Ein Beitrag zur Optimierung von elektrochemisch hergestellten Oberflächen im Werkzeug- und Formenbau

Von der Fakultät Maschinenbau

der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. Christian Gerth

aus Braunschweig

Hauptberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. H.c. mult

Engelbert Westkämper

Mitbericht: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Eberhard Göde

Tag der Einreichung: 23. November 2005

Tag der mündlichen Prüfung: 10. Juli 2006

Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart 2006

I Verzeichnis

II	Abkürzungen und Formelzeichen	13
Ш	Abbildungsverzeichnis	. 18
IV	Tabellenverzeichnis	. 22
1	Einleitung	. 23
1.1	Aufgabenstellung und Zielsetzung	25
1.2	Vorgehensweise	26
2 2.1	Bedeutung der Oberfläche im Werkzeug- und Formenbau Standzeiterhöhung	
2.2	Topographie	30
2.3	Oberflächen- und Schichttechnologien im Werkzeug- und Formenbau	31
3	Einsatz des elektrochemischen Beschichtungsverfahren im Werkzeug- und Formenbau	
3.1	Vorteile gegenüber anderen Verfahren	37
3.2	Mögliche industrielle Einsatzfelder im Werkzeug- und Formenbau	37
3.2.1	Einsatz des elektrochemischen Beschichtens in Rapid Tooling Prozessen	37
3.3	Voraussetzungen für den Einsatz im Werkzeug- und Formenbau	38
4	Die Theorie des elektrochemischen Beschichtungs- prozesses	40
4.1	Grundlagen des elektrochemischen Beschichtungsprozesses	40
4.2	Atomistische Betrachtung des Ionentransportes	42
4.2.1	Migration	44
4.2.2	Diffusion	45
4.2.3	Konvektion	47
4.3	Elektrodenvorgänge und damit verbundene Effekte	48

4.4	Makroskopische Schichtdickenverteilung	. 50
4.5	Theoretische Schichtdickenberechnung	. 52
5	Mathematische Modelle zur Berechnung der relevanten Prozessparameter beim elektrochemischen Beschichten	55
5.1	Mathematisches Modell zur Berechnung elektrischer und magnetischer Felder	. 55
5.2	Mathematisches Modell zur Berechnung des elektrischen Feldes beim elektrochemischen Beschichtungsprozess	. 61
5.3	Mathematisches Modell zur Berechnung hydrodynamischer Strömungszustände	. 62
5.4	Mathematisches Modell zur Berechnung des hydrodynamischen Strömungszustandes beim elektrochemischen Beschichtungsprozess	. 67
6	Computermodell zur Simulation des elektrochemischen Beschichtungsprozesses	68
6.1	Auswahl des Computermodells	. 69
6.2	Finite-Volumen-Methode (FVM)	.71
6.3	Implementierung der mathematischen Beziehungen in ein Computermodell	. 73
6.4	Koppelung der Modelle	.74
6.5	Beschreibung der verwendeten Software	. 76
7	Experimentelle Ermittlung der spezifischen Elektrolytkennzahlen	79
7.1	Eigener Versuchsaufbau zur Ermittlung von Elektrolytkennzahlen	. 80
7.2	Zu untersuchende Elektrolytsysteme	. 82
7.2.1	Nickel-Phosphor-Elektrolyt (NIPHOS 966)	. 83
7.2.2	Alkanisch cyanidfreier Kupferelektrolyt (µChem 510 Z)	. 85
7.3	Ermittlung des Potentialsprungs an den Elektrodenoberflächen	. 85
7.3.1	Versuchsanordnung und Berechnung des Potentialsprunges	. 85
7.3.2	Versuchsergebnisse für den Nickel-Phosphor- und den Kupferelektrolyten	. 87

7.4	Ermittlung des Einflusses der Hydrodynamik auf das	
	Beschichtungsergebnis	88
7.4.1	Versuchsreihe Nickel-Phosphor-Elektrolyt	91
7.4.2	Versuchsreihe Kupfer-Elektrolyt	95
8	Implementierung und Verifikation der Simulation	97
8.1	Implementierung der spezifischen Elektrolytkennwerte in das	
	Computermodell	97
8.1.1	Implementierung des spezifischen Beschichtungsverhaltens des Kupferelektrolyten (µChem 510 Z)	97
8.1.2	Implementierung des spezifischen Beschichtungsverhaltens des Nickel-	
	Phosphor-Elektrolyten (NIPHOS 966)	98
8.2	Simulation der Beschichtung eines Werkstücks	. 101
8.2.1	Simulationsergebnis für den Kupferelektrolyt (μChem 510 Z)	. 102
8.2.2	Simulationsergebnis für den Nickel-Phosphor-Elektrolyten (NIPHOS 966).	. 107
8.3	Verifikation der Simulation	. 111
9	Wirtschaftlicher Rapid-Tooling-Prozess durch elektro-	44-
9.1	chemische Beschichtung mit formangepasster Anode Prozesskette des Rapid Tooling	
9.2	Verbesserungs- und Einsparpotentiale in der Lasersinter-Prozesskette	. 117
9.3	Voraussetzungen für den Einsatz des elektrochemischen Beschichtens be	im
	Lasersintern	. 119
9.4	Lösungsansatz durch flexible Anodengestaltung	. 120
9.5	Elektrochemisches Beschichten von lasergesinterten Werkstücken mittels	
	eines flexiblen Anodensystems	. 122
9.5.1	Flexibles Anodensystem	. 123
9.5.2	Beschichtung mit formangepasster und ebener Anodengeometrie	. 125
9.6	Mögliche Optimierungspotentiale durch eine gezielte elektrochemische	
	Beschichtung im Rapid Tooling	. 130

9.6.1	lasergesinterten und gefrästen Oberflächen	131
9.6.2	Standzeiterhöhung der beschichteten Formteile	133
10	Prozesskettensteuerung durch vernetzte digitale Teilprozesssimulation in der industriellen Teilefertigung	134
11	Zusammenfassung und Ausblick	137
12	Summary	139
13	Literaturverzeichnis	141
14	Anhang	152
14.1	Zeichnungssatz des Verfahrensraums Vorversuche	152
14.2	Zeichnungssatz des Verfahrensraums für das formangepasste Anodesystem	164
14.3	Auszug aus dem Stoffdatenblatt NIPHOS 966	170
14.4	Auszug aus dem Stoffdatenblatt μ Chem 510 Z	172

1 Einleitung

In den letzten Jahren ist die Wettbewerbssituation, vor allem für die verarbeitende Industrie, durch einen sich verstärkenden Kosten- und Innovationsdruck immer problematischer geworden. [Westkämper 2002a] Auf Grund der Globalisierung der Märkte und des sich verschärfenden internationalen Wettbewerbs lassen sich Kostensteigerungen nur bedingt über erhöhte Preise am Markt durchsetzen. [Reinhart 2004] Deshalb sind die Unternehmen zu einer ständigen Überprüfung und Verbesserung ihrer Geschäftsprozesse gezwungen, um durch permanente Rationalisierungsmaßnahmen im internationalen Kostenwettbewerb bestehen zu können. Darüber hinaus zwingt der beschleunigte Technologiewandel in immer kürzeren Zeiträumen zu einer Anpassung der Produkte an den neuesten technologischen Stand. Außerdem müssen Unternehmen, wenn sie langfristig erfolgreich sein wollen, auf die differenzierten Kundenwünsche eingehen und sich dem schnell ändernden Kundengeschmack anpassen. Daraus resultieren kürzere Variantenvielfalt Produktzykluszeiten bei zunehmender und sinkenden Gesamtstückzahlen. [Westkämper 2004b]

Als Schlüsselkennzahl für die schnelle Markteinführung von neuen Produkten und damit für den Unternehmenserfolg erweist sich deshalb der Zeitraum des so genannten "time to market". [Wildemann 2002] Er sollte so kurz wie möglich sein. [Grimm 2002] Dies erfordert eine durchgängige Vernetzung aller Produktentstehungsprozesse der Produktentwicklung die von Produktionsplanung bis zur Produktion selbst. Kurze Markteinführungszeiten und der permanente Kostendruck machen nicht nur eine schnelle Umsetzung von Produktideen in marktgängige Produkte erforderlich sondern in der Regel auch die parallele Entwicklung neuer Fertigungstechnologien. [Eversheim 2005] Daher ist der Produktinnovationszyklus eng mit dem Prozessinnovationszyklus (Abbildung 1-1).

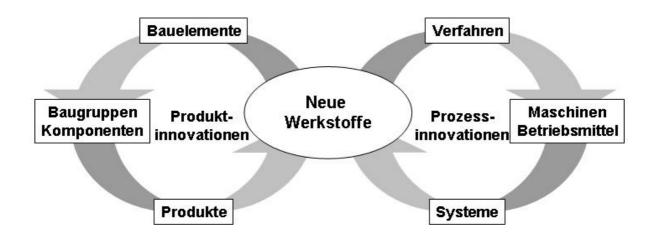


Abbildung 1-1: Innovationszyklen in der Technik [Westkämper 2002a]

In der Entwicklungsphase kommt dem Prototypenbau eine zentrale Bedeutung zu. Er dient der Absicherung der Produktfunktionalität und des Produktionsprozesses. Dabei ist die Herstellung möglichst seriennaher Bauteile in dieser Phase kostspielig und zeitaufwendig, insbesondere, wenn spezifische Betriebsmittel wie z.B. Werkzeuge und Formen dafür notwendig sind. [Pieverling 2003]

Unter dem Begriff "Rapid Tooling" wurden in den letzten Jahren Fertigungsstrategien entwickelt, die ein schnelles und kostengünstiges Herstellen solcher Betriebsmittel erlauben sollen. [Reinhart 1998] Dabei gewinnen generative Verfahren wie das Lasersintern zunehmend an Bedeutung. [Abele 2004] Doch weder das für einen solchen Prozess geeignete Material noch der zu Grunde liegende Fertigungsprozess sind derzeit in der Lage, die an Prototypenwerkzeuge gestellten Anforderungen in Bezug auf Standzeit, Oberflächengüte, Korrosionsbeständigkeit und Formgenauigkeit zu erfüllen. [Aulbur 2004] Abhilfe könnte eine maßgeschneiderte Beschichtung schaffen, mit deren Hilfe sich diese Nachteile ausgleichen ließen.

Als anlagentechnisch einfaches und deshalb weit verbreitetes und kostengünstiges Verfahren zur Erzeugung solcher Funktionsoberflächen bietet sich das elektrochemische Beschichten (Galvanisieren) an, bei dem man je nach Wahl des Elektrolyten unterschiedlichste Legierungen auf das Grundmaterial aufbringen kann. [Kanani 2000] Dabei lassen sich in relativ kurzer Zeit erhebliche Schichtdicken bei niedrigen Prozesstemperaturen abscheiden, so dass Gefügeveränderungen im Grundwerkstoff und damit Formveränderungen nicht befürchtet werden müssen. Der kostenmäßige Vorteil relativiert sich jedoch, weil zur Erzeugung gleichmäßiger

Schichtdicken kostenintensive Zusatzbetriebsmittel wie z.B. Formanoden notwendig sind. Auf Grund dieser Randbedingungen kommt die Galvanik vornehmlich dann zum Einsatz, wenn eine gleichmäßige Schichtdicke nicht erforderlich oder die Anfertigung einer teuren Formanode auf Grund der zu beschichtenden Stückzahlen wirtschaftlich sinnvoll ist. Anderenfalls müssen die endgültigen Werkstückmaße durch aufwendiges Nacharbeiten, z.B. durch Schleifen, erreicht werden. Es liegt deshalb nahe, nach Lösungsmöglichkeiten zu suchen und den galvanischen Prozess so zu gestalten, dass man endkonturgenaue Werkstücke kostengünstig ohne Nacharbeit herstellen kann. Die vorliegende Arbeit zeigt dazu einige neue Wege auf.

1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Produzierende Unternehmen sollten ihre Fertigungsprozesse in vernetzten und wandlungsfähigen Prozessketten organisieren um wirtschaftlich und flexibel auf die sich schnell ändernden Markterfordernisse reagieren zu können. [Bullinger 2003] Dies gilt besonders auch für den Werkzeug- und Formenbau. Deshalb sind dort Strategien wie das Rapid Tooling gefragt, die eine schnelle und kostengünstige Herstellung von Vor- und Kleinserienwerkzeugen ermöglichen. [Shellabear 2000] Wie eingangs beschrieben, liegen die derzeitigen Defizite, besonders der mittels generativen Fertigungsverfahren hergestellten Werkzeuge, im Bereich der Standfestigkeit und Oberflächentopographie. [Lohner 2002] Diese könnten durch eine gezielte Beschichtung der Oberfläche kompensiert werden. Hierzu bietet sich der elektrochemische Beschichtungsprozess an. Um seine Vorteile in dem heute geforderten flexiblen Fertigungsprozess des Rapid Toolings nutzen zu können sind folgende Voraussetzungen zu erfüllen:

- Eine qualitative Vorhersage des Beschichtungsergebnisses ohne aufwendige Vorversuche.
- Eine möglichst homogene Beschichtung über die gesamte Bauteiloberfläche.
- Ein wirtschaftliches Herstellen der benötigten Formanoden.
- Eine möglichst geringe Nacharbeit.

Die vorliegende Arbeit hat das Ziel, ein Verfahren anzugeben, das rechnergestützt die wesentlichen Prozessparameter für die elektrochemische Beschichtung ermittelt und ein flexibles, auf unterschiedliche Werkstückgeometrien anpassbares

Anodenkonzept zur wirtschaftlichen Beschichtung von lasergesinterten Bauteilen zu beschreiben. Damit ließe sich der galvanische Prozess auch bei Rapid-Tooling-Strategien wirtschaftlich einsetzen.

1.2 Vorgehensweise

Ausgehend von den qualitativen Anforderungen werden die notwendigen Funktionseigenschaften einer Oberflächenschicht bei Werkzeugen und Formen aufgezeigt. Ein Überblick über die gängigen Beschichtungsverfahren und ihre spezifischen Prozessbedingungen und Einsatzgebiete schließt sich an sowie eine Bewertung in Bezug auf ihren wirtschaftlichen Einsatz im Werkzeug- und Formenbau. Insbesondere wird dabei auf die elektrochemische Beschichtung und die Voraussetzungen für deren Einsatz in diesem Gebiet eingegangen.

Eine theoretische Betrachtung der Wirkzusammenhänge beim elektrochemischen Beschichtungsprozess bildet die Grundlage für ein numerisches Modell, mit dessen Hilfe sich der Schichtaufbau bei unterschiedlichen Prozessbedingungen theoretisch bestimmen lässt. lm praktischen Versuch mit zwei unterschiedlichen Elektrolytsystemen erfolgt seine Verifizierung. Darauf aufbauend wird gezeigt, dass dieses Simulationsmodell und das Konzept einer flexiblen, auf unterschiedliche Werkstückgeometrien anpassbaren Anode, den kostengünstigen Einsatz der elektrochemischen Beschichtung im Werkzeug- und Formenbau ermöglichen. Die hieraus resultierenden qualitativen und wirtschaftlichen Vorteile werden an Hand von exemplarischen Beispielen lasergesinterter Bauteile dargestellt. Ein Ausblick auf mögliche Erweiterungen dieses Ansatzes bildet den Abschluss der Arbeit.

11 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit hat gezeigt, dass sich beim Rapid Tooling besonders für lasergesinterte Werkzeuge und Formen neue Möglichkeiten durch eine gezielte elektrochemische Beschichtung ergeben.

Dazu wurden im ersten Teil der Arbeit die qualitätsbestimmenden physikalischen und chemischen Einflussgrößen dieses Beschichtungsverfahrens herausgearbeitet. Dabei konnte gezeigt werden, dass hydrodynamische Effekte neben der E-**Einfluss** Feldausprägung einen wesentlichen auf die Qualität des Beschichtungsergebnisses ausüben. Auf diese Erkenntnisse baut ein Simulationsmodell auf, das sich wesentlich von bisher bekannten Ansätzen unterscheidet. Im realen Versuch wurde die Wirksamkeit der Simulation mit zwei unterschiedlichen Elektrolyten nachgewiesen.

Um die geforderten gleichen Strömungs- und E-Feldbedingungen an jedem Punkt der Werkstückoberfläche zu gewährleisten, sind der Werkstückgeometrie angepasste Anoden notwendig. Da die Herstellung solcher werkstückgebundenen Anoden teuer ist, lohnt deren Einsatz bisher nur in der Großserie. Ein flexibles, auf unterschiedlich geformte Oberflächen einstellbares Anodensystem könnte diese Beschränkung aufheben. Das Prinzip eines solchen, für verschiedene Werkstücke nutzbaren Anodensystems wird im zweiten Teil der Arbeit beschrieben und sein Einsatz mit einer realen Beschichtung erfolgreich verifiziert.

Durch generative Verfahren hergestellte Formwerkzeuge konnten bisher die an Prototypenwerkzeuge gestellten Qualitätsanforderungen in der Regel nur mit erheblichem Nacharbeitsaufwand erfüllen. Mittels gezielter elektrochemischer Beschichtung und mit der in dieser Arbeit beschriebenen Vorgehensweise ließen sich bei lasergesinterten Formwerkzeugen, die vor allem im Prototypenbau von Kunststoffbauteilen von großem Interesse sind, deren bisherige Qualitätsmängel Sowohl Simulationsmodell preisgünstig beseitigen. das vorgestellte zur elektrochemischen Beschichtung als auch das Konzept Formanodensystems machen weitere Anwendungen denkbar. So könnte man mittels Simulation und entsprechend eingestellter Anode gezielt Maßabweichungen durch elektrochemisches Beschichten ausgleichen. Damit wäre ein rechnergestützter

Qualitätsregelkreis, in dem alle Teilprozesse einer Fertigungsprozesskette digital abgebildet sind, vollständig zu schließen.

12 Summary

A contribution to optimizing electro-chemically manufactured surfaces for tool and mould making

Manufacturing enterprises should organize their manufacturing processes in networked and versatile networks in order to be able to react to fast changing market requirements in an economic and flexible way. This is also valid for tool and mould making. Therefore, in this field strategies such as rapid tooling are required which allow for a fast and low-cost manufacturing of small or pilot series.

This dissertation shows a new approach in the field of rapid tooling by applying directed electro-chemical layers to laser-sintered tools and moulds in particular

In the first part of this study, those physical and chemical parameters of this coating method which may have an effect on quality are worked out. It can be demonstrated that apart from the characteristics of the electric field, hydro-dynamic effects decisively influence the quality of a coating. A simulation model, which fundamentally differs from current approaches, is based on these results. The effectiveness of the simulation has been proved in experiments with two different electrolytes.

Anodes have to be adapted to the geometry of a work-piece in order to ensure the required identical conditions concerning current and electrical field in every point of the work-piece's surface. Due to the costs of manufacturing, such work-piece dependent anodes, have up to now have been employed in line production only. This constraint could be compensated by a flexible anode system adjustable to variously shaped surfaces. In the second part of this study, the principle of such an anode system usable for different work-pieces is described and its use in a real coating process successfully verified.

Moulding tools manufactured by generative methods have usually so far only met the quality requirements for prototypes when reworked with considerable effort. The directed electro-chemical coating and the approach described in this dissertation are a cheap way to eliminate existing quality defects of laser-sintered moulding tools, as they are used for making prototypes of plastic parts in particular. The introduced

model of electro-chemical coating simulation as well as the concept of a flexible anode system both allow for new applications. Using the simulation and a respectively adjusted anode, electro-chemical coating could, for example, help compensating for deviations. Thus, a computer aided quality control loop, digitally representing all sub-processes of a manufacturing chain, could be closed entirely.