



Der Roadster SL von DaimlerChrysler

Eine Rechnung, die aufgeht

Schnelle und anwendbare Prozesssimulationen

Oliver Tiedje, Böblingen, Günther Behr, Sindelfingen

Die Grundlage von Prozesssimulationen ist das Zusammenspiel von Erfahrung, Anlagenkenntnis, theoretischen Überlegungen und Simulationsrechnungen. Am Beispiel des Umgriffproblems bei der kathodischen Tauchlackierung wird gezeigt, wie schnell praxisrelevante Resultate erzielt werden können.

Prozesssimulationen zur Optimierung von Qualität, Kosten und Zeit sind das Gebot der Stunde. Der enge Zeit- und Kostenrahmen in Planung und Produktion legt ein vorheriges theoretisches Betrachten einer Anlage nahe. Wie kann man aber in dem momentan noch unvollständigen Gerüst der theoretischen Zusammenhänge schon Gewinn aus den Rechnungen ziehen?

Die Lösung liegt in der Kombination von Erfahrung, Versuchen und Kenntnis von Anlagen einerseits, theoretischen Überlegungen und Simulationen andererseits. Mit diesem Zusammenspiel kann ein Baustein einer umfassenderen Prozesssimulation geschaffen werden, der nicht erst in der Zukunft, sondern heute schon zu praxisrelevanten Ergebnissen

führt. Am Beispiel des Umgriffproblems bei der kathodischen Tauchlackierung (KTL) wird erläutert, wie durch die Bündelung von Praxis und Theorie schnelle und kostensparende Resultate erzielt werden.

In diesem Beitrag soll an den vier Stationen „Planung, Optimierung, Fehlerbehebung und Prozessüberwachung“ im „Leben einer Anlage“ der Einsatz von Simulationen diskutiert werden.

Bei der Planung von Anlagen müssen die einzelnen Einflüsse im Vorfeld abgeschätzt werden. Probeaufbauten und Versuche kosten viel Zeit und Geld und sollten, um realisierbare Aussagen zuzulassen, genau vorbereitet werden. Das Wissen, welche Parameter welche Wirkung erzielen, ist unabdingbar.

Während der Optimierung versucht man, gezielt einzelne Größen zu verändern und Probleme zu beheben. Die Anlagen sind aber so komplex, dass selten Änderungen einzelner Größen möglich sind. Unerwünschten Veränderungen durch die Beeinflussung anderer Parameter muss oft wieder entgegengewirkt werden. Um dies zu vermeiden, ist es hilfreich, die einzelnen Einflüsse separat zu kennen.

Bei der Fehlerbehebung ist es wichtig, zunächst genau das Problem zu lokalisieren, bevor Maßnahmen ergriffen werden können. Sonst kann es passieren, dass sehr viele Parameter verändert werden, ohne dass nachher klar ist, welche Maßnahme den Erfolg gebracht hat. Hierbei treten jedoch häufig unbeabsichtigte negative Nebeneffekte auf, die vermieden werden könnten.

Für die Prozessüberwachung ist die Kenntnis der einzelnen Einflüsse – auch in Ausnahmesituationen – nötig. Wenn die Abhängigkeiten bekannt sind, kann von den beobachteten Größen auf die Fehlerursache geschlossen werden. Diese Fehlererkennung lässt sich auch automatisieren, um durch online-Überwachung Fehlproduktionen oder Anlagenstandzeiten zu vermeiden.

Liegen alle Themengebiete sowohl in der Theorie als auch in der Praxis in einer Hand, resultieren enorme Synergieeffekte. Eine gute Planung beschleunigt die Optimierung und vermeidet Fehler. Um-

gekehrt können Erfahrungen aus der Prozessüberwachung oder Optimierung schon bei der Planung neuer Anlagen eingesetzt werden.

Praktischer Nutzen der Prozesssimulation

Diesen unterschiedlichen Aufgabengebieten sind einige Punkte gemeinsam:

- Einflüsse einzelner Prozessparameter sollen unabhängig von einander untersucht werden.
- Die Aussagen sollen schnell und mit praktischer Relevanz bereitgestellt werden.
- Der Kostenrahmen ist stets begrenzt.
- Versuche sind oft auf Grund hoher Kosten, Zeitknappheit oder nicht realisierbarer Versuchsbedingungen nicht möglich.

Virtuelle Untersuchungen können diese Aufgaben bewältigen. Die Simulation der zugrunde liegenden physikalischen und technischen Gegebenheiten ist dabei die Grundlage.

Einen Ansatz hierfür stellt die parameterfreie *Ab-initio*-Ebene dar. Die Spanne reicht von Simulationen einzelner physikalischer Sachverhalte bis zu der allumfassenden Simulation, bei deren Entwicklung in der letzten Zeit große Fortschritte erzielt wurden (mo 1-2/2003). Die Hoff-

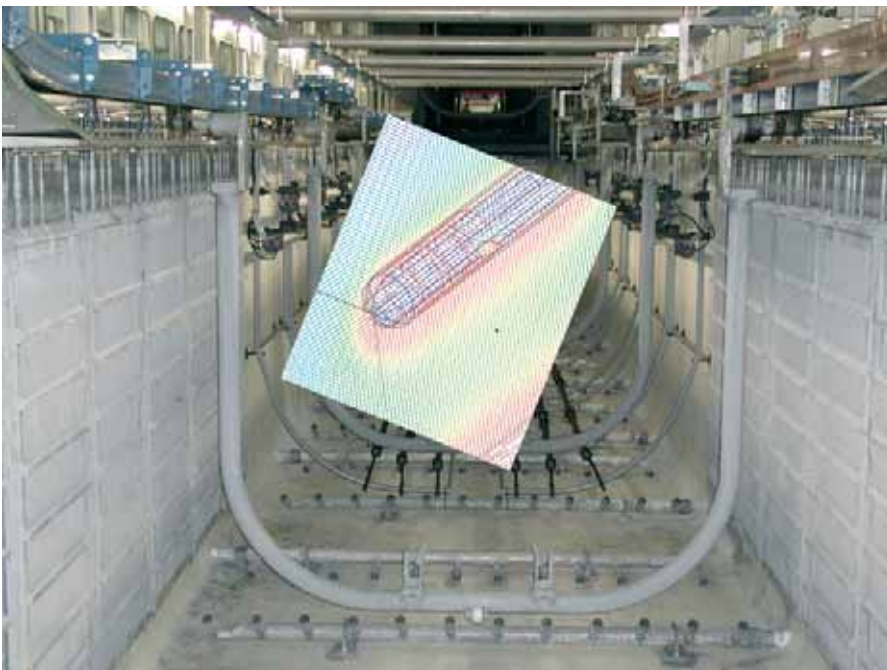


Bild 1. Nähe zwischen Simulation und Anlagentechnik bringt schnell und kostengünstig anwendbare Resultate (Simulation mit „Maxwell 3D“ von Ansoft erzeugt)

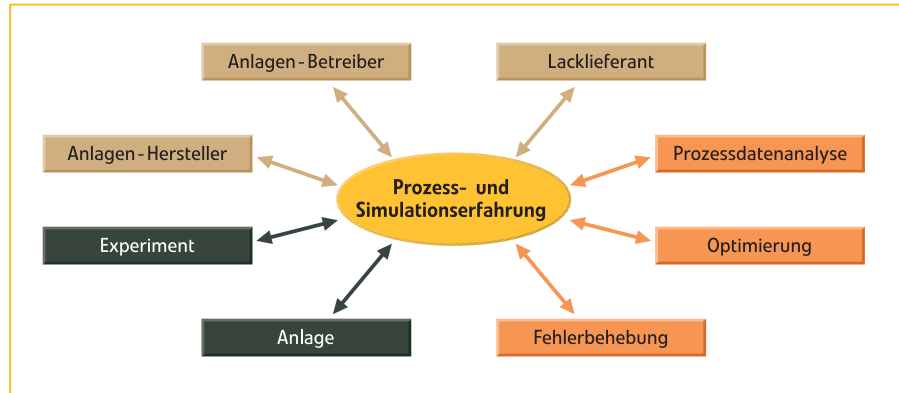


Bild 2. Zusammenarbeit und Koordination beschleunigen die Simulationsergebnisse und schaffen problembezogene Lösungen

nung besteht darin, eine Blackbox zu schaffen, in die man die geplanten Anlagendetails eingibt und die Qualitätsdaten herausbekommt – oder in der man besser noch durch Vorgabe der geforderten Qualitätsdaten die Anlagenauslegung berechnen kann. Dieses Ziel ist noch weit entfernt. So bleibt offen, wie schon heute Bausteine der vollständigen Simulation ihren Beitrag leisten können.

Die Lösung liegt in der Berücksichtigung der Anlagendetails bei der Fragestellung an die Simulation. Am effektivsten ist die Kombination der Simulation mit der Erfahrung aus der Praxis der Anlagen. Dieses Vorgehen soll im Weiteren genauer erläutert werden. Ferner wird

aufgezeigt, wie dadurch erfolgreich Simulationen eingesetzt werden können.

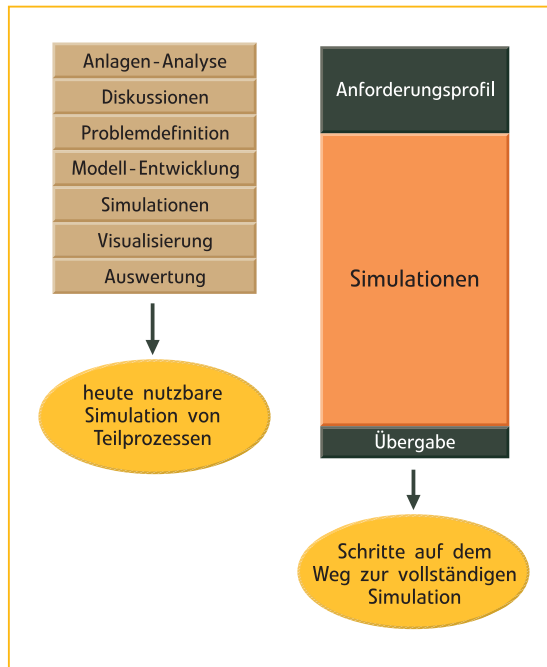
Vorgehensweise bei der Simulation

Sowohl Planer als auch Anlagenbetreiber interessiert, wie die theoretischen Berechnungen für sie von Nutzen sein können oder ob es sich nur um akademische Spielerei handelt. Die Simulationen zeigen dann ihren Nutzen, wenn bei der Durchführung folgende Voraussetzungen beachtet werden: Es sollte eine unabhängige Schnittstelle zwischen dem Anlagenbauer, dem Lacklieferanten und dem Betreiber geschaffen werden. In der Diskussion zwischen den Praktikern und Theoretikern wird das Problem spezifiziert und präzisiert. Oft kann eine einfach durchzuführende Simulation die gestellte Frage beantworten (Bild 2). Es ist sinnvoll, die Simulation unabhängig von den Lacklieferanten und Anlagenherstellern durchzuführen, um die Neutralität zu wahren.

Im Vordergrund muss immer die Lösung des Problems und nicht die Simulation stehen. Durch einen detailliert geplanten Ablauf (Bild 3) entsteht schnell, kostengünstig und anwendernah eine qualitativ hochwertige Lösung. Erst nach der exakten Problemdefinition sollte nach dem geeigneten Modell und der Softwarelösung gesucht werden. Diese muss für das Problem geeignet und einfach bedienbar sein und schnelle Lösungen bringen.

Bei der Kooperation von DaimlerChrysler und Syspilot liegen sowohl die Praxis durch Anlagenplanung, -optimierung, Prozessanalyse und Inbetriebnahmen als auch die Theorie durch Simulationen verschiedener Prozessschritte in

Bild 3. Ablauf einer schnell durchführbaren Simulation (links) und einer möglichst allumfassenden Simulation (rechts)



einer Hand, so dass diese Vorgehensweise in optimaler Weise ermöglicht wird.

Der Auswertung der Ergebnisse muss unbedingt ein zentraler Raum eingeräumt werden, damit die Berechnungsergebnisse anschließend den Anwender erfolgreich unterstützen.

Das Problem des Umgriffs bei der KTL

Eine moderne kathodische Tauchlackierung ist ein hochkomplexer Vorgang mit

vielen noch unbekanntem Teilprozessen – eine komplette Anlage beinhaltet z. B. mehrere Tausend verschiedene Schaltsignale und Parameter, die miteinander korrelieren. Bild 4 zeigt einen kleinen Ausschnitt. Einige Beispiele sollen verdeutlichen, wie zur Analyse und Optimierung von kathodischen Tauchlackierbädern numerische Simulationen von großem Nutzen sein können.

Beispiel 1: Es wurden Simulationen durchgeführt, um quantifizierte Aussagen über Abhängigkeiten zu erreichen, die in



Bild 4. In der kathodischen Tauchlackierung gibt es eine Vielzahl von Einflüssen, die in realen Becken miteinander wechselwirken. In der Simulation lassen sich die einzelnen Einflüsse untersuchen und so gezielt optimale Parameter finden

Versuchen nicht so einfach separiert werden können, da in einer realen Situation immer mehrere Größen variiert werden. In Simulationen wurde herausgefunden, wie groß die einzelnen Einflüsse sind.

Beispiel 2: Versuche zum Umgriffsverhalten im KTL wurden durch Simulationen vorbereitet, um schnell und effektiv die Experimente zu planen. Dadurch konnten mit geringem Aufwand abgesicherte Ergebnisse erzielt werden.

Beispiel 3: Die Optimierung einer Anlage des DaimlerChrysler-Werks in Bremen wurde in Zusammenarbeit mit der Planungsabteilung beschleunigt und abgesichert, indem z. B. im Vorfeld die optimalen Parameter abgeschätzt wurden.

Bei der kathodischen Tauchlackierung besteht unter anderem eine Herausforderung darin, Hohlräume ausreichend zu beschichten. Die Lackabscheidung verläuft mittels elektrischer Felder. In Innenräumen sind diese Felder sehr viel geringer, so dass das Schichtwachstum langsamer abläuft. Ein besonders schwierig zu beschichtendes Bauteil ist der Schweller an der Unterseite der Karosse. In diesem befinden sich Löcher, durch die der Lack in das Innere eindringen soll. Zu optimieren ist hier die Lochgröße. Zum einen müssen die Löcher groß genug sein, um eine ausreichende Beschichtung in diesem korrosionsanfälligen Bauteil zu gewährleisten. Zum anderen darf die Stabilität der Karosse nicht durch die Löcher beeinträchtigt werden.

Zur Optimierung der Beschichtung sind im Bodenbereich des KTL-Beckens zusätzliche freie Anoden (Bild 5) eingebracht. Diese sollen insbesondere für die ausreichende Beschichtung im Schweller und Unterbodenbereich sorgen.

Physikalisch-mathematische Grundlagen

Für die Stromverläufe in einem KTL-Becken sind die Maxwellschen Gleichungen und das Ohmsche Gesetz maßgebend. Das Programmpaket „Maxwell 3D“ der Firma Ansoft, München, löst diese numerisch in hoher Geschwindigkeit und Genauigkeit. Es ermöglicht, viele Rechnungen zu unterschiedlichen Eingangsparametern auf einem handelsüblichen PC (ein Prozessor, 1 GB Arbeitsspeicher) über Nacht durchzuführen.

Das allgemeine Programmpaket für die Maxwellschen Gleichungen ist durch Eingabe von Leitfähigkeiten und geome-

trischen Anordnungen auf das Problem der KTL-Beschichtung anzuwenden, indem die Kirchhoffschen Gesetze zusammen mit dem Ohmschen Gesetz auf die Maxwellgleichungen abgebildet werden. Die Stromdichte $I(s)$ im Inneren des Schwellers kann durch Programmierung von Postprozess-Makros ausgegeben werden. Die Schichtdicke s kann zu jedem Zeitpunkt t durch Lösung einer Differentialgleichung berechnet werden. Die nötigen Parameter werden durch Fitfunktionen an den numerischen Rechnungen gewonnen. Das Abscheideäquivalent \ddot{A} ist dem Lackhersteller bekannt.

Ein Modell für eine Prüfkörper-(Schweller)-Anoden-Anordnung kann in diesem Beispiel durch eine einfache Geometrie die tatsächlichen Verhältnisse ab-

Kontakt

syspilot Industrie Consulting GmbH
71034 Böblingen
Tel. 070 31 / 76 39-261
Fax: 070 31 / 76 39-269
E-Mail: oliver.tiedje@syspilot.de

DaimlerChrysler AG
VBT/HPC B515
71059 Sindelfingen
Tel. 070 31 / 90 25 60
guenther.behr@daimlerchrysler.com

Ansoft GmbH & Co KG
81379 München
Tel. 089 / 68 08 62 50
Fax 089 / 68 08 62 26
E-Mail: achim@ansoft.com

bilden. Die Feldlinienkonzentrationen wurden dann mit der entsprechenden Software „Maxwell 3D“ berechnet, die sich durch Flexibilität und Kostengünstigkeit von anderen Softwarepaketen für diese Anwendung hervorhebt. So wird der Einfluss verschiedener Faktoren – zum Beispiel des Abstands des Schwellers von der Anode – untersucht, um die Anordnung der Anoden zu optimieren.

Praxisbeispiel

Bei der Optimierung des Umbaus einer KTL-Beschichtungsanlage für Sportwagen (Titelbild) bei DaimlerChrysler wurde gemeinsam mit syspilot die Auslegung der Anlage durch Simulationen und prak-



Bild 5. Systemzelle bestehend aus freien Bodenanoden und Dialysezellen

tische Optimierungen unterstützt. Mittels Simulation lässt sich das Schichtwachstum in einem Automobilschweller zu jedem Zeitpunkt, an jedem Ort des Schwellers, in Abhängigkeit wichtiger Parameter (hier z. B. des Abstands Schweller - Anode), bestimmen.

In der Untersuchung ließ sich die Planung durch die Aussagen zum Abstands- und Lochdurchmesserverhalten des Umgriffs unterstützen, so dass der Planungsprozess schneller und sicherer erfolgen konnte. Zur Absicherung der Ergebnisse wurde ein experimenteller Aufbau entwickelt, ein Versuchsplan erstellt und die Resultate stichprobenartig im Technikum reproduziert. Die Vorhersagen wurden bestätigt, Bild 6.

Zusammenfassung

Durch die intensive Kooperation aller Beteiligten, die ganzheitliche Betrachtungsweise und Erfahrungen in Theorie und Praxis auf allen Gebieten der Beschichtungstechnik kann die richtige Pro-

blemstellung bestimmt werden. So werden Kosten gespart, die Qualität erhöht und die Resultate schneller erzielt. Prozesssimulationen unterstützen schon heute Planungsprozesse.

Durch Analyse des Problems und Konzentration auf das Wesentliche kann eine Simulation dem Planer und Anlagenbetreiber eine gute Hilfestellung sein. Die Auswahl der optimalen Softwarelösung ist der nächste Schritt, um mit einem flexiblen Programm schnell und kostengünstig die Rechnungen abzuschließen. Die hier vorgestellten Simulationen umfassten von ersten Gesprächen bis zur Erstellung des Abschlussberichts nur acht Wochen.

Die Autoren dieses Beitrags

Dr. rer. nat. Oliver Tiedje, Jahrgang 1971, studierte in Kiel theoretische Physik und ist seit 2002 Consultant bei der syspilot GmbH in Böblingen.

Dipl.-Ing. Günther Behr, Jahrgang 1949, studierte nach dem Ingenieurstudium Betriebswirtschaft an der Akademie Meersburg und ist seit 1977 im Bereich Oberflächentechnik der DaimlerChrysler AG in Sindelfingen tätig.

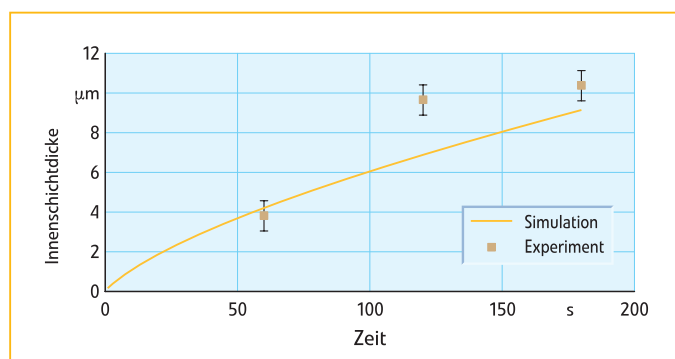


Bild 6. Schichtwachstum in einem Modell-Schweller: Vergleich Theorie - Experiment