
IPA-IAO

Forschung und Praxis

Band 96

Berichte aus dem
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik
und Automatisierung (IPA), Stuttgart,
Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft
und Organisation (IAO), Stuttgart, und
Institut für Industrielle Fertigung und
Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart

Herausgeber: H. J. Warnecke und H.-J. Bullinger



Otto Baumgärtner

**Rechnersimulation des
Beschichtungsprozesses beim
Elektrotauchlackieren –
Anwendung zum Berechnen
des Umgriffs**

Mit 42 Abbildungen

**Springer-Verlag
Berlin Heidelberg New York Tokyo 1986**

Dipl.-Ing. Otto Baumgärtner

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart

Dr.-Ing. H. J. Warnecke

o. Professor an der Universität Stuttgart

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart

Dr.-Ing. habil. H.-J. Bullinger

o. Professor an der Universität Stuttgart

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Stuttgart

D 93

ISBN-13 : 978-3-540-17102-7

e-ISBN-13 : 978-3-642-82923-9

DOI : 10.1007 / 978-3-642-82923-9

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwendung, vorbehalten. Die Vergütungsansprüche des § 54, Abs. 2 UrhG werden durch die „Verwertungsgesellschaft Wort“, München, wahrgenommen.

© Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 1986.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Gesamtherstellung: Copydruck GmbH, Heimsheim
2362/3020—543210

Geleitwort der Herausgeber

Futuristische Bilder werden heute entworfen:

- o Roboter bauen Roboter,
- o Breitbandinformationssysteme transferieren riesige Datenmengen in Sekunden um die ganze Welt.

Von der "mensenleeren Fabrik" wird da gesprochen und vom "papierlosen Büro". Wörtlich genommen muß man beides als Utopie bezeichnen, aber der Entwicklungstrend geht sicher zur "automatischen Fertigung" und zum "rechnerunterstützten Büro". Forschung bedarf der Perspektive, Forschung benötigt aber auch die Rückkopplung zur Praxis - insbesondere im Bereich der Produktionstechnik und der Arbeitswissenschaft.

Für eine Industriegesellschaft hat die Produktionstechnik eine Schlüsselstellung. Mechanisierung und Automatisierung haben es uns in den letzten Jahren erlaubt, die Produktivität unserer Wirtschaft ständig zu verbessern. In der Vergangenheit stand dabei die Leistungssteigerung einzelner Maschinen und Verfahren im Vordergrund. Heute wissen wir, daß wir das Zusammenspiel der verschiedenen Unternehmensbereiche stärker beachten müssen. In der Fertigung selbst konzipieren wir flexible Fertigungssysteme, die viele verkettete Einzelmaschinen beinhalten. Dort, wo es Produkt und Produktionsprogramm zulassen, denken wir intensiv über die Verknüpfung von Konstruktion, Arbeitsvorbereitung, Fertigung und Qualitätskontrolle nach. Rechnerunterstützte Informationssysteme helfen dabei und sollen zum CIM (Computer Integrated Manufacturing) führen und CAD (Computer Aided Design) und CAM (Computer Aided Manufacturing) vereinen. Auch die Büroarbeit wird neu durchdacht und mit Hilfe vernetzter Computersysteme teilweise automatisiert und mit den anderen Unternehmensfunktionen verbunden. Information ist zu einem Produktionsfaktor geworden, und die Art und Weise, wie man damit umgeht, wird mit über den Unternehmenserfolg entscheiden.

Der Erfolg in unseren Unternehmen hängt auch in der Zukunft entscheidend von den dort arbeitenden Menschen ab. Rationalisierung und Automatisierung müssen deshalb im Zusammenhang mit Fragen der Arbeitsgestaltung betrieben werden, unter Berücksichtigung der Bedürfnisse der Mitarbeiter und unter Beachtung der erforderlichen Qualifikationen. Investitionen in Maschinen und Anlagen müssen deshalb in der Produktion wie im Büro durch Investitionen in die Qualifikation der Mitarbeiter begleitet werden. Bereits im Planungsstadium müssen Technik, Organisation und Soziales integrativ betrachtet und mit gleichrangigen Gestaltungszielen belegt werden.

Von wissenschaftlicher Seite muß dieses Bemühen durch die Entwicklung von Methoden und Vorgehensweisen zur systematischen Analyse und Verbesserung des Systems Produktionsbetrieb einschließlich der erforderlichen Dienstleistungsfunktionen unterstützt werden. Die Ingenieure sind hier gefordert, in enger Zusammenarbeit mit anderen Disziplinen, z. B. der Informatik, der Wirtschaftswissenschaften und der Arbeitswissenschaft, Lösungen zu erarbeiten, die den veränderten Randbedingungen Rechnung tragen.

Beispielhaft sei hier an den großen Bereich der Informationsverarbeitung im Betrieb erinnert, der von der Angebotserstellung über Konstruktion und Arbeitsvorbereitung, bis hin zur Fertigungssteuerung und Qualitätskontrolle reicht. Beim Materialfluß geht es um die richtige Aus-

wahl und den Einsatz von Fördermitteln sowie Anordnung und Ausstattung von Lagern. Große Aufmerksamkeit wird in nächster Zukunft auch der weiteren Automatisierung der Handhabung von Werkstücken und Werkzeugen sowie der Montage von Produkten geschenkt werden.

Von der Forschung muß in diesem Zusammenhang ein Beitrag zum Einsatz fortschrittlicher intelligenter Computersysteme erfolgen. Planungsprozesse müssen durch Softwaresysteme unterstützt und Arbeitsbedingungen wissenschaftlich analysiert und neu gestaltet werden.

Die von den Herausgebern geleiteten Institute, das

- Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart (IFF),
- Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA),
- Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO)

arbeiten in grundlegender und angewandter Forschung intensiv an den oben aufgezeigten Entwicklungen mit. Die Ausstattung der Labors und die Qualifikation der Mitarbeiter haben bereits in der Vergangenheit zu Forschungsergebnissen geführt, die für die Praxis von großem Wert waren. Zur Umsetzung gewonnener Erkenntnisse wird die Schriftenreihe "IPA-IAO - Forschung und Praxis" herausgegeben. Der vorliegende Band setzt diese Reihe fort. Eine Übersicht über bisher erschienene Titel wird am Schluß dieses Buches gegeben.

Dem Verfasser sei für die geleistete Arbeit gedankt, dem Springer-Verlag für die Aufnahme dieser Schriftenreihe in seine Angebotspalette und der Druckerei für saubere und zügige Ausführung. Möge das Buch von der Fachwelt gut aufgenommen werden.

H. J. Warnecke · H.-J. Bullinger

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) in Stuttgart.

Herrn Professor Dr.-Ing. H.-J. Warnecke, dem Leiter des IPA sowie des Instituts für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart, danke ich besonders für seine wohlwollende Unterstützung und Förderung, die zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen haben.

Herrn Professor Dr. rer.nat. L. Dulog, Leiter des 2. Instituts für Technische Chemie der Universität Stuttgart danke ich für die Bereitschaft zur Durchsicht des Manuskripts und zur Übernahme des Mitberichts.

Weiterhin danke ich Herrn Professor Dr. H. Roßwag, Leiter des Fachbereichs Oberflächentechnik und Werkstoffkunde der Fachhochschule Aalen für die kritische Durchsicht der Arbeit und die wertvollen fachlichen Anregungen, die sich daraus ergaben.

Darüberhinaus möchte ich mich bei allen Mitarbeitern des IPA bedanken, die zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben. Besonders gilt dies für Herrn Dr. K. Mertz für die Diskussionsbereitschaft und die guten Hinweise beim Verfassen der Arbeit, sowie Frau Scheunemann und Frau Schreiber bei der Erstellung des Manuskripts. Weiterhin gilt mein besonderer Dank Herrn Iwan Guntero für die Unterstützung bei der Durchführung der Versuche.

	Seite
01 Inhaltsverzeichnis	9
02 Formelzeichen, Variablennamen, Einheiten von verwendeten Grössen	12
1 Einführung	14
1.1 Bedeutung des Elektrotauchlackierens (ETL)	14
1.2 Abscheidemechanismen	15
1.3 Umgriff	19
1.4 Berechnungsverfahren	20
1.5 Anwendungsmöglichkeiten	22
2 Berechnungsprogramm zur Simulation der ETL-Beschichtung	24
2.1 Simulation des Beschichtungsvorganges	24
2.2 Berechnen der elektrischen Potentialverteilung	25
2.2.1 Auswahl des Berechnungsverfahrens	25
2.2.2 Berechnen von Potentialfeldern nach der Methode der Finiten Elemente	26
2.3 Berechnen der Lackabscheidung	30
2.3.1 Stromdichteverteilung, Lackabscheidung, Schichtwiderstände	30
2.3.2 Erfassen des instationären Beschichtungsprozesses	33
2.3.3 Anfangsladung und Mindeststromdichte	36
2.3.4 Inhomogenitäten im elektrischen Feld	37
2.3.5 Spannungsprogramme	38
2.3.6 Dreidimensionale Erfassung komplexer Geometrien	40
2.4 Aufbau des Rechnerprogramms	43
2.4.1 Steuerung des Berechnungsablaufs, Eingabedaten	44

	Seite
2.4.2 Berechnen der Potentialverteilung	46
2.4.3 Berechnen der Schichtdickenverteilung	46
2.4.4 Ausgabeprogramme	46
2.5 Lackparameter	48
2.5.1 Bedeutung der Lackparameter	48
2.5.2 Messmethoden	50
3 Berechnen des Umgriffs und dessen Abhängigkeiten mit Hilfe des Simulationsprogramms	55
3.1 Betrachtete Einflussgrößen	57
3.2 Umgriffsmodell	59
3.3 Kenngrößen für den Umgriff	62
3.4 Umgriffsberechnungen	65
3.4.1 Auswahl von Lacksystemen	65
3.4.2 Experimentelle Bestimmung der Lackparameter	66
3.4.3 Parametervariationen	68
3.4.4 Ergebnisausgabe	70
3.4.5 Vergleich von Berechnungen und Versuchen	74
3.5 Ergebnisse der Umgriffsberechnungen	81
3.5.1 Graphische Darstellungen der Abhängigkeiten des Umgriffs	81
3.5.2 Mathematische Darstellungen mit Hilfe von Regressionsanalysen	92
3.6 Bedeutung der Ergebnisse für die Praxis	96
4 Darstellung der Feldverschiebung während der Beschichtung	97
4.1 Berechnungen zur Darstellung der Feldverschiebung	98

	Seite
5 Fehlerbetrachtungen	102
5.1 Fehler beim Berechnungsverfahren	102
5.2 Fehler bei der Versuchsdurchführung	104
6 Zusammenfassung	107
7 Literaturverzeichnis	109