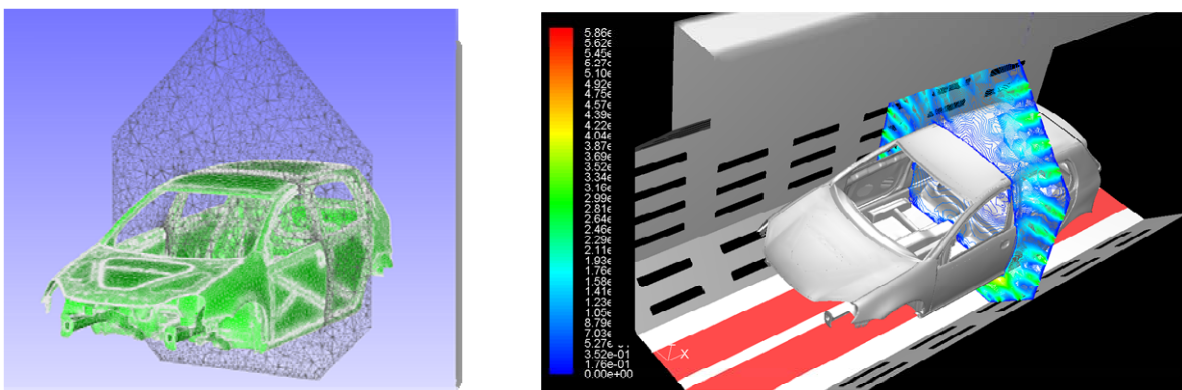


Abb. 1.10: Beispiel eines Projektergebnisses: Vernetzungsstrategie (links) und detailliertes Strömungsfeld an einer konkreten Stelle im Trockner (rechts)

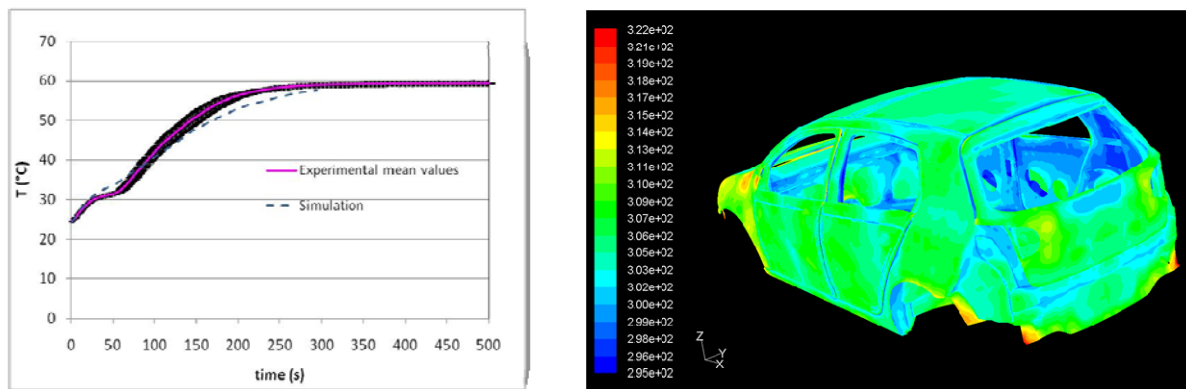


Abb. 1.11: Projektbeispiel: lokale, zeitabhängige Lackrocknung mit 1. und 2. Trocknungsabschnitt (links) sowie flächige Darstellung einer momentanen Temperaturverteilung im Zwischenzustand der Aufheizung (rechts)

Die beteiligten Softwareanbieter werden die noch erforderlichen Entwicklungen für die Kommerzialisierung des Programms in den kommenden Monaten durchführen. Dabei sind 2 unterschiedliche Endversionen für den Anwender vorgesehen:

- Eine auf physikalischen Modellen beruhende Softwareerweiterung für das auf der numerischen Strömungssimulation (CFD) basierende Programm FLUENT
- Eine Implementierung der Fehlerentstehungsmodelle und Weiterentwicklung des überwiegend empirisch geprägten Programmpakets VPS-Dry der Fa. CADFEM

## 1.6 Nutzen, Verwertung und Ausblick

Die durchgeführten Arbeiten haben durch ihre zahlreichen Veröffentlichungen bereits jetzt zu einer generellen Anhebung des Kenntnisstandes bezüglich des Prozesses der industriellen Lackrocknung geführt. Bei einer konsequenten Umsetzung der Ergebnisse lassen sich signifikante, sowohl wirtschaftliche wie auch umweltentlastende Effekte erzielen. Dabei kann zwischen kurz- und längerfristigen Auswirkungen unterschieden werden. Langfristig sind solche Prozesssimulationen Bestandteile der digitalen Fabrik und stellen damit ein modernes und effektives Werkzeug zur Optimierung von Fertigungsprozessen und Fabrikabläufen dar. Mit Hilfe der digitalen Fabrik können innovative Technologien zur Optimierung von Produkten und Dienstleistung realisiert werden. Die virtuelle Lackieranlage ist hierbei ein integraler Bestandteil, da auch in Zukunft die Oberflächenbeschichtung ein wichtiger Schritt im Fertigungsablauf darstellen wird.

Kurz- und mittelfristig ergeben sich durch die unmittelbare Anwendung des erstellten, noch zu kommerzialisierenden Simulationsprogramms eine Reihe von positiven Auswirkungen für die Lackiertechnik, z.B. die generelle Verbesserung der Betriebssicherheit von Lackrocknern, die Reduzierung des Energieaufwandes, die Minimierung des Nacharbeitsaufwandes und damit eine generelle Reduzierung der Produktionskosten sowie die schnelle und effektivere Umsetzung neuer, umweltfreundlicherer Lacksysteme und Trocknungsprozesse. Bereits jetzt konnte eine Reihe von



grundlegenden Ergebnissen erzielt werden, deren Umsetzung und Transfer in die Praxis bereits während der Projektlaufzeit begannen und die über das Projektende hinaus weitergeführt werden können.

Aus wissenschaftlicher Sicht hat das vorliegende Forschungsvorhaben signifikanten Pilotcharakter, da erstmalig versucht wurde, einen wichtigen Teilprozess der Lackierung gesamthaft zu simulieren. Die Erfahrungen, die hier gesammelt wurden, werden richtungweisend für die weitere Realisierung und Umsetzung der virtuellen Lackierung als Teil der digitalen Fabrik sein. Für die beteiligten Hochschulen ergibt sich die Möglichkeit, mit der Entwicklung ähnlicher, problemangepasster numerischer Modelle direkt an dieses Forschungsvorhaben anzuschließen.

Aus wirtschaftlicher Sicht entstand durch dieses Forschungsvorhaben die Basis für ein anwendungsgerechtes Simulationspaket zur Vorhersage industrierelevanter Trocknungsprozesse. Die beteiligten Softwareanbieter werden jetzt die noch erforderlichen Entwicklungen für die Kommerzialisierung des Programms im Anschluss an das Forschungsvorhaben durchführen. Bei entsprechender Nachfrage durch Kunden oder im Rahmen weiterer Forschungsprojekte sind u.a. folgende Arbeiten geplant:

- Anbindung des Verdunstungsmodells und/oder des Lackierfehlermodells in andere Programmsysteme, z.B. VPS/DRY.
- Weiterentwicklung des Lackierfehlermodells für andere Qualitätsrelevante Oberflächeneigenschaften.
- Seminar zur Vernetzung?

Langfristig soll dann das kommerzielle Simulationspaket zur Vorhersage konvektiver Trocknungsprozesse um Module zur Berechnung der Lackhärtung mit infraroter und ultravioletter Strahlung erweitert sowie als elementarer Baustein der digitalen Fabrik in eine durchgängige Prozesskettensimulation integriert werden.

## 1.7 Literatur und eigene Veröffentlichungen

### A. Grundlegende, relevante Literatur zum Forschungsvorhaben:

- [01] D. Ondratschek, M. Schneider, H. Vogelsang: Forcierung des Wasserlackeinsatzes durch neue Trocknungsverfahren. Forschungsbericht FZKA-BWPLUS, Universität Stuttgart, Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF), 2001
- [02] J. Mintzlaff: Trocknungsmechanismen bei der Dispersionslackierung. Fortschr.-Bericht, VDI Reihe 3, Nr. 614, VDI-Verlag, 1999
- [03] M. Schröder: Untersuchungen zum Trocknungsvorgang bei nass-in-nass applizierten Lackschichten. Fortschr.-Bericht, VDI Reihe 3, Nr. 775, VDI-Verlag, 2002
- [04] C. Geipel: Energie- und Stofftransport bei der Trocknung von Automobil-Basis- und Modelllacken. Fortschr.-Bericht, VDI Reihe 3, Nr. 855, VDI-Verlag, 2006

- [05] W. Schabel, P. S. Scharfer, M. Kind: Messung von Konzentrationsprofilen bei der Trocknung von dünnen Filmen mit Hilfe der Konfokalen-Mikro-Raman-Spektroskopie. *Chemie Ingenieur Technik*, Vol. 75, no. 8, S. 1105-1106
- [06] R. Saure: Zur Trocknung von lösemittelfeuchten Polymerfilmen. *Fortschr. Bericht VDI-Reihe 3, Nr. 407*, VDI-Verlag, 1995
- [07] M.M. Hussain, I. Dincer: Numerical simulation of two-dimensional heat and moisture transfer during drying of a rectangular object. *Numerical Heat and Moisture Transfer, Part A*, vol. 43, no. 8, p. 867-878
- [08] M.M. Hussain, I. Dincer: Analysis of two-dimensional heat and moisture transfer during drying of spherical objects. *International Journal of Energy Research*, vol. 27, no. 8, p. 703-713
- [09] E.P. Suhovic: Comparative Analysis of Turbulence Models. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, vol. 73, no. 2, 2000
- [10] J.R. Quispe, E. Canales, R. Borquez: Simulation of turbulent flows in an impingement dryer by an extended kappa-epsilon model. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 190, no. 5-7, p. 625-637
- [11] Z. Han, R.D. Reitz: A temperature wall function for variable-density turbulent flows with application to engine convective heat transfer modeling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 40, no. 3, p. 613-625
- [12] R.A. Cairncross: The fate of residual solvent in drying coatings: can it get trapped and how? *PSTC, Pressure Sensitive Tape Council*, vol. 25, p. 85-96.
- [13] M. Vinjamur, R.A. Cairncross: Guidelines for dryer design based on results from non-Fickian model. *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 87, no. 3, p. 477-486.
- [14] R.A. Cairncross: Residual solvent in drying coatings. Can it get trapped and how? *Adhesives Age*, vol. 45, no. 7, p. 37-41
- [15] R.A. Cairncross, S. Jeyadev, R.F. Dunham, K. Evans, L.F. Francis, L.E. Scriven: Modeling and design of an industrial dryer with convective and radiant heating. *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 58, no. 8, p. 1279-1290
- [16] P.E. Price jun., R.A. Cairncross: Optimization of single-zone drying of polymer solution coatings to avoid blister defects. *Drying Technology*, vol. 17, p. 1303-1311
- [17] R.A. Cairncross, C.J. Durning: A Model for Drying of Viscoelastic Polymer Coatings. *AIChE Journal*, vol. 42, no. 9, p. 2415-2425
- [18] R. Saure, G.R. Wagner, E.U. Schluender: Drying of solvent-borne polymeric coatings. *Surface and Coatings Technology*, vol. 99, no. 3, p. 253-256
- [19] C. Klocke, O. Böhm, C. Groth, C. Steinbeck-Behrens: Virtuelle Lacktrocknung bei BMW. *Journal für Oberflächentechnik*, 2000, Nr. 9, S. 52, 54
- [20] K. Huber: Simulation des Temperaturverhaltens von Fahrzeugkarosserien im KTL-Trockner. *DFO Automotive Conf. 2004*, S. 54-64
- [21] B.E. Launder: Numerical computation of convective heat transfer in complex turbulent flows: time to abandon wall function? *International Journal of Heat Mass Transfer*. Vol. 27 No. 9, pp.1485-1491, 1984
- [22] R.W. Johnson: Numerical simulation of local Nusselt number for turbulent flow in a square duct with a 180° bend. *Numerical Heat Transfer*, vol.13, pp.205-228, 1988

- [23] N. Djilali, I. Gartshore, and M. Salcudean: Calculation of convective heat transfer in recirculating turbulent flow using various near-wall turbulence models. Numerical Heat Transfer, Part A, vol. 16, pp.189-212, 1989
- [24] J. Bredberg and L. Davidson: Low-Reynolds number turbulence models: An approach for reducing mesh sensitivity. ASME vol. 126, pp.14-21, 2004
- [25] D. Cooper, D.C. Jackson, B.E. Launder and G.X. Liao: Impinging jet studies for turbulence model assessment—I. Flow-field experiments. Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 36, No. 10, pp. 2675-2684, 1993
- [26] T.J. Craft, L.J. Graham and B.E. Launder: Impinging jet studies for turbulence model assessment—II. An examination of the performance of four turbulence models. Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.36, No. 10, pp. 2685-2697, 1993
- [27] S.Z. Shuja, B.S. Yilbas, and M.O. Budair: Gas jet impingement on a surface having a limited constant heat flux area: various turbulence models. Numerical Heat Transfer, Part A, 36: pp. 171-200, 1999
- [28] S. Bae, S.K. Lele, and H.J. Sung: Direct numerical simulation of stagnation region flow and heat transfer with free-stream turbulence. Physics of Fluid Vol. 15, Nr. 6, pp. 1462-1483, 2003
- [29] P.A. Durbin: Separated flow computations with the  $k-\epsilon-v^2$  model. AIAA journal Vol. 33, No. 4, pp. 659-664, 1995
- [30] M. Behnia, S. Parneix, and P.A. Durbin: Prediction of heat transfer in an axis-symmetric turbulent jet impinging on a flat plate. Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 41, No. 12, pp. 1845-1855, 1998.

#### B. Eigene Vorarbeiten der Projektpartner:

- [31] D. Ondratschek, M. Schneider, H. Vogelsang: Forcierung des Wasserlackeinsatzes durch neue Trocknungsverfahren. Forschungsbericht FZKA-BWPLUS, Universität Stuttgart, Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF), 2001
- [32] Scheibe, A.: Teilchenbahnberechnung zur Simulation von elektrostatischen Lackiervorgängen mit Hochrotationszerstäubern, Dissertation, Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb, Universität Stuttgart, 2000
- [33] Ye, Q., Domnick, J., Scheibe, A.: Numerical simulation of electrostatic spray-painting processes in the automotive industry. In Krause, E.: High Performance Computing in the Science and Engineering 2004 : Transactions for the High Performance Computing Center, Stuttgart (HLRS) 2004. 7th HLRS results and review workshop on October 4 - 5 at the HLRS, Berlin : Springer, 2005, ISBN 3-540-22943-4, S.261-275
- [34] Scheibe, A.: Anwendung der Beschichtungssimulation in der Praxis. Simulation in der Lackiertechnik : Fraunhofer IPA - Workshop, 4. November 2004, Stuttgart, Stuttgart, 2004
- [35] K. Rother et al.: Towards a virtual process chain for body painting: Modular developments and implementation strategies, 3<sup>rd</sup> Int'l Strategy Conference "Core Issues for future Car Body Painting", 19.-20.06.2002, Berlin
- [36] C. Geipel, M. Schröder, P. Stephan: Untersuchung des Trocknungsvorganges von Automobil-Basislacken. Chemie Ingenieur Technik, Vol. 75, No. 8, pp. 1005-1006, 2003.

- [37] C. Geipel, P. Stephan: Experimental investigation of the drying process of automotive base paints. Proceedings 4th Europ. Thermal Sciences Conference, paper dry1, Birmingham, 2004. In print: Journal of Applied Thermal Engineering.
- [38] S. Sckuhr, P. Stephan: Modellierung des Verdunstungsverhaltens von Tropfen einer wässrigen Polymerdispersion. Chemie Ingenieur Technik, Vol. 73, No. 5, pp. 509-514, 2001.
- [39] J. Domnick et al.: Vorhersage der Schichtdicke und des Auftragswirkungsgrades bei der Pulverbeschichtung, DFO-Tagung Pulverlack-Praxis, Lindau, 14.-15. Juni 1999
- [40] J. Domnick et al.: Berechnung der Luftströmung in Lackierkabinen mit numerischen Verfahren, DFO-Automobil-Tagung, Weimar, 29.-30. Sept. 1998
- [41] Scheibe, A. ; Steinhilber, T. ; Ye, Q. ; Westkämper, E.: Simulationsverfahren für eine optimale Luftführung in großräumigen Lackierkabinen. In: wt Werkstattstechnik online 97 (2007), Nr.6, S.449-452

#### C. Im Rahmen dieses Vorhabens veröffentlichte Beiträge:

- [42] Scheibe, A.; Westkämper, E.: Complex Numerical Simulation in Production Techniques. In: Resch, Michael; The 8th High Performance Computing on Vector Systems 2008, Springer-Verlag GmbH, 2009
- [43] Scheibe, A.: Zwischenergebnis zum Verbundprojekt "Simulation von Lacktrocknern", European Automotive Coating 15. DFO Automobil-Tagung, Deutsche Forschungsgesellschaft für Oberflächenbehandlung e.V., 2008
- [44] Scheibe, A.; Westkämper, E.; Ye, Q.: Modelling and simulation of drying processes - a new approach in virtual painting. In: Teti, R. ; International Institution for Production Engineering Research - CIRP-, Paris: Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, CIRP ICME 2008. CD-ROM: Innovative and Cognitive Production Technology and Systems. 6th CIRP International Conference, 23-25 July, 2008, Naples, Italy, Naples, 2008
- [45] Ye, Q.; Pulli, K.; Scheibe, A.; Domnick, J.; Gruseck, D.: Numerical and experimental study of convective heat transfer with complicated turbulent flow in a laboratory dryer for turbulence model assessment. In: Meyer, J.P.: Heat Transfer, Fluid Mechanics & Thermodynamics, HEFAT 2008 : Proceedings of the Sixth International Conference, Pretoria, South Africa, 30 June-2 July 2008, Pretoria, ZA, 2008
- [46] Scheibe, A.; Westkämper, E.; Ye, Q.: Numerical simulation of painting processes. In: NAFEMS Deutschland, Grafing bei München: Simulation of Complex Flows (CFD) - Applications and Trends: Seminar, 10th-11th March 2008, Wiesbaden, Germany, Bernau am Chiemsee, 2008
- [47] Scheibe, A.; Westkämper, E.; Ye, Q.: Modelling and simulation of drying processes - a new approach in virtual painting. In: Maropoulos, P.G.; International Institution for Production Engineering Research -CIRP-, Paris: 4th International Conference on Digital Enterprise Technology, DET 2007. Proceedings: 19-21 September 2007, Bath, United Kingdom, Bath, 2007

- [48] Scheibe, A.; Westkämper, E.: Simulation von Lacktrocknern : Ein weiterer Baustein der virtuellen Fabrik. In: wt Werkstattstechnik online 97 (2007), Nr.6
- [49] Scheibe, A.: Zwischenergebnisse zum Verbundprojekt "Simulation von Lacktrocknern". In: Friedrich, R.; Deutsche Forschungsgesellschaft für Oberflächenbehandlung e.V. -DFO-: European automotive coating. 14th DFO Automotive Conference 2007. Conference papers: 8th - 9th May 2007, Bad Kissingen, Neuss: DFO Service GmbH, 2007
- [50] F. Brinckmann, S. Hecht, P. Stephan: Simulation of the drying process of paint films using FLUENT. ANSYS Conference & 25. CADFEM Users' Meeting, Dresden, November 2007
- [51] Felix Brinckmann, Thomas Lehnhäuser, Ralf Löffler, Peter Stephan: Simulation of the heat and mass transfer during paint drying processes. ANSYS Conference & 27. CADFEM Users' Meeting. Leipzig, November 2009
- [52] F. Brinckmann, P. Stephan: Wärme- und Stofftransport bei der Zwischentrocknung von Basecoat-Systemen. Invited keynote paper, Proceedings 14th DFO Automotive Conference, pp. 149-156, Bad Kissingen, 2007
- [53] F. Brinckmann, P. Stephan: Experimental investigation of the drying process of water-based paints used in automotive industry. European Coating Symposium, Karlsruhe, September 2009
- [54] YE, Q., PULLI, K., SCHEIBE, A.: Prediction of turbulent heat transfer for industrial drying processes – Turbulence model assessment. NAFEMS World Congress 2009, June 16th-19th, Crete, Greece.
- [55] YE, Q., PULLI, K., SCHEIBE, A., J DOMNICK, and GRUSECK, D: Numerical simulation of turbulent heat transfer in industrial drying processes. Proceeding of the 4th EASC 2009, European Automotive Simulation Conference, Munich, Germany.
- [56] DOMNICK, J., GRUSECK, D., PULLI, K., SCHEIBE, A. and YE, Q.: Investigation of the drying process of Water based paint film for automotive applications. Proceedings of 8th European Coating Symposium, Sept. 7-9, Karlsruhe, 2009.
- [57] Trautwein, E.: Untersuchungen zur Bildung von Nadelstichen unter definierten Applikations- und Trocknungsbedingungen. Diplomarbeit, Chemieingenieurwesen, Hochschule Esslingen, 2009.
- [58] Yin, Y.: Experimentelle Untersuchungen des Hygrex-Trockners hinsichtlich des Strömungsfeldes und des Aufheizverhaltens in Abhängigkeit von Eingangsgeschwindigkeit und Werkstückgeometrie. Diplomarbeit Maschinenbau, Universität Stuttgart, 2007.
- [59] Shen, B.: Numerische Simulation der Trocknungsprozesse im Hygrex-Trockner. Diplomarbeit, Maschinenbau, Universität Stuttgart, 2010.

## **2. Einzelberichte der Zuwendungsempfänger**

### **2.1 Bericht des IFF**

#### 2.1.1 Zielsetzung und Aufgabenstellung

Im Rahmen des Verbundprojektes SiLat übernahm das Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart (IFF) die Projektleitung und Organisation über die gesamte Projektphase.

Primärziel aller beteiligten Projektpartner war, ein experimentell verifiziertes Simulationsprogramm zur Vorhersage der dominant konvektiven instationären Lackfilmtrocknung auf komplexen, dreidimensionalen Bauteilen zu erhalten.

Das IFF hatte am Anfang des Projektes die Aufgabe, mit der Hilfe von Literaturrecherchen und mit der Hilfe von Fragebögen an Anwender aus der Praxis den Stand der Technik zur konvektiven Trocknung in allen infrage kommenden naturwissenschaftlich-technischen Bereichen zu aktualisieren.

Im weiteren Verlauf des Projektes wurden durch die Fachhochschule Esslingen (FHTE) die experimentellen Arbeiten begonnen. Das IFF stellte dazu die Laboreinrichtungen und die Gerätschaften, wie z.B. den Hygrex- und den Eisenmann-Trockner zur Verfügung und begleitete die Experimente von Anbeginn an.

Von Anfang an wurden vom IFF auch die physikalischen Grundlagen zur Thermodynamik und zur Strömungsmechanik untersucht, um schrittweise die Strömungssimulation im Ofen sowie die Aufheizsimulation auf den Bauteilen durchführen zu können, zunächst ohne Lack und für einfache Bauteilgeometrien, um zum Abschluss die Lacktrocknungssimulation auf komplexen Bauteilen durchführen zu können. Dazu wurden vom IFF ausführliche physikalische Grundlagenuntersuchungen durchgeführt, z.B. Einfluss der Turbulenzmodelle auf die Strömung sowie den Einfluss der Wärmestrahlung und den Einfluss von verschiedenen Bauteilmaterialien sowie Werkstoffpaarungen auf die Aufheizung.

Parallel dazu wurden von der FHTE Experimente durchgeführt, wie z.B. Geschwindigkeitsmessungen im Ofen sowie Aufheizkurven auf Bauteilen, zunächst ohne Lack. Diese Ergebnisse dienten zur ständigen Verifizierung der Simulationsergebnisse für das IFF. Dadurch konnten u.a. auch, als Vorbereitung zur Simulation mit komplexen Bauteilen, Modellierungs- und Vernetzungsregeln festgelegt werden.

In der zweiten Phase des Projektes wurde dann schließlich vom Institut für technische Thermodynamik Darmstadt (TTD) in Zusammenarbeit mit ANSYS Deutschland GmbH Darmstadt (ANSYS) das Lacktrocknungsmodell, basierend aus Vorarbeiten des TTD, entwickelt und im FLUENT-Programm schrittweise implementiert. Das IFF führte dazu erste Verifikationsrechnungen durch und überprüfte die Ergebnisse auf deren Konsistenz. In enger Zusammenarbeit mit dem TTD wurden die Modelle fertiggestellt und von ANSYS in das FLUENT-Programm

implementiert. Ende 2008 war die Programmentwicklung abgeschlossen.

Das IFF hatte zum Abschluss des Projektes Anfang 2009 die Aufgabe, mit verschiedenen Versuchsparametern das Programm ausgiebig zu testen und die simulierten Ergebnisse mit den Praxiswerten der FHTE zu vergleichen.

Für die gesamte Umsetzung der Ziele wurden die Arbeiten in 13 Arbeitspakete gegliedert.

### 2.1.2 Arbeitspakete und Zeitschiene

Im Rahmen des Projektes SiLat wurden die Arbeitspakete (AP) in enger und aktiver Zusammenarbeit gemeinsam mit den Projektpartnern durchgeführt. Das IFF hatte dabei folgende Aufgaben durchzuführen:

#### AP 1

Im Arbeitspaket 1 wurden die physikalischen Grundlagen zur Lacktrocknung aus bisherigen Kenntnissen der Strömungsmechanik, der Thermodynamik und der Festigkeitslehre sowie die dadurch begründeten Anforderungen an die Prozesssimulation zusammengetragen und ausgewertet.

#### AP 2

Das IFF hatte im nächsten Schritt in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern die Aufgabe, den aktuellen Stand der Technik zu Berechnungsmöglichkeiten von Strömungen in Trocknern sowie die Aufheizung von darin befindlichen Objekten zu ermitteln, auszuwerten und bereits erste mögliche Lösungsstrategien, insbesondere die Vernetzungsmöglichkeiten komplexer Geometrien, zu erarbeiten. Die Arbeitspakete 1 und 2 waren nach dem 1. Quartal 2007 abgeschlossen.

#### AP 3 und 4

In den nächsten beiden Arbeitsschritten mussten die ersten experimentellen Arbeiten zur Lacktrocknung vorbereitet und, zunächst ohne Lackschicht, durchgeführt werden. Die Laboreinrichtungen und Gerätschaften dazu, insbesondere die Lacktrockner, wurden vom IFF vorbereitet bzw. bereitgestellt. Die experimentellen Arbeiten wurden von der FHTE durchgeführt und vom IFF begleitet. Zu nennen sind hier die Geschwindigkeitsmessung im Strömungsfeld des Ofens und Temperaturmessungen auf blanken Blechen.

Die Hauptarbeiten des IFF konzentrierten sich dabei verstärkt auf die Modellierung und Vernetzung der Trockner (Hygrex-, Vötsch- und Eisenmann-Trockner) und auf die Durchführung von Strömungs- und Aufheizsimulationen, zunächst ohne Lackschicht, zum Vergleich mit den Experimenten.

Desweiteren mussten die relevanten Stoffdaten für die Lacktrocknungssimulation auf experimentellem Wege ermittelt werden.

Die nächsten Arbeiten des IFF konzentrierten sich dann auch auf theoretische Untersuchungen, wie z.B. die Ermittlung der besten Turbulenz- und Viskositätsmodelle bei turbulenter Strömung. Die Arbeitspakete 3 und 4 wurden bis zum Ende des 3. Quartals 2007 fertiggestellt.

#### AP 5

Nach den Grundlagenuntersuchungen wurden vom IFF in Zusammenarbeit mit der TTD die bisher vorhandenen 1-dimensionalen Lackrocknungsmodelle bezüglich der Praxisrelevanz und für die TTD zur Modellerweiterung vorbereitet. Arbeitspaket 5 wurde in 2007 durchgeführt.

#### AP 6 und 7

In den nächsten Schritten mussten die Modelle für die Lackrocknung von ANSYS in das FLUENT-Programm implementiert und vom IFF verifiziert werden. Die Modellimplementierung konnte erst im zweiten Halbjahr 2008 abgeschlossen werden und vom IFF dann getestet werden.

#### AP 8 bis 10

Zur Simulation der Lackierfehler bei der Lackrocknung sind von der FHTE zunächst umfangreiche experimentelle Arbeiten durchgeführt und vom IFF unterstützt worden. Eine mögliche Integration der Modelle von ANSYS in das FLUENT-Programm war anschließend vorgesehen. Das IFF hatte die Aufgabe, dies zu verifizieren. Die Arbeitspakete 8 bis 10 konnten Ende 2008 abgeschlossen werden.

#### AP 11

In den letzten Stufen des Projektes erfolgte die praxisnahe Anwendung der Modelle. Vom IFF wurden Aufheizsimulationen mit Lack auf einem ebenen Blech im Hygrex-Trockner durchgeführt und mit Praxiswerten der FHTE verglichen. Abschließend wurden Anwendungen aus der Praxis, z.B. die Golf 5 Karosserie, modelliert und simuliert.

#### AP 12 und 13

In den abschließenden Paketen wurde über die mögliche Umsetzung der Simulationstools für die Praxis diskutiert. Ferner sind Veröffentlichungen und Projektanwendungen und Fortsetzungen geplant. Die letzten Arbeitspakete 11 bis 13 konnten bis Mitte 2009 abgeschlossen werden.

### 2.1.3 Erzielte Ergebnisse

Zu Beginn des Projektes konzentrierten sich die Arbeiten des IFF auf die Ermittlung des Standes der Technik. Dabei wurden Literaturrecherchen und Anwenderbefragungen durchgeführt (siehe Kapitel 1). Durch die gewonnenen Erfahrungen aus dem Stand der Technik und den bisher durchgeführten Simulationsrechnungen erkennt man, dass es sich um eine äußerst komplexe und bisher nicht gelöste Aufgabe in der numerischen Simulation von Lackrocknungsprozessen handelt:

- Die Strömung um die Karosserie ist durch komplexe turbulente Strömungen mit großen Wirbeln, Grenzschichtablösungen und durch Staupunkte der Aufprallströmung geprägt (Abb. 2.1.1)
- Die wandnahen empfindlichen Parameter, z.B. die Nusselt-Zahl und die



Wandschubspannung, hängen stark von den eingesetzten Turbulenzmodellen, den dazugehörigen Wandbehandlungen und der Gitterauflösung in Wandnähe ab

- Die Lackfilme setzen sich aus mehreren Komponenten zusammen
- Das herkömmliche Verdampfungsmodell, basierend auf einer ebenen Platte mit der Nusselt- sowie mit der Sherwood-Zahl (siehe [Geipel-06] und [Schroder-02]), ist wegen der komplexen turbulenten Strömung und des 3D-Bauteiles nicht mehr geeignet für die in der vorliegenden Forschungsarbeit durchzuführenden Trocknungsprozesse.
- Die instationäre Berechnung für Wärme- und Masse-Übertragung mit kompliziertem und bewegtem 3D-Objekt fordert die Entwicklung der numerischen Algorithmen mit Hochleistungsrechnern.

Diese komplexe und schwierige Fragestellung sollte im Rahmen des Forschungsprojektes in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern gelöst werden.

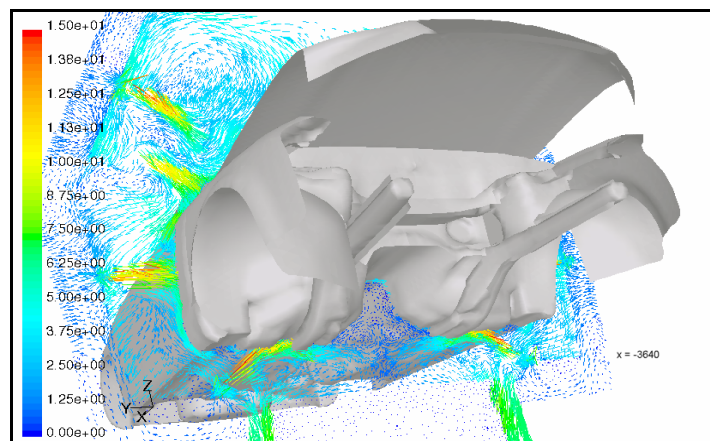


Abb. 2.1.1 Strömungsfeld der Trocknerdüsen

### 2.1.3.1 Untersuchungen der Leistungsfähigkeit der Modelle im CFD Programm

Das kommerzielle numerische Rechenprogramm, ANSYS-FLUENT, wurde im vorliegenden Projekt mit erweiterten, spezifischen Modellen für die Kinetik abdunstender Lackfilme verwendet. Es ist notwendig, die Leistungsfähigkeit der grundlegenden physikalischen Modelle in CFD-Code FLUENT zu überprüfen. Daher wurden zuerst detaillierte numerische Untersuchungen turbulenter Wärmeübertragung mit relativ einfachen Strömungen, nämlich mit einer völlig ausgebildeten Kanalströmung ( $Re_{\tau} = u_{\tau}\delta/\nu = 395$ ) und mit einer Prallströmung mit Einzeldüse (Verhältnis von Düsenposition zum Düsendurchmesser  $H/D = 2$ ) durchgeführt. Für die beiden Strömungen stehen DNS-Daten und experimentelle Daten zur Verfügung. Fokussiert wurden die Einflüsse der Turbulenzmodelle im CFD-Code und der entsprechenden Wandgitterauflösung. Damit kann, dem Anwendungsfall entsprechend, das korrekte Turbulenzmodell für die Trocknungs-Simulation ausgewählt werden.

Insgesamt wurden acht Turbulenzmodelle und drei Wandgitterauflösungen in den Simulationen benutzt. Die Ergebnisse wurden mit vorhandenen DNS-Daten von [Kawamura-99] sowie experimentellen Daten von [Baughn-91], [Baughn-92] und [Yan-92] verglichen. Im Folgenden werden nur die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst. Tabelle 2.1.1 zeigt die verwendeten Turbulenzmodelle und Wandgitterauflösungen in der Simulation. Der Vergleich der Nusselt-Zahl für Kanalströmung und Prallströmung wird in Abb.2.1.2-2.1.5 dargestellt. Folgende Schlussfolgerungen zur Simulation konnten gezogen werden:

- Im Allgemeinen sind die Turbulenzmodelle mit Wandfunktion sehr wandgitterempfindlich. Mit den Wandfunktionsmodellen, z.B. rke-swf, kann eine gute Vorhersage der Nusselt-Zahl gemacht werden, jedoch nur wenn  $y^+ > 30$  (Abb. 2.1.2 und Abb. 2.1.5). Demgegenüber ist im Fall  $y^+ < 30$  eine große Abweichung des Ergebnisses (Abb. 2.1.2 und Abb.2.1.3) zu erwarten.
- Die v2f- und rke\_en-Modelle nähern sich besser den Literaturdaten, wenn  $y^+ < 4$  (Abb. 2.1.2 und Abb.2.1.3), allerdings erzeugen die beide Modelle große Abweichungen in der Nusselt-Zahl für grobes Gitter (Abb. 2.1.2 und Abb.2.1.4) und sind daher sehr wandgitterempfindlich.
- Das sstkw-Modell erzeugt sehr gute Ergebnisse für Kanalströmung (Abb. 2.1.2), jedoch sieht man eine gewisse Gitterabhängigkeit im Fall des groben Gitters für Prallströmung, nämlich eine Unterschätzung der Nusselt-Zahl im Staupunktbereich (Abb. 2.1.5).
- Das neue rke\_s\_swf-Modell (Update in 2009) ist relativ stabil bezüglich der untersuchten Wandgitterauflösungen, sowohl für Kanalströmung als auch für Prallströmung und somit sehr gut geeignet für industrielle Berechnungen.

Basierend auf den obigen Simulationsergebnissen kann das Modell anhand der Gitterqualität des Beschichtungsobjektes für die Praxisanwendung im Lackrocknungsprozess empfohlen werden:

- k- $\epsilon$  Modell mit *wall fuctions* für sehr grobe Wandgitterauflösung, z.B.  $y^+ \gg 30$
- sstkw Modell für dominierte Wandgitterauflösung  $y^+ < 30$
- k- $\epsilon$  Modell mit *scalable standard wall function* für komplizierte Bauteile, z.B. Karosserie, auf der eine gemischte Wandgitterauflösung im Bereich von  $40 < y^+ < 5$  existiert.

Tabelle 2.1.1 Verwendete Turbulenzmodelle und Wandgitterauflösungen

Abkürzung	Modellbeschreibung
rke-swf	<i>Realizable k-<math>\epsilon</math> with standard wall functions</i>
sstkw	<i>Shear-Stress Transport k-<math>\omega</math> with enhanced wall function</i>
rke_en	<i>Realizable k-<math>\epsilon</math> with enhanced wall treatment</i>
v2f	<i>V2F Model: low Reynolds number model</i>
rke_s_swf	<i>Realizable k-<math>\epsilon</math> with scable standard wall function</i>
Wandgitterauflösung:	$y^+ = 0.1 - 30$ , entsprechend, $Y = 0.003 - 0.8$ mm. $y^+ = y u_\tau / \nu$

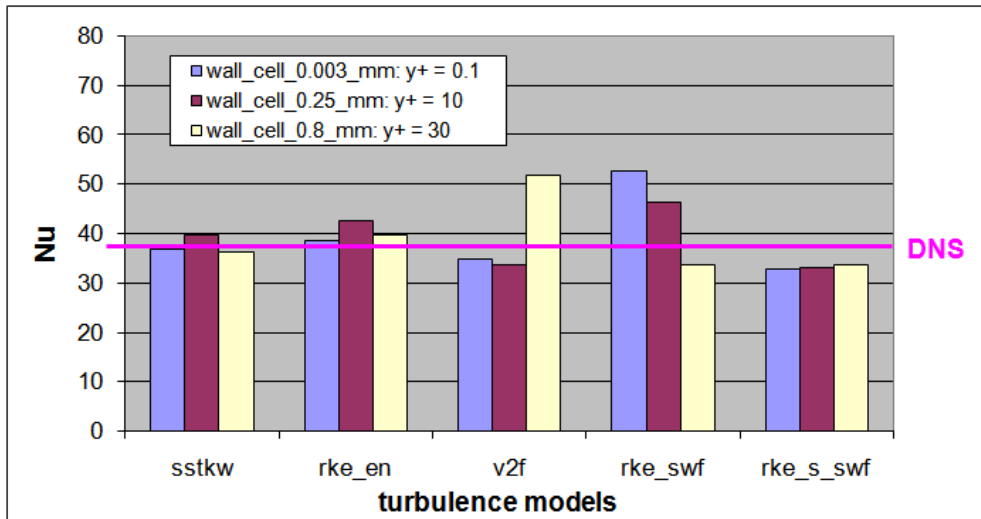


Abb. 2.1.2 Vergleich der Nusselt-Zahl mit den DNS-Daten in Kanalströmung

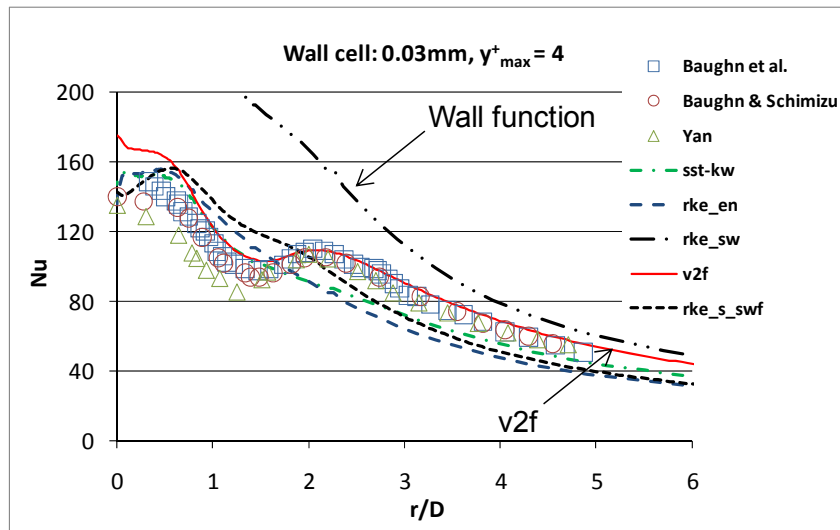


Abb. 2.1.3 Vergleich der Nusselt-Zahl mit Literatur-Daten der Prallströmung für feines Wandgitter: 0.03mm bzw.  $y^+_{max} = 4$

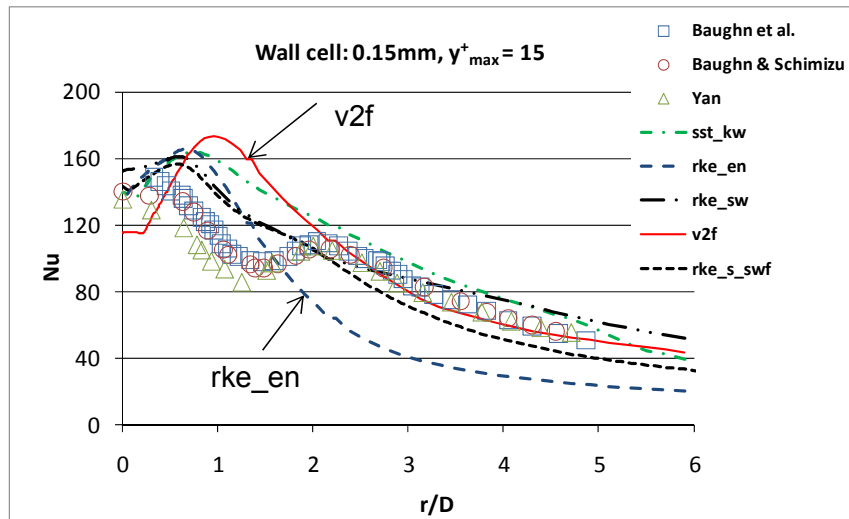


Abb. 2.1.4 Vergleich der Nusselt-Zahl mit Literatur-Daten der Prallströmung für Wandgitter: 0.15mm bzw.  $y^+_{\max} = 15$

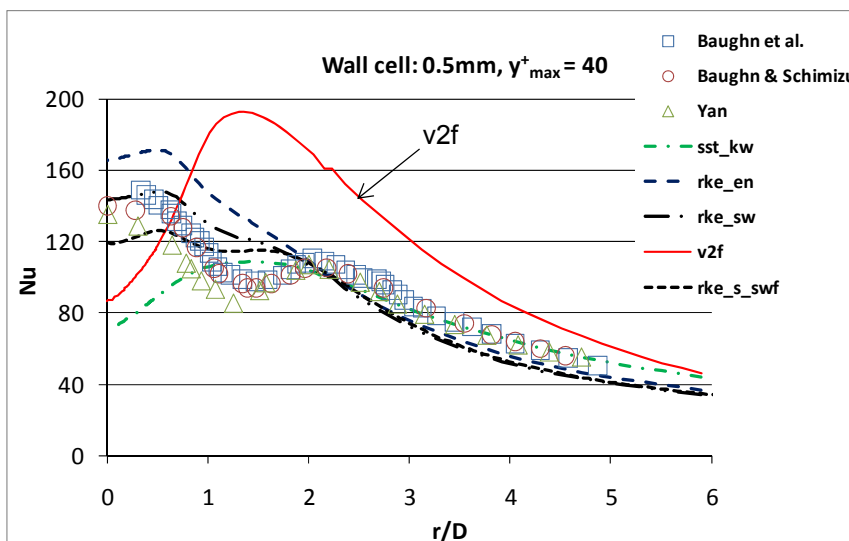


Abb. 2.1.5 Vergleich der Nusselt-Zahl mit Literatur-Daten der Prallströmung für grobes Wandgitter: 0.5mm bzw.  $y^+_{\max} = 40$

### 2.1.3.2 Numerische Simulation im Hygrex-Trockner

Nach den detaillierten numerischen Untersuchungen für die Modellvalidierung mit relativ einfachen Strömungen konzentrierten sich die weiteren Arbeiten des IFF auf die numerische Untersuchung im Hygrex-Trockner (Abb. 2.1.6), einem realen Trockner, in dem komplizierte Turbulenzströmung häufig auftritt. Anhand der Ergebnisse der vorherigen Arbeitspakete wurde vom IFF das Vernetzungsmodell des Trockners optimiert. Mit dem geeigneten Turbulenzmodell, nämlich dem sstk-Modell, wurde dann das Strömungs- und Temperaturfeld zunächst im leeren Trockner, dann mit ebenen Platten und einem 3D-stilisierten Führerhausmodell, sowie mit Dämmmatten simuliert. Am Ende wurde die Aufheizung von Blechen mit Lackschicht im Hygrex-Trockner mit dem von TTD und ANSYS entwickelten 1D-

Verdampfungsmodell berechnet. Zur Modellvalidierung kamen die von der FHTE am IFF ermittelten experimentellen Ergebnisse zum Einsatz.

Die in den numerischen Untersuchungen eingesetzten verschiedenen Parameter, wie z.B. die Endtemperatur, die Anströmgeschwindigkeit sowie die Blechanordnung im Ofen, usw. wurden in sämtlichen Zwischenberichten dargestellt.

Detaillierte Vergleiche des Geschwindigkeitsfeldes im Trockner zwischen Simulation und Experiment wurden in unserer Veröffentlichung [45] sowie im Kapitel 2.3 dargestellt. Die Ergebnisse der Strömungssimulation stimmten mit den Ergebnissen der Experimente überein.

Abbildung 2.1.7 und 2.1.8 zeigen die Simulations- und Versuchsergebnisse zur Aufheizung mit dem horizontal angeordneten Blech. Ein sehr ähnlicher Temperaturverlauf zwischen Simulation und Experiment auf dem Werkstück kann man dabei sehen. Die linke Seite der Platte, die sich nahe zur Düsenwand befindet, wurde schneller als die rechte Seite der Platte beheizt. Der genaue Vergleich der Aufheizkurven, z.B. von Punkt 3, wird in Abbildung 2.1.9 gezeigt. Eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung wurde erreicht.

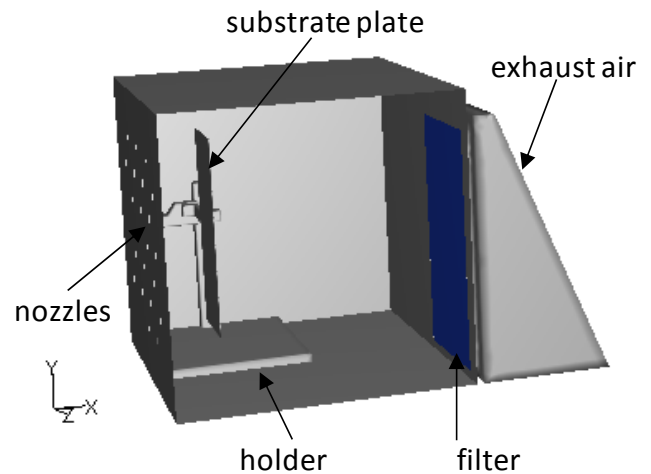


Abb. 2.1.6 Hygrex-Trockner

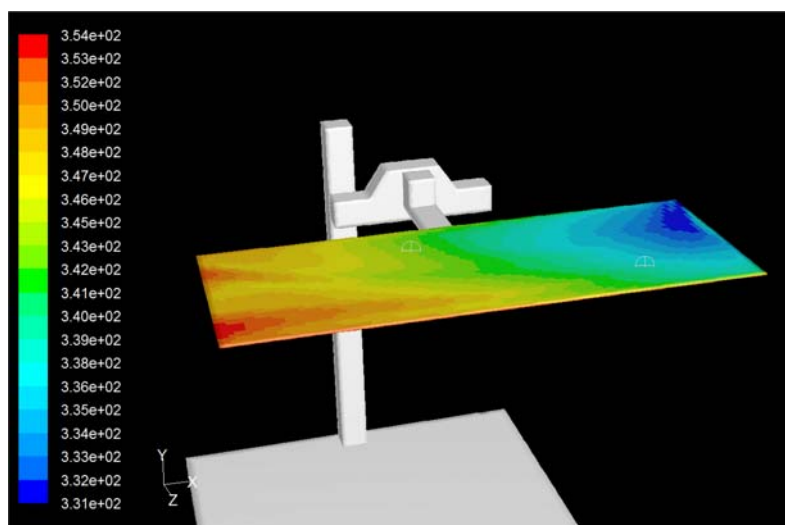


Abb. 2.1.7: Simulierte Temperaturkonturen auf dem Werkstück zum Zeitpunkt  $t=200$  s

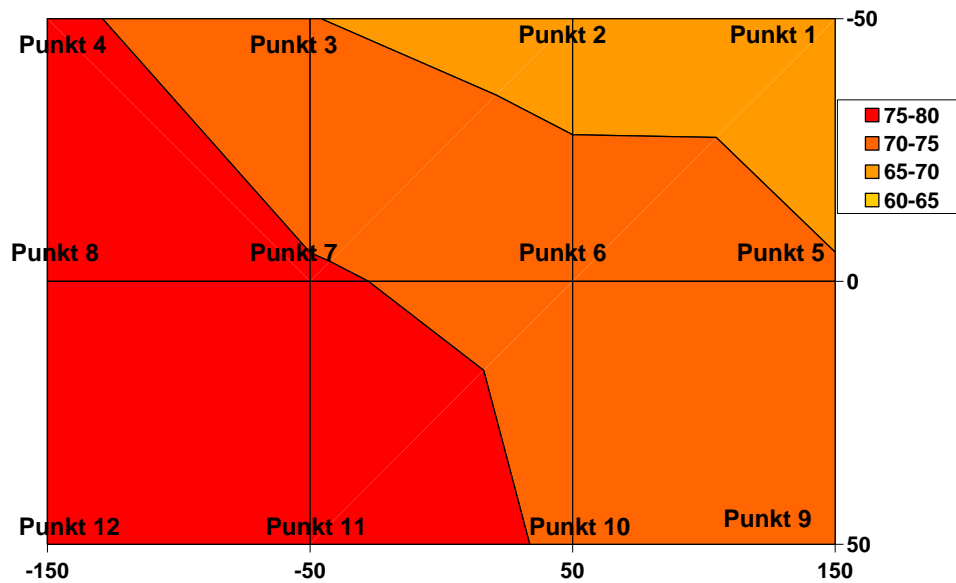


Abb. 2.1.8: Gemessene Temperaturkonturen auf dem Werkstück zum Zeitpunkt  $t=200$  s

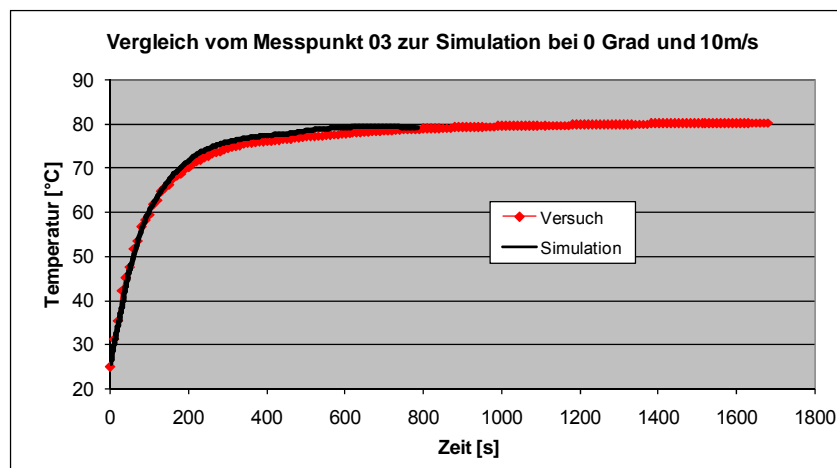


Abb. 2.1.9: Vergleich des Temperaturverlaufs auf der Werkstückoberfläche – Vergleich Simulation mit Experiment (Beispiel Messpunkt 3)

Die Prallströmung mit Mehrdüsen im Hygrex-Trockner, als weiterer typischer Praxisfall bei komplexen Strömungen, wurde ebenfalls näher untersucht. Das senkrecht angeordnete Blech wurde verwendet, wie aus der Abb. 2.1.10 ersichtlich. Desweiteren wurden die Simulationsergebnisse auf dem Blech, die Geschwindigkeitsverteilung und die Temperaturverteilung bei einer bestimmten Zeit dargestellt. Das Kreismuster der Geschwindigkeitskontur in Abb. 2.1.10 (a) repräsentiert die Düsenpositionen. Die detaillierte Information der Aufheizkurve auf dem Blech sieht man in der Abb. 2.1.11. Eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung wurde erzielt.

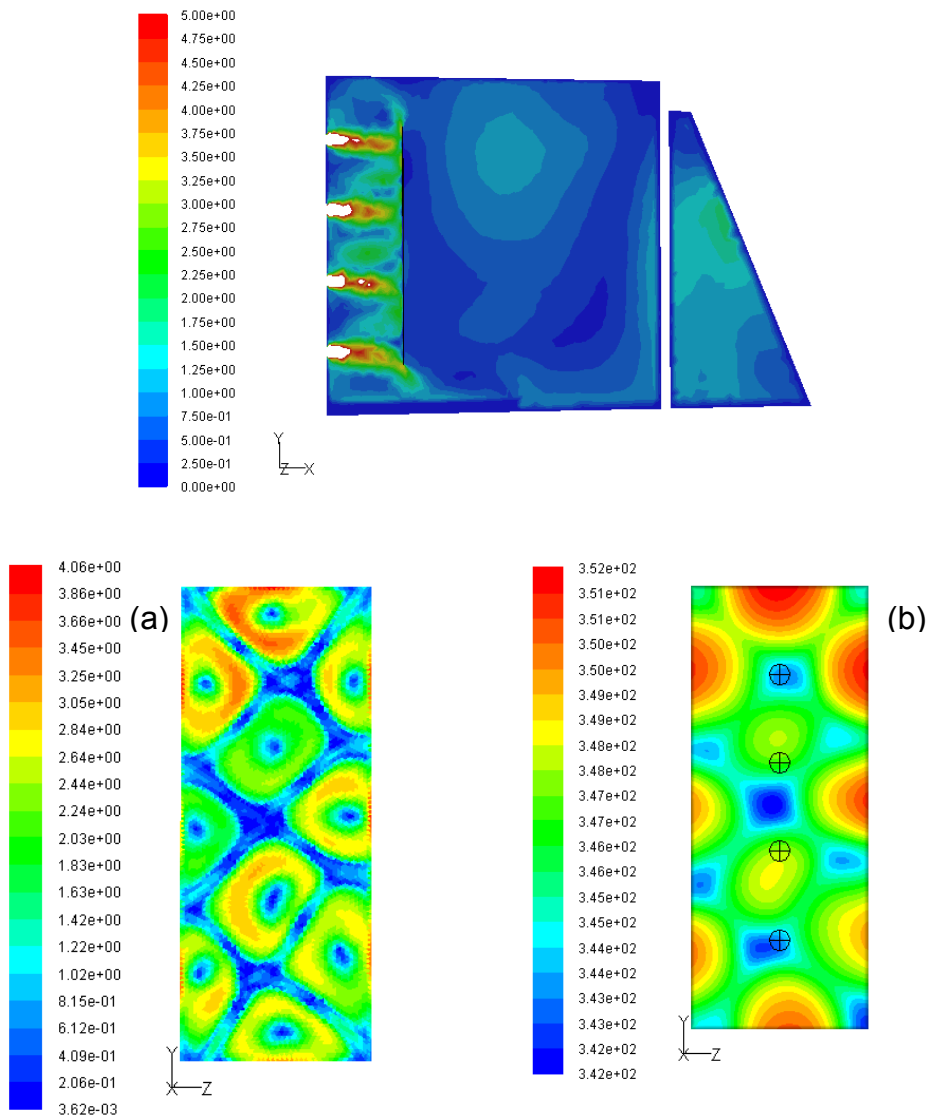


Abb. 2.1.10: Geschwindigkeitskontur im Ofen(oben), (a): Geschwindigkeitsverteilung im Element des benachbarten Bleches [m/s], (b): Temperaturverteilung [K] auf dem Blech bei  $t=96s$

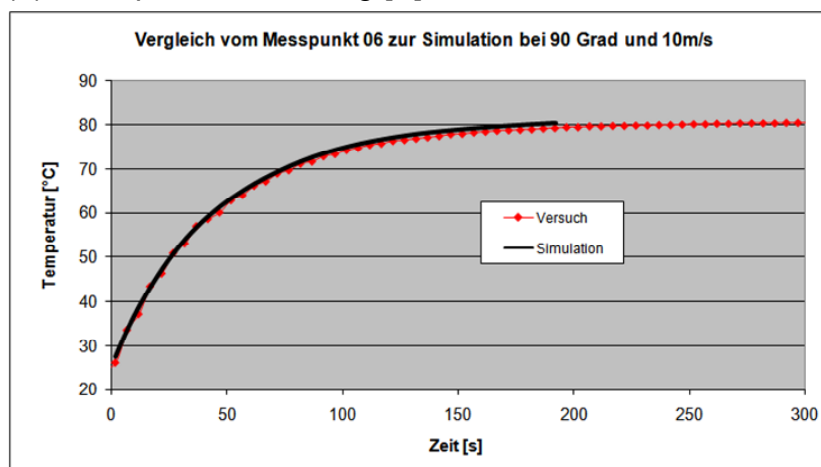


Abb. 2.1.11: Vergleich der Aufheizkurven auf dem KTL-Blech bei Prallströmung zwischen Experiment und Simulation

Das AP 3 wurde mit Zustimmung der Projektpartner dadurch erweitert, dass neben einfachen Blechen auch Bleche mit Dämmmaterialien, z.B. mit Bitumen, untersucht werden mussten, da dies häufig in der Praxis vorkommt.

Analog zu den vorherigen Versuchen wurden deshalb vom IFF zusätzlich Modellwerkstücke mit verschiedenen Werkstoffmaterialien konstruiert und vernetzt. Dazu wurden Simulationen mit zwei Netzmodellen durchgeführt:

- Das erste Netzmodell mit Volumengeometrien zur realen Darstellung der physikalischen Modelle für Bleche und Dämmmatten. Dieses Modell entspricht der Praxis. Sehr gute Simulationsergebnisse wurden in dem 3. Zwischenbericht zusammengefasst. Allerdings ist dieses Modell bei komplexen Geometrien schwierig zu realisieren.
- Das zweite Modell, nur mit ebenen Flächen. Um das komplizierte Volumennetz feiner Strukturen, wie z.B. bei dünnen Werkstückoberflächen, einzusparen, können in FLUENT die sogenannten „*shell-conductions*“ eingesetzt werden, die für die thermodynamischen Berechnungen die Werkstoffdicke berücksichtigen. Das Modell wird dadurch erheblich einfacher. Stoffdaten des Mischungsmaterials für zusammengeklebtes KTL-Blech und Dämmmatte werden wie folgt berechnet:

$$\rho = \frac{\rho_1 d_1 + \rho_2 d_2}{d} \quad \lambda_{\text{II}} = \frac{\lambda_1 d_1 + \lambda_2 d_2}{d} \quad \lambda_{\perp} = d \left( \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} \right)^{-1}$$

$$C_p = \frac{C_{p1} \rho_1 d_1 + C_{p2} \rho_2 d_2}{\rho d} \quad d_1 = 1\text{mm}, d_2 = 3\text{mm}, d = 4\text{mm}$$

Wobei  $d_1 = 1\text{mm}$  die Wandstärke des KTL-Blechtes,  $d_2 = 3\text{mm}$  die Wandstärke der Dämmmatte und  $d = 4\text{mm}$  die Wandstärke des gemischten Materials ist. Die Wärmeleitfähigkeit wurde mit biaxialem Modell berechnet.

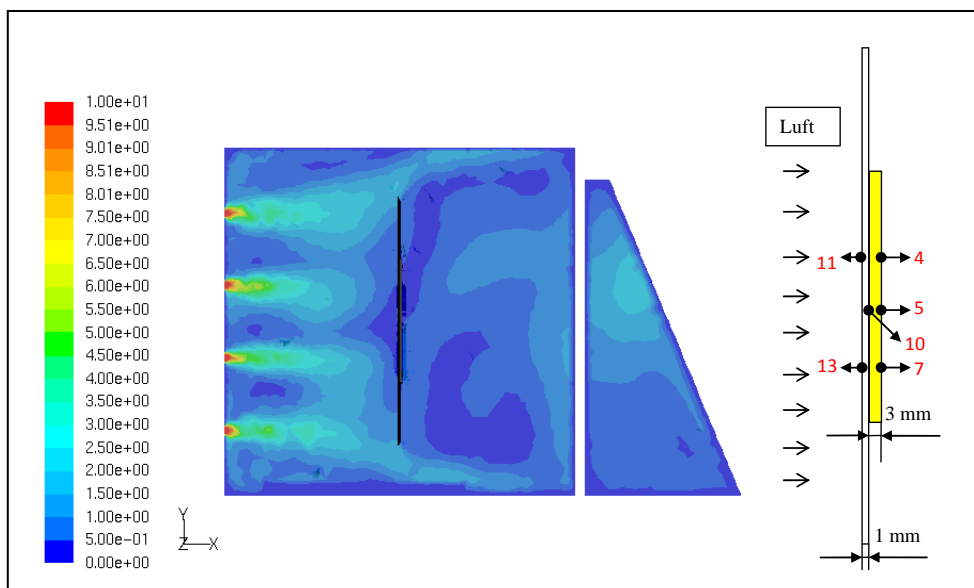


Abb. 2.1.12: Geschwindigkeitskontur in der Ebene  $z=0$  und Skizze des KTL-Dämmmatte-Blechtes beim Versuch mit Messpunkten



Simulationsergebnisse beim Blechabstand zur Düsenwand von 320 mm ( $L/D=14$ ) mit „*shell conduction*“ Modell werden in Abb. 2.1.12 und 2.1.13 dargestellt. Sehr gute Übereinstimmung zwischen der Simulation und der Messung ist für die Messpunkte Mp11 und Mp4 im Bereich des Mischungsmaterials festzuhalten.

Im Fall  $L/D = 5.5$ , d.h. der Blechabstand zur Düsenwand beträgt 160mm, ist der Effekt der Prallströmung stark. Der Wärmeübertragungskoeffizient auf der KTL-Blechseite ist höher als die auf der Seite der Dämmmatte. Abweichungen von 10% auf der KTL-Blechseite und 20% auf der Dämmmattenseite sind dabei festzustellen (siehe 4. Zwischenbericht).

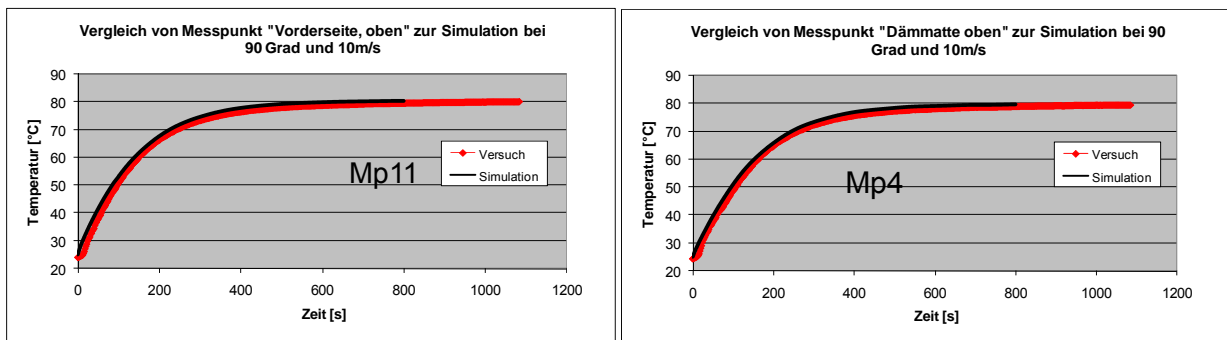


Abb. 2.1.13: Vergleich der Aufheizkurven an zwei Messpunkten

Im weiteren Projektverlauf wurden die numerischen Simulationen mit komplexem Bauteil, einem zum 3D-stilisierten Führerhaus, im Hygrex-Trockner durchgeführt. Untersucht wurde der Einfluss der Grenzschicht an der Außen- und Innenseite des Bauteiles. Die komplexe Strömung um das Führerhaus und die Temperaturverteilung auf dem Bauteil werden in Abb. 2.1.14 gezeigt. Abbildung 2.1.15 stellt die gemessenen und simulierten Aufheizkurven in Messpunkt 4 und 14 dar. Ausführliche Vergleiche der Aufheizkurven für verschiedene Messpunkte finden sich auf der Internet-Webseite des Projektes.

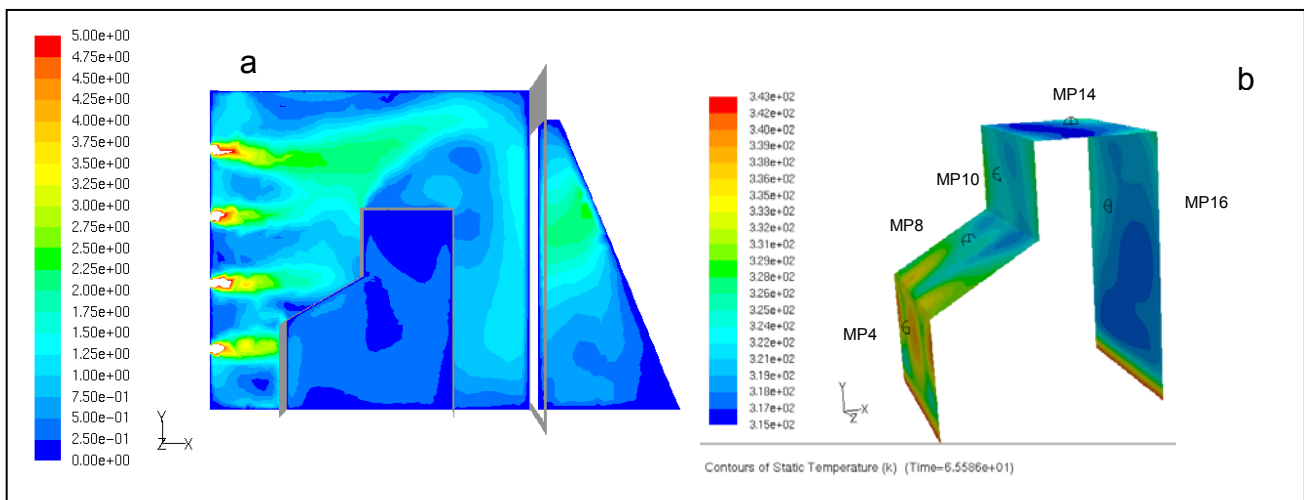


Abb. 2.1.14: (a): Geschwindigkeitskontur in der Ebene  $z=0$ . (b): Temperatur- und Messpunktverteilung auf dem Bauteil

Eine sehr gute Übereinstimmung zwischen dem Experiment und der Simulation (Abb. 2.1.15) wurde bestätigt. Es ist deutlich zu sehen, dass der Einfluss der inneren Gitterschicht auf die Aufheizkurve gering ist, was darauf hindeutet, dass man auf eine aufwendige Prismenschicht-Vernetzung an der Innenseite des komplizierten 3D-Bauteiles verzichten kann, falls keine dominierte Strömung in Innenräumen existiert.

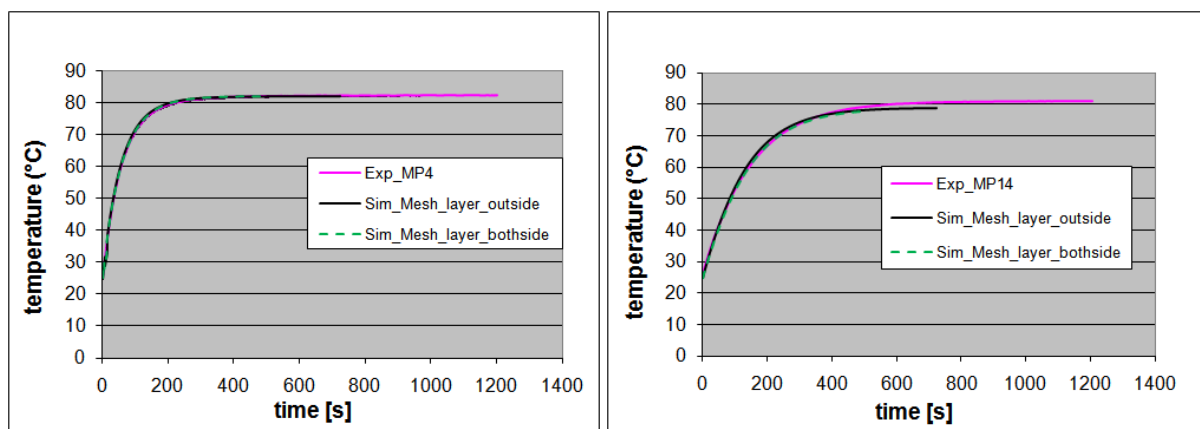


Abb. 2.1.15: Vergleich der Aufheizkurven an zwei Messpunkten

Anschließend erfolgten in den letzten Arbeitspaketen die Aufheizsimulationen der konventionellen Zwischentrocknung im Hygrex-Trockner mit Lackschicht am Blech. Abbildung 2.1.16 stellt das verwendete Geometriemodell in der Simulation dar. Verschiedene Betriebsparameter, wie in der Diplomarbeit von Trautwein [57] dargestellt, wurden in der numerischen Untersuchung verwendet. In Tabelle 2.1.2 wird ein Satz der Simulationsparameter als Beispiel aufgelistet. Die Lackzusammensetzung wurde nach einer Ablüftungszeit von 300 Sekunden nach Lackauftrag experimentell bestimmt.

Der von ANSYS und TTD implementierte und verbesserte UDF-Code, nämlich das Verdampfungsmodell im FLUENT-Code, das geeignet für ein beliebiges 3D-Objekt ist, wurde in der Simulation mit Hygrex-Trockner eingesetzt, um das Modell im praktischen Trocknungsprozess zu überprüfen. Dabei wurde eine enge Zusammenarbeit zwischen IFF, ANSYS und TTD für die Modellentwicklung durchgeführt. Die von FHTE im Hygrex-Trockner ermittelten experimentellen Ergebnisse, nämlich die Aufheizkurven und Massenabnahmen auf dem Blech, kamen für die Validierung der Simulationsergebnisse zum Einsatz.

Tabelle 2.1.2: Simulationsparameter

Luftgeschwindigkeit	6 - 20 m/s
Lufttemperatur	50 - 80 °C
Luftfeuchte	6 - 10 g/kg
Lackzusammensetzung	Wasser: 46%, Butylglykol: 27%, Feststoff: 27%

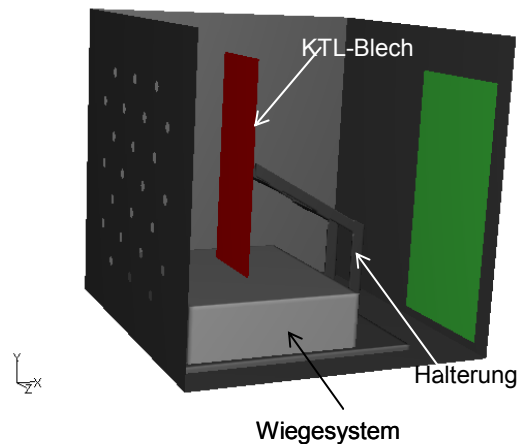


Abb. 2.1.16: Hygrex-Trockner mit KTL-Blech und Wiegesystem

Die simulierte Geschwindigkeits-, Temperatur-, und Filmdickenverteilung auf dem Blech bei einer bestimmten Zeit wird in Abb. 2.1.17 dargestellt. Es ist zu beobachten, dass die Lackschicht am Rand des Bleches und im Bereich des Staupunktes der Prallströmung schneller verdunstet, wobei der entsprechende Wärmeübertragungskoeffizient sowie die Blechtemperatur auch höher sind.

Die Aufheizkurven und die Masse auf dem Blech bei verschiedenen Randbedingungen wurden mit dem Simulationsprogramm bestimmt und mit den Praxiswerten verglichen. Bei den Randbedingungen wurden die Ofentemperatur, die Einströmgeschwindigkeit und die Luftfeuchte, als wichtige Parameter, in einem für die Praxis wichtigen Bereich variiert. In Abb. 2.1.18 - Abb. 2.1.21 sind beispielhaft einige Ergebnisse dargestellt. Sinnvolle Simulationsergebnisse wurden erzielt. Beispielsweise sieht man einen leichten zweistufigen Kurvenverlauf in der simulierten Aufheizkurve wie im Experiment. Die Abweichung zwischen dem Experiment und der Simulation beträgt  $2^{\circ}\text{C}$  in der ersten Trocknungsphase und ca.  $5^{\circ}\text{C}$  in der zweiten Trocknungsphase. Die maximale Abweichung in der Abdunstverlaufskurve beträgt ca. 1.5 g.

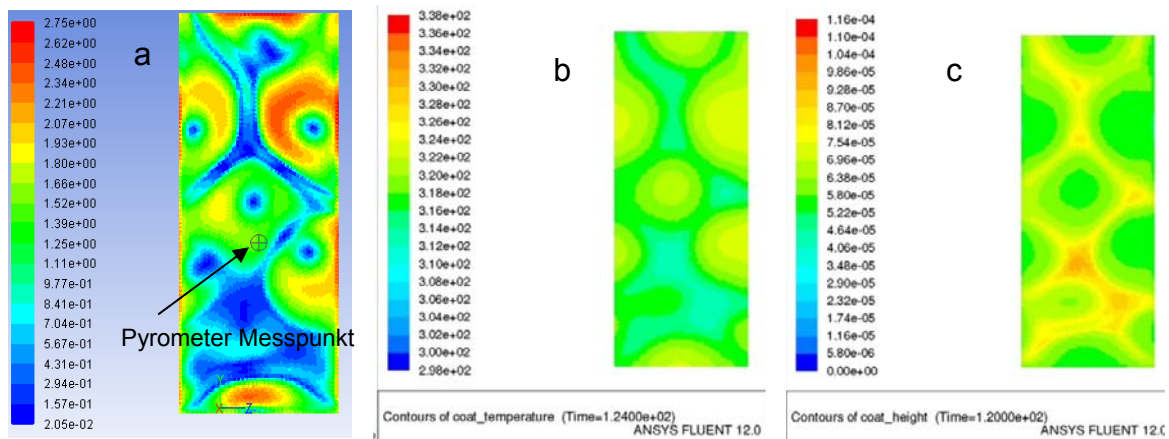


Abb. 2.1.17: Konturverteilungen am Blech bei  $t = 124\text{s}$ : (a): Geschwindigkeit [m/s], (b):Lacktemperatur [K], (c): Filmdicke [m]

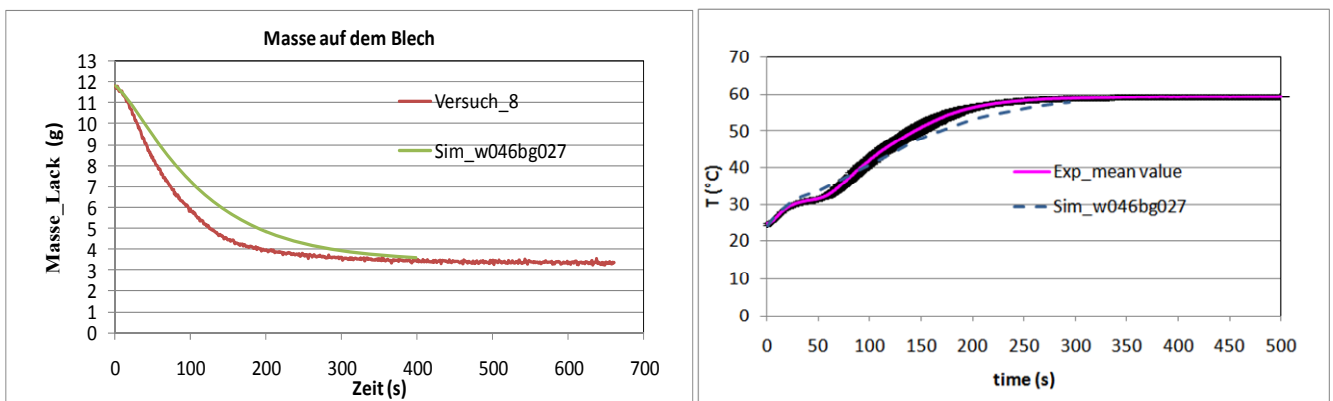


Abb. 2.1.18: Masse- und Temperaturverlauf (V8, Ofentemperatur 333 K, Lufteintrittsgeschwindigkeit 12.5 m/s, Luftfeuchte 10 g/kg)

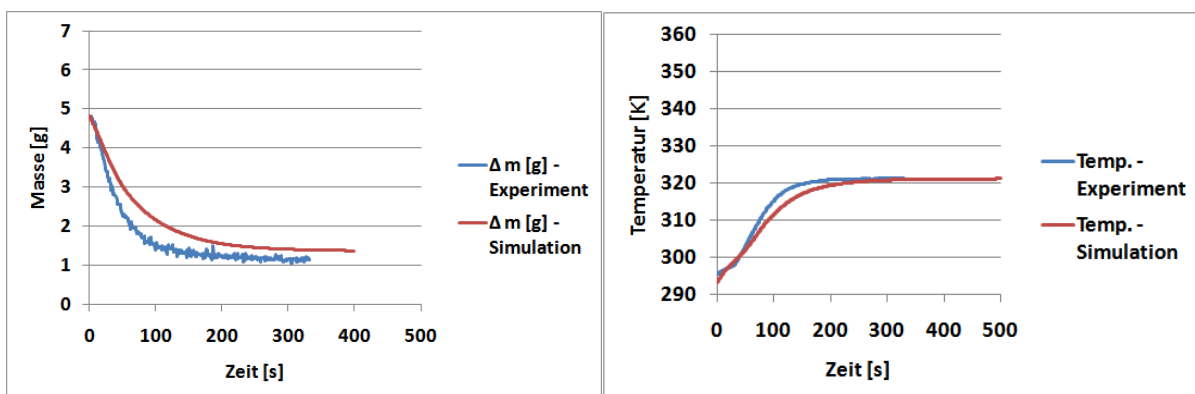


Abb. 2.1.19: Masse- und Temperaturverlauf (V203, Ofentemperatur 321 K, Lufteintrittsgeschwindigkeit 15 m/s, Luftfeuchte 6 g/kg)

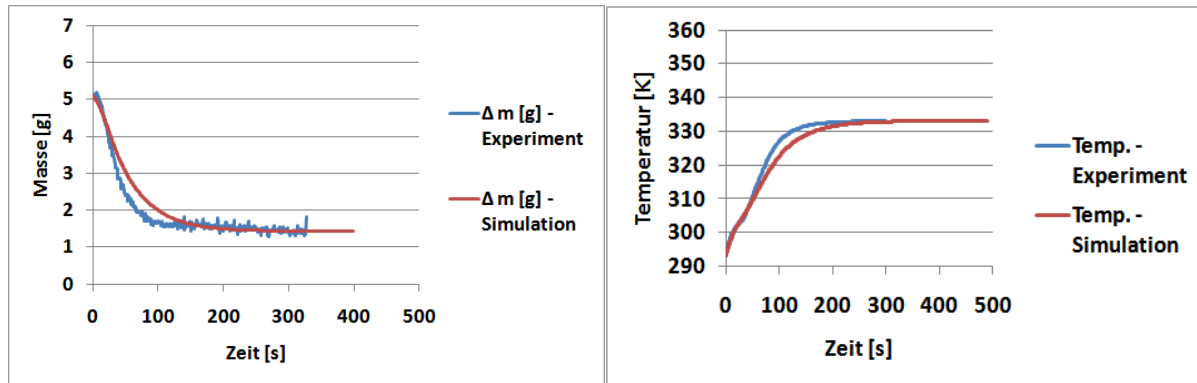


Abb. 2.1.20: Masse- und Temperaturverlauf (V208, Ofentemperatur 333 K, Luftertrittsgeschwindigkeit 16,7 m/s, Luftfeuchte 10 g/kg)

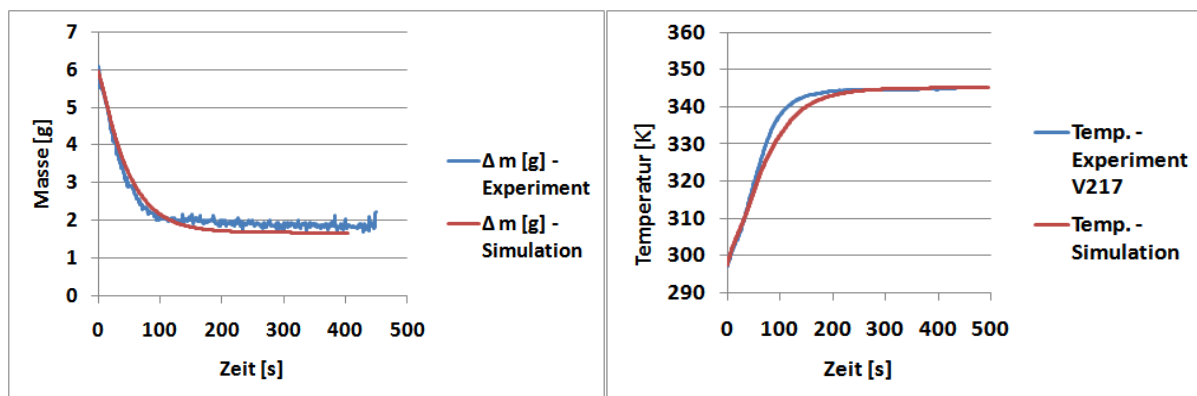


Abb. 2.1.21: Masse- und Temperaturverlauf (V217, Ofentemperatur 345 K, Luftertrittsgeschwindigkeit 15 m/s, Luftfeuchte 6 g/kg)

Die von diesem Arbeitspaket erfassten Simulationsergebnisse liefern detaillierte lokale Informationen für das beheizte Bauteil beim Aufheizvorgang, z.B. Geschwindigkeits-, Temperatur-, Temperaturgradienten-, Luftfeuchtigkeits- und Stoffkonzentrationsverteilung. Gleichzeitig wurden Lackierfehler im Hygrex-Trockner von FHTE und IFF experimentell untersucht. Gemäß den experimentellen und simulierten Ergebnissen wurde ein Lackierfehlermodell von FHTE entwickelt. Die Ergebnisse sollten später von ANSYS ins Simulationsmodell implementiert werden.

### 2.1.3.3 Numerische Simulation im Eisenmann-Trockner am IPA

Numerische Untersuchungen mit praxisbezogenem Trockner, z.B. Eisenmann-Trockner für Automobilindustrie, wurden von IFF in AP2, 3, 11 und 12 durchgeführt. Zuerst wurde die komplizierte Geometrie des Eisenmann-Trockners (Abb. 2.1.22) nach gewissen numerischen Untersuchungen vereinfacht. Statt alle Räume, wie in Abb. 2.1.22, wurde nur der Trockerraum für das Simulationsmodell verwendet. Die Randbedingungen der Einlassgeschwindigkeit wurden gemäß den experimentellen Ergebnissen festgelegt.

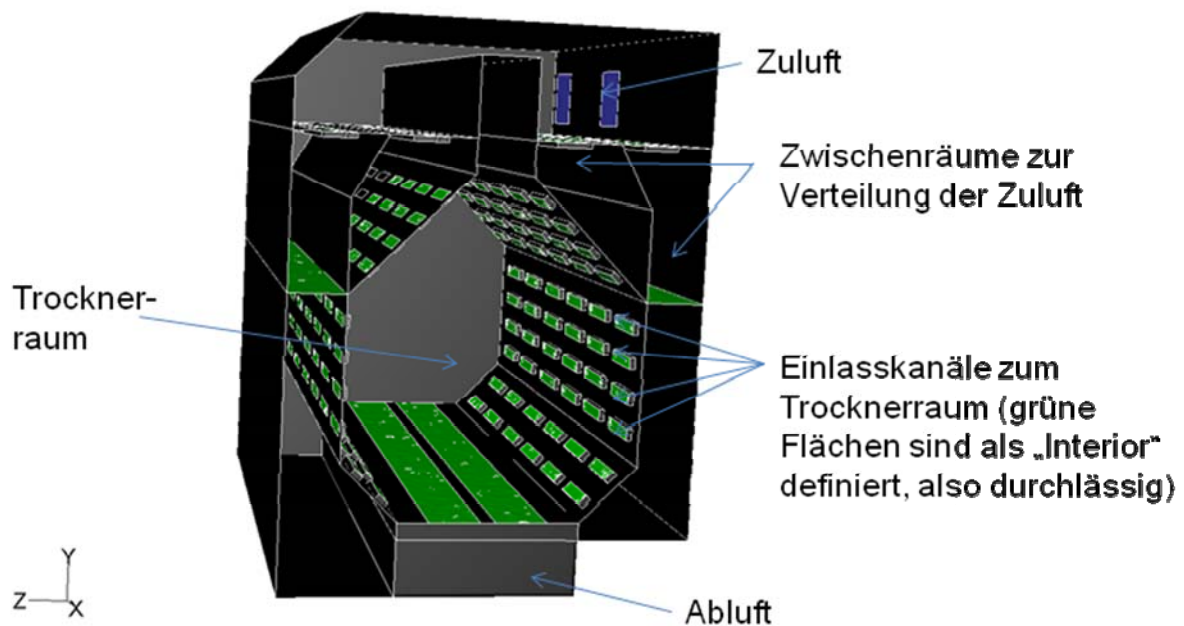


Abb. 2.1.22: Der Eisenmann-Trockner am IPA

In der Zwischenzeit wurde vom IFF das Netzmodell eines sehr komplexen Praxisteils, einer Golf 5 Karosserie, vorbereitet. Das Oberflächennetz stammt von einem Crash-Test-Modell, basierend auf Nastran-Daten. Mit diesem Datenformat ist es eigentlich nicht einfach, mit FLUENT-Tgrid Programm ein kompliziertes Volumennetz der Karosserie mit angeforderter Qualität zu erzeugen. Nach einigen Versuchen wurde auf die Bestrebung, die Erzeugung dieses Volumennetzes mit Tgrid, verzichtet. Gegen Ende von 2008 wurde das Volumennetz der Karosserie (Golf5) mit ICEM-CFD von ANSYS erzeugt. Die Anzahl der 3D-Elemente in der gesamten Berechnungszone beträgt ca. 8 Mio. Zellen (Abb. 2.1.23).

Wegen dem relativ groben Netz an der Karosserieoberfläche wurden die Simulationen mit *realisable*  $k-\varepsilon$  Turbulenzmodell mit „*standard wall function*“ durchgeführt, weil keine Prismenschicht auf der Karosserieoberfläche gebaut wurde. In der Simulation wurden unterschiedliche Wandstärken (0.65 – 3mm) für die Karosserieoberfläche mit „*sell conduction model*“ berücksichtigt. Der Zeitschritt der Aufheizsimulation betrug  $dt < 0.5$  s. Anfangstemperatur an Oberfläche der Karosserie und Betriebstemperatur im Trockner waren jeweils 25°C und 170° C.

Die Aufheizsimulation mit der Golf5 Karosserie ohne Lackschicht wurde durchgeführt und mit Praxiswerten der FHTE verglichen. In Abbildung 2.1.24 und 2.1.25 sind Geschwindigkeitsvektoren und die Temperaturverteilung auf der Karosserie dargestellt. Es ist zu beobachten, dass der Kotflügel, Teil der Motorhaube sowie die Tür schnell aufgeheizt wurden. Die Aufheizrate ist abhängig von der Exposition des Bauteiles zur Umströmung und der Stärke des Bauteiles. Ein quantitativer Vergleich der Aufheizkurven wird in Abb. 2.1.26 – 2.1.27 dargestellt. Die Übereinstimmung zwischen simulierten und gemessenen Aufheizkurven war sowohl im Außenbereich (Abb. 2.1.26), als auch im Innenbereich (Abb. 2.1.27) der Karosserie gut. Der relative Fehler in der Aufheizkurve der Temperatur ist  $< 10\%$ .



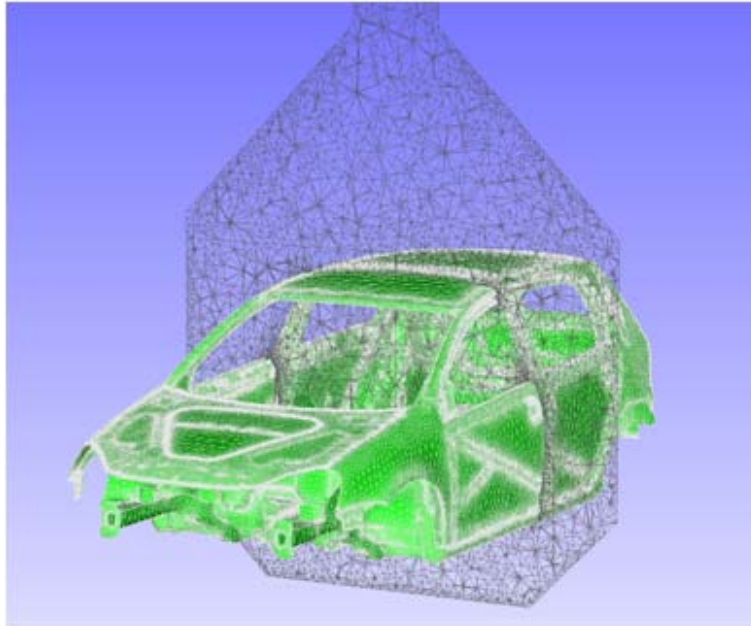


Abb. 2.1.23: Golf5 Karosse im optimierten Netz

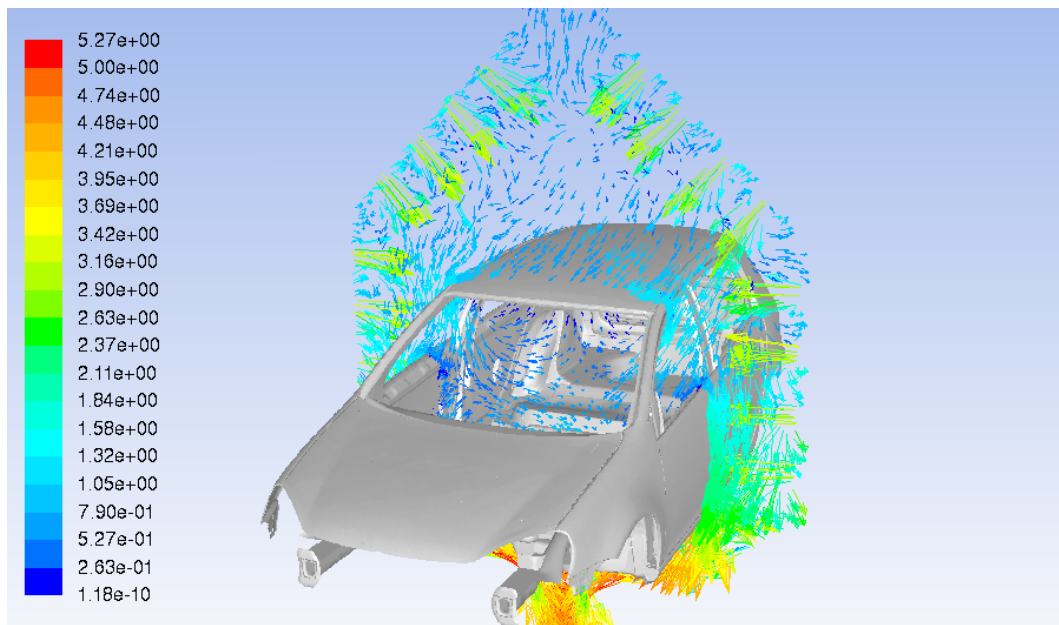


Abb. 2.1.24: Geschwindigkeitsvektor in einer Schnittebene

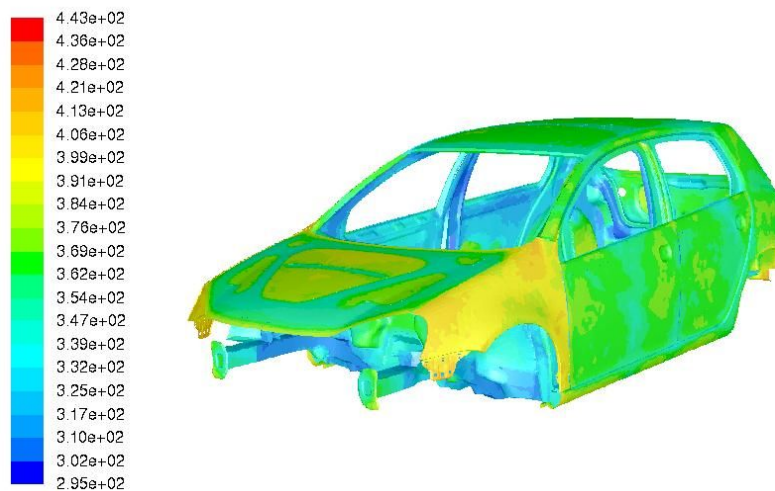
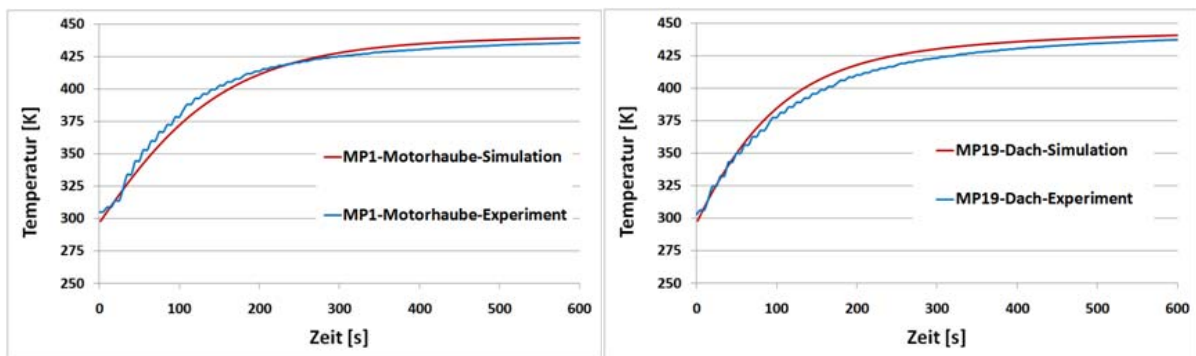
Abb. 2.1.25: Temperaturverteilung in Kelvin auf der Karosse bei  $t=64s$ 

Abb. 2.1.26: Vergleich der Aufheizkurven zwischen Simulation und Experiment - Außenbereich

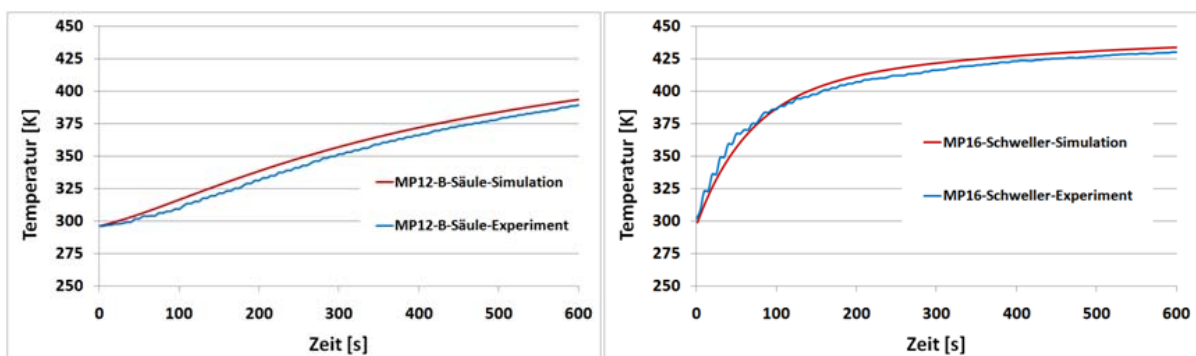


Abb. 2.1.27: Vergleich der Aufheizkurven zwischen Simulation und Experiment - Innenbereich



#### 2.1.3.4 Vorgehensweisen zur Durchführung der Aufheizsimulation

Nach der erfolgreichen Lackrocknungssimulation und der vom IFF bis dahin gemachten Erfahrung wird der im folgendem beschriebene Lösungsweg für die Anwender bei der Simulation empfohlen.

Die Vorgehensweise zur Durchführung der Aufheizsimulation im Trocknungsprozess lässt sich schließlich in folgende Schritte einteilen:

- Vernetzung des Ofenmodells und des Werkstückes
- Simulation der Gasströmung (ohne Lackschicht):
  1. Festlegen der Randbedingungen für Luftströmungsberechnung:
    - Luftgeschwindigkeit (m/s) und Lufttemperatur (K) in velocity inlet
    - Thermalbedingungen der Wände im Trockner
    - Luftfeuchtigkeit (kg H<sub>2</sub>O/ kg Luft)
  2. Auswählen eines geeigneten Turbulenzmodells anhand der Gitterqualität des Werkstückes
  3. Stationäre Simulation mit Solver: „Flow“ und „Turbulence“ in der ersten Ordnung und der zweiten Ordnung bis Lösung konvergiert (Residuals für „Flow“ und „Turbulence“: 1e-4)
  4. Fortsetzung der stationären Simulation mit Solver: „Flow“, „Turbulence“, „Energie“ und „Discrete-Ordinates“, bis Lösung konvergiert (Residuals für „Flow“ und „Turbulence“: 1e-3, für „Energie“ und „DO-Modell“: 1e-6).
- Simulation der Filmverdampfung (Detailliert siehe FLUENT UDF-Dokument für SiLat-Projekt):
  1. Laden der von Fluent implementierten UDF-Trocknungsmodule
  2. Anlegen der Materialeigenschaften für Lackfilm, z.B. Laden „setup\_material.bc“ für Modellack
  3. Anlegen der Randbedingungen für die Berechnung des Filmabduunstens
    - Auswählen UDF des Massetransportes für jede lackierte Zone
    - Auswählen UDF des Energietransportes für jede lackierte Zone
  4. Aktivieren des 1-D Trocknungsmodells im UDF-Panel
  5. Initialisieren der Werkstücktemperatur  
Zurücksetzen der Werkstücktemperatur auf Raumtemperatur
  6. Einstellen wichtiger Parameter für 1 D-Modell
    - Auswählen der lackierten Zonen
    - Festlegen der Anfangsschichtdicke des Films
    - Festlegen der Anfangslackzusammensetzung
  7. Initialisieren des 1 D-Modells
  8. Instationäre Aufheizberechnung  
Abschließend wird dann die eigentliche Aufheizsimulation mit Solver: „Flow“, „Turbulence“, „Energie“, „Discrete-Ordinates“ und „Species“ mit Zeitschritt dt=0.1s bis 0.2 s gestartet.

### 2.1.3.5 Rechenaufwand

In Rahmen des vorliegenden Silat-Projektes fokussierten sich die Arbeiten vom IFF auf numerische Untersuchungen des Aufheizvorganges in praxisbezogenen Trocknern, nämlich in einem labormäßigen Ofen, Hygrex-Trockner und einem industriellen Trockner, dem Eisenmann-Trockner für Automobilindustrie. Die gesamten Netzelemente im Simulationsmodell mit Hygrex-Trockner betragen ca. 1 Million. Die numerische Simulationen konnten mit lokalem PC-Rechner mit Parallelprozessor durchgeführt werden.

In der Simulation mit dem Eisenmann-Trockner und dem Karossenmodell hat die Gitterzellenanzahl kräftig (ca. 8 Millionen) zugenommen. Die Simulationen mit Eisenmann-Trockner wurden daher mit Rechnern im Hochleistungsrechenzentrum (HLRS) in Stuttgart durchgeführt. In der folgenden Tabelle wird der Rechenaufwand der instationären Aufheizsimulation mit Karosse ohne Lackschicht zusammengefasst:

Gitteranzahl	ca. 8 Millionen Elemente
Zeitschritt in der Aufheizsimulation	< 0.5 s
Rechner: Opteron Cluster in HLRS	Prozessor: 10 Nodes x 2 x 4 Cores mit 8 GBMemory/node CPU Zeit: ca. 10Tage für Aufheizzeit von 10 Minuten

Tabelle 2.1.3 Rechenaufwand der instationären Aufheizsimulation

### 2.1.4 Nutzen und Verwertung der Ergebnisse

Die durchgeführten Arbeiten führten zu einer generellen Anhebung des Kenntnisstandes bezüglich des Prozesses der industriellen Lackrocknung. Als langfristiger nutzen stellt die hier entwickelte Prozesssimulationen ein Bestandteile der digitalen Fabrik und damit ein modernes und effektives Werkzeug zur Optimierung von Fertigungsprozessen und Fabrikabläufen dar. Mit Hilfe der digitalen Fabrik können innovative Technologien zur Optimierung von Produkten und Dienstleistung realisiert werden. Die virtuelle Lackieranlage ist hierbei ein integraler Bestandteil, da auch in Zukunft die Oberflächenbeschichtung ein wichtiger Schritt im Fertigungsablauf darstellen wird. Kurzfristig ergibt sich durch unmittelbare Anwendung des erstellten Simulationsprogramms eine Reihe von positiven Auswirkungen für die Lackiertechnik, z.B. die generelle Verbesserung der Betriebssicherheit von Lackrocknern, die Reduzierung des Energieaufwandes, die Minimierung des Nacharbeitsaufwandes und damit eine generelle Reduzierung der Produktionskosten sowie die schnelle und effektivere Umsetzung neuer, umweltfreundlicherer Lacksysteme und Trocknungsprozesse.

Aus wissenschaftlicher Sicht hat das vorliegende Forschungsvorhaben für das Institut signifikanten Pilotcharakter, da erstmalig ein wichtiger Teilprozess der hochwertigen industriellen Lackierung gesamthaft, bis hin zur Vorhersage von Prozessfehlern simuliert wurde. Die Erfahrungen, die hier gesammelt wurden, werden richtungweisend für die weitere Realisierung und Umsetzung der virtuellen Lackierung als Teil der digitalen Fabrik und der hiermit verbundenen beantragung

weiterer öffentlich geförderter Projekte.

Mit den vom IFF durchgeführten Arbeiten wurde vor allem auch die Richtigkeit der Simulation überprüft und bestätigt. Damit wurden auch für externe Anwender die Voraussetzung geschaffen, durch das Programm, durch den Lösungsweg und durch seine dadurch gewonnene Erfahrung, eigene Problemfälle der Lackiertrocknung zu lösen, z.B.:

- Lackierfehler bei der Trocknung rechtzeitig erkennen und verhindern
- Prozessoptimierung (z.B. Durchlaufzeit verringern)
- Anlagenoptimierung durch richtige Parameterauswahl (Trocknergeometrie, Anordnung des Bauteils im Trockner, Einlassgeschwindigkeiten, Temperatur, etc.) und dadurch z.B. Verringerung der Betriebskosten.

Nachfolgend sind weitere, das Thema betreffende Quellenangaben aufgeführt:

- [Baughn-91] Baughn J, Hechanova A, Yan X.: An experimental study of entrainment effects on the heat transfer from a flat surface to a heated circular impinging jet. Heat Transfer 1991; 111: 1023-5
- [Baughn-92] Baughn J, Shimizu S.: Heat transfer measurements from a surface with uniform heat flux and an impinging jet. Heat Transfer 1989; 111: 1096-8
- [Kawamura-99] Kawamura, H., Abe, H., and Matsuo, Y.: DNS of turbulent heat transfer in channel flow with respect to Reynolds and Prandtl number effects. Int. J. of Heat and Fluid Flow 20 (1999) 196-270.
- [Geipel-06] C. Geipel: "Energie- und Stofftransport bei der Trocknung von Automobil-Basis- und Modelllacken", Promotionsschrift, VDI Verlag, 2006
- [Schröder-02] M. Schröder: "Untersuchungen zum Trocknungsvorgang bei nass-in-nass applizierten Lackschichten", Promotionsschrift, VDI Verlag, 2002
- [Yan-92] Yan X, Baughn JW, Mesbah M: The effects of Reynolds number on the heat transfer distribution from a flat plate to an impinging jet. ASME HTD 1992; 226: 1-7

## 2.2 Bericht des TTD

### 2.2.1 Zielsetzung und Aufgabenstellung

Im Rahmen der Arbeitspakete des TTD sollten die Einflüsse von Trocknungsprozessparametern und Materialparametern qualitativ und quantitativ beschrieben werden. Trocknungsprozessparameter sind beispielsweise die Trocknungstemperatur, Luftfeuchtigkeit, sowie Art und Geschwindigkeit der Anströmung eines lackierten Bauteils. Bei den Materialparametern standen die zu verwendenden Stoffdaten wie Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität oder Diffusionskoeffizienten der einzelnen Komponenten sowie die Zusammensetzung des Lackmaterials im Fokus. In einem ersten Schritt sollten die Trocknungsparameter experimentell an der Laboranlage zur Lacktrocknung am TTD erfasst werden. Dazu musste die Anlage entsprechend der geforderten Trocknungsprozessparameter umgebaut werden. Weiterhin sollte ein existierendes numerisches stand-alone Modell so erweitert werden, dass es in eine CFD-Domain (Computational Fluid Dynamics) eingebunden und somit auf beliebig geformten Oberflächen eingesetzt werden kann. Zur Validierung sollten mit dem erstellten Modell exemplarisch Versuche nachgerechnet und mit den experimentell ermittelten Daten verglichen werden.

### 2.2.2 Arbeitspakete und Zeitschiene

Nachfolgende Abbildung 1 zeigt exemplarisch den zeitlichen Bearbeitungsablauf der einzelnen Arbeitspakete des TTD. Abweichend vom Projektplan wurden in einzelnen Arbeitspaketen die Schwerpunkte teilweise neu akzentuiert.

Jahr	2006				2007					2008					2009									
Monat	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	S	J	F	M	A	M	J	J	A	S
Zusammenstellung der Grundlagen	■																							
IFF																								
AP 2 Stand der Technik	■	■																						
CADFEM																								
AP 3 Simulation Strömung/Aufheizung	■	■																						
IFF																								
AP 4 Stoffdaten				■	■	■	■	■	■															
FHTE																								
AP 5 Modellierung Trocknung				■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■									
TTD																								
AP 6 Modellintegration Trocknung										■	■													
Fluent																								
AP 7 Verifikation Trocknungsmodell																					■	■	■	
IFF																								
AP 8 Experimente Lackierfehler																					■	■	■	
FHTE																								
AP 9 Integration Lackierfehlermodell																								
Fluent																								
AP 10 Verifikation Lackierfehlermodell																					■	■	■	
IFF																								
AP 11 Industrielle Verifikation																						■	■	
IFF																								
AP 12 Analyse und Umsetzung																								
DFO																								
AP 13 Koordination																								
IFF																								

Abbildung 1, Arbeitspakete und Zeitschiene

### 2.2.3 Erzielte Ergebnisse

Im Folgenden wird auf die wichtigsten Ergebnisse aus den Bereichen „Stoffdaten“, „experimenteller Aufbau“, „Trocknungsmodell und Simulation“ und „Vergleich von Experiment und Simulation“ eingegangen. Details zu den einzelnen Bereichen sind weiterhin in den Veröffentlichungen (siehe Kapitel 1.8) sowie den Zwischenberichten zum SiLat-Projekt zu entnehmen.

#### 2.2.3.1. Stoffdaten

Für die Simulation der Lacktrocknung ist eine Vielzahl von Stoffdaten verschiedener Stoffe in unterschiedlichen Aggregatzuständen erforderlich. Diese sind:

Stoff	Aggregatzustand			Stoffdaten						
	f	fl	g	$\lambda$	$c_p$	$\rho$	$\eta$	$a_i$	$\Delta_i$	$\epsilon$
Aluminium	X			X	X	X				
Stahl	X			X	X	X				
Wasser		X	X	X	X	X	X	X	X	X
Luft			X	X	X	X	X	X	X	X
Butylglykol		X	X	X	X	X	X	X	X	X

**Tabelle 1, Stoffdaten**

Die Stoffdaten wurden den Quellen [Sckuhr-01], [Schröder-02], [Geipel-06], [VDI-05] und [Yang-07] entnommen und liegen als Konstantwerte (Feststoffe) bzw. als temperatur- und zum Teil konzentrationsabhängige Polynome vor. Für die Stoffdaten wurde ein separates Dokument zu dem Arbeitspaket AP 4 erstellt und auf dem SiLat-Webespace projektintern veröffentlicht.

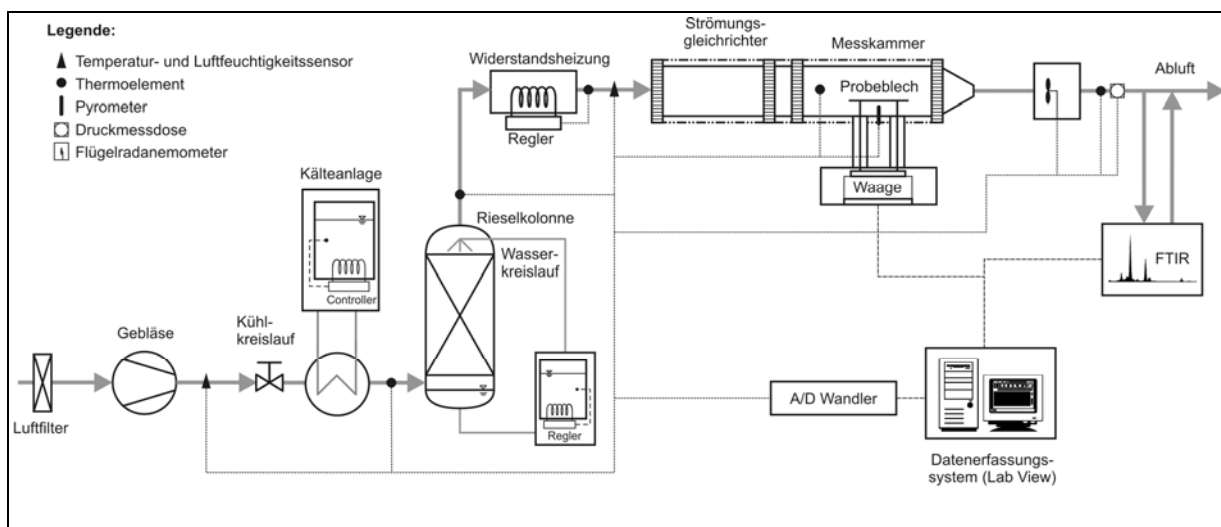
#### 2.2.3.2. Experimenteller Aufbau

Am TTD wurden verschiedene Trocknungsversuche an einer Laboranlage durchgeführt. Abbildung 2 zeigt schematisch den Aufbau der Versuchsanlage. Gefilterte Umgebungsluft wird hierbei über ein Gebläse durch einen Wärmeübertrager mit einem angeschlossenen Kältekreislauf sowie eine Rieselkolonne geführt. Hiermit kann der absolute Wassergehalt der Luft in einem Bereich von  $x_{Luft} = 2 - 20 \text{ g/kg}_{tr. Luft}$  eingestellt werden. Über eine elektrische Widerstandsheizung wird die Luft anschließend in einem Temperaturbereich von 20 - 80°C erwärmt. Die Temperaturen werden mit Thermoelementen von Typ K (Genauigkeit:  $\pm 0.5 \text{ K}$ ) erfasst. Vor der Messkammer stellt sich in einem Strömungsgleichrichter eine ausgebildete Rohrströmung ein. Die Geschwindigkeit der Strömung wird nach der Messzelle mittels eines Flügelradanemometers erfasst. Die mittlere Geschwindigkeit in der Messzelle kann in einem Bereich von 0.5 - 2m/s eingestellt werden. Zwei Parameter des eingelegten Probeblechs werden erfasst: zum einen wird die Gewichtsabnahme durch die Lösemittelverdampfung durch Auflegen des Probebleches auf eine Waage gemessen (maximale Genauigkeit je nach Strömungsform:  $\pm 10 \text{ mg}$ ). Zum anderen wird in der Mitte des Probebleches mittels eines Pyrometers die Temperatur der Probeblechrückseite (ohne Lackfilm) in

einer kreisförmigen Fläche von ca. 3 cm<sup>2</sup> gemessen. Die Genauigkeit beträgt hier aufgrund der Kalibrierung mit den Thermoelementen  $\pm 1$  K. Alle Wände der Messzelle sind mit elektrischen Widerstandsheizschlaufen beheizt. Im Abluftkanal werden neben der Strömungsgeschwindigkeit auch Druck und Temperatur der Abluft erfasst. Damit kann der jeweilige Normvolumenstrom errechnet werden. Weiterhin wird der organische Lösemittelgehalt eines Teilmassenstroms der Abluft mittels eines Fourier-Transmissions-Infrarot-Spektrometers (FTIR) bestimmt.

Neben den oben genannten Zwischentrocknungsbedingungen können weiterhin auch Trocknungsbedingungen für das Einbrennen der Lackschichten eingestellt werden. Die Temperaturen können hierbei in einem Bereich von 80 °C - 150 °C eingestellt werden. Die Geschwindigkeiten werden zwischen 0.5 – 2m/s variiert. Auf eine Einstellung der Luftfeuchtigkeit wird verzichtet.

Die Temperaturen des Standardversuches orientieren sich an den Bedingungen in einem industriellen Zwischentrockner in der Automobilindustrie. Bei einem Standardversuch werden in der Messzelle eine Temperatur  $t_{\text{Luft}} = 70$  °C, eine mittlere Strömungsgeschwindigkeit  $v_{\text{Luft}} = 1$  m/s und eine absolute Luftfeuchtigkeit  $x_{\text{Luft}} = 6$  g/kg<sub>tr. Luft</sub> eingestellt. Ausgehend von diesem Versuch wird ein Trocknungsprozessparameter variiert, alle anderen Parameter bleiben konstant.



**Abbildung 2, Schema der Laboranlage zur Lacktrocknung**

Abbildung 3 zeigt unterschiedliche Konfigurationen der Messzelle. In der Parallelanströmung kann statt einem ebenen Blech (Abbildung 3 a) auch ein Z-förmiges Probablech eingelegt werden. Je nach Ausrichtung des Absatzes in Strömungsrichtung kann dabei ein "backward-facing-step flow" (Abbildung 3 b) bzw. ein "forward facing step flow" (Abbildung 3 c) bezüglich des Massentransportes aus dem Lackfilm generiert werden. Statt einem Deckel an der Decke der Messzelle kann mit einem Infrarotstrahler das Blech zusätzlich beheizt (Abbildung 3 d) oder alternativ können eine Infrarot-Kamera bzw. eine CCD-Kamera (Abbildung 3 e) oberhalb des Bleches angebracht werden. Ein Kanal, der senkrecht zur Blechoberfläche auf der Messzelle montiert wird, ermöglicht weiterhin Trocknungsversuche in einer Prallströmung. Mittels verschiedener Einlassgeometrien kann die Strömungsform auf dem Blech variiert werden (Abbildung 3 f).

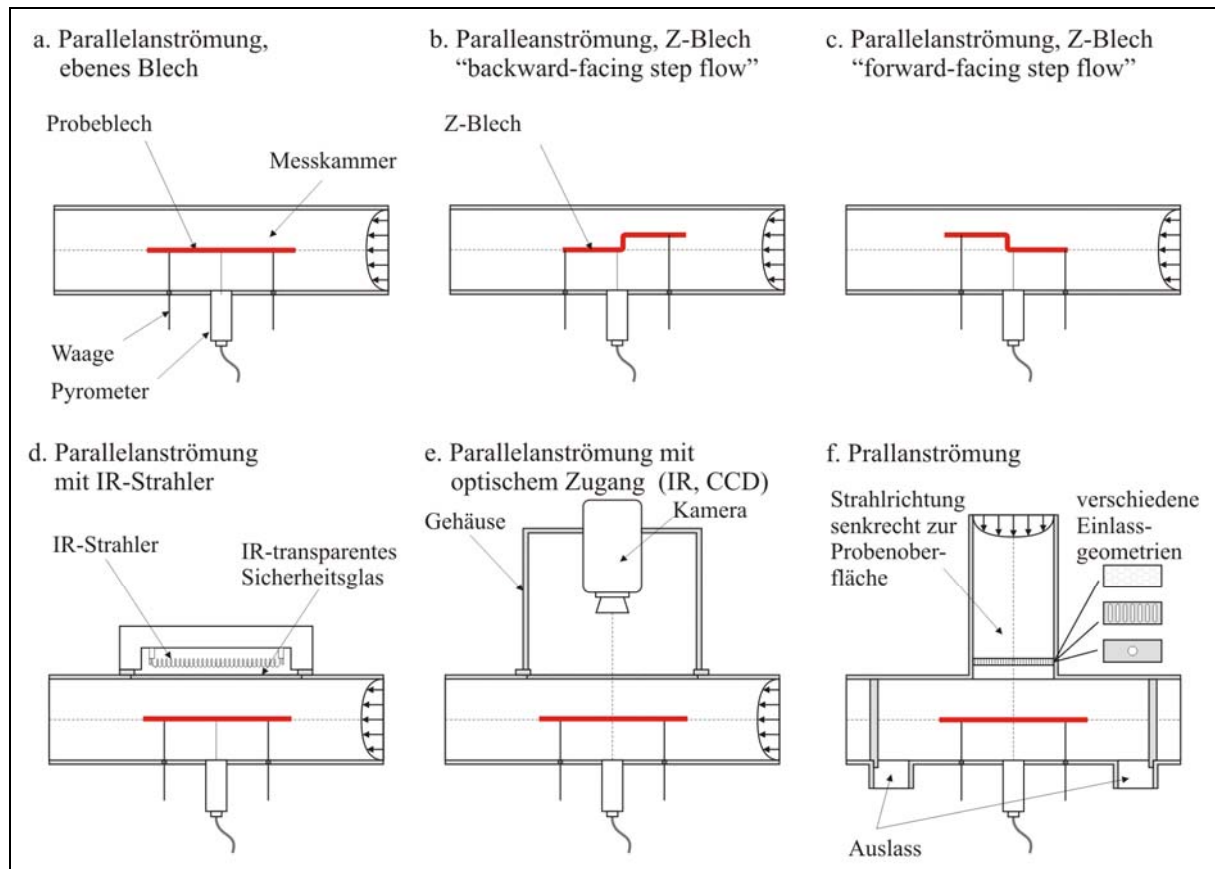


Abbildung 3, Konfigurationen der Messzelle

Wasserbasierte Reallacksysteme wie sie in der Automobilindustrie eingesetzt werden, enthalten eine Vielzahl an verschiedenen Komponenten in teilweise nur geringer Konzentration. Um eine spätere Simulierbarkeit zu gewährleisten, wurden neben Reallacken auch ein Modelllacksystem, bestehend aus Wasser ( $x_{\text{Wasser}} \approx 0.6$ ), dem organischen Lösungsmittel Butylglycol ( $x_{\text{Butylglycol}} \approx 0.2$ ) und dem Feststoff Polyurethan ( $x_{\text{PUR}} = 1 - x_{\text{Wasser}} - x_{\text{Butylglycol}} \approx 0.2$ ) untersucht.

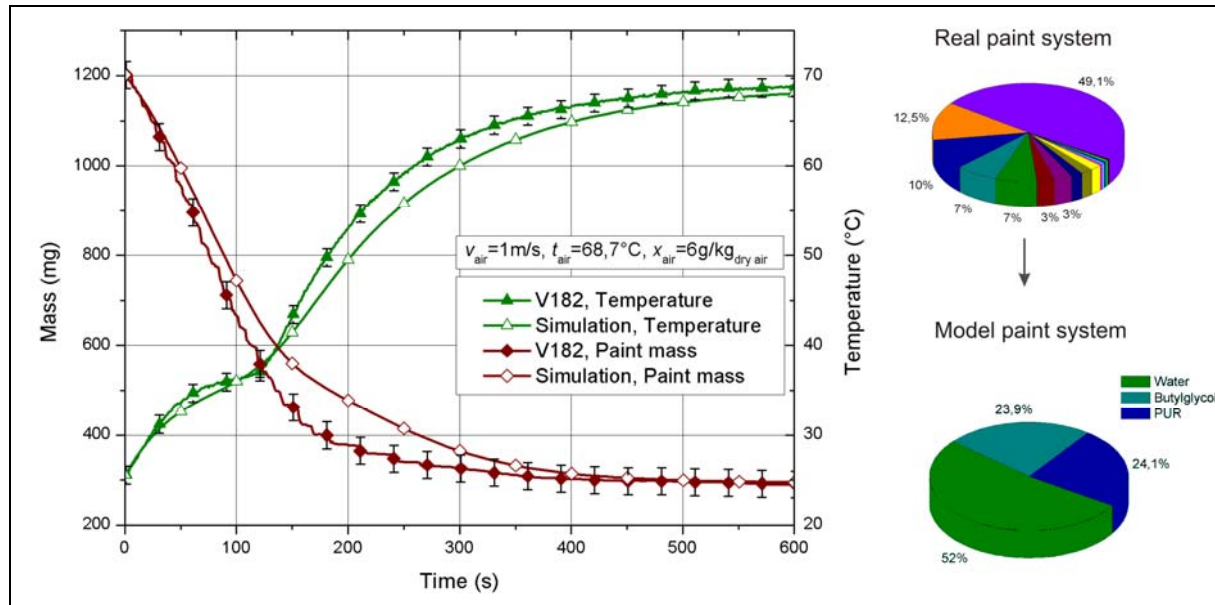


Abbildung 4, Vergleich Modellsystem mit einem Reallsystem

Die Probengeometrie beträgt 110 mm x 200 mm x 0,8 mm. Die ebenen, mit kathodischen Tauchlack (KTL) beschichteten Stahlbleche wurden von den Projektpartnern der Daimler AG zur Verfügung gestellt. Die Z-förmigen haben dieselben Ausgangsmaße wie die ebenen Probebleche, die Falzhöhe beträgt 20 mm. Nach dem Biegen wurden diese Bleche von den Projektpartnern an der FH Esslingen mit KTL beschichtet.



Abbildung 5, Lackapplikation mit Filmziehgerät

Die Lackapplikation erfolgte, je nach Anwendungszweck, entweder mit einem pneumatischen Automaten oder mit einem CNC-gesteuerten Filmziehgerät. Sowohl die Reallsysteme wurden auf ebene Probebleche bzw. das Modellsystem auf die Z-förmige Probebleche pneumatisch appliziert. In den sonstigen Versuchen mit parallel angeströmten Probeblechen sowie in den Prallströmversuchen wurde



Modelllack mit dem Filmziehgerät aufgezogen. Hierbei wurde das ebene, mit KTL beschichtete Probeblech auf einem Magnettisch eben aufgespannt (Abbildung 5). Über einen CNC-gesteuerten xyz-Tisch wurde über eine gefederte Trapezführung das Filmziehgerät mit einer definierten Kraft auf das Probeblech angedrückt. Anschließend wurde der Lack in das Filmziehgerät gegeben und mit einer konstanten Verfahrensgeschwindigkeit längs auf dem Probeblech appliziert.

Nach der Lackapplikation werden die beschichteten Bleche gewogen und danach in die Messzelle des Versuchsstandes eingelegt. Während der Trocknung werden sekundlich Gewicht des Probebleches, Temperatur in der Mitte des Probeblechs sowie Lösemittelgehalt in der Abluft erfasst. Nach 600s werden die Proben aus dem Kanal entnommen, nochmals gewogen, und anschließend bei einer Temperatur von 140°C in einem Ofen eingebrannt und abschließend nochmals gewogen.

Abbildung 6 zeigt den charakteristischen zweistufigen Massen- und Temperaturverlauf für die Trocknung einer Dispersion. Bei einer Trocknung bei Standardbedingungen stellt sich im Lackfilm gegen Ende des ersten Trocknungsabschnitts eine Grenztemperatur aufgrund der Verdunstung des freien Lösemittels an der Lackoberseite ein. Im zweiten Trocknungsabschnitt wird dann asymptotisch die Temperatur der umströmenden Luft erreicht. Die Masse des Lackfilms nimmt im ersten Trocknungsabschnitt linear ab. Im zweiten Abschnitt wird dann asymptotisch das Trockengewicht, also das Gewicht des Festkörpers im Lack samt Lösemittel im Gleichgewichtszustand mit der umströmenden Trocknungsluft erreicht. Der Trocknungsvorgang im zweiten Trocknungsabschnitt wird von der Diffusion des Lösemittels im Lackfilm dominiert.

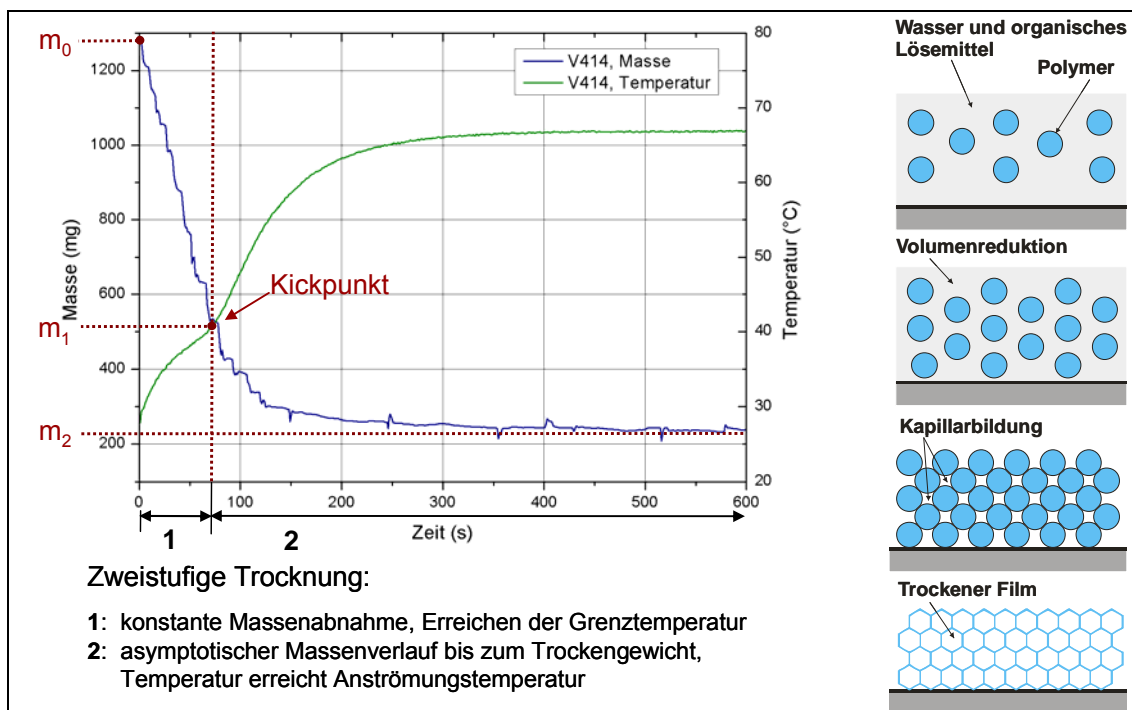


Abbildung 6, Dispersionstrocknung

Abbildung 7 zeigt Temperatur- und Masseverlauf eines Bleches in "forward-" und "backward-facing step" Strömungsbedingungen bezüglich der lackierten Seite. Erster und zweiter Trocknungsabschnitt können deutlich voneinander unterschieden

werden. Bei Versuch 307 stellt sich während der “forward-facing“-Bedingungen ein ca. 2 K geringeres Temperaturniveau als im Vergleich zu Versuch 304 in “backward-facing“-Bedingungen. Dies erklärt sich durch eine „Abschattung“ der Strömung in Versuch 304 im Messbereich des Pyrometers.

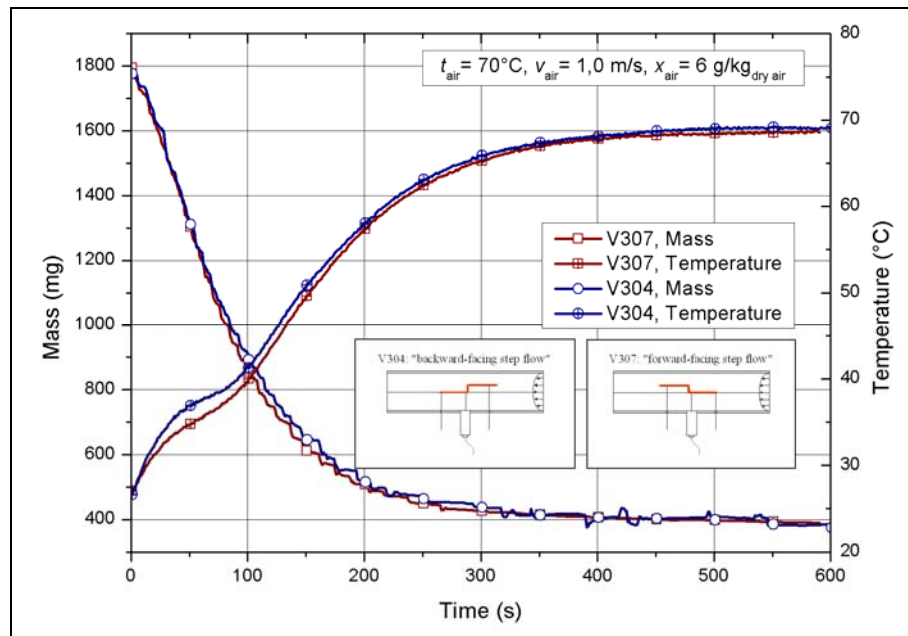


Abbildung 7, Z-Blech in “forward-“ und “backward-facing step“ Strömungsbedingungen

Abbildung 8 und Abbildung 9 zeigen den transienten Temperatur-, Masse- und Lösemittelkonzentrationsverlauf bei Variation der Anströmgeschwindigkeit unter Prallströmbedingungen. Auch hier können die beiden Trocknungsabschnitte unterschieden werden.

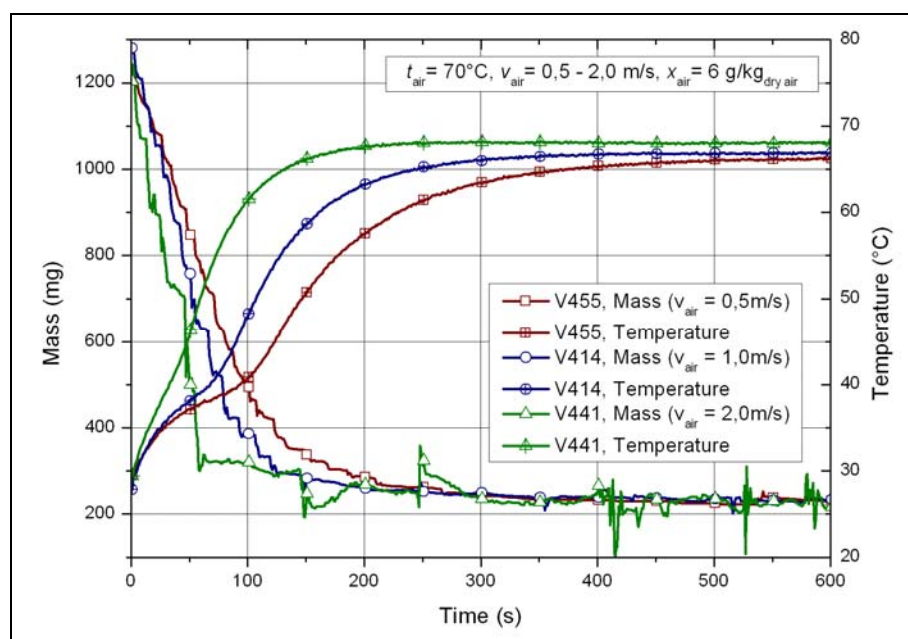


Abbildung 8, Prallströmversuch - Variation der  $v_{\text{air}}$ - transienter Masse- und Temperaturverlauf

Eine gravimetrische Erfassung des Gewichtes des Probebleches war trotz der Prallströmungsbedingungen bis zu einer Einlassgeschwindigkeit  $v_{\text{air}} = 2 \text{ m/s}$  möglich. Bei einer hohen Anströmgeschwindigkeit wird der zweite Trocknungsabschnitt vergleichsweise schneller erreicht. Entsprechend größer fällt mit steigender Anströmgeschwindigkeit der Gradient der Massenabnahme im ersten Trocknungsabschnitt aus. Ein Maximum der organischen Lösemittelkonzentration wurde im zweiten Trocknungsabschnitt festgestellt.

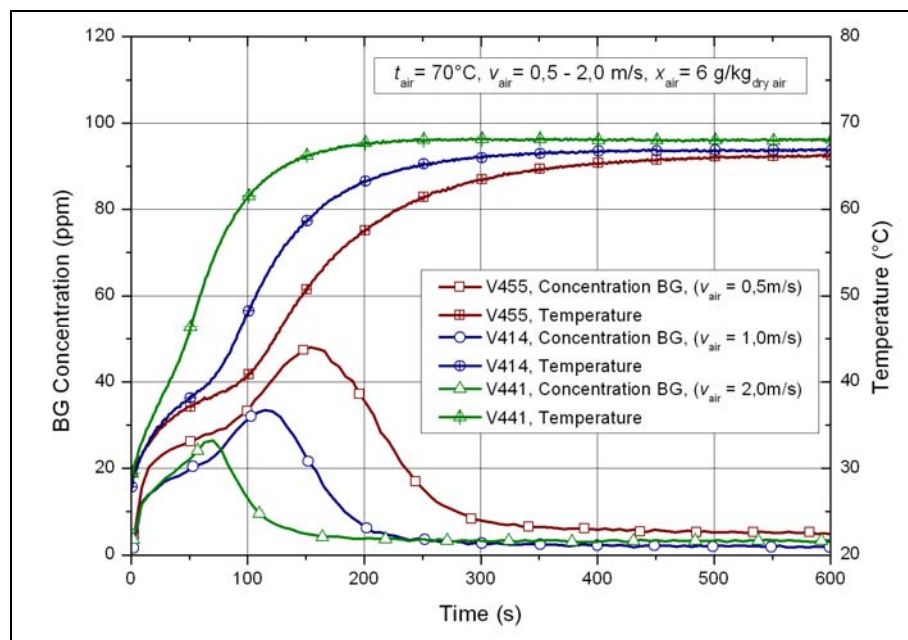


Abbildung 9, Prallströmversuch - transienter Masse- und Lösemittelkonzentrationsverlauf

Der Einfluss unterschiedlicher Anströmungsbedingungen wird in Abbildung 10 verdeutlicht. Hier ist vergleichend die Temperatur in der Blechmitte eines nicht mit Lack beschichteten Bleches in verschiedenen Anströmungsbedingungen über der Zeit aufgetragen. Dabei dauert es ca. 300s bis ein ebenes Blech in Parallelanströmung die Anströmtemperatur erreicht. Nach ca. 220s erreicht ein Z-förmiges Probeblech bei paralleler Anströmung ebenfalls die Anströmtemperatur. Ein schnelleres Aufheizverhalten kann bei der Prallströmung beobachtet werden. Eine Wabenstruktur als Einlassgeometrie ist bezüglich eines schnellen Aufheizverhaltens ungünstiger als eine Rippen- oder Düsen einlassgeometrie. Das schnellste Aufheizverhalten weist die Parallelströmung in Kombination mit einem Infrarotstrahler auf. Nach nur ca. 20s wird die Zieltemperatur überschritten und der Strahler abgeschaltet. Das sich einstellende Temperaturniveau liegt aufgrund der Verluste an der infrarottransparenten Scheibe unterhalb des Strahlers ca. 2 K unter dem Niveau der anderen Versuche.

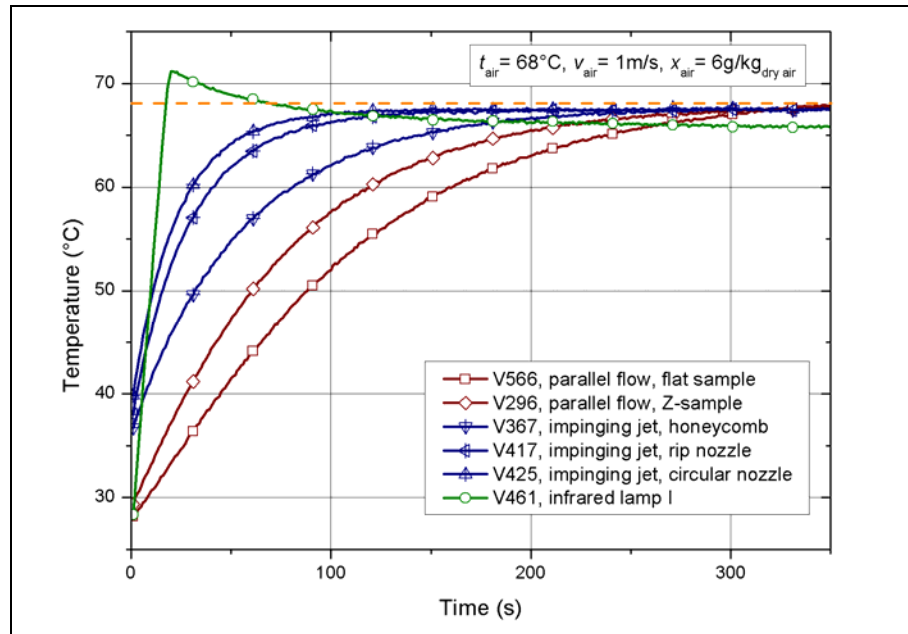


Abbildung 10, Aufheizverhalten bei unterschiedlichen Versuchsbedingungen

Mit Hilfe der chromatisch codierten konfokalen Abstandsmessung sollte geklärt werden, ob es sich bei der Lackrocknung auf strukturierten Oberflächen um einen eindimensionalen, also senkrecht zur Substratoberfläche verlaufenden Transportprozess handelt. Dazu wurden am TTD spezielle Probebleche mit einer Rippengeometrie hergestellt (Abbildung 11, links). Die Rippen bzw. Stegbreite beträgt 1mm. Die Rippentiefe wurde variiert. Nach Erfassung der Rippentopologie durch die chromatisch codierte konfokale Abstandsmessung wurde Lack auf die Probegeometrien appliziert und die sich ausbildende Oberflächentopologie durch die Trocknung mittels der Abstandsmessung alle zwei Minuten über ca. 2 Stunden bei Raumtemperatur erfasst.

Die chromatisch codierte konfokale Abstandsmessung (CHR, Fa. Precitec) basiert auf einer speziellen Linse, die einfallendes weißes Licht in Abhängigkeit der Wellenlänge unterschiedlich fokussiert. Liegt eine Phasengrenze im Messbereich, wird Licht einer Wellenlänge in den Messkopf zurückreflektiert einfallenden weißen Licht im Faserkoppler getrennt und detektiert. Innerhalb des Messbereichs kann somit die Lage der Phasengrenze erfasst werden (Abbildung 11, rechts).

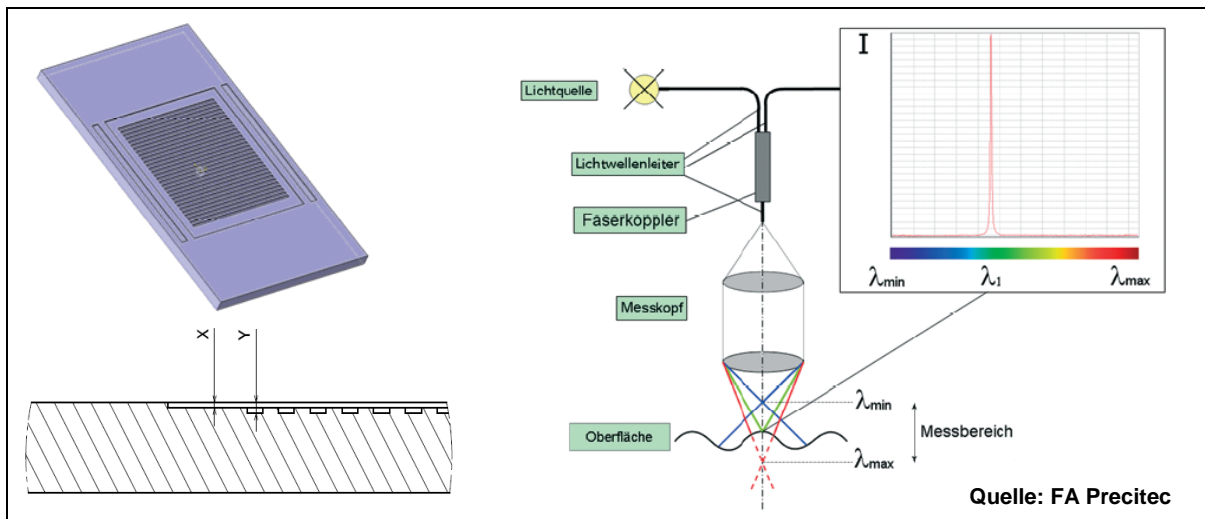


Abbildung 11, Chromatisch codierte konfokale Abstandsmessung

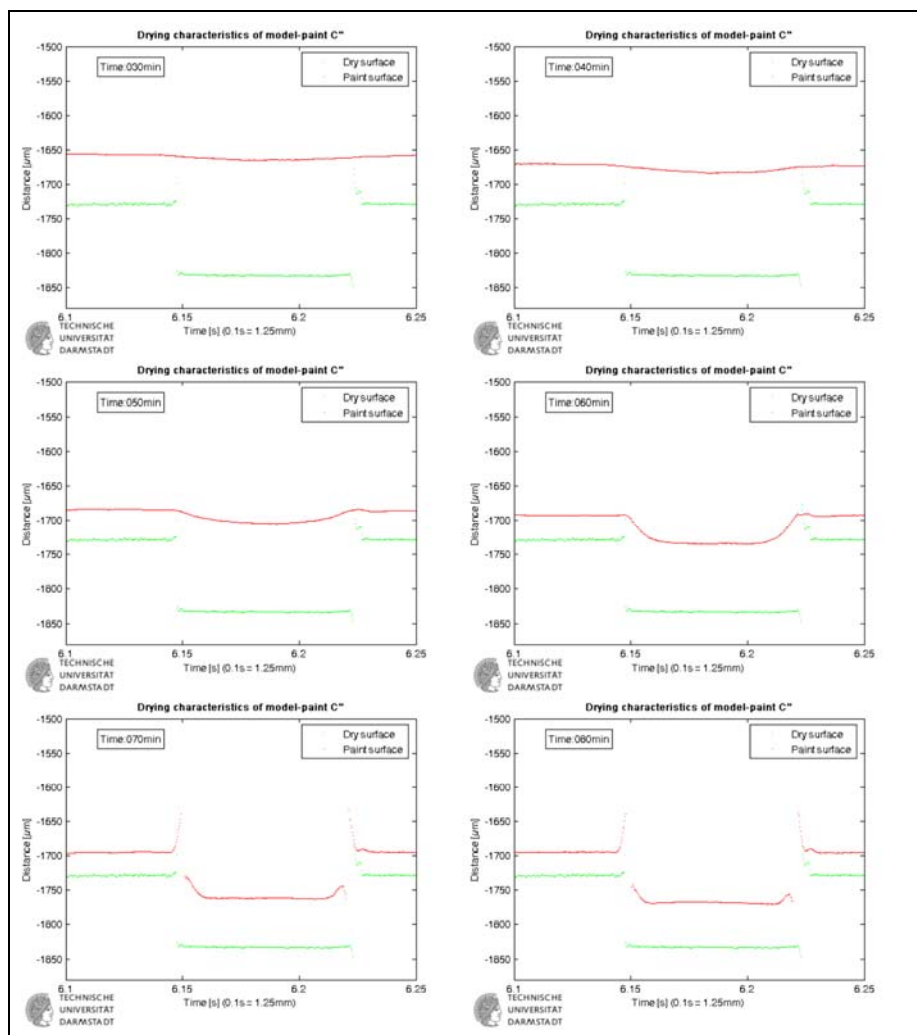


Abbildung 12, Bildausschnitte aus Videoauswertung beim CHR-Trocknungsversuch

Abbildung 12 zeigt Bildausschnitte aus der Videoauswertung der CHR-Versuche. In grün ist die Topologie des Rippenbleches, in rot die Phasengrenze dargestellt. Eine weitere Auswertung ergab, dass die Trocknung, ungestört von der Rippengeometrie als eindimensional anzunehmen ist. Dies ist eine wichtige Voraussetzung zur Anwendbarkeit des Trocknungsmodells.

### 2.2.3.3. Trocknungsmodell und Simulation

In den durchgeführten Trocknungsversuchen wurde ein Modelllacksystem verwendet, das sich auch für die Modellierung der Trocknung gut verwenden lässt und auch schon von [Geipel-06] und [Schröder-02] beschrieben wurde. Mit nachfolgenden Vereinfachungen lässt sich das Trocknungsmodell anwenden:

- Das Lacksystem besteht aus nur einer Schicht
- Die Konzentrationen in der Schicht sind initial homogen.
- Es kann ein Dispersionstrocknungsprozess angenommen werden.
- Der Trocknungsprozess ist eindimensional (normal zur freien Lackoberfläche)
- Der Einfluss von Kräften (z.B. Scherkräfte, Volumenkräfte) ist vernachlässigbar
- Thermisches Gleichgewicht: der Lackfilm ist in jedem Zeitschritt normal zur Lackoberfläche isotherm
- Mechanisches Gleichgewicht: Der Partialdruck  $p_{\text{sat},i}$  kann in der Gasphase direkt am Lackfilm angenommen werden

Das von [Geipel-06] und [Schröder-02] implementierte Trocknungsmodell gilt für eben angeströmte Platten. Um das Modell in eine CFD-Domain einzubinden und auf beliebig gekrümmten Oberflächen einzusetzen, können verschiedene Strategien verfolgt werden (Abbildung 13).

Mit Variante 1 kann das Stoff- und Wärmeübergangsverhalten eines ebenen Bleches in einer Parallelanströmung, modelliert in einer CFD-Domain grundsätzlich gerechnet werden. Allerdings können z.B. beim Vernetzen von „kleinen“ Strukturen, wie etwa Spalten, Inkonsistenzen auftreten, da für die Trocknung jeder Oberflächenzelle eine Fernfeldbedingung gefunden werden muss.

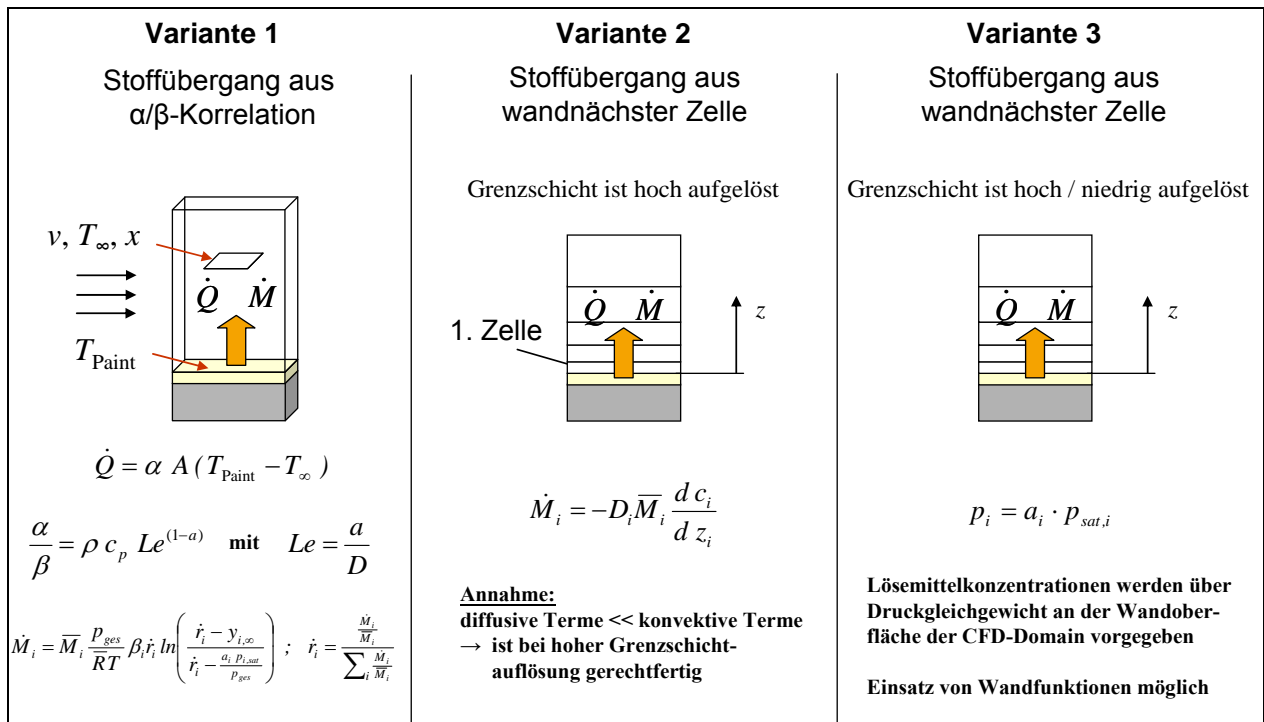


Abbildung 13, Modellierung Wärme- und Stoffübergang in der Grenzschicht

Variante 2 berechnet den Lösemittelstrom in die CFD-Domain eindimensional unter Vernachlässigung der konvektiven Terme in der wandnächsten Zelle. Diese Vorgehensweise setzt die Vorgabe eines Massenquellterms in der Domain sowie eine hohe Grenzschichtauflösung voraus.

Variante 3 gibt eine Konzentration der Lösemittel an der Wand vor. Die Konzentration des Lösemittels an der Wand wird mit der Gleichung

$$p_{i,G} = a_i \cdot p_{\text{sat},i}$$

bestimmt und anschließend in einen Massenanteil  $x_i$  umgerechnet. Dabei sind  $p_{i,G}$  der Partialdruck an der Wand in der Gasphase,  $a_i$  die konzentrations- und temperaturabhängige Aktivität und  $p_{\text{sat},i}$  der temperaturabhängige Sättigungsdampfdruck der Komponente  $i$ . Die genaue Funktionsweise der Konzentrationsvorgabe ist in Abbildung 14 dargestellt.



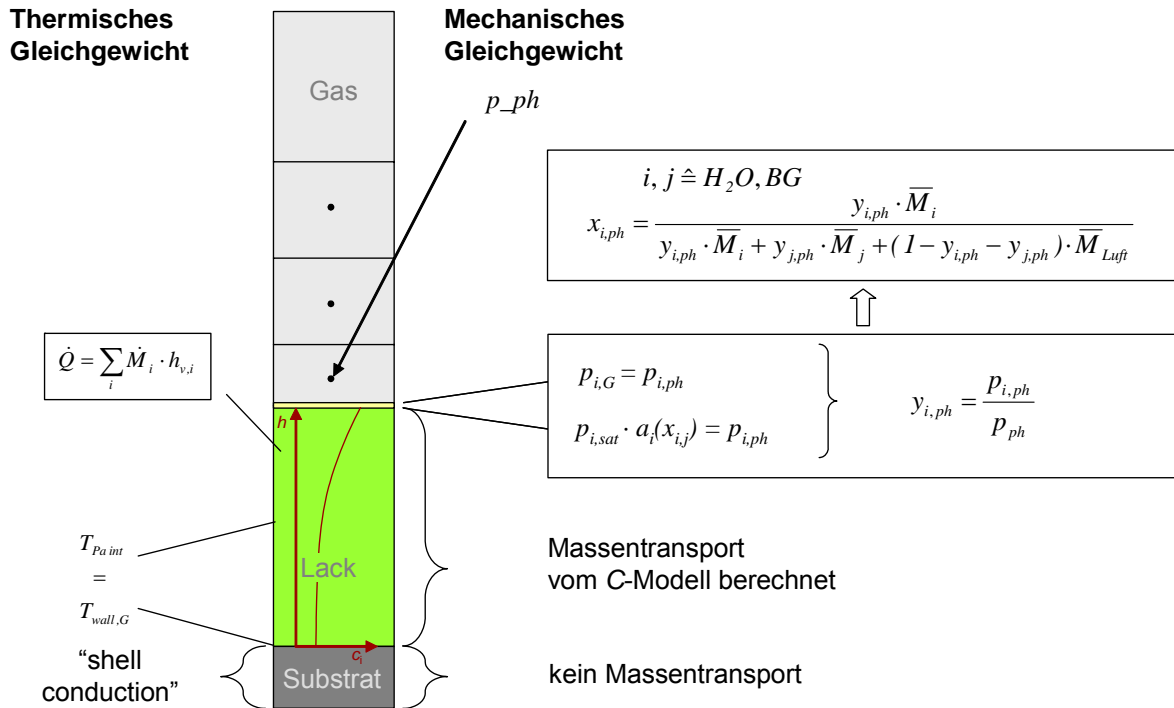


Abbildung 14, Anbindung C-Modell an die Fluent-CFD-Domän

Mittels User-Defined-Functions (UDF) wurde das Trocknungsmodell an eine Fluent-CFD-Domäne gekoppelt. Das Modell wurde sowohl in der Fluent-Version 6.x sowie 12.x erfolgreich getestet. Ein Scheme-Interface, ermöglicht eine einfache Vorgabe der Parameter des Modelllackes, der mit Lack applizierten Flächen und weitere Parameter, wie Relaxationsfaktoren, numerische Stützstellen in der Lackschicht, etc.

Teile des Modells wurden vom Projektpartner Daimler übernommen und in enger Kooperation mit den Projektpartnern bei Fluent weiterentwickelt. Das Trocknungsmodell des TTD ist eher für akademische Zwecke relevant. Parallel zu dem am TTD entwickelten Modell wurde ein Trocknungsmodell bei Fluent entwickelt, das für den industriellen Einsatz konzipiert ist. Dieses Modell arbeitet aufgrund einer Polyfit-Funktion von Konzentrationen über die Schichtdicke speichereffizienter und kann über eine „In Situ Adaptive Tabulation“-Funktion Modellaufrufe bei der Berechnung der Trocknung reduzieren.

Abbildung 15 zeigt eine Fluent 12-Oberfläche mit zwei Scheme-Eingabeinterfaces für die Parameter für das Trocknungsmodell des TTD.



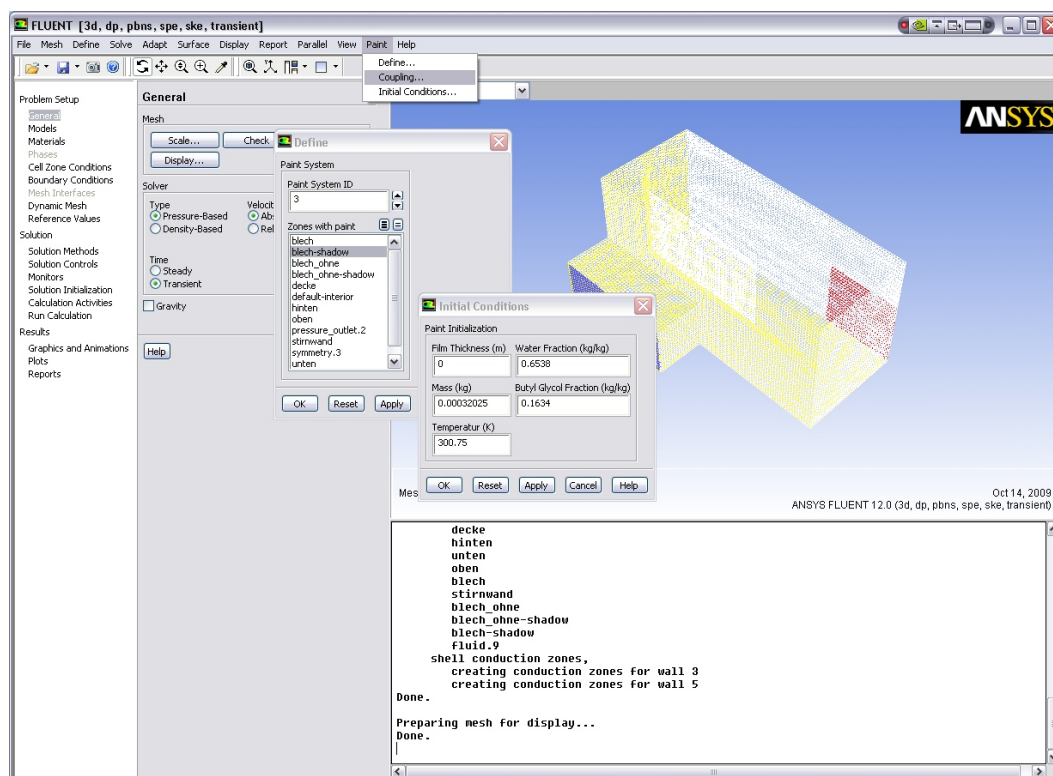


Abbildung 15, Scheme-Interface zur Eingabe der Lackparameter

Zur Anwendung des Trocknungsmodells wurden ein Tutorial und eine Präsentation erstellt, mit dessen Hilfe eine leichte Einarbeitung in Funktionsweise und Anwendung des Trocknungsmodells gewährleistet wird.

### 2.2.3.3. Vergleich von Experiment und Simulation

Der Vergleich von Experiment und Simulation erfolgte in zwei Schritten. In einem ersten Schritt wurde das simulierte Aufheizverhalten von Probeblechen ohne Lack mit entsprechenden Versuchen verglichen. Dies dient zur Verifikation der numerischen Gitter und der vorgegebenen Randbedingungen. In einem zweiten Schritt wurde das so verifizierte Gitter zur Berechnung der Trocknung von Probeblechen mit Lackfilm verwendet und wiederum mit entsprechenden Versuchen verglichen.

Das Aufheizverhalten eines Probebleches ohne Lack im Parallelanströmversuch (vgl. Abbildung 3 c) ist für drei Experimente (V295, V296 und V297) und eine Simulation in Abbildung 16 dargestellt. Die maximale Abweichung von ca. 1.5 K nach 100s erklärt sich aus dem erweiterten Sichtbereich des Pyrometers (ca. 3cm<sup>2</sup>) im Vergleich zum diskreten Messpunkt „P05“. Die Genauigkeit des Pyrometers beträgt nach der Kalibrierung  $\pm 1$  K. Das Gitter kann damit als verifiziert angesehen werden und für weitere Berechnung zur Trocknung des Lackfilms herangezogen werden.

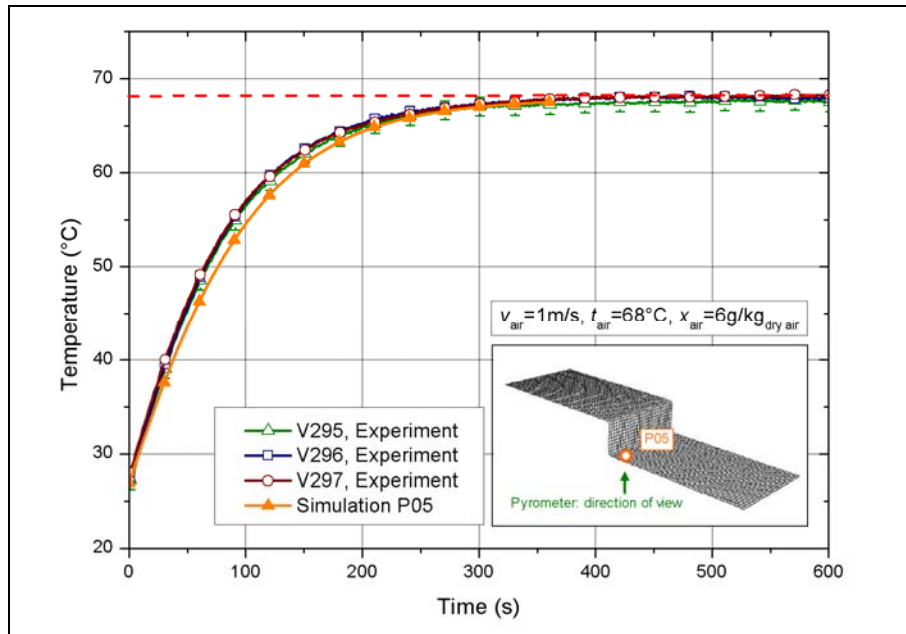


Abbildung 16, Experiment und Simulation: Aufheizverhalten Z-Blech

Da die Messungen mit dem Pyrometer lediglich eine punktuelle Information über die Temperatur des Blechs liefern, wurden Versuche mit einer Infrarotkamera zur Erfassung der transienten Temperaturverteilung auf dem Blech vorgenommen. Jedoch konnte die Infrarotkamera nicht ausreichend genau kalibriert werden. Daher wurde auf Probebleche „Thermochromic Liquid Crystal“-Streifen (TLC) mit unterschiedlicher Sensitivität in verschiedenen Temperaturbereichen geklebt. Abbildung 17 zeigt die Draufsicht auf ein Probeblech mit TLC-Streifen in Parallelanströmung (Versuchsanordnung nach Abbildung 3 e) sowie die Ergebnisse zur Temperaturverteilung auf dem Blech aus der zugehörigen Simulation. Experiment und Simulation weisen eine maximale Temperaturdifferenz von  $\pm 2$  K auf, die gemessene Temperaturverteilung entspricht der Verteilung aus der Simulation.

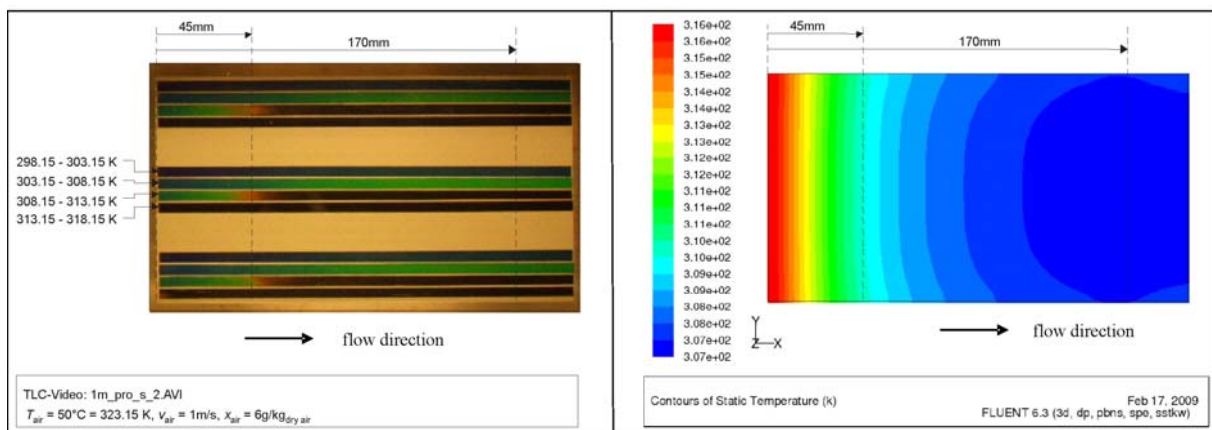


Abbildung 17, Aufheizversuch: ebenes Blech mit TLC-Streifen in paralleler Strömung

Aus dem Vergleich von Experiment und Simulation kann geschlossen werden, dass die erstellten Gitter und vorgegebenen Randbedingungen das Aufheizen von Blechen ohne Lack ausreichend genau wiedergeben. In einem zweiten Schritt wurde

nun die Trocknung von Probeblechen simuliert und mit den entsprechenden Versuchen verglichen.

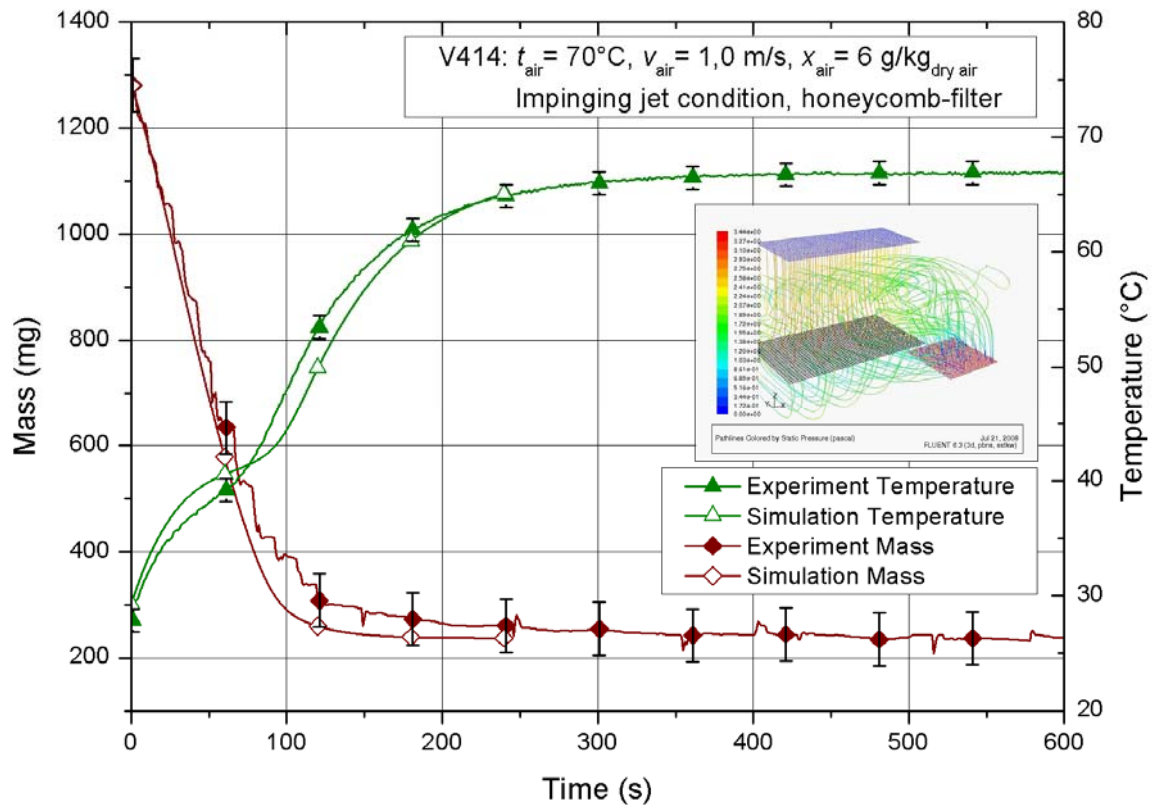


Abbildung 18, Transienter Masse- und Temperaturverlauf im Standardversuch

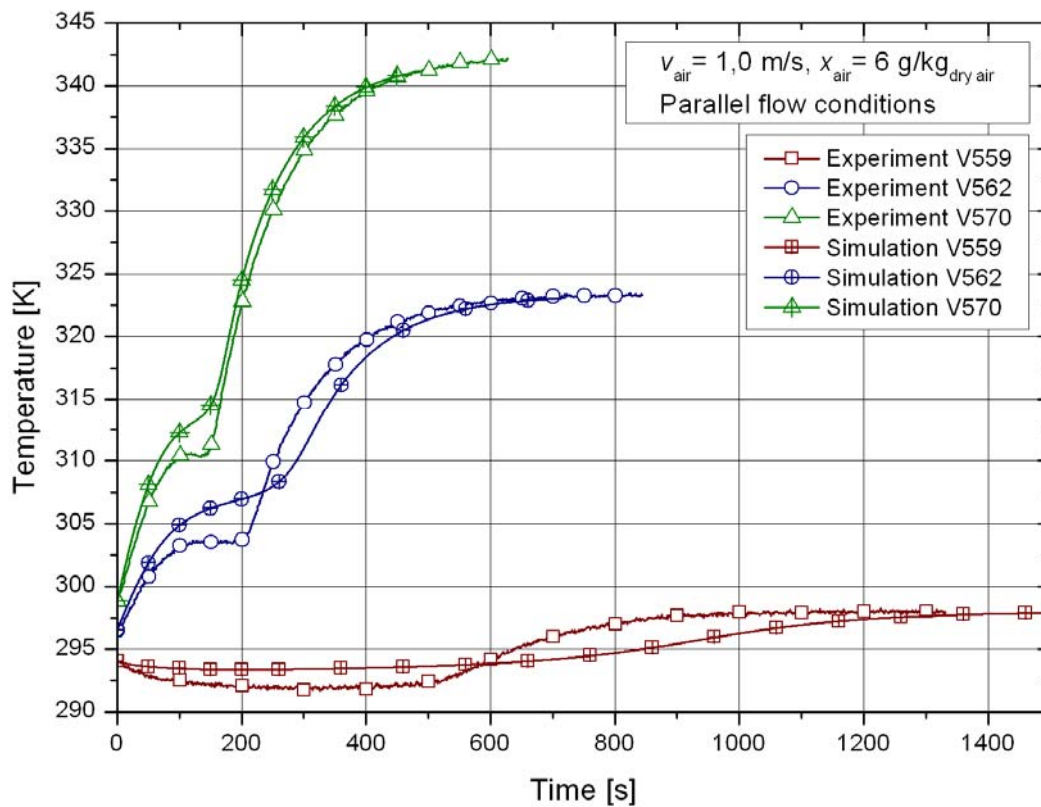


Abbildung 19, Transienter Temperaturverlauf bei verschiedenen Trocknungstemperaturen

Abbildung 18 zeigt den transienten Temperatur- und Masseverlauf von Experiment und Simulation in einer Prallströmung bei Standardbedingungen. Die Abweichung der Temperatur beträgt maximal  $\Delta t = 4.0 \text{ }^\circ\text{C}$ , die Abweichung im Masseverlauf liegt im Bereich der Messunsicherheit  $\Delta m = \pm 50 \text{ mg}$ . Für die Standardbedingungen kann also von einer guten Einstimmung zwischen Experiment und Simulation ausgegangen werden. Ferner kann davon ausgegangen werden, dass das numerische Trocknungsmodell alle für die Thermodynamik der Trocknung relevanten Vorgänge ausreichend präzise repräsentiert. In Abbildung 19 ist der transiente Temperaturverlauf für unterschiedliche Trocknungstemperaturen aufgetragen. Bei Parallelanströmung bei Standardbedingungen ist ebenfalls eine gute Übereinstimmung von Experiment und Simulation ersichtlich. Bei niedrigen Anströmungstemperaturen weichen Experiment und Simulation teilweise erheblich ab. Dies ist durch den gewählten Gültigkeitsbereich der verwendeten Parameter für die Aktivität und den Diffusionskoeffizient von [Geipel-06] begründet. Die Stoffparameter wurden für den Standardversuch ermittelt. Eine bessere Abbildung des Trocknungsvorgangs in der Simulation kann also mit neu ermittelten Stoffwerten für einen größeren Gültigkeitsbereich erreicht werden.

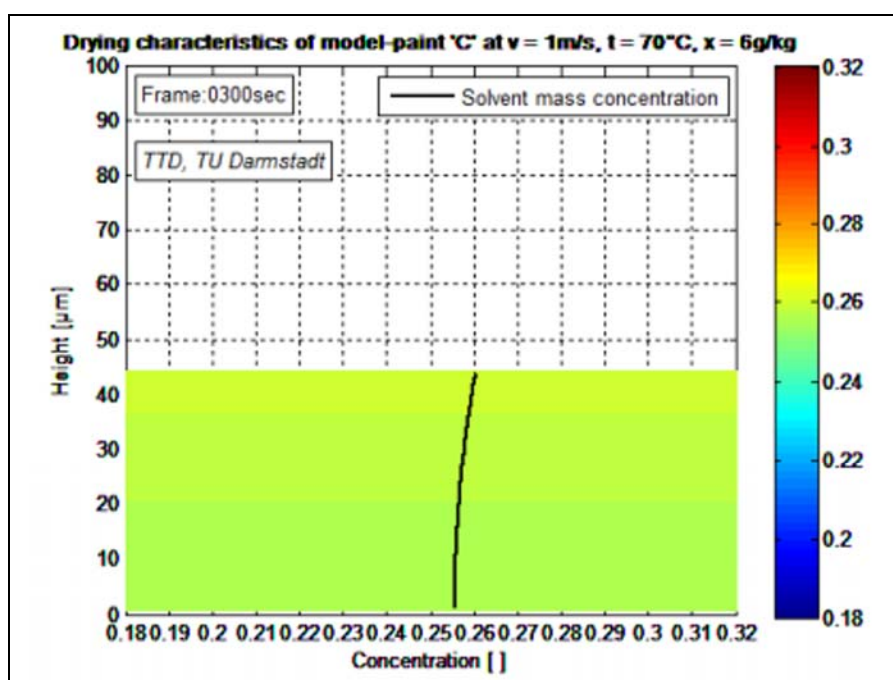


Abbildung 20, Organische Lösemittelkonzentrationsverteilung über Schichtdicke

Neben Temperatur- und Gewichtsverlauf kann durch das implementierte Modell auch die Konzentration von organischem Lösemittel und Wasser über der Schichtdicke in jedem Zeitschritt abgefragt werden. Dies ist beispielsweise für die Implementierung von Fehlervorhersagemodellen von Interesse.

Weiterhin kann nun durch die Einbindung des Trocknungsmodells die Lösemittelkonzentration in der CFD-Domain die örtliche und zeitliche Lösemittelkonzentration vorhergesagt werden. Abbildung 21 zeigt exemplarisch die organische Lösemittelverteilung in der Abluft eines parallel angeströmten ebenen Probestreifes. Somit können Aussagen z.B. bezüglich des Explosionsschutzes oder der Lösemittlexposition abgeleitet werden.

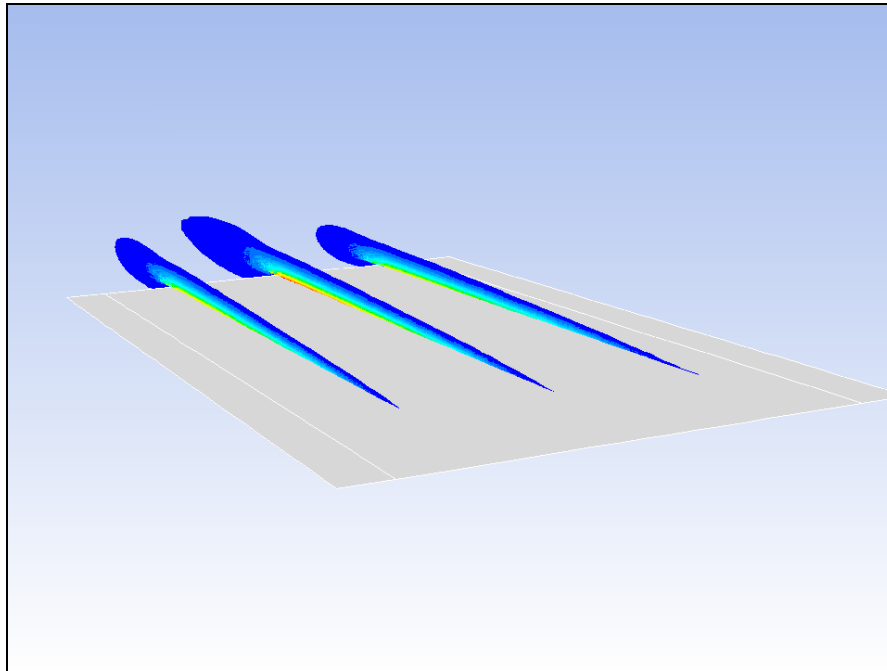


Abbildung 21, Lösemittelverteilung in der Abluft

#### 2.2.4 Nutzen und Verwertung der Ergebnisse

Am TTD wurden im Berichtszeitraum drei Konferenzbeiträge sowie ein Vortrag als „invited keynote“ verfasst (siehe Kapitel 1.8.). Weitere zusammenfassende Beiträge der Arbeiten am TTD im Rahmen des SiLat-Projektes sowie eine Weiterverwendung des Modells zu Schwerpunktsthemen wie beispielsweise Konzentrationsvorhersagen in der Trocknungsabluft von Lackieranlagen oder zur Anwendung des Modells in kontinuierlichen arbeitenden Bandtrocknungsanlagen sind für 2010 geplant.

- [Brinckmann-07] Brinckmann, F. & Hecht, S. Simulation of the drying process of paint films using FLUENT ANSYS Conference & 25. CADFEM Users' Meeting Proceedings, 2007
- [Geipel-06] C. Geipel: "Energie- und Stofftransport bei der Trocknung von Automobil-Basis- und Modelllacken", Promotionsschrift, VDI Verlag, 2006
- [Schröder-02] M. Schröder: "Untersuchungen zum Trocknungsvorgang bei nass-in-nass applizierten Lackschichten", Promotionsschrift, VDI Verlag, 2002
- [Sckuhr-01] S. Sckuhr: "Simulation des thermodynamischen Verhaltens von Lackpartikeln bei der Spritzapplikation", Promotionsschrift, VDI Verlag, 2001
- [VDI-05] "VDI-Wärmeatlas", Springer Verlag, 2005
- [Yang-07] Yang, Y. et.al.: BUY-DIPPR Thermophysical Properties Laboratory, Project 801, Evaluated Process Design Data

## 2.3 Bericht der Hochschule Esslingen

### 2.3.1 Zielsetzung und Aufgabenstellung

Der nachfolgende Abschnitt beschreibt die Arbeiten der Hochschule Esslingen innerhalb des Projektes. Die Hauptaufgabe der Hochschule Esslingen bestand global in der Koordination und Durchführung nahezu aller experimentellen Untersuchungen einschließlich der Beschaffung der erforderlichen Apparate und messtechnischen Anlagen. Dabei wurde die Arbeit in enger Abstimmung mit dem Koordinator (IFF) durchgeführt, in dessen Technikum aufgrund der dort vorhandenen Lackieranlagen auch räumlich die meisten Untersuchungen stattfanden.

### 2.3.2 Arbeitspakete und Zeitschiene

Ausgehend von den im Projektantrag formulierten Arbeitspaketen haben sich im Laufe des Projektes für die Hochschule Esslingen 2 wesentliche Tätigkeitsschwerpunkte ergeben, die zum Teil arbeitspaketübergreifend angelegt waren:

1. Durchführung aller experimenteller Untersuchungen, mit Ausnahme der grundlagenorientierten Versuche des TTD Darmstadt, was sowohl die Charakterisierung der Strömung in den verschiedenen Trocknern als auch Aufheizversuche mit und ohne applizierter Lackschicht betrifft (Arbeitspakete 3, 5, 7 und 10).
2. Modellentwicklung zur Vorhersage trocknungsbedingter Lackierfehler bei der Decklacktrocknung in der Karosserielackierung (Arbeitspaket 8).

Das weitere, von der Hochschule Esslingen zu koordinierendes Arbeitspaket 4 betraf die experimentelle Bestimmung der für das Abdunstmodell relevanten Stoffdaten, die entsprechenden Ergebnisse hierzu finden sich im Berichtsabschnitt des TTD Darmstadt.

Anmerkungen zum zeitlichen Ablauf der Arbeiten finden sich in der Beschreibung der Arbeiten innerhalb der Arbeitspakete. Im Bezug auf AP8 kann festgehalten werden, dass aufgrund der Komplexität der Problemstellung dieses nicht abschließend behandelt werden konnte. Daher muss unterschieden werden zwischen der Bereitstellung eines ersten Fehlervorhersagemodells, die so rechtzeitig erfolgte, dass eine entsprechenden Schnittstelle in das Simulationsprogramm eingearbeitet werden konnte, und den insbesondere in der 2. Projekthälfte stetig weitergeführten Arbeiten zur Einarbeitung zusätzlicher physikalischer Effekte, die zwar deutlich über die ursprüngliche Planung im Projekt hinausgehen, trotzdem aber inhaltlich nicht abgeschlossen werden konnten.



### 2.3.3 Erzielte Ergebnisse

#### 2.3.3.1 Charakterisierung der verschiedenen Trocknersysteme

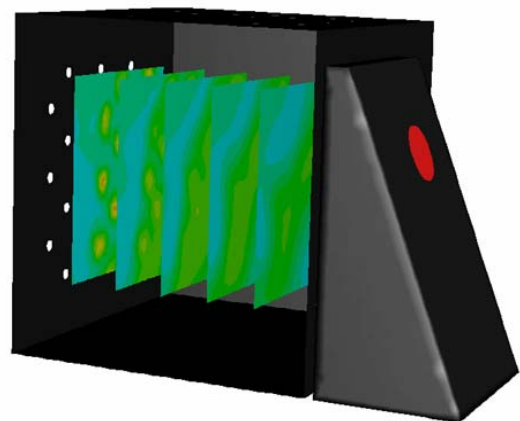
Zur Erfüllung der experimentellen Aufgabenstellungen mussten verschiedene Trocknersysteme bereitgestellt bzw. beschafft werden. Im Einzelnen handelte es sich um ein sogenanntes HYGREX-Trockner, der in Bezug auf die einstellbaren Temperaturen und Luftfeuchten bzw. die entsprechenden zeitlichen Abläufe dieser Werte genau auf die Zwischentrocknung von Basislackschichten in der Automobillackierung abgestimmt ist. Der Trockner mit einer Größe von ca.  $0,4 \text{ m}^3$  ist mit einem dedizierten Wiegesystem für ebene Bleche und einem Zugang für ein Pyrometer ausgestattet.

einen Industrietrockner der Fa. VÖTSCH mit einem Trocknervolumen von  $1,4 \text{ m}^3$ , der bis zu Trocknungstemperaturen von  $200^\circ \text{ C}$  arbeitet. Die Größe dieses Trockners ist insbesondere daran ausgerichtet, auch kleinere dreidimensionale Werkstücke aufheizen und trocknen zu können.

Im Vorfeld der eigentlichen Versuche zur Aufheizung verschiedener Werkstücke und zur Erzeugung von Lackierfehlern galt es vorrangig, die entsprechenden Trocknertypen hinsichtlich ihrer Strömungs- und Temperaturverteilung zu charakterisieren. Hierzu wurden experimentelle Untersuchungen der Eingangs- und Randbedingungen in Verbindung mit den entsprechenden und vergleichenden numerischen Strömungssimulationen durchgeführt.

#### *HYGREX-Trockner*

Das Strömungsfeld im in Abb. 1 gezeigten HYGREX-Trockner wurde mittels Laser-Doppler Anemometrie bei unterschiedlichen Betriebsparametern vermessen und anschließend simuliert. Gemessen wurden die Geschwindigkeitsvektoren in X- und Y- Richtung an insgesamt 720 einzelnen Messpunkten, verteilt auf fünf Ebenen. Ein typisches Ergebnis der zugehörigen Simulation ist in Abb. 2 dargestellt.



**Abbildung 1 und 2: Hygrex-Trockner mit Laser-Doppler Optik und Ergebnis einer Simulation der Trocknerinnenströmung, dargestellt anhand von 5 parallelen Ebenen**

Eine weitergehende Verifikation der Strömung im Trockner sowie der Über-

einstimmung zwischen Messung und Simulation geschah anhand der Umströmung eines typischen Versuchsbleches. Die gewählte Anordnung ist in Abb. 3 dargestellt, wobei sich das Blech an einer definierten Position etwa mittig im Trockerraum befand.

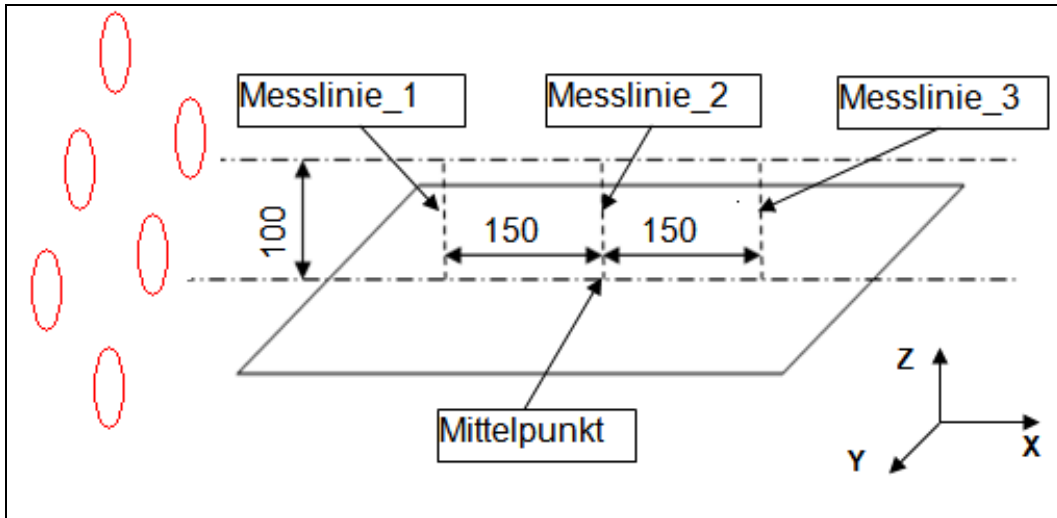


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Bestimmung der Ausbildung von Strömungsprofilen an Oberflächen

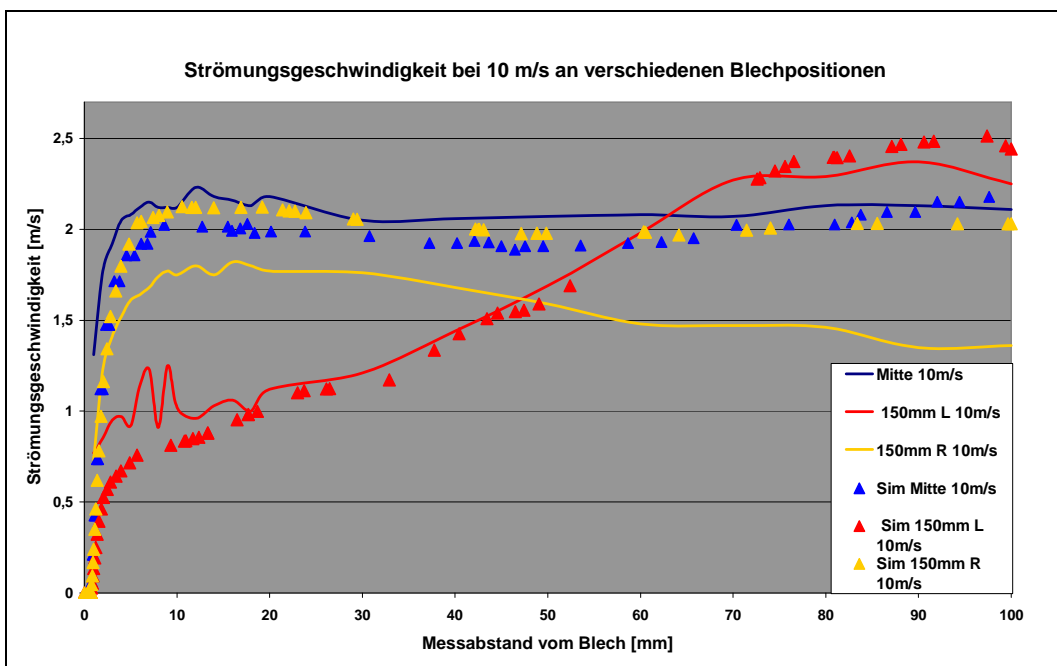


Abbildung 4: Vergleich der Ergebnisse aus LDA – Messung und numerischer Simulation bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 10m/s

In Abb. 4 sind gemessene und numerisch ermittelte Profile der mittleren Geschwindigkeit entlang der dargestellten Messlinien 1-3 verglichen. Es ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung mit Ausnahme der Messlinie 3. Mit Hilfe einer zusätzlichen instationären Simulation wurde festgestellt, dass die Strömung im Trockner hinter dem Versuchsblech zwei verschiedene Zustände einnehmen kann, was sich bei der Überströmung des Bleches besonders im hinteren Bereich bemerkbar machen wird. Während die



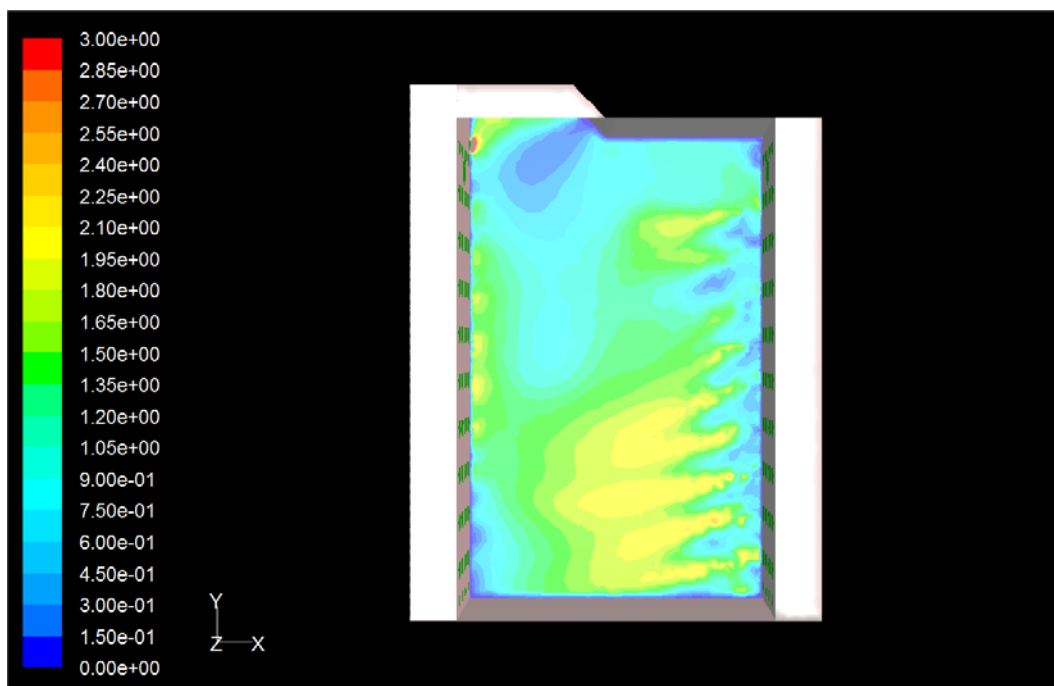
Simulation einer der beiden Zustände als Endresultat ausgibt, integriert eine Laser-Doppler-Messung über einen längeren Zeitraum und berechnet daraus einen zeitlichen Mittelwert, der in diesem Fall stärker von der Simulation abweichen wird

### *VÖTSCH-Trockner*

In zum HYGREX-Trockner analoger Weise wurde auch der 1,4 m<sup>3</sup> Kammertrockner der Fa. VÖTSCH vermessen und anschließend simuliert. Aufgrund der Trocknergröße kamen in diesem Fall Hitzdrahtanemometer zur Strömungsmessung zum Einsatz und es erfolgte eine Konzentration auf die Düseneinlassströmungen.

Abb. 6 zeigt das auf den gemessenen Eingangsbedingungen basierende Ergebnis der simulierten Trocknerinnenströmung. Es ist typisch für Industrietrockner, die im Normalfall kein homogenes Strömungsfeld liefern, da bereits die Düseneinlassströmungen größere örtliche Gradienten aufweisen.

Darüber hinaus wurde in der Simulation ein Bauteil eingebracht, das allerdings keine Beeinflussung im Bereich der Eingangsströmung verursachte. Mit anderen Worten: Mit den einmal gewonnenen Eingangsbedingungen können nahezu beliebige Werkstückumströmungen und –aufheizprozesse im Trocknerinneren simuliert werden.



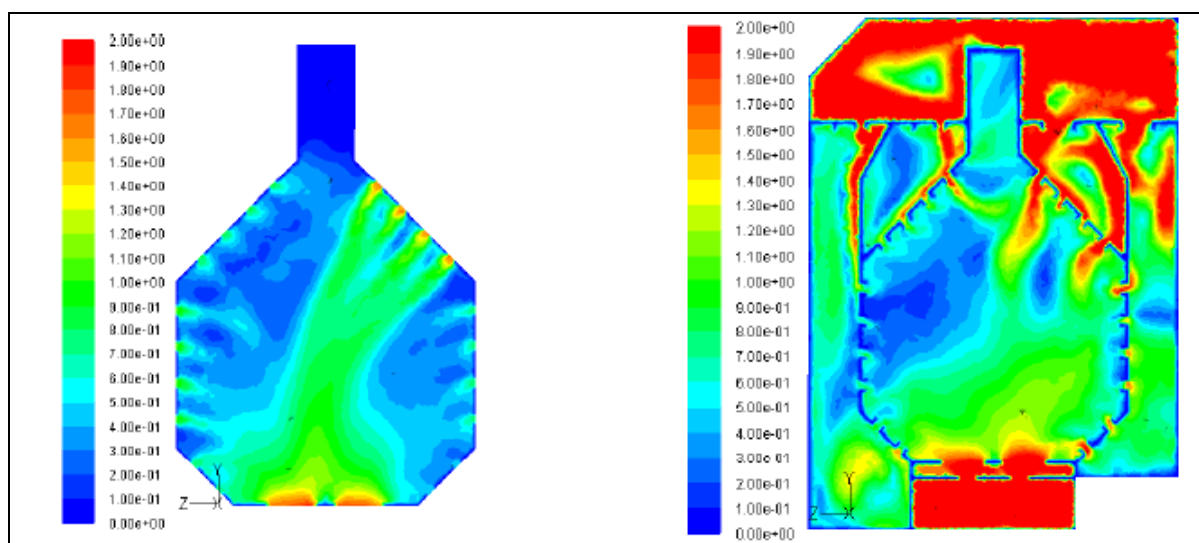
**Abbildung 6:** Darstellung der Simulation des Strömungsprofils im Trockner der Fa. Vötsch, basierend auf den ermittelten Messwerte

### *Eisenmann-Kammertrockner*

Als dritter wichtiger Trockner kam ein am Fraunhofer-IPA vorhandener Kammertrockner der Fa. Eisenmann zum Einsatz. Dieser ist in seinen Abmessungen so dimensioniert, dass damit Original-Automobilkarossen aufgeheizt und getrocknet werden können. Im Gegensatz zur Produktion handelt es sich allerdings um einen geschlossenen Kammertrockner ohne Bewegung des Werkstückes während des Trocknungsprozesses.

Während beim zuvor vorgestellten Trockner noch auf gemessene Eingangsdaten unmittelbar in der Zuströmung der Luft in den Trocknerraum zurückgegriffen werden

kann, muss bei diesem größeren und komplexeren Trockner der komplette Zu- und Abluftbereich mit berechnet werden, um auf ein der Messung ähnliches Ergebnis zu kommen. Insbesondere die unsymmetrische Geometrie der Zuluftanlage wirkt sich hier signifikant durch ein daraus resultierendes Ungleichgewicht des Strömungsfeldes zwischen der linken und rechten Trocknerseite aus. In der Praxis bedeutet dies, dass für eine sinnvolle und reproduzierbare Simulation der Aufheizung und Trocknung beliebiger Werkstücke in Industrietrocknern oder Trocknertunnels auf keinen Fall von idealen Zuströmbedingungen ausgegangen werden kann. Zumindest muss eine experimentelle Überprüfung durchgeführt werden; gegebenenfalls muss eine Trocknungssimulation auch Strömungsbereiche außerhalb des eigentlichen Trocknerraumes berücksichtigen.



**Abbildung 5 und 6: Darstellung der Simulation des Strömungsprofils im Trockner der Fa. Eisenmann, mit den gemessenen Eingangsbedingungen und 1,2 Millionen Zellen, sowie die Simulation des kompletten Trockners mit 3,2 Millionen Zellen**

### 2.3.3.2 Experimentelle Untersuchungen zum Aufheizen verschiedener Werkstückgeometrien

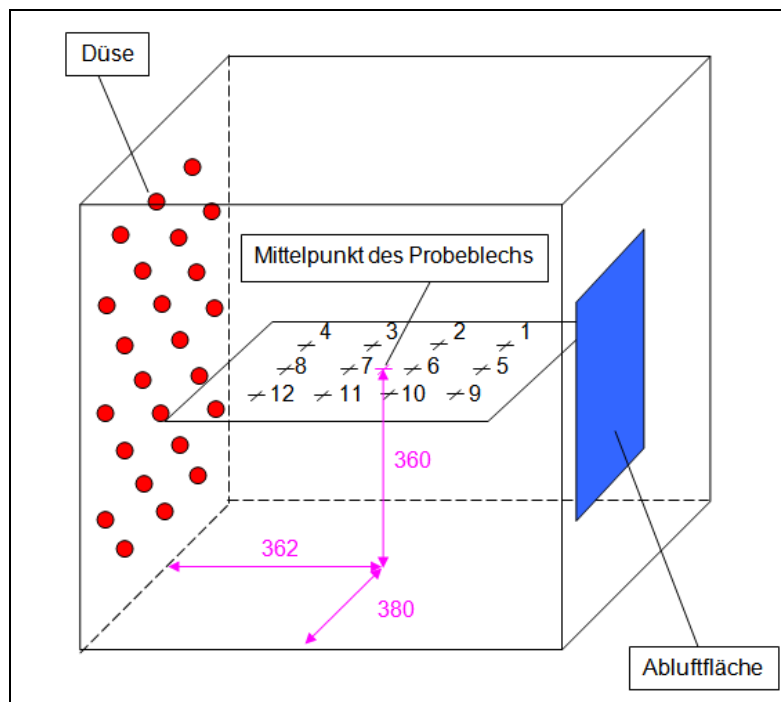
Im nachfolgenden Kapitel sind exemplarisch die verschiedenen experimentellen Untersuchungen zusammengefasst, die zur Verifikation der reinen Aufheizsimulation durchgeführt werden mussten. Die entsprechenden Simulationen sowie die individuellen Vergleiche zwischen Messung und Simulation finden sich in den entsprechenden Kapiteln des IFF.

#### *Aufheizverhalten ebener Bleche bei unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten und Konfigurationen*

Im Hygrex-Trockner wurde eine Vielzahl von Versuchen durchgeführt, um das Aufheizverhalten ebener Bleche in Funktion der Anordnung und der Strömung zu ermitteln. Untersucht wurden unter anderem die parallele Anströmung der Bleche durch die Düsen als auch die sogenannte Prallströmung, bei der die Bleche senkrecht vor den Düsen positioniert wurden. Hierfür wurde eine entsprechende Haltevorrichtung konstruiert, die auf der einen Seite die sich ausbildende Strömung im Innenraum so wenig wie möglich beeinflussen durfte, auf der anderen Seite aber über genug Stabilität verfügen musste, um ein KTL - beschichtetes Blech mit den

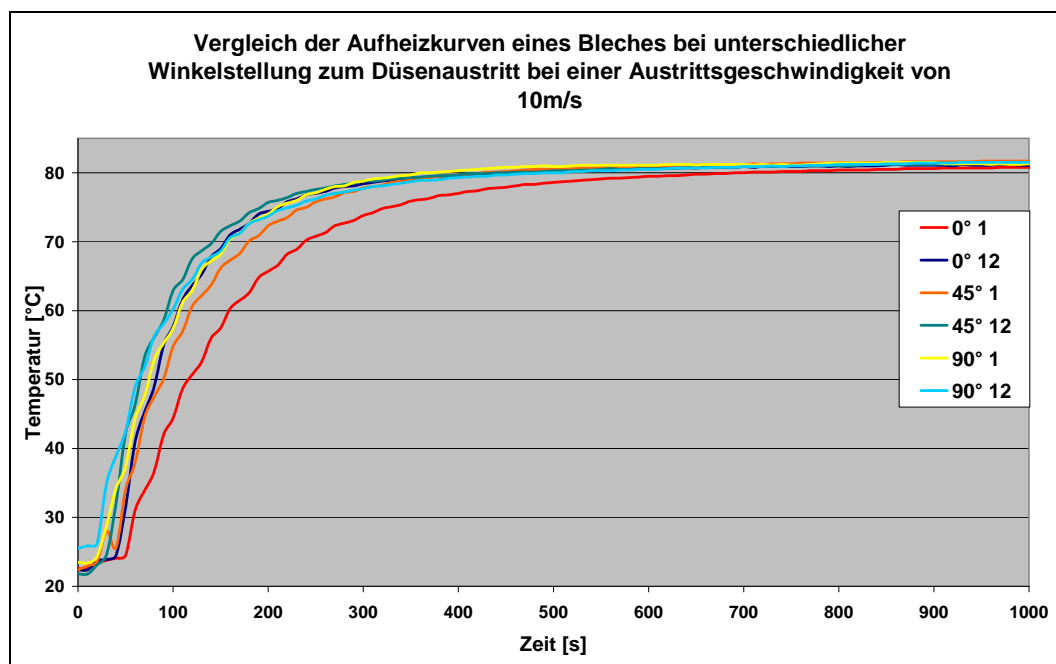
Abmessungen 500\*200\*1 selbst bei höheren Anströmgeschwindigkeiten sicher zu fixieren. Die Messung der Temperatur erfolgte normalerweise mittels 12 über die Blechoberfläche verteilter Thermoelemente, wobei teilweise Vorder- und Rückseite vermessen wurden.

In Abstimmung mit den numerischen Arbeiten am IFF wurden drei Einstellungen, d. h.  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  und  $90^\circ$  bezogen auf die Austrittsrichtung der Strömung, näher untersucht. Die Geschwindigkeiten betragen jeweils 5, 10 und 15 m/s. In Abbildung 7 ist die Position des Blechs für den Versuchsaufbau bei  $0^\circ$  dargestellt. Deutlich zu sehen sind die 12 Messpunkte auf dem Objekt. Die Darstellung zeigt, dass die Messpunkte 1, 5 und 9 die größte Distanz zur Düsenwand aufweisen.



**Abbildung 7: Schematische Darstellung der Versuchsanordnung im Trockner für laminare Anströmung**

In Abb. 8 ist exemplarischen der Vergleich des Aufheizverhaltens der Messpunkte 12 (Richtung Düsen) und 1 (düsenabgewandte Blechseite) in Abhängigkeit der Winkelstellung bei einer Anströmgeschwindigkeit von 10 m/s dargestellt. Deutlich ersichtlich wird die mit ansteigenden Winkeln abnehmende Differenz der Temperaturkurven der beiden Messpunkte. Während bei  $0^\circ$  Messpunkt 1 signifikant langsamer aufgeheizt wird als Messpunkt 12, verlaufen die Kurven bei  $90^\circ$  nahezu deckungsgleich.



**Abbildung 8: Vergleich der Aufheizkurven eines Bleches bei unterschiedlichen Winkelstellungen und einer Anströmgeschwindigkeit von 10 m/s**

#### *Aufheizverhalten bei Prallströmung*

Aufgrund der Modelle für den örtlichen Wärme- und Stoffübergang war es erforderlich, dann Fall der sogenannten Prallströmung, in dem die aus einer Düse ausströmende Luft mit relativ geringem Anstand senkrecht auf die Werkstückoberfläche trifft, getrennt zu untersuchen. Hierzu wurde der Abstand zwischen Düsenwand und Probeblech unter 90° Anordnung von 360 mm auf 160 mm verkleinert. Bei einem Düsendurchmesser von 32 mm entspricht dies einem Abstand von 5 Düsendurchmessern, d.h. der Freistrahlscharakter sollte noch vollständig erhalten sein.

Das Ergebnis des Vergleiches der beiden Abstände (jeweils 90°-Anordnung) ist in Abb. 9 für zwei Messpunkte aufgezeigt. Eine Verkürzung des Abstandes zum Düsenfeld bewirkt ein deutlich schnelleres Aufheizen eines Objektes, was sich in den höheren Aufheizgradienten abzeichnet. In der numerischen Simulation wurde eine entsprechende Anpassung für den Wärme- und Stoffübergang bei Prallstrahlströmung eingeführt, woraus letztendlich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation resultierte.

#### *Aufheizverhalten eines mit Dämmmatten hinterlegten Blechs*

Stellvertretend für eine Reihe von Materialien, die im Karosseriebau Verwendung finden, wurde der Einfluss einer eingelegten Akustik-Dämmmatte auf das lokale Aufheizverhalten in diesem Bereich untersucht. Die gewählte Anordnung einschließlich der Lage der Thermoelemente ist in Abb. 10 dargestellt. Um möglichst alle interessanten Bereiche messtechnisch erfassen zu können, wurden sowohl Vorder- und Rückseite der Dämmmatte, als auch die Grenzfläche zum Blech sowie die umliegenden, nur mit Lack beschichteten Bereiche des Grundbleches mit



zwischen Blech/Dämmmatte und auf der Rückseite der Dämmmatte nahezu identisch sind, kann man von einem primär kapazitiven Einfluss des Materials ausgehen. In der Simulation (siehe Bericht IFF) war es daher möglich, die Aufheizung in solchen Bereichen mit mittleren Werten für die Wärmekapazität und die Wärmeleitung zu beschreiben.

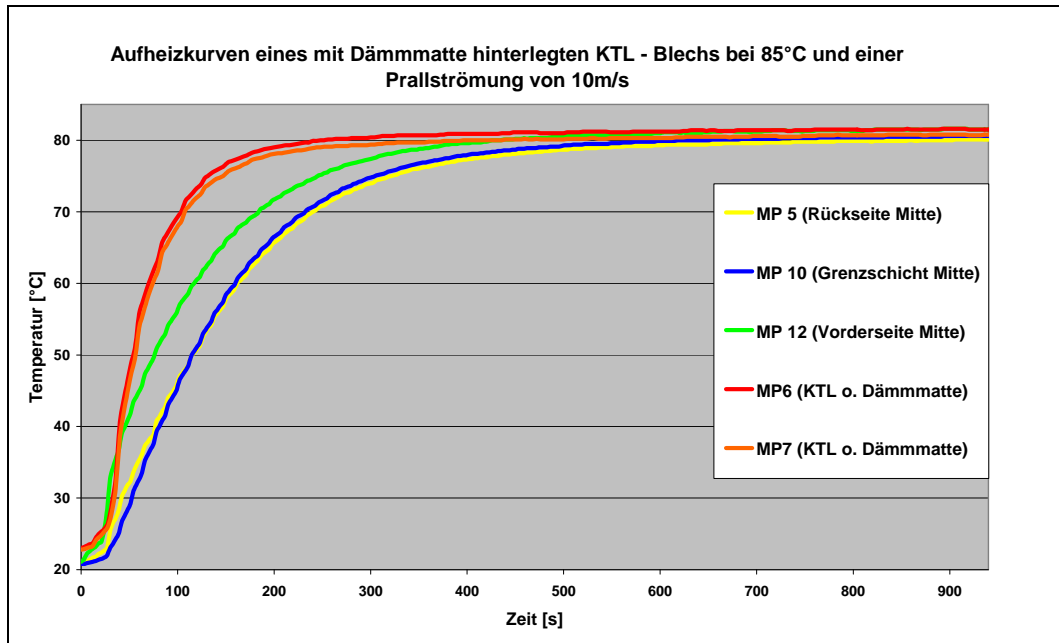


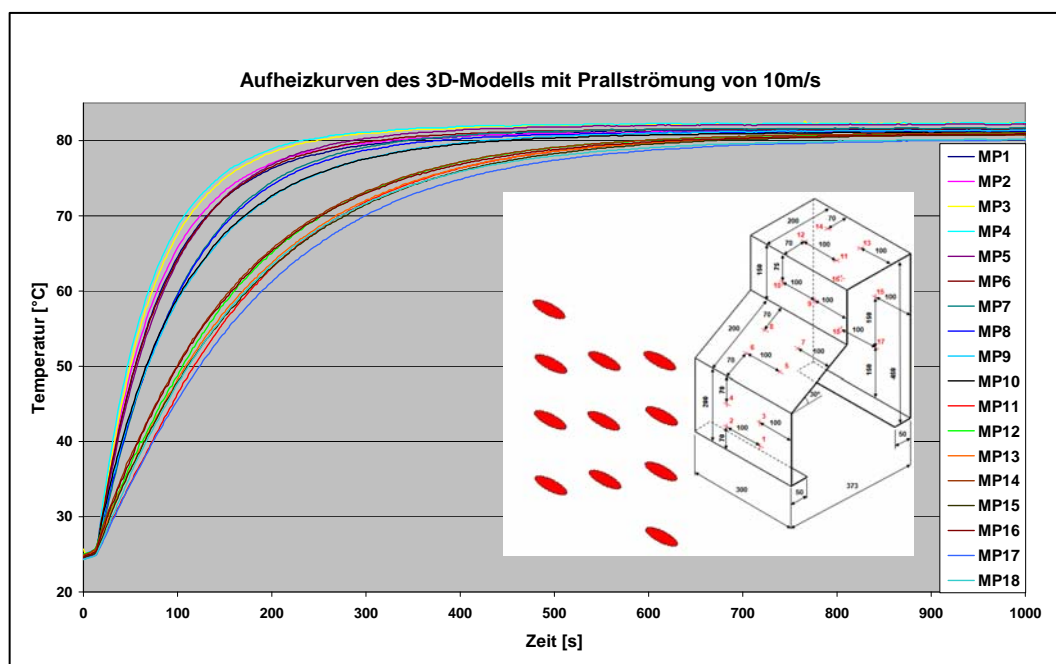
Abbildung 11: Vergleich der Aufheizkurven eines Bleches mit und ohne Akustik – Dämmmatte

#### Aufheizverhalten eines vereinfachten Lkw- Führerhauses

Aufbauend auf den guten Erfahrungen der Versuche im HYGREX-Trockner mit ebenen Blechen wurde ein vereinfachtes dreidimensionales Modell eines Nutzfahrzeug-Führerhauses gefertigt und an insgesamt 18 Stellen mit Thermoelementen versehen.

Durch die Form entstehen vielfältige Strömungsbedingungen, einschließlich der bereits diskutierten Prallströmung im vorderen, den Düsen zugewandten Bereich des Führerhauses. Das andere Extrem bilden die Bereiche innerhalb der Geometrie, die relativ stark von der Strömung abgeschirmt sind und daher nur niedrige mittlere Geschwindigkeiten erfahren. Insgesamt ergeben sich die für die Überprüfung der numerische Simulation wichtigen und sinnvollen örtlich stark variierenden Strömungsbedingungen.

Abb. 12 zeigt die gesamte Messanordnung einschließlich der Lage der Thermolemente sowie ausgewählte Temperaturkurven bei einer Düsenauslassgeschwindigkeit von 10 m/s und einer Trocknertemperatur von 80° C. Erwartungsgemäß heizen sich die der Düsenwand zugewandten ebenen Flächen am schnellsten auf, da hier der konvektive Wärmeübergang aufgrund der hohen Anströmgeschwindigkeiten maximiert wird. Analog hierzu ist der Wärmeeintrag in den waagrechten Flächen sowie der düsenabgewandten Rückseite am geringsten. In der Summe unterscheiden sich damit die Aufheizeiten um den Faktor 2, was in der Praxis für den Erfolg des Lackeinbrennprozesses entscheidend sein kann.



**Abbildung 12: Anordnung der Thermoelemente am Modell und gemessene Aufheizkurven**

#### *Aufheizverhalten eines Lkw- Chassis- Ausschnitts im Eisenmann-Kammer*

Speziell um den Einfluss hoher Wandstärken bis 20 mm sowie weiterer Materialansammlungen z. B. in Form von Schweißnähten zu untersuchen, wurde im Eisenmann-Kammertrockner ein Ausschnitt eines LKW-Chassis aufgeheizt.

Den Aufbau des Bauteils, für das eine entsprechende CAD-Geometrie vorlag, ist in Abb. 13 zusammen mit dem Trockner dargestellt. Insgesamt wurden 23 Thermoelemente in spiegelsymmetrischer Anordnung auf dem Objekt angebracht. Die asymmetrische Lage des Bauteils im Trockner ergab sich infolge der vorhandenen Halterungen am Werkstück und der Fördererkonstruktion. Dies stellte jedoch keine Einschränkung für die numerischen Simulationsrechnungen dar, da aufgrund der bereits diskutierten komplexen Strömung im Trockner immer der komplette Trockner einschließlich der Zuströmgeometrie berechnet werden musste.

Aus den gemessenen Aufheiz- und Abkühlkurven in Abb. 14 ist deutlich zu erkennen, dass bei einer Trocknertemperatur von 90° C, dies entspricht den Bedingungen in der Lackierpraxis bei diesen Bauteilen, die Werkstücktemperatur in Bereich besonders massive Teile auch nach 40 min noch wesentlich darunter liegt. Im dargestellten Fall ergibt sich eine minimale Maximaltemperatur von lediglich 75° C, was in aller Regel zu niedrig für eine ausreichende Vernetzung des Lacksystems sein dürfte.



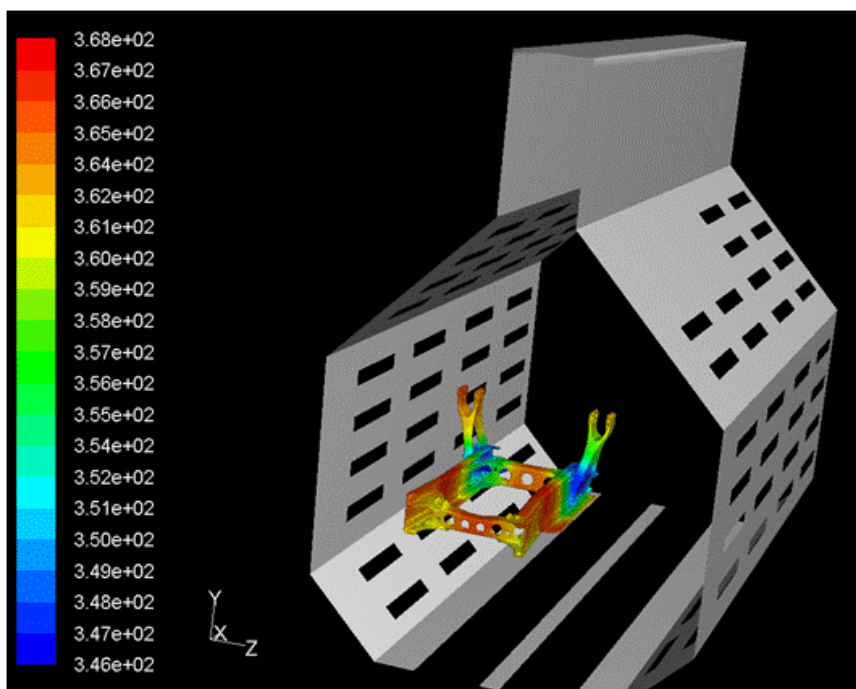


Abbildung 13: Positionierung des Chassis – Ausschnitts im Eisenmantrockner

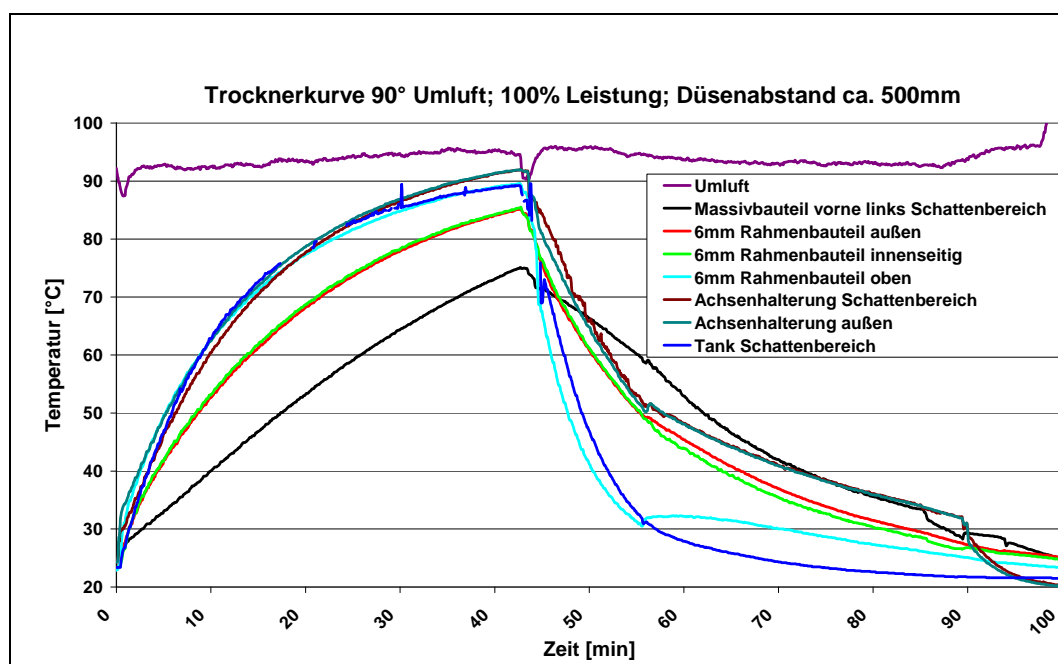


Abbildung 14: Aufheizkurven des Chassis – Ausschnitts bis zum Erreichen der 70°C der Massivbauteile im Schattenbereich

#### *Aufheizverhalten einer Golf V – Karosserie im Eisenmann-Kammertrockner*

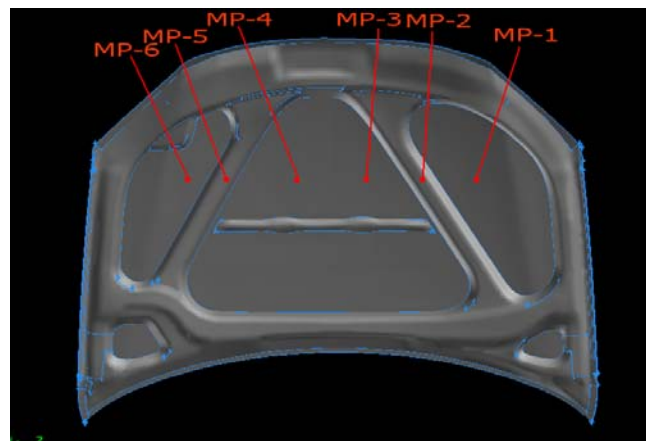
In einem abschließenden Versuch zur reinen Aufheizung komplexer Werkstücke ohne Lackschicht wurde ebenfalls im Eisenmann -Trockner eine komplette Automobilkarosserie des Typs VW Golf V aufgeheizt. Dieses Beispiel wurde gewählt, da VW als Projektpartner eine Rohkarosserie einschließlich der für die Simulationsrechnungen erforderliche CAD-Geometrie zur Verfügung stellen konnte. Wie in Kapitel 4.5 bereits erwähnt diente dieser Versuchsaufbau zum Sammeln von



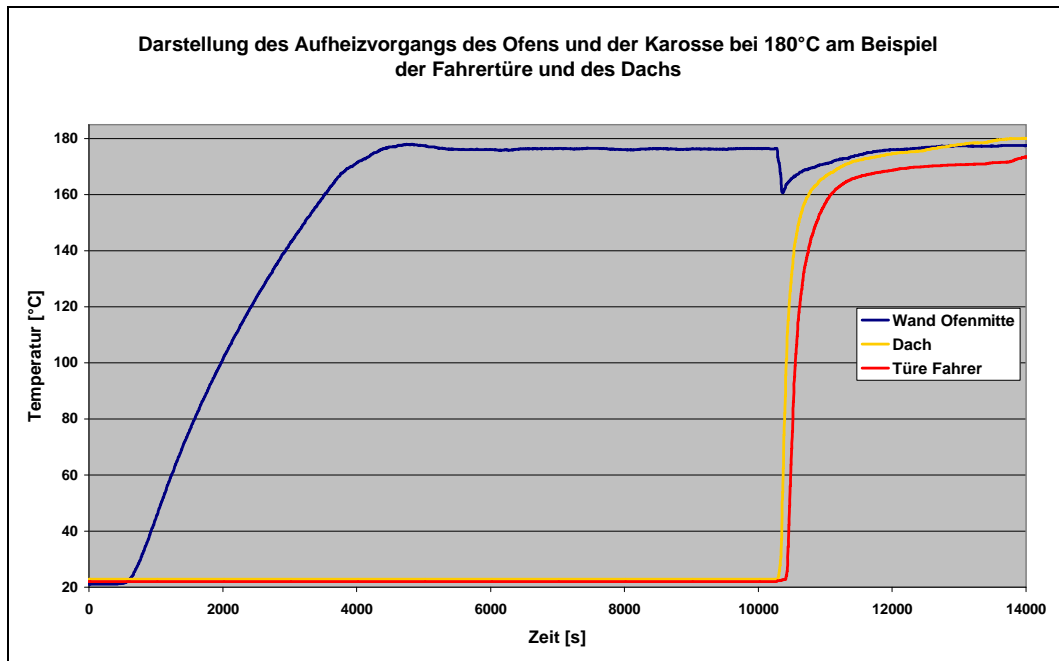
Erfahrungen in Hinblick auf die Beschreibung des Aufheizverhaltens ganzer Karossen.

Für diese Untersuchung wurden insgesamt 3 komplette Aufheizversuche durchgeführt, zwischen denen die vorhandenen 36 Messfühler und –datenkanäle jeweils neu positioniert wurden. Insgesamt ergaben sich somit mehr als 100 verschiedene Meß-stellen, die über die gesamte Karosse einschließlich der Einstiegsbereiche und der Innenräume verteilt wurden. Dabei wurde auf eine spiegelsymmetrische Anordnung geachtet. Die Meßstellen wurden vermessen und in die CAD-Darstellung übernommen.

Abb. 15 zeigt im Detail die Lage der Thermoelemente auf der Unterseite der Kühlerhaube anhand des CAD – Ausschnittes. Die entsprechenden experimentellen Ergebnisse einschließlich des Vergleiches zwischen Messung und Simulation finden sich im Berichtsteil des IFF. Ein grundlegendes Problem dieser Art von Experimente ist in Abb. 16 skizziert. Aufgrund der für das Einbringen der Karosse erforderlichen Öffnung des Trocknertores kommt es zu einer kurzfristigen deutlichen Absenkung der Trocknerumlufttemperatur, im dargestellten Fall etwa um 20 ° C. Andererseits erfolgte der Temperaturanstieg der Karosse nach Einbringen in den Ofen an den beiden dargestellten Positionen (einfache Bleche im Tür- und Dachbereich ohne Fälze) sehr rasch. Für diese erste Phase der Aufheizung ergeben sich somit zeitabhängige Randbedingungen, die in einer stationären Simulationsrechnung nicht berücksichtigt werden können.



**Abbildung 15: Darstellung der Verteilung der Messpunkt auf der Unterseite des Motorraumdeckels**



**Abbildung 16:** Darstellung des Aufheizverhaltens der Karosserie und der Innentemperatur im Kammertrockner exemplarisch an zwei Messpunkten

### 2.3.3.3 Entwicklung eines Modells zur Vorhersage von trocknungsbedingten Lackierfehlern

#### *Betrachteter Prozess und gewähltes Vorgehen:*

Eine zentrale Aufgabe der Arbeiten der Hochschule Esslingen im Rahmen des Forschungsprojekts lag in der Entwicklung eines Modells zur Vorhersage von durch die Trocknung bedingten Lackierfehlern. Dieses Modell soll dann in das vorhandene Simulationsprogramm eingearbeitet werden und eine Abschätzung des vorhandenen Fehlerpotentials in Abhängigkeit vom berechneten Trocknungsverlauf erlauben.

Die Untersuchungen in diesem Arbeitspaket fanden im Technikum des Fraunhofer IPA unter Verwendung des Hygrex-Trockners statt. Für den betrachteten Decklackprozess in der Automobillackierung mussten die in Tab. 1 aufgelisteten Parameter eingehalten werden. Als Basislack kam der für die gesamten Untersuchungen verwendete Modelllack auf PU-Basis zum Einsatz.

Basislackapplikation	Modelllack, ca. 12-14 $\mu\text{m}$	ESTA Applikation
Ablüften	5 min	Kabinentemperatur (20° C)
Zwischentrocknung	ca. 10 min	verschiedene Temperaturen
Klarlackapplikation	2-K System, ca. 35 $\mu\text{m}$	Pneumatische Applikation
Decklacktrocknung	ca. 20 min	140° C

**Tabelle 1: Prozessparameter beim Decklackauftrag**

Die im Weiteren dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf die Variation der Parameter der Zwischentrocknung. Aus der Praxis ist bekannt, dass sich diese

Parameter signifikant auf die Qualität des Lackaufbaus nach der abschließenden Decklacktrocknung auswirken. Im Besonderen trifft dies auf die sogenannten Nadelstiche (engl.: Pinholes) zu. Es handelt sich dabei um kreisrunde Vertiefungen im Klarlack, die bis zum darunterliegenden Basislack reichen.

Abb. 17 zeigt eine Fotografie und eine dreidimensionale Darstellung eines in den vorliegenden Untersuchungen erzeugten Pinholes. Der Durchmesser beträgt hier ca. 60  $\mu\text{m}$ . Signifikant für diesen Lackierfehler ist der abgeflachte „Fuß“, der für eine Störung bis zum darunterliegenden Füller spricht.

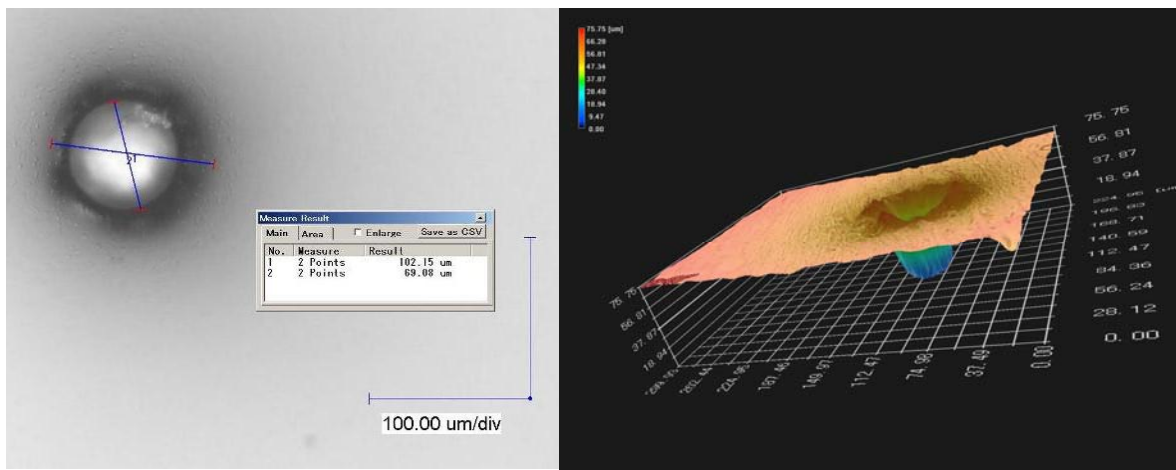


Abbildung 17: Aufnahmen eines Pinholes in 2D und 3D

Man geht davon aus, dass Pinholes durch das Ausdampfen von Restlösemitteln aus dem Basislack und/oder durch im Basislack vorhandene Luftblasen, die bei der Decklacktrocknung zerplatzen, entstehen. Unstrittig ist dabei, dass die Parameter bei der Zwischentrocknung eine wichtige Rolle spielen.

Ausgehend von diesem Kenntnisstand wurde mit Hilfe des Programmes MINITAB zur statistischen Versuchsplanung eine Reihe von Versuchsplänen ausgearbeitet, durchgeführt und ausgewertet. Zu berücksichtigen waren die beiden in der Praxis angewandten unterschiedlichen Methoden der Zwischentrocknung, zum einen die konventionelle Zwischentrocknung mit erhöhten Lufttemperaturen bis ca. 80° C, zum anderen die sogenannte Niedertemperaturtrocknung, bei der die Trocknerluft bei Temperaturen bis ca. 40° C zusätzlich getrocknet wird.

Die untersuchten Standardbedingungen für die beiden Trocknungsprozesse sind in Tab. 2 zusammengefasst. Es handelte sich jeweils um sogenannte zentral zusammengesetzte Versuchspläne mit Wiederholversuchen, wodurch jeder Versuchsplan aus 20 Versuchen bestand.

	Konvent. Vortrocknung	Niedertemperaturtrocknung
Temperatur [°C]:	40 – 48 – 60 – 72 – 80	25 – 29 – 35 – 41 – 45
Strömungsgeschwindigkeit [m/s]:	8 – 10 – 12,5 – 15 – 16,5	8 – 10 – 12,5 – 15 – 16,5
Luftfeuchte [g/kg]:	4,4 – 6 – 10 – 14 – 16	3,8 – 4 – 5 – 6 – 6,2

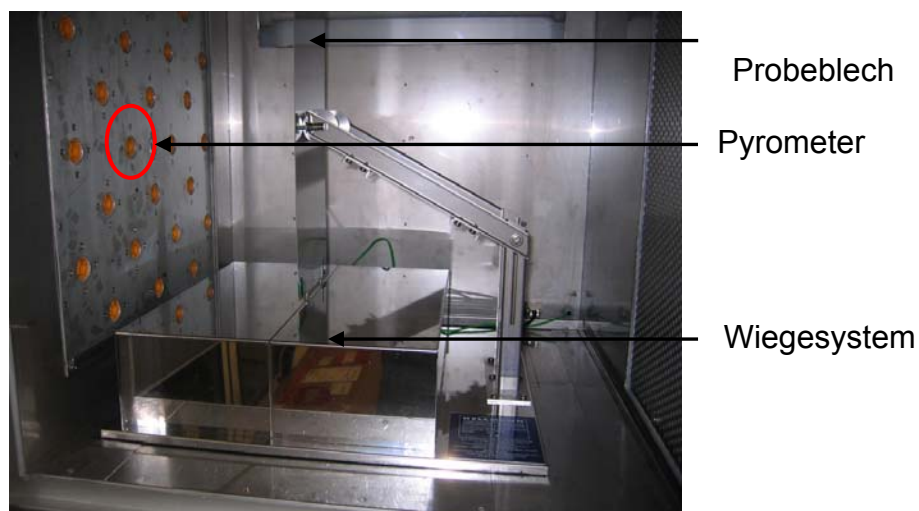
Tabelle 2: Parameter der Versuchspläne für die entsprechenden Trocknungsprozesse

Ausgehend von bereits vorhandenen Erfahrungen der industriellen Partner sowie der

TTD Darmstadt wurden folgende Messverfahren eingesetzt:

- On-line Aufnahme des momentanen Gewichtes des lackierten Bleches mittels eines speziellen Wiegesystems und einer thermisch isolierten Waage
- On-line Erfassung der Temperatur der Lackoberfläche in der Blechmitte mittels Pyrometer Fallweise zusätzlich aufgebrachte Thermoelemente auf der unlackierten Blechrückseite
- Off-line Messung der Lackzusammensetzung mit Hilfe der thermogravimetrischen Analyse und der Gaschromatographie. Hierzu wurden nach der Applikation, nach der Abdunstung und nach der Zwischentrocknung Lackproben vom Blech abgenommen.

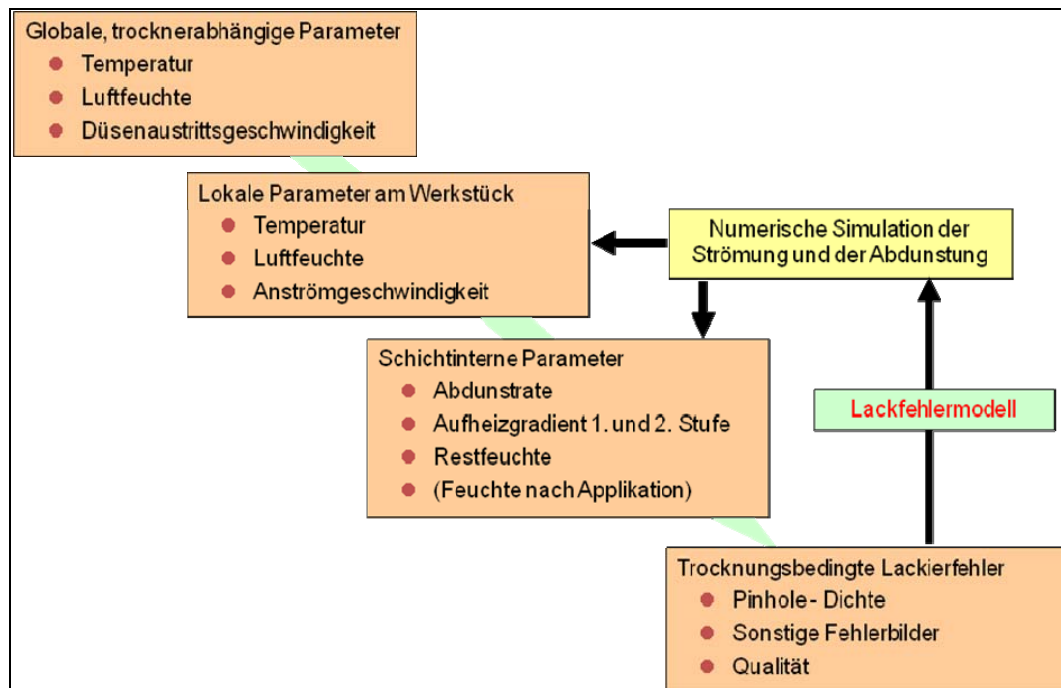
Die Anordnung des Bleches im Trockner, die Ausführung des Wiegesystems und die Lage des Pyrometers sind in Abb. 18 dargestellt.



**Abbildung 18:** Darstellung des Wiegesystems im Hygrex – Trockner; links in der Wandmitte das Pyrometer

In Abb. 19. wurde versucht, die Zusammenhänge bei der Modellbildung zu erläutern. Insgesamt kann man 3 Gruppen von Trocknungsparametern definieren, welche auf die Bildung von Nadelstichen Einfluss nehmen. In der ersten Gruppe handelt es sich um globale, trockenereigene Parameter wie Temperatur, Luftfeuchte oder Düsen Eintrittsgeschwindigkeit. Lokale, ortsabhängige Variationen der Fehlerwahrscheinlichkeit können damit allerdings nicht dargestellt werden. Dies wird erst durch Verwendung örtlicher Parameter wie z.B. der Luftgeschwindigkeit an der Werkstückoberfläche möglich. Diese Luftgeschwindigkeit muss aus der durchgeführten Simulation der Trocknerströmung herausgelesen werden.

Weitere Ergebnisse der Simulation stellen die lackschichtinternen Größen wie Abdunstrate oder Aufheizgradienten dar. Diese bieten die Chance, in noch stärkerem Maße die ablaufenden physikalischen Prozesse, die zur Nadelstichbildung bei der Trocknung führen, verstehen zu lernen. Das grundsätzliche Vorgehen in den beiden letztgenannten Fällen ist jedoch das Gleiche: Die sich in der instationären Prozesssimulation ergebenden Parameter müssen abgespeichert werden, um im Nachgang daraus die örtliche Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Lackschichtfehlern berechnen zu können. Im Weiteren werden lediglich Modelle diskutiert, die sich auf örtliche Parameter abstützen und damit universell verwendet werden können.



**Abbildung 19: Einflussparameter und Positionierung des Lackfehlermodells**

Dabei muss grundsätzlich zwischen der konventionellen Trocknung und der Niedertemperaturtrocknung mit entfeuchteter Luft unterschieden werden. Wie in Abb. 20 anhand eines typischen Beispiels dargestellt, entsteht bei der konventionellen Trocknung ein sogenannter zweistufiger Trocknungsprozess, bei der sich in der ersten Stufe eine annähernd konstante Abdunstrate einstellt, während sich in der daran anschließenden zweiten Stufe durch die Begrenzung des Stofftransportes in der Schicht ein örtlicher Temperatur- und gegebenenfalls auch ein Stoffgradient einstellt. Bei der konventionellen Trocknung ist daher zwischen den Temperaturgradienten der beiden Phasen zu differenzieren.

#### *Ergebnisse zur Niedertemperatur - Vortrocknung*

Auf der Basis der zuvor diskutierten Ansätze wurden mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung eine Reihe von Modellen formuliert und analysiert. Grundlegende Qualitätsparameter waren dabei der Korrelationskoeffizient zwischen Modell und Messung sowie die statistische Signifikanz der einzelnen Modellparameter. Aus der Vielzahl von Modellen hat sich im Falle der Niedertemperaturtrocknung ein relativ einfacher, linearer Zusammenhang zwischen der Pinhole-dichte  $f(p)$  in  $1/m^2$  und dem aus der entsprechenden numerischen Simulation berechneten maximalen Aufheizgradienten  $\Delta\vartheta/\Delta\tau$  in  $K/s$  ergeben:

$$f(p) = -987,28 + 249,64 \cdot (\Delta\vartheta/\Delta\tau)$$

Die Übereinstimmung zwischen Modell und Messungen ist in Abb. 21 dargestellt. Wie auch noch nachfolgend für den Fall der konventionellen Trocknung diskutiert wird, erbrachte die Analyse der gemessenen Restfeuchte des Basislackes nach der Zwischentrocknung keinen direkten Zusammenhang mit dem Auftreten von Nadelstichen. Dies widerspricht der gängigen Meinung verschiedener Anwender, dass bei einer erhöhten Restfeuchte des Basislackes vor der abschließenden

Decklacktrocknung die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Pinholes ansteigt. Allerdings ist darauf hinzuweisen, dass die Messungen lediglich eine mittlere Restfeuchte aufzeigen. Eine eventuell entstandene Hautbildung des Basislackes (Verhinderung eines weiteren diffusiven Massenstromes aus unteren Bereichen der Basislacksschicht) kann damit nicht erkannt werden.

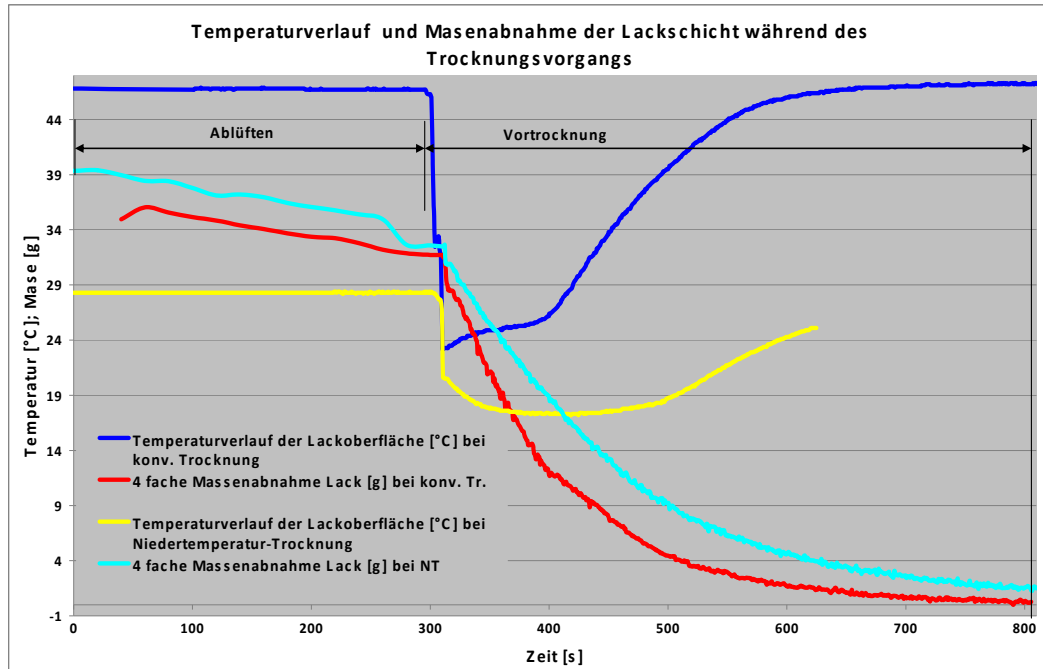


Abbildung 20: Verlauf der Massenabnahme vom Ablüften bis zum Ende der Zwischentrocknung gegenüber dem zweistufigen Temperaturverlauf (Lösemittelabdunstung) an der Lackoberfläche bei konventioneller Trocknung und Niedertemperatur-Trocknung

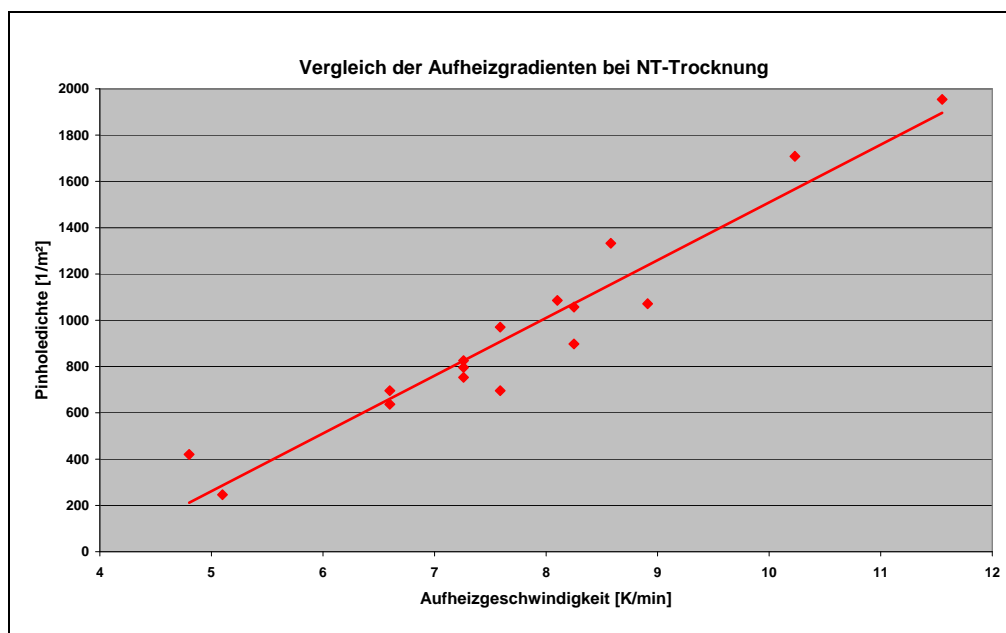


Abbildung 21: Modell für die Pinhole-Dichte in direkter Abhängigkeit des Aufheizgradienten

### *Ergebnisse zur konventionellen Zwischentrocknung*

Bei der konventionellen Zwischentrocknung wird mit normalen relativen Luftfeuchten und erhöhten Lufttemperaturen bis ca. 80° C gearbeitet. In diesem Fall stellt die Temperaturdifferenz den Treiber für Wärme- und Stoffübergang dar.

Analog zur Auswertung der Versuchsreihe bei Niedertemperatur – Trocknung mit teilentfeuchteter Luft werden im Folgenden lediglich Ergebnisse bezüglich der Modelle unter Verwendung der örtlichen bzw. schichtinternen Parametern vorgestellt. Es handelt sich dabei zum einen um die lokale Geschwindigkeit der Luft, zum anderen um den Aufheizgradienten in der Schicht. Wie bereits diskutiert, kann in diesem Fall zwischen den Aufheizgradienten in der ersten und zweiten Trocknungsphase unterschieden werden. Darüber hinaus gibt es auch Aussagen aus der Praxis, dass insbesondere der Aufheizgradient in den ersten 100 s Trocknungszeit entscheidend für das Auftreten von Nadelstichen ist.

Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass unter den genannten Alternativen das Modell, welches sich auf den 2. Aufheizgradienten abstützt, die beste Vorhersagegüte aufweist. Im Gegensatz zur Niedertemperaturtrocknung sind in diesem Fall die globale Luftfeuchte sowie verschiedene Wechselwirkungen ebenfalls signifikant. In die nachfolgende Gleichung sind der Aufheizgradient in  $K/s$ , die lokale Geschwindigkeit in  $m/s$  und die absolute Luftfeuchte in  $g/kg$  einzusetzen.

$$f(p) = 24,7132 + 29,1613 \cdot (\Delta\theta/\Delta t) - 545,089 \cdot (v_{lok}) + 29,6248 \cdot X + 481,381 \cdot (v_{lok})^2 - 0,820482 \cdot (\Delta\theta/\Delta t)^2 - 1,15395 \cdot (x)^2 + 5,98660 \cdot [(\Delta\theta/\Delta t) \cdot v_{lok}] + 0,949253 \cdot [(\Delta\theta/\Delta t) \cdot x] - 43,4554 \cdot (v_{lok} \cdot x)$$

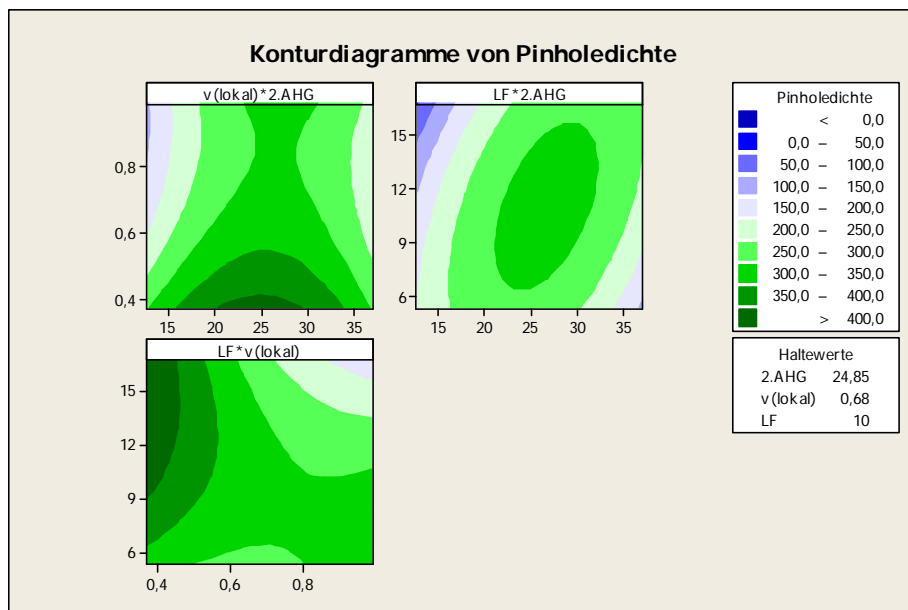
Die Abhängigkeit der Pinholedichte von den genannten 3 Trocknungsparametern ist in Form von Konturen in Abb. 22 dargestellt. Das Modell zeigt tendenziell eine maximale Wahrscheinlichkeit von Pinholes im mittleren Bereich des Aufheizgradienten und eher moderaten Luftgeschwindigkeiten. Eine erhöhte Luftfeuchte führt zu einer Verstärkung der Pinholebildung. Bei einem Korrelationskoeffizient von 0,85 entstehen bei diesem Modell maximale Abweichung von  $\pm 10\%$  zwischen vorhergesagter und tatsächlicher, experimentell ermittelter Pinholedichte.

### *Einfluss weiterer Schichtparameter*

Aufgrund von Erfahrungen aus der Praxis wurde wiederholt vermutet, dass die Restfeuchte des Basislackes am Ende der Zwischentrocknung, d.h. vor dem sich daran anschließenden Klarlackauftrag erkennbaren Einfluss auf die Beobachtung von Nadelstichen nach der Decklacktrocknung besitzt. Restlösemittel bzw. –wasser aus dem Basislack wird durch die hohen Temperaturen im Decklacktrockner ausgetrieben und muss durch die darüber befindliche Klarlackschicht diffundieren. Je nach Trocknungszustand des Klarlackes könnten dabei bleibende Fehler im Klarlack entstehen.

Zur Untersuchung dieses Einflusses wurden daher, wie bereits diskutiert, nach der Zwischentrocknung Lackproben entnommen und mittels Thermogravimetrie bzw. Gaschromatographie der Lösemittelgehalt bzw. die Zusammensetzung gemessen. Allerdings konnte daraus kein statistisch abgesichertes Modell abgeleitet werden. In ähnlicher Weise gilt dies übrigens auch für die Restfeuchte nach der Applikation, d. h. vor der Zwischentrocknung, die ebenfalls untersucht wurde.





**Abbildung 22:** Ergebnisflächen für die Pinholeichte in Funktion des 2. Aufheizgradienten, der örtlichen Luftgeschwindigkeit und der globalen absoluten Luftfeuchte

### Weitergehende Modellverifizierungen

Bis zu diesem Punkt wurden lediglich für das jeweilige Versuchsblech integrale Werte diskutiert, d.h. es wurde von konstanten, örtlich invarianten Trocknungsbedingungen ausgegangen. Diese Annahme wurde auch dadurch verifiziert, dass bei der Identifikation und Auszählung der Pinholes keine örtliche Konzentration beobachtet werden konnte, zumal bei einem Abstand von 360 mm zwischen Düsenwand und Blech der Einfluss der einzelnen Freistrahlen bereits signifikant abgeklungen ist. Zur Überprüfung dieser Annahme wurde eine Düse soweit verlängert, dass der Abstand noch 150 mm betrug. Dadurch ergab sich nicht nur die Ausbildung eines lokal auf die Blechoberfläche auftreffenden Freistrahles (Prallstrahl), sondern auch insgesamt eine Erhöhung der durchschnittlichen lokalen Anströmgeschwindigkeit über dem Blech um den Faktor 3.

Beim durchgeführten statistischen Versuchsplan mit konventionellen Trocknungsbedingungen wurde im Prinzip das zuvor vorgestellte Modell bestätigt. Darüber hinaus konnte auch in diesem Fall keine örtlich erhöhte Pinholekonzentration beobachtet werden, obwohl es aus der Praxis entsprechende Berichte gibt. Zu beachten ist an dieser Stelle die Versuchsblechgröße, die bezüglich der Statistik sehr einschränkt.

In einer weiteren Versuchsreihe wurde der Einfluss wechselnder Anströmbedingungen untersucht, wie sie in der Praxis bei der Bewegung eines Werkstückes durch einen Durchlauftrockner entsteht. Der verwendete Hygrex-Trockner bot dabei die Möglichkeit, die Strömungsgeschwindigkeit zwischen zwei Stufen, jeweils mit einer Periodendauer von 76 s, zu variieren. Es wurden verschiedene Geschwindigkeitsstufen getestet, wobei in Abb. 23 beispielhaft der gemessene Temperaturverlauf bei der Taktung zwischen 15 und 20 m/s mit den Verläufen bei jeweils konstanten Düseneinlassgeschwindigkeiten auf niedriger und hoher Stufe verglichen wird. Es wird deutlich, dass in diesem Fall in der ersten Trocknungsphase die Temperatur genau zwischen den beiden konstanten



Betriebsbedingungen liegt, während in der zweiten Trocknungsphase der durch die höhere Einlassgeschwindigkeit größere Aufheizgradient überwiegt. Dieses Ergebnis ist dann relevant, wenn mittels einer stationären Simulation die Trocknung in einem Durchlauftrockner berechnet werden soll. In dieser Situation sind für die Entstehung von Lackierfehlern die Bereiche mit hoher Strömungsgeschwindigkeit zu betrachten.

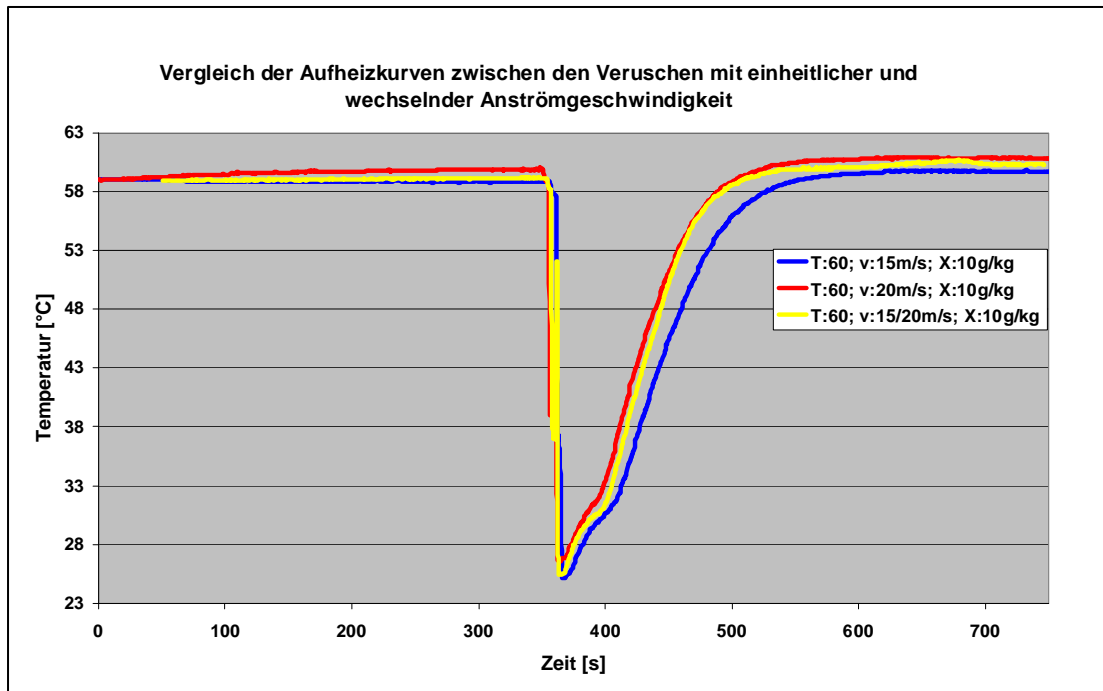


Abbildung 23: Vergleich der Aufheizkurven bei konstanter und wechselnder Anströmgeschwindigkeit

#### *Einfluss der Applikationsparameter*

Bei allen bisherigen Versuchsreihen in der Vergangenheit wurde der Basislack mit einem sogenannten ungerändelten Glockenteller (Durchmesser 55 mm) appliziert, was nach allgemeinem Informationsstand die Pinholebildung begünstigt. Die gewählte Drehzahl betrug 50 000 1/min, die Farbmenge 300 ml/min.

In einer abschließenden Versuchsreihe wurden diese Applikationsparameter systematisch variiert, um deren Einfluss auf das Auftreten von Nadelstichen zu quantifizieren. Folgende Variationen wurden durchgeführt:

	Standard	Modifikation
Glocke	ungerändelt	Gerade Rändelung
Drehzahl	50 000 1/min	40 000 – 60 000 1/min
Farbmenge	300 ml/min	300 – 500 ml/min

Tabelle 3: Untersuchte Variationen der Applikationsparameter

Die übrigen Prozessparameter wie Trocknungszeiten oder Klarlackapplikation

blieben dagegen unverändert. Aus den erhaltenen Ergebnissen lassen sich folgende Schlussfolgerungen formulieren:

1. Den größten Einfluss auf die Entstehung von Nadelstichen besitzt die Glockentellergeometrie. Mit gerändeltem Glockenteller wurden bei ansonsten identischen Applikationsparametern deutlich weniger Nadelstiche beobachtet. Der Grund hierfür ist allerdings unklar. Die durchgeführten Messungen der Restfeuchte nach der Zwischentrocknung ergaben im Rahmen der Messgenauigkeit keine signifikanten Veränderungen.
2. Die Nadelstichhäufigkeit nimmt mit höherer Glockendrehzahl und niedrigerer Farbmenge reproduzierbar ab. In Extremfällen konnten keine Nadelstiche mehr beobachtet werden. Beide Parameterveränderungen führen zu einer feineren Zerstäubung, d. h. mit anderen Worten: Je feiner die Zerstäubung, desto geringer ist die Applikation auf Nadelstiche anfällig. Feiner Zerstäubung führt im Übrigen auch tendenziell zu einer geringeren Lackfeuchte nach der Applikation bzw. zu Beginn der Zwischentrocknung.

Die Ergebnisse der durchgeführten Messungen können natürlich nicht durch die oben vorgestellten Modelle wiedergegeben werden, da in diesen Modellen die spezifischen Applikationsparameter nicht auftauchen. Vielmehr muss für jede Applikationstechnik ein eigenes Modell entwickelt werden. Insofern handelt es sich lediglich um „Prototypen-Modelle“, anhand derer die Anforderungen an die Modellschnittstelle im Simulationsprogramm definiert werden können.

Über die Simulation hinausgehend zeigen die Ergebnisse deutlich auf, dass die Zusammenhänge und Prozesse, die zur Bildung von Nadelstichen führen, noch nicht ausreichend verstanden sind. Weitere, grundlegende Untersuchungen wären hier erforderlich; diese gehen über den Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens aber weit hinaus.

#### 2.3.4 Nutzen und Verwertung der Ergebnisse

Im vorliegenden Vorhaben lag der Fokus der Arbeiten der Hochschule Esslingen auf der Durchführung experimenteller Untersuchungen. Das Ergebnis dieser Untersuchungen bildete die Basis für die Arbeitspakete AP 3 (Aufheizung ohne Lackschicht), AP 6 und AP 7 (Integration und Verifikation des Lacktrocknungsmodells) sowie AP 8 und AP 9 (Modellbildung sowie Integration des Lackfehlermodells). In Bezug auf die Arbeitspakete 6 und 7 waren die Arbeiten komplementär zu den grundlagenorientierten Untersuchungen an der T.H. Darmstadt gestaltet. Insbesondere erfolgte dabei eine Übertragung des Lacktrocknungsmodells auf komplexere Trockner und Bauteilgeometrien.

Die Untersuchungen zur Vorhersage von Lackierfehlern, gewählt wurden hier die sogenannten Nadelstiche, führten zur Formulierung erster Modelle, anhand derer die Anforderungen an die in das Simulationsprogramm zu implementierende Schnittstelle definiert werden konnten. Das gewählte Vorgehen, u. a. die Anwendung der statistischen Versuchsplanung, sowie die angewandte Messtechnik haben sich bewährt. Die Untersuchungen zeigten aber auch, dass die physikalischen Prozesse, die zur Bildung dieser Nadelstiche führen, teilweise noch nicht richtig verstanden sind. Hier sind weitergehende Arbeiten erforderlich, d.h. die vorgestellten Modelle haben zum Teil lediglich demonstrativen Charakter.

## 2.4 Bericht der DFO

### 2.4.1 Zielsetzung und Aufgabenstellung

Die Aufgabe der DFO bestand im Wesentlichen darin, die Kommunikation mit den Unternehmen zu unterstützen und für weitere Kooperationen zu werben sowie über die Branche und über den Stand der Entwicklungen zu informieren.

Hierzu wurden die Informationen in den Gremien der DFO regelmäßig vorgestellt (regelmäßige DFO-Tagungen) und durch Abstimmung mit weiteren Projekten ein möglichst breiter Transfer sichergestellt.

Die Abstimmung mit weiteren Projekten und Verbänden diente auch dazu Doppelarbeit zu verhindern. Diese Art der Abstimmung fand u.a. mit der Deutschen Gesellschaft für Galvano- und Oberflächentechnik e.V. (DGO) im Projekt (ANSIM) statt, in dem Erfahrungen in der Projektkoordinierung (z.B. Intranetgestaltung) ausgetauscht werden.

### 2.4.2 Arbeitspakete und Zeitschiene

Die Arbeitspakete der DFO waren im Wesentlichen die Wissensverbreitung im Rahmen der zahlreichen Fachausschüsse der DFO, im Rahmen von eigenen Tagungen und bei Veranstaltungen anderer Anbieter.

Parallel dazu wurde in der DFO Mitgliederzeitschrift „DFO Informationen“ kontinuierlich über den Stand der Projektbearbeitung berichtet.

Alle Arbeitspakete wurden kontinuierlich während der Projektlaufzeit durchgeführt.

### 2.4.3 Erzielte Ergebnisse

Anders als bei den anderen Partnern lassen sich die erzielten Ergebnisse des Projektteils der DFO nicht in Form von erstellten Programmen oder durchgeführten Messungen beurteilen.

Bei der DFO ist die Zahl der durchgeführten Berichte im Rahmen von Fachausschusssitzungen, Tagungen, Mitgliederversammlungen etc. das Maß für die erzielten Ergebnisse. Über die Projektlaufzeit wurde so im Rahmen von ca. 150 Veranstaltungen über den Stand des Projektes berichtet. Hinzukommen zahlreiche Veröffentlichungen.

#### 2.4.4 Nutzen und Verwertung der Ergebnisse

Die Erkenntnisse des Projektes fließen u.a. in die Schulungs- und Weiterbildungsaktivitäten der DFO ein. Daneben werden die Erkenntnisse auch im Rahmen der DFO Fachberatung aktiv genutzt. Nutzer dieser Fachberatung sind in der Regel KMU, die auf diesem Weg an aktuelle Entwicklungen der Forschung und Entwicklung heran geführt werden können.

Weitere Projekte auf dem Gebiet der Trockner-Entwicklung und -untersuchung (insbesondere im Bereich der Beschichtung von Holz, Holzwerkstoffen und Kunststoffen) sowie der Simulation von Beschichtungsprozessen sind für die Zukunft geplant. Hierbei steht der Wissenstransfer insbesondere in Bereich von Anwendungen im Bereich der KMU's in Fokus der Arbeiten.

Auch im Bereich anderer Aushärtungsverfahren für Lacke wie der UV-Härtung sollen die bisher gewonnen Erkenntnisse des Projektes aktiv genutzt werden. So beispielsweise in dem vor kurzen gestarteten Projektes ENSIKOM (Entwicklung, Simulation und prozesssichere Umsetzung zur umweltfreundlicheren und wirtschaftlicheren Beschichtung von komplexen Kunststoffbauteilen).

Es wird erwartet, dass ein entsprechender Austausch zum gegenseitigen Nutzen und Übertragung der Ergebnisse in andere Branchen der Projekte führt. Für den Einsatz in der Automobilindustrie wird vor allem die benötigte Rechenzeit den Erfolg bestimmen. Daher werden die im Projekt erarbeiteten Vernetzungsstrategien zur Optimierung des Rechenbedarfs für eine Gesamtkarosserie hierfür maßgeblich sein.

## 2.5 Bericht der ANSYS Deutschland GmbH

### 2.5.1 Zielsetzung und Aufgabenstellung

Im Rahmen des Verbundprojektes SiLaT wurde die ANSYS Germany GmbH (vormals Fluent Deutschland GmbH) als Projektpartner für die Implementierung der Modelle zur Lackrocknung und Lackfehler-Vorhersage in das Strömungssimulations-Programm FLUENT involviert.

Primärziel und Aufgabe der ANSYS Deutschland GmbH war die Integration der Modelle aus AP 5 (Lackrocknung) und AP8 (Lackfehler) in die betrachteten Softwarepakete, unter Berücksichtigung der Kopplung der Strömungsberechnung mit den thermodynamischen Berechnungen zum Wärmetransport.

Dabei bauten die Arbeiten der ANSYS Germany GmbH auf Arbeiten von Projektpartnern zur grundlegenden Modellentwicklung auf.

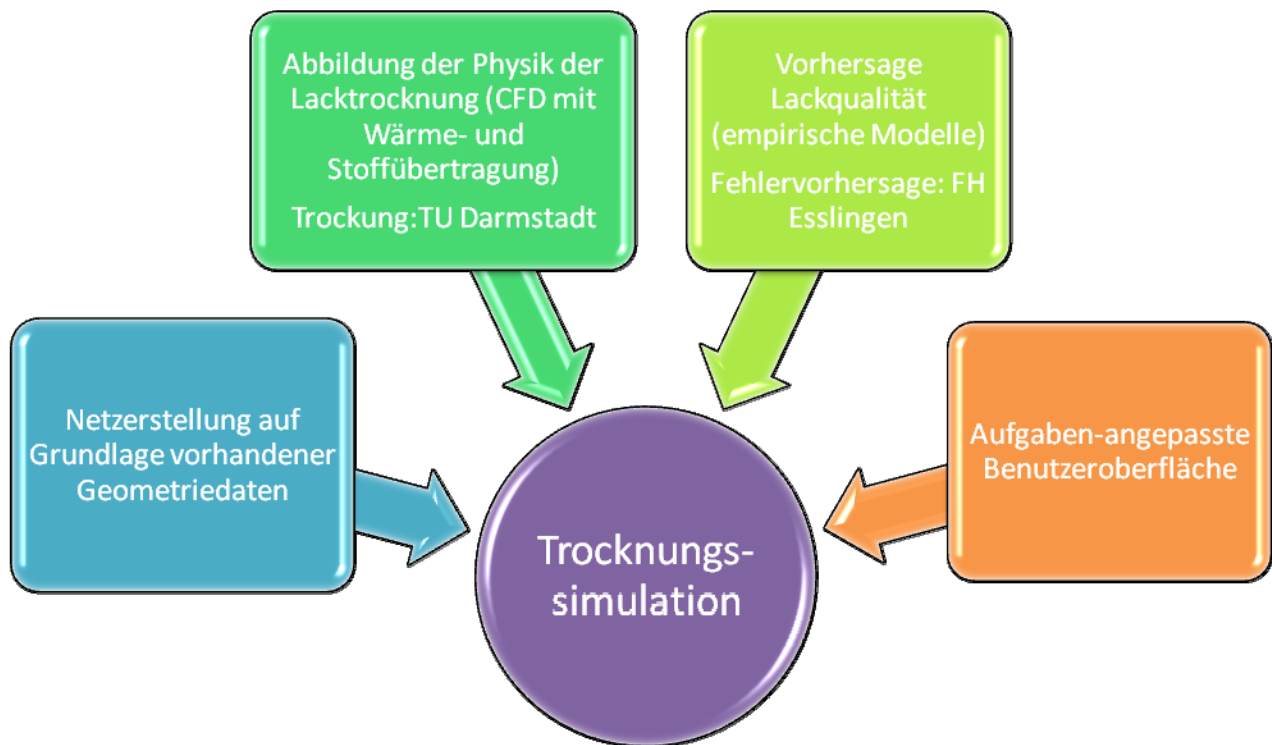


Abbildung 2.5.1.1: Interaktion der Projektpartner

Zum Abschluss des Projektes sollte den Projektpartnern eine Software zur Verfügung stehen, mit der die im Rahmen des Forschungsprojektes erzielten bzw. gewonnenen Erkenntnisse und Modelle zur Verbesserung der Simulation des Lackrocknungs-Vorganges direkt und zeitnah in der industriellen Praxis angewendet bzw. umgesetzt werden können.

Bei der softwaretechnischen Umsetzung der Projektergebnisse sollten die Aspekte numerische Effizienz und langfristige Verfügbarkeit der Modelle besonders beachtet werden:

Als Anbieter des Simulationsprogramms und von notwendigen Programmen zur Erstellung des Berechnungsgitters und der graphischen und alphanumerischen Auswertung der Ergebnisse konnte die ANSYS Germany GmbH am Standort Darmstadt die Implementierung unter Zugriff auf den Source-Code und die interne Dokumentation der Software FLUENT durchführen und im Rahmen der Arbeiten notwendige und/oder wünschenswerte Verbesserungen unter den o.a. Aspekten an der Grundsoftware FLUENT durchführen.

## 2.5.2 Arbeitspakete und Zeitschiene

### AP 2

Die Firma ANSYS Germany GmbH begann ihre größeren Beiträge im Rahmen des Projektes mit Arbeiten im Rahmen des Arbeitspaketes 2 „Stand der Technik“ mit Schwerpunkt auf dem Komplex „Geometriaufbereitung und Vernetzung“. Hier war eine Bearbeitung des Themenschwerpunktes mit einem personellen Aufwand von drei Mannmonaten geplant.

Es erwies sich jedoch aufgrund der Komplexität dieses Unterthemas als notwendig, die Teilaufgabe mit einem erhöhten Zeitbudget und daher auch einer längeren Dauer (geplant: Abschluss nach Q1/2007) durchzuführen. Eine effiziente und qualitativ hochwertige Vernetzung einer komplexen Fahrzeugkarosserie ist aufwendig, aber für eine erfolgreiche und wiederum effiziente Simulation von (Um-) Strömung und Wärme- und Stoffübertragung zwingend notwendig.

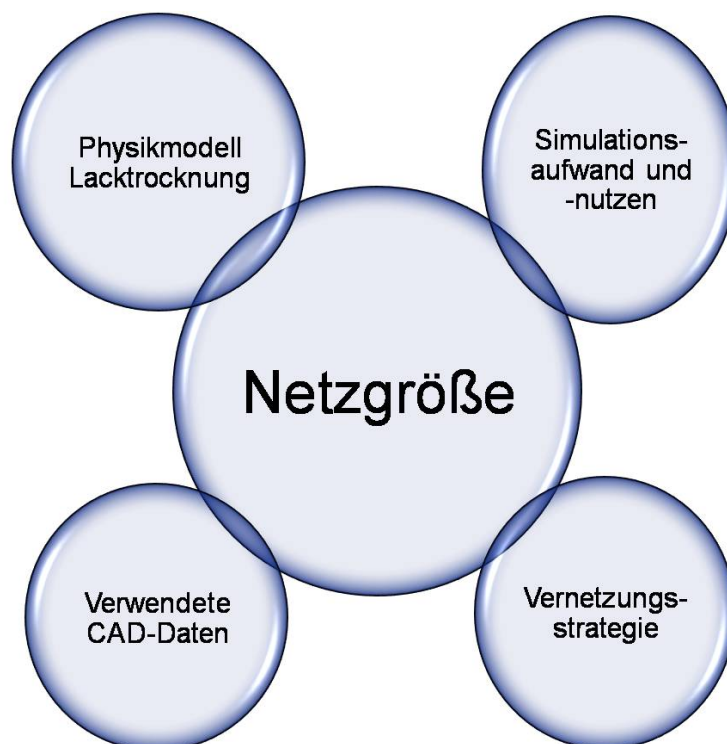


Abbildung 2.5.2.1: Abhängigkeiten der Modellierung von der Vernetzung

Abhängig von den zur Verfügung stehenden Modellbeschreibungen für die Geometrie einer Fahrzeug-Karosserie (Abbildung 2.5.2.2) sind nach dem derzeitigen Stand der Technik andere Vorgehensweisen notwendig, um ein qualitativ hochwertiges, effizientes Berechnungsgitter zu erzeugen.

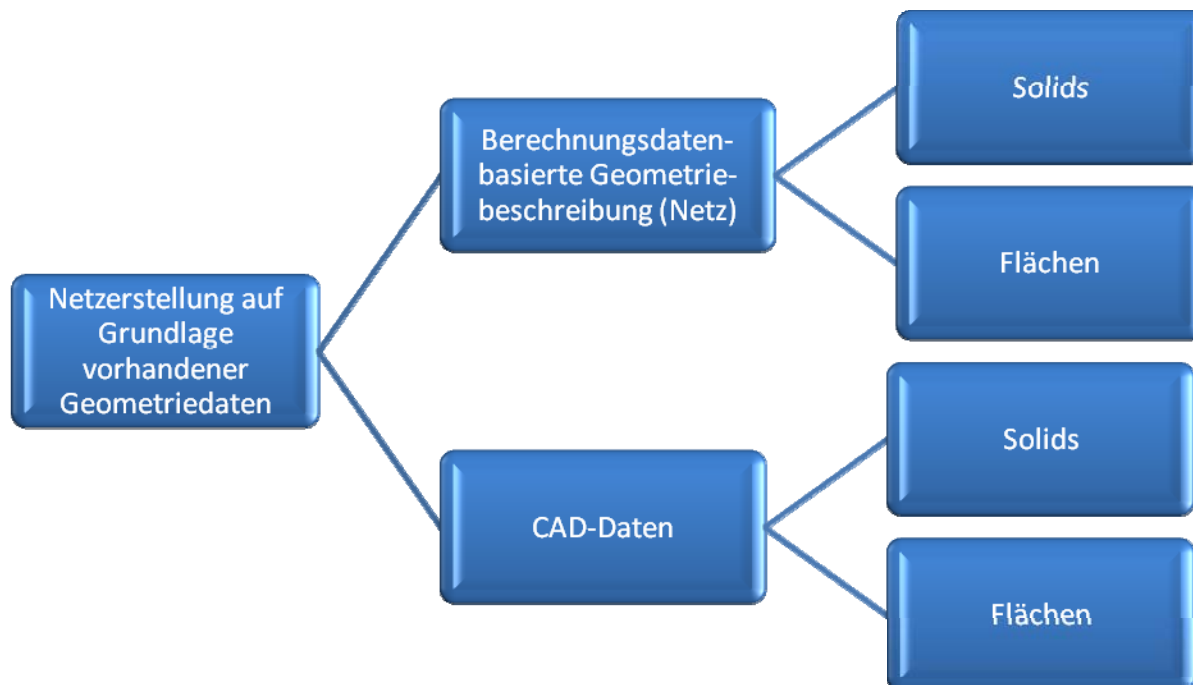


Abbildung 2.5.2.2: Möglichkeiten der Geometrie-Modelldaten für die Vernetzung

Derzeit setzen die Projektpartner unterschiedliche CAD-Programme, unterschiedliche Standard-Datenformate und unterschiedliche Vernetzungsprogramme ein. Das meist verwendete CAD-Programm im Kern-Automobilbereich, CATIA, stellt seit der Version 5 volumenbasierte CAD-Modelle bereit – die für das Projekt aus Geheimhaltungsgründen verfügbaren Karosseriedaten basierten jedoch auf Berechnungsgittern.

Da alle Projektpartner einer gründlichen Vorbereitung des Themas Vernetzung auch im Hinblick auf die spätere industrielle Verifikation der erzielten Ergebnisse einen hohen Stellenwert einräumten, und da eine parallele Durchführung anderer Arbeiten späterer Arbeitspakete möglich war, wurden die Arbeiten am AP2 bei Ende 2007 weitergeführt.

AP3:

Im Rahmen des AP3 „Praxisbezogene Untersuchungen...“ waren unterstützende Arbeiten für die direkt mit dem Arbeitspaket betrauten Partner geplant. Diese Tätigkeiten wurden bei der ANSYS Germany GmbH nicht separat erfasst; jedoch wurden für die Projektpartner u.a. zwei Workshops zu einzelnen konkreten Themen im Bereich Geometrieaufbereitung und Vernetzung und dem damit verbundenen Einsatz der Vernetzungs- und Simulationssoftware von ANSYS vorbereitet und durchgeführt. Zum Thema Turbulenzmodellierung für die konkrete Anwendung Trocknersimulation fand ein umfassender Gedanken- und Erfahrungsaustausch mit dem IFF statt.

**AP6:**

Im Rahmen des AP6 „Integration der Modelle für die Lackrocknung“ wurde von der ANSYS Germany GmbH in enger Kooperation mit dem Institut für Technische Thermodynamik der Technischen Universität Darmstadt das dort entwickelte Grundmodell der Lackrocknung auf die Notwendigkeiten der Anbindung an den Strömungscode FLUENT angepasst und als User Defined Function in FLUENT implementiert.

Im Rahmen des AP6 wurde vom Projektpartner Daimler angeboten, auf die Ergebnisse einer Industriepromotion zu dem Thema aufzubauen. Dies ermöglichte die direkte Einbeziehung der bis dato gewonnenen Ergebnisse, bedingte jedoch – aufgrund der notwendigen Rücksichtnahme auf die formalen Modalitäten des Promotionsverfahrens – eine Zeitverzögerung für den Beginn der Arbeiten am AP6. So konnte das AP6 - abgesehen von vorbereitenden Arbeiten - erst im November 2007 inhaltlich tatsächlich begonnen werden.

Die Grund-Implementierung des Lackrocknungsmodells konnte daher im zweiten Halbjahr 2008 abgeschlossen werden; es wurden jedoch bis im ersten Halbjahr 2009 noch Verbesserungen und Optimierungen vorgenommen, die thematisch sowohl dem AP6 als auch dem AP11 (industrielle Verifikation) zugeordnet werden könnten.

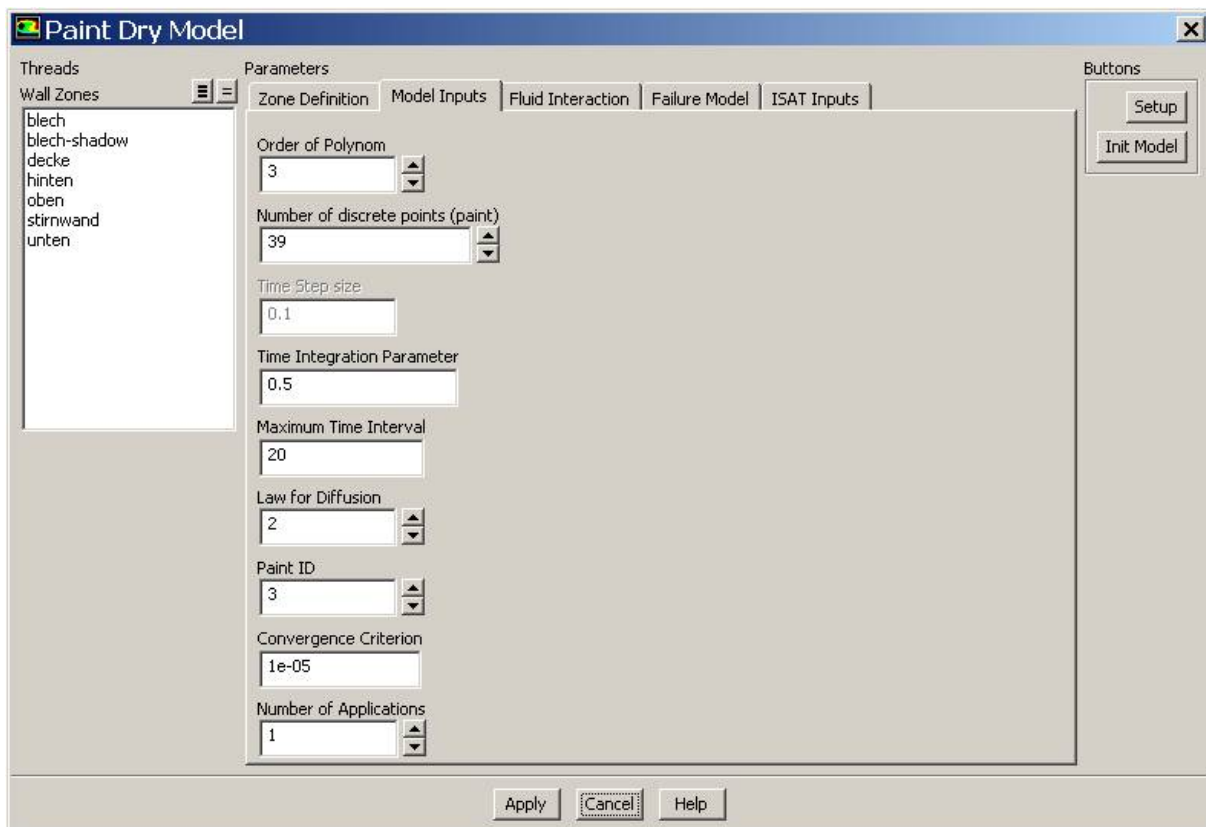


Abbildung 2.5.2.3. Graphische Benutzeroberfläche des Lackrocknungs-Moduls

**AP9:**

Die Arbeiten im Rahmen des AP9 „Implementierung der Lackfehler-Vorhersage“ wurden mit erheblicher Verzögerung begonnen; zwar wurden vorbereitende Arbeiten im Jahr 2008 durchgeführt (im wesentlichen Abstimmungen der Paket-Beteiligten über Modellierungsmöglichkeiten und –grenzen, notwendige und verfügbare



Programmparameter etc.), die Kernarbeiten konnten jedoch erst im ersten Halbjahr 2009 mit der Implementierung einer generischen Modellschnittstelle durchgeführt werden. Aufgrund der Schwierigkeiten bei der Entwicklung eines allgemeingültigen Lackfehler-Modells für den exemplarisch gewählten Fehlertypus „PINHOLE“ konnte nur die generische Schnittstelle implementiert werden (s.u.). Dies führte zu einer Reduktion des Arbeitsaufwandes für das AP11 bei der ANSYS Germany GmbH gegenüber der Planung.

AP11:

Mit der Durchführung des AP11 „Industrielle Verifikation“ wurde – wie geplant - frühzeitig begleitend zu den Arbeitspaketen sechs und neun begonnen, wobei die Abgrenzung der Arbeiten zwischen den Arbeitspaketen (auch zu AP2) fließend war. Für die Lackrocknung wurde eine vollständige Prinzip-Verifikation für den gesamten Workflow durchgeführt und im Sommer 2009 erfolgreich abgeschlossen.

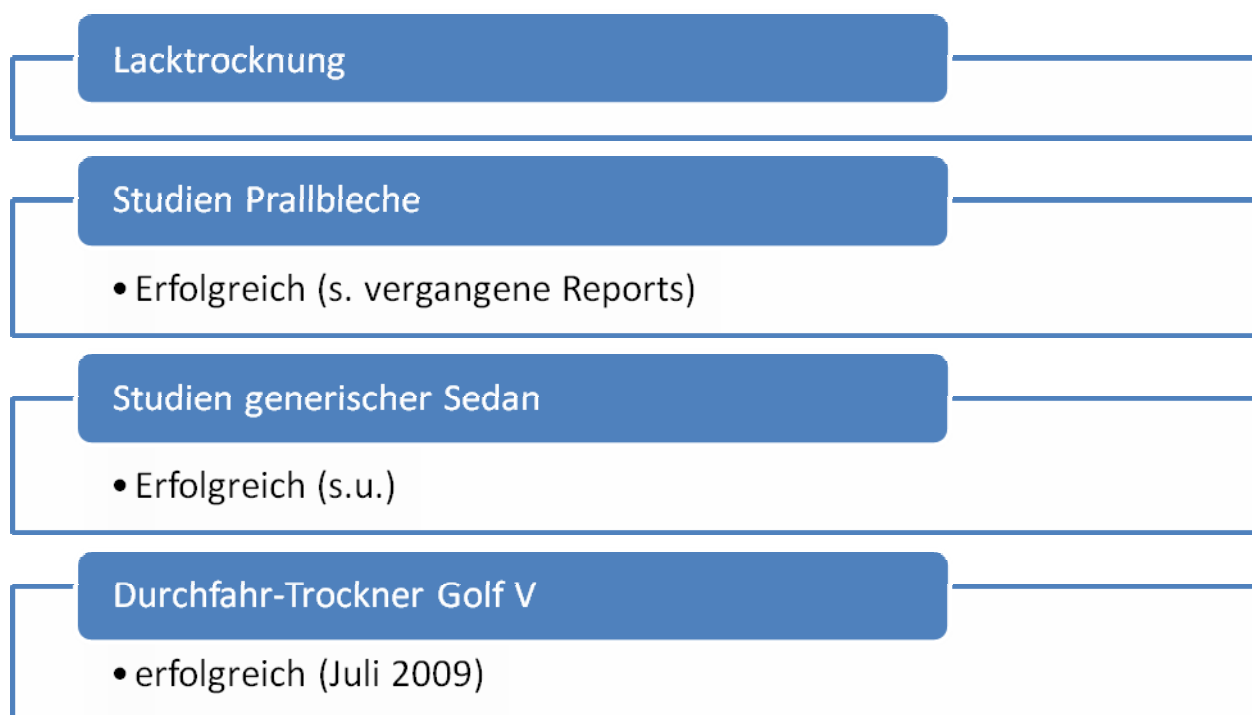


Abbildung 2.5.2.4: Verifikationssimulationen ANSYS und TU Darmstadt

Für die Lackfehlervorhersage konnte keine Verifikation durchgeführt werden, da kein allgemeingültiges Modell zur Verfügung steht (s.o.).

### 2.5.3 Erzielte Ergebnisse

Im Rahmen der Arbeitspakete AP2 und AP6 wurde auf der Grundlage der für das Projekt zur Verfügung stehenden Geometriebeschreibung eine Vernetzungs- und Simulationsstrategie entwickelt, die ein qualitativ gutes Berechnungsgitter und eine effiziente Simulation erlaubt:

Grundlage bildete ein Berechnungsgitter, das die Flächenbeschreibung der Karosserie als triangulierte Fläche beinhaltete (s. Abbildung 2.5.3.1). Dies stellt einen Weg der Vernetzung dar, der in der Automobilindustrie gangbar ist. Nachteilig ist bei diesem Weg, dass bereits für die vorherige Simulation mit anderer Zielrichtung vernachlässigte Geometriebestandteile nicht mehr in der Simulation berücksichtigt werden können. Auch bereits erfolgte Vereinfachungen des Geometriemodells sind nicht mehr rückgängig zu machen

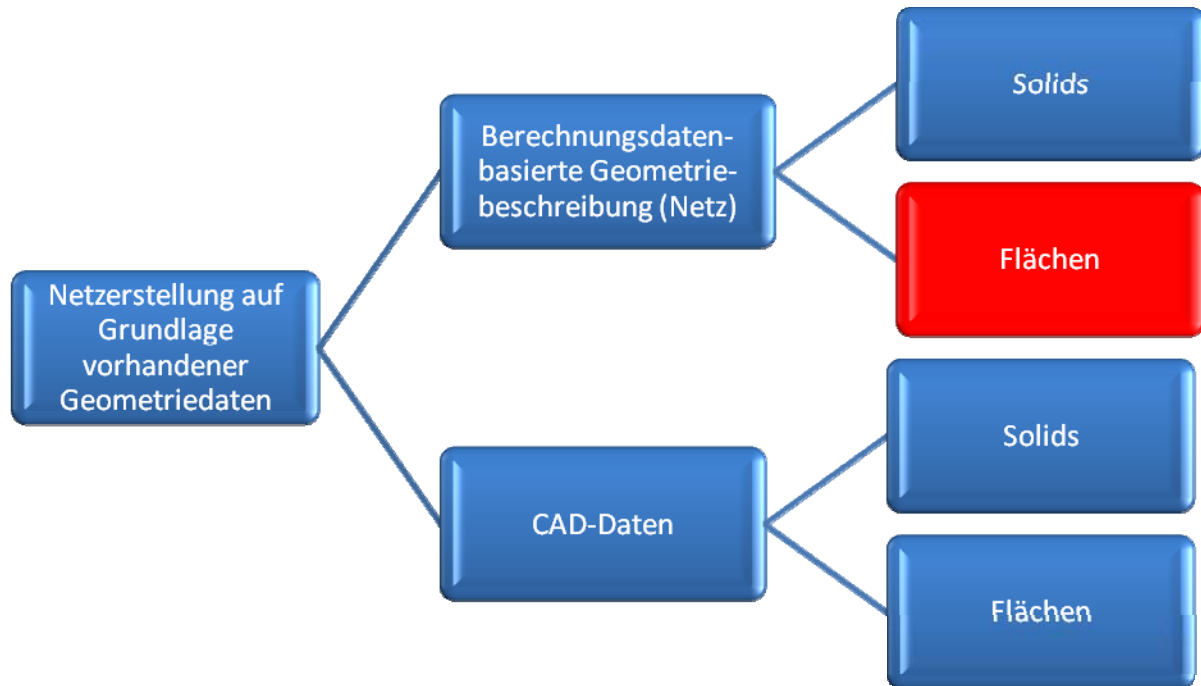


Abbildung 2.5.3.1: Einordnung verfügbares Geometriemodell

Andererseits sind Berechnungsgitter zu einem relativ frühen Zeitpunkt der Entwicklung eines neuen Fahrzeugs verfügbar, da beispielsweise grundlegende Crash-Untersuchungen früh erfolgen.

Der daraus entwickelte Workflow berücksichtigt die Erfordernisse einer Trocknungssimulation unter diesen Grundvoraussetzungen gut.

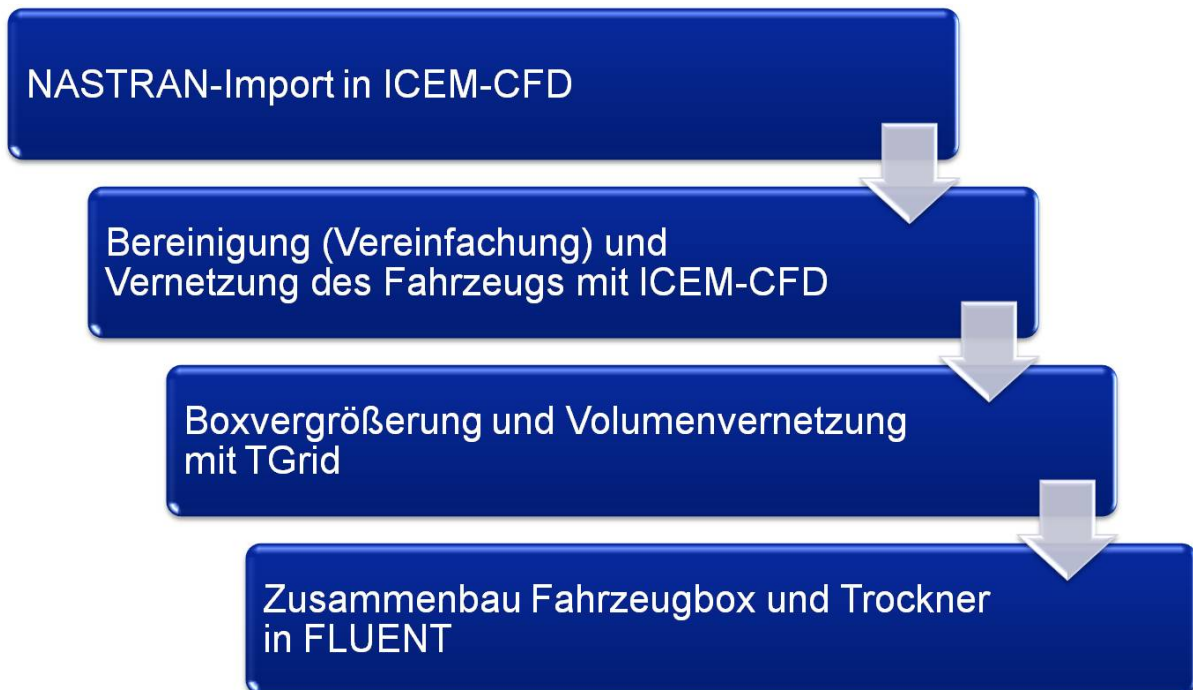


Abbildung 2.5.3.2: Workflow für die Vernetzung auf Grundlage Berechnungsgitter

Im Rahmen des Projektes wurde eine Variante dieser Vorgehensweise entwickelt, die zu einer Verringerung des Simulationsaufwandes durch eine Verringerung der Modellgröße für die Simulation führt: lediglich das Nahfeld des Fahrzeuges wird in der Strömungssimulation betrachtet. Statt eines Netzes auf ca. 60m Länge (Automobiler Durchlaufrockner) wird so nur ein Abschnitt von ca. 6-8m Länge betrachtet, was zu verringerten Rechenzeiten führt. Begründen lässt sich dieser Ansatz durch die zonierte Ausführung moderner Durchfahrtrockner: die Zonierung sorgt für eine lokale und reproduzierbare Umgebungsbedingung der Karosserie in den einzelnen Bereichen – es wird also durch Aufbau und Steuerung Sorge dafür getragen, daß die Rückwirkungen und Koppelungen einzelner Trocknerabschnitte durch „Durchströmung“ in Längsrichtung begrenzt sind. Diesem Umstand wird mit der eingesetzten Systematik Rechnung getragen, um Rechenzeiteffizienz zu erreichen.

Diese Vorgehensweise ist jedoch noch durch eine Veränderung der Randbedingungen an der „Fahrzeugbox“ erweiterbar, um beispielsweise dem Umstand Rechnung zu tragen, dass in der Realität mehrere Karosserien hintereinander den Trockner durchlaufen. In einem solchen Fall ist eine Beeinflussung möglich. Dann können transiente Profile für den Nachlauf der vorhergehenden Karosserie auf den Eintrittsrand der Fahrzeugbox aufgeprägt werden. Dies würde entweder Messungen im Trockner zur Gewinnung der Profile oder aber eine einmalige Simulation des Gesamttrockners mit ggf. niedrigerer Netzauflösung der Einzelkarosserie erfordern.

Alternativ könnte das abströmende Profil der Einzelkarosserie gleichsam erneut als Anströmbedingung verwendet werden. Hier gilt es ggf. noch, eine optimale Vorgehensweise zu entwickeln, die jedoch abhängig von der Betriebsart bzw. –systematik des Trockner sein wird.

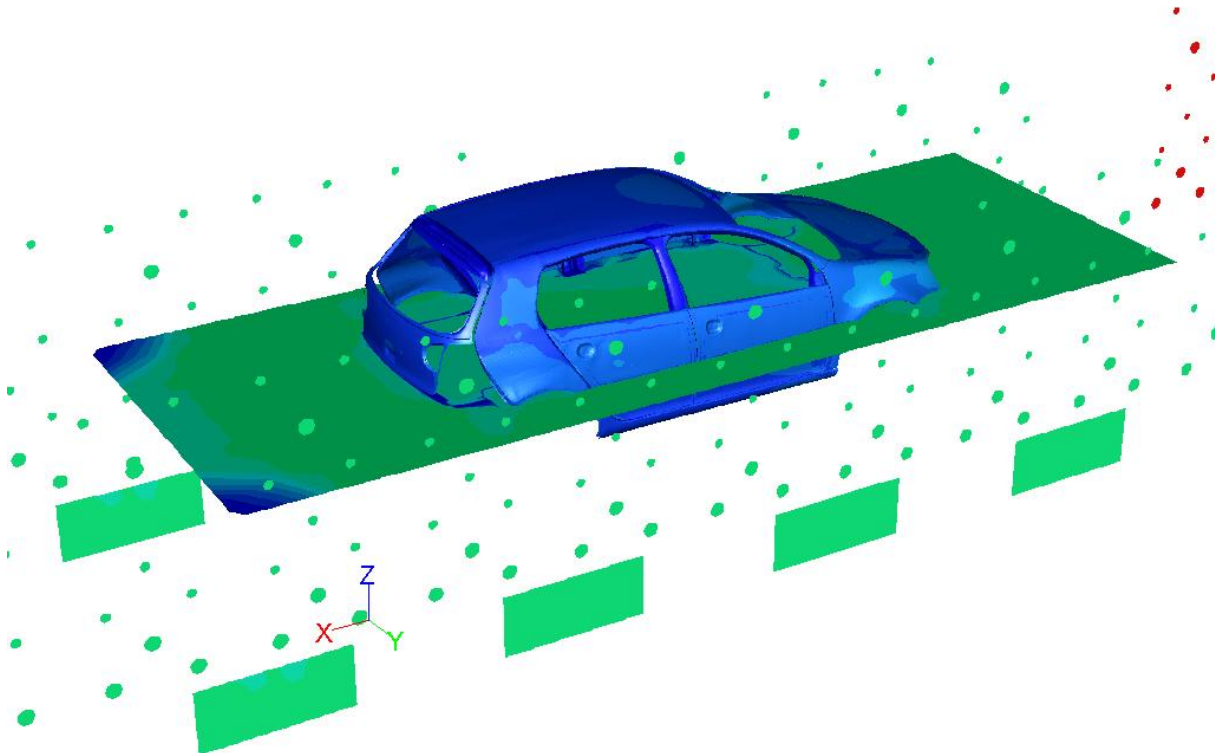


Abbildung 2.5.3.3: Fahrzeugbox am Ende der 2. Trocknerzone

Diese generelle Vorgehensweise der Nahfeld-Betrachtung ist jedoch jederzeit modifizierbar, da sie keine notwendige Bedingung für die entwickelte Simulationstechnik darstellt, sondern lediglich zur Optimierung der Effizienz beiträgt.

Im Falle einer vollen Simulation des Trockners wird das Netz entweder aus Einzelboxen zusammengesetzt, falls die Beeinflussung der einzelnen Karosserie durch die vorhergehenden betrachtet werden soll. Dabei können dennoch unterschiedliche Netzauflösungen pro Karosserie verwendet werden, um den Rechenaufwand zu begrenzen. Im Falle einer Einzelkarosserie kann mit der Funktionalität „Deforming Mesh“ das Netz vor bzw. hinter dem Fahrzeug der Trocknerlänge angepasst werden.

Für andere Trocknertypen als Durchfahrtrockner im Automobilbereich ist die Vereinfachung „Nahfeld-Betrachtung“ nicht notwendig, da aufgrund anderer Trockner- und Trocknungsgut-Größen die Notwendigkeit nicht gegeben ist.

Weiterhin wurde das Modell auf der Grundlage der Funktionalität „Conducting shell“ als Ersatzmodell für Karosseriebleche als Volumenkörper aufgebaut. Auch diese Vereinfachung ist keine notwendige Bedingung der Simulation, sondern dient einerseits der Effizienz. Zum zweiten ist sie dem Ausgangs-Datenmaterial geschuldet, da die Ausgangsgeometriedaten nicht überall Dickeninformation in Form tatsächlich vorhandener Solids beinhalteten (Abbildung 2.5.3.4).

## Kotflügel als Flächenmodell:

Flächen nicht verbunden

Unterschiedliche Blech-  
stärken in einem Bauteil

Flansche als Flächen  
ohne Dicke am Bauteil

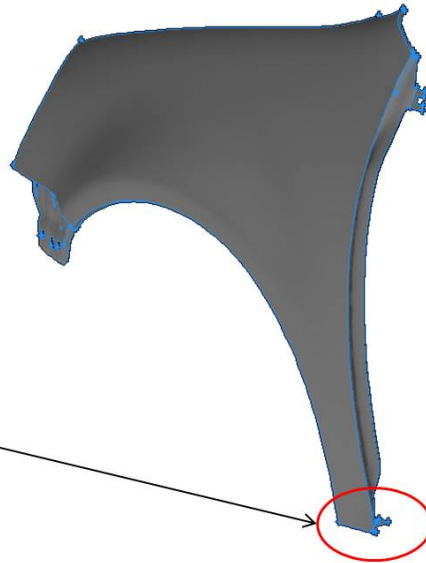


Abbildung 2.5.3.4: Bauteilgeometrie aus NASTRAN-Daten

Ob der Endanwender der Methodik SOLIDS als 3D-Bauteile modelliert oder die „Conducting-Shell“-Vereinfachung nutzt, ist jedoch für die Gesamt-Vorgehensweise nicht entscheidend. Die Wahl hat selbstverständlich Auswirkungen auf Genauigkeit der Vorhersage, Rechenzeit und notwendige Daten-Vorbereitung (Abbildung 2.5.3.5).

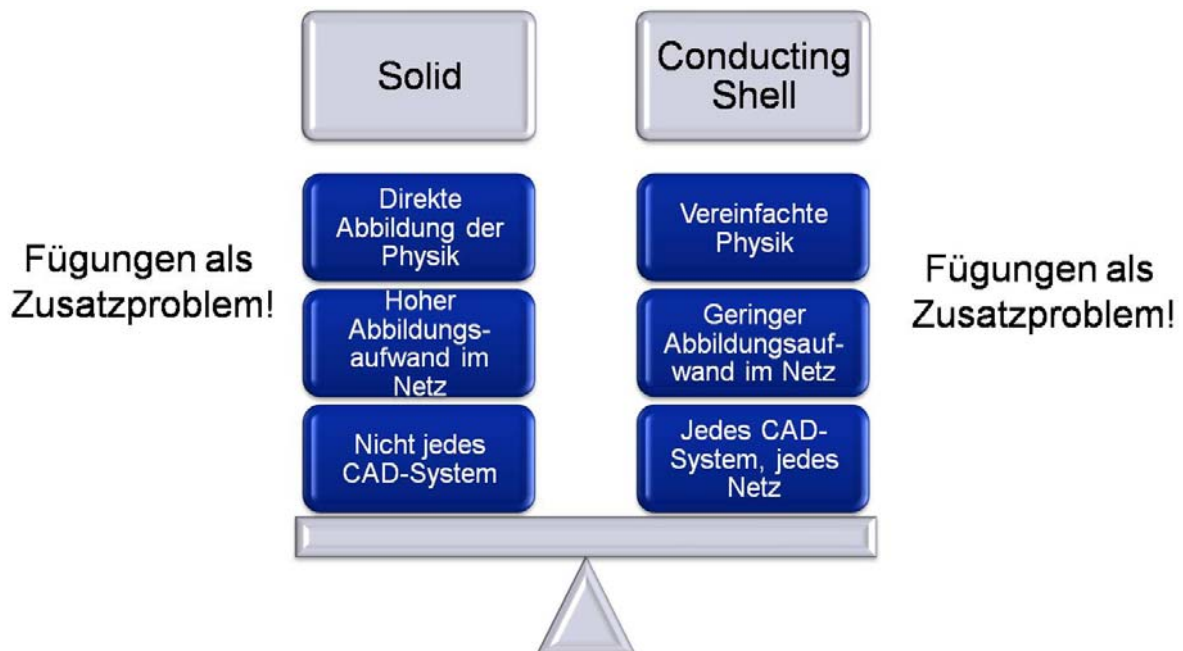


Abbildung 2.5.3.5: Abbildungsoptionen für Blechstärken

Bedacht werden muss bei der Frage der Abbildung der Bauteile auch die Fügetechnik – sie erzeugt einen flächigen Wärmeleitwiderstand, der für eine korrekte Abbildung der Aufheizung der Karosserie berücksichtigt werden sollte. Auch dieser

Punkt kann jedoch unabhängig von der sonstigen Vorgehensweise in FLUENT ggf. geeignet adressiert werden (Zusammenziehen in einen Gesamt-Wärmeleitwiderstand eines abgebildeten Bauteils, Berücksichtigung an der Berührfläche per UDF).

Zusammenfassend wurden im Rahmen der Pakete AP2 und AP11 unterschiedliche Möglichkeiten aufgezeigt bzw. entwickelt, mittels denen der Endanwender der Methodik der Lacktrocknungs-Simulation abhängig von den konkreten Voraussetzungen und Limitierungen beim Endanwender die geeignete Vorgehensweise wählt, um die Simulation effektiv und zielführend durchzuführen.

Eine weitere Automatisierung des Prozesses – und damit eine Effizienzsteigerung – wäre durch weiterführende Untersuchungen zur optimalen Vorgehensweise beim sogenannten Preprozessing möglich.

Die Arbeiten im Arbeitspaket sechs mündeten in der Implementierung einer Funktionalität für die Abbildung des physikalischen Prozesses der Lacktrocknung im Rahmen der CFD-Simulation. Die Funktionalität besteht aus dem Berechnungsteil, der per User Defined Function an das CFD-Programm FLUENT angebunden ist, und der Erweiterung der Graphischen Benutzeroberfläche von FLUENT um die Eingabemaske für die Lacktrocknungs-spezifischen Eingabeparameter.

Die User Defined Function bindet das im Grundsatz von der TU Darmstadt entworfene und validierte numerische Berechnungsverfahren der Abdunstung der/des Lösungsmittels in die Gesamtberechnung ein. Zur Umsetzung in die Anwendung im Rahmen eines CFD-Verfahrens mussten Veränderungen an der Methodik vorgenommen werden (z.B. Definition der Fernfeld-Bedingung auf der Grundlage der während der Berechnung verfügbaren Variablen). Als Ergebnis wird primär der Energie- und Stoffhaushalt der Lackschicht und die sich daraus ergebenden Wärme- und Stoffströme in das Simulationsgebiet berechnet. Diese Größen wiederum sind abhängig von der Strömung selbst (Konzentrationsgradient und Temperaturgradient) – es handelt sich daher um eine gekoppelte Simulation.

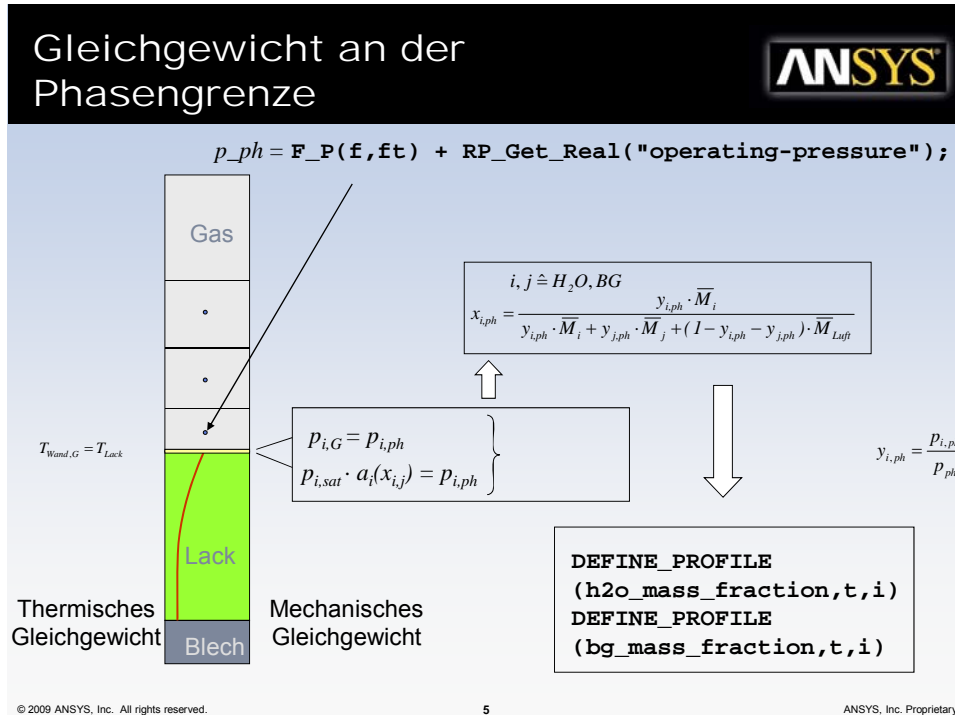


Abbildung 2.5.3.6: Berechnungsschema der Lackrocknung

Das Berechnungsverfahren für den Stoff- und Wärmehaushalt der Lackschicht besteht aus einem örtlich hochauflösenden 1D-Verfahren, das mit zahlreichen Stützstellen in der Lackschicht die Verläufe von Temperatur und Lösemittelkonzentration berechnet. Es ergibt sich folgende Lösungsschematik der mit der Strömungssimulation gekoppelten Berechnung:

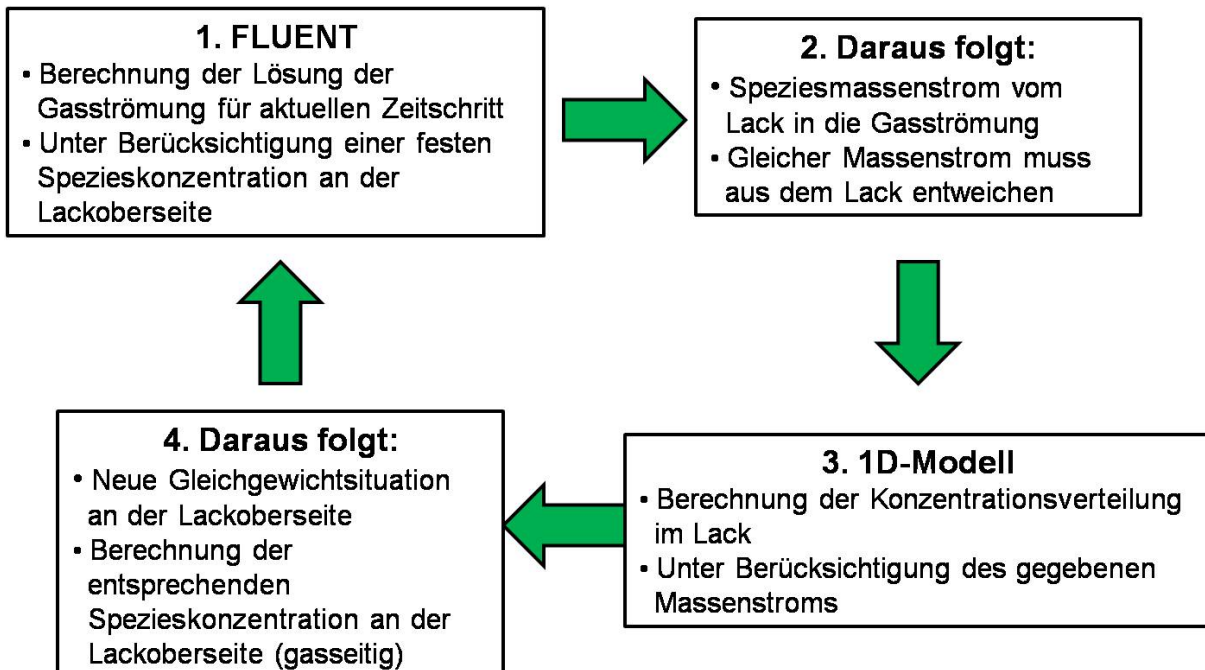
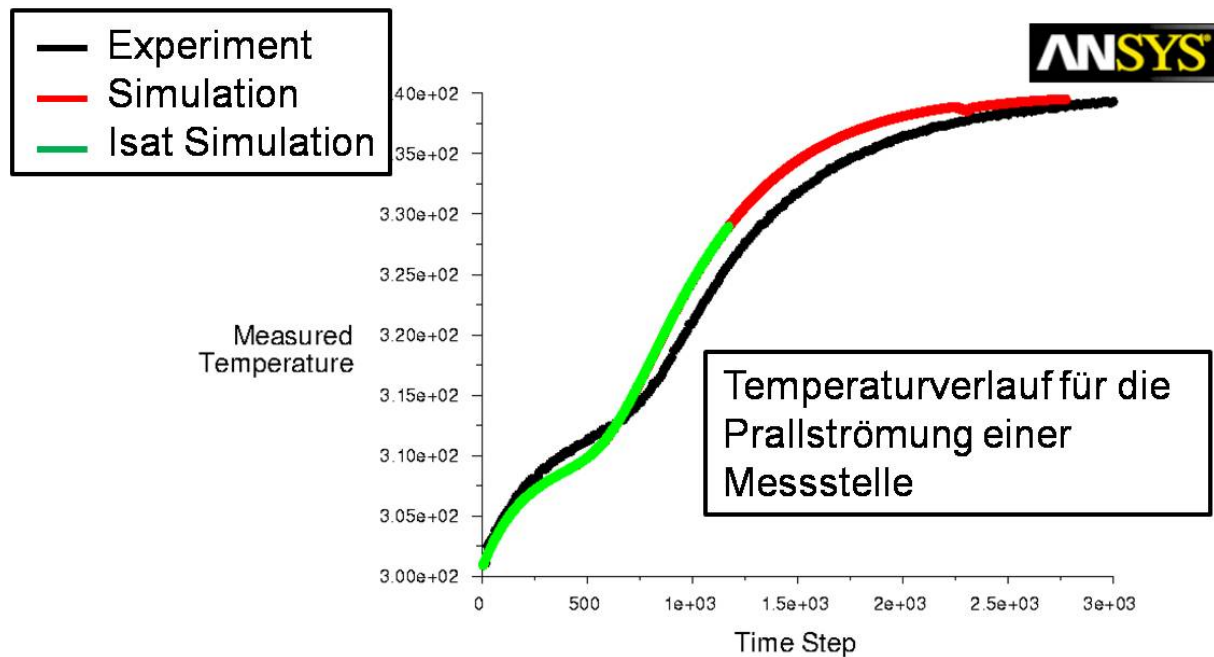


Abbildung 2.5.3.7: Koppelung Lackrocknungs- und Strömungssimulation



Zur Steigerung der Effizienz zukünftiger Simulation wurde die Methodik bei der Implementierung in FLUENT durch die Approximierung mittels Polynomen und deren Speicherung in einer Tabelle nach dem ISAT-Verfahren (In Situ Adaptive Tabulation) ergänzt. Dadurch wird erreicht, daß für Punkte, an denen vergleichbare lokale Gegebenheiten (in Form von Zustandsvektoren) vorliegen, Werte nicht erneut berechnet, sondern aus der Tabelle ermittelt werden. Die Tabelle ist dabei dynamisch und wird laufend um neue Zustandsvektoren ergänzt.



Pyromter measurements over time

Oct 26, 2009  
ANSYS FLUENT 12.0 (2d, pbns, lam)

Abbildung 2.5.3.8: Vergleich Experiment, direkte Berechnung und ISAT-Tabellierung

Die Validierung im AP11 zeigte, daß die entwickelte Funktionalität voll einsatzbereit ist. Eine vollständige Simulation der Durchfahrt einer Golf-V-Kaorsserie durch einen generischen Durchfahrtrockner wurde bei ANSYS Darmstadt durchgeführt. Dabei wurden exemplarisch die Oberflächentemperatur und die Lackdicke während der Simulation verfolgt.

Die Plausibilität der Ergebnisse konnte festgestellt werden: Dickenschrumpfung des Lacks folgt der Aufheizung der Bauteile, die Aufheizrate ist abhängig von der Exposition des Bauteils zur (aufheizenden) Umströmung und der Stärke des Bauteils (Abbildung 2.5.3.9).



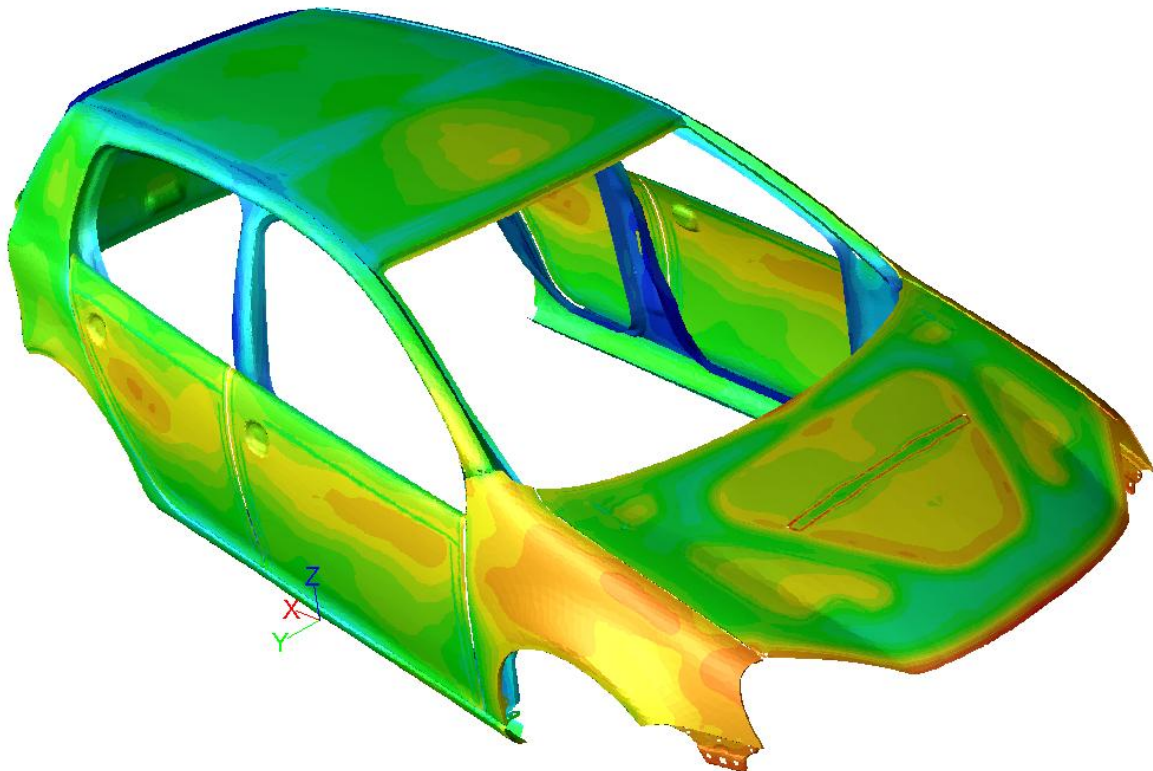


Abbildung 2.5.3.9: Temperatur der Karosserie nach  $\frac{1}{4}$  der Trocknerdurchfahrt

Hinsichtlich des Arbeitspaketes neun (Lackfehlermodell-Implementierung) wurde der Arbeitsanteil der ANSYS Germany GmbH dominiert von dem Projektergebnis des AP8, demzufolge kein allgemeingültiges Berechnungsmodell für die Vorhersage des exemplarischen Fehlertypus 'Pinhole' entwickelt werden konnte.

Ursache für diese Entwicklung war der Umstand, daß sich auch Prozessparameter außerhalb der CFD-Simulation als signifikant für die Lackfehler-Vorhersage beim Fehlertyp Pinhole erwiesen, z.B. die verwendete Lackiertechnik (Durchmesser und Rotationsgeschwindigkeit Rändelglocke, Restfeuchte Grundlack etc.). Auch erscheint es zumindest möglich, daß der Lackfehler-Typus Pinhole die Betrachtung des Lacks als Fluid erfordern würde, da Kraterbildung sicher bei noch fluidem Lacksystem unwahrscheinlich ist. „Selbstheilung“ von Kratern erscheint in fluidem Zustand möglich bzw. wahrscheinlich, sofern die Grundfläche nicht beispielsweise durch Verunreinigung oder andere Fehler schlecht benetzbar ist und gleichzeitig die Viskosität des Lacksystems niedrig genug ist, damit Oberflächenspannungskräfte das Schließen der Oberfläche bewirken können.

Des Weiteren werden für die Charakterisierung der vorherigen Lackschichten typischer Weise keine diskreten, sondern globalisierte Größen verwendet (mittlere Restfeuchte des Lacks versus Lokale Restfeuchte).

In Summe ergab sich aus dieser Konstellation, daß kein validierbares Modell für die CFD-Simulation zur Verfügung stand.

Daher beschränkten sich die Arbeiten von ANSYS im AP9 auf die Implementierung

einer prototypischen Schnittstelle für die Fehlervorhersage, die bestimmte Variablen der CFD-Simulation für eine Berechnungs- bzw. Detektionsroutine für hohe Lackfehler-Wahrscheinlichkeit einfach zugänglich macht. Abbildungen 2.5.3.10 und zeigt exemplarisch das Eingabefenster der Benutzeroberfläche .

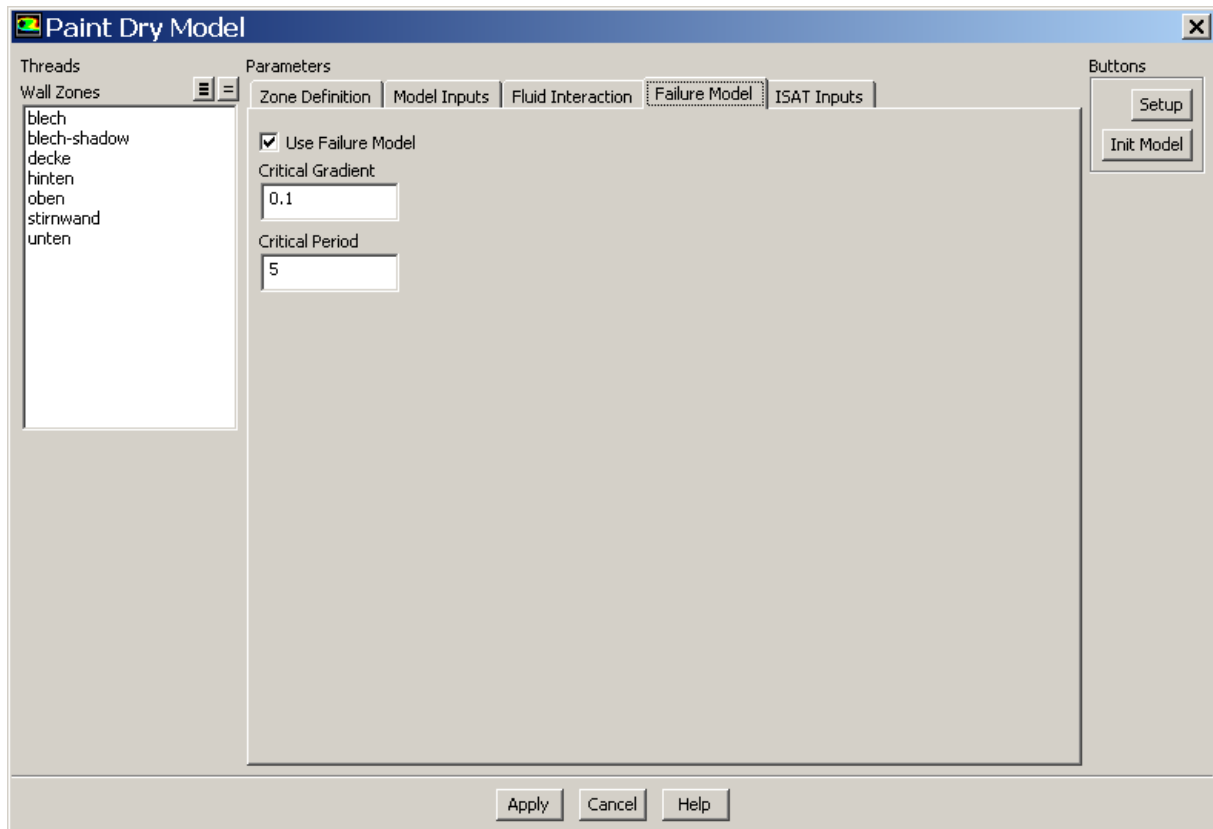


Abbildung 2.5.3.10: Prototypisches Fehlermodell mit kritischem Temperaturgradient und kritischer Intervall-Länge als implementierte Schaltgrößen

Die Modellschnittstelle für die Lackfehlervorhersage ist sehr einfach auf andere Ergebnisvariablen umzustellen, so daß eine Anpassung an konkrete Modell zur Validierung oder dem Einsatz bei festgelegten sonstigen signifikanten Prozeßgrößen möglich ist.

Derzeit sind insgesamt 27 sogenannte User Defined Memory Variablen vordefiniert, beispielsweise die Lackschichtdicke und die Lacktemperatur, sowie vier Dummy-Parameter für die Lackfehlervorhersage

Nicht durchgeführt werden konnte die klassische Validierung mit experimentellen Daten. Es standen keine Karosserie-Geometriedaten und dazu passende Trockner-Geometrie- und Betriebsdaten zur Verfügung, für die valide Messdaten vorhanden wären.

Mit Abschluss der Arbeiten an der Validierungsrechnung endeten die Arbeiten der ANSYS Germany GmbH im Rahmen des Projektes SiLaT.

## 2.5.4 Nutzen und Verwertung der Ergebnisse

Die Im Rahmen des Projektes SiLaT entwickelte Methodik und Programmerweiterungen des Strömungssimulationsprogrammes FLUENT können prinzipiell von jedem Anwender des Programmes FLUENT zur Simulation von Trocknungsvorgängen eingesetzt werden.

Die Methodik erlaubt es, Trocknerkonzepte (Geometrie und/oder Betriebsparameter), neue Lacksysteme, Geometrien des Trocknungsgutes mittels Simulation und unter Berücksichtigung der Wärme- und Stoffumsätze bei der Abtrocknung des Lackes zu evaluieren.

Damit ist es möglich, industrielle Trocknungsvorgänge im Hinblick vielfältige Zielparameter, beispielsweise auf niedrigeren Energieverbrauch oder beschleunigte Trocknung oder geringe Trockner-Baugröße, durch Simulation zu optimieren.

Die dazu notwendigen Programmerweiterungen stehen denjenigen Projektpartnern, die das Programmsystem FLUENT einsetzen, gemäß Kooperationsvereinbarung zur Verfügung.

Für die Abschluss-Sitzung des Projektes wurde eine Powerpoint-Präsentation erarbeitet, die den Projektteilnehmern alle notwendigen Schritte zur Durchführung der gekoppelten Simulation erläutert und daher einen „Leitfaden“ zur Simulation auf Grundlage der Projektergebnisse darstellt.

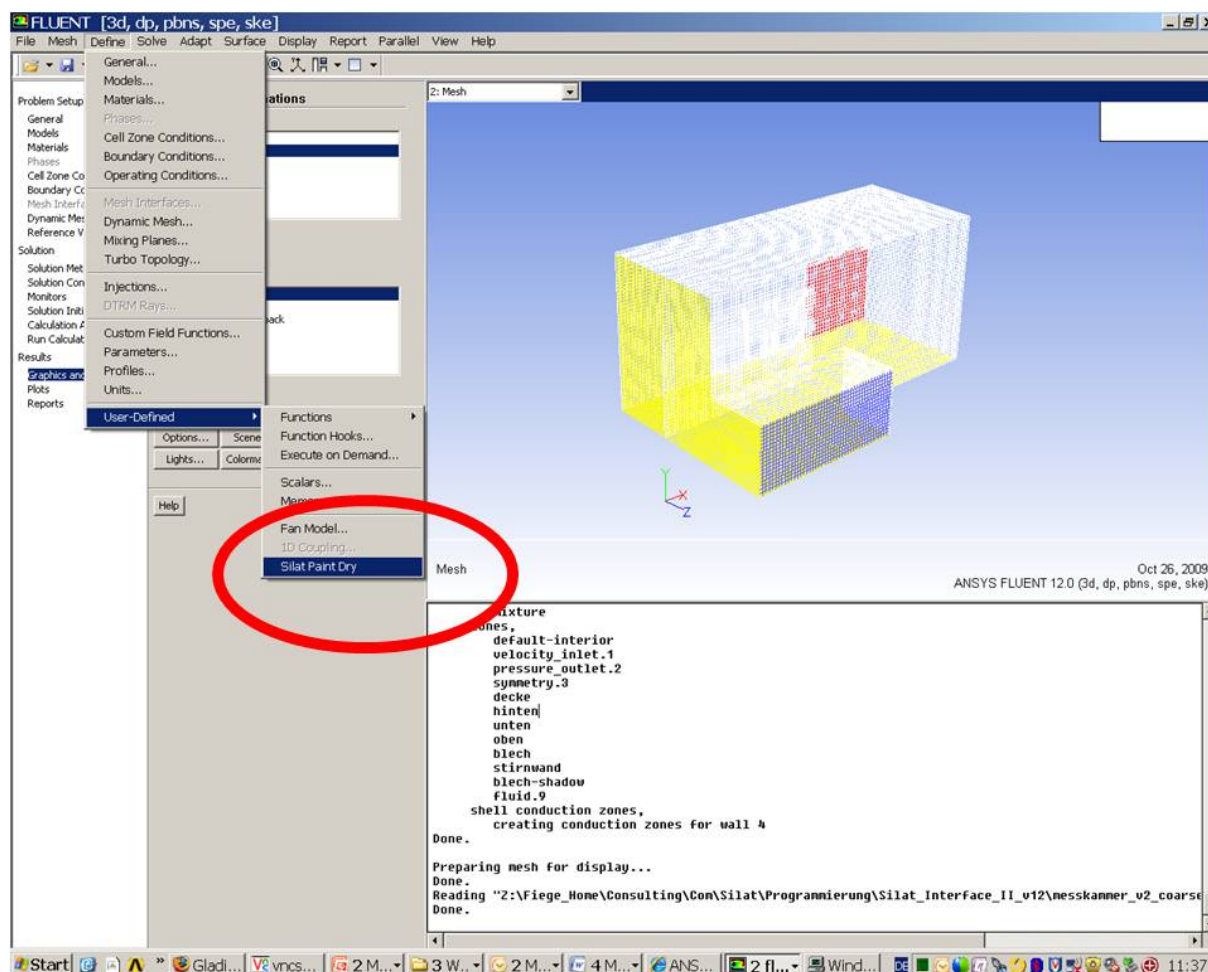


Abbildung 2.3.5.11: Screenshot aus dem Simulations-Leitfaden

Die Nutzung durch Dritte bedarf einer abschließenden Klärung unter den Projektpartnern. Interessensbekundungen aus dem Bereich industrielle Lacktrocknung liegen vor.

Die Arbeiten an dem Projekt SiLaT wurden auf der „European Automotive Simulation Conference“ im Juni 2009 und auf der ANSYS Users COnter3ence im November 2009 vorgestellt.

## 2.6 Bericht der CAD-FEM GmbH

### 2.6.1 Zielsetzung und Aufgabenstellung

In dem Antragstext ist unter Punkt „1.2 Bezug zu Förderpolitischen Zielen“ als Ziel die „erfolgreiche Implementierung der digitalen Fabrik“ näher erläutert.

Mit den Produkten der Firma CADFEM unter der Bezeichnung VirtualPaintShop gab es schon einen im Einsatz befindlichen Ansatzpunkt für eine Implementierung für die Simulation der Lacktrocknung. Gegenüber der hier vorhandenen Lösung VPS/DRY sollten in dem Projekt umfangreichere Aspekte einbezogen werden: Die Verdunstung in der Lackschicht, ein Lackfehlermodell und Randbedingungen im Ofen basierend auf einer Strömungssimulation. Die Strömungssimulation erfordert ein Rechenetz um die Karosserie, welches im Normalfall nicht schon für andere Zwecke vorhanden ist wie z.B. Berechnungsnetze für die Crash Simulation.

Aufgrund der Erfahrung mit Simulationslösung wie VPS/DRY sollte CADFEM als eine Grundlage des Projektes Anforderungen an das zu erstellende Berechnungsprogramm definieren und Möglichkeiten der Kopplung z.B. zur Berechnung des Bauteilverzugs aufzeigen.

Aufgrund der Erfahrungen bei der Erstellung von Finite Elemente Netzen, die eine Rohkarosserie umgeben, sollte CADFEM Vorschläge zur Lösung und ggf. Automatisierung dieser Aufgabe anhand der Modellspezifikationen im Stand der Technik erarbeiten.

Mit diesen beiden Aspekten – Simulationslösung und Vernetzung – sollte CADFEM unterstützende und vorbereitende Arbeiten einbringen, wie z.B. die Aufbereiten von CAD-Daten und ggf. der Vernetzung dieser Daten, zusammen mit der eigenen, langjährigen Simulationserfahrung,

### 2.6.2 Arbeitspakete und Zeitschiene

Die Unterstützung beim Zusammenstellen der Anforderungen und die Arbeiten zur Vernetzung stellten die umfangreichsten Arbeiten im Rahmen des Projektes dar und waren mit den Arbeitspaketen 1 und 2 zu Beginn der Projektlaufzeit geplant. Diese Arbeiten sind auch zum größten Teil in diesem Zeitraum ausgeführt worden. Die Darstellung der Vernetzung im Stand der Technik wurde aber über den gesamten Projektzeitraum begleitend fortgeführt. Die Unterstützung in den anderen Arbeitspaketen 5, 7, 8, 10 und 11 war nur mit einem geringen Tätigkeitsumfang geplant und erstreckte sich fast über die gesamte Projektlaufzeit.



Der Unterschied der lokalen Temperaturen an den typischen Stellen (d.h. im Außenbereich und im Innenbereich der Karosserie) ist deutlich sichtbar. Dadurch lässt sich der Einfluss der Verdampfung auf den Temperaturverlauf an einer Gesamtkarosserie im Trocknungsprozess eindeutig aufzeigen. Anhand einer Definition der gewünschten Genauigkeiten für diesen Prozess ist es möglich zu entscheiden, ob eine Kopplung der Effekte für die Temperatursimulation notwendig ist, oder welche Vereinfachungen für das Verdampfungsmodell in der Simulation zulässig sind.

Anforderungen an die Berechnungsprogramme können unter Berücksichtigung der folgenden Aspekte aufgestellt werden:

- Gewünschter Aussagegehalt der Simulation und daraus abgeleitet:
  - Erforderliche physikalische Kopplungen
  - Genauigkeitesanforderungen an physikalische Größen
  - Ableitungen auf die programmtechnischen Vorgaben bei den jeweils gewählten oder vorgegebenen Programmen
- Grenzen der technischen Realisierbarkeit:
  - Komplexität der physikalischen Modelle
  - Größe der Modelle (Netzvorgaben)
  - Hardware Voraussetzungen
- Grenzen der wirtschaftlichen Realisierbarkeit:
  - Aufwand für die technische Implementierung
  - Beschaffungskosten der Software
  - Antwortzeiten (Anwendung in der Produktentwicklung möglich?)

Es gab mit dem IFF Gespräche zum Umfang der Messung und Methoden, wie diese von CADFEM im Rahmen von VPS/DRY Projekten durchgeführt werden.

Ergebnisse der Messung vom IFF wurden CADFEM für Studienzwecke mit zugehöriger Dokumentation zur Verfügung gestellt. Basierend auf diesen Messdaten wurde ein erster Entwurf eines Ofenmodells für VPS/DRY abgeleitet, so dass hiermit vergleichende Berechnungen durchgeführt werden können.



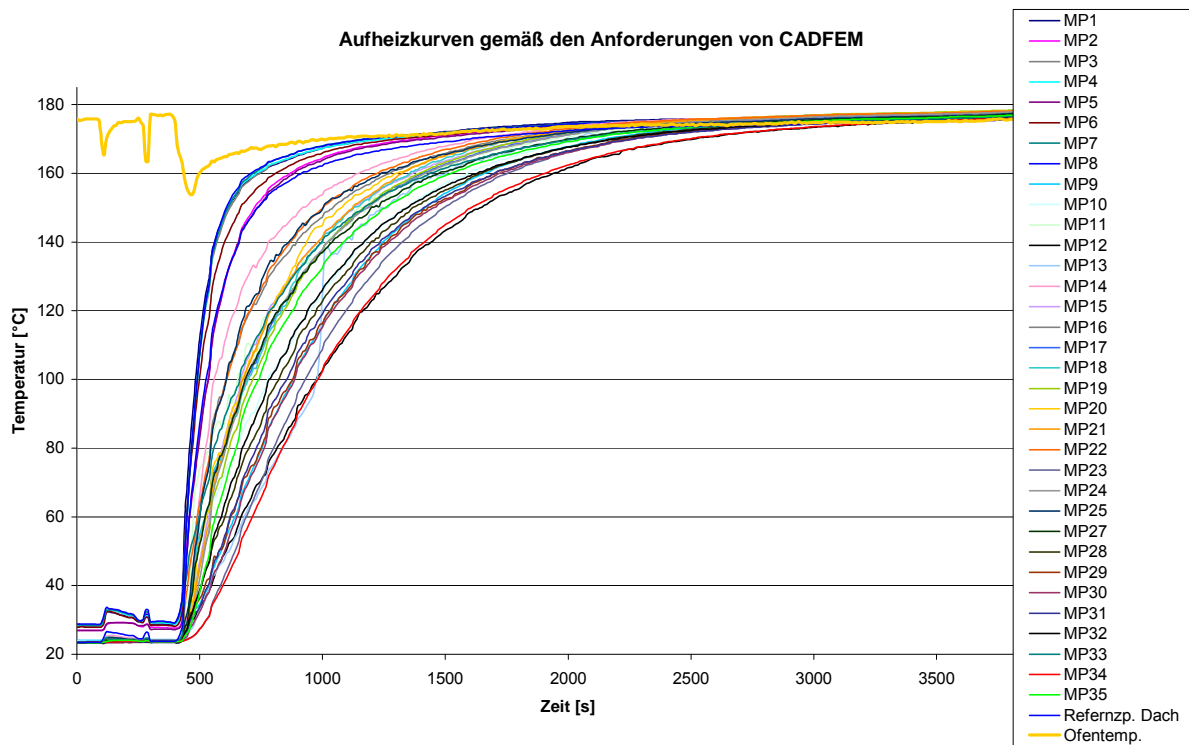


Abbildung: vom IFF Gemessene Ofenkurven

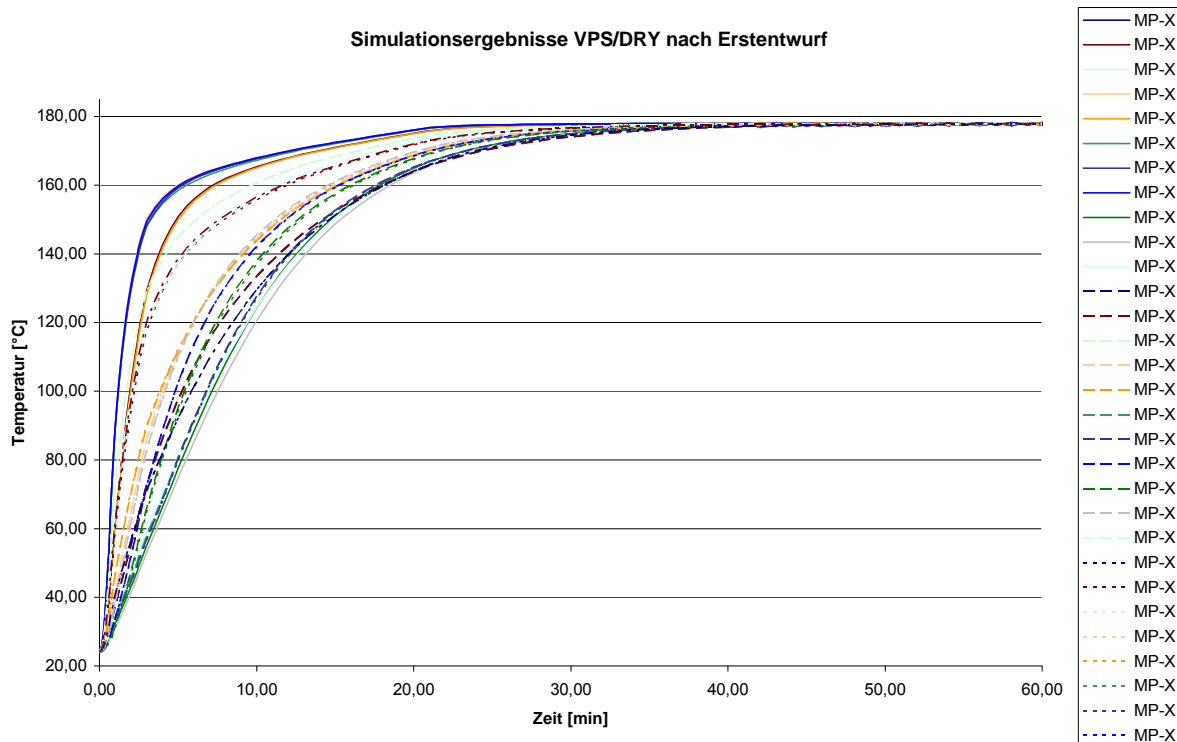


Abbildung: Simulierte Ofenkurven mit einem ersten Ofenentwurf und noch nicht gesicherten Stand des FE-Modells der Karosserie

Eine qualitative Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation an der Karosserie, basierend auf dem Ofenmodell, kann somit gut gezeigt werden. Im Vergleich zu industriellen Öfen mit unbekanntem Parametern, die in der



Karosseriefertigung zum Einsatz kommen, kann der hier verwendete Ofen gut beschrieben werden.

Einige Fragen, die einen quantitativen Vergleich zwischen den Messungen und Simulationsergebnissen aussagekräftig gemacht hätten, konnten im Rahmen des Projektes nicht mehr untersucht werden. Diese waren:

- Stand des FE-Modells der Karosserie zum realen Fahrzeug
- Stand des FE-Modells der Karosserie bezüglich modellierter Verbindungen
- Verifikation der Dokumentation zu den Messungen
- Kalibrierung des Ofenmodells

#### AP2 und sonstige vorbereitende und unterstützende Tätigkeiten:

Der Stand der Technik für die Vernetzung ist zu einem großen Teil maßgebend für die technische Realisierbarkeit und die zu erwartenden Kosten für die Simulation der Lacktrocknung. Im Laufe des Projektes hat sich gezeigt, dass es in diesem Zusammenhang sehr komplexe und vielfältige Anforderungen gibt.

Der notwendige Umgang mit sehr großen Datenmengen bei der Handhabung von detaillierten, kompletten Karosseriemodellen, setzt der wirtschaftlichen Durchführbarkeit enge Grenzen.

Es wurden deshalb die Möglichkeiten der derzeit marktführenden Vernetzungswerkzeuge vergleichend untersucht. Hierzu hat CADFEM ein einfaches aber repräsentatives CAD-Modell aus einem aktuellen Kundenprojekt als Versuchsmodell herangezogen. Es handelte sich dabei um eine in CATIA V5 erstellte Baugruppe (Querträger (Hutprofil) auf einem Bodenblech).

Bei der Netzerstellung basierend auf CAD-Daten unterteilt man den Gesamtprozess der Erstellung eines FE-Modells sinnvollerweise in 4 Abschnitte.

1. Zusammenstellung der CAD-Daten der Karosse
2. Vorbereitung der Geometriedaten  
(Überprüfung auf Vollständigkeit, Bereinigung nicht vernetzungsrelevanter Bestandteile)
3. Import der Geometrie und Bearbeitung  
(Transfer der Geometrie in internes Format und Manipulation der Geometrie)
4. Vernetzung und Export des Netzes.

Zusammenfassend ergibt sich aus der Untersuchung folgendes Bild:

- ▶ Bei allen untersuchten eigenständigen Vernetzern tritt beim Import von CAD-Geometrie ein Informationsverlust auf; dies gilt natürlich nicht oder nur in geringerem Umfang bei Vernetzungsfunktionen, die in CAD-Systeme integriert sind.
- ▶ Die Vernetzung und im Besonderen die Vorbereitung der Geometrie erfordert i.A. sehr hohen manuellen Aufwand. Es entsteht der Eindruck, dass die Vernetzer für die Bearbeitung abgeschlossener Projekte vorgesehen sind, die vom Umfang bedeutend kleiner sind als dies bei der Handhabung ganzer Karosserien mit hohem Detaillierungsgrad zu erwarten ist.
- ▶ Im Hinblick auf eine wirtschaftlich notwendige Automatisierung boten die untersuchten Vernetzer keine Methoden, die allgemeingültig und umfassend eine solche Automatisierung erlauben.

- ▶ Eine eventuell notwendige Vernetzung mit Prismenschichten um numerischen Anforderungen an das Netz gerecht zu werden, können nicht alle Werkzeuge anbieten.

#### Schlussfolgerungen:

- ▶ Keines der untersuchten Werkzeuge konnte alle Schritte des Prozesses allgemeingültig abdecken.
- ▶ Am Erfolgversprechendsten schien es, mehrere Werkzeuge miteinander zu kombinieren.
- ▶ Eine bestmögliche Integration und Automatisierung der einzelnen Bearbeitungsschritte ist im Hinblick auf die sehr großen Datenmengen unabdingbar.
- ▶ Für überschaubare Teilmodelle aus wenigen Blechen oder vereinfachten Karosseriemodellen sind viele Methoden und Vorgehensweisen möglich. Ein objektiver Vergleich ist dabei schwierig, da der Aufwand stark von dem Anwendungswissen des Bearbeiters abhängig ist.

Produkt	TGrid	ICEM	ANSYS WB	CATIA Toolkit	ANSA	Hypermesh
<b>Eigenschaft</b>						
<b>Betrachteter Verwendungszweck</b>	Vernetzer	Vernetzer	Arbeitsumgebung für Modell Handhabung, Vernetzung und Simulation	Bearbeitung von Karosseriestrukturen für Volumen und Vernetzung	Vernetzer	Vernetzer
<b>Bestandteile</b>	Softwareprodukt	Softwareprodukt	Softwareprodukt	CATIA V5 CAA Implementierung	Softwareprodukt	Softwareprodukt
<b>CAD-Geometrieimport</b>	nein	ja	ja	ja	ja	ja
<b>Geometriebearbeitung</b>	nein	eingeschränkt	eingeschränkt	ja		
<b>Betrachtete Geometriebasis</b>	Flächen	Flächen	Volumen, Flächen	Volumen, Flächen	Flächen	Volumen, Flächen
<b>Informationsverlust bei CADImport</b>		ja	ja	nein, wenn CATIA Ausgangsbasis verwendet wird	ja	ja
<b>Betrachtete Verfahren</b>	Shell-Netz in Volumen - Volumennetz - Prismennetze		Ausgangsbasis Geometrie	Geometriebearbeitung für detailgenaue Volumennetze	Geometriebearbeitung - Shellnetze	
<b>Elementqualität</b>						
<b>Prismen-Netz (Boundary Layer)</b>	ja	ja	ja	nein		
<b>manueller Aufwand an Testbeispielen</b>	gross	gross	gross	teilw. autom.	reduziert	teilw. autom.
<b>Eignung untersuchter API</b>	(Skripting)	Skripting	Skripting	ja	Skripting	
<b>Automatisierung</b>	nein	gering	nein	ja	ja	
<b>Bearbeiter Qualifikation</b>				Handhabung CATIA, Methoden Toolkit und /CATIA Toolkit, Karosseriebau Verständnis		
<b>Möglichkeit verbundene Netze herzustellen</b>				automatisch		
<b>Domäne</b>	Volumennetze	Hexaeder-Netze	Volumen-, Shell-Netze	Volumennetze		

Tabelle: Vergleich von Vernetzungsmöglichkeiten

Ein Ergebnis aus dem Projekt ist auch, dass ein allgemeingültiger Vergleich zwischen den Vernetzungsmöglichkeiten, welche die verschiedenen Anwendungen bieten, kaum möglich ist. Bei der Auswahl der Werkzeuge spielen sehr viele firmeninterne- und situationsspezifische Randbedingungen eine Rolle. Daher ist die Tabelle im Vergleich zu der internen Bewertung bei CADFEM nur eingeschränkt wiedergegeben. Fast alle Eigenschaften müssen auf die betrachteten Beispiele eingeschränkt bewertet werden. Sowohl bei der grundsätzlichen Eignung und bei der Anwendbarkeit der Funktionen spielt die Qualifikation des Personals eine

entscheidende Rolle. Daher sind Felder, bei denen dieser subjektive Einfluss als dominant empfunden wurde, in dieser Darstellung frei gelassen. Als wichtiger Nebeneffekt hat sich beim Aufstellen des Methodenkatalogs der Know-How Aufbau durch die methodenübergreifende Betrachtungsweise erwiesen. Neben den vielfältigen Funktionen und Methoden, die die verschiedenen Vernetzungstools bieten, sind z.B. auch folgende Punkte bei der Methodenauswahl zu berücksichtigen:

- Erfahrungen bei der Vernetzung von Karosseriemodellen
  - Komplexität
  - Prozesssicherheit
  - Automatisierung
  - Wirtschaftlichkeit
- Festlegungen, Erfordernisse
  - Simulation
  - Prozess
- Beschaffenheit der CAD Daten
  - Struktur( prozessbezogene Datenhaltung)
  - Vollständigkeit
  - Qualität
- Verfügbarkeit verschiedener Werkzeuge
  - Geometriebearbeitung
  - Vernetzung

#### 2.6.4 Nutzen und Verwertung der Ergebnisse

Die bei CADFEM vorhandene Simulationslösung VPS/DRY konnte im Vergleich zu den CFD basierenden Methoden detaillierter betrachtet werden. In ersten Kundenprojekten wurden beide Methoden ergänzend zueinander angewendet.

Nach Einschätzung von CADFEM lassen sich die Methoden der Verdunstungssimulation oder der Schadensprognose zumindest zu einem Großteil auch auf Basis von VPS/DRY implementieren. Damit gibt es eine Grundlage, dieses am Markt anzubieten und bei entsprechender Nachfrage ist das Risiko einer Implementierung deutlich geringer, als es dies ohne das Projekt gewesen wäre.

Bisher hat sich die Nachfrage der Trocknungssimulation fast ausschließlich auf KTL Öfen konzentriert. Die Möglichkeit, Verdunstung bei der Simulation zu berücksichtigen und mit einem Lackierfehlermodell Schadenfälle vorherzusagen, wird hoffentlich die Nachfrage nach der Trocknungssimulation auf andere Öfen ausweiten, die bisher noch nicht mit Hilfe unserer Simulationsmethoden abgedeckt wurden.

Der Know-How Aufbau und die Erfahrungen in den Vernetzungsmethoden lässt eine qualifiziertere Bewertung der eigenen Methoden zu. Für Fälle, in denen vergleichbare Vernetzungsaufgaben einmal basierend auf CATIA Daten und ein anderes Mal basierend auf UG Daten gelöst werden mussten, konnte dieses systematische Wissen schon erfolgreich angewendet werden.