

# **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

# IPA-IAO Forschung und Praxis

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

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper  
und

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E.h. mult. Dr. h.c. mult. Hans-Jörg Bullinger  
und

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath

Christian Gerth

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

Nr. 438

Dr.-Ing. Christian Gerth

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

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper

ord. Professor an der Universität Stuttgart

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

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E.h. mult. Dr. h.c. mult. Hans-Jörg Bullinger

ord. Professor an der Universität Stuttgart

Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft, München

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath

ord. Professor an der Universität Stuttgart

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

D 93

ISBN 3-936947-91-0 Jost Jetter Verlag, Heimsheim

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils gültigen Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Jost Jetter Verlag, Heimsheim 2006.

Printed in Germany.

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.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Druck: printsystem GmbH, Heimsheim

## Geleitwort der Herausgeber

Über den Erfolg und das Bestehen von Unternehmen in einer marktwirtschaftlichen Ordnung entscheidet letztendlich der Absatzmarkt. Das bedeutet, möglichst frühzeitig absatzmarktorientierte Anforderungen sowie deren Veränderungen zu erkennen und darauf zu reagieren.

Neue Technologien und Werkstoffe ermöglichen neue Produkte und eröffnen neue Märkte. Die neuen Produktions- und Informationstechnologien verwandeln signifikant und nachhaltig unsere industrielle Arbeitswelt. Politische und gesellschaftliche Veränderungen signalisieren und begleiten dabei einen Wertewandel, der auch in unseren Industriebetrieben deutlichen Niederschlag findet.

Die Aufgaben des Produktionsmanagements sind vielfältiger und anspruchsvoller geworden. Die Integration des europäischen Marktes, die Globalisierung vieler Industrien, die zunehmende Innovationsgeschwindigkeit, die Entwicklung zur Freizeitgesellschaft und die übergreifenden ökologischen und sozialen Probleme, zu deren Lösung die Wirtschaft ihren Beitrag leisten muss, erfordern von den Führungskräften erweiterte Perspektiven und Antworten, die über den Fokus traditionellen Produktionsmanagements deutlich hinausgehen.

Neue Formen der Arbeitsorganisation im indirekten und direkten Bereich sind heute schon feste Bestandteile innovativer Unternehmen. Die Entkopplung der Arbeitszeit von der Betriebszeit, integrierte Planungsansätze sowie der Aufbau dezentraler Strukturen sind nur einige der Konzepte, welche die aktuellen Entwicklungsrichtungen kennzeichnen. Erfreulich ist der Trend, immer mehr den Menschen in den Mittelpunkt der Arbeitsgestaltung zu stellen - die traditionell eher technokratisch akzentuierten Ansätze weichen einer stärkeren Human- und Organisationsorientierung. Qualifizierungsprogramme, Training und andere Formen der Mitarbeiterentwicklung gewinnen als Differenzierungsmerkmal und als Zukunftsinvestition in *Human Resources* an strategischer Bedeutung.

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.

Die von den Herausgebern langjährig geleiteten Institute, das

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

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 Jost Jetter 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.

Engelbert Westkämper    Hans-Jörg Bullinger    Dieter Spath

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF) der Universität Stuttgart und am Fraunhofer Institut Produktionstechnik und Automatisierung (IPA).

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Engelbert Westkämper, dem Direktor des IFF und des IPA für die Anregung zu dieser Arbeit und ihrer Förderung. Vor allem danke ich ihn aber für die vertrauensvolle Zusammenarbeit als sein Assistent und für die vielfältigen Erfahrungen, die ich bei ihm sammeln konnte.

Herrn Prof. Eberhard Göde danke ich für die Übernahme des Zweitberichts.

Durch ihren persönlichen Einsatz bei der Erstellung und Inbetriebnahme der Versuchsanlage sowie ihrer Mithilfe bei der Durchführung der Versuche und der Prozesssimulation haben die Herren Walter Mergen, Dalibor Dudic und Frank Herbrig wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Dafür danke ich ihnen besonders.

Nicht zu letzt möchte ich den Herrn Dr.-Ing. Andreas Scheibe und meinem Vater, Herrn Dr.-Ing. Hans-Heinrich Gerth für die ständige Diskussionsbereitschaft und die konstruktiven Anregungen während der Erstellung dieser Arbeit danken.





# I Verzeichnis

<b>II</b>	<b>Abkürzungen und Formelzeichen.....</b>	<b>13</b>
<b>III</b>	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>18</b>
<b>IV</b>	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>22</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>23</b>
1.1	Aufgabenstellung und Zielsetzung .....	25
1.2	Vorgehensweise.....	26
<b>2</b>	<b>Bedeutung der Oberfläche im Werkzeug- und Formenbau ....</b>	<b>27</b>
2.1	Standzeiterhöhung .....	29
2.2	Topographie .....	30
2.3	Oberflächen- und Schichttechnologien im Werkzeug- und Formenbau .....	31
<b>3</b>	<b>Einsatz des elektrochemischen Beschichtungsverfahrens im Werkzeug- und Formenbau.....</b>	<b>36</b>
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
<b>4</b>	<b>Die Theorie des elektrochemischen Beschichtungs- prozesses .....</b>	<b>40</b>
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
<b>5</b>	<b>Mathematische Modelle zur Berechnung der relevanten Prozessparameter beim elektrochemischen Beschichten .....</b>	<b>55</b>
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
<b>6</b>	<b>Computermodell zur Simulation des elektrochemischen Beschichtungsprozesses.....</b>	<b>68</b>
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
<b>7</b>	<b>Experimentelle Ermittlung der spezifischen Elektrolytkennzahlen .....</b>	<b>79</b>
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 ( $\mu$ Chem 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
<b>8</b>	<b>Implementierung und Verifikation der Simulation.....</b>	<b>97</b>
8.1	Implementierung der spezifischen Elektrolytkennwerte in das Computermodell .....	97
8.1.1	Implementierung des spezifischen Beschichtungsverhaltens des Kupferelektrolyten ( $\mu$ Chem 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 ( $\mu$ Chem 510 Z) .....	102
8.2.2	Simulationsergebnis für den Nickel-Phosphor-Elektrolyten (NIPHOS 966) ..	107
8.3	Verifikation der Simulation .....	111
<b>9</b>	<b>Wirtschaftlicher Rapid-Tooling-Prozess durch elektrochemische Beschichtung mit formangepasster Anode.....</b>	<b>115</b>
9.1	Prozesskette des Rapid Tooling .....	115
9.2	Verbesserungs- und Einsparpotentiale in der Lasersinter-Prozesskette .....	117
9.3	Voraussetzungen für den Einsatz des elektrochemischen Beschichtens beim 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	Einbringung der Mikrorauigkeit durch elektrochemische Beschichtung von lasergesinteren und gefrästen Oberflächen .....	131
9.6.2	Standzeiterhöhung der beschichteten Formteile .....	133
<b>10</b>	<b>Prozesskettensteuerung durch vernetzte digitale Teilprozesssimulation in der industriellen Teilefertigung ....</b>	<b>134</b>
<b>11</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>137</b>
<b>12</b>	<b>Summary .....</b>	<b>139</b>
<b>13</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>141</b>
<b>14</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>152</b>
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 $\mu$ Chem 510 Z.....	172

## II Abkürzungen und Formelzeichen

### Abkürzungen

Abb.	Abbildung
ad.	adsorbiertes
Al	Aluminium
C	Kohlenstoff
Cr	Chrom
CAD	Computer Aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
CVD	chemical vapour deposition
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
EMK	Elektromotorische Kraft
FEM	Finite-Element-Methode
FVM	Finite-Volumen-Methode
H	Wasserstoff
HV	Härte nach Vickers
LIGA	Lithographie, Galvanik, Abformung
Me	Metallion
Mio.	Millionen
Mrd.	Milliarden
Ni	Nickel
O	Sauerstoff
P	Phosphor
PVD	physical vapour deposition

sogn.	sogenannt
Temp.	Temperatur
Ti	Titan
2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional

## Formelzeichen

### *Lateinische Buchstaben*

Größe	Einheit	Bezeichnung
$A$	[m <sup>2</sup> ]	Kontrollfläche
$a$	[m]	Abstand
$\ddot{A}q$	[kg/C]	Abscheideäquivalent
$b$	[-]	Steigung
$\underline{B}$	[T]	magnetische Flussdichte
$c$	[mol/l]	Konzentration der Lösung
$c^*$	[mol/l]	Standardkonzentration (1 mol/l)
$c_0$	[mol/l]	Konzentration im Elektrolytinneren
$c_s$	[mol/l]	Konzentration an der Kathodenoberfläche
$D$	[cm <sup>2</sup> /s]	Diffusionskoeffizient
$\underline{D}$	[C/m <sup>2</sup> ]	elektrische Verschiebungsdichte
$d$	[m]	Schichtdicke
$\underline{E}$	[V/m]	elektrische Feldstärke
$e$	[C]	Elementarladung
$Eu$	[-]	Eulerzahl
$f$	[-]	Reibungskoeffizient
$\underline{F}$	[N]	Kraft
$\underline{F}^*$	[N]	Reibungskraft

$F$	[C/mol]	Faradaysche Konstante
$Fr$	[-]	Froudezahl
$G$	[m <sup>3</sup> ]	Raumgebiet
$\underline{H}$	[A/m]	magnetische Feldstärke
$I$	[A]	elektrische Stromstärke
$J$	[A]	Ladungsfluss
$\underline{J}$	[A]	elektrische Wirbeldichte
$j$	[A/dm <sup>2</sup> ]	elektrische Stromdichte
$j_M$	[A/dm <sup>2</sup> ]	elektrische Stromdichte verursacht durch Migration
$j_{Diff.}$	[A/dm <sup>2</sup> ]	elektrische Stromdichte verursacht durch Diffusion
$J_x$	[kg/s]	Materialfluss (in x-Richtung)
$K_{(t1)}$	[-]	Konzentrationsprofil zum Zeitpunkt $t1$
$l$	[m]	Länge
$m$	[kg]	Masse
$m_{theor}$	[kg]	theoretisch abgeschiedene Masse
$m_{prakt.}$	[kg]	praktisch abgeschiedene Masse
$M$	[kg/mol]	Molare Masse
$N_a$	[1/mol]	Avogadrozahl oder Loschmidt-Zahl
$n$	[-]	Stoffmenge
$p_K$	[%]	kathodische Stromausbeute
$p$	[Pa]	Druck
$p^*$	[Pa]	Standard Druck (10 <sup>5</sup> Pa)
$Q$	[C]	Ladung
$Q_n$	[C]	Ladung des Teilchens
$R$	[Ω]	Widerstand
$R^*$	[J/K·mol]	allgemeine Gaskonstante

$R_a$	[ $\mu\text{m}$ ]	Rauhigkeitskennwert
$R_z$	[ $\mu\text{m}$ ]	Rauhigkeitskennwert
$r$	[m]	Radius
$r_{12}$	[m]	Abstand der Teilchen
$r_0$	[-]	Einheits-Radiusvektor
$Re$	[-]	Reynoldszahl
$Str$	[-]	Strouhalzahl
$T$	[K]	absolute Temperatur
$T^*$	[K]	Standardtemperatur (298,15 K)
$t$	[s]	Zeit
$T_B$	[m]	Turbulenter Strömungsbereich
$U$	[V]	Spannung
$U_A$	[V]	Anodenspannung
$U_K$	[V]	Kathodenspannung
$\Delta U_P$	[V]	Potentialsprung
$V$	[m <sup>3</sup> ]	Kontrollvolumen
$v$	[m/s]	Geschwindigkeit
$v_0$	[m/s]	Strömungsgeschwindigkeit im vollturbulenten Bereich
$z$	[-]	Oxidationsstufe

### **Griechische Buchstaben**

$\alpha$	[-]	Durchtrittsfaktor
$\delta_N$	[m]	Dicke der Nernstsche Diffusionsgrenzschicht
$\delta_{Pr}$	[m]	Dicke der Prandtlsche Strömungsgrenzschicht
$\delta_{\ddot{U}}$	[m]	Dicke der Übergangsschicht
$\delta_V$	[m]	Dicke der viskosen Unterschicht



$\epsilon$	[C <sup>2</sup> /m]	Dielektrizitätskonstante
$\epsilon_0$	[A·s/v·m]	elektrische Feldkonstante
$\Phi$	[Wb]	elektrischer Fluss
$\eta$	[V]	Überspannung
$\eta_A$	[V]	Überspannung an der Anode
$\eta_C$	[V]	Konzentrationsüberspannung
$\eta_D$	[V]	Durchtrittsüberspannung
$\eta_K$	[V]	Kristallisationsüberspannung (Überspannung an der Kathode)
$\eta_V$	[kg·m/s]	dynamischen Viskosität des Elektrolyten
$\eta_W$	[V]	Widerstandsüberspannung
$\varphi$	[V]	elektrisches Potential
$\varphi_0$	[V]	elektrisches Standardpotential
$\varphi_A$	[V]	elektrisches Potential des Anodenmaterials
$\varphi_{AB}$	[V]	elektrisches Abscheidungspotential
$\varphi_K$	[V]	elektrisches Potential des Kathodenmaterials
$\varphi_{RA}$	[V]	Ruhepotential Anode
$\varphi_{RK}$	[V]	Ruhepotential Kathode
$\mu$	[cm <sup>2</sup> /s·V]	Ionenbeweglichkeit
$\mu^*$	[H/m]	Permeabilität
$\nu$	[m <sup>2</sup> /s]	kinetische Viskosität
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte
$\tau$	[Ω·m]	spezifischer Widerstand
$\chi$	[S]	elektrische Leitfähigkeit

### III **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1-1: Innovationszyklen in der Technik [Westkämper 2002a].....	24
Abbildung 2-1: Oberflächentechnik im Wandel [Westkämper 2004a] .....	27
Abbildung 2-2: Arten von Oberflächen- bzw. Schichtsystemen [Kanani 2001].....	28
Abbildung 2-3: Betrachtung der Standzeit von Umformwerkzeugen [Weber 2004] ..	29
Abbildung 3-1: Anteile verschiedener Verfahren in der Oberflächentechnik [Mohaupt 2005] .....	36
Abbildung 4-1: Schematische Darstellung des Ionentransportes [Wolfhard 1980]...	43
Abbildung 4-2: Konzentrationsprofil an der Kathodenoberfläche [Tannenberger 2002b] .....	46
Abbildung 4-3: Potentialverlauf zwischen Anode und Kathode bei Stromfluss .....	49
Abbildung 4-4: Schematische Darstellung der primären Stromdichteverteilung durch lokal unterschiedliche Feldlinienkonzentration.....	51
Abbildung 5-1: Einteilung der elektromagnetischen Felder bezüglich ihres Zeitverhaltens [Schwab 2002].....	58
Abbildung 5-2: Visuelle Darstellung eines elektrischen Feldes durch Äquipotentiallinien und Feldlinien.....	62
Abbildung 5-3: Laminarer und turbulenter Strömungszustand einer Rohrströmung .	64
Abbildung 5-4: Geschwindigkeitsprofil an einer horizontal angeströmten Platte (turbulenter Strömungszustand) [Schlichting 1997] .....	65
Abbildung 6-1: Simulationskreislauf [Kahlert 2004].....	68
Abbildung 6-2: Beispiel für ein vernetztes Volumen.....	72
Abbildung 6-3: Modell zur Simulation qualitätsrelevanter Kennzahlen beim elektrochemischen Beschichten.....	75
Abbildung 6-4: Prozesssimulation mit dem Softwarepaket FLUENT .....	77
Abbildung 7-1: Versuchsstand .....	81
Abbildung 7-2: Schnittzeichnung des Verfahrensraums.....	82
Abbildung 7-3: Makroskopische Betrachtung des Potentialverlaufs zwischen den Elektroden.....	86

Abbildung 7-4: Ausgewählte Stromdichteverteilung über die Probenoberfläche .....	89
Abbildung 7-5: Beispiel eines ausgewählten laminaren Strömungszustandes (durchschnittliche Geschwindigkeit von 0,018 m/sec im Zulauf) .....	90
Abbildung 7-6: Beispiel eines turbulenten Strömungszustandes ( durchschnittliche Geschwindigkeit von 1,44 m/sec im Zulauf) .....	90
Abbildung 7-7: Gemessene Schichtdicken auf der Mittellinie der Probe (NIP).....	91
Abbildung 7-8: Gemessene Schichtdicken in Abhängigkeit zur Stromdichte (NIP) ...	92
Abbildung 7-9: Gemessener P-Gehalt in Abhängigkeit zur Messposition .....	93
Abbildung 7-10: Gemessener P-Gehalt in Abhängigkeit zur Stromdichte .....	93
Abbildung 7-11: Gemittelte Stromausbeuten in Abhängigkeit zur Stromdichte (NIP)	94
Abbildung 7-12: Gemessene Schichtdicken in Abhängigkeit zur Stromdichte (Cu) ..	95
Abbildung 7-13: Resultierende Stromausbeuten in Abhängigkeit zur Stromdichte (Cu).....	96
Abbildung 8-1: Phosphorgehalt in Abhängigkeit von der Stromdichte [Unicore 2003].....	99
Abbildung 8-2: Zu beschichtendes Werkstück .....	101
Abbildung 8-3: Berechnetes E-Feld und Potentialfeld (Cu).....	102
Abbildung 8-4: Berechnetes hydrodynamisches Strömungsfeld im Verfahrensraum (Cu) .....	103
Abbildung 8-5: Resultierende viskose Unterschicht auf der Bauteiloberfläche (Cu)	104
Abbildung 8-6: Berechnete Grenzstromdichten und Stromdichten auf der Bauteiloberfläche (Cu) .....	104
Abbildung 8-7: Berechnete Schichtdickenverteilung auf der Bauteiloberfläche (Cu) .....	105
Abbildung 8-8: Messpunkte zur Verifikation des Simulationsmodells (Cu).....	105
Abbildung 8-9: Berechnetes Potentialfeld und E-Feld (NIP) .....	107
Abbildung 8-10: Berechnetes Strömungsfeld (NIP) .....	108
Abbildung 8-11: Berechnete Legierungszusammensetzung auf der Bauteiloberfläche .....	109
Abbildung 8-12: Berechnete Schichtdickenverteilung auf der Bauteiloberfläche (NIP) .....	109
Abbildung 8-13: Messpunkte zur Verifikation des Simulationsmodells (NIP) .....	110

Abbildung 8-14: Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse mit den realen Messwerten vom betrachteten Kupferelektrolyten .....	112
Abbildung 8-15: Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse mit den realen Messwerten vom betrachteten Nickel-Phosphor-Elektrolyten .....	113
Abbildung 8-16: Verwendung einer unstetigen Funktion für die Stromausbeute.....	114
Abbildung 9-1: Gesamtkonzept Rapid Tooling [Pieverling 2003] .....	116
Abbildung 9-2: Technologische Prozesskette des Rapid Tooling .....	116
Abbildung 9-3: Teilschritte zur Herstellung einer konventionellen formangepassten Anode .....	121
Abbildung 9-4: Prinzip eines flexiblen Anodensystems .....	121
Abbildung 9-5: Versuchsaufbau mit Formanodensystem.....	122
Abbildung 9-6: Erzeugte Anodengeometrien mittels eines Stiftemodells .....	123
Abbildung 9-7: Gesamtprozessablauf zur Erzeugung einer Anodengeometrie.....	123
Abbildung 9-8: Automatisierte Segmentzustellung mit Hilfe eines CNC-Bearbeitungszentrums .....	124
Abbildung 9-9: Strömungsfeld einer ebenen Anode und einer werkstückangepassten Anode .....	125
Abbildung 9-10: Resultierende viskose Unterschicht auf der Bauteiloberfläche (links mit ebener Anode und rechts mit werkstückangepasster Anode) .	126
Abbildung 9-11: E-Feld einer ebenen Anode und einer werkstückangepassten Anode .....	127
Abbildung 9-12: Vergleich der resultierenden Stromdichteverteilung auf der Bauteiloberfläche .....	127
Abbildung 9-13: Vergleich des resultierenden Phosphorgehaltes auf der Bauteiloberfläche .....	128
Abbildung 9-14: Gegenüberstellung beider Beschichtungsergebnisse mittels Schliffbild .....	129
Abbildung 9-15: E-Feld einer werkstückangepassten Anode mit platinieren Seitenwänden der Anodensegmente .....	130
Abbildung 9-16: Verminderung der Rauheitswerte von lasergesinterten Oberflächen durch Beschichtung.....	131
Abbildung 9-17: Verminderung der Rauheitswerte von gefrästen Oberflächen durch Beschichtung .....	132

Abbildung 9-18: Einebnungseffekte durch elektrochemische Beschichtung von lasergesinterten Oberflächen .....	132
Abbildung 10-1: Abgleich der Solldaten innerhalb einer Prozesskette .....	134
Abbildung 10-2: Kompensation entstehender Toleranzabweichungen in der Prozesskette .....	135
Abbildung 10-3: Graphische Darstellung eines Prozesspfades .....	136

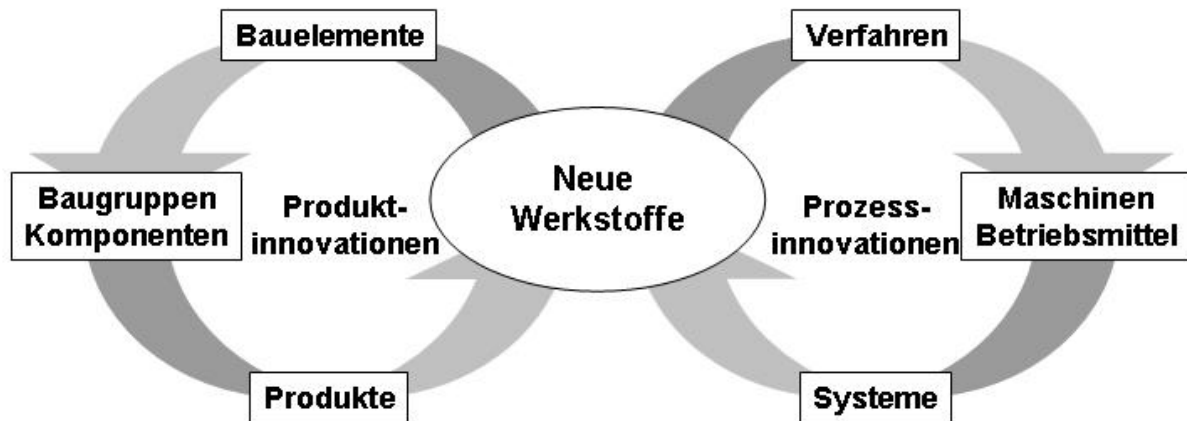
## IV Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Eigenschaften von Schicht- und Oberflächentechnologien [Eulenstein 2002] ..	32
Tabelle 6-1: Vergleich von Berechnungsverfahren zur Lösung von Differenzialgleichungen [Scheibe 1999] .....	70
Tabelle 7-1: Elektrolytzusatzstoffe und ihre Wirkungsweise [Unruh 2001] .....	79
Tabelle 7-2: Verfahren zur Bestimmung von Elektrolytkennwerten .....	80
Tabelle 7-3: Messwerte zur Ermittlung des Potentialsprunges bei verschiedenen hydrodynamischen Bedingungen (Cu) .....	87
Tabelle 7-4: Messwerte zur Ermittlung des Potentialsprunges bei verschiedenen hydrodynamischen Bedingungen (NiP) .....	88
Tabelle 8-1: Prozessparameter für den Kupferelektrolyten.....	102
Tabelle 8-2: Simulierte Ergebnisse für die betrachteten Messpunkte (Cu) .....	106
Tabelle 8-3: Prozessparameter für den Nickel-Phosphor-Elektrolyten.....	107
Tabelle 8-4: Simulierte Ergebnisse für die betrachteten Messpunkte (NiP).....	110
Tabelle 8-5: Reales Beschichtungsergebnis für den Kupferelektrolyten .....	111
Tabelle 8-6: Reales Beschichtungsergebnis für den Nickel-Phosphor-Elektrolyten .....	111
Tabelle 9-1: Prozessdaten des DMLS-Verfahrens am Beispiel einer EOSINT- M 250 Anlage [EOS 2004] .....	118

# 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 Produktzykluszeiten bei zunehmender Variantenvielfalt 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 von der Produktentwicklung über die 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 gekoppelt (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. Im 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 lasergesinteter Bauteile dargestellt. Ein Ausblick auf mögliche Erweiterungen dieses Ansatzes bildet den Abschluss der Arbeit.

## 2 Bedeutung der Oberfläche im Werkzeug- und Formenbau

Um im Wettbewerb mit Ländern, die ein niedriges Lohnniveau haben, bestehen zu können, müssen sich Hochlohnländer durch die Fertigung von anspruchsvollen und qualitativ hochwertigen Bauteilen abgrenzen. Dies setzt aber voraus, dass die zur Herstellung benötigten Werkzeuge und Formen diesen Ansprüchen gerecht werden. Aus wirtschaftlichen Gründen sollten die eingesetzten Betriebsmittel darüber hinaus in einem möglichst langen Zeitraum ihre Funktion optimal erfüllen. [Popp 2003] Dieser ständig steigende Anspruch an den Werkzeug- und Formenbau hinsichtlich höherer Standzeiten, schnellerer Prozesszyklen im Formprozess und der Zunahme der zu verarbeitenden Materialien hat zu einer Neuorientierung bei der Gestaltung von Werkzeugen in der industriellen Fertigung geführt. [Klocke 2002]

Um den neuen Anforderungen zu genügen ist es notwendig, bei der Auslegung von Werkzeugen nicht mehr von der Auswahl des Grundwerkstoffes auszugehen sondern vielmehr die Funktion in den Vordergrund der Auslegungsüberlegungen zu stellen (siehe Abbildung 2-1).

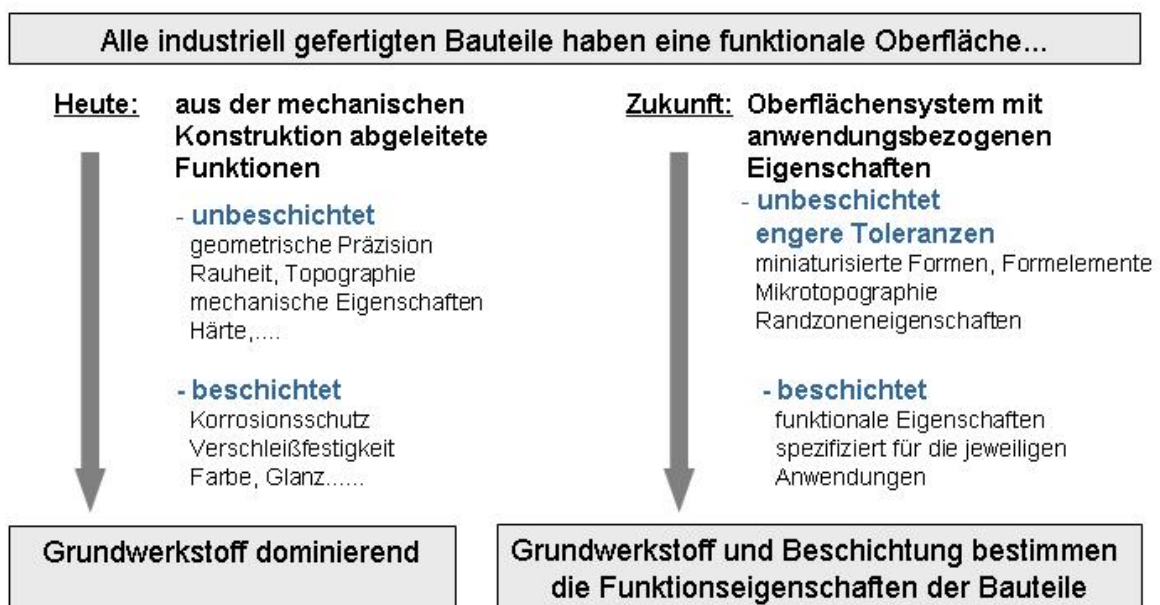
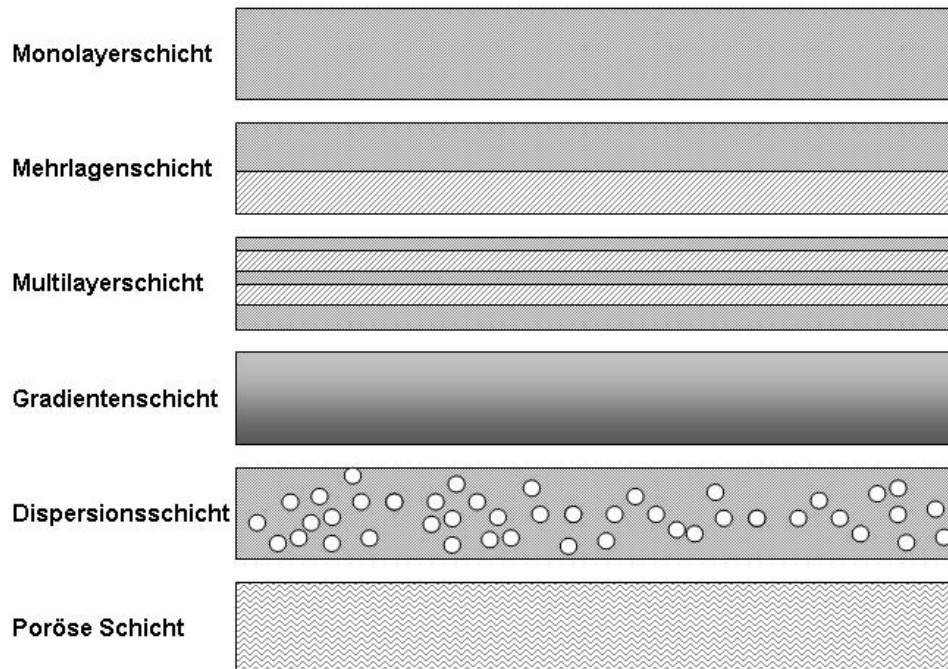


Abbildung 2-1: Oberflächentechnik im Wandel [Westkämper 2004a]

Der Grundwerkstoff selbst kann in vielen Fällen die an das Werkzeug gestellten Funktionsansprüche nicht mehr erfüllen. Aus diesem Grund übernimmt im immer stärkeren Maße eine Kombination aus Grundwerkstoff und Oberflächensystem die geforderten Funktionen (siehe Abbildung 2-2).



**Abbildung 2-2: Arten von Oberflächen- bzw. Schichtsystemen [Kanani 2001]**

Auf diese Weise können die jeweiligen Funktionsanforderungen den spezifischen Stoffen zugeordnet werden. [Westkämper 2004a] Der Grundwerkstoff erfüllt dabei folgende Funktionsanforderungen:

- Wärmeleitfähigkeit
- mit konturgebenden Verfahren präzise verarbeitbar (z.B. gute Zerspanbarkeit)
- Aufnahme von permanent wechselnden mechanischen Kräften
- Aufnahme von permanent wechselnden thermischen Belastungen
- Geometrietreue

An das Oberflächensystem werden folgende Funktionsanforderungen gestellt:

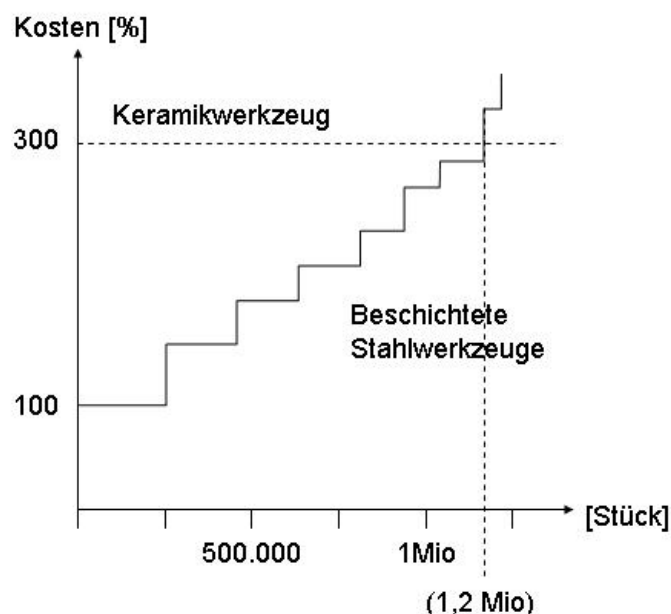
- Erhöhung der Verschleißbeständigkeit
- Erhöhung der Korrosionsbeständigkeit
- Reduzierung der Entformungskräfte

- Reduzierung von Formbelägen
- Verbesserung von Gleiteigenschaften

Die weitgehende Erfüllung dieser Funktionsanforderungen führt zu höheren Standzeiten, schnelleren Prozesszeiten und durch die Topographieverbesserung der Werkzeugoberfläche zu einer höheren Qualität der damit gefertigten Bauteile. [Gastrow 1998] Dabei wirken sich Standzeiterhöhung und Topographieverbesserung im Einzelnen wie folgt aus:

## 2.1 Standzeiterhöhung

Der wirtschaftliche Nutzen einer höheren Standzeit eines Werkzeuges lässt sich leicht bestimmen. So kann es aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten sinnvoll sein, ein wesentlich teureres Werkzeug zu beschaffen, wenn dadurch die Standzeit entsprechend verlängert wird. In Abbildung 2-3 ist beispielhaft Kostenverlauf von Werkzeugen mit und ohne Keramikinlayes bei der Kaltumformung von Blechteilen dargestellt. Ein solcher Kostenverlauf zeigt an, wann der Einsatz von keramischen Werkzeugen im Vergleich zu beschichteten Stahlwerkzeugen wirtschaftlich ist.



**Abbildung 2-3: Betrachtung der Standzeit von Umformwerkzeugen [Weber 2004]**

Einen maßgeblichen Einfluss auf die Standzeit eines Werkzeuges haben Verschleiß und Korrosion.

Nach DIN 50320 versteht man unter Verschleiß den fortschreitenden Materialverlust auf der Oberfläche eines festen Körpers, hervorgerufen durch mechanische Ursachen. [DIN 50320] Die Verschleißmechanismen lassen sich in vier Gruppen unterteilen: [Lange 1984] [DIN 50323]

- Abrasion
- Adhäsion
- Oberflächenzerrüttung
- Tribooxidation

Durch diese unterschiedlichen Wirkmechanismen, lässt sich das Verschleißverhalten eines Werkstoffes nicht nur durch eine Werkstoffgröße ausdrücken. [DIN 50321] Aussagen über das Verschleißverhalten eines Werkstoffes sind deshalb mit großen Unsicherheiten behaftet.

Unter Korrosion versteht man eine Werkstoffschädigung, hervorgerufen durch chemische oder elektrochemische Reaktionen mit einem gasförmigen oder flüssigen Umgebungsmedium. Deshalb begünstigen z.B. hohe Betriebstemperaturen die chemischen Reaktionen auf der Oberfläche des Werkzeuges. [Bargel 2005] Um die Korrosionsbeständigkeit bei den besonders gefährdeten Formeinsatzoberflächen, d.h. die formbestimmenden Teile des Werkzeuges zu verbessern, ist die richtige Werkstoffauswahl bezüglich Grundwerkstoff und des Beschichtungsmaterials eine zwingende Voraussetzung. [DIN 55928 ]

## **2.2 Topographie**

Im Werkzeug- und Formenbau beeinflusst die Oberflächentopographie der Formeinsätze die Qualität der Bauteile und den Fertigungsprozess entscheidend. Sie bestimmen nicht nur die optischen und haptischen Eigenschaften der damit gefertigten Werkstücke sondern auch die Prozessdauer und seine Zuverlässigkeit. Dabei spielen die Entformungskräfte besonders bei der Verarbeitung von Kunststoffen und Blechen eine wichtige Rolle, denn die Entformbarkeit von Werkstücken resultiert aus folgenden Einzelkomponenten: der Schwindung des zu verarbeitenden Werkstoffs, der Formgeometrie und der Wechselwirkung zwischen der Werkzeugoberfläche und dem Werkstoff. [Grundmann 2003]

Durch eine entsprechende Beschichtung der Werkzeugoberfläche lassen sich die Adhäsionskräfte zwischen Werkzeugoberfläche und Formteil so beeinflussen, dass man die Zykluszeit entsprechend des verkürzten Entformungsprozesses wesentlich verringern kann. Außerdem lässt sich bei entsprechender topographischer Gestaltung der Oberfläche die Belagbildung auf der Werkzeugoberfläche, z.B. beim Spritzgießprozess, reduzieren oder ganz vermeiden. Solche Beläge sind häufig die Ursache für Topographiestörungen auf der Werkstückoberfläche und somit die Ursache für Qualitätsmängel. [Heinen 2002]

Des Weiteren kann man durch eine spezifisch gestaltete Oberflächentopographie verbesserte Gleiteigenschaften erzielen und somit den Werkzeugverschleiß minimieren. Gerade in den Bereichen der Schieber, Backen und Auswerfersysteme von Werkzeugen ist eine möglichst geringe Reibung für die Langlebigkeit und das fehlerfreie Zusammenwirken der einzelnen Komponenten eines Werkzeuges unabdingbar. Durch eine spezielle Mikrostruktur der Oberfläche und die geeignete Paarung bei den Materialien der Werkzeugkomponenten lassen sich die Reibwerte um ein Vielfaches senken. Der Trend zu immer funktionaleren Produkten führt dazu, Designeffekte an Werkstücken durch definierte Glanzgrade und gezielte Struktureindrücke zu verstärken. Haptik und Optik der Oberfläche werden so schon im Ur- bzw. Umformprozess entscheidend mitgeprägt. Deshalb kann dann auf eine nachträgliche Oberflächenbeschichtung der Werkstücke in der weiteren Prozesskette verzichtet werden. Solche Oberflächeneffekte lassen sich in der Regel durch eine entsprechende Mikrorauigkeit der Werkzeugoberfläche erzielen. [Eulenstein 2002]

## **2.3 Oberflächen- und Schichttechnologien im Werkzeug- und Formenbau**

Für das Erzeugen von funktionalen Oberflächen stehen eine Reihe von Beschichtungs- und Oberflächentechnologien zur Verfügung, die einzeln oder kombiniert eingesetzt werden können. Deshalb ist es üblich, dass die mehrheitlich klein- und mittelständischen Betriebe, die Beschichtungsprozesse im Lohn anbieten, im Durchschnitt mehr als zwei Verfahren der Oberflächentechnik beherrschen. [Grundmann 2002] Betrachtet man beispielsweise die gestiegenen Anforderungen, die heute an Spritzgießwerkzeuge gestellt werden, dann wird deutlich, dass Standardverfahren, wie z.B. Härten oder Nitrieren diese häufig nicht mehr erfüllen

können. Funktionseigenschaften werden vermehrt durch Kombinationen aus Plasmanitrieren, chemischer und elektrochemischer Beschichtung oder Hartstoffbeschichtungen (PVD und CVD Verfahren) erzielt.

Ein eindeutiges Ranking der einzelnen Beschichtungsverfahren ist ebenso unmöglich wie bei den form- bzw. strukturgebenden Verfahren. Jedes dieser Verfahren hat seine spezifischen Vor- und Nachteile durch seine spezifischen physikalischen, thermischen und chemischen Prozessbedingungen. Deshalb sind ihre Einsatzgebiete fallbezogen festzulegen.

Tabelle 2-1 zeigt die häufigsten Oberflächen- und Schichttechnologien mit ihren spezifischen Funktionseigenschaften und Prozessbedingungen.

Verfahren	Schichtdicke [µm]	Betriebs-temp. max. [°C]	Reibwert gegen Stahl	Härte [HV]	Prozessdruck [Pa]	Prozess-temp. [°C]
Härten	-	-	-	500 - 1000	-	-
Nitrieren	-	-	ca. 0,55	500 - 1200	-	350 - 600
Chem. Nickel	10 - 30	500	ca. 0,45	300 - 1000	-	< 100
Chem. Nickel mit PTFE	1 - 20	300	ca. 0,2	300 - 600	-	< 100
El. chem. Hartchrom	5 - 200	450	ca. 0,5	600 - 1050	-	< 100
El. chem. NiP	> 500	500	ca. 0,5	600 - 1200	-	< 100
PVD-Verfahren TiN	2 - 4	600	ca. 0,4	2000 - 2300	$< 1 \cdot 10^{-3}$	250 - 450
PVD-Verfahren CrN	2 - 4	700	ca. 0,5	1700 - 2000	$< 1 \cdot 10^{-3}$	250 - 450
PVD-Verfahren TiAlN	2 - 4	800	ca. 0,4	2700 - 3000	$< 1 \cdot 10^{-3}$	250 - 450
PVD-Verfahren dlc	2 - 4	300	ca. 0,2	700 - 2100	$< 1 \cdot 10^{-3}$	100 - 250
CVD-Verfahren TiC/TiN	6 - 9	800	ca. 0,4	2300 - 3100	$1 \cdot 10^{-1} - 1 \cdot 10^2$	850 - 1050
CVD-Verfahren CrC	8 - 15	500	ca. 0,5	1500 - 2300	$1 \cdot 10^{-1} - 1 \cdot 10^2$	850 - 1050

**Tabelle 2-1: Eigenschaften von Schicht- und Oberflächentechnologien**  
[Eulenstein 2002]



Neben dem Substratmaterial (Grundwerkstoff des zu beschichtenden Werkstückes) sind die fertigungstechnischen Rand- und Rahmenbedingungen für die richtige Wahl der geeigneten Beschichtungstechnologie entscheidend. So muss sich z.B. das Substratmaterial mit den Prozessbedingungen ohne Funktionseinbußen verarbeiten lassen. Des Weiteren beeinflussen Prozesszeit und Prozesskosten die Verfahrenswahl. Außer den Schichteigenschaften spielt die Beschichtungsgenauigkeit als Einflussfaktor für die Qualität und Funktionalität des Werkzeuges eine weitere wichtige Rolle bei der Auswahl.

Um für die geforderten Funktionsanforderungen das richtige Oberflächensystem zu ermitteln, ist ein so genanntes Schichtengineering bzw. Surface-Engineering notwendig. [Gissler 1992] [Westkämper 2004a] Darunter wird ein methodisches Vorgehen verstanden, durch das ein auf die spezifischen Anforderungen zugeschnittenes Schichtsystem festgelegt wird.

Dabei sind im Werkzeug- und Formenbau folgende Rahmenbedingungen zu beachten:

- Einhaltung der geforderten Werkzeuggeometrie (keine oder nur geringe Nacharbeit)
- keine Beeinträchtigung der Oberflächengüte
- kein Härte- bzw. Zähigkeitsverlust des Grundmaterials durch prozessbedingte thermische Belastungen
- Wirtschaftlichkeit

Diese Rahmenbedingungen lassen sich in der Regel nur einhalten, wenn das eingesetzte Beschichtungsverfahren als Teil der gesamten Prozesskette betrachtet wird und schon bei ihrer Planung Berücksichtigung finden. [Zimmer 2003]

Die im Werkzeug- und Formenbau eingesetzten Schicht- und Oberflächenverfahren lassen sich in drei Kategorien einteilen:

- den Verfahren der Abscheidung dünner Schichten über die Dampfphase
- den Verfahren dicker Schichten über die liquide Phase und
- den Randzonen- bzw. Wärmebehandlungsverfahren

Letztere wandeln durch gezielte Wärmebehandlung und Einlagerung von Fremdatomen die Randzone des Bauteiles bzw. der Substratoberfläche um. In der

Wärmebehandlung unterscheidet man grundsätzlich zwischen Verfahren, die eine durchgreifende Gefügeumwandlung bewirken und Verfahren, die lediglich eine Umwandlung in der Randzone eines Werkstückes verursachen. Zu den erstgenannten Verfahren gehören das Glühen und Härten, d.h. die thermischen Verfahren. Wärmebehandlungsverfahren, die eine Umwandlung an der Randschicht zum Ziel haben, zählen zu den Diffusions- und Beschichtungsverfahren bzw. den thermochemischen Verfahren. Hierzu zählt beispielsweise das Nitrieren. [Müller 2003] Die Nachteile dieser Verfahren liegen zum einen darin, dass ihre Wirkungsweise stark vom Substratwerkstoff abhängig ist, zum anderen in den Gefahren des Verzuges der wärmebehandelten Bauteile. Die Funktionalitätssteigerung bezieht sich ausschließlich auf die Härte, Zähigkeit und Zugfestigkeit der Randzone.

Zu den Dünnschichttechnologien werden das CVD-Verfahren (*chemical vapour deposition*) und das PVD-Verfahren (*physical vapour deposition*) gezählt. Die PVD- bzw. CVD-Beschichtung erfolgt als letzter Veredelungsschritt auf den fertig bearbeiteten Werkzeugen oder Bauteilen. Es entsteht hierbei, aufgrund der dünnen Schichtdicken, keine Veränderung der Maßhaltigkeit. Durch die besonderen Eigenschaften der Schichten erhält man eine deutliche Steigerung des Verschleißwiderstandes bzw. eine Reibungsverminderung. Dadurch ergibt sich ein breites Anwendungsspektrum bei Werkzeugen zur Zerspanung, Umformung und zum Druckgießen, sowie Werkzeugen zur Kunststoffverarbeitung und vielen Bauteilen mit bestimmten Funktionsanforderungen. [Westkämper 2004c] Nachteile liegen in den hohen Prozesstemperaturen und den niedrigen Prozessdrücken. Diese verursachen aufgrund des apparativen Aufwandes hohe Betriebs- und Investitionskosten und schränken die Anwendungsgebiete ein, denn die behandelten Werkstücke müssen diesen Prozessbedingungen standhalten. Es dürfen z.B. keine Gefügeveränderungen im Grundmaterial auftreten. Das Versagen solcher dünnen und harten Schichten beruht häufig auf einer ungenügenden Haftung auf dem Substrat oder einer zu geringen Stützwirkung des Grundmaterials (Eierschaleneffekt). [Kanani 2001]

Die chemisch und elektrochemisch aufgetragenen Schichten sind im Gegensatz zu den keramischen Dünnschichten eine Zehnerpotenz dicker. Deshalb werden diese häufig auch in Kombination mit CVD- bzw. PVD-Schichten aufgebracht. Elektrochemische Schichten können sehr schnell erzeugt werden, da ein

Schichtdickenwachstum von mehreren  $\mu\text{m}$  pro Minute möglich ist. Ebenso sind Schichtdicken von 1 bis 2000  $\mu\text{m}$  erzeugbar. Durch geeignete Prozesssteuerung lassen sich neben Einschichtsystemen auch Multilayersysteme, Gradientenschichten, Legierungsschichten sowie Dispersionsschichten herstellen. Die chemische Beschichtung hat ihren Vorteil in der Konturtreue, denn das Schichtwachstum basiert auf einer rein chemischen Reaktion und benötigt keine zusätzlichen Reaktionsbedingungen. Hierin liegt wiederum der Nachteil der elektrochemischen Beschichtung. Durch die bei komplexen Bauteilen unvermeidlichen unterschiedlichen lokalen Beschichtungsbedingungen ist eine hohe Konturtreue nicht zu erreichen.

Ein ideales Beschichtungsverfahren sollte bei Beibehaltung der Vorteile:

- steuerbares lokales Abscheideverhalten,
- schnelles Schichtwachstum,
- dicke und funktionelle Schichten,
- robuster Prozess

die Nachteile:

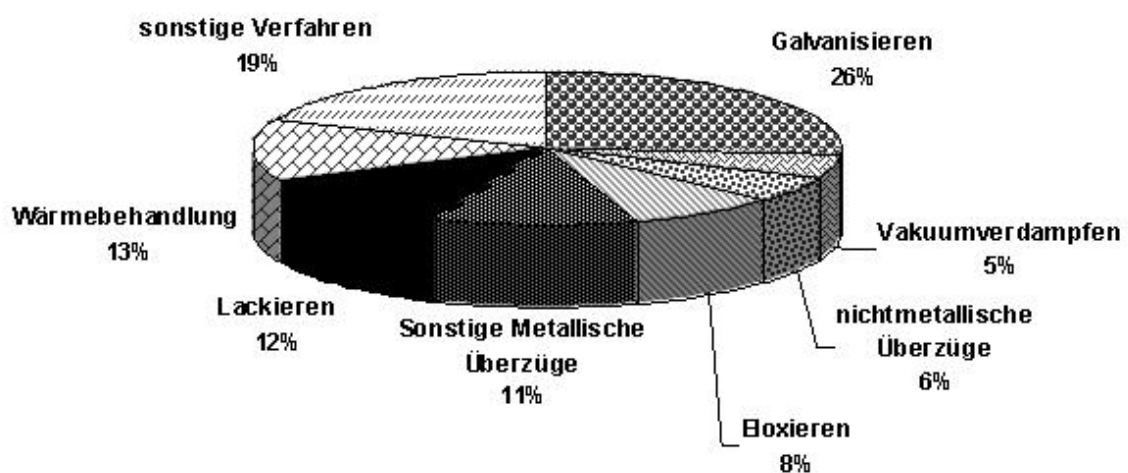
- hohe Prozesstemperaturen,
- niedrige Prozessdrücke,
- hohe Investitionskosten

vermeiden.

Wie im Folgenden gezeigt, erfüllt die elektrochemische Beschichtung einen großen Teil dieser geforderten Prozessmerkmale. Wenn es dazu noch gelingt, die spezifischen Nachteile dieses Verfahrens durch entsprechende Prozessgestaltung abzumindern oder sogar zu beseitigen, könnte dies in einigen Bereichen des Werkzeug- und Formenbaus zu einer wesentlichen Funktions- und Kostenverbesserung beitragen.

### 3 Einsatz des elektrochemischen Beschichtungsverfahrens im Werkzeug- und Formenbau

Das elektrochemische Beschichten (Galvanisieren) ist einer der am weitesten verbreiteten Beschichtungsprozesse zum Veredeln von Oberflächen. Dies zeigt die folgende Abbildung:



**Abbildung 3-1: Anteile verschiedener Verfahren in der Oberflächentechnik [Mohaupt 2005]**

Gerade bei den metallischen Überzügen kommt der elektrochemischen Beschichtung eine Schlüsselrolle zu. Ihr Gesamtumsatz wird in Deutschland auf rund 5,6 Mrd. € geschätzt. Die damit erzeugten Schichten werden sowohl für dekorative Zwecke als auch zur Erhöhung des Verschleißwiderstandes oder der elektrischen Leitfähigkeit, vor allem aber im Bereich des Korrosionsschutzes, eingesetzt. [Mohaupt 2005]

### **3.1 Vorteile gegenüber anderen Verfahren**

Die Vorzüge dieses Verfahrens liegen in den niedrigen Investitions- und Prozesskosten. Dies ist auf die niedrige Prozesstemperatur und das Arbeiten bei Atmosphärendruck zurückzuführen. Außerdem ermöglicht das hohe Schichtwachstum kurze Prozesszeiten und das Erzeugen von relativ dicken Schichten. Der entscheidende Vorteil liegt aber zweifelsohne in der Robustheit des Prozesses selbst und der Vielzahl des damit erzeugbaren Schichtsysteme. [Gaßner 2005]

Besonders die Robustheit des Prozesses und das schnelle Erzeugen von dicken Schichtsystemen (Einstoff-, Legierungs- und Gradientenschichtsysteme) sind es, die einen wirtschaftlichen Einsatz in vielen Gebieten des Werkzeug- und Formenbaus schon heute erlauben. Die dadurch erzeugten Schichten können als Zwischenschichten für eine Hartstoffschicht (z.B. PVD-Verfahren TiAlN) dienen oder auch als einzelne Funktionsschicht (z.B. Hartchrom oder Nickel) aufgebracht werden. [Jehn 2004]

### **3.2 Mögliche industrielle Einsatzfelder im Werkzeug- und Formenbau**

Die hauptsächlichen Einsatzfelder der elektrochemisch erzeugten Schichten liegen gegenwärtig im Verchromen und Vernickeln von Formeinsätzen bei Spritzgießwerkzeugen für große Serien und bei der Herstellung bzw. Abformung von Formteilen für den Mikrospritzgießprozess nach dem LIGA- Verfahren. [Giro 2004]

Neue Einsatzfelder werden aber auch in Rapid Tooling Prozessen gesehen.

#### **3.2.1 Einsatz des elektrochemischen Beschichtens in Rapid Tooling Prozessen**

Der Einsatz des elektrochemischen Beschichtungsverfahrens gewinnt bei der Herstellung von Vor- und Kleinserienwerkzeugen und bei mittleren Serien immer mehr an Bedeutung. [Turan 2002] Die hierbei oft verwendeten Grundkörper, die beispielsweise durch kostengünstige generative Verfahren oder Gießharze erzeugt

werden, weisen eine Vielzahl von mangelhaften Oberflächeneigenschaften auf. Diese können nur durch spezifische Funktionsschichten, die bis zu 5 mm aufweisen, kompensiert werden. [Behrens 2005]

Betrachtet man z.B. ein lasergesintertes Bauteil, so liegt die Härte des Grundmaterials, meist Nickel-Bronze- oder Stahlpulver, zwischen 120 und 220 HV. Die Oberflächenrauheit ( $R_a$ ) hat in der Regel einen Wert von 2 bis 5  $\mu\text{m}$  und die Restporosität beträgt je nach Grundmaterial und Belichtungsstrategie 0,5 bis 5%. [Trenker 2001] Um ähnliche Oberflächengüten wie bei Serienwerkzeugen zu erreichen, ist ein manuelles Nachbearbeiten zwingend erforderlich. [Abele 2004] Der Wunsch, mit solchen Werkzeugen und Formen wirtschaftlich auch Kleinserien herzustellen, macht eine Beschichtung zur Kompensation der negativen Eigenschaften des Grundmaterials notwendig. Denkbar wäre es z.B., lasergesinterten Formen durch elektrochemisches Beschichten mit einer 20 bis 100  $\mu\text{m}$  dicken Nickel-Phosphor- oder Hartchromschicht zu überziehen, um die Rauheitswerte und die Oberflächentopographie zu verbessern sowie die Verschleißfestigkeit wesentlich zu erhöhen. Die wirtschaftliche Gestaltung eines solchen Beschichtungsprozesses erfordert einige neue technische Voraussetzungen.

### **3.3 Voraussetzungen für den Einsatz im Werkzeug- und Formenbau**

Der wirtschaftliche Einsatz der elektrochemischen Beschichtung in der Prozesskette des Werkzeug- und Formenbaus macht eine exakte Abscheidung des Beschichtungsmaterials notwendig, um eine gleichmäßige Schichtdicke und -zusammensetzung zu erhalten, sowie eine hohe Abscheidungsgeschwindigkeit.

Um dieses Ziel zu erreichen, sind auf die Werkzeuggeometrie exakt abgestimmte Verfahrensräume bzw. Reaktionsräume (Raum zwischen Anoden und Kathode) notwendig. Nur so kann erreicht werden, dass die Abscheidebedingungen auf der gesamten Werkzeugoberfläche annähernd gleich sind. Andernfalls ergeben sich erhebliche Unterschiede bei der Schichtdicke und -zusammensetzung. Dies setzte dem Verfahren vor allem aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten enge Grenzen. Denn die hierzu notwendigen Formanoden sind in der Anfertigung meistens sehr kostspielig, da sich ihre optimale Geometrie derzeit nur mittels aufwendiger

Vorversuche exakt ermitteln lässt. Außerdem müssen die Anoden wegen der Aggressivität vieler Elektrolyte aus Titan gefertigt und ggf. noch patiniert werden. [Baumgärtner 2004] Dieser Aufwand ist derzeit nur in der Großserie wie z.B. beim Beschichten von Einspritzdüsen oder Kolbenstangen zu rechtfertigen. Wird dagegen auf derart speziell angepasste Anoden verzichtet, erfordern die lokalen Schichtdickenunterschiede in der Regel aufwendige Nacharbeit, z.B. durch Schleifen und Polieren. [Denkena 2003a]

Will man also in Zukunft die Vorteile der elektrochemischen Beschichtung auch bei Prototypenwerkzeugen nutzen, sind im Wesentlichen folgende Problemfelder zu lösen:

- Die Auslegung der optimalen Anodengeometrie sollte ohne Vorversuche möglich sein.
- Die Anode sollte so gestaltet sein, dass sie sich auf unterschiedliche Werkstückgeometrien anpassen lässt.

Auf Vorversuche könnte man verzichten, wenn es gelingen würde, den Beschichtungsprozess im Rechner so abzubilden, dass eine Bestimmung der prozessrelevanten Parameter bei unterschiedlichen Prozessbedingungen möglich wird. Dazu ist es notwendig, die Wirkzusammenhänge der elektrochemischen Beschichtung zu analysieren und darauf aufbauend ein numerisches Modell zu entwickeln, das diese Ziele erreicht. Mit diesem Modell ließen sich dann auch die wichtigsten Auslegungsparameter für ein flexibles Anodensystem ermitteln, um so werkzeugangepasste Anodengeometrien zu erzeugen und somit die Grundvoraussetzung zur wirtschaftlich Nutzung eines solchen Systems zur Verfügung stellen.

## 4 Die Theorie des elektrochemischen Beschichtungsprozesses

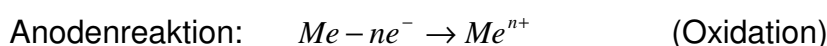
Der elektrochemische Abscheidungsprozess setzt sich zusammen aus elektrischen, hydrodynamischen und chemischen Teilprozessen. Diese laufen parallel zueinander ab und beeinflussen sich gegenseitig in ihrer Wirkung. [Tannenberger 2002a] Um ein Werkstück mit einer gezielten elektrochemisch erzeugten Metallschicht zu überziehen, müssen die Wirkmechanismen des Beschichtungsprozesses bekannt sein. Nur so können die Einflüsse der verschiedenen Prozessparameter abgeschätzt werden.

### 4.1 Grundlagen des elektrochemischen Beschichtungsprozesses

Für das Überziehen einer Werkstückoberfläche mit einer Metallschicht durch eine elektrochemische Beschichtung sind gewisse Grundvoraussetzungen notwendig. So muss durch Anlegen einer Gleichspannung eine ausreichend große Potentialdifferenz zwischen der Anode und der Kathode vorhanden sein. Diese Potentialdifferenz bewirkt, dass die sich in Lösung befindlichen Metallionen durch einen gerichteten Transportvorgang an die Kathodenoberfläche (Werkstück) gelangen und dort durch Aufnahme von Elektronen elementares Schichtmetall abgeschieden (reduziert) wird. [Westkämper 2004c] Dieser Vorgang lässt sich wie folgt beschreiben:



An der Anode läuft ein umgekehrter chemischer Vorgang ab. Bei Verwendung von löslichen Anoden (die Anoden bestehen aus dem Schichtmaterial) gehen Metallatome unter Abgabe von Elektronen in Lösung.



Bei der Verwendung von unlöslichen Anoden wird an der Anodenoberfläche Sauerstoff produziert.



Anodenreaktion:  $4OH^- \rightarrow O_2 + 2e^- + 2H_2O$  (Oxidation)

Die für diese Prozesse notwendige Potentialdifferenz ist von dem verwendeten Metall abhängig. Denn jedes Metall besitzt ein charakteristisches Potential  $\varphi$ . Dieses beschreibt die Tendenz eines Metalls, sich in positiv geladene Ionen überführen zu lassen. [Strauch 1987]

Um Potentiale verschiedener Metalle quantifizieren zu können, wurde von Nernst das so genannte Standardpotential  $\varphi_0$  definiert (Normalwasserstoffelektrode, Standardbedingungen:  $T^*= 25^\circ\text{C}$ ,  $c^*= 1\text{mol/l}$ ,  $p^*= 1,013\text{bar}$ ).

Basierend auf diesen Kennwert lassen sich mit Hilfe der Nernstschen Gleichung Elektrodenpotentiale für unterschiedliche Konzentrationen und Umgebungsbedingungen wie folgt bestimmen:

$$\varphi = \varphi_0 + R \cdot T \frac{\ln c}{z \cdot F} \quad (4-1)$$

mit  $R$  allgemeine Gaskonstante (8,314 [VAs/molK])

$T$  absolute Temperatur in K

$c$  Konzentration der Lösung [mol/l]

$z$  Oxidationsstufe des Metallions

$F$  Faradaysche Konstante (96493 [As/mol])

Kombiniert man zwei Elektroden mit jeweils unterschiedlichen Potentialen, so entsteht ein galvanisches System. Beim Anlegen einer äußeren Gleichspannung erzeugt das System eine Polarisationsspannung  $\Delta U_p$ , die als Elektromotorische Kraft (EMK) zwischen den polarisierten Elektroden der Fremdspannung entgegengerichtet ist. [Strauch 1987]

$$\Delta U_p = EMK = \varphi_A - \varphi_K = U_A - U_K \quad (4-2)$$

mit  $\varphi_A$  Potential des Anodenmaterials

$\varphi_K$  Potential des Kathodenmaterials

$U_A$  Anodenspannung

$U_K$  Kathodenspannung

Auf Grund von Hemmungen beim Transport der Metallionen durch den Elektrolyten, erfolgt die tatsächliche Abscheidung erst mit höherer Fremdspannung als der theoretisch ermittelten. Die Abweichung dieser tatsächlich benötigten Potentialdifferenz  $\varphi_{AB}$  (Abscheidungspotential) von der *EMK* des Systems wird bei Einzelelektroden (eine Reaktion an Elektroden) als Überspannung und bei Mehrzelektroden (mehrere Reaktionen an Elektroden) als Polarisation bezeichnet.

$$\eta = \varphi_{AB} - EMK \quad (4-3)$$

mit  $\eta$  Überspannung bzw. Polarisation

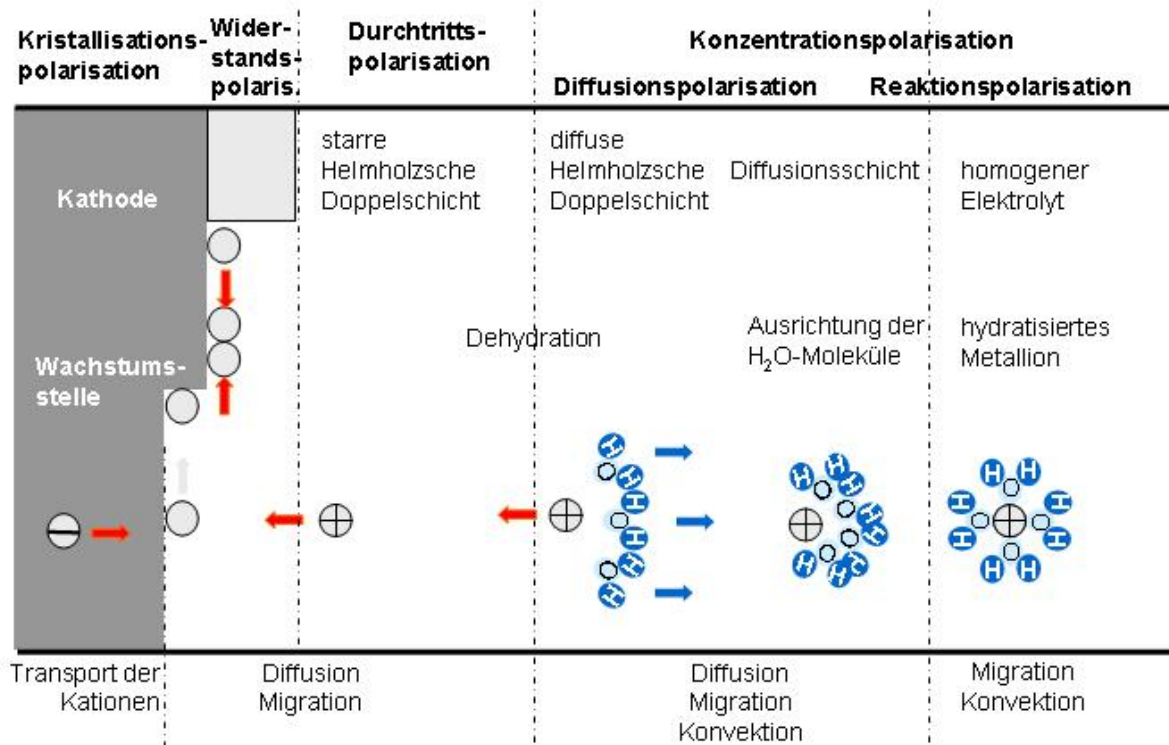
## 4.2 Atomistische Betrachtung des Ionentransportes

Neben der notwendigen elektrischen Potentialdifferenz zwischen den Elektroden ist die Bereitstellung aller zur Reaktion notwendigen Reaktanden am vorgesehenen Ort eine weitere Voraussetzung. Daraus ergibt sich, dass die Transportmechanismen entscheidend für das Schichtwachstum sind. Betrachtet man ein beliebiges im Reaktionsraum zwischen Anode und Kathode in Lösung befindliches Metallion, so wirken darauf eine Reihe von Kräften, die für den gerichteten Ionentransport verantwortlich sind. Modellhaft kann dieser vom Inneren des Verfahrensraumes (Raum zwischen Anode und Kathode oder Galvanische Zelle) bis zur Kristallisation an die Kathodenoberfläche in 6 Teilschritte unterteilt werden [Wolfhard 1980]:

- Abtransport der hydratisierten Metallionen aus der homogenen galvanischen Zelle zur Phasengrenze Kathode/Elektrolyt.
- Veränderung der räumlichen Anordnung der Wasserdipole um die Metallionen durch Abschwächen der chemischen Bindungskräfte innerhalb der Diffusionsschicht.
- Vollständiges Abstreifen der Hydrathüllen der Metallionen in der Helmholtzschen Doppelschicht.
- Ladungsaustausch und Entstehung von adsorbierten Atomen (ad-Atomen) an der Kathodenoberfläche.
- Bildung von Kristallkeimen durch Oberflächendiffusion der ad-Atome auf der Kathodenoberfläche.

- Wachstum der thermodynamisch stabilen Kristallkeime zu einer metallischen Schicht.

Dieser Transport wird durch drei elementare Bewegungsmechanismen verursacht: der Migration, der Konvektion und der Diffusion.



**Abbildung 4-1: Schematische Darstellung des Ionentransportes [Wolfhard 1980]**

Wie in Abbildung 4-1 schematisch dargestellt ist, bewirken in den jeweiligen Teilschritten mehrere Bewegungsmechanismen gleichzeitig den Ionentransport.

Bei dieser Betrachtung werden die Stöße von benachbarten Elektrolytmolekülen auf das Ion nicht berücksichtigt. Diese Vereinfachung kann vorgenommen werden, wenn die verursachenden Moleküle homogen im Elektrolyt gelöst sind und somit kein Konzentrationsgradient vorliegt. Nur dann erfolgen die Stöße vollkommen ungeordnet.

## 4.2.1 Migration

Befinden sich in einem Raum zwei Elektroden die eine Potentialdifferenz zueinander aufweisen, herrscht zwischen ihnen ein elektrisches Feld mit der Stärke  $\underline{E}$ . Auf ein Ion mit der Ladung  $z \cdot e$  wirkt dann eine Kraft  $\underline{F}$ . Diese Kraft beschleunigt das Ion je nach Ladungsrichtung zur Kathode oder Anode (Coulombsches Gesetz).

Der Anteil des Ionentransportes, der aus dieser Kraftwirkung resultiert, wird als Migration bezeichnet und lässt sich wie folgt beschreiben [Atkins 2002]:

$$\underline{F} = z \cdot e \cdot \underline{E} = z \cdot e \cdot \text{grad}\varphi \quad (4-4)$$

mit  $\varphi$  Potential  
 $z$  Oxidationsstufe  
 $e$  Elementarladung

Da sich das Ion durch den Elektrolyten bewegt, erfährt es eine Reibungskraft  $\underline{F}^*$ . Diese lässt sich nach der Stokeschen Gleichung wie folgt beschreiben [Atkins 2002]:

$$\underline{F}^* = f \cdot v = 6\pi \cdot \eta_v \cdot a \cdot v \quad (4-5)$$

$$f = 6\pi \cdot \eta_v \cdot a \quad (4-6)$$

mit  $f$  Reibungskoeffizient  
 $v$  Wandergeschwindigkeit  
 $\eta_v$  Viskosität des Elektrolyten  
 $a$  Hydrodynamischer Radius des betrachteten Ions

Im stationären Zustand stellt sich ein Kräftegleichgewicht zwischen der Reibungskraft  $\underline{F}^*$  und der elektrischen Feldkraft  $\underline{F}$  ein. Für die resultierende Wandergeschwindigkeit  $s$  ergibt sich daraus:

$$s = \frac{z \cdot e \cdot E}{f} \quad (4-7)$$

Damit ist die Wandergeschwindigkeit proportional der Stärke des angelegten Feldes. Diesen Proportionalitätsfaktor  $\mu$  bezeichnet man als Ionenbeweglichkeit.

$$s = \mu \cdot E \quad (4-8)$$

Der aus diesem Effekt resultierende Ionen-transport erzeugt den Ladungsfluss  $J$ . Dieser ergibt sich aus der Teilchendichte und ist von deren Ladung abhängig:

$$J = z \cdot e \cdot c \cdot N_A \cdot v \cdot s = z \cdot v \cdot c \cdot F \cdot s \quad (4-9)$$

mit  $F = e \cdot N_A$  (Faradaysche Konstante)

Aus dem Ladungsfluss errechnet sich die Stromdichte  $j_M$  wie folgt:

$$j_M = J \cdot A \quad (4-10)$$

mit  $A$  = Fläche (durch die der Ladungsfluss erfolgt)

Damit ergibt sich für die Stromdichte:

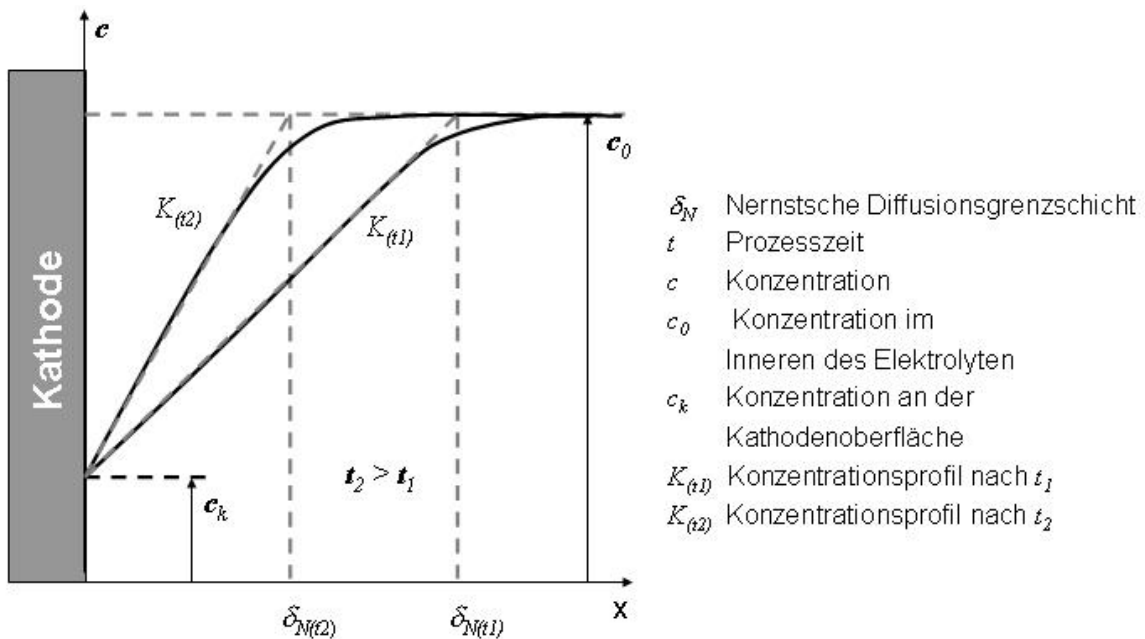
$$j_M = z \cdot F \cdot v \cdot s \quad (4-11)$$

$$\text{oder } j_M = z \cdot F \cdot c \cdot \mu \cdot \text{grad}\varphi \quad (4-12)$$

Dies zeigt, dass die Migrationskraft auf alle Ionen wirkt, die sich im elektrischen Feld des Verfahrensraumes befinden.

## 4.2.2 Diffusion

Besteht ein chemisches Gleichgewicht, so ist die Konzentration der reaktionsfähigen Ionen im gesamten Elektrolyten gleich. Beim Anlegen einer Fremdspannung und der daraus resultierenden Metallabscheidung auf der Kathodenoberfläche kommt es zu lokalen Konzentrationsunterschieden. Die Folge ist ein Konzentrationsgradient, der sich, ausgehend von der Kathodenoberfläche, ins Innere des Elektrolyten so weit ausbreitet, bis sich ein stationärer Zustand einstellt. In Abbildung 4-2 ist die Konzentrationsverteilung bei der Abscheidung eines elektrolytisch aktiven Stoffes dargestellt. [Holze 1998]



**Abbildung 4-2: Konzentrationsprofil an der Kathodenoberfläche [Tannenberger 2002b]**

Um diese Konzentrationsdifferenzen und das hieraus gestörte chemische Gleichgewicht auszugleichen, erfolgt ein entsprechender Ionentransport.

Diesen Transportvorgang bezeichnet man als Diffusion. Nach dem 1. Fickschen Gesetz ist der Materialfluss  $J_x$  (in Richtung  $x$ ) proportional zu dem Konzentrationsgradienten  $dc/dx$ . Hieraus folgt:

$$J_x(\text{Material}) = -D \frac{dc}{dx} \quad (4-13)$$

mit  $D$  Diffusionskoeffizient

$dc/dx$  Konzentrationsgradient in der Richtung  $x$

Aus dieser Gleichung lässt sich der durch die Diffusion bedingte Stromfluss  $j_{Diff}$  berechnen.

$$j_{Diff} = z \cdot F \cdot D \cdot \frac{dc}{dx} \quad (4-14)$$

Betrachtet man das Konzentrationsprofil in Abbildung 4-2 ergibt sich für den stationären Fall und unter der Annahme eines linearen Gradienten die vereinfachte Gleichung

$$j_{Diff} = z \cdot F \cdot D \cdot \frac{c_0 - c_s}{\delta_N} \quad (4-15)$$

mit  $c_0$  Konzentration im Elektrolytinneren

$c_s$  Konzentration an der Kathodenoberfläche

$\delta_N$  Dicke der Nernstschen Diffusionsgrenzschicht

Erreicht die Konzentration an der Kathodenoberfläche  $c_s$  den Wert 0 ist die Grenzstromdichte  $j_{Grenz}$  erreicht.

$$j_{Grenz} = z \cdot F \cdot D \cdot \frac{c_0}{\delta_N} \quad (4-16)$$

Sie darf nicht überschritten werden, da sonst die Gefahr besteht technisch nicht verwendbare Schichten abzuscheiden. Die bei Überschreitung der Grenzstromdichte abgeschiedenen Schichten weisen eine raue und nicht geschlossene Oberflächenstruktur auf. [DIN 50957]

Nach Untersuchungen von Vielstich kann die Grenzstromdichte für turbulente Strömung näherungsweise nach der Vielstich-Gleichung berechnet werden:

$$j_{Grenz} \approx \sqrt{v_0} \quad (4-17)$$

In dieser Gleichung wird die mittlere Strömungsgeschwindigkeit des turbulenten Strömungsgebietes  $v_0$  als Basis herangezogen. [Wingenfeld 2004]

### 4.2.3 Konvektion

Unter Konvektion versteht man die durch Strömung verursachte Ionenbewegung. Diese ist auf thermische Unterschiede (freie Konvektion) oder von außen aufgezwungene hydrodynamische Strömung (erzwungene Konvektion) zurückzuführen. [Kanani 2000]

Die aus beiden Konvektionsarten entstehende Elektrolytbewegung verursacht an der Kathodenoberfläche eine Strömungsgrenzschicht  $\delta_{Pr}$  (Prandlsche Grenzschicht). Die Dicke der in Gleichung (4-16) eingehenden Diffusionsgrenzschicht  $\delta_N$  wird maßgeblich von der Strömungsgrenzschicht geprägt. Sie lässt sich wie folgt berechnen: [Hamann 1998]

$$\delta_N = \delta_{Pr} \cdot \left( \frac{\nu}{D} \right)^{-1/3} \quad (4-18)$$

mit  $\nu$  = kinetische Zähigkeit (für Wasser ca.  $1 \cdot 10^{-2}$  [cm<sup>2</sup>/sec])

$\delta_{Pr}$  = Prandlsche Grenzschicht

So ist es nicht verwunderlich, dass durch erzwungene Konvektion das Abscheideverhalten bzw. Schichtwachstum entscheidend beeinflusst werden kann. Je nach Elektrolytsystem hat die Konvektion in Form einer gerichteten hydrodynamischen Anströmung der Bauteiloberfläche neben der Verringerung der Diffusionsgrenzschicht auch Auswirkungen auf weitere Schichteigenschaften (z.B. Schichtwachstum, Rauigkeit, Dendritenbildung und Glanz). [Bolch 1998], [Möbius 2003] Dieser Effekt, der sehr elektrolytspezifisch ist, konnte bisher noch nicht explizit durch chemische, thermodynamische oder physikalische Gesetzmäßigkeiten beschrieben werden.

### 4.3 Elektrodenvorgänge und damit verbundene Effekte

Der Transport von Ionen zur Elektrodenoberfläche wird in der Regel durch verschiedene Einflüsse behindert bzw. verlangsamt und weicht deshalb von den theoretischen idealisierten Modellen ab. Diese Widerstandseinflüsse werden unter dem Begriff der Polarisation zusammengefasst.

Um diese zu überwinden, muss eine Überspannung  $\eta$  angelegt werden. Dies kann man je nach Wirkmechanismus und Ort wie folgt aufteilen [Strauch 1987]:

- Konzentrationsüberspannung  $\eta_C$
- Durchtrittsüberspannung  $\eta_D$
- Kristallisationsüberspannung  $\eta_K$
- Widerstandsüberspannung  $\eta_W$

Betrachtet man die in Abbildung 4-1 schematisch dargestellten Transportvorgänge an der Kathode, so lassen sich die lokal auftretenden Polarisationseffekte wie folgt beschreiben [Wolfhard 1980]:



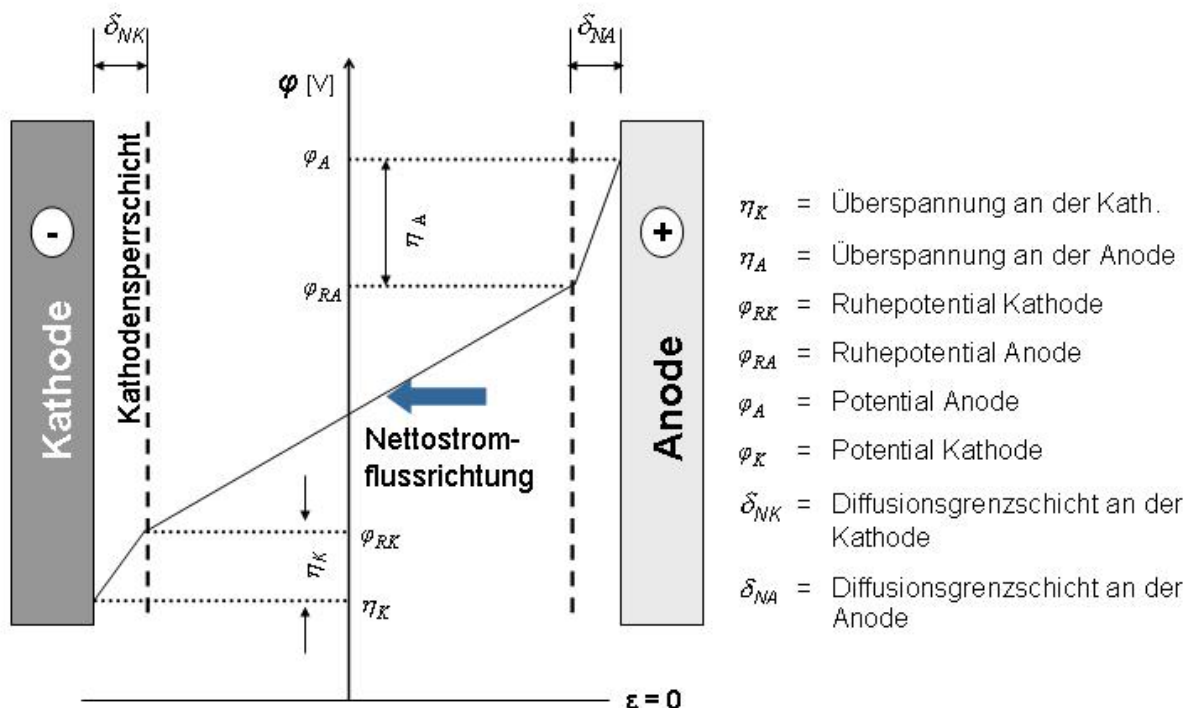
Die vom Inneren des Elektrolyten bis zur Doppelschicht (vgl. Abbildung 4-1) wirkenden Hemmungsmechanismen werden mit Konzentrationsüberspannung bezeichnet. Diese setzt sich aus der *Diffusions-* und der *Reaktionsüberspannung* zusammen. Die Diffusionsüberspannung berücksichtigt dabei die Bewegungseinschränkung, die durch den Konzentrationsunterschied der Ionen im Elektrolyten hervorgerufen wird. Mit *Reaktionsüberspannung* bezeichnet man alle Hemmungen, die auf die ablaufenden Teilreaktionen (Hydrations-, Dehydrations-, Komplexbildungs-, Komplexzerfallsreaktionen, etc.) zurückzuführen sind.

Die nachfolgenden Hemmungen beim Durchtritt der Ionen an der Phasengrenze zwischen Elektrolyten und Elektrode verursachen die Durchtrittsüberspannung.

Hingegen ist die Widerstandsüberspannung auf hemmende Mechanismen beim Ionenübergang zurückzuführen. Ursachen hierfür sind unmittelbar an der Elektrode angrenzende, oft passivierende Schichten. [Strauch 1990] Aus der Addition der einzelnen Überspannungen ergibt sich die Gesamtüberspannung:

$$\eta_{ges} = \eta_C + \eta_D + \eta_K + \eta_W \quad (4-19)$$

Der hieraus resultierende Potentialverlauf zwischen Anode und Kathode ist in Abbildung 4-3 dargestellt.



**Abbildung 4-3: Potentialverlauf zwischen Anode und Kathode bei Stromfluss**

Mit der oben beschriebenen Polarisation ist die Diskrepanz zwischen der in Gleichung (4-2) errechneten theoretischen elektromotorischen Kraft (*EMK*) und der zur Abscheidung von Ionen benötigten höheren Zusatzspannung erklärt. Die notwendige kathodische und anodische Überspannung zur Überwindung der Helmholtzschen Doppelschicht (Durchtrittsüberspannung  $\eta_D$ ) lässt sich theoretisch über die Arrhenius und Buttler-Volmer Gleichungen herleiten:

$$\eta_{anodisch} = \frac{2,3 \cdot R \cdot T}{(1 - \alpha) \cdot n \cdot F} \lg i_0 - \frac{2,3 \cdot R \cdot T}{(1 - \alpha) \cdot n \cdot F} \lg i \quad (4-20)$$

$$\eta_{kathodisch} = \frac{2,3 \cdot R \cdot T}{\alpha \cdot n \cdot F} \lg i_0 - \frac{2,3 \cdot R \cdot T}{\alpha \cdot n \cdot F} \lg i \quad (4-21)$$

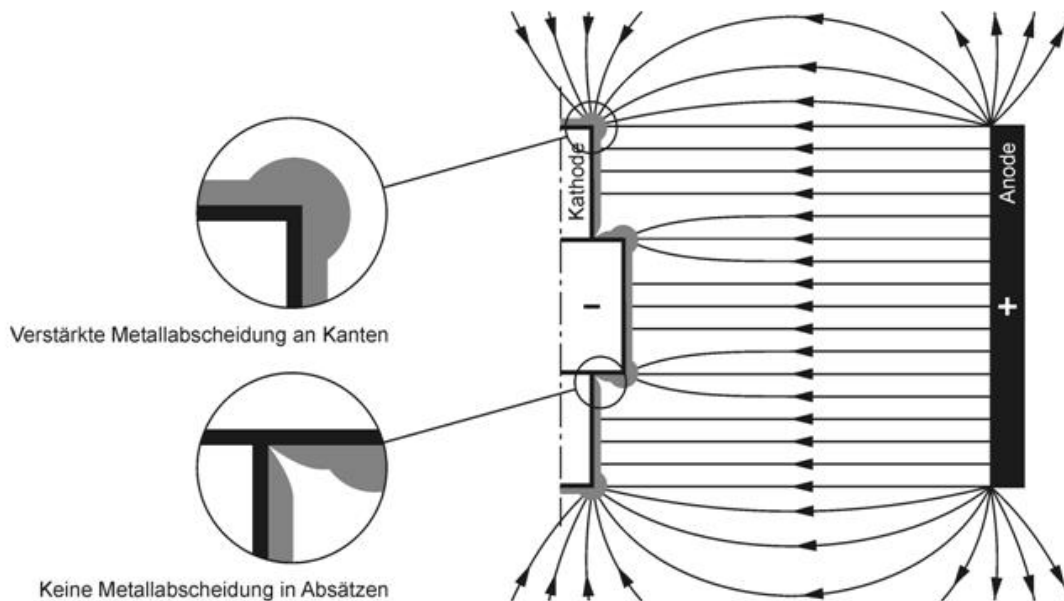
mit  $\alpha$  Durchtrittsfaktor (Wert zwischen 0 und 1)

Die zur expliziten Berechnung der Überspannungen notwendigen Daten müssen mittels Voltammetrie bestimmt werden. Hierunter versteht man die Analyse und Auswertung der experimentell aufgezeichneten Strom-Spannungskurven. Aus diesen lässt sich dann der Durchtrittsfaktor ermitteln.

#### 4.4 Makroskopische Schichtdickenverteilung

Die Fähigkeit eines Elektrolytsystems, gleichmäßige Schichten auf eine komplex geformte Oberfläche abzuscheiden, wird mit dem Begriff der „Streifähigkeit“ beschrieben. Diese makroskopische Eigenschaft hängt von einer Vielzahl von Effekten ab, die unter den Begriffen primäre, sekundäre und tertiäre Stromdichteverteilung zusammengefasst werden.

Die **primäre Stromdichteverteilung** resultiert aus dem anliegenden Potentialfeld zwischen Anoden- und Kathodengeometrie. Der Verlauf der elektrischen Feldlinien folgt klaren geometrischen Beziehungen. Wie in Abbildung 4-4 dargestellt, ergibt sich hieraus an den den Verfahrensraum zugewandten Ecken und exponierten Formelementen der Kathode eine Erhöhung der elektrischen Feldlinienkonzentration.



**Abbildung 4-4: Schematische Darstellung der primären Stromdichteverteilung durch lokal unterschiedliche Feldlinienkonzentration**

Die hieraus resultierende kathodische Stromdichte führt nach Gleichung (4-29) zu einer lokal verstärkten bzw. geschwächten Ionenabscheidung. Die primäre Stromdichteverteilung wird im Wesentlichen durch die geometrischen Gegebenheiten im Verfahrenssaum bestimmt. Dazu gehören sowohl die Kathoden-, Anoden- und Verfahrenssaumgeometrie als auch die Anordnung von Anode und Kathode im Verfahrenssaum selbst.

Alle Effekte, die mit dem Transport der Ionen an die Kathodenoberfläche zusammenhängen und ebenfalls Einfluss auf die Streufähigkeit des Elektrolyten haben, werden unter dem Begriff der **sekundären Stromdichte** zusammengefasst.

Ursächlich hierfür sind die in Kapitel 4.3 beschriebenen Polarisierungseffekte. Deren Einflussgrößen sind:

- Grundansatz des Elektrolyten
- Elektrolytzusätze
- Elektrolyttemperatur
- pH-Wert
- Stromdichte
- Relativbewegung zwischen Kathode und Elektrolyt

Für die **tertiäre Stromdichteverteilung** sind die Nebenreaktionen an der Kathode verantwortlich. Diese chemischen Reaktionen, wie z.B. die Wasserstoffabscheidung, hängen vom pH-Wert, der Elektrolytzusammensetzung, der Prozesstemperatur und der Stromdichte ab. Hieraus ergibt sich die kathodische Stromausbeute (vgl. Kapitel 4.5). [Dettner 1989]

## 4.5 Theoretische Schichtdickenberechnung

Der Zusammenhang zwischen der abgeschiedenen bzw. umgesetzten Stoffmenge und dem Stromfluss kann aus dem ersten Faradayschen Gesetz abgeleitet werden: [Strauch 1990]

$$n \sim Q \quad (4-22)$$

$$Q = I \cdot t \quad (4-23)$$

mit  $n$  Stoffmenge

$Q$  Ladung

$I$  Stromfluss

$t$  Zeit

Wird jedem Ion eine elektrische Ladung zugeordnet, erhält man unter Einbeziehung des elektrochemischen Äquivalentes für die abgeschiedene Masse folgende Beziehung:

$$m = Ae_{theoret.} \cdot j \cdot A \cdot p_K \quad (4-24)$$

mit  $m$  Masse

$j$  lokale Stromdichte

$A$  Fläche

$p_K$  kathodische Stromausbeute

Das elektrochemische Äquivalent wird wie folgt berechnet:

$$Ae_{theoret.} = \frac{M}{z \cdot F} \quad (4-25)$$

mit  $M$  molare Masse

Die Stromausbeute beschreibt die Differenz zwischen der theoretisch maximalen und tatsächlich abgeschiedenen Masse. Diese Differenz entsteht durch die in der Praxis ablaufenden Konkurrenzreaktionen an der Kathodenoberfläche. Insbesondere durch die Wasserstoffabscheidung steht nicht der gesamte zugeführte Strom für die Metallabscheidung zu Verfügung. Dies wird durch die kathodische Stromausbeute berücksichtigt. [Unruh 2001]

$$p_k = \frac{m_{\text{prakt.}}}{m_{\text{theoret.}}} 100\% \quad (4-26)$$

mit  $m_{\text{theor}}$  theoretisch abgeschiedene Masse

$m_{\text{prakt.}}$  praktisch abgeschiedene Masse

Bei vorgegebener Schichtdicke  $d$  lässt sich die Stoffmasse  $m$  unter Einbeziehung der Dichte  $\rho$  wie folgt berechnen:

$$m = d \cdot A \cdot \rho \quad (4-27)$$

mit  $\rho$  Dichte des Schichtmaterials

$d$  Schichtdicke

$A$  Fläche

Setzt man nun Gleichung (4-24) mit Gleichung (4-27) gleich, ergibt sich hieraus die Schichtdicke:

$$Ae_{\text{theoret.}} \cdot j \cdot A \cdot t \cdot p_K = d \cdot A \cdot \rho \quad (4-28)$$

$$d = \frac{Ae_{\text{theoret.}} \cdot j \cdot t \cdot p_K}{\rho} \quad (4-29)$$

Will man nun aber nicht nur die Schichtdicke eines Einstoffsystems berechnen sondern einer Schicht mit mehreren Legierungspartnern, wird dies wesentlich schwieriger. Die Gleichung (4-29) kann jetzt nicht mehr angewandt werden, da zur Gesamtschichtdicke alle Legierungspartner beitragen. Eine Summation ist aber nur in beschränkten Fällen möglich (z.B. wenn alle Legierungspartner gleichmäßig zum Schichtaufbau beitragen würden). Die Gleichung lautet dann:

$$d_{gesamt} = d_1 + \dots + d_n = \frac{Ae_{theoret.(1)} \cdot j_{(1)} \cdot t \cdot p_{K(1)}}{\rho_{(1)}} + \dots + \frac{Ae_{theoret.(n)} \cdot j_{(n)} \cdot t \cdot p_{K(n)}}{\rho_{(n)}} \quad (4-30)$$

Auf Grund dieser theoretischen Betrachtungen des elektrochemischen Beschichtungsprozesses und der dabei ermittelten Gesetzmäßigkeiten ist es nun möglich, ein numerisches Modell zu entwickeln, das in der Lage ist, den Beschichtungsprozess so abzubilden, dass damit eine Optimierungsstrategie hinsichtlich der Anodengeometrie erarbeitet werden kann.

## **5 Mathematische Modelle zur Berechnung der relevanten Prozessparameter beim elektrochemischen Beschichten**

Die in Kapitel 1 beschriebenen theoretischen Zusammenhänge zeigen, dass die Abscheidebedingungen auf der Kathoden- bzw. Werkstückoberfläche im Wesentlichen vom Stoff- bzw. Ionentransport abhängen. Dieser wird durch die lokalen Haupteinflussgrößen, der Stromdichte (vgl. Kapitel 4.1) und der Konvektion (vgl. Kapitel 4.2.3) bestimmt. Zu deren quantitativer Bestimmung ist es notwendig, das E-Feld und den hydrodynamischen Strömungszustand im gesamten Verfahrensraum zu ermitteln. Im Folgenden werden die mathematischen Beziehungen für diese beiden physikalischen Effekte abgeleitet, die die Grundlage für die im Computermodell hinterlegten mathematischen Modelle sind.

### **5.1 Mathematisches Modell zur Berechnung elektrischer und magnetischer Felder**

Wie in Kapitel 4.4 beschrieben, ist die primäre Stromdichteverteilung zwischen der Anode und Kathode für das lokale Abscheideverhalten ausschlaggebend. Aber auch für die sekundäre und tertiäre Stromdichteverteilung hat das lokal herrschende E-Feld eine wesentliche Bedeutung.

Elektrische Felder werden von elektrischen Ladungen mit unterschiedlichen Potentialen, von zeitlich variierenden magnetischen Feldern oder einer Kombination aus beiden hervorgerufen. Ein Feldproblem lässt sich mathematisch durch skalare (Potentialfelder) und vektorielle (E-Felder) Ortsfunktionen beschreiben.

Wird jedem Raumpunkt  $\underline{r}_0 = (x,y,z)$  eine Zahl zugeordnet, ergibt sich die Funktion eines Skalarfeldes. Ordnet man hingegen jedem Raumpunkt einen Vektor zu, entsteht die Funktion eines Vektorfeldes. Das elektrische Feld ist ein Vektorfeld. In jedem Raumpunkt existiert eine richtungsabhängige elektrische Feldstärke. Hingegen ist das elektrische Potential ein Skalarfeld, denn jedem Raumpunkt wird eine Zahl, nämlich das Potential zugeordnet. [Stöcker 2004]

Das elektromagnetische Feld ist durch folgende fünf Feldgrößen bestimmt:

- der elektrischen Feldstärke  $\underline{E}$
- der magnetischen Feldstärke  $\underline{H}$
- der elektrischen Verschiebungsdichte  $\underline{D}$
- der magnetischen Flussdichte  $\underline{B}$
- der elektrischen Stromdichte  $\underline{J}$

Diese sind durch drei Materialgleichungen miteinander wie folgt verknüpft:

$$\underline{J} = \chi \cdot \underline{E} \quad (5-1)$$

$$\underline{D} = \varepsilon \cdot \underline{E} \quad (5-2)$$

$$\underline{B} = \mu \cdot \underline{H} \quad (5-3)$$

mit  $\chi$  elektrische Leitfähigkeit

$\varepsilon$  Dielektrizitätskonstante

$\mu^*$  Permeabilität

Durch die Maxwellschen Gleichungen ist es gelungen, die Ursache, die Wirkung, die Wechselwirkungen und die zeitliche Abhängigkeit von elektrischen und magnetischen Feldern zu bestimmen. Diese Gleichungen lassen sich sowohl in integraler als auch in differentialer Form darstellen. Dabei hängen die Wirbel eines Magnetfeldes von der elektrischen Stromdichte und der Verschiebungsstromdichte ab (Durchflutungsgesetz).

$$\oint_c \underline{H} ds = \iint_A \left( \underline{J} + \frac{\partial \underline{D}}{\partial t} \right) dA \quad \text{bzw.} \quad \text{rot} \underline{H} = \underline{J} + \frac{\partial \underline{D}}{\partial t} \quad (5-4)$$

Jede Änderung des  $\underline{B}$ -Feldes führt zu einem elektrischen Gegenfeld. Die Wirbel des elektrischen Feldes sind von der zeitlichen Änderung der magnetischen Induktion abhängig (Induktionsgesetz).

$$\oint_c \underline{E} ds = - \frac{\partial}{\partial t} \iint_A \underline{B} dA \quad \text{bzw.} \quad \text{rot} \underline{E} = - \frac{d \underline{B}}{dt} \quad (5-5)$$

Das  $\underline{B}$ -Feld ist quellenfrei. Es gibt keine magnetischen Monopole.



$$\oiint_A \underline{B} dA = 0 \quad \text{bzw.} \quad \text{div} \underline{B} = 0 \quad (5-6)$$

Das  $\underline{D}$ -Feld ist ein Quellenfeld. Die Ladung ist Quelle des elektrischen Feldes.

$$\oiint_A \underline{D} dA = \iiint_V \rho dV \quad \text{bzw.} \quad \text{div} \underline{D} = \rho \quad (5-7)$$

Die Kraft  $\underline{F}$ , die auf ein geladenes Teilchen in einem elektrischen Feld wirkt, ist proportional zur Feldstärke  $\underline{E}$ . In homogenen elektrischen Feldern ist diese Kraft überall gleich groß:

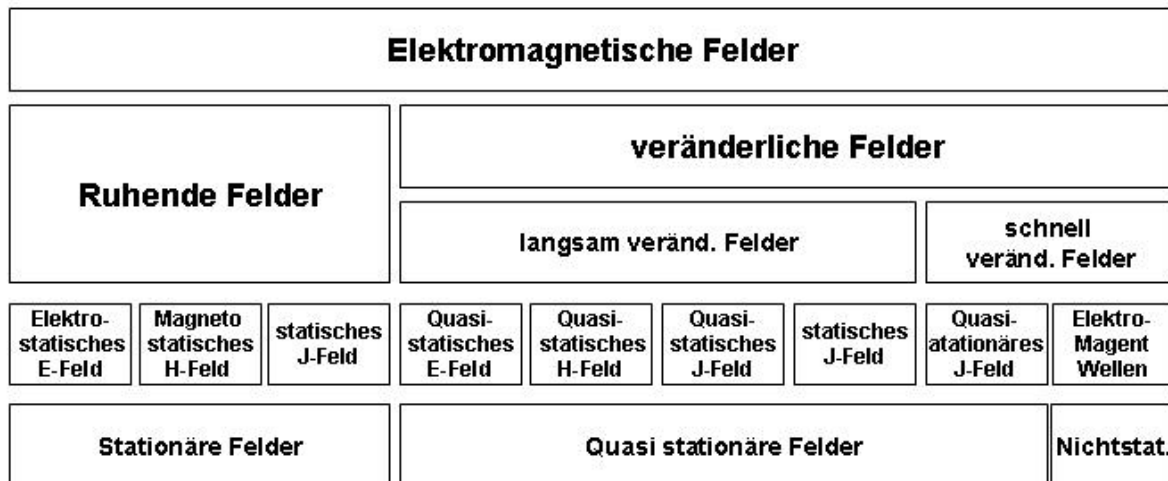
$$\underline{F} = \int_Q \underline{E} dQ \quad (5-8)$$

Im Fall kugelförmiger Ladungen ergibt sich durch Integration dieser Gleichung das bekannte coulombsche Gesetz:

$$F = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi \epsilon_0 r_{12}^2} \underline{r}_0 \quad (5-9)$$

mit  $Q_n$  Ladung des Teilchens  
 $\epsilon_0$  elektrische Feldkonstante [8,85 10<sup>-12</sup> As/Vm]  
 $r_{12}$  Abstand der Teilchen

Durch die Verwendung der Materialgleichungen (5-2 bis 5-4) und Maxwellschen Gleichungen (5-5 bis 5-9) können alle elektromagnetischen Feldformen beschrieben werden. Die hauptsächlichen Unterschiede der verschiedenen Feldformen liegen in ihrem Zeitverhalten. Diese lassen sich wie in Abbildung 5-1 dargestellt, in ruhende und zeitlich veränderliche Felder unterteilen:



**Abbildung 5-1: Einteilung der elektromagnetischen Felder bezüglich ihres Zeitverhaltens [Schwab 2002]**

Bei zeitlich veränderbaren Feldern sind alle Feldgrößen eine Funktion der Zeit. Die elektrischen und magnetischen Felder sind gekoppelt zu betrachten. Diese Kopplung ist zurückzuführen auf das Induktionsgesetz und den Verschiebungsstrom. Zum einen erzeugen zeitlich veränderte Magnetfelder auf Grund des Induktionsgesetzes elektrische Wirbelfelder und zum anderen entstehen bei zeitlich inkonsistenten elektrischen Feldern, wegen des Verschiebungsstroms, magnetische Felder.

Ruhende Felder zeichnen sich durch stationäre (zeitlich konstante) Ströme und Magnetfelder aus. Somit sind auch die Feldgrößen keine Funktionen der Zeit, sondern lassen sich durch Funktionen von Ortsvariablen ausdrücken. Durch diese Bedingungen besteht keine Kopplung zwischen den magnetischen und elektrischen Feldern.

Die ruhenden Felder werden in drei Feldarten aufgeteilt (Abbildung 5-1):

Das **elektrostatische Feld** existiert in der nichtleitenden Umgebung ruhender Ladung. Es fließen keine Ströme. Setzt man nun in die Maxwellschen und Materialgleichungen die folgenden Rahmenbedingungen des elektrostatischen Feldes ein (zeitlich konstant, wirbel- und quelfrei), so ergeben sich folgende Beziehungen:

$$\operatorname{rot} \underline{E} = \underline{0} \quad (5-10)$$

$$\underline{E} = -\operatorname{grad} \varphi \quad (5-11)$$

$$\operatorname{div} \underline{D} = \rho \quad (5-12)$$

$$\underline{D} = \varepsilon \underline{E} \quad (5-13)$$

$$\Delta \varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (5-14)$$

(In raumladungsfreien Gebieten wird  $\rho = 0$  gesetzt.)

Die Berechnung elektrostatischer Felder erfolgt auf zwei Arten: entweder direkt mit dem Gaußschen Gesetz oder indirekt durch Berechnung der Potentialfunktion  $\varphi$  und anschließender Differentiation (Gradientenbildung aus Gleichung (5-14)).

Das **magnetostatische Feld** existiert innerhalb und außerhalb gleichstromführender Leiter und in der Umgebung von Permanentmagneten. Magnetostatische Felder sind quellenfrei. Eine magnetische Ladung existiert nicht ( $\operatorname{div} \underline{B}(\underline{r}) = 0$ ).

Die Ursache magnetostatischer Felder sind bewegte Ladungen, beziehungsweise äquivalente Gleichströme mit der Wirbeldichte  $\operatorname{rot} \underline{H}(\underline{r}) = \underline{S}(\underline{r})$ .

Für magnetostatische Felder ergeben sich dann unter Berücksichtigung dieser Randbedingungen aus den Maxwellschen und Materialgleichungen die folgenden Beziehungen:

$$\operatorname{rot}\underline{H} = \underline{J}_L \quad (5-15)$$

$$\operatorname{div}\underline{B} = 0 \quad (5-16)$$

$$\underline{B} = \mu\underline{H} \quad (5-17)$$

$$\Delta\varphi_m = 0 \quad (5-18)$$

$$\Delta\underline{A} = -\mu\underline{J}_L \quad (5-19)$$

Die Berechnung magnetostatischer Felder kann ebenfalls auf zwei Arten erfolgen. Entweder direkt aus dem Durchflutungsgesetz oder indirekt durch Ermittlung einer skalaren Potentialfunktion  $\varphi_m(r)$ , beziehungsweise einer vektoriellen Potentialfunktion  $\underline{A}(r)$  und anschließender Differentiation:

$$\underline{H} = -\operatorname{grad}\varphi_m \quad (5-20)$$

$$\underline{B} = \mu\underline{H} = \operatorname{rot}\underline{A} \quad (5-21)$$

Das **statische elektrische Strömungsfeld**, auch oft als Gleichstrom-Strömungsfeld bezeichnet, entsteht bei einem konstanten Stromfluss durch einen elektrischen Widerstand von  $\rho \neq 0$ . Hierbei stellt sich im elektrischen Feld parallel zum elektrischen Fluss  $\Phi$  ein Stromfluss  $I$  ein. Der Vektor  $\underline{J}_L(r)$  der Stromdichte wird als Strömungsfeld bezeichnet, wobei an jeder Stelle im Leiter das Ohmsche Gesetz ( $R = U/I$ ) gilt.

Wie das elektrostatische Feld in der Umgebung ruhender elektrischer Ladungen, ist auch das statische Strömungsfeld ein wirbel- und quellfreies Vektorfeld. Folglich gelten die unten aufgeführten Beziehungen:

$$\operatorname{rot} \underline{E} = 0 \quad (5-22)$$

$$\operatorname{div} \underline{J}_L = 0 \quad (5-23)$$

$$\Delta \varphi = 0 \quad (5-24)$$

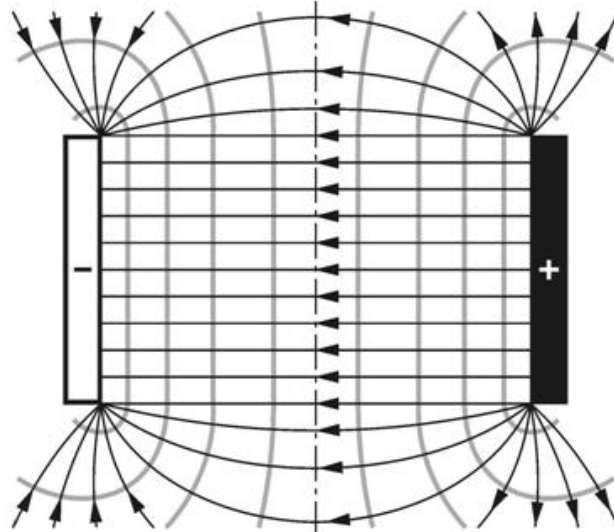
In integraler Form ergibt sich hieraus:

$$\underline{J} = \chi \cdot \underline{E} \quad (5-25)$$

## 5.2 Mathematisches Modell zur Berechnung des elektrischen Feldes beim elektrochemischen Beschichtungsprozess

Wird von einem konstanten Stromfluss zwischen den Elektroden während des gesamten Beschichtungsprozesses ausgegangen, kann in erster Näherung für die Berechnung ein ruhendes E-Feld angenommen werden. Hierbei besitzt der Elektrolyt einen elektrischen Widerstand von  $\tau > 0$ .

Es bildet sich nach Anlegen einer Spannung ein statisches Strömungsfeld, das aus einem wirbel- und quellfreien Vektorfeld gebildet wird. Diese Annahme setzt voraus, dass die Leitfähigkeit des Elektrolyten während des Prozesses zwischen den Elektroden konstant bleibt. Durch eine entsprechende Umwälzung oder Strömungsführung des Elektrolyten ist diese Bedingung im Wesentlichen auch technisch zu erfüllen. So kann das E-Feld durch die Gleichung (5-15) in einer Simulation ausgedrückt und das Ergebnis des simulierten statischen Strömungsfeldes, wie in Abbildung 5-2 gezeigt, dargestellt werden.



**Abbildung 5-2: Visuelle Darstellung eines elektrischen Feldes durch Äquipotentiallinien und Feldlinien**

Auf den Äquipotentiallinien herrscht ein konstantes Potential. Sie liegen orthogonal zu den Feldlinien. Die Feldlinien verlaufen vom Plus- zum Minuspool.

### **5.3 Mathematisches Modell zur Berechnung hydrodynamischer Strömungszustände**

Neben dem E-Feld und den daraus resultierenden lokalen Abscheidebedingungen sind die Strömungsverhältnisse im Verfahrensraum für den elektrochemischen Beschichtungsprozess von entscheidender Bedeutung. In dessen Inneren sollte eine gezielte Durchströmung einen kontinuierlichen Elektrolytaustausch bewirken und so für eine konstante Ionenkonzentration sorgen. Gerade an der Kathode ist die Grenzschichtdicke entscheidend für den Ionentransport an die Reaktionsoberfläche. Wie bereits in Kapitel 4.2.2 gezeigt, wird deshalb auch von einer konvektiven Diffusion der Reaktanden an der Kathodenoberfläche gesprochen.

Daher haben die im gesamten Verfahrensraum auftretenden strömungsmechanischen Erscheinungen wie Turbulenzen oder Totwassergebiete einen direkten oder indirekten Einfluss auf den Abscheidungsprozess.

In einem durchströmten Raum wirken grundsätzlich fünf unterschiedliche Kräfte (die Druck-, Trägheits-, Schwere- und Reibungskraft) auf ein Massenelement. [Zierep 1997] Aus diesen Kräften lassen sich vier voneinander unabhängige dimensionslose

Kraftverhältnisse bilden. Die hieraus abgeleiteten Kennzahlen charakterisieren den hydrodynamischen Strömungszustand und beschreiben die zu Grunde liegenden physikalischen Effekte. Es sind dies:

$$Eu = \frac{\text{Druckkraft}}{\text{Trägheitskraft (b)}} = \frac{p}{\rho \cdot v^2} \quad (\text{Euler- oder Newton-Zahl}) \quad (5-26)$$

Gerade für kompressible Medien ist die Euler- oder Newton-Zahl relevant. Hier ergibt sich auch der Zusammenhang zwischen Eulerzahl und Mach-Zahl.

$$Fr = \frac{\text{Trägheitskraft (b)}}{\text{Schwerkraft}} = \frac{v^2}{L \cdot g} \quad (\text{Froude-Zahl}) \quad (5-27)$$

Die Froude-Zahl ist für Systeme wichtig, bei denen die Schwerkraft einen wesentlichen Einfluss auf die Strömung hat.

$$Str = \frac{\text{Trägheitskraft (a)}}{\text{Trägheitskraft (b)}} = \frac{L}{t \cdot v} \quad (\text{Strouhal-Zahl}) \quad (5-28)$$

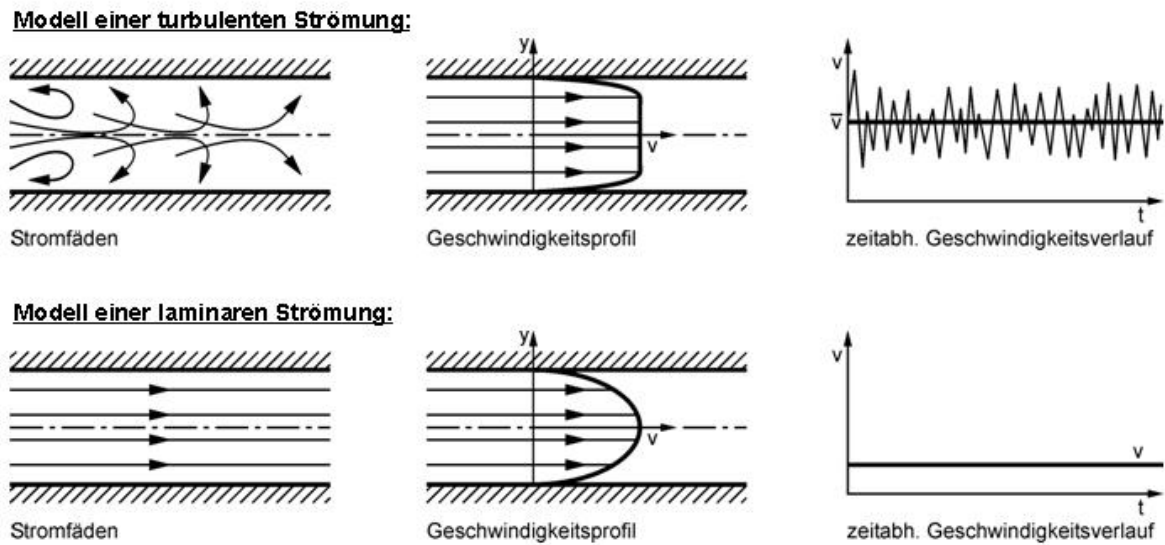
Die Strouhal-Zahl charakterisiert Strömungssysteme mit instationären Vorgängen und ermöglicht es, das instationäre Glied der Bernoulli-Gleichung mit dem stationären Term ins Verhältnis zu setzen.

$$Re = \frac{\text{Trägheitskraft (b)}}{\text{Reibungskraft}} = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\eta^*} \quad (\text{Reynolds-Zahl}) \quad (5-29)$$

Die Reynoldszahl erfasst den Reibungseinfluss. Ergibt sich für die Reynoldszahl ein Wert sehr viel größer als 1, so ist der Einfluss der Reibungskraft innerhalb der Strömung von geringer Wirkung und nur an den Phasengrenzen relevant. Nimmt aber die Reynoldszahl einen Wert kleiner gleich 1 an, so ist der Einfluss der Reibungskraft gegenüber der Trägheitskraft erheblich und ist somit in der Strömung von Bedeutung. Diese vier Kennzahlen ermöglichen es, unter gewissen Bedingungen Messungen bzw. Erkenntnisse aus Modellversuchen auf komplexe reale Strömungssysteme zu übertragen. Der Modellversuch muss dazu ein geometrisch ähnliches Strömungsfeld beinhalten, um auf die Wirklichkeit schließen zu können. [Zierep 1997] Insbesondere bei der Verwendung der Reynoldszahl ist es notwendig, zwischen laminaren und turbulenten Strömungszuständen zu unterscheiden.

Der laminare Strömungszustand zeichnet sich durch ein homogenes Strömungsprofil aus. Die Stromfäden verlaufen parallel zueinander (Abbildung 5-3). Der Betrag der

Reynoldszahl ist kleiner 2300. Bei einem Wert über 2300 schlägt die Strömung in ein turbulentes Strömungsprofil um.

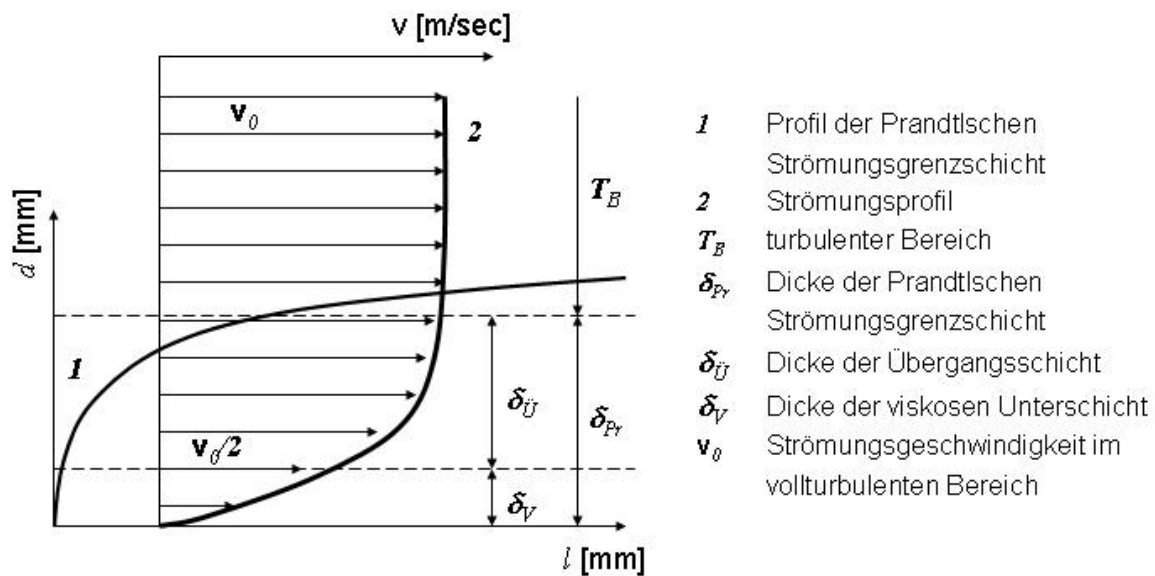


**Abbildung 5-3: Laminarer und turbulenter Strömungszustand einer Rohrströmung**

Es breiten sich Wirbelströmungen aus und die Moleküle sind stochastischen Bewegungen unterworfen. Eine turbulente Strömung ist instationär und kann nicht durch Stromlinien beschrieben werden. Wie zuvor schon ausgeführt, üben die Strömungsverhältnisse auf den elektrochemischen Beschichtungsprozess im Bereich des Phasenüberganges zwischen Kathodenoberflächen und Elektrolyt für eine Reihe von Teilprozessen einen großen Einfluss aus.

Betrachtet man den in Abbildung 5-4 dargestellten Fall einer horizontal überströmten Platte, so ist festzustellen, dass sich nach einer gewissen Einlaufstrecke eine Plattengrenzschicht – die Prandtlische Strömungsgrenzschicht  $\delta_{pr}$  – ausbildet. [Schlichting 1997]





**Abbildung 5-4: Geschwindigkeitsprofil an einer horizontal angeströmten Platte (turbulenter Strömungszustand) [Schlichting 1997]**

An der Wand haftet die Strömung ( $v = 0$ ), während am Grenzschichtrand die Strömung die Geschwindigkeit der freien Außenströmung ( $v = v_\infty$ ) erreicht. Daraus resultiert ein Geschwindigkeitsprofil der Grenzschicht, das sich in die viskose Unterschicht, der Übergangsschicht und den vollturbulenten Strömungsbereich einteilen lässt. Der Außengrenze der viskosen Unterschicht wird bei einer 50% Abnahme der freien Außenströmung ( $v_\infty$ ) bzw. Kernströmung erreicht. [Schlichting 1997]

Die Dicke der Prandtlischen Strömungsgrenzschicht hängt primär vom Betrag der Reynoldszahl  $Re$  ab. Mit zunehmender Turbulenz der Strömung verringert sie sich. Näherungsweise kann man die Dicke der Prandtlische Strömungsgrenzschicht wie folgt bestimmen:

$$\delta_{Pr} = \frac{0,364}{\sqrt{Re}} \cdot l \quad \text{für} \quad Re < 5 \cdot 10^5 \quad (5-30)$$

$$\delta_{Pr} = \frac{0,37}{Re^{1/5}} \cdot l \quad \text{für} \quad 5 \cdot 10^5 < Re < 10^7 \quad (5-31)$$

$10^7$

Die Voraussetzung für die Anwendung dieser Formeln ist allerdings eine hydraulisch glatte Oberfläche. [Schlichting 1997]

Um eine Strömung vollständig, d.h. dreidimensional beschreiben zu können, müssen der Geschwindigkeitsvektor  $\underline{c}$  und die thermodynamischen Größen Druck  $p$ , Dichte  $\rho$  und Temperatur  $T$  im gesamten zu untersuchenden Raum bekannt sein. Zur Berechnung dieser sechs Größen (drei Geschwindigkeitskomponenten  $u$ ,  $v$ ,  $w$  und drei thermodynamische Variablen  $p$ ,  $\rho = 1/v_{\text{spez}}$ ,  $T$ ) benötigt man die Erhaltungssätze für Masse (5-32), Impuls (5-33) und Energie (5-34) sowie die Zustandsgleichung (5-35), die die thermodynamischen Variablen miteinander verknüpft. [Oertel 1999]

$$\frac{dm}{dt} = 0 \quad (5-32)$$

$$\frac{dl}{dt} = \sum_n \underline{F}_n \quad (5-33)$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \sum_n \underline{F}_n \cdot \underline{u} + \sum_i Q_i \quad (5-34)$$

$$dT = \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right)_{v_{\text{spez}}} dp + \left( \frac{\partial T}{\partial v_{\text{spez}}} \right)_p dv_{\text{spez}} \quad (5-35)$$

Die Erhaltungssätze werden dabei in Form von partiellen Differentialgleichungen angegeben (Navier-Stokes-Gleichungen).

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = X - \frac{\partial p}{\partial x} + \eta \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (5-36)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = Y - \frac{\partial p}{\partial y} + \eta \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (5-37)$$

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = Z - \frac{\partial p}{\partial z} + \eta \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (5-38)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5-39)$$

## 5.4 Mathematisches Modell zur Berechnung des hydrodynamischen Strömungszustandes beim elektrochemischen Beschichtungsprozess

Zur Berechnung von einfacheren Problemstellungen können zur Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen (5-36) bis (5-39) Anfangs- und Randbedingungen angegeben werden, die in der Regel das zu lösende Gleichungssystem vereinfachen. Bei der Betrachtung des elektrochemischen Beschichtungsprozesses kann in erster Näherung von einer stationären ( $d/dt = 0$ ), inkompressiblen ( $\rho = \text{konstant}$ ), reibungs- ( $\eta^* = 0$ ) und drehungsfreien ( $\Delta \Phi = 0$ ) Strömung ausgegangen werden. Hieraus ergibt sich durch Vereinfachung der Navier-Stokes-Gleichungen die Bernoullische Bewegungsgleichung. [Schlichting 2000]

$$\Delta \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (5-40)$$

wobei  $u = \frac{\partial \phi}{\partial x}$ ,  $v = \frac{\partial \phi}{\partial y}$ ,  $w = \frac{\partial \phi}{\partial z}$

Diese vereinfachten Navier-Stokes-Gleichungen können als mathematisches Modell für die Berechnung des hydrodynamischen Strömungszustands gelten. Um aber auch Aussagen in den Bereichen der Grenzflächen und Übergangsbereiche der Strömung zu bekommen reicht dieser vereinfachte Ansatz oft nicht aus. Für diese Untersuchungen muss die gesamten Navier-Stokes-Gleichungen zugrunde gelegt werden. Die hieraus resultierenden Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich der Phasengrenze zwischen Elektrolyt und Kathodenoberflächen können in erster Näherung die Basis für die Berechnung der lokal herrschenden Grenzschichtdicken bilden. Sie bestimmen sich nach Gleichung (5-30) und (5-31). Aus dem Ergebnis der lokal herrschenden Prandlschen Grenzschicht lässt sich dann die für den Stofftransport entscheidende Diffusionsgrenzschicht nach Gleichung (4-18) ermitteln.

## 6 Computermodell zur Simulation des elektrochemischen Beschichtungsprozesses

Die Optimierung von Fertigungsprozessen lässt sich durch den Einsatz numerischer Verfahren wesentlich effizienter gestalten. Zur Ermittlung optimierter Fertigungsstrategien und technologischer Stellgrößen sind derzeit in der Regel noch kosten- und zeitintensive experimentelle Untersuchungen notwendig und das Entwickeln entsprechender Prototypen. Bedingt durch immer höhere Rechenleistung und bessere Simulationstechniken lässt sich in Zukunft der experimentelle Aufwand erheblich reduzieren. [Engel 2001]

Zur Erstellung eines Simulationsprogramms für ein Fertigungsverfahren ist ein vertieftes Prozessverständnis unabdingbar (vgl. Kapitel 1), um die wichtigsten Prozessparameter und ihre Wirkzusammenhänge zu ermitteln. Nur so ist es möglich, aus ihnen das mathematische Modell zur Vorhersage des Fertigungsergebnisses zu entwickeln (vgl. Kapitel 1) und in ein entsprechendes Computermodell zu überführen.

Das systematische Vorgehen zur Simulation eines technischen Systems kann als Regelkreis wie folgt beschrieben werden.

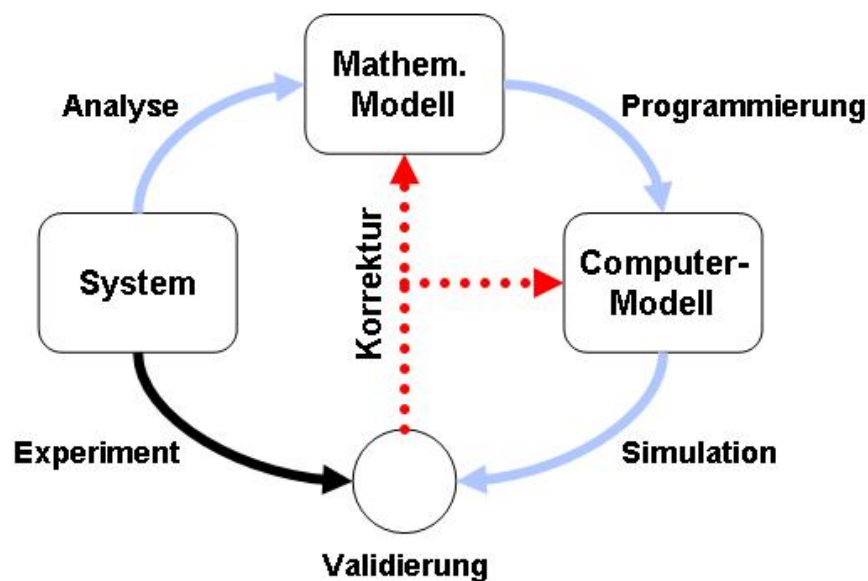


Abbildung 6-1: Simulationskreislauf [Kahlert 2004]

Der erste Schritt besteht aus der Definition der Systemgrenzen, der Systemkomponenten, der Ein- und Ausgangsgrößen sowie den Energie-, Stoff- und Informationsflüssen zwischen den Systemkomponenten. Im zweiten Schritt, der Systemanalyse, werden die Abhängigkeiten der Ausgangsgrößen von den Eingangsgrößen sowie den Systemparametern bestimmt. Im dritten Schritt wird das Systemverhalten in einem mathematischen Modell beschrieben und durch Zeitdiskretisierung in ein entsprechendes Computermodell umgesetzt. Im letzten und entscheidenden Schritt erfolgt die Validierung der Simulation, d.h. es werden die simulierten Werte mit dem Realsystem verglichen. In Abhängigkeit von den Ergebnissen ist das Modell ggf. so lange zu überarbeiten, bis die Simulation der realen Wirklichkeit weitgehend entspricht. [Kahlert 2004]

Im Folgenden wird ein Computermodell gesucht, das es ermöglicht sowohl die Navier-Stokes-Gleichungen (vgl. Gleichung (5-36) bis (5-39)) zur Berechnung des hydrodynamischen Strömungszustandes, als auch die Gleichungen des statisch elektrischen Strömungsfelds (vgl. Gleichung (4-23) bis (4-26)) zu lösen. Zusätzlich muss eine Möglichkeit bestehen, beide Ergebnisse zu koppeln, um so die prozessrelevanten Kennzahlen, wie z.B. die lokale Grenzstromdichte (vgl. Gleichung (4-16)) und die Schichtdicke (vgl. Gleichung (4-29)) zu berechnen.

## **6.1 Auswahl des Computermodells**

Zur Simulation müssen die physikalischen, hydrodynamischen und chemischen Teilprozesse bzw. Prozessparameter in eine Form überführt werden, dass sie im Rechner verarbeitet werden können. Hierzu steht eine Reihe von Simulationstechniken zur Verfügung.

Das dem Computermodell zu Grunde liegende mathematische Modell ist bei der Auswahl des richtigen Ansatzes entscheidend. Kann wie in diesem Fall, das Prozessverhalten durch Bildung von Differenzialgleichungen beschrieben werden (vgl. Kapitel 1), eignen sich Finite-Element-Methoden (FEM) bzw. Finite-Volumen-Methoden (FVM). Ist die Beschreibung des Prozesses auf die Wechselwirkung zwischen einzelnen Atomen zurückzuführen, so wird man diese explizit abbilden und durch molekulare Ansätze, wie z.B. die Molekulardynamik oder durch statistische Betrachtungen mittels Monte-Carlo Modell auf den Gesamtprozess übertragen.

[Scheibe 2004] Eine Übersicht der gängigsten numerischen Simulationsverfahren ist in Tabelle 6-1 dargestellt.

<b>Methode</b>	<b>Einsatzgebiet</b>	<b>Vorteil</b>	<b>Nachteil</b>
Analytische Lösung	Einfache Aufgaben und Geometrie	Exakte Berechnung	Nur bei einfachen Geometrien einsetzbar
Boundary Integral (Randintegrale)	Zur Berechnung von Oberflächen- und Randwerten	Schnelle Lösung für reine Randwertaufgaben	Keine Berücksichtigung des Feldinneren
Differenzverfahren (spez. Taylorentwicklung)	Universell anwendbar bei einfachen Gleichungen erster Ordnung	Schnelle Lösung, leicht zu programmieren	Komplexe Geometrien können nur schlecht berechnet werden. Feinmaschiges Netz notwendig
Finite-Volumen-Methode (FVM)	Hauptsächlich für die Strömungsmechanik gebräuchlich	Hohe Flexibilität bei komplexen Geometrien, gleichzeitige Lösung von mehreren Differenzialgleichungen möglich	Aufwendige Netzgenerierung Nachteile in der Randzelle, da immer die Zellenmitte als Bezugspunkt verwendet wird.
Finite-Elemente-Methode (FEM)	Weit verbreitete Methode, gerade bei mechanischen Simulationen	Hohe Flexibilität bei komplexen Geometrien, großflächige Elemente verwendbar	Aufwendige Netzgenerierung
Monte Carlo	Komplexe Systeme, atomistische Wechselwirkung	Einfache Berechnung	Lediglich statistische Interpretation des Problems, hohe Rechenzeit
Molekulardynamik	Betrachtung einzelner Moleküle bzw. Atome, wie ein mechanisches System	In der atomistischen Betrachtung sehr genau	Skalierungseffekte bzw. statistische Ungenauigkeiten bei makroskopischen Problemstellungen

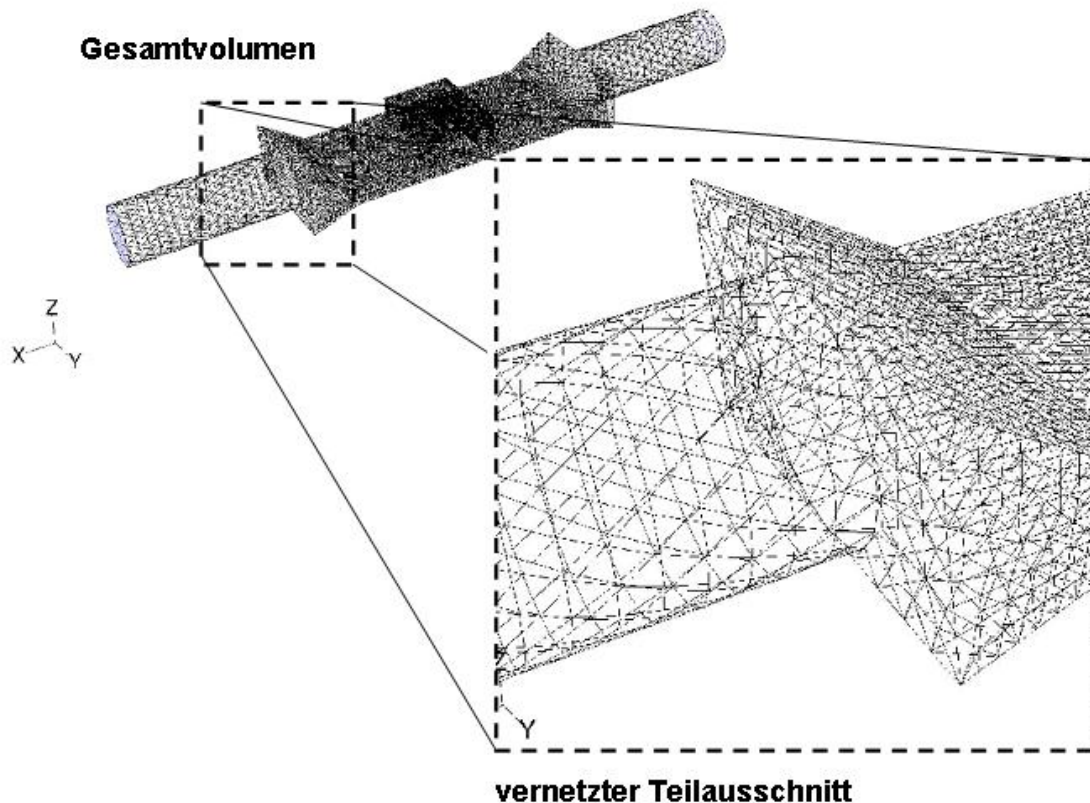
**Tabelle 6-1: Vergleich von Berechnungsverfahren zur Lösung von Differenzialgleichungen [Scheibe 1999]**

Eine der wichtigsten Fragestellungen bei der Modell- bzw. Simulationserstellung von technischen Systemen ist die Abgrenzung des Anwendungsbereichs und der sich hieraus ergebende Detaillierungsgrad. Denn die Simulation ist stets mit einem hohen Rechenaufwand verbunden. Es ist deshalb wichtig, vorher zu prüfen, ob die Aufnahme bestimmter Details sinnvoll ist und dies in einem vernünftigen Verhältnis zum dazu notwendigen Aufwand steht. Als Regel kann gelten: Das Modell ist so grob wie möglich zu entwerfen. [Bronstein 2000] Andererseits muss man berücksichtigen, dass die kleinste numerische Detaillierung feiner sein muss als die kleinste zu berechnende physikalische Größe.

Da sich die entscheidenden Prozesszustände, elektrisches Feld und hydrodynamische Strömung, numerisch durch Differentialgleichungen beschreiben lassen, wird bei der Modellbildung auf den FVM-Ansatz zurückgegriffen. Atomistische Betrachtungen können derzeit ausgeschlossen werden, da im Elektrolyten immer eine Vielzahl unterschiedlicher Moleküle (vgl. Tabelle 7-1) vorliegen, deren Wechselwirkungen und Wirkmechanismen in der Regel unbekannt sind. Nur einzelne Effekte des Abscheidemechanismus additivfreier Elektrolyten können derzeit ansatzweise unter Verwendung einer Atomistischen Betrachtungsweise simuliert werden. [Pricer 2002]

## **6.2 Finite-Volumen-Methode (FVM)**

Das Finite-Volumen-Verfahren wurde in den 50er Jahren als Methode zur Lösung von Erhaltungsgleichungen für die Raumfahrt entwickelt. [LeVeque 2002] Erhaltungsgleichungen sind spezielle partielle Differentialgleichungen, denen die Erhaltungssätze (Energie, Masse und Impuls) zugrunde liegen. So ist es nicht verwunderlich, dass der Hauptanwendungsbereich der Finite-Volumen-Methode in der numerischen Strömungsberechnung zur Lösung der Euler- und Navier-Stokes-Gleichungen liegt. Um die FVM auf das zu untersuchende Gebiet anzuwenden, wird dieses in eine endliche (finite) Zahl an Gitterzellen (die Volumen) zerlegt. Zur Diskretisierung dieser dreidimensionalen Strukturen werden für gewöhnlich einzelne Tetraeder, Quader, Prismen oder hybride Mischgitter verwendet. In Abbildung 6-2 ist ein solches Rechengitter beispielhaft dargestellt.



**Abbildung 6-2: Beispiel für ein vernetztes Volumen**

Da in jeder dieser Zellen die Erhaltungssätze gelten, kann eine Veränderung der betrachteten Größe, z.B. der Energie, in einer Zelle nur durch deren Ab- oder Hinzufießen über deren Zellenrand erfolgen. Berechnet man diese Flüsse, wie z.B. den Energiefluss, lässt sich ein Gleichungssystem aufstellen, das die Veränderung in den Zellen beschreibt. Man erhält so ein mathematisches System von gewöhnlichen Differenzialgleichungen. Diese können mittels numerischer Iterationsverfahren mit technischer hinreichender Genauigkeit gelöst werden. [LeVeque 2002]

Finite-Volumen-Verfahren lassen sich als spezielle Finite-Elemente-Verfahren auffassen, bei denen man in den Zellen und nicht in den Knotenpunkten stückweise konstante bzw. stückweise lineare Ansatzfunktionen wählt. Dies hat Vorteile in der flexiblen Wahl der Gittergeometrie sowie im Zulassen von unstetigen Lösungen. Diese treten gerade in der Fluid- und Gasdynamik häufig auf. Die zu untersuchenden Problemstellungen müssen allerdings in Form einer Transportgleichung definierbar sein.



### 6.3 Implementierung der mathematischen Beziehungen in ein Computermodell

Wie in vorangegangenen Kapiteln dargestellt, ist es zur Simulation qualitätsrelevanter Prozessgrößen des elektrochemischen Beschichtungsprozesses (wie z.B. der lokalen Grenzstromdichte) notwendig, Ergebnisse verschiedener, mathematisch und physikalisch unabhängiger Differentialgleichungen (z.B. Stromdichte und Diffusionsgrenzschicht) miteinander zu koppeln. Hierbei müssen zunächst die hydrodynamischen Strömungsverhältnisse mit den Navier-Stokes-Differentialgleichungen zur Berechnung der Strömungsgrenzschicht und Teile der Maxwell-Gleichungen zur Beschreibung des elektrischen Feldes gelöst werden. Des Weiteren kann man das eigentliche Abscheideverhalten des spezifischen Elektrolyten oder den Einfluss der verwendeten Anodengeometrie aus der hieraus resultierenden lokal herrschenden Stromdichte und Diffusionsgrenzschicht in den Randzellen an der Bauteiloberfläche bestimmen. Die Lösung der genannten Differentialgleichungen ist nur noch numerisch, in einem gekoppelten iterativen Rechenverfahren wie der Finiten Volumen Methode möglich.

Für elektrochemische Beschichtungen existieren derzeit zwei kommerziell erhältliche Simulationsprogramme, das niederländische Programm *ELSYCA* und das amerikanische Programm *CELL-DESIGN*. Über deren Grundlagen wird in der Literatur nur bruchstückhaft berichtet, so dass eine abschließende Bewertung nicht möglich ist. Soweit aus den Beschreibungen [Landau 2002], [Deconinck 2002], [Landau 2004], [Kubber 2002] ersichtlich ist, erfolgt die Simulation der hydrodynamischen Strömungszustände in beiden Programmen in einem separaten, vom der Potentialfeldsimulation getrennten Rechenetz. Dieses Vorgehen erschwert eine Kopplung der beiden Simulationsergebnisse. Des Weiteren können nur einfache dreidimensionale Volumen zwischen den Elektroden berechnet werden. Der Grund hierfür ist, dass diese Programme zur Generierung von Volumennetzen auf CAD-Programme und Datenmodelle zurückgreifen, die nicht speziell für das Vernetzen dreidimensionaler Strukturen ausgelegt sind (z.B. SolidWorks). Zudem werden lediglich hydraulisch glatte Oberflächen bei der Strömungssimulation vorausgesetzt. Bei der Beschichtung technischer Oberflächen ( $R_z > 2 \mu\text{m}$  bzw.  $R_a > 1 \mu\text{m}$ ), weichen aber die Strömungsverhältnisse und die daraus resultierenden

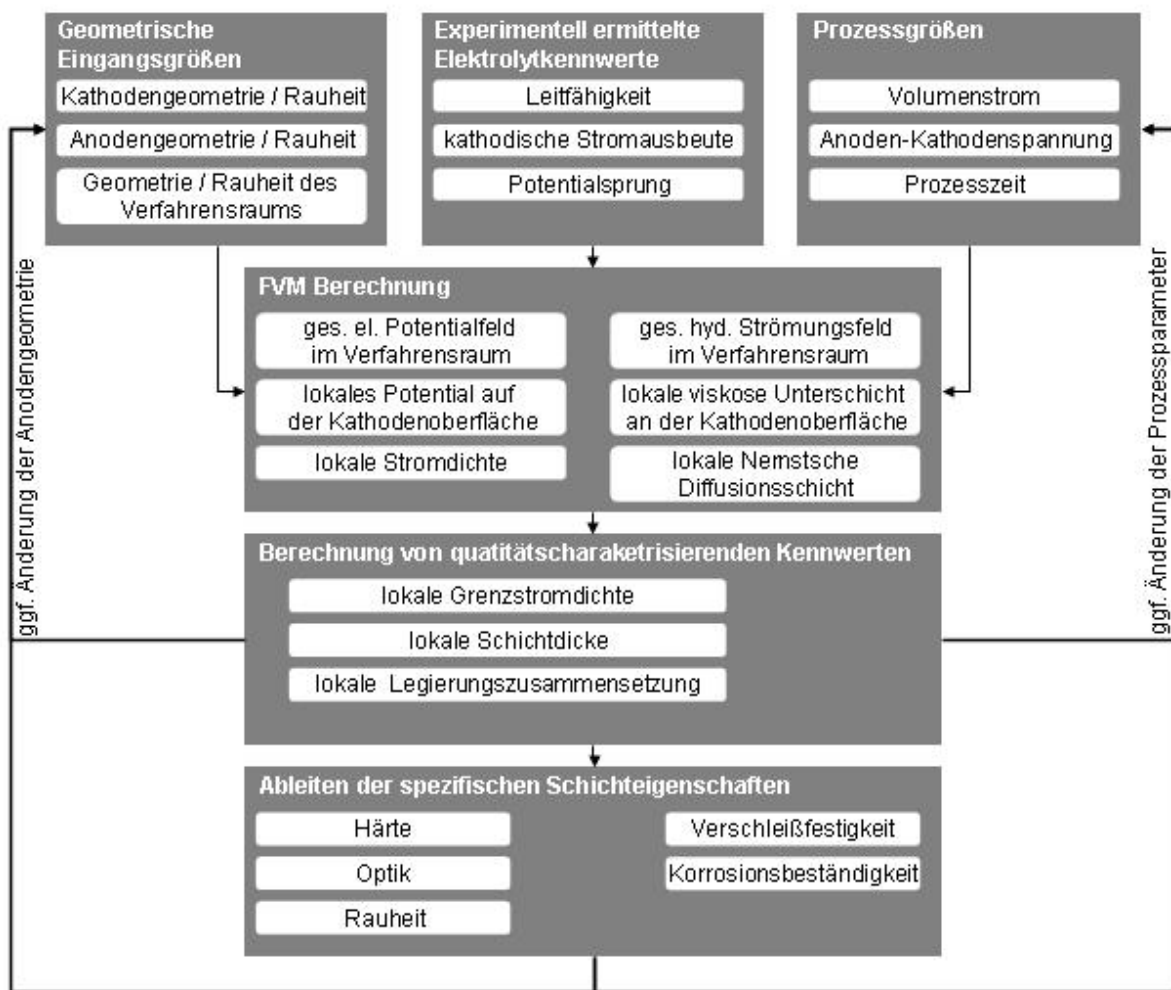
Grenzschichteneffekte an der Werkstückoberfläche von der idealisierten Form erheblich ab. [Schlichting 1997] Um jedoch die Strömungszustände auch an technischen Oberflächen bestimmen zu können, wird in dieser Arbeit auf das CFD-Programm (Computational Fluid Dynamics) FLUENT zurückgegriffen.

Die Erweiterung des Strömungsprogramms um die Berechnung des elektrischen Feldes, sowie der spezifischen Beschichtungsalgorithmen, erfolgen im eigenen, am Institut entwickelten Source-Code (User Defined Funktion). Da die Erweiterung komplett in das CFD-Programm integriert ist, wird auf das gleiche Gitter zurückgegriffen. Dies ermöglicht eine problemlose Kopplung der Ergebnisse in den betrachteten Randzellen.

## **6.4 Koppelung der Modelle**

Um die auf der Kathoden- bzw. Werkstückoberfläche lokal herrschenden Prozessbedingungen zu simulieren, ist es notwendig, sowohl die Strömungsbedingungen als auch das elektrische Potential in jeder einzelnen Randzelle zu kennen. Sie dienen als Basiswerte für die anschließende Berechnung der für eine optimale Auslegung des Prozesses benötigten lokal herrschenden Kennwerte, wie z.B. die Grenzstromdichte, der Legierungszusammensetzung oder die Schichtdicke. Nur bei einer Verwendung des gleichen Netzes sowohl für die E-Feldsimulation, als auch für die hydrodynamische Strömungssimulation ist es möglich, diese Basiswerte einer Randzelle auf der Kathodenoberfläche genau und effizient zuzuordnen. Die hierzu notwendige Implementierung des simulierten elektrischen Potentialfeldes in das CFD-Programm erfolgt über die definierte UDF Schnittstelle (User Defined Functions) und ist vor allem bei der Berechnung von sekundärer und tertiärer Stromdichte unerlässlich.

Mit der Koppelung von Strömungs- und E-Feldsimulation wird ein Simulationsmodell geschaffen, das es ermöglicht, die für den Beschichtungsprozess notwendigen Auslegungskennzahlen auf der Werkstückoberfläche zu simulieren. In Abbildung 6-3 ist das gesamte Vorgehen graphisch dargestellt.



**Abbildung 6-3: Modell zur Simulation qualitätsrelevanter Kennzahlen beim elektrochemischen Beschichten**

Im ersten Schritt werden die Eingangsbedingungen des betrachteten Systems festgelegt. Hierzu gehören zum einen die gesamten geometrischen Verhältnisse (des Verfahrensraumes, Geometrie der Anoden und des zu beschichtenden Werkstückes und dessen topographischen Rauheitswertes) und zum anderen die spezifischen Elektrolytkennwerte. Zusätzlich bestimmt man die variablen Prozessgrößen (Zeit, Volumenstrom und Anoden-Kathodenspannung).

Diese spezifizierten Eingangsbedingungen bilden die Randwerte für die anschließende Simulation der relevanten physikalischen und elektrochemischen Prozessgrößen. Die Berechnung des elektrischen Potentialfeldes und des hydrodynamischen Strömungsfeldes erfolgt mit Hilfe der FVM. Die hieraus für jede auf der betrachteten Werkstückoberfläche befindliche Randzelle resultierende lokale

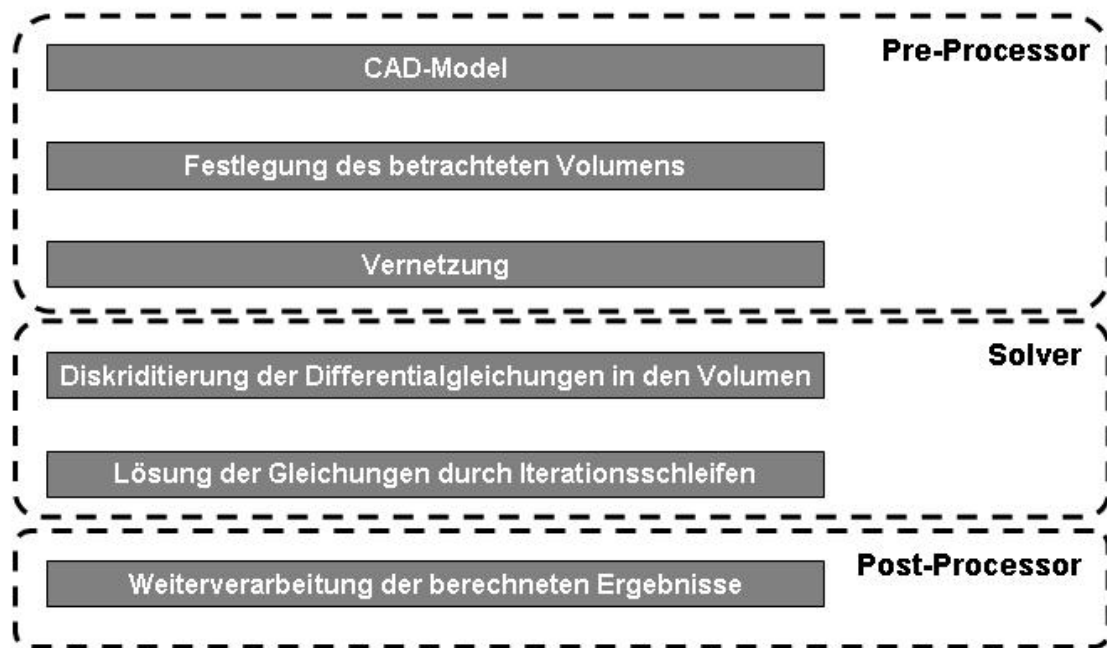
elektrische Stromdichte und Nernstsche Diffusionsschicht bilden die Basis für die Berechnung von qualitätscharakterisierenden Kennwerten, wie z.B. die lokale Grenzstromdichte (vgl. Gleichung (4-16)), die lokale Schicht (vgl. Gleichung (4-29)) und ggf. die lokale Legierungszusammensetzung (vgl. Gleichung (4-30)).

Der Verlauf der so ermittelten Kennwerte und die hieraus abgeleiteten Erkenntnisse über die Güte des simulierten Prozesses können genutzt werden, um bei lokal auftretender Über- oder Unterschreitung von Sollwerten eine Änderung der Eingangsbedingungen vorzunehmen. Beispielsweise ist es vorstellbar, dass bei einer partiellen Überschreitung der Grenzstromdichte auf der Werkstückoberfläche die Anodengeometrie in dem betroffenen Bereich verändert wird. In einem weiteren Schritt könnte man aber auch diese ermittelten Kennwerte zu weiteren Aussagen über spezifische Schichteigenschaften nutzen. Dieses würde eine qualitative Absicherung des der Prozessplanung zugrunde liegenden Schichtengineerings ermöglichen. Auch hier wäre bei einem unbefriedigenden Ergebnis einer betrachteten Schichteigenschaft (wie z.B. der Korrosionsbeständigkeit) eine Änderung der Eingangsgrößen (wie z.B. Beschichtungszeit) vorstellbar.

## **6.5 Beschreibung der verwendeten Software**

Wie bereits eingangs beschrieben, wird in dieser Arbeit auf ein kommerzielles CFD-System der amerikanischen Firma Fluent INC. und ein an dieses Programm gekoppeltes institutsinternes Programm (basierend auf der Programmiersprache C++) als Tool für das Computermodell zurückgegriffen. Das Softwarepaket FLUENT ist – wie die meisten CFD-Programme – aus den drei Komponenten Pre-Processor, Solver und Post-Processor aufgebaut (siehe Abbildung 6-4).

Die Erzeugung des Finite-Volumen-Gitters für die Berechnung erfolgt mit dem speziell für die Gittergenerierung entwickelten Pre-Processor GAMBIT, der auf den CAD-Daten der zu berechnenden Geometrie aufbaut. Das im Softwarepaket FLUENT enthaltene 3D-CAD-Programm hat den Vorteil, dass sowohl die Definition der Geometrie als auch die anschließende Vernetzung auf der selben Bedienoberfläche möglich sind. Alternativ hierzu können auch bereits existierende Geometriedaten aus anderen CAD-Programmen wie beispielsweise Pro-Engineer und Catia in GAMBIT importiert und vernetzt werden.



**Abbildung 6-4: Prozesssimulation mit dem Softwarepaket FLUENT**

Bei der Generierung von Gittern in GAMBIT sind grundsätzlich zwei Gittertypen zu unterscheiden: das strukturierte und das unstrukturierte Gitter. Das strukturierte Gitter besteht aus Vierecken (2D), beziehungsweise Quadern (3D), die jeweils vier, beziehungsweise sechs Nachbarzellen aufweisen. Das unstrukturierte Gitter besteht hingegen im zweidimensionalen Fall aus dreieckigen und/oder viereckigen Zellen und im dreidimensionalen Fall aus Tetraedern und/oder Prismen. Im Vergleich zu strukturierten Gittern ermöglicht das unstrukturierte Gitter eine einfachere und flexiblere Vernetzung (Gitterbildung) auch bei komplexen Geometrien, da eine Gitterverdichtung in kritischen Bereichen jederzeit erfolgen kann. Nachteilig bei der Verwendung unstrukturierter Gitter ist der höhere Rechenaufwand. Dieser resultiert aus dem erhöhten Speicherplatzbedarf, der sich aus der höheren Zahl von Gitterzellen und der in der Regel langsameren Konvergenz (höhere Anzahl von Iterationen) die sich zur Erzielung vergleichbarer Ergebnisse mit strukturierten Gittern ergibt.

Im Solver des Programms FLUENT werden die zugrunde gelegten Differentialgleichungen den Zellen zugeordnet. Vor der iterativen Berechnung des Strömungsfelds durch Lösen der Massen, Impuls- und Energiebilanzen, müssen alle relevanten Informationen zur Problemstellung erfasst werden. Hierzu gehören neben dem Festlegen der Randbedingungen für den Ein- und Austritt des strömenden

Elektrolyten (z.B. Strömungsgeschwindigkeit), auch die Auswahl des geeigneten Strömungsmodells (Turbolenz- oder Laminarmodell) und passende Konvergenzalgorithmen.

Gleichzeitig zur Simulation von Strömungsfeldern bietet das Programm FLUENT über so genannte User-Defined-Functions (UDF) die Möglichkeit, weitere physikalische, elektrische und chemische Prozesse zu integrieren und ebenfalls mit zu berechnen. Zu diesem Zweck müssen im Voraus entsprechende Source-Codes in einer kompatiblen Programmiersprache (z.B. C++) generiert werden, die die entsprechenden Algorithmen des zu simulierenden Prozesses enthalten. Auf diese Weise kann so nach der Berechnung des Potentialfelds die Schichtdickenverteilung durch ein am Institut entwickeltes Programm auf der Werkstückoberfläche qualitativ berechnet werden.

Im letzten Schritt der Prozesssimulation erfolgt die Auswertung der Simulationsergebnisse. Als Post-Processor-Plattform bietet das Programm FLUENT die Möglichkeit, die Ergebnisse für bestimmte prozessbestimmende Parameter (z.B. Geschwindigkeit, Temperatur, Druck usw.) in Form von Vektor-, Linien-, Kontur- und Oberflächendarstellungen zu visualisieren. Die Kompatibilität zu anderen Softwareprogrammen wie Microsoft EXCEL und MatLab ermöglicht die Verarbeitung der Berechnungsergebnisse in weiteren Programmen auf Basis von Windows.

## 7 Experimentelle Ermittlung der spezifischen Elektrolytkennzahlen

Für die Simulation des elektrochemischen Beschichtungsprozesses muss eine Vielzahl von spezifischen Kennzahlen, der an der Beschichtungsreaktion beteiligten Reaktanden, bekannt sein. Diese lassen sich zum Teil nur indirekt aus Versuchsreihen ermitteln. Im realen Elektrolytssystem befindet sich neben den Reaktanden eine Vielzahl von Zusatzstoffen. Sie dienen der Stabilisierung und Leistungssteigerung des Elektrolytsystems. In Tabelle 7-1 sind die häufigsten Zusatzstoffe und ihre Wirkung aufgeführt.

<b>Elektrolytzusatz</b>	<b>Wirkung</b>
<b>Glanzbildner</b>	Unterstützt die Bildung glatter Oberflächen
<b>Einebner</b>	Erhöhung der Mikrostruktur
<b>Netzmittel / Tenside</b>	Reduktion der Oberflächenspannung
<b>Leitsalze</b>	Erhöhung der Leitfähigkeit
<b>Pufferlösungen</b>	Stabilisieren eines bestimmten PH-Wertes bzw. Bereiches

**Tabelle 7-1: Elektrolytzusatzstoffe und ihre Wirkungsweise [Unruh 2001]**

Viele der von den Zusatzstoffen verursachten Wirkmechanismen und Nebenreaktionen sind unbekannt. Die explizite Zusammensetzung eines Elektrolytsystems wird vom Hersteller in der Regel nicht preisgegeben, da die Zugabe bestimmter Zusatzstoffe auf deren Erfahrungen basieren und somit unter deren nicht öffentlich publiziertes Know-how fällt. Deshalb macht die komplexe Zusammensetzung von Elektrolyten eine rein numerische Simulation unmöglich. Man ist somit gezwungen, aus den wenigen Informationen die ein Hersteller zur Verfügung stellt und durch gezielte Versuchsreihen die benötigten spezifischen Kennwerte zu bestimmen. Zu diesen Kennwerten gehören:

- die Stromausbeute
- der Einfluss der Hydrodynamik auf die Schichtcharakteristik

Um diese Kennwerte zu ermitteln wird in der Literatur eine Reihe von Versuchsaufbauten beschrieben. In Tabelle 7-2 ist eine Übersicht der gängigsten Verfahren zur Bestimmung von Elektrolytkennwerten aufgeführt.

<b>Verfahren</b>	<b>Analyseergebnis</b>
<b>Hullzelle</b>	Sichtprüfung bezüglich optischer Schichtqualität [DIN 50957]
<b>Haber-Bumzelle</b>	Ermittlung der Makrostreufähigkeit [Kanani 2000]
<b>Jetlab</b>	Schichtqualität bzw. Schichtdicke bei einer Staupunktströmung [Unicore 2003]
<b>Rotierende Scheibenelektrode</b>	Ermittlung der Grenzstromdichte und Schichteigenschaften bei verschiedenen Rotationsgeschwindigkeiten [Monev 2005]
<b>Rotierende Zylinderelektrode</b>	Ermittlung der Grenzstromdichte und Schichteigenschaften bei verschiedenen Rotationsgeschwindigkeiten [Tannenberger 2002b]

***Tabelle 7-2: Verfahren zur Bestimmung von Elektrolytkennwerten***

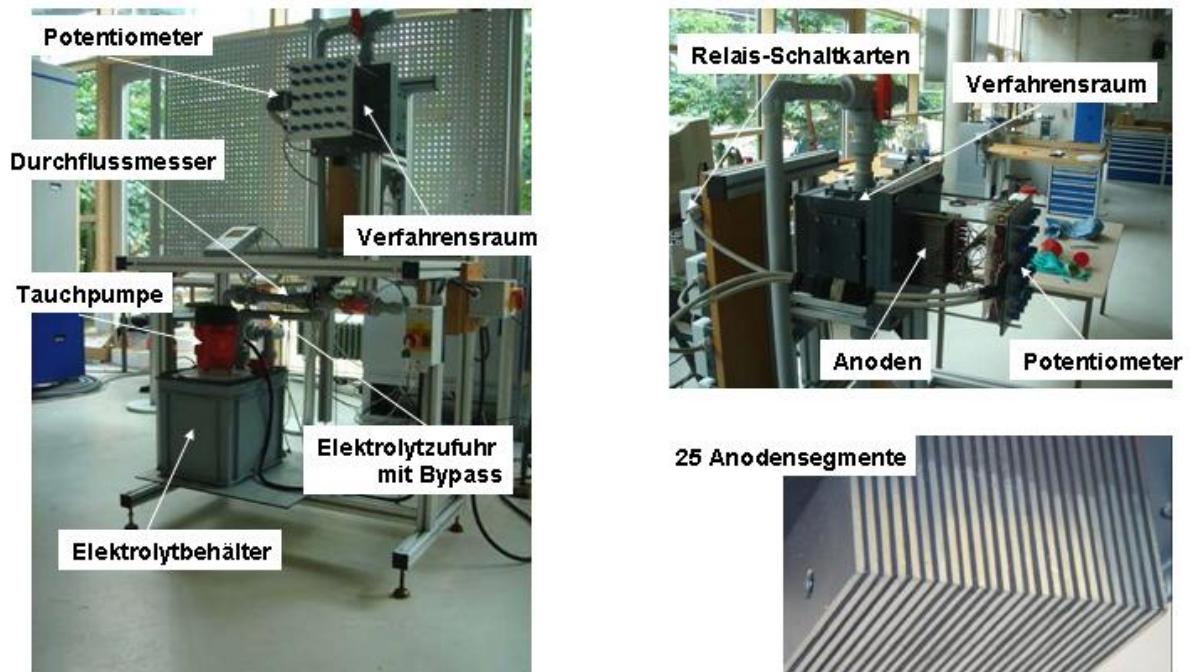
Bis auf das Jetlab–Verfahren sind alle anderen aufgeführten Verfahren so angelegt, möglichst kleine Elektrolytmengen zu verwenden. Dies hat bei der Entwicklung von Elektrolytsystemen den Vorteil, nur wenige Milliliter Elektrolyt herstellen zu müssen, um so die Herstell- und Entsorgungskosten zu minimieren.

## **7.1 Eigener Versuchsaufbau zur Ermittlung von Elektrolytkennzahlen**

Die bisherigen in der Literatur beschriebenen Versuchsanordnungen befriedigen in vieler Hinsicht nicht, denn sie bilden die Realität in der Regel nur unzureichend ab. Gerade hinsichtlich der Strömungsuntersuchungen ist es aber notwendig, annähernd gleiche Strömungsbedingungen in den Vorversuchen zu haben wie in der realen industriellen Anlage. Deshalb wurde der Versuchsaufbau so ausgelegt, dass im gleichen Verfahrensraum die Vorversuche, wie auch später die Beschichtung von Werkstücken, durchgeführt werden können.

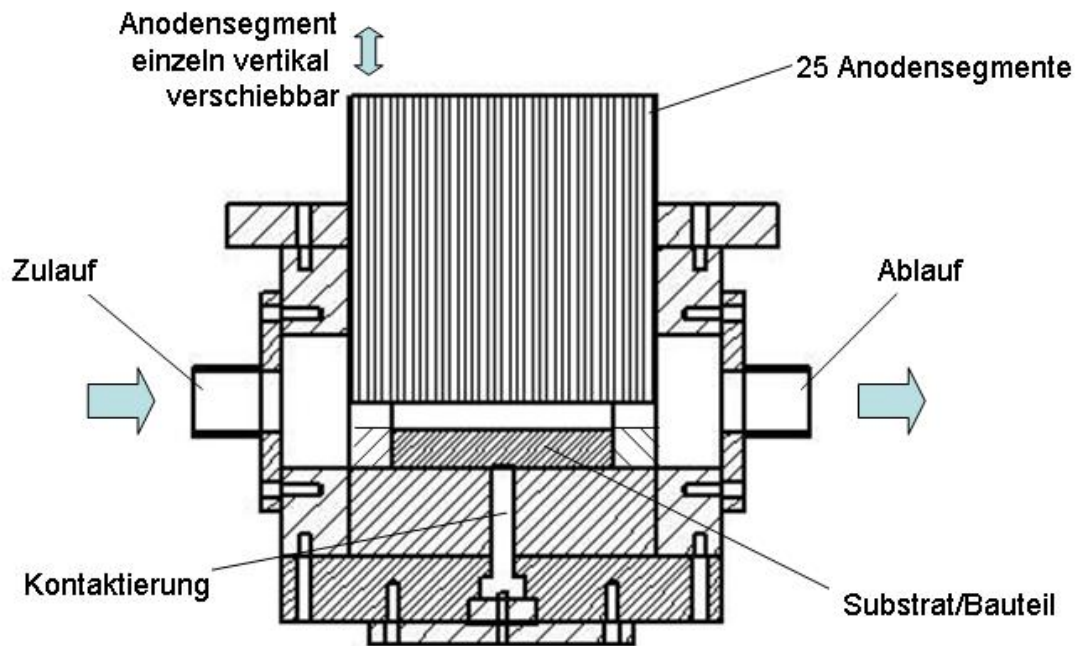


Der Versuchsaufbau besteht aus einem Verfahrensraum der es ermöglicht, sowohl verschiedene hydrodynamische Strömungszustände (siehe Abbildung 7-5), wie auch unterschiedliche E-Felder zu generieren (siehe Abbildung 7-4).



**Abbildung 7-1: Versuchsstand**

Darüber hinaus existiert ein Bereitstellungsbehälter, der bis zu 20 Liter Elektrolyt aufnehmen kann. Die am Behälter aufgesetzte Kreiseltauchpumpe ermöglicht mittels Bypassführung die Erzeugung eines gleichmäßigen Volumenstroms zwischen 0,5 und 60 [l/min]. Abbildung 7-2 zeigt einen Schnitt durch den Verfahrensraum mit der Probenaufnahme, die es ermöglicht, auch ebene Proben (Platten) ohne Anströmkante in den Boden zu integrieren.



**Abbildung 7-2: Schnittzeichnung des Verfahrensraums**

Das relativ große Innenvolumen erlaubt, Probenkörper mit Grundfläche von 100 x 100 mm und einer Maximalhöhe von 60 mm zu beschichten. Im oberen Teil des Verfahrensraums befindet sich die Anode. Im Gegensatz zu den üblichen Versuchsaufbauten besteht die Anode aus 25 Segmenten, die mit unterschiedlichen Potentialen beaufschlagt werden können. Zudem kann die gesamte Anode vertikal verschoben werden. Dies ermöglicht, den Anoden-Kathoden-Abstand und die E-Feldgestaltung zu ändern. Auf diese Weise lässt sich der Verfahrensraum für unterschiedliche Versuche modifizieren. Durch die beschriebenen Maßnahmen kann die Geometrie des Verfahrensraums den erforderlichen hydrodynamischen Strömungszuständen angepasst werden. Außerdem ist es durch die segmentierten Anodenplatten möglich, das E-Feld zu variieren ohne die Strömungsbedingungen zu verändern, da auf Einbauten, wie z.B. Blenden, verzichtet werden kann.

## 7.2 Zu untersuchende Elektrolytsysteme

Am Beispiel zweier völlig unterschiedlicher Elektrolytsysteme wird im Folgenden das Vorgehen bei der Elektrolytcharakterisierung und der anschließenden Implementierung des spezifischen Elektrolytverhaltens in die Grundgleichungen der numerischen Simulation beschrieben. Während der Untersuchungsschwerpunkt bei

einem neuartigen Nickel-Phosphor-Elektrolyten (NIPHOS 966) in der Legierungszusammensetzung liegt, ist das Grenzstromdichteverhalten bei unterschiedlichen Strömungsbedingungen, bei einem bereits industriell eingesetzten Kupferelektrolytem von besonderem Interesse.

### **7.2.1 Nickel-Phosphor-Elektrolyt (NIPHOS 966)**

Eine Nickel-Phosphorlegierung kommt in der Natur nicht vor. Sie kann nur auf chemischem Weg oder durch Schmelzprozesse hergestellt werden. [Horvitz 1953] Durch ihre besonderen Eigenschaften ist diese Legierung jedoch aus technischer Sicht als Funktionsschicht vielseitig einsetzbar. Zusätzlich wird sie auch als Grundmaterial zur Herstellung von Mikrobauteilen verwendet. [Giro 2004] Die technischen Vorzüge von Nickel-Phosphor-Schichten sind je nach Legierungszusammensetzung vor allem folgende: [Unicore 2003]

- kristallines bis quasiamorphes Material
- magnetisch bis nichtmagnetisch
- hohe Grundhärte von ca. 600 HV, die durch Wärmebehandlung bis auf 1200 HV gesteigert werden kann
- hohe Korrosionsfestigkeit
- hohe Verschleißfestigkeit
- gute Lötbarkeit

Der Phosphorgehalt kann je nach gewünschten Eigenschaften von 0 bis auf ca. 25 at.-% (Atomprozent) gesteigert werden. [Winkler 2004]

Durch die hohen Abscheideraten und niedrigeren Prozesskosten werden die galvanisch erzeugten Nickel-Phosphor-Legierungen auch zur Beschichtung von Mikrostrukturen eingesetzt. [Becher 1995] Nickel-Phosphor-Schichten lassen sich mit zwei Beschichtungsverfahren herstellen: auf chemische bzw. stromlose oder auf galvanische bzw. elektrochemische Weise. Beide Verfahren haben spezifische Vor- und Nachteile. Die rein chemische Beschichtung wird derzeit im breiten Maße industriell angewandt. Die Vorteile dieses Verfahrens liegen vor allem in der Konturtreue. So lassen sich kompliziert geformte Bauteile mit einer sehr

gleichmäßigen Schicht überziehen. Nachteilig sind die hohen Prozesskosten. Diese bestimmen sich durch folgende Eigenschaften:

- Die Abscheiderate ist gering (bis zu 25 µm/h).
- Für eine effektive Arbeitsweise sind hohe Prozesstemperaturen von bis zu 90 °C notwendig.
- Die Lösung wird durch Gebrauch instabil, denn die hohen Temperaturen zersetzen die stabilisierenden organischen Bestandteile.
- Die Lösung ist gegen Fremdatome sehr anfällig.
- Die Lösung verarmt und muß stetig nachdosiert werden, was zu den hohen Analytikskosten führt.
- Die zu beschichtende Oberfläche muss ein positiveres elektrochemisches Potential als Nickel aufweisen.

Die galvanisch erzeugten Nickel–Phosphor–Schichten unterscheiden sich nicht von den chemisch erzeugten. [Kurowiki 2003] Die Vorteile der elektrochemischen Beschichtung liegen neben den geringeren Betriebskosten in der Variationsmöglichkeit der Schichteigenschaften. Durch unterschiedliche lokale elektrische Stromdichten bzw. Potentiale lassen sich verschiedene Eigenschaften lokal oder über die gesamte Oberfläche erzeugen. Obwohl Brenner schon in den 40-iger und 60-iger Jahren [Brenner 1963] und Vakhidow in den 70-iger Jahren [Vakhidow 1970] die galvanische Abscheidung von Nickel-Phosphor-Legierungen beschrieben haben, ist erst in den letzten Jahren das Thema wieder aufgegriffen worden. Durch die Bereitstellung neuerer kommerziell erhältlicher Elektrolyte von verschiedensten Anbietern werden galvanisch hergestellte Nickel-Phosphor-Schichten als Alternative zur stromlosen Beschichtung von Bauteilen diskutiert. [Winkler 2004] Gerade wegen der Korrosions- und Verschleißfestigkeit dieser Funktionsschicht ist der Einsatz auch in bestimmten Bereichen des Werkzeug- und Formenbaus von großem Vorteil, zumal die Stromausbeute bei über 50 % liegt und somit eine echte Alternative zum Hartverchromen von Bauteilen besteht. [Winkler 2004]

## **7.2.2 Alkanisch cyanidfreier Kupferelektrolyt ( $\mu$ Chem 510 Z)**

Um die Vorgehensweise zur Simulation qualitätsrelevanter Kennzahlen weiter zu untermauern wird zusätzlich ein alkanisch cyanidfreier Kupferelektrolyt ( $\mu$ Chem 510 Z) untersucht. Dieser Elektrolyt ermöglicht die Erzeugung technisch hochwertiger Kupferschichten bis zu mehreren Millimetern Dicke. Seine Deck- und Streufähigkeit wird als ausgezeichnet beschrieben. Aus diesem Grund liegt der industrielle Haupteinsatz in der Beschichtung von Mikrobautteilen. [SurTec 2004] Durch den Verzicht von cyanidischen Zusätzen konnten außerdem die Gesundheitsgefahren dieses Elektrolytsystems erheblich gesenkt werden.

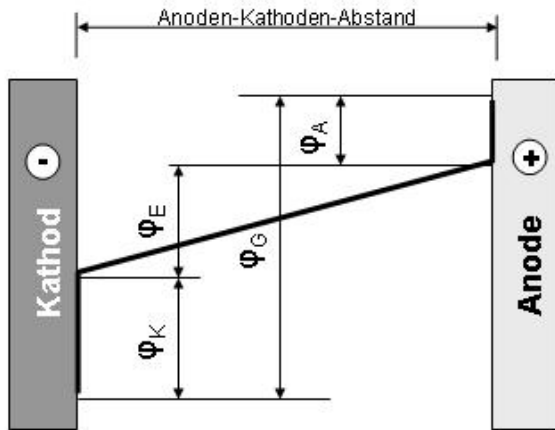
## **7.3 Ermittlung des Potentialsprungs an den Elektrodenoberflächen**

Um den realen Potentialverlauf an den Elektrodenoberflächen in der Simulation berücksichtigen zu können, muss dieser experimentell ermittelt werden. Wie in Kapitel 4.3 beschrieben, beinhaltet der Potentialsprung die Überspannungseffekte an der Anoden- und Kathodenoberfläche. Um diese Effekte zu messen, kann entweder eine Strom/Spannungskurve mittels rotierender Scheibenelektrode aufgenommen werden, oder man ermittelt die reale Spannungsdifferenz zwischen der Anode und Kathode bei zwei verschiedenen Elektrodenabständen.

### **7.3.1 Versuchsanordnung und Berechnung des Potentialsprunges**

Um den Einfluss der Hydrodynamik auf den Potentialsprung zu berücksichtigen bzw. zu berechnen, wird die Spannung sowohl bei einem laminaren als auch bei einem turbulenten Strömungszustand ermittelt.

Aus den Ergebnissen lässt sich dann der Potentialsprung in erster Näherung bestimmen: wie in Abbildung 7-3 dargestellt, kann man bei einer makroskopischen Betrachtung von einem linearen Potentialverlauf bis zu den Elektrodenoberflächen ausgehen.



- $\varphi_K$  = Potentialsprung an der Kathode
- $\varphi_A$  = Potentialsprung an der Anode
- $\varphi_E$  = Potentialverlauf im inneren des Elektrolyten
- $\varphi_G$  = Gesamt Potentialdifferenz

**Abbildung 7-3: Makroskopische Betrachtung des Potentialverlaufs zwischen den Elektroden**

Für die im Versuch gemessene Spannung bzw. Potentialdifferenz ergibt sich dann folgende Beziehung:

$$\eta_{ges} = \eta_{verf.} + \eta_{elektroden} \quad (7-1)$$

mit  $\eta_{verf.}$  linearer Potentialverlauf im Inneren des Elektrolyten

$$\eta_{elektroden} = \eta_{anode} + \eta_{kathode} \quad (\text{Potentialsprung an den Elektrodenoberflächen})$$

Der Potentialverlauf im Inneren des Elektrolyten kann bei homogener Durchmischung als Geradengleichung ausgedrückt werden:

$$\eta_{verf.} = b \cdot l \quad (7-2)$$

mit  $b$  Steigung

$l$  Anoden - Kathodenabstand

Somit ergeben sich für beide Versuche die Gleichungen:

$$\eta_{ges(1)} = m \cdot l_{(1)} + \eta_{elektroden} \quad (7-3)$$

$$\eta_{ges(2)} = m \cdot l_{(2)} + \eta_{elektroden} \quad (7-4)$$

Daraus lassen sich nun die zwei Unbekannten ( $b$  und  $\eta_{elektroden}$ ) berechnen. Es ergibt sich für die Steigung  $b$  die Gleichung:

$$b = \frac{\eta_{ges(2)} - \eta_{ges(1)}}{l_{(2)} - l_{(1)}} \quad (7-5)$$

Der Potentialsprung an den Elektrodenoberflächen kann wie folgt bestimmt werden:

$$\eta_{elektrode} = \eta_{ges(1)} - b \cdot l_{(1)} = \eta_{ges(1)} - \left[ \frac{\eta_{ges(2)} - \eta_{ges(1)}}{l_{(2)} - l_{(1)}} \right] \cdot l_{(1)} \quad (7-6)$$

### 7.3.2 Versuchsergebnisse für den Nickel-Phosphor- und den Kupferelektrolyten

Es wurde nach den im Kapitel 7.3.1 beschriebenen Verfahren der Potentialsprung an den Elektrodenoberflächen für die beiden betrachteten Elektrolyten bestimmt.

Für den alkanisch cyanidfreien Kupferelektrolyt ( $\mu$ Chem 510 Z) ergaben sich aus den in Tabelle 7-3 aufgeführten Messwerten nach Gleichung (7-6) ein Potentialsprung bei turbulenten Strömungsbedingungen von 3,0 V. Bei fast stehenden Elektrolyten stieg der Potentialsprung auf 3,2 V an. Unter Verwendung von Gleichung (7-5) ergab sich eine Steigung von 0,01 [V/m].

Versuche	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9
Gesamtstrom [A]	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Volumenstrom [l/min]	0,1	0,1	0,1	12	12	12	24	24	24
Spannung [V]	3,24	3,33	3,53	3,1	3,22	3,32	3,11	3,18	3,28
Anoden-Kathodenabstand [mm]	10	20	30	10	20	30	10	20	30

**Tabelle 7-3: Messwerte zur Ermittlung des Potentialsprunges bei verschiedenen hydrodynamischen Bedingungen (Cu)**

Bei dem Nickel-Phosphor-Elektrolyt hingegen blieb der Potentialsprung trotz unterschiedlicher hydrodynamischer Strömungszustände konstant. Es wurde ein Wert von 2,9 V und einer Steigung von 0,06 [V/m] ermittelt.

Versuche	V1	V2	V3	V4	V5	V6
Gesamtstrom [A]	8	8	8	8	8	8
Volumenstrom [l/min]	54	24	0,1	54	24	0,1
Spannung [V]	3,6	3,6	3,6	4,8	4,8	4,8
Anoden-Kathodenabstand [mm]	10	10	10	30	30	30

**Tabelle 7-4: Messwerte zur Ermittlung des Potentialsprunges bei verschiedenen hydrodynamischen Bedingungen (NiP)**

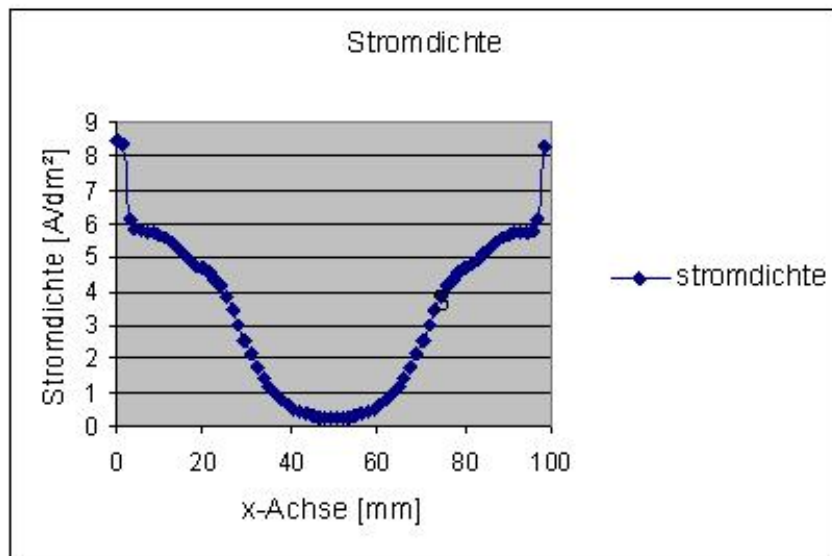
Das unterschiedliche Verhalten der untersuchten Elektrolyten bei verschiedenen hydrodynamischen Bedingungen kann ihre Ursache in den unterschiedlich hohen Ionenkonzentrationen haben. Im Kupferelektrolyten liegen lediglich 18 [g/l] Kupfer im ionisierten Zustand vor, hingegen sind 80 [g/l] Nickel und 24 [g/l] Phosphor im Nickel-Phosphorelektrolyten gelöst. So kann bei einer geringen Anströmung eine schnellere Verarmung an Kupferionen an der Kathode erfolgen und somit einen Anstieg der Spannung hervorrufen.

## 7.4 Ermittlung des Einflusses der Hydrodynamik auf das Beschichtungsergebnis

Um den Einfluss der Hydrodynamik auf das Abscheideverhalten zu untersuchen und daraus dann Rückschlüsse auf das Schichtwachstum und ggf. die Legierungszusammensetzung in Abhängigkeit von den hydrodynamischen Verhältnissen im Verfahrensraum zu ziehen, wurden horizontal angeströmte Platten unter verschiedenen Strömungszuständen beschichtet. Zur Abdeckung eines möglichst großen Prozessfensters, um mit nur wenigen Versuchen die Klassifizierung des Elektrolytverhaltens durchführen zu können, wurde außerdem ein ansteigendes E-Feld auf der Probenoberfläche mit möglichst homogen



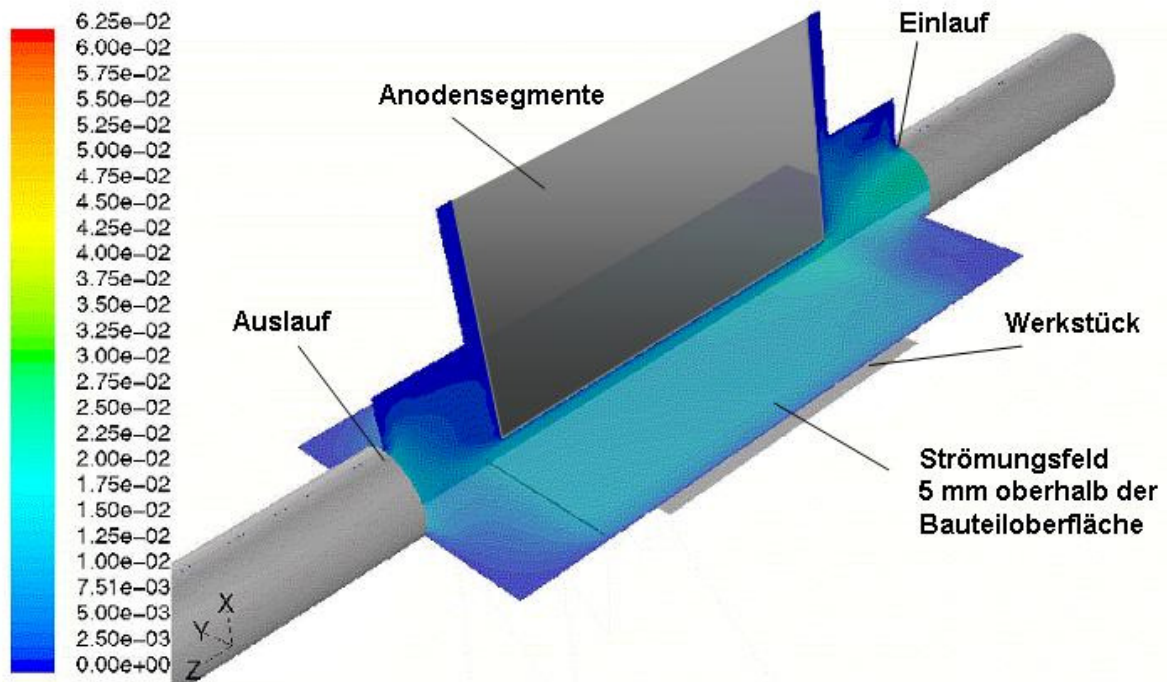
ansteigendem Verlauf erzeugt. Durch das Beschalten von lediglich 8 Anodensegmenten konnte ein solches Potentialfeld annähernd erzeugt werden. In Abbildung 7-4 ist die hieraus resultierende Stromdichteverteilung auf der Probenmitte bei einer angelegten Potentialdifferenz von 0,55 V zwischen geschalteten Anodensegmenten und planen Probekörpern dargestellt.



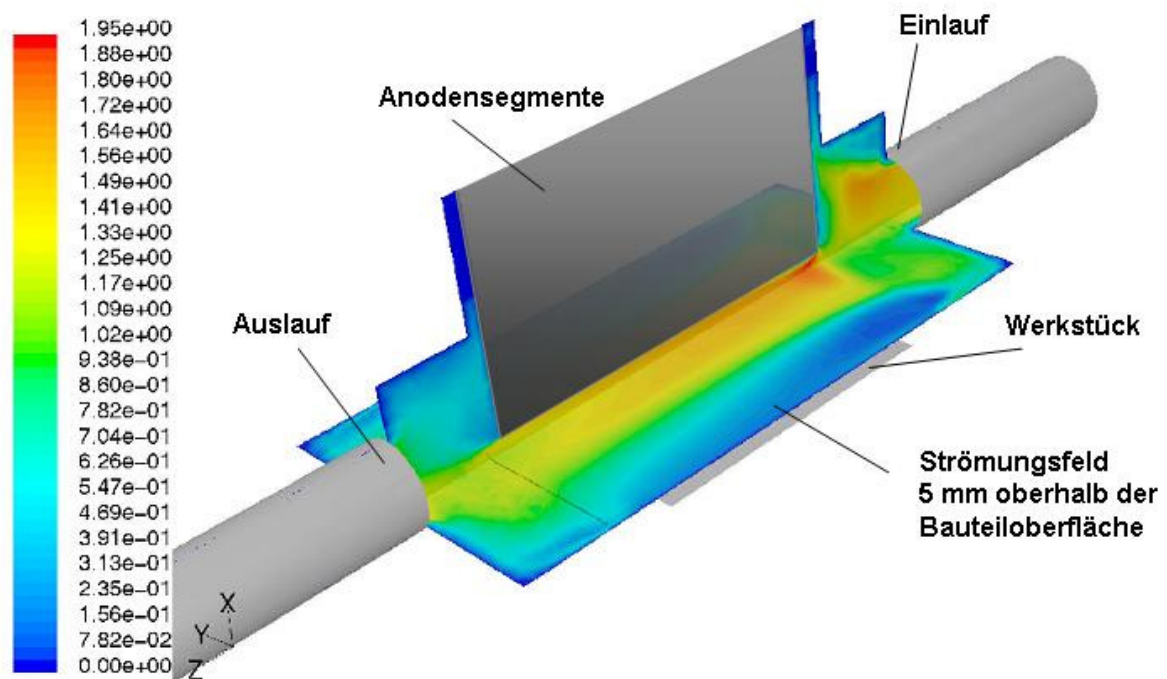
**Abbildung 7-4: Ausgewählte Stromdichteverteilung über die Probenoberfläche**

Diese gewählte Beschaltung erzeugt eine Wannenform und nutzt somit die Randzoneneffekte (Potentialerhöhungen) an den Probekörperflanken aus. So kann ein recht homogener Stromdichteanstieg in der Mitte des Probekörpers erzeugt werden. Die letzten Stromdichtespitzen bleiben unberücksichtigt. Es kann hierdurch je nach gewählter Potentialdifferenz ein sehr großes Prozessfenster betrachtet werden. Der Strömungszustand bleibt hingegen unverändert. Es kann auf Blenden oder geometrische Unebenheiten zwischen Anoden- und Kathodenflächen verzichtet werden.

Darüber hinaus erfolgte eine Untersuchung sowohl laminarer als auch turbulenter Strömungszustände (Abbildung 7-5). Um sowohl das Potentialfeld, als auch den Strömungszustand zu bewerten, werden in den Darstellungen die Außenwände und Anoden ausgeblendet (vgl. Abbildung 7-2 und technischen Zeichnungen im Anhang). Zusätzlich werden eine vertikale und eine horizontale Schnittebene in das betrachtete Volumen gelegt, um die Effekte optisch hervorzuheben.



**Abbildung 7-5: Beispiel eines ausgewählten laminaren Strömungszustandes**  
(durchschnittliche Geschwindigkeit von 0,018 m/sec im Zulauf)

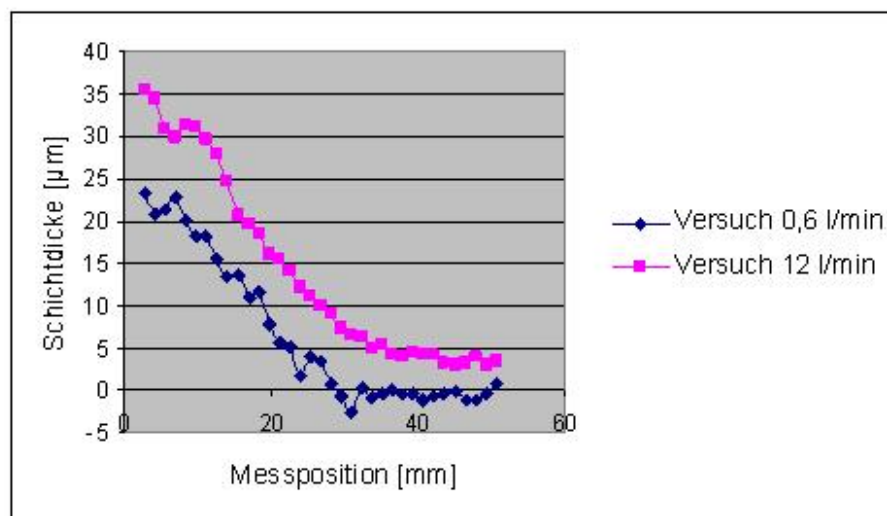


**Abbildung 7-6: Beispiel eines turbulenten Strömungszustandes** ( durchschnittliche  
Geschwindigkeit von 1,44 m/sec im Zulauf)

Es ist in beiden Strömungszuständen zu erkennen, dass im Bereich des Einlaufs einige Verwirbelungen entstehen. Um einen möglichst homogenen Strömungszustand über die gesamte Messstrecke zu gewährleisten, wurden die Messwerte lediglich im Strömungszentrum und in der zweiten Hälfte auf der Bauteiloberfläche aufgenommen. So bleiben die im Einstrombereich auftretenden Eintrittswirbel unberücksichtigt. Zudem bildet sich die Strömungsgrenzschicht erst nach einer gewissen Einlaufstrecke bei einer horizontal angeströmten Fläche vollständig aus. [Schlichting 1997] [Zierep 1997]

### 7.4.1 Versuchsreihe Nickel-Phosphor-Elektrolyt

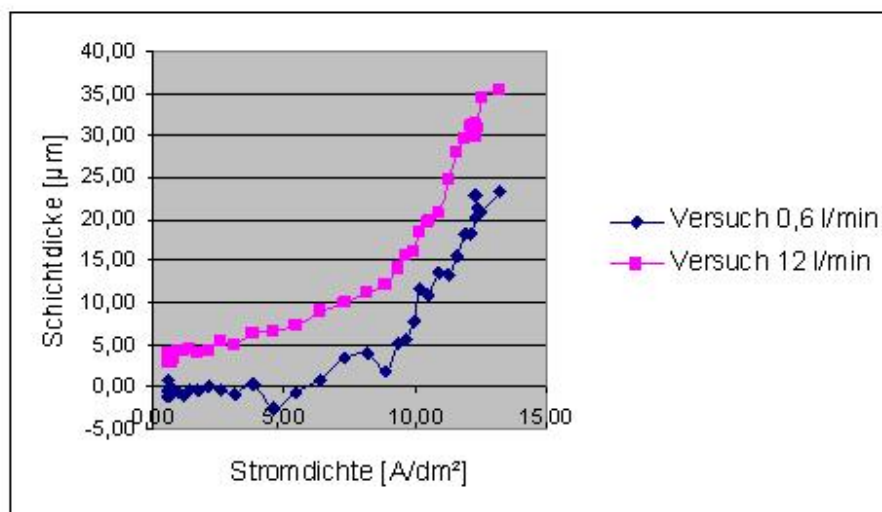
Die Beschichtungsergebnisse, die mit dem Nickel-Phosphor-Elektrolyten unter den oben beschriebenen Versuchsbedingungen gewonnen wurden, sind in Abbildung 7-7 zusammengefasst. Sie ergaben einen recht homogenen Schichtdickenverlauf.



**Abbildung 7-7: Gemessene Schichtdicken auf der Mittellinie der Probe (NIP)**

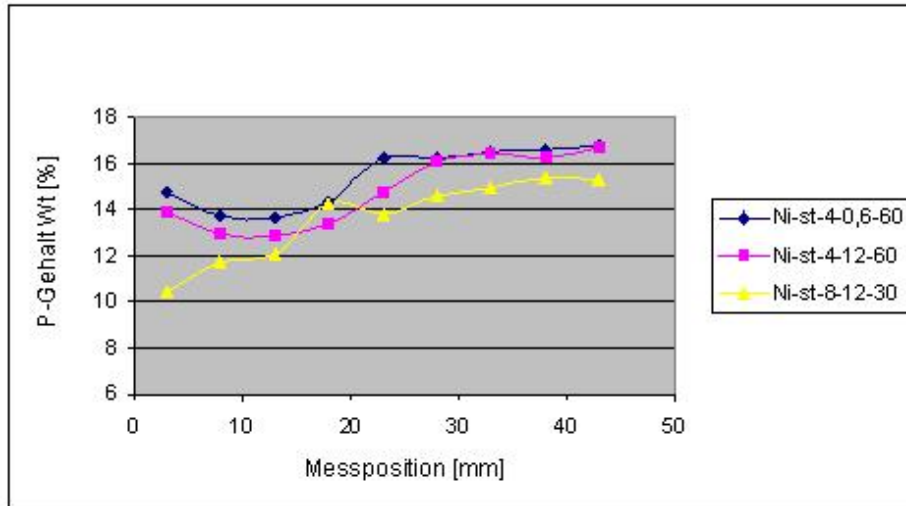
Ermittelt wurde der Schichtdickenverlauf durch eine Referenzmessung der Probenhöhe vor und nach der Beschichtung. Als Messgerät wurde ein optisches Koordinatenmessgerät vom Typ Werth Video-check-IP 400x400 verwendet. Die Höhen werden damit durch ein Autofokusverfahren bestimmt. Es wurden im Abstand von 1 mm auf der Mittelachse die Probenhöhen bestimmt. Die Vorteile dieser Messstrategie liegen zum einen in der zerstörungsfreien Schichtdickenermittlung und zum anderen in der Mittelwertbestimmung. Es wird kein einzelner Messpunkt,

sondern durch Bildverarbeitung der Mittelwert der Probenhöhe im gewählten Messfenster bestimmt. Das gewählte Prozessfenster betrug  $0,08 \text{ mm}^2$ . Dies ermöglicht auch, Oberflächen mit hohem Rauheitswert ( $R_z > 10 \text{ }\mu\text{m}$ ) zu vermessen. Die Messunsicherheit des verwendeten Gerätes wird vom Hersteller mit weniger als  $\pm 1 \text{ }\mu\text{m}$  angegeben. Der Nachteil dieser Messstrategie liegt im Einlegen des Probenkörpers. Es besteht hierbei immer die Gefahr des Verkippens der Probe. Hervorgerufen werden kann dieses durch Staubkörnchen oder Ablagerungen an der Auflagefläche der Probe. Aus diesem Grund wurde die Unterseite nach dem Beschichtungsvorgang entsprechend nachbehandelt. Werden den einzelnen Schichtdickenwerten die entsprechenden lokal herrschenden Stromdichten zugeordnet, ergibt sich folgender Verlauf:

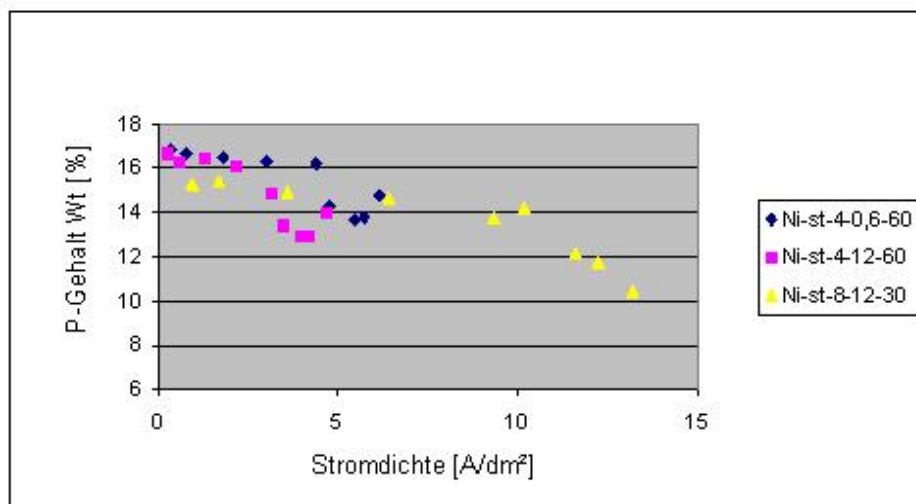


**Abbildung 7-8: Gemessene Schichtdicken in Abhängigkeit zur Stromdichte (NIP)**

Es zeigt sich, dass das Abscheideverhalten kaum vom hydrodynamischen Zustand abhängt. Als zweites wird der entsprechende Phosphorgehalt im Abstand von 3 mm an drei ausgewählten Proben bestimmt. Dieses erfolgt durch die Bestimmung der Legierungszusammensetzung mit Hilfe der energiedispersiven Röntgenanalyse (EDX). Die Messwerte sind in Abbildung 7-9 aufgeführt.



**Abbildung 7-9: Gemessener P-Gehalt in Abhängigkeit zur Messposition**

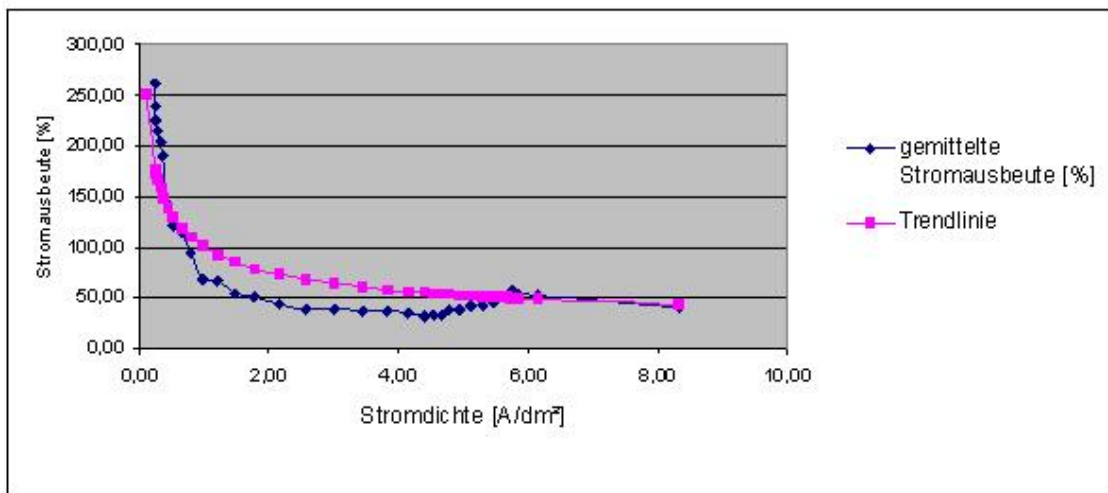


**Abbildung 7-10: Gemessener P-Gehalt in Abhängigkeit zur Stromdichte**

Die Versuchsergebnisse zeigen außerdem, dass der Phosphor-Gehalt durch eine Elektrolytbewegung über einen weiten Stromdichtebereich fast auf einem konstanten Niveau gehalten werden konnte, wobei sich kaum ein Unterschied zwischen turbulentem (Volumenstrom 12 l/min) und laminarem (Volumenstrom 0,6 l/min) Strömungszustand feststellen ließ. Der Fehler des EDX liegt in der Größenordnung von 20 %. Dies ist auf die geringe Analysetiefe des Verfahrens zurückzuführen. Sie liegt bei ca. 1µm. Für eine genauere Analyse wäre das Glow Discharge Optical Spectroscopy Verfahren (GDOS) notwendig. Hier liegt die Analysetiefe bei ca. 1 mm. Dagegen weisen die vom Hersteller veröffentlichten Untersuchungsergebnisse, die

im Hüllzellenversuch gewonnen wurden, einen kontinuierlichen Abfall des Phosphorgehalts mit zunehmender Stromdichte auf (vgl. Abbildung 8-1). Hingegen ergaben die Jetlab Versuche des Herstellers fast identische Ergebnisse. Dies ist auch nicht verwunderlich, da hierbei mit einer gerichteten Strömung gearbeitet wird (vgl. Tabelle 7-2). Dies untermauert die Verwendung eines auf die spätere industrielle Anwendung angepassten Versuchsaufbau. Nur so können die hierfür geltenden Kennwerte wirklichkeitsnah ermittelt werden.

Mit einer merklichen Elektrolytbewegung kann also der Phosphor-Gehalt über einen gewissen Stromdichtebereich stabilisiert werden. Die sich aus den Versuchen ergebende Stromausbeute ist in Abbildung 7-11 dargestellt.

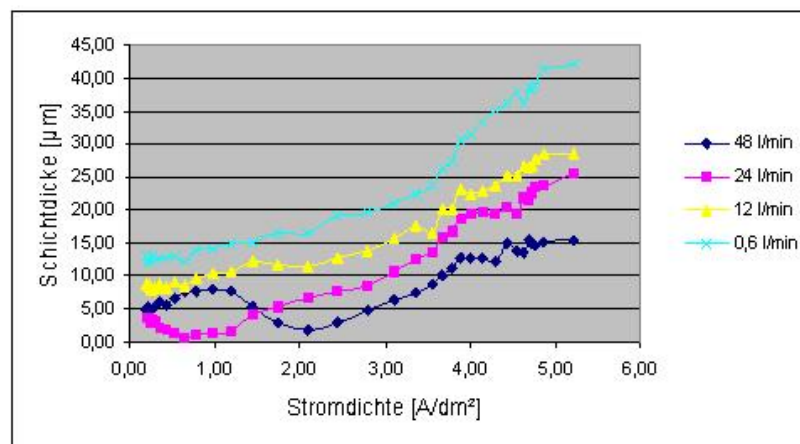


**Abbildung 7-11: Gemittelte Stromausbeuten in Abhängigkeit zur Stromdichte (NIP)**

Die Ergebnisse machen deutlich, dass sich die Stromausbeute im Bereich zwischen 1,6 und 6 [A/dm²] fast konstant auf den Wert 50 % einstellt. Im Stromdichtebereich unterhalb von 1,6 [A/dm²] steigt die Stromdichte dagegen exponentiell an.

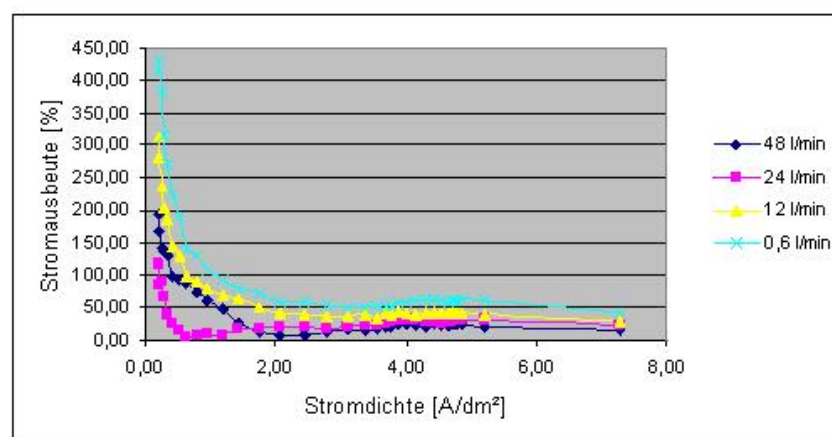
## 7.4.2 Versuchsreihe Kupfer-Elektrolyt

Um die spezifische Charakteristika des Kupferelektrolyten zu ermitteln, wurden die gleichen Versuche wie beim Nickel-Phosphor-Elektrolyten mit verschiedenen Strömungszuständen durchgeführt und der Volumenstrom mit vier verschiedenen Strömen (0,6 [l/min]; 12 [l/min]; 24 [l/min]; 48 [l/min]) variiert. Es wurde die gleiche Messstrategie zur Ermittlung der Schichtdicke wie in Kapitel 7.4.1 angewendet.



**Abbildung 7-12: Gemessene Schichtdicken in Abhängigkeit zur Stromdichte (Cu)**

Dieses weist auf einen erheblichen Einfluss auf das Abscheidungsverhalten durch die im Verfahrensraum herrschenden hydrodynamischen Strömungszustände hin. Je stärker die horizontal ebene Probe angeströmt wird, desto geringer ist die Stromausbeute. Dieses zeigen auch die in der folgenden Graphik dargestellten Stromausbeutekurven.





**Abbildung 7-13: Resultierende Stromausbeuten in Abhängigkeit zur Stromdichte (Cu)**

Die Versuchsreihe zeigt anschaulich, dass der hydrodynamische Zustand einen gravierenden Einfluss auf das Beschichtungsergebnis hat. Eine optische Beurteilung der Proben ergab außerdem, dass es bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten (Volumenstrom von 0,6 l/min) in Bereichen ab 3,5 A/dm<sup>2</sup> Stromdichte, zu rauen und matten (angebrannten) Beschichtungsergebnissen kommt. Dies deutet auf eine lokale Überschreitung der Grenzstromdichte hin. Hervorgerufen wird diese durch die recht niedrige Kupferionenkonzentration von 18 g/l. Für eine optimale Verfahrensauslegung ist bei diesem Elektrolytssystem die Berechnung der lokal herrschenden Grenzstromdichte die entscheidende qualitätsbestimmende Größe. Es muss dabei gewährleistet sein, dass die Grenzstromdichte an keiner Stelle der zu beschichtenden Oberfläche erreicht wird. Um eine gute Schichtqualität zu erreichen, sollte die lokale Stromdichte mindestens 20% unter der Grenzstromdichte liegen. [Unruh 2001]



## 8 Implementierung und Verifikation der Simulation

Die in Kapitel 1 experimentell ermittelten Elektrolytdaten werden in die entsprechenden physikalischen und chemischen Beziehungen (vgl. Kapitel 1) eingefügt und im Computermodell entsprechend berücksichtigt, damit sich das spezifische Verhalten der Elektrolytsysteme in der Simulation widerspiegeln kann.

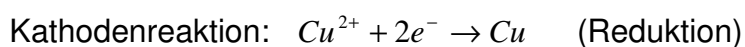
### 8.1 Implementierung der spezifischen Elektrolytkennwerte in das Computermodell

In den Vorversuchen wurde das unterschiedliche Verhalten der verschiedenen Elektrolytsysteme ermittelt. Dieses muss nun entsprechend in den theoretischen Grundformeln berücksichtigt werden.

Einige dieser Effekte (wie z.B. die Stromausbeute beim betrachteten Kupferelektrolyten) lassen sich nur in gewissen Prozessfenstern in stetigen mathematischen Funktionen darstellen (vgl. Abbildung 7-13). Deshalb liefert die Simulation auch nur für diese Prozessfenster gültige Ergebnisse, die in dem von den Elektrolytherstellern empfohlenen Arbeitsbereich liegen. Für extreme Prozessbedingungen besteht die Möglichkeit, das Abscheideverhalten mit dafür speziell gewonnenen Elektrolytdaten zu simulieren oder zusätzliche nichtstetige mathematische Beziehungen in das verwendete Computermodell aufzunehmen. Dies würde jedoch den Erstellungsaufwand erheblich vergrößern.

#### 8.1.1 Implementierung des spezifischen Beschichtungsverhaltens des Kupferelektrolyten ( $\mu$ Chem 510 Z)

Die chemische Kupferabscheidung erfolgt nach folgender Reaktionsgleichung:



Die Schichtdicke kann somit nach Gleichung (4-29) berechnet werden. Aus den Vorversuchen kann für die hierfür benötigte Stromausbeute durch folgende Funktionen in erster Näherung angegeben werden:

$$p_{K(Cu)} = 92 \cdot (j_{(lokal)})^{-0,6} \quad (8-1)$$

Die lokale Schichtdicke lässt sich aus den Gleichungen (4-29) und (8-1) ermitteln. Damit ergibt sich:

$$d_{lokal(Cu)} = \frac{Ae_{theoret.(Cu)} \cdot j_{lokal} \cdot t \cdot p_{K(Cu)}}{\rho_{(Cu)}} \quad (8-2)$$

Die Elektrolytdaten, die für die Berechnung der Grenzstromdichte (vgl. Formel (4-16)) notwendig sind, werden in der Literatur wie folgt angegeben:

$$M_{(Cu)} = 63,546 \text{ [g/mol]}$$

$$c_{0(Cu)} = 18 \text{ [g/l]} \quad [\text{SurTec 2004}]$$

$$\rho_{(Cu)} = 8,9 \text{ [g/cm}^3\text{]}$$

$$D_{(Cu)} = 0,714 \cdot 10^{-5} \text{ [cm}^2\text{/sec]} \quad (\text{für } \frac{1}{2} \text{ Cu}^{2+} \text{ bei 298 K) [Linde 2005]}$$

$$D_{(Cu)} = 0,786 \cdot 10^{-5} \text{ [cm}^2\text{/sec]} \quad (\text{für } \frac{1}{2} \text{ Cu}^{2+} \text{ bei 328 K)}$$

$$z_{(Cu)} = 2$$

$$\chi_{(Cu)} = 205 \text{ [mS]}$$

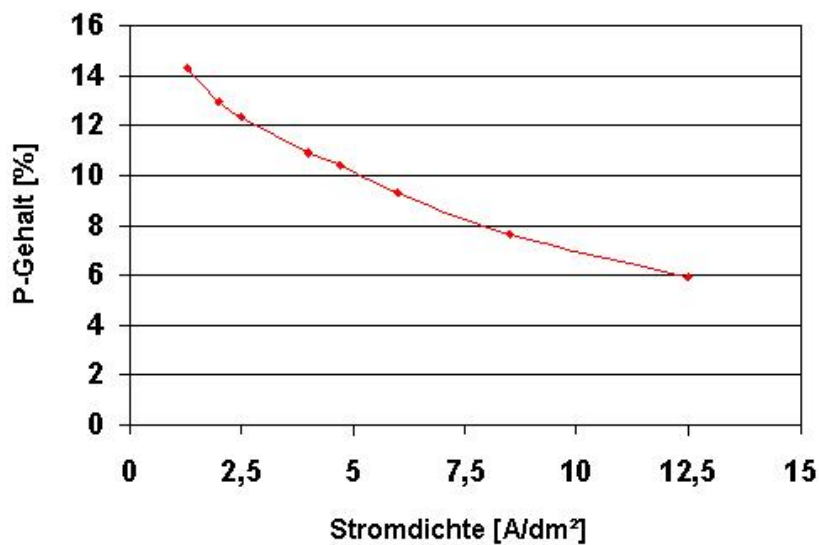
Hieraus ergibt sich die spezifische Funktion der lokalen Schichtdicke für die anschließende Simulation

$$d_{lokal(Cu)} = 12,25 \cdot (j_{lokal})^{0,4} \quad (8-3)$$

### 8.1.2 Implementierung des spezifischen Beschichtungsverhaltens des Nickel-Phosphor-Elektrolyten (NIPHOS 966)

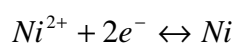
Im Gegensatz zum Kupferelektrolyten liegt das Prozessfenster des Nickel-Phosphor-Elektrolyten nicht im unmittelbaren Bereich der Grenzstromdichte. Entscheidend für die technischen Eigenschaften der Schicht ist vielmehr die Legierungszusammensetzung. Würde man die Stromdichte wesentlich erhöhen und so in den Bereich der Grenzstromdichte kommen, könnte, wie in Abbildung 8-1

dargestellt, der Phosphorgehalt unter 8% absinken und so eine funktionell minderwertige Legierungszusammensetzung entstehen. [Gaßner 2005]

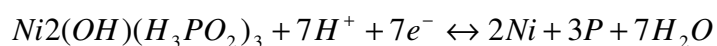


**Abbildung 8-1: Phosphorgehalt in Abhängigkeit von der Stromdichte [Unicore 2003]**

Die Vorversuche haben aber auch deutlich gemacht, dass der Phosphorgehalt nicht nur von der lokal herrschenden Stromdichte, sondern auch von der Strömung abhängt. Um möglichst homogene Schichteigenschaften auf der gesamten Bauteiloberfläche zu erzeugen, müssen sowohl die lokalen Strömungsbedingungen als auch die lokale Stromdichte in einem engen Prozessfenster liegen. Die Nickelabscheidung läuft nach folgender Reaktionsgleichung ab:

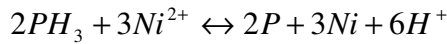
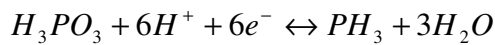


Der chemische Reaktionsweg bei der Phosphorabscheidung wird in der Literatur dagegen kontrovers diskutiert. Es werden folgende zwei mögliche Reaktionswege angegeben, die sich auf empirische Beobachtungen und Untersuchungen stützen. Nach Vakhidov verläuft die Phosphorabscheidung nach folgendem Reaktionsweg: [Vakhidow 1971]

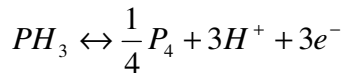


mit  $H_3PO_3 + 2H^{+} + 2e^{-} \leftrightarrow H_3PO_2 + H_2O$

Der von Landau und Zeller beschriebene Reaktionsweg beinhaltet die Bildung und den Zerfall von Phosphin: [Zeller 1988]



oder



Das Dilemma mehrerer möglicher Reaktionswege zeigt eine der wesentlichen Schwierigkeiten bei der Simulation elektrochemischer Prozesse auf. Häufig sind nur Fragmente oder Vermutungen über den eigentlichen Reaktionsweg bekannt. In diesen Fällen muss man sich ganz auf experimentell ermittelte Zusammenhänge und Erkenntnisse bei der Modellbildung stützen. Aus den Vorversuchen konnten für den NIPHOS 966 Elektrolyten folgende Beziehungen für die Gesamtstromausbeute in Abhängigkeit zur Stromdichte ermittelt werden:

$$P_{K(NiP)} = F(j_{\text{lokal}}) = 100 \cdot (j_{\text{lokal}})^{-0,4} \quad (8-4)$$

Die Legierungszusammensetzung lässt sich mathematisch in grober Näherung wie folgt beschreiben:

$$P_{\text{Gehalt}} = F(j_{\text{lokal}}) = -0,25 j_{\text{lokal}} + 15,3 \quad (8-5)$$

Diese Funktionen sind nur für ein Prozessfenster mit einer mittleren Elektrolytgeschwindigkeit von mindestens 0,1 [m/sec] und einer Stromdichte bis max. 10 [A/dm<sup>2</sup>] gültig. Diese lassen sich dann wie folgt in der theoretisch hergeleiteten Grundformel (vgl. Formel (4-29)) berücksichtigen. Mit den aus der Literatur bekannten spezifischen Stoffdaten:

$$M_{(Ni)} = 58,69 \text{ [g/mol]}$$

$$M_{(P)} = 30,97 \text{ [g/mol]}$$

$$c_{0(Ni)} = 80 \text{ [g/l]}$$

$$c_{0(P)} = 18 \text{ [g/l]}$$

$$\rho_{(Ni)} = 8,91 \text{ [g/cm}^3\text{]}$$

$$\rho_{(P)} = 1,82 \text{ [g/cm}^3\text{]}$$

$$z_{(Ni)} = 2$$

$$z_{(P)} = 2$$

$$D_{(Ni)} = 0,661 \cdot 10^{-5} \text{ [cm}^2\text{/sec]}$$

$$D_{(P)} = ? \cdot 10^{-5} \text{ [cm}^2\text{/sec]}^*$$

(für  $\frac{1}{2} Ni^{2+}$  bei 298 K)

(\* für dissoziierte oder nicht dissoziierte

$$D_{(Ni)} = 0,739 \cdot 10^{-5} [\text{cm}^2/\text{sec}]$$

(für  $\frac{1}{2} \text{Ni}^{2+}$  bei 333 K)

phosphrige Säure ist der Diffusionskoeffizient in der Fachliteratur nicht aufgeführt)

$$\chi_{(NiP)} = 115 [\text{mS}]$$

ergibt sich die endgültige Simulationsgleichung:

$$d_{\text{lokal}(Cu)} = 12 \cdot (j_{\text{lokal}})^{0,6} \quad (8-6)$$

## 8.2 Simulation der Beschichtung eines Werkstücks

In Abbildung 8-2 ist das Werkstück dargestellt, für das eine Beschichtung simuliert werden soll. In einem zweiten Schritt wird dann zur Verifikation des Simulationsergebnisses dieses Werkstück real im selben Verfahrensraum beschichtet, der auch für die Vorversuche zur Bestimmung der spezifischen Elektrolytparameter benutzt wurde.

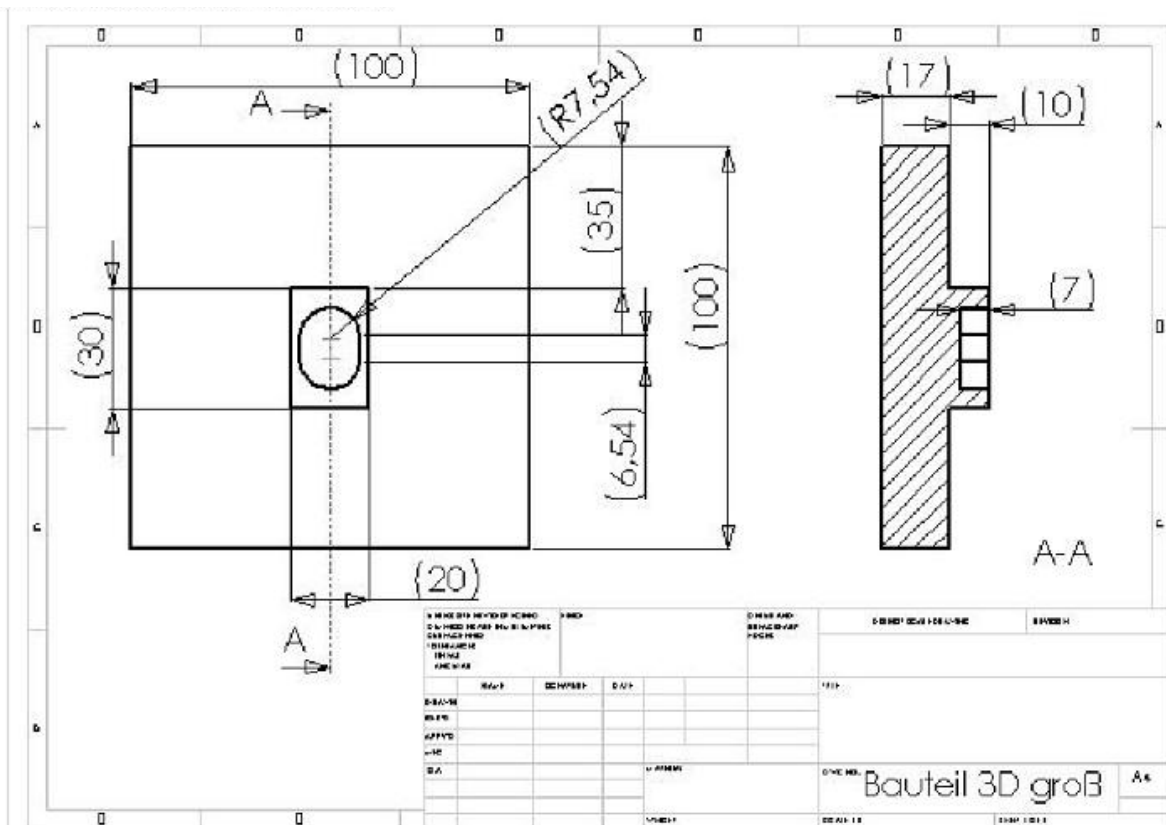


Abbildung 8-2: Zu beschichtendes Werkstück

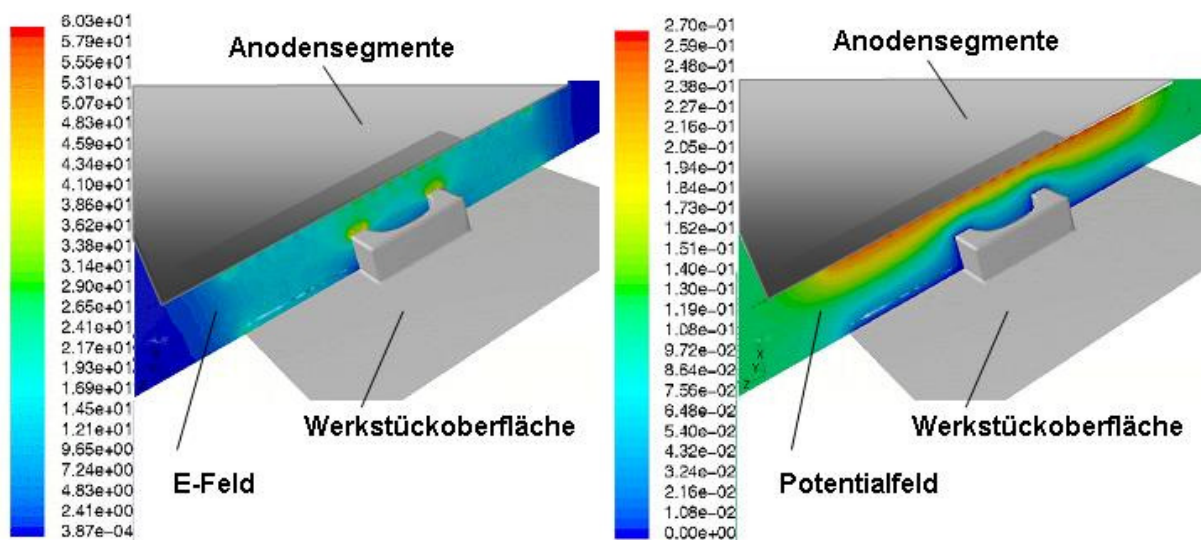
## 8.2.1 Simulationsergebnis für den Kupferelektrolyt ( $\mu$ Chem 510 Z)

Die Simulation erfolgt mit den in Tabelle 8-1 aufgeführten Prozessparametern:

<b>Volumenstrom</b>	24 [l/min]
<b>Strom</b>	2 [A]
<b>Potentialdifferenz</b>	0,3 [V]
<b>Beschichtungsdauer</b>	60 [min]
<b>Leitfähigkeit</b>	200 mS

**Tabelle 8-1: Prozessparameter für den Kupferelektrolyten**

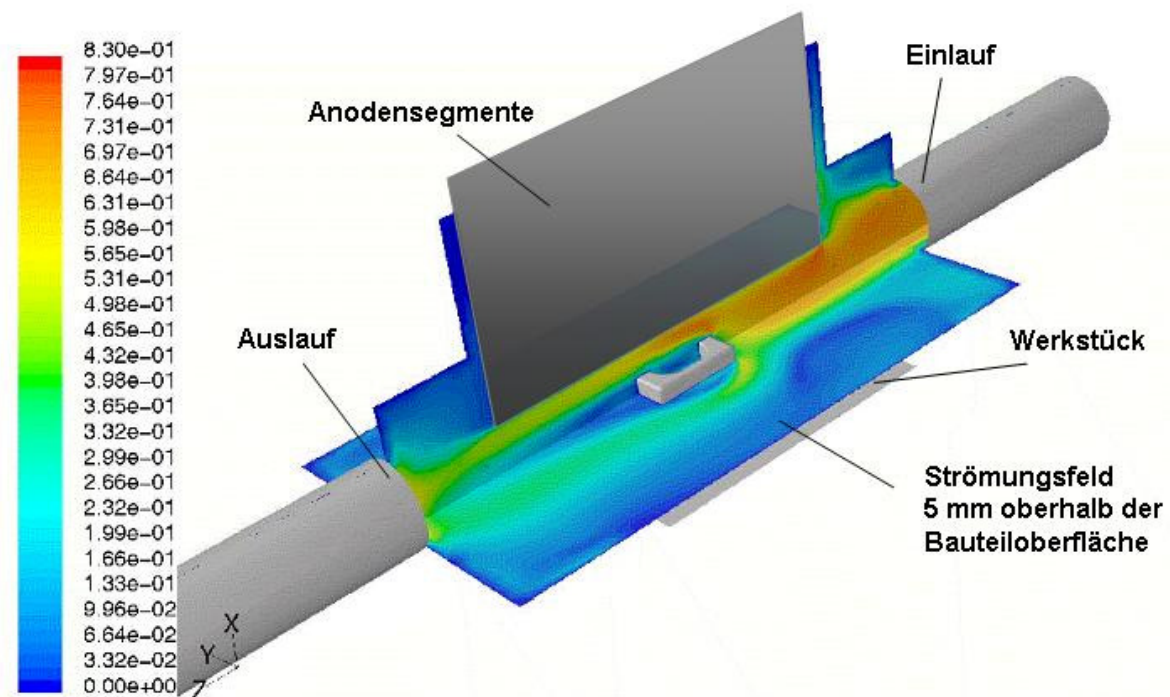
Es werden für die Simulation die Konvergenzkriterien für die Berechnung des hydrodynamischen Strömungsfeldes auf  $1 \cdot 10^{-3}$  und für die Berechnung der E-Feldberechnung auf  $1 \cdot 10^{-3}$  festgelegt. Zur Ermittlung dieser Werte benötigte das Simulationsprogramm insgesamt 6.950 Iterationsschritte. Der betrachtete Verfahrensraum wurde in insgesamt 509.857 Zellen mit 139.436 Knoten aufgeteilt. Das hieraus resultierende Potentialfeld, E-Feld und hydrodynamische Strömungsfeld ist in Abbildung 8-3 und Abbildung 8-4 aufgezeichnet.



**Abbildung 8-3: Berechnetes E-Feld und Potentialfeld (Cu)**

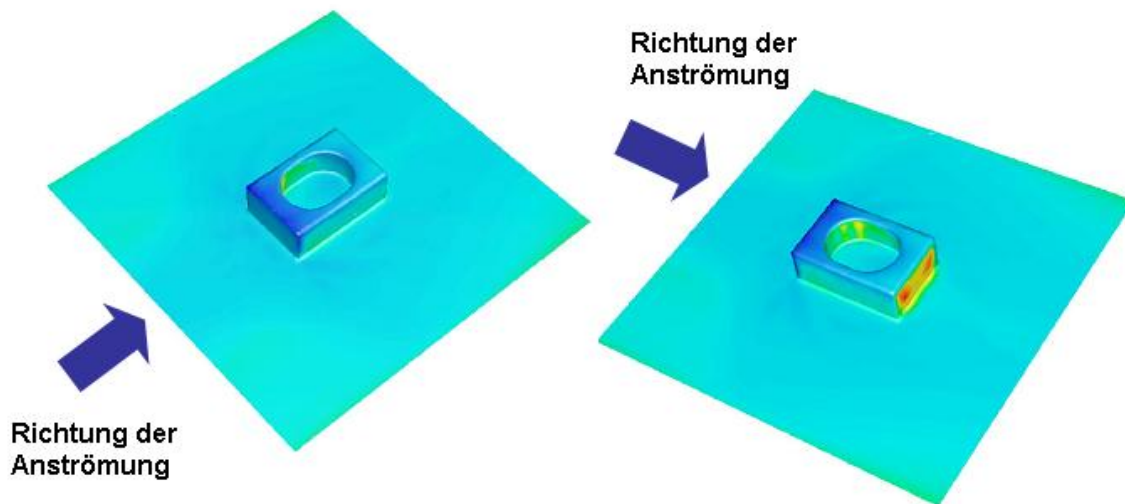
Das berechnete Potentialfeld weist im Bereich der Werkstückoberhebungen eine starke Konzentration der Äquipotentiallinien auf. Dieses lässt auf eine verstärkte

Metallabscheidung schließen. Im Bereich der Vertiefung und dem Übergang zwischen Werkstückebene und Werkstückerhebung ist eine erhebliche Aufweitung der Äquipotentiallinien erkennbar. Die Betrachtung des elektrischen Feldes verstärkt diese Erkenntnis. Die lokale Feldstärke an den Kanten der Werkstückerhebung erreicht einen Wert von bis zu 60 V/m. Die Verdeckten Kanten im Inneren des Werkstücks wiesen hingegen nur eine Feldstärke von 2,4 V/m auf.



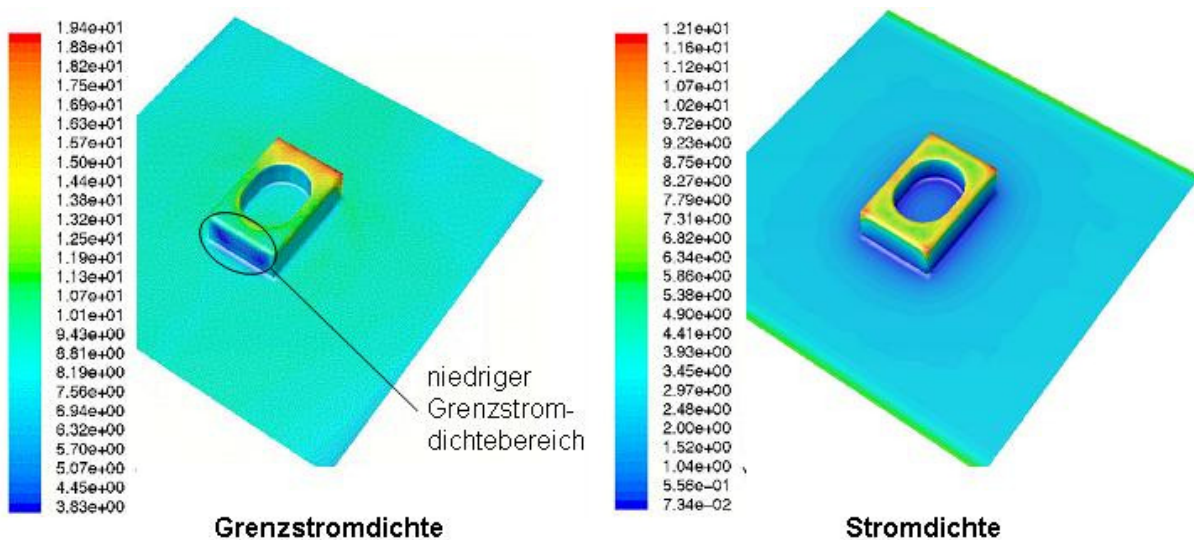
**Abbildung 8-4: Berechnetes hydrodynamisches Strömungsfeld im Verfahrensraum (Cu)**

Das hydrodynamische Strömungsfeld erreicht im Bereich der Stirnseite der Werkstückerhebung (obere Kante) eine Maximalgeschwindigkeit von 0,7 m/s und reduziert sich an der abgewandten Seite auf unter 0,03 m/s. Dies unterstreicht auch der in Abbildung 8-5 dargestellte starke lokale Anstieg der Strömungsgrenzschichtdicke in diesem Bereich.



**Abbildung 8-5: Resultierende viskose Unterschicht auf der Bauteiloberfläche (Cu)**

Die sich daraus ergebenden lokalen Grenzstromdichten (Abbildung 8-6) zeigen wiederum die hieraus entstehende Gefahr einer technischen nicht einwandfreien Abscheidung, die durch Anbrennungen und Dendritenwachstum hervorgerufen werden kann.

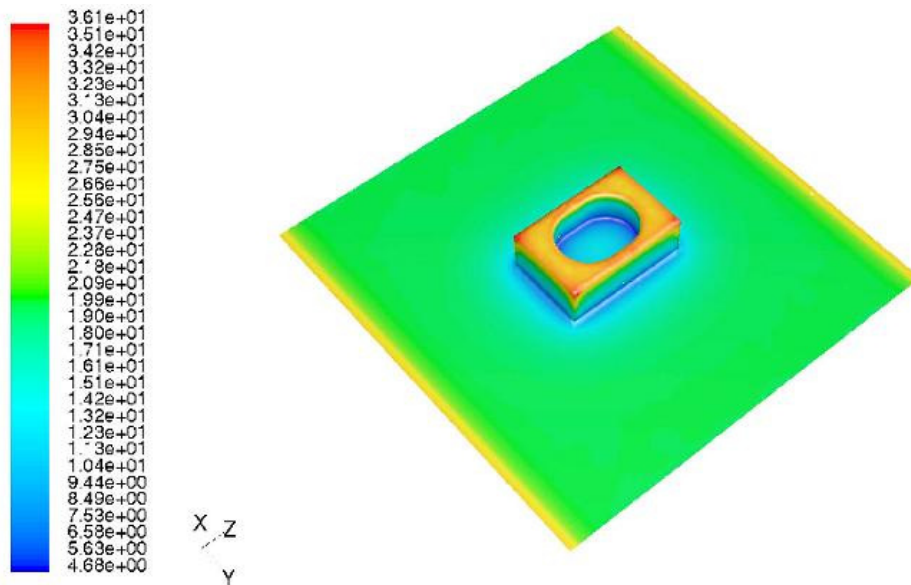


**Abbildung 8-6: Berechnete Grenzstromdichten und Stromdichten auf der Bauteiloberfläche (Cu)**

Die lokal herrschende Stromdichte sollte um mindesten 20% unter der Grenzstromdichte liegen, um ein technisch einwandfreies Beschichtungsergebnis zu garantieren. [Unruh 2001]

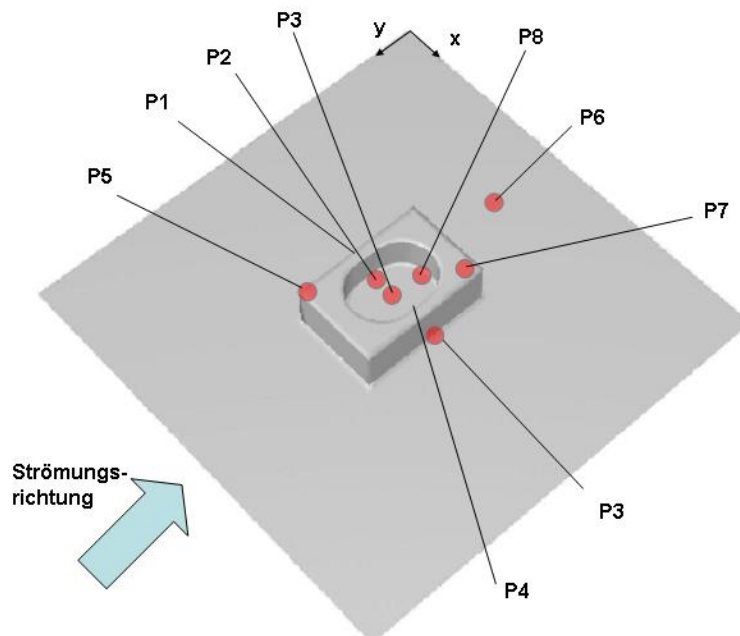


Die zu erwartende Schichtdickenverteilung auf der Bauteiloberfläche ist in Abbildung 8-7 aufgeführt.



**Abbildung 8-7: Berechnete Schichtdickenverteilung auf der Bauteiloberfläche (Cu)**

Zur anschließenden Verifikation der Simulation werden die in Abbildung 8-8 gezeigten Messpunkte ausgewählt.



**Abbildung 8-8: Messpunkte zur Verifikation des Simulationsmodells (Cu)**

Für die einzelnen Messpunkte ergeben sich folgende, durch die Simulation ermittelten Schichtdicken:

Messpunkte	Stromdichte [A/dm <sup>2</sup> ]	viskose Unterschicht [mm]	theoretische Schichtdicke [µm]	Stromausbeute [%]	simulierte Schichtdicke [µm]
P1	0,3-0,4	4,2 - 4,3	4 - 6	190	9,5
P2	0,19-0,31	4,4 - 4,5	3 - 4	250	10
P3	0,6-0,7	3,8 - 4,2	8 - 10	125	11,3
P4	8,1-9,1	2,8 - 3,2	43 - 94	26	29
P5	11,5-11,6	1,9 - 2	83 - 84	22	18,5
P6	2,5-2,6	4,0 - 4,1	33 - 35	53	18,55
P7	7,4-7,5	3,8 - 3,9	73 - 75	28	21
P8	0,07-0,19	3,8 - 3,9	1 - 3	450	9
P9	0,3-0,4	4,2 - 4,3	4 - 6	190	9,5

**Tabelle 8-2: Simulierte Ergebnisse für die betrachteten Messpunkte (Cu)**

Die simulierten Werte zeigen zum Teil eine deutliche Streubreite auf (vgl. Tabelle 8-2). Hervorgerufen wird dieses durch die nicht eindeutige Zuordnung eines Zellenwertes zu dem betrachteten Messpunkt. Da mehrere Zellengrenzen sich im Bereich des Messpunktes befinden, schwanken die Werte. Diese Toleranz der simulierten Messwerte kann nur durch eine Verfeinerung des Netzes vermindert werden.

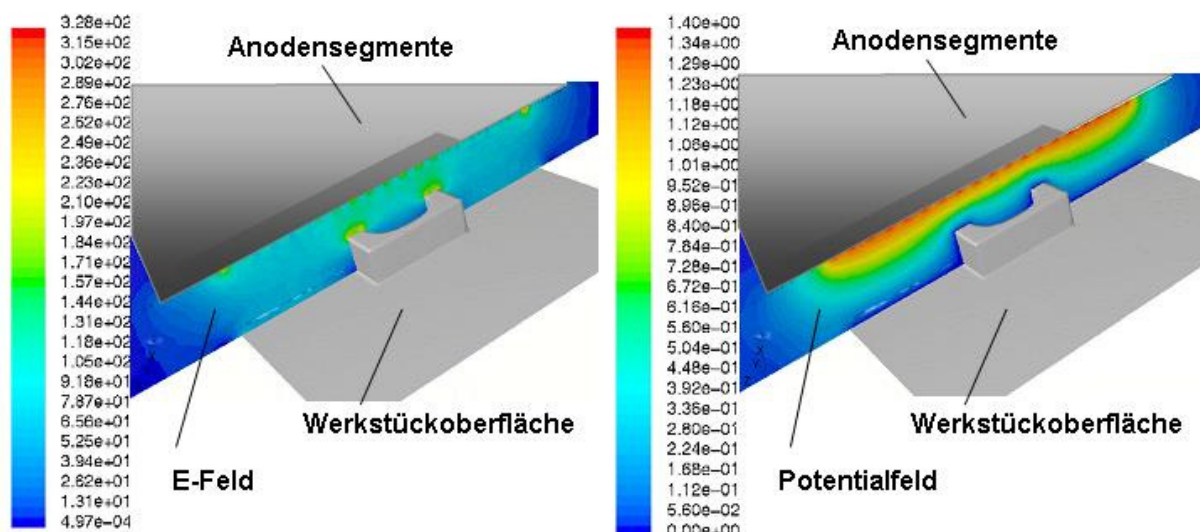
## 8.2.2 Simulationsergebnis für den Nickel-Phosphor-Elektrolyten (NIPHOS 966)

Die Simulation wird mit den in Tabelle 8-3 aufgeführten Prozessparametern durchgeführt.

<b>Volumenstrom</b>	12 [l/min]
<b>Strom</b>	8 [A]
<b>Potentialdifferenz</b>	0,3 [V]
<b>Beschichtungsdauer</b>	60 [min]
<b>Leitfähigkeit</b>	201 [mS]

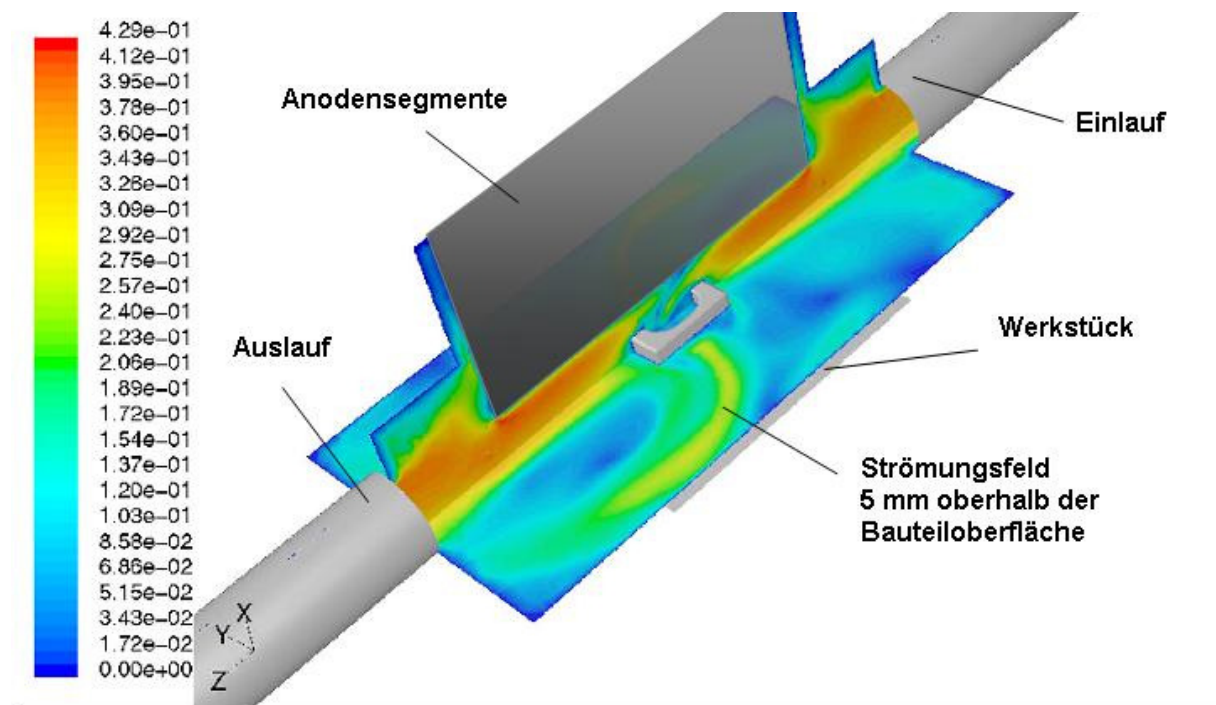
**Tabelle 8-3: Prozessparameter für den Nickel-Phosphor-Elektrolyten**

Ebenso wie bei der vorangegangenen Simulation der Kupferbeschichtung wurden für die E-Feldberechnung ein Konvergenzkriterium von  $1 \cdot 10^{-4}$  und für die hydrodynamische Strömungsberechnung ein Konvergenzkriterium von  $1 \cdot 10^{-2}$  vorgegeben. Um diese Vorgaben zu erfüllen wurden insgesamt 4.400 Iterationsschritte benötigt. Die Zellenzahl des verwendeten Netzes belief sich auf insgesamt 293.712 Zellen und 215.788 Knoten. Das ermittelte Potential- und das Strömungsfeld ist in Abbildung 8-9 und Abbildung 8-10 dargestellt.



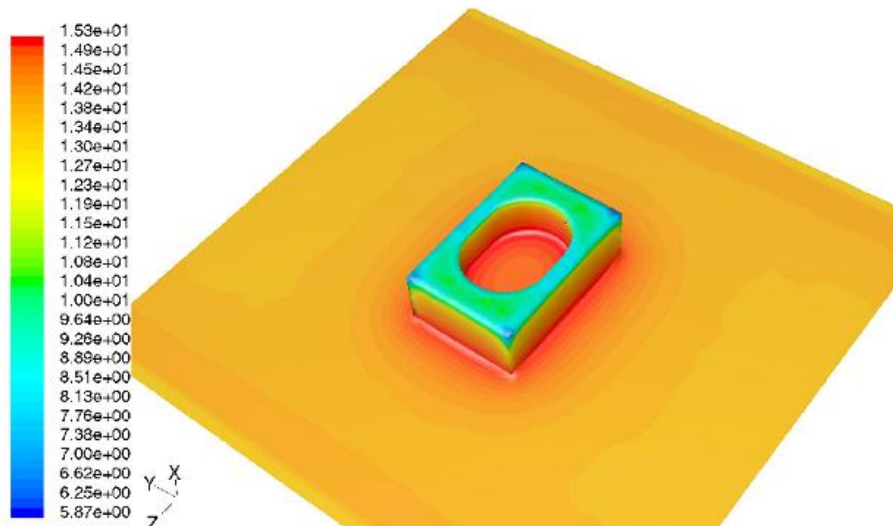
**Abbildung 8-9: Berechnetes Potentialfeld und E-Feld (NIP)**

Genau wie bei der vorangegangenen Berechnung der Kupferabscheidung weist auch hier das Potentialfeld eine starke Konzentration der Äquipotentiallinien im Bereich der Werkstückerhebung auf. Der hiermit verbundene Anstieg der lokalen Feldstärke beträgt an den Anoden zugewandten Kanten bis zu 32 V/m. Im Inneren der Werkstückerhebung schwächt sich die lokale Feldstärke auf 2 V/m ab. Die in Abbildung 8-10 dargestellten Strömungsverhältnisse weisen jeweils zwei Wirbelbereiche in den Ein- und Auslaufflächen auf. Die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten liegen im Bereich der Werkstückerhebung bei 0,3 m/s.



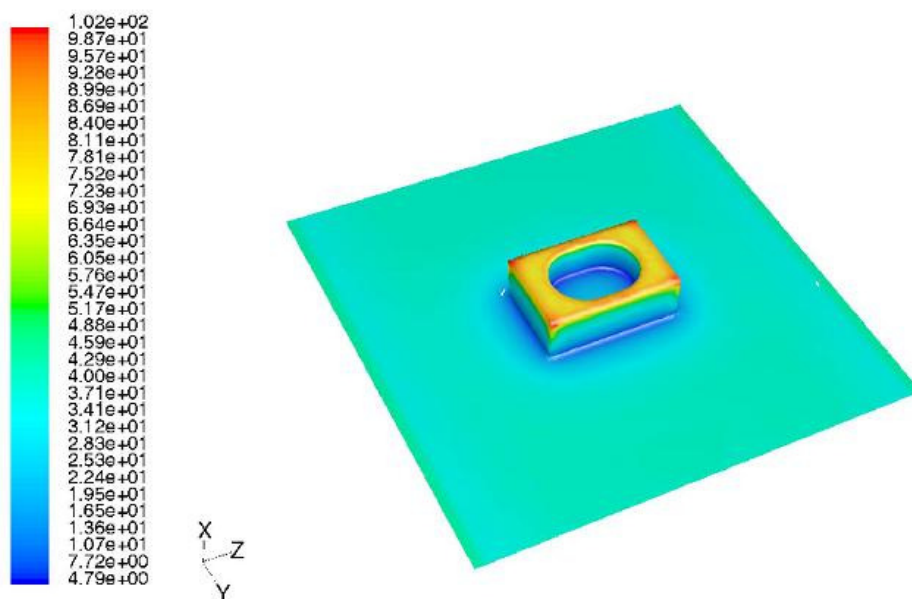
**Abbildung 8-10: Berechnetes Strömungsfeld (NIP)**

Aus der Berechnung der Stromdichte lassen sich die lokale Legierungszusammensetzung (vgl. Abbildung 8-11) und die Schichtdickenverteilung (vgl. Abbildung 8-12) auf der Werkstückoberfläche ableiten.



**Abbildung 8-11: Berechnete Legierungszusammensetzung auf der Bauteiloberfläche**

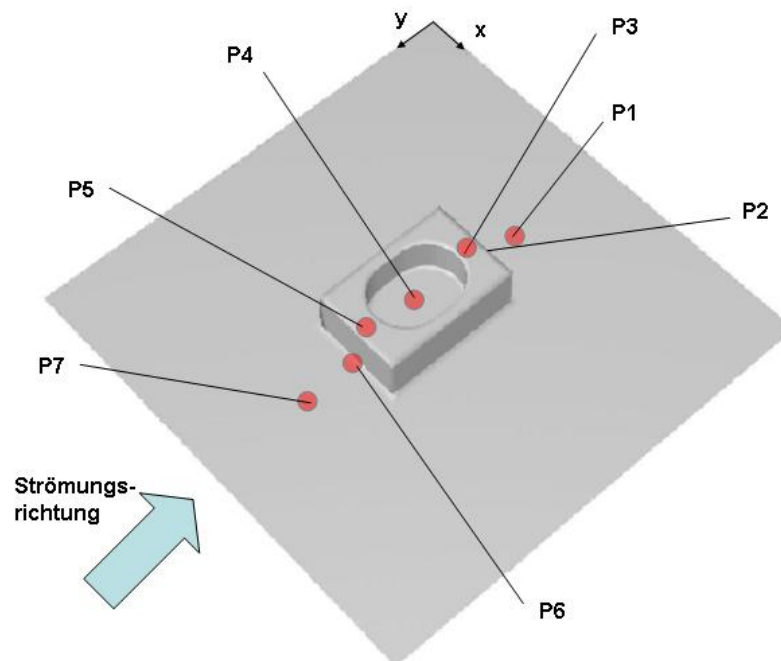
Der Phosphorgehalt erreicht in den abgeschirmten Bereichen (Innen- und Außenkanten der Werkstückerhebung) einen Wert von bis zu 15 %. In der Ebene des Werkstücks sinkt dieser auf ca. 13,5 % ab. In Bereichen mit hoher Stromdichte (der Anode zugewandten Ecken) sinkt der Phosphorgehalt auf 7 % ab.



**Abbildung 8-12: Berechnete Schichtdickenverteilung auf der Bauteiloberfläche (NIP)**

Die Schichtdickenverteilung weist eine starke Inhomogenität auf. An den Außenkanten der Werkstückerhebung sind bis zu 100  $\mu\text{m}$  zu erwarten. In den Bereichen des Übergangs zwischen Ebene und Werkstückerhebung werden hingegen lediglich 5  $\mu\text{m}$  abgeschieden.

Zur anschließenden Verifikation der Simulation werden die in Abbildung 8-13 gezeigten Messpunkte ausgewählt.



**Abbildung 8-13: Messpunkte zur Verifikation des Simulationsmodells (NIP)**

Für diese Messpunkte wurden folgende Schichtdicken und Prozessparameter durch die Simulation ermittelt:

Messpunkte	Stromdichte [A/dm <sup>2</sup> ]	viskose Unterschicht [mm]	theoretische Schichtdicke [μm]	Stromausbeute [%]	simulierte Schichtdicke [μm]
M1	3,3-2,7		36	51	18
M2	0,9-1,6		15	80	12
M3	21,0-21,9		256	30	76
M4	2,3-3,0		32	43	14
M5	21,0-21,9		256	30	76
M6	0,9-1,6		15	80	12
M7	3,3-2,7		36	51	18

**Tabelle 8-4: Simulierte Ergebnisse für die betrachteten Messpunkte (NIP)**

Auch die in Tabelle 8-4 aufgeführten simulierten Messwerte weisen eine gewisse Streubreite auf. Dieses ist ebenfalls, wie bei der simulierten Kupferbeschichtung, auf die Güte des verwendeten Netzes zurückzuführen. Bei einem durchschnittlichen Randzellenvolumen von 0,2 mm<sup>3</sup> ist häufig eine eindeutige Zuordnung einer Zelle zu einem betrachteten Messpunkt nicht möglich.

### 8.3 Verifikation der Simulation

Zur Verifikation des Simulationsmodells wurde das, der Simulation zu Grunde liegende Werkstück (vgl. Abbildung 8-2) beschichtet und die Ergebnisse mit denen der Simulation verglichen. Die Beschichtung erfolgt mit dem gleichen Versuchsaufbau, der auch für die Vorversuche diente (vgl. Abbildung 7-1). Lediglich der Kathoden-Anodenabstand und die geschalteten Anoden wurden dem Werkstück entsprechend angepasst.

P1 = 27 µm	P3 = 27 µm	P5 = 50 µm	P7 = 52 µm	P9 = 30 µm
P2 = 26 µm	P4 = 51 µm	P6 = 35 µm	P8 = 26 µm	

**Tabelle 8-5: Reales Beschichtungsergebnis für den Kupferelektrolyten**

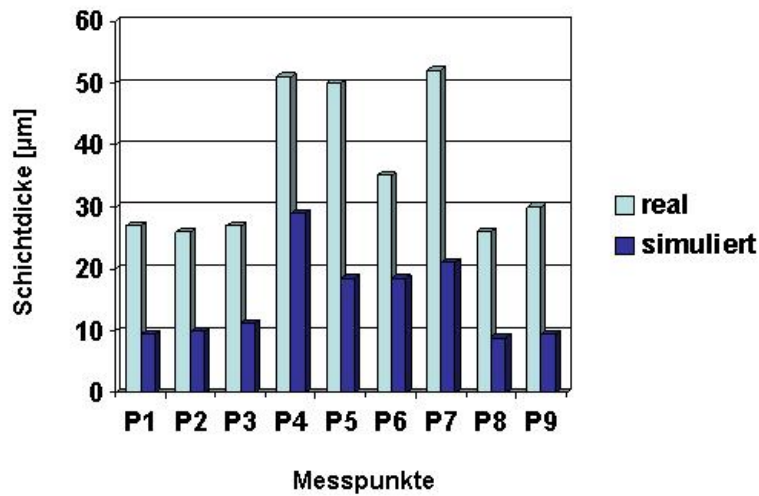
Die in Tabelle 8-5 dargestellten Messwerte wurden, wie bei den Vorversuchen auch, mittels zerstörungsfreier optischer Vergleichsmessung ermittelt. Hingegen wurden die in Tabelle 8-6 aufgeführten Messwerte der Nickel-Phosphor-Abscheidung mit Hilfe einer Schlifffilmbauswertung festgestellt.

M1 = 20 µm	M3 = 113 µm	M5 = 1 µm	M7 = 15 µm
M2 = 11 µm	M4 = 13 µm	M6 = 8µm	

**Tabelle 8-6: Reales Beschichtungsergebnis für den Nickel-Phosphor-Elektrolyten**

Um die Gültigkeit des Simulationsmodells für die einzelnen Elektrolytsysteme zu überprüfen, werden die simulierten Ergebnisse mit den real gemessenen Werten verglichen. In Abbildung 8-14 und Abbildung 8-15 sind die realen und simulierten

Schichtdicken aus den Versuchen mit den betrachteten Elektrolytsystemen dargestellt.

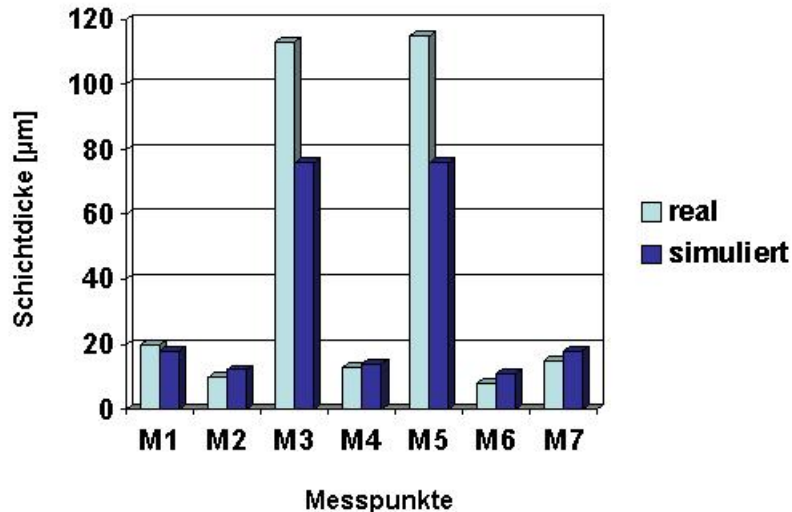


**Abbildung 8-14: Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse mit den realen Messwerten vom betrachteten Kupferelektrolyten**

Die generelle Abweichung der simulierten Schichtdicken bei der Kupferabscheidung von den real gemessenen Werten ist sicherlich auf die starke Streufähigkeit der Elektrolyte zurückzuführen. Dieses hieraus entstehende Abscheideverhalten konnte bei den ebenen Probekörpern und dem nur leicht ansteigenden E-Feld kaum ermittelt werden. Da sich alle weiteren betrachteten Messpunkte in Bereichen mit hohem Stromdichtegradienten befinden, kommt dieser Effekt der Makrostreufähigkeit zum Tragen. Es ist deshalb auch nicht verwunderlich, dass die simulierte Schichtdicke bei diesen Punkten um die Hälfte geringer ist. Um den Effekt der Makrostreufähigkeit von Elektrolytsystemen auch in der Berechnung zu berücksichtigen, müsste ein zusätzlicher Faktor in die Formel (8-1) eingeführt werden. Dieser Faktor könnte aus dem Gradienten des E-Feldes (zwischen betrachteter Zelle und den benachbarten Zellen) gebildet werden. Die experimentelle Ermittlung dieses Effektes wäre durch verschieden tiefe Kerben auf der Probenplatte möglich.

Bei der visuellen Überprüfung des Beschichtungsergebnisses konnte eine erhöhte Dendritenbildung in den Bereichen mit einer hohen Grenzschichtdicke nachgewiesen werden (vgl. Abbildung 8-5).

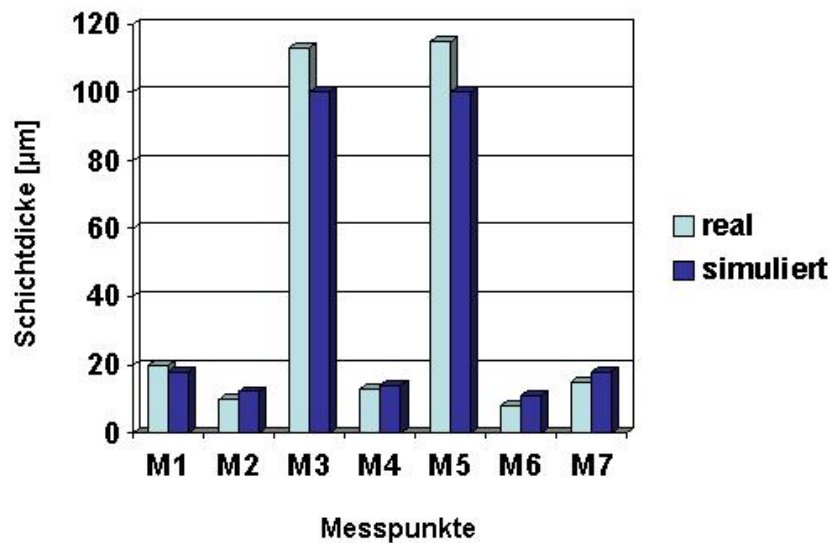




**Abbildung 8-15: Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse mit den realen Messwerten vom betrachteten Nickel-Phosphor-Elektrolyten**

Hingegen sind die simulierten Werte der Nickel-Phosphor-Beschichtung sehr nah an der Realität (vgl. Abbildung 8-15). Die Abweichungen zwischen 1 % und 35 % sind auf die Güte der aus den Vorversuchen abgeleiteten mathematischen Funktionen der spezifischen Stromausbeute zurückzuführen. Die Messpunkte M3 und M5 liegen mit den dort herrschenden lokalen Stromdichten von 22 [A/dm<sup>2</sup>] am äußersten Rand des betrachteten Prozessfensters und werden durch die im Programm hinterlegte Gleichung (vgl. (8-6)) nicht mehr hinreichend beschrieben. Würde man bei der Ermittlung der spezifischen Elektrolytkennzahlen sich auf ein bestimmtes Prozessfenster beschränken und das Computermodell so gestalten, dass für einzelne Prozessfenster unterschiedliche mathematische Funktionen hinterlegt werden können, hätte dies eine weitere Annäherung des Simulationsergebnisses an die Realität zu Folge. Für den betrachteten Nickel-Phosphorelektrolyten würde an einer lokalen Stromdichte von 10 [A/dm<sup>2</sup>] nicht mehr Gleichung (8-4) sondern Gleichung einer Geraden  $p_{K(NiP)} = 40 - 0,1 \cdot j_{\text{lokal}}$  für die lokale Stromausbeute gelten.

Dieses ergäbe dann folgende Annäherung an das reale Beschichtungsergebnis:



**Abbildung 8-16: Verwendung einer unstetigen Funktion für die Stromausbeute**

Es zeigt sich aber, dass man durch die kombinierte Simulation des elektrischen Potentialfeldes und dem hydrodynamischen Strömungszustand sowie einer gezielten Bestimmung der benötigten Elektrolytparameter für ein bestimmtes Prozessfenster das Beschichtungsergebnis für beliebig geformte Bauteile relativ gut vorhersagen kann. Für die weiteren Schritte in dieser Arbeit, nämlich die Auslegung einer werkstückangepassten flexiblen Anode, spielen die quantitativen Ungenauigkeiten zwischen simulierten und realen Beschichtungsergebnissen keine Rolle. Bei der Auslegung einer entsprechenden Anode kommt es wie im Folgenden gezeigt wird, vor allem auf die Minimierung der relativen lokalen Unterschiede der zwei Einflussparameter (Stromdichte und Diffusionsgrenzschicht) und nicht auf deren diskrete Werte an.

Die Ergebnisse sind im Ganzen sehr vielversprechend. Das gekoppelte Modell (Hydrodynamik und E-Feld) eröffnet zusätzlich die Möglichkeit, durch entsprechende Implementierung von Gesetzmäßigkeiten, Vorhersagen über weitere qualitätsrelevante Kennwerte wie z.B. die Rauigkeit und Härte zu tätigen.

## **9 Wirtschaftlicher Rapid-Tooling-Prozess durch elektrochemische Beschichtung mit formangepasster Anode**

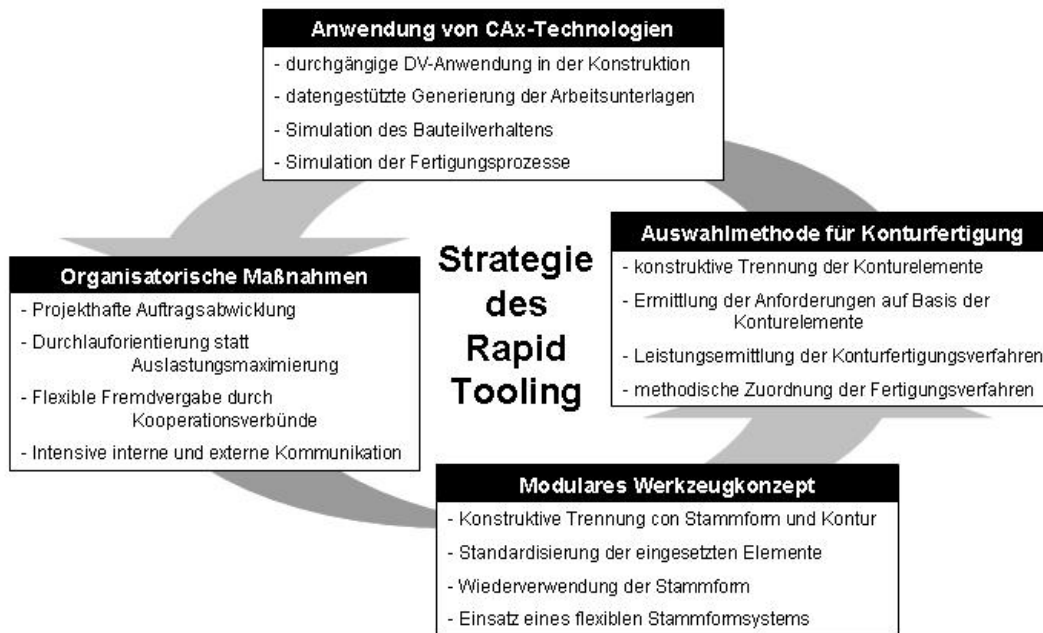
Sinn der Strategie des Rapid Toolings ist die schnelle, entwicklungsbegleitende Herstellung von urformenden Prototypen- und Kleinserienwerkzeugen. [Pieverling 2003] Hauptsächlicher Anwendungsbereich wird im Spritzgiessen von Thermoplasten und Druckguss von Leichtmetallen gesehen. [Witt 2002b] [Shellabear 2000] Beide Fertigungstechnologien stellen höchste Anforderungen an die Komplexität der Betriebsmittel. Häufig muss man jedoch aus wirtschaftlichen Gründen auf den Einsatz von Prototypwerkzeugen verzichten und fertigt auf Basis unsicherer Werkstückdaten gleich ein Serienwerkzeug. Dies birgt die Gefahr hoher Änderungskosten und zeitlichen Verzögerungen während der Produktentwicklung in sich.

Um einerseits die Funktion der geplanten Werkzeuge frühzeitig abzusichern und andererseits mit seriennahen Bauteilen die Produktfunktion sicherstellen zu können, wäre es wünschenswert, mit kostengünstigen Fertigungsverfahren die Herstellung solcher Prototypwerkzeuge zu ermöglichen. Die Strategie des Rapid Toolings versucht auf diese Herausforderung eine Antwort zu geben. [Lindner 2002]

### **9.1 Prozesskette des Rapid Tooling**

Das Rapid Tooling umfasst die gesamte Prozesskette der Prototypenwerkzeugfertigung. Sie beginnt mit der Konstruktion der Werkzeuge auf Basis fertigungsgerechter CAD-Werkstückdaten und beinhaltet sowohl die Auswahl des konturgebenden Verfahrens als auch die Bemusterung der Bauteile, um nur die wichtigsten Schritte zu nennen. [K. Cuhls 2002]

Im Sinne des Begriffes „Strategie“ muss das Rapid Tooling als ganzheitliches Maßnahmenpaket verstanden werden. Das Gesamtkonzept ist in Abbildung 9-1 schematisch dargestellt:



**Abbildung 9-1: Gesamtkonzept Rapid Tooling [Pieverling 2003]**

Die gesamte Prozesskette läuft, wie in Abbildung 9-2 dargestellt, in 8 Grundschritten ab:



**Abbildung 9-2: Technologische Prozesskette des Rapid Tooling**

Als Konturgebende Verfahren kommen neben dem traditionellen Fräsen und Erodieren zunehmend generative Verfahren, wie z.B. das Lasersintern und das Laserschmelzen zum Einsatz. [Abele 2004] Je nach Einsatzgebiet und verwendetem Grundmaterial sowie benötigter Stückzahl an Prototypen oder Losgröße der Kleinserien wird das Werkzeug noch mit einer Funktionsschicht überzogen. Am Ende der Kette steht die qualitative Bemusterung der damit gefertigten Teile. Auch das Rapid Tooling unterliegt den Gesetzen der Wirtschaftlichkeit. Sie entscheidet letztlich darüber, ob ein Prototypwerkzeug als Zwischenschritt oder gleich ein Serienwerkzeug trotz der eingangs beschriebenen Unsicherheiten gefertigt wird.

Ein Faktor, der in der Regel über die Wirtschaftlichkeit entscheidet, ist das Verfahren zur Form- bzw. Konturgebung. Deshalb haben in den letzten Jahren kostengünstige generative Verfahren wie das Lasersintern an Bedeutung gewonnen. [Pieverling 2003] Dieses Verfahren hat einige Vorteile gegenüber den konventionellen Erodier- und Fräsverfahren. Denn die Datenüberführung vom CAD-Prozess in die spezifische Sprache der Sinteranlagen ist unproblematisch. [Lenz 2004] Dazu kommen die geringen Rüst-, Arbeitsvorbereitungs- und Instandsetzungszeiten bei diesem Verfahren.

Die Nachteile dieser noch sehr jungen Fertigungstechnologie liegen in den relativ großen geometrischen Toleranzen [Abele 2004], der mangelnden Verschleißfestigkeit des zu verarbeitenden Grundmaterials, der Erosion [Witt 2002a] und den hohen Eigenspannungen der Bauteile. Dadurch entstehen hohe Nachbearbeitungskosten durch manuelles Strahlen und Schleifen. Deshalb sind derzeit die Einsatzbereiche der gesinterten Werkzeuge beschränkt. [Dusel 2000]

## **9.2 Verbesserungs- und Einsparpotentiale in der Lasersinter-Prozesskette**

Die Randbedingungen des DMLS-Verfahrens (Direct Metal Laser Sinter) lassen nur ein relativ eingegengtes Prozessfenster für Folgeprozesse zu. Dies ergibt sich aus der Betrachtung der in Tabelle 9-1 aufgeführten Prozessdaten. [Trenker 2001]

Allgemeine Prozessdaten						
		DirectMetal	DirectMetal	DirectSteel	DirectSteel	DirectSteel
		50	20	50	20	H20
Metallpulver		Bronze-basierte Matrix, enthält Ni	Bronze-basierte Matrix, enthält Ni	Stahl-basierte Matrix, enthält Ni	Stahl-basierte Matrix, enthält Ni	Stahl-legierung, enthält Cr, Ni, Mo, Si, V, C
Bauteilgenauigkeit [ $\mu\text{m}$ ]		$\pm 80$	$\pm 50$	$\pm 100$	$\pm 50$	$\pm 50$
kleinste Wandstärke [mm]		0,7	0,6	0,9	0,7	0,7
Oberflächenrauigkeit						
ohne Nachbehandlung [ $\mu\text{m}$ ]	R <sub>a</sub>	-	9	-	10	10
	R <sub>z</sub>	50 – 60	40 - 50	60	50	40 - 50
nach Mikrostrahlen [ $\mu\text{m}$ ]	R <sub>a</sub>	-	3	-	4	5
	R <sub>z</sub>	20	15	35	15	25
R <sub>z</sub> nach Polieren [ $\mu\text{m}$ ]		bis 1	bis 8	bis 5	bis 2	Bis 1
Bauteileigenschaften						
Restporosität [%]		20	8	5	2	0,5
Zugfestigkeit [MPa]		200	400	500	600	1100
E-Modul [GPa]		50	80	110	130	180
Biegebruchfestigkeit [MPa]		400	700	950	1000	2000
Wärmeausdehnungskoeffizient [ $10^{-6} / \text{K}$ ]		18	18	9	9	13
Wärmeleitfähigkeit [W/mK]		30	30	13	13	15
Härte [HV]		95	115	205	225	350
Max. Temperatur [°C]		400	400	800	800	1100

**Tabelle 9-1: Prozessdaten des DMLS-Verfahrens am Beispiel einer EOSINT- M 250 Anlage [EOS 2004]**

Besonders die Auswahl eines geeigneten Beschichtungsverfahrens zur Verbesserung der Werkstückeigenschaften wird durch mehrere Einflussfaktoren stark eingeschränkt. Durch die hohen Eigenspannungen im gesinterten Bauteil sind nur solche Beschichtungsprozesse geeignet, deren Prozesstemperaturen unter der Spannungsarmglüh- bzw. Rekristallisationstemperatur des verwendeten Materials

liegen. Zur Verbesserung der Oberflächenqualität bzw. Kompensation von topographischen Fehlern sind bei einer Restporosität von bis zu 5% und bei Rauigkeitswerten von  $R_a < 5 \mu\text{m}$  erheblich dicke Beschichtungen notwendig.

Betrachtet man die in Tabelle 2-1 aufgeführten Beschichtungstechnologien und ihre spezifischen Prozessparameter, so sind nur das elektrochemische oder das chemische Beschichten dafür geeignet. Die Prozesstemperaturen dürfen die Rekristallisationstemperatur des gesinterten Nickel-Bronze-Materials von ca.  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  nicht überschreiten. Des Weiteren sind Schichtdicken über  $10 \mu\text{m}$  notwendig, um die durch die Restporosität verursachten topographischen Fehler zu schließen. Ansonsten würden perforierte Beschichtungen entstehen.

Unter Berücksichtigung der Gefahr, dass sich feinste Partikel des nicht verschmolzenen Metallpulvers herauslösen, ist auch ein wirtschaftlicher Einsatz des chemischen Beschichtungsverfahrens in Frage zu stellen. Denn die verwendeten chemischen Elektrolytsysteme reagieren sehr empfindlich gegenüber Fremdmalleintrag. So wird z.B. ein industriell eingesetztes chemisches Nickelbad schon bei einer Fremdionenkonzentration von  $20 \text{ mg Kupfer pro Liter}$  unbrauchbar und muss ausgetauscht bzw. aufbereitet werden. [Unicore 2003] Außerdem lassen sich die erforderlichen dicken Schichten wirtschaftlich damit nicht erzeugen. Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Beschichtungsversuchen von lasergesinterten Werkstücken ergab eine Analyse des Elektrolyten mittels Spektroskopie einen Fremdioneneintrag von über  $30 \text{ mg/l Kupfer}$ . Dies hätte ein chemisches Nickelbad unbrauchbar gemacht.

### **9.3 Voraussetzungen für den Einsatz des elektrochemischen Beschichtens beim Lasersintern**

Um den elektrochemischen Beschichtungsprozess in die Prozesskette des Lasersinterns und damit in eine Rapid Tooling Strategie erfolgreich integrieren zu können, sind einige Voraussetzungen zu erfüllen. Vor allem muss die manuelle Nacharbeit nach der Beschichtung auf ein Minimum reduziert werden, um die wirtschaftlichen Vorteile dieses Verfahrens gegenüber den konventionellen konturgebenden Verfahren nicht einzubüßen.

Dafür ist neben der in Kapitel 1 dargestellten rechnergestützten Prozessparameterermittlung durch Simulation auch eine wirtschaftliche Herstellung von formangepassten Anoden (Formanode) notwendig. Diese sind erforderlich, um ein gleichmäßiges Beschichtungsergebnis über die gesamte Werkstückkontur zu erreichen. Wie in Kapitel 4.5 dargestellt, ist die Schichtdicke eine Funktion der geometrischen Verhältnisse zwischen Anode und Werkstück. Um an jeder Stelle der Werkstückoberfläche die gleichen Bedingungen bezüglich der dort herrschenden lokalen elektrischen Potentiale und Grenzschichten zu erhalten, ist eine entsprechend dem Werkstück angepasste Anode erforderlich, mit der diese Bedingungen erfüllt werden können. Andernfalls erhält man ein inhomogenes Beschichtungsergebnis bezüglich der Schichtdicke und ggf. auch der Legierungszusammensetzung. Die kostengünstige Herstellung einer Formanode ist also bei komplexen Werkstückgeometrien ein Schlüsselfaktor bei der wirtschaftlichen Auslegung von lasergesinterten Werkzeugen aber auch bei anderen Rapid Tooling Prozessen.

## **9.4 Lösungsansatz durch flexible Anodengestaltung**

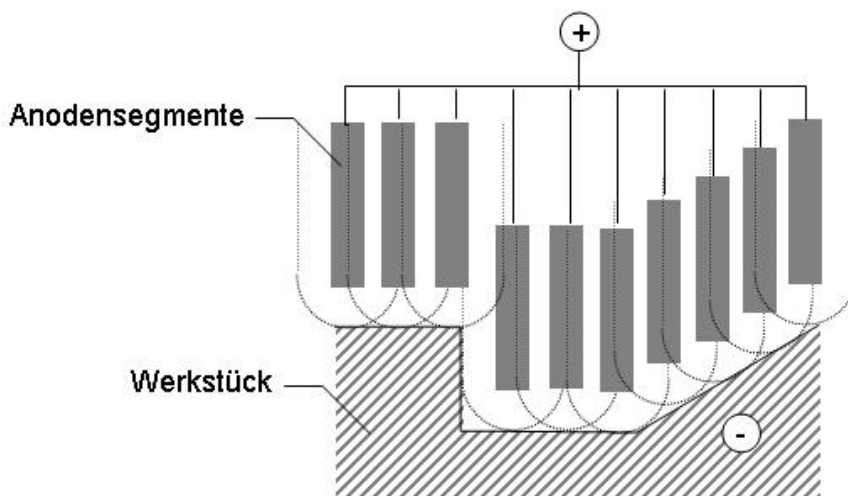
Formanoden werden industriell wegen der derzeit hohen Herstellungskosten fast ausschließlich in der Serienproduktion von Werkstücken mit hohen Qualitätsanforderungen eingesetzt. Auf Grund der Aggressivität der verwendeten Elektrolyten müssen diese aus spezifischem Material, meist aus Titan, hergestellt werden. Solche Titananoden sind außerdem noch mit einer Platinschicht zu überziehen, damit die Oberfläche nicht passiviert und somit nicht mehr elektrisch leitet. Die Teilschritte zu Herstellung einer konventionellen Formanode sind in Abbildung 9-3 dargestellt:





**Abbildung 9-3: Teilschritte zur Herstellung einer konventionellen formangepassten Anode**

Dieser Herstellungsprozess ist aufwendig und kostspielig, insbesondere wegen der schlechten Zerspanungseigenschaften, wenn Titan zum Einsatz kommt. Abhilfe könnte ein flexibles Anodensystem schaffen, das so in seiner Geometrie veränderbar ist, dass es auf unterschiedliche Werkstücke angepasst werden kann. Dadurch ließen sich erhebliche Kosten und Ressourcen einsparen. Ein mögliches Lösungskonzept böte eine Segmentierung der Anode in einzelne Formelemente. [Bingel 2003] Da besonders Formwerkzeuge wegen der Entformbarkeit der Werkstücke keine Hinterschneidungen aufweisen dürfen und deshalb von oben zugänglich sind, bietet sich dort dieses Prinzip an. Denn unter Verwendung von Stiften könnte, wie mit einem feinen Nagelbrett, ein negatives oder positives Abbild der zu beschichtenden Oberflächengeometrie erzeugt werden. Das Prinzip ist in Abbildung 9-4 dargestellt:



**Abbildung 9-4: Prinzip eines flexiblen Anodensystems**

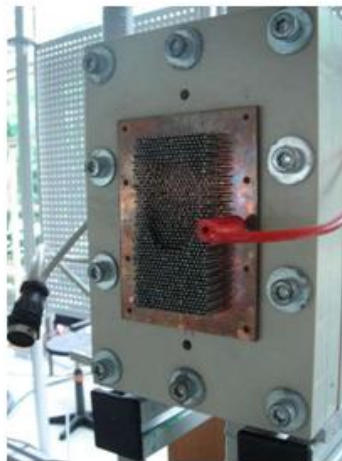
Mit dieser Bauweise wäre es möglich, durch vertikales Verschieben der Stifte unterschiedliche Formen zu erzeugen. Es kommt allein darauf an, dass das gewünschte Spaltmaß zwischen Anodensegment und Werkzeugoberfläche einstellbar ist. Damit müsste das Anodensystem nur einmal aufwendig gefertigt werden und stünde dann für die Beschichtung unterschiedlichster Oberflächengeometrien auf Dauer zur Verfügung. Im Folgenden wird ein solches Anodensystem beschrieben und seine Wirksamkeit und Handhabbarkeit bewiesen.

## 9.5 Elektrochemisches Beschichten von lasergesinterten Werkstücken mittels eines flexiblen Anodensystems

Der in Kapitel 1 vorgestellte Versuchsstand (vgl. Abbildung 7-1) wurde der für die Vorversuche und zur Verifikation der Simulation verwendete Verfahrensraum durch einen zweiten, entsprechend modifizierten Verfahrensraum ersetzt (siehe Abbildung 9-5). Dieser ermöglicht es, Bauteile mit einer Grundfläche von maximal 50 x 100 mm und einer maximalen Höhe von 40 mm zu beschichten.



Versuchsstand mit Verfahrensraum 2



Kontaktiertes Formanodensystem



Formteil im Verfahrensraum 2

**Abbildung 9-5: Versuchsaufbau mit Formanodensystem**

Der Elektrolyt kann mit einem maximalen Volumenstrom von 80 [l/min], wie bei den Vorversuchen zur Simulation, durch den Verfahrensraum strömen.

## 9.5.1 Flexibles Anodensystem

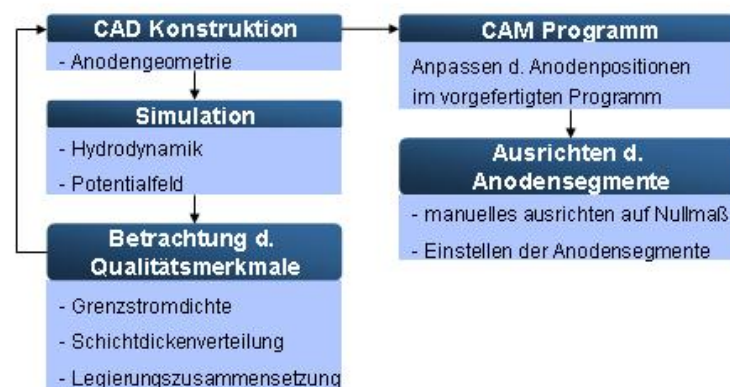
Um eine möglichst konturgenaue Form nachbilden zu können, befinden sich 850 Titanstifte mit einem Durchmesser von 1,5 mm im Deckel des Verfahrensraums, der damit die Baugruppe der Formanode darstellt. Diese werden durch eine abgedichtete Lochplatte geführt und lassen sich durch vertikale Verschiebung der Kontur des zu beschichtenden Werkstückes anpassen. Hierdurch kann man, wie in Abbildung 9-6 dargestellt ist, unterschiedliche Geometrien erzeugen.



**Abbildung 9-6: Erzeugte Anodengeometrien mittels eines Stiftemodells**

Kontaktiert werden die Stifte über zwei an der Verfahrensaußenseite befindliche Kupferplatten, zwischen denen sich ein mäanderförmig verlegtes 3 mm breites Kupferband befindet. Der so erzeugte Reibkontakt ermöglicht ein vertikales Verschieben der einzelnen Anodenstifte.

Die Einstellung der Stifte kann am einfachsten mittels einer CNC-Maschine erfolgen. Der Prozessablauf der Formgenerierung ist in Abbildung 9-7 schematisch dargestellt:



**Abbildung 9-7: Gesamtprozessablauf zur Erzeugung einer Anodengeometrie**

Das Einstellen der Anodensegmente mit Hilfe eines herkömmlichen CNC-Bearbeitungszentrums dauert pro Segment zwischen 1,5 und 2 Sekunden (siehe Abbildung 9-8). Bei einer Positioniergeschwindigkeit von 1000 [mm/min], einer Zustellgeschwindigkeit von 300 [mm/min] und einer Rückstellgeschwindigkeit von 1000 [mm/min] kann man das hier verwendete Anodensystem mit seinen insgesamt 850 Stiften bei einer durchschnittlichen vertikalen Zustellung der einzelnen Stifte von 8 mm in weniger als 28 Minuten auf eine entsprechende Formgeometrie einstellen.



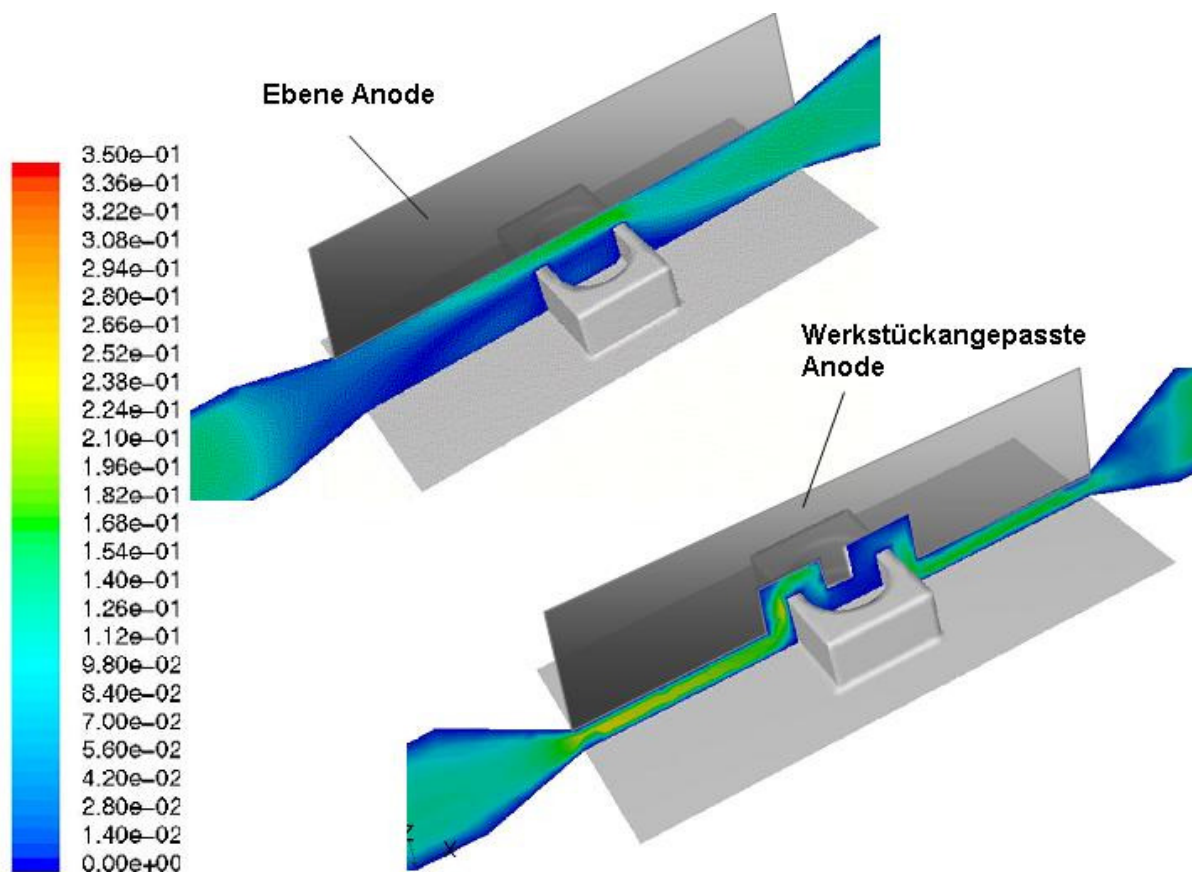
**Abbildung 9-8: Automatisierte Segmentzustellung mit Hilfe eines CNC-Bearbeitungszentrums**

Mit diesem Anodensystem wurden im Folgenden Beschichtungsversuche durchgeführt, um seine Wirksamkeit gegenüber einer ebenen Anodengeometrie aufzuzeigen. Die Arretierung der Stifte nach dem Zustellvorgang erfolgt durch einen Klemmmechanismus. Gelochte Polymerplatten werden durch Anziehen von Schrauben im Verfahrensraumdeckel verdichtet. Dies bewirkt eine Presspassung zwischen Stift und Polymereinlage und dichtet das Innere des Verfahrensraums zudem noch gegen die Umgebung ab.

## 9.5.2 Beschichtung mit formangepasster und ebener Anodengeometrie

Um den Einfluss einer der Werkzeuggeometrie angepassten Anode zu demonstrieren, wurde ein lasergesintertes Werkstück sowohl mit einer entsprechend seiner Oberflächenform angepassten, als auch mit einer ebenen Anode beschichtet.

Die Ermittlung der Position der einzelnen Anodenstifte erfolgte mittels Simulation der lokalen Strömungsverhältnisse und Potentialverläufe (vgl. Abbildung 9-7). Die Simulationsergebnisse der relevanten Prozessparameter (E-Feld und hydrodynamische Strömung) sind für beide Fälle in Abbildung 9-9 und Abbildung 9-11 dargestellt.

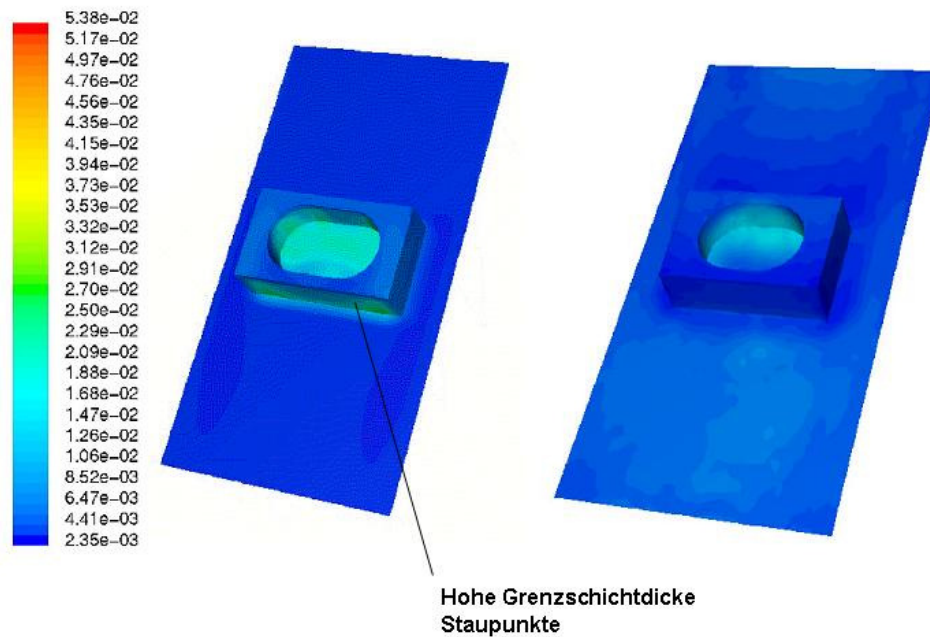


**Abbildung 9-9: Strömungsfeld einer ebenen Anode und einer werkstückangepassten Anode**

Die verbesserte Verkleinerung des Spaltmaßes bzw. des Strömungsquerschnitts zwischen Anode und Werkstück bei der Verwendung einer werkzeugangepassten Anode führt zu einer Erhöhung der Kernströmung. Die Strömungsgeschwindigkeiten

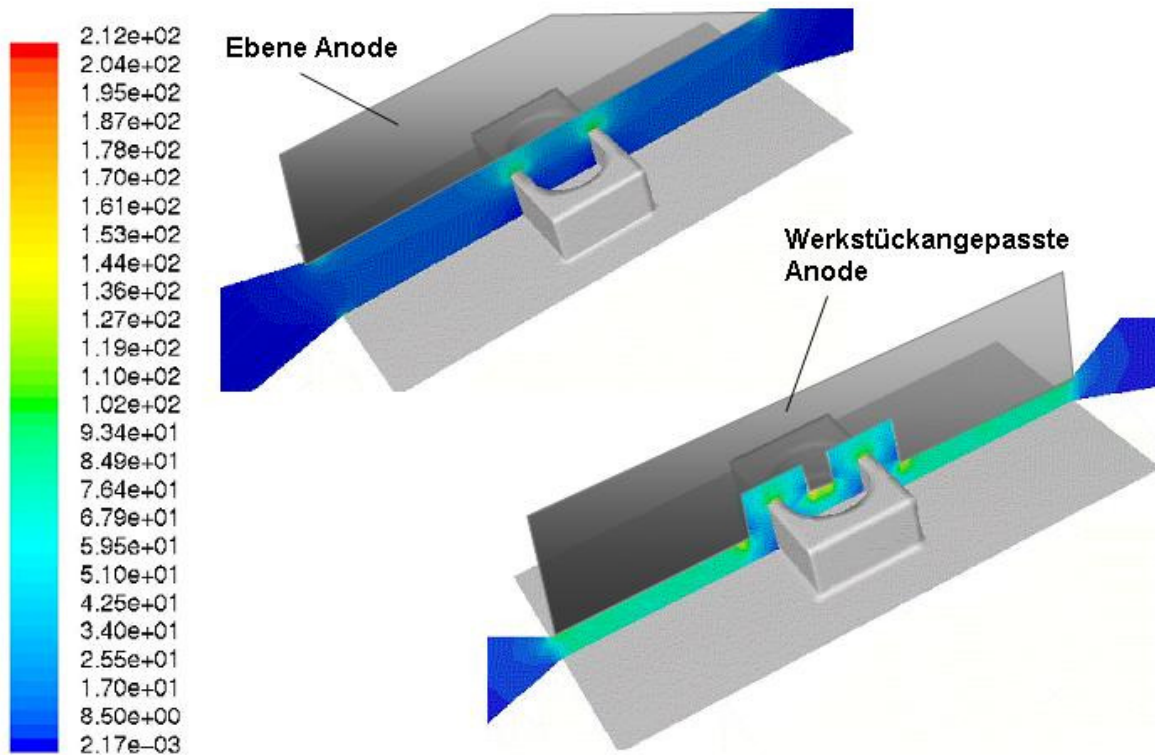


erhöhen sich im ebenen Bereich von 0,02 auf bis zu 0,2 m/s. Die hieraus resultierende generelle Abnahme der Grenzschichtdicke und deutliche Homogenisierung der Grenzschichtdickeverteilung über der gesamten Bauteiloberfläche ist in Abbildung 9-10 sehr gut erkennbar. Die Dicke der Strömungsgrenzschicht im Bereich der abgewandten Seite der Werkstückkerbung konnten verhindert und somit die damit verbundene Gefahr des lokalen Dendritenwachstums verringert werden.



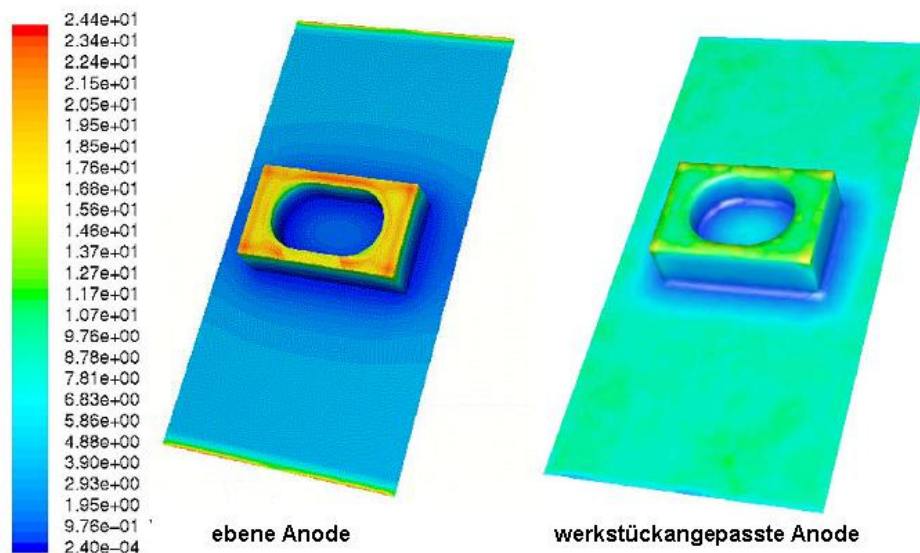
**Abbildung 9-10: Resultierende viskose Unterschicht auf der Bauteiloberfläche (links mit ebener Anode und rechts mit werkstückangepasster Anode)**

Ebenso verhält es sich beim Vergleich der in Abbildung 9-11 dargestellten E-Felder. Die Feldstärke konnte gerade im ebenen Bereich von 0,2 V/m auf ca. 7 V/m gesteigert werden.



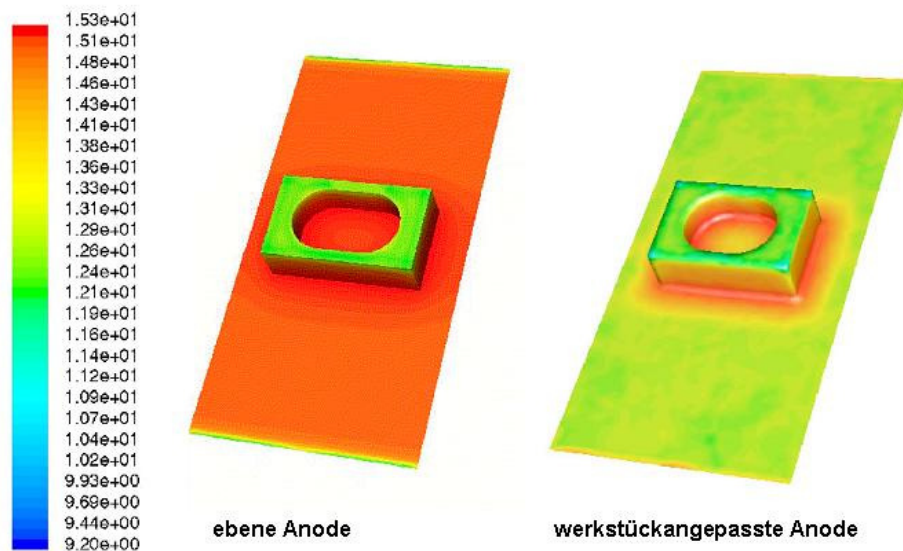
**Abbildung 9-11: E-Feld einer ebenen Anode und einer werkstückangepassten Anode**

Aus den Berechnungen des E-Feldes lasen sich die auf der Bauteiloberfläche herrschende lokale Stromdichteverteilung (Abbildung 9-12) und der Phosphorgehalt (Abbildung 9-13) ableiten.



**Abbildung 9-12: Vergleich der resultierenden Stromdichteverteilung auf der Bauteiloberfläche**

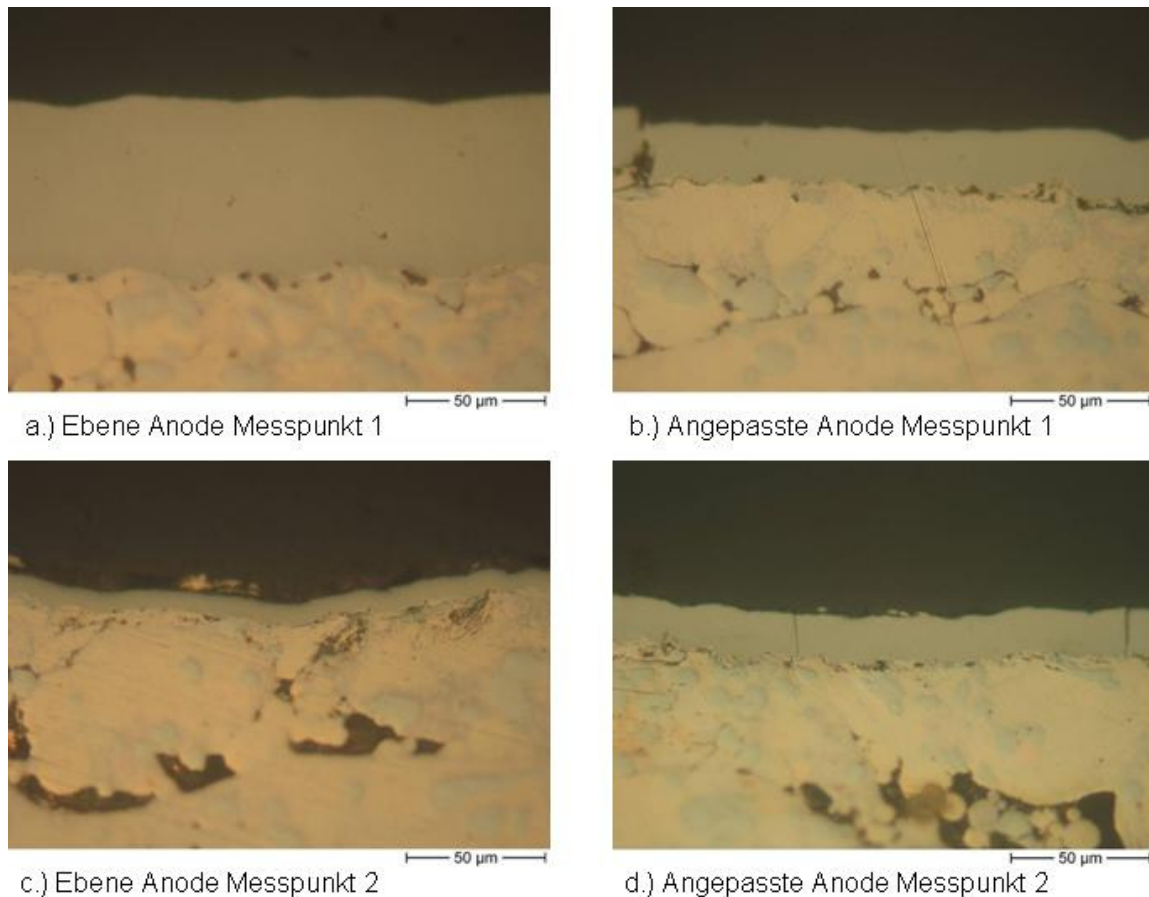
Wie aus der Betrachtung der elektrischen Felder und Potentialfelder ersichtlich, verändert sich die Stromdichteverteilung auf der Werkstückteilerfläche bei der Verwendung der Formanode. Gerade in den erhöhten Bereichen der Werkstückerhebung können entsprechend von durchschnittlich 20 A/dm<sup>2</sup> auf 12 A/dm<sup>2</sup> gesenkt werden. Dieses ändert auch den Phosphorgehalt. In Abbildung 9-13 ist eine wesentliche Homogenisierung über alle Bereiche des Werkstücks zu erkennen.



**Abbildung 9-13: Vergleich des resultierenden Phosphorgehaltes auf der Bauteiloberfläche**

Die Wirkungsweise der werkzeugangepassten Anode ist bei der Gegenüberstellung der relevanten Prozessparameter somit deutlich zu erkennen. Der Vergleich zeigt unterschiedliche Strömungs- und E-Feldverläufe, wobei die inhomogeneren Feldbedingungen bei der ebenen Anode ein schlechteres Beschichtungsergebnis erwarten lassen. Diese Vermutung wurde durch reale Beschichtung bestätigt (Abbildung 9-14).



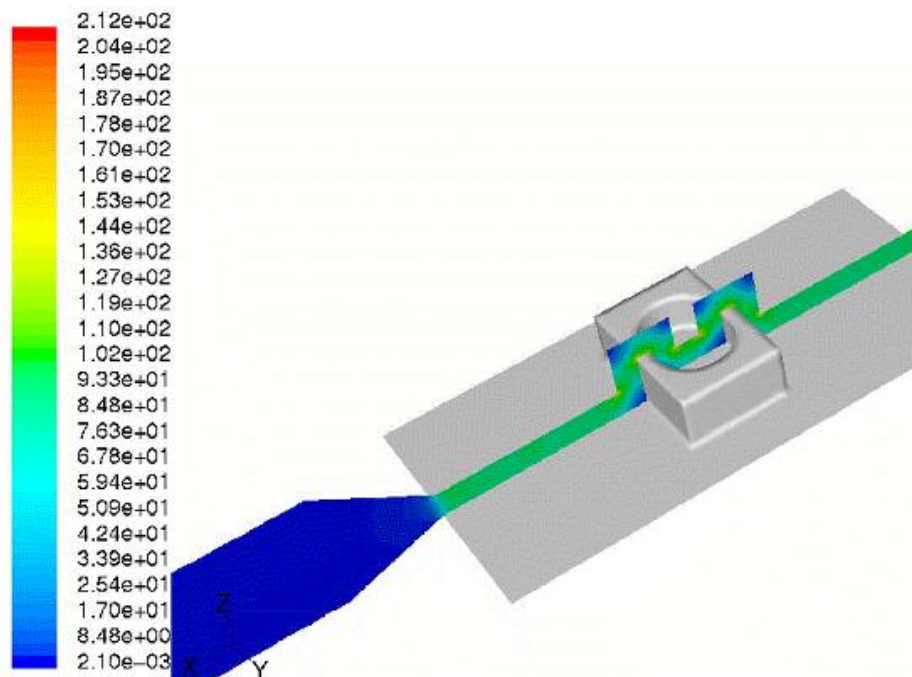


**Abbildung 9-14: Gegenüberstellung beider Beschichtungsergebnisse mittels Schliffbild**

Das Beschichtungsergebnis der werkstückangepassten Anode ist also wesentlich homogener hinsichtlich der lokal abgeschiedenen Schichtdicke. So konnten die lokalen Überbeschichtungen auf der Werkstückerhebung (Messpunkt 1) um über 50% gegenüber der ebenen Anode gesenkt werden. Sogar im ebenen Bereich (Messpunkt 2) des Werkstückes war die Beschichtung um fast 100% besser gegenüber der nicht angepassten Anode. Dieses Ergebnis ist auch nicht weiter verwunderlich, denn nur mit einer formangepassten Anode lassen sich annähernd gleiche lokale Strömungs- und E-Feldbedingungen auf der Werkstückoberfläche erzeugen. Dieser Zusammenhang wurde bereits in Kapitel 1 und 1 ausführlich diskutiert und findet auch in diesen realen Beschichtungen seine Bestätigung.

Durch Reduzierung des Spaltmaßes unter die im Beispiel verwendeten 5 mm und einer noch feineren Segmentierung der Anodenfläche ließe sich eine noch homogene Schichtverteilung erzeugen. Des weiterem könnte man durch eine Platinierung der gesamten Segmentoberfläche in Bereichen ein noch homogeneres

E-Feld erzeugen (siehe Abbildung 9-15), das ebenfalls positive Auswirkungen auf das Beschichtungsergebnis hätte.



**Abbildung 9-15: E-Feld einer werkstückangepassten Anode mit platinierter Seitenwand**

Die Ergebnisse zeigen, dass mit dem Prinzip der flexiblen werkstückangepassten Anode ein wesentlicher Beitrag zur Verbesserung des Beschichtungsergebnisses geleistet wird.

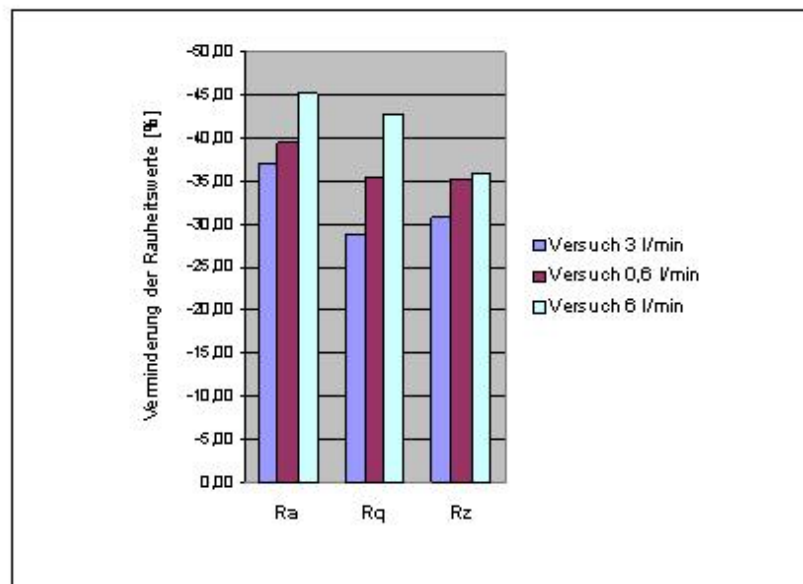
## 9.6 Mögliche Optimierungspotentiale durch eine gezielte elektrochemische Beschichtung im Rapid Tooling

Die Optimierungspotentiale bei der gezielten elektrochemischen Beschichtung von generativ erzeugten Formen und Werkzeugen liegen neben der Erhöhung des Korrosions- und Verschleißschutzes auch in dem möglichen Verzicht auf Nachbearbeitung oder zumindest ihrer Verringerung. Dieses setzt jedoch eine durchgängige digital vernetzte Prozesskette aller Teilprozesse voraus. So könnten beispielsweise Erkenntnisse aus den simulierten Beschichtungsergebnissen zurückgeführt und im vorgelagerten Formgebungsprozess berücksichtigt werden. Diese Vorgehensweise ermöglichte es, wichtige Teilprozesse der Kette exakt

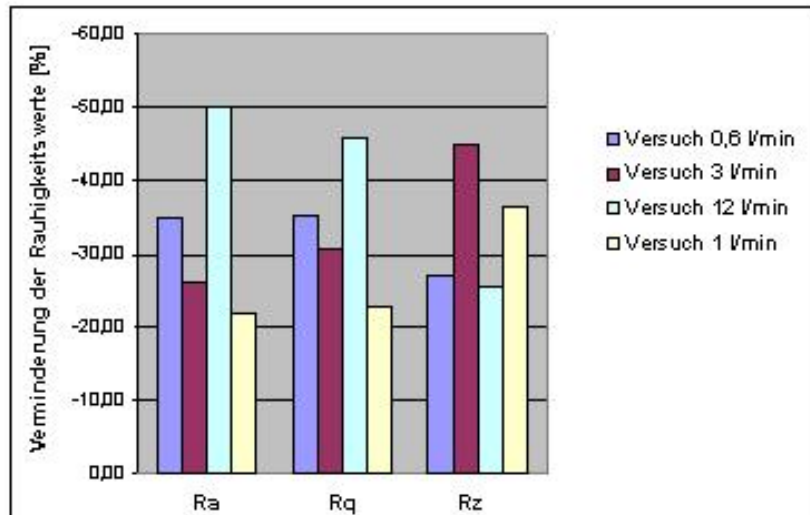
aufeinander abzustimmen, um ein qualitatives und wirtschaftliches Optimum zu erreichen. Dazu werden im Folgenden einige Beispiele aufgezeigt.

### 9.6.1 Einebnung der Mikrorauigkeit durch elektrochemische Beschichtung von lasergesinterten und gefrästen Oberflächen

Durch das Aufbringen einer Nickel-Phosphor-Schicht konnten die Rauheitswerte der Probenoberflächen durchschnittlich um bis zu 1/3 gemindert werden. Sowohl bei lasergesinterten Proben (siehe Abbildung 9-16) als auch gefrästen Stahlproben (siehe Abbildung 9-17) konnte dieser Effekt bei verschiedensten Prozessbedingungen nachgewiesen werden.

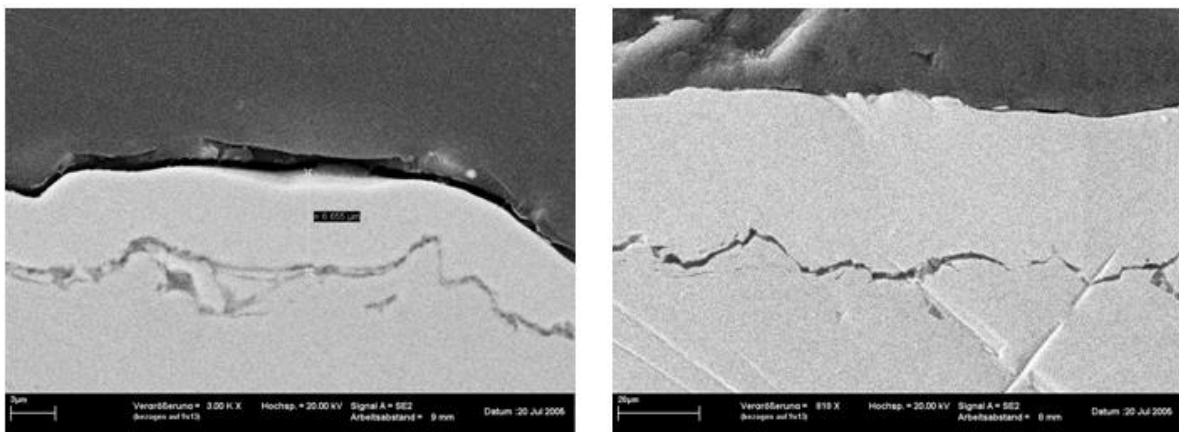


**Abbildung 9-16: Verminderung der Rauheitswerte von lasergesinterten Oberflächen durch Beschichtung**



**Abbildung 9-17: Verminderung der Rauheitswerte von gefrästen Oberflächen durch Beschichtung**

Gerade bei den lasergesinterten Oberflächen kann durch aufbringen einer Nickelphosphorschicht eine erhebliche Einebnung aller Rauheitswerte (Ra, Rz und Rq) festgestellt werden. Dieser ist ebenso bei verschiedenen Schichtdicken auf den folgenden Schliiffbildern gut zu erkennen.



**Abbildung 9-18: Einebnungseffekte durch elektrochemische Beschichtung von lasergesinterten Oberflächen**

Denkbar ist es, durch entsprechende Beschichtung nicht nur die Standzeit des Werkzeuges zu erhöhen, sondern zusätzlich teilweise oder vollständige Kompensierungen unerwünschter Rauigkeiten an einem lasergesinterten Werkstück zu erzeugen, um so die Nacharbeit auf ein Minimum zu reduzieren.

## 9.6.2 Standzeiterhöhung der beschichteten Formteile

Der derzeitige große Unterschied zwischen lasergesinterten Prototypwerkzeugen und Serienwerkzeugen ist die Standzeit bzw. die maximale Stückzahl, die mit dem Prototypenwerkzeug hergestellt werden kann. Diese ist dann erreicht, wenn die geometrischen Eigenschaften nicht mehr den gestellten Anforderungen gerecht werden. [Denkena 2003b] Typische Prototypingprojekte benötigen Stückzahlen von 50-1500. [Shellabear 2000]

Durch das Aufbringen von verschleißfesten Schichten, wie z.B. Nickel-Phosphor oder einer entsprechenden Mehrlagenschicht (TiN auf einer Ni-Grundsicht) auf generativ gefertigte Werkzeuge ist eine erhebliche Standzeiterhöhung möglich. [Dolinsek 2004] Dadurch könnte der Einsatzbereich generativ gefertigter Werkzeuge erweitert und die Ausbringungszahl der damit hergestellten Teile in die geforderten Größenordnungen von Kleinst- und Kleinserien gesteigert werden. Ein Beispiel aus dem Bereich der Herstellung von kostengünstigen Umformwerkzeugen zeigt dieses. So konnten mit einem Werkzeugsatz über 100.000 Bleche umgeformt werden, der aus einem Gießharzkern besteht und mit einer elektrochemisch hergestellten Nickellegierungsschicht überzogen wurde. [Behrens 2005]

## 10 Prozesskettensteuerung durch vernetzte digitale Teilprozesssimulation in der industriellen Teilefertigung

Die durchgängige Simulation aller in der Prozesskette für ein bestimmtes Qualitätsmerkmal entscheidenden technischen Prozesse ermöglicht es, im Voraus die Solldaten innerhalb der Kette bezüglich dieses Merkmales zu optimieren. [Westkämper 2002b] Betrachtet man beispielsweise die Geometrie des zu fertigenden Bauteils als ein solches Qualitätsmerkmal, so können, ausgehend von den Solldaten des Werkstückes alle vorhersagbaren Toleranzabweichungen der formgebenden Teilprozesse als Eingangsdaten der in der Linie befindlichen vorgelagerten Prozesse (siehe Abbildung 10-1) entsprechend in den Eingangsdaten berücksichtigt werden. [Westkämper 2004b]

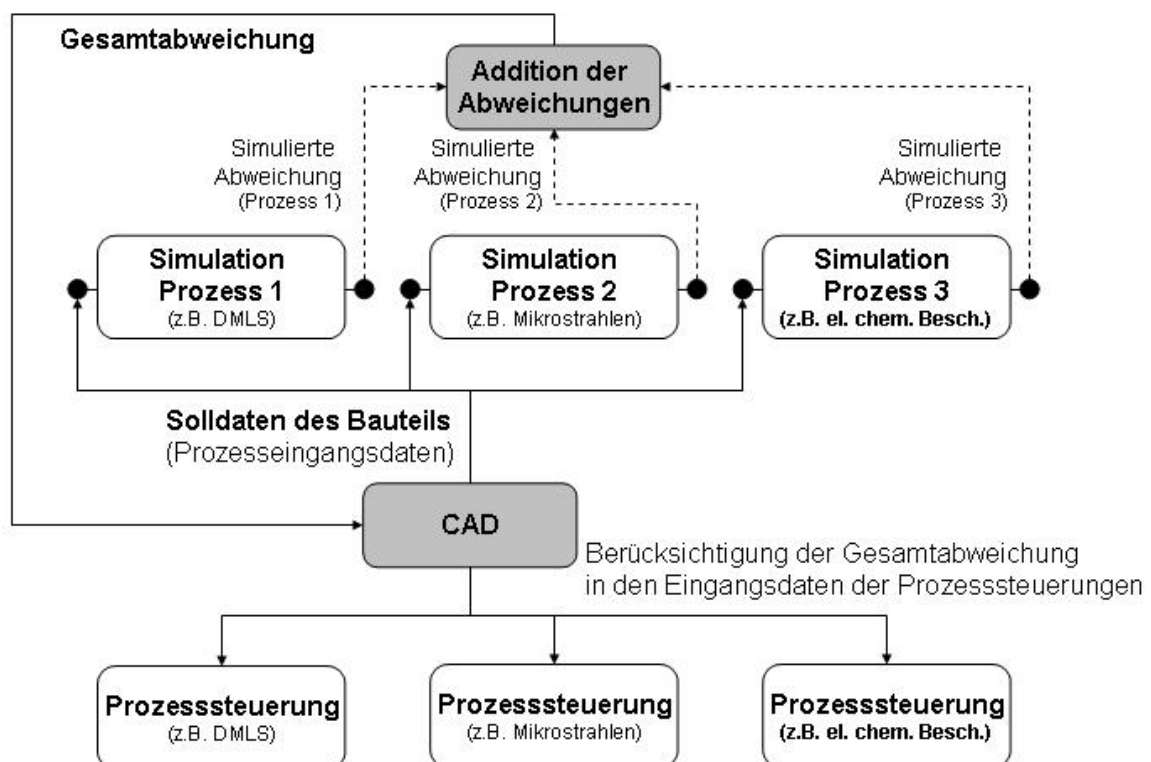
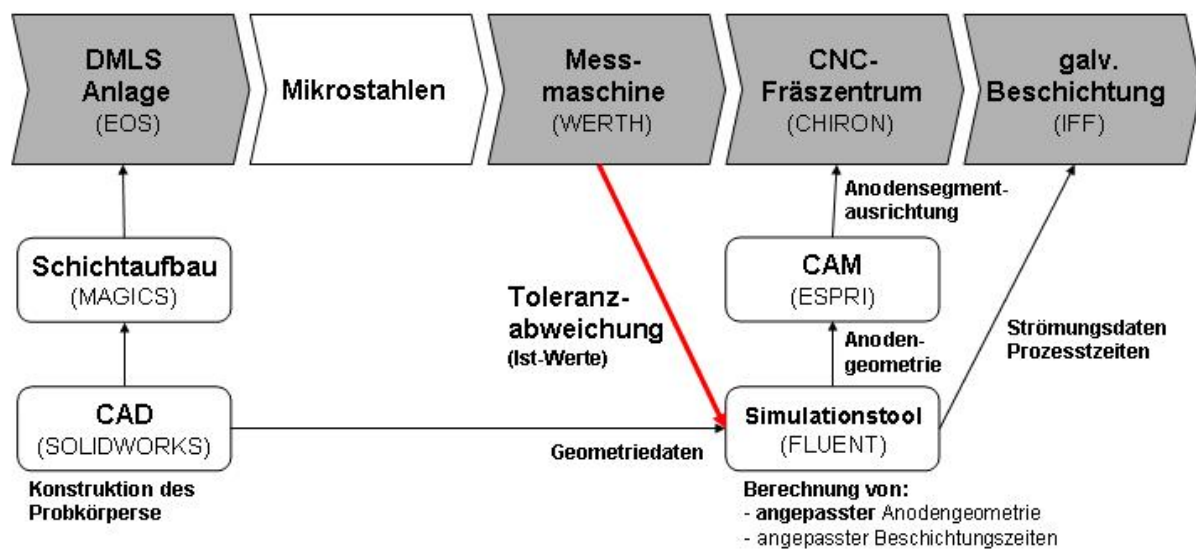


Abbildung 10-1: Abgleich der Solldaten innerhalb einer Prozesskette

Beispielsweise ist man so in der Lage, die beim elektrochemischen Beschichtungsprozess entstehenden lokalen Schichtdickenunterschiede mittels

Simulation vorherzusagen und diese bei den Solldaten der vorgelagerten konturgebenden Fertigungsverfahren zu berücksichtigen. Diese Kompensation vorhersagbarer Geometrieabweichungen in der Prozesskette bewirkt eine Minimierung der Nacharbeitszeiten und ermöglicht eine optimale wirtschaftliche Auslegung der gesamten Kette. Neben der Voraboptimierung der Eingangsdaten ist es ebenso denkbar, die Ist-Daten der betrachteten Qualitätsmerkmale nach jedem Fertigungsschritt (z.B. die entstandenen Toleranzabweichungen) in der Prozessführung der nachgelagerten Teilprozesse zu berücksichtigen. So könnten, wie anhand des in Abbildung 10-2 dargestellten Beispiels, durch partielle Überbeschichtung auftretende Untermaße aus der Konturgebung ausgeglichen werden. [Westkämper 1996]

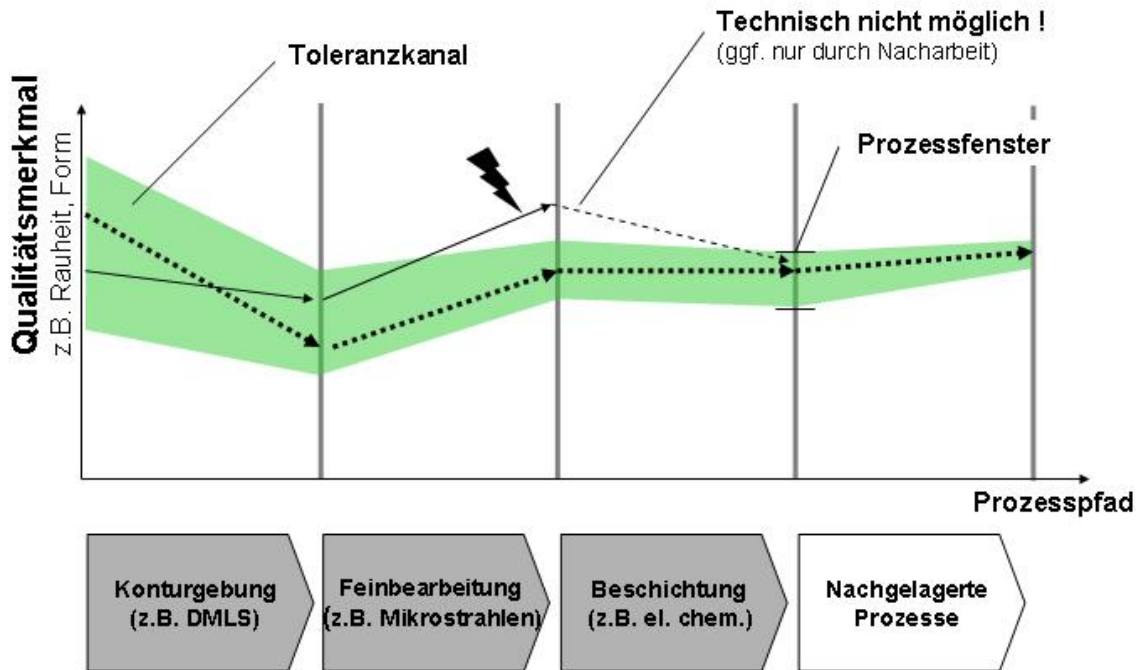


**Abbildung 10-2: Kompensation entstehender Toleranzabweichungen in der Prozesskette**

Ausgehend von den CAD-Daten wird das Bauteil mittels Lasersinterverfahren generativ aufgebaut und anschließend mikrogestrahlt. Die hier entstehenden geometrischen Abweichungen (Toleranzen) werden mittels optischer oder taktiler Koordinatenermittlung erfasst und an Simulationstool des Folgeprozesses (der elektrochemische Beschichtung) übermittelt. Diese Ist-Wertabweichung wird bei der Ermittlung und Festlegung der optimalen Prozessparameter (Beschichtungszeit, Strömungszustand und Anodengeometrie) berücksichtigt. Dieses mögliche Vorgehen setzt aber den Einsatz flexibler Fertigungstechnologien und der exakten Vorsimulation des Prozessverhaltens voraus. Nur wenn die nachgelagerten



Prozesse in entsprechenden Prozessfenstern fertigen können, ist es möglich, aufgetretene Fehler des Vorprozesses durch Anpassen der Prozessparameter (z.B. Beschichtungszeit, Anodengeometrie, etc.) entsprechend zu kompensieren. Dies kann im Prozesspfad graphisch dargestellt werden (siehe Abbildung 10-3).



**Abbildung 10-3: Graphische Darstellung eines Prozesspfades**

Nur wenn sich die entstandenen Toleranzabweichungen eines Prozesses noch innerhalb des Toleranzkanals befinden, ist eine Korrektur durch die geplanten nachfolgenden Prozesse möglich. Liegt das Prozessergebnis außerhalb des Bereiches muss der geplante Fertigungsprozess abgebrochen werden. Eine frühzeitige Erkennung dieses Zustandes verhindert, dass das Bauteil weitere Wertschöpfungsprozesse durchläuft. [Westkämper 2002c] Nur durch außerplanmäßige Nacharbeit kann ggf. der Fehler behoben werden und das Ausschussbauteil wieder in die Prozesskette eingelastet werden.



## 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-Feldausprägung einen wesentlichen Einfluss 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 preisgünstig beseitigen. Sowohl das vorgestellte Simulationsmodell zur elektrochemischen Beschichtung als auch das Konzept eines flexiblen 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.

## 13 Literaturverzeichnis

Abele 2004 Abele, E.; Fiedler, U.:

Technologien im Vergleich - Die Konkurrenz schläft nicht -. In: Form + Werkzeug, 2 (2004), S. 48-50

Atkins 2002 Atkins, P.W.; De Paula, J.:

Physical chemistry. 7. Aufl., New York: W.H. Freeman, 2002

Aulbur 2004 Aulbur, R.; Freyer, C.:

Schichtweise zur endgültigen Geometrie. In: VDI-Z Integrierte Produktion, 11 (2004), Nr. 3, S. 24-25

Bargel 2005 Bargel, H.-J.; Schulze, G.:

Werkstoffkunde. 9. Aufl., Berlin: Springer, 2005

Baumgärtner 2004 Baumgärtner, M.:

Galvanisiergerechtes Konstruieren. In: A. Zielonka and H.A. Jehn (Hrsg.): Galvanische Schichten. Renningen-Malmsheim: expert verlag, 2004, S. 273

Becher 1995 Becher, U.:

Untersuchungen zur teilautomatisierten Abscheidung von Nickel-Phosphor-Legierungen in Mikrostrukturen, 1995 TU Ilmenau, Fak. Maschinenbau, Diss. 1995

Behrens 2005 Behrens, B.M., S. Deiler, G.:

Kostengünstige Tiefziehwerkzeuge für mittlere Serien. In: VDI-Z Integrierte Produktion, 5 (2005), S. 24-27

Bingel 2003 Schutzrecht DE 101 32 408 C2 (2003). Bingel, U.; Gerth, C.

Bolch 1998 Bolch, T.; Holeczek, H.; Metzner, M.:

Structured Chromium Layers - Process Technology & Applications. In: SUR/FIN '98, Orlando, Florida, 1998, S. 203-213

- Brenner 1963 Brenner, A.:  
Elektrodeposition of Alloys: Prinzipals und Practice, 2. Elektodeposition of Alloys containing Phosphorous and Nickel or Cobalt, New York, 1963
- Bronstein 2000 Bronstein, I.N.; u.a.:  
Taschenbuch der Mathematik. 5. Aufl., Frankfurt am Main: Verlag Harri Deutsch, 2000
- Bullinger 2003 Bullinger, H.-J.; Warnecke, H.J.; Westkämper, E.:  
Neue Organisationsformen in Unternehmen: Ein Handbuch für das modernen Management. 2. Aufl., Berlin: Springer, 2003
- Deconinck 2002 Deconinck, J.v.d.B., B.:  
Virtual Electrochemical Reaktors. In: Modelling of electrochemical cells and processes, 10 - 11 October 2002, Schwäbisch Gmünd. European Academy of Surface Science, 2002
- Denkena 2003a Denkena, B.; Lütjens, G.; Böß, V.:  
Feinbearbeitung von Werkzeugen und Formen: Automatisches Schleifen und Bandschleifen von Freiformflächen im Praxistest. In: wt Werkstattstechnik online (2003a), Nr. 11, S. 729-734
- Denkena 2003b Denkena, B.L., G.:  
Feinbearbeitung von Werkzeugen und Formen. In: wt Werkstattstechnik online, 93 (2003b), Nr. H. 11, S. 729-734
- Dettner 1989 Dettner, H.W.:  
Lexikon für Metalloberflächen-Veredlung, Saugau/Württ.: Eugen G. Leuze Verlag, 1989
- DIN 50323 Norm DIN 50323 1988: Tribologie: Begriffe
- DIN 50321 Norm DIN 50321 1979: Verschleiß-Meßgrößen
- DIN 55928 Norm DIN 55928 1980: Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungen und Überzüge: Beschichtungsstoffe und Schutzsysteme (Teil 5)

DIN 50957 Norm DIN 50957 1978: Galvanisierungsprüfung mit der Hull-Zelle

DIN 50320 Norm DIN 50320 1979: Verschleiß: Begriffe: Systemanalyse von Verschleißvorgängen: Gliederung des Verschleißgebietes

Dolinsek 2004 Dolinsek, S.P., P.:

Applications of different coatings for improvement the characteristics of DMLS Tools. In: EOS International User Meeting 2004, München. EOS GmbH, 2004

Dusel 2000 Dusel, K.-H.:

Rapid Tooling: Spritzgießen mit Prototyp Werkzeugen und der Einfluss auf die Bauteileigenschaften. Stuttgart: I.f.K.u. Kunststoffkunde, 2000 Universität Stuttgart, Maschinenbau, Diss. 2000

Engel 2001 Engel, H.; Szulczynski, H.; Zettier, R.:

Simulation von Fertigungsprozessen. In: Futur: Vision und Innovation. Mitteilungen aus dem Produktionstechnischen Zentrum (PTZ), 3 (2001), Nr. 1, S. 18-19

EOS 2004 EOS:

DirectMetal und DirektSteel Werkstoffe für EOSINT M250 Xtendent. In: Materialdatenblatt (2004)

Eulenstein 2002 Eulenstein, T.; Schmidt, S.:

Oberflächen- und Schichttechnologien für Spritzgießwerkzeuge. In: VDI (Hrsg.): Spritzgießen 2002. Düsseldorf: VDI- Gesellschaft Kunststofftechnik, 2002, S. 93-107

Eversheim 2005 Eversheim, W.S., G.:

Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung, Berlin: Springer, 2005

Gaßner 2005 Gaßner, F.:

Elektrolytisch abgeschiedene Nickel-Phosphor-Legierungen. In: Galvanotechnik, 4 (2005), S. 818-822

Gastrow 1998 Gastrow, H.:

Der Spritzgießwerkzeugbau in 130 Beispielen. 5. Aufl., München: Hanser, 1998

- Giro 2004 Giro, F.; Saumer, M.; Weber, L.:  
Galvanisch abgeschiedene Nickel-Phosphor-Schichten für den mikrotechnischen Formenbau mittels Ultrapräzisionszerspanung. In: Galvanotechnik, 7 (2004), S. 1748-1751
- Gissler 1992 Gissler, W.J., H.A.:  
Advanced Techniques for Surface Engineering. 1. Aufl., Berlin: Springer, 1992
- Grimm 2002 Grimm, T.W., T.:  
Timing Isn't Everything, But Almost. In: Time Compression Technologies, 5 (2002), Nr. 5/2002
- Grundmann 2003 Grundmann, G.; Eulenstein, T.; Blau, W.:  
Kostensenkung in der Ur- und Umformtechnik durch Oberflächenengineering für Formen und Werkzeuge. In: Technologietransfer zu Ur- und Umformwerkzeugen (2003), Nr. 03-1, S. 2-7
- Grundmann 2002 Grundmann, G.B., W.:  
Modellrechnungen anhand von Fallbeispielen, Düsseldorf: VDI-TZ, 2002
- Hamann 1998 Hamann, C.H.; Vielstich, W.:  
Elektrochemie. 3. Aufl., Weinheim: Wiley-VCH, 1998
- Heinen 2002 Heinen, S.:  
Mit dünnen Schichten gegen dicke Probleme: Die richtige Beschichtung schützt vor Anhaftung und Verschleiß bei der Bearbeitung von Verbundwerkstoffen. In: Form + Werkzeug (2002), Nr. 5, S. 69-70
- Holze 1998 Holze, R.:  
Leitfaden der Elektrochemie, Stuttgart: Teubner, 1998
- Horvitz 1953 Horvitz, G.J.:  
Metalls Programm, 1953
- Jehn 2004 Jehn, H.A.:  
Alternative Beschichtungsverfahren (CVD, PVD) - Konkurrenz oder Ergänzung. In: Galvanische Schichten. Renningen: Expert Verlag, 2004, S. 196 - 223



- K. Cuhls 2002 K. Cuhls, K.B., H. Grupp:  
 Innovations for our Future: Delphi '98. New Foresight on Science and  
 Technology, Heidelberg: Physica-Verlag, 2002
- Kahlert 2004 Kahlert, J.:  
 Simulation technischer Systeme, Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2004
- Kanani 2000 Kanani, N.:  
 Galvanotechnik, München Wien: Carl Hansa Verlag, 2000
- Kanani 2001 Kanani, N.:  
 Galvanotechnik - Neue Entwicklungen und Perspektiven. In: Congress  
 Industrielle Oberflächentechnik, 7. und 8. Februar 2001, Braunschweig. Neue  
 Materialien Niedersachsen, 2001
- Klocke 2002 Klocke, F.; Bilsing, A.:  
 Technologisches Benchmarking im Werkzeug- und Formenbau. In: wt  
 Werkstattstechnik online, 11 (2002), S. 595-599
- Kubber 2002 Kubber, D.d.:  
 industrial microsystem plating. In: Modelling of electrochemical cells and  
 processes, 10 - 11 October 2002, Schwäbisch Gmünd. European Academy of  
 Surface Science, 2002
- Kurowiki 2003 Kurowiki, A.:  
 Elektrochemische und oberflächenanalytische Untersuchungen zur  
 galvanischen und chemischen Nickel-Phosphor Schichtbildung, 2003  
 Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, Fak. Mathematik, Diss. 2003
- Landau 2004 Landau, U.M., E.:  
 The L-Cell- A novel Device for Plating Process Characterization. In:  
 AESF/SURFIN 2004, Chicago, 2004
- Landau 2002 Landau, U.M., E.; Chivilikhin, S.:  
 Computer-Based Simulations Providing Unintuitive and Elusive Electrochemical  
 Data. In: Modelling of electrochemical cells and processes, 10 - 11 October  
 2002, Schwäbisch Gmünd. European Academy of Surface Science, 2002

Lange 1984 Lange, K.:

Umformtechnik. 2. Aufl., Berlin: Springer, 1984

Lenz 2004 Lenz, J.:

Laser-Sintern. Die Schlüsseltechnologie des e-Manufacturing. In: RTEjournal - Forum für Rapid Technologie (2004), Nr. 1(2004), S. I ISSN 1614-0923, URN urn:nbn:de:0009-2-141, URL:

<http://www.rtejournal.de/aktuell/archiv/ausgabe1/14/> [14.10.05]

LeVeque 2002 LeVeque, R.J.:

Finite Volume Methods for Hyperbolic Problems, Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2002

Linde 2005 Linde, D.R.:

CRC Handbook of Chemistry and Physics. 86th. Aufl., Boca Raton: CRC Press, 2005

Lindner 2002Lindner:

Vergleichende Analyse zur Seriennähe von Rapid Tooling-Prozessketten und spritzgegossenen Kunststoffprototypen. Aachen: V. Mainz, 2002 (IKV Bericht aus der Kunststoffverarbeitung, Band 123) RWTH Aachen, Maschinenbau, Diss. 2002

Lohner 2002 Lohner, A.:

Potentiale durch den Einsatz des Präzisions-Laser-Sinter-Verfahren im Produktentwicklungsprozess von Kunststoffteilen. In: Spritzgießen 2002. Düsseldorf: VDI- Gesellschaft Kunststofftechnik, 2002, S. 309-315

Möbius 2003 Möbius, A.; u.a.:

Integration der Schichttechnik in Fertigungsabläufe. In: Stuttgarter Impulse: Zukunft gestalten - Zeichen setzen, 13. bis 15. Oktober 2003, Stuttgart. Fertigungstechnisches Kolloquium, 2003, S. 308-338

Mohaupt 2005 Mohaupt, M.:

Oberflächentechnik Bericht zur Branche. In: IKB Information, mai (2005), S. 11

Monev 2005 Monev, M.Z., A.:

Elektrochemische Abscheidung von Gold/Kobalt-Multilayersystemen mit Hilfe der rotierenden Scheibenelektrode. In: Galvanotechnik, 5 (2005), S. 1068-1073

Müller 2003 Müller, K.-P.:

Praktische Oberflächentechnik. 4. Aufl., Wiesbaden: Vieweg, 2003

Oertel 1999 Oertel, H.:

Strömungsmechanik, Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg & Sohn Verlag, 1999

Pieverling 2003 Pieverling, J.:

Ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Konturverfertigungsverfahren für das Rapid Tooling. München: H.U. Verlag, 2003 (Forschungsberichte iwv 178) TU München, Fak. Maschinenbau, Diss. 2003

Popp 2003 Popp, U.; Neudecker, T.:

Standzeiterhöhung durch Oberflächenstrukturierung. In: wt Werkstattstechnik online, 93 (2003), Nr. 11, S. 776-779

Pricer 2002 Pricer, T.J.; Kushner, M.J.; Alkirec, R.C.:

Monte Carlo Simulation of the Electrodeposition of Copper: I. Additive-Free Acidic Sulfate Solution. In: Journal of The Electrochemical Society, 149 (2002), S. C396-C405

Reinhart 2004 Reinhart, G.:

Flexibilität und Wandlungsfähigkeit von Fabriken in globalen Wettbewerb. In: 5. Deutsche Fachkonferenz Fabrikplanung, 31. März / 1. April 2004, Stuttgart. Verlag Moderne Industrie, 2004, S. 4

Reinhart 1998 Reinhart, G.; Lorenzen, J.:

Technologien zur schnellen Herstellung von Prototypen und Vorserienwerkzeugen.

In: Tagungsband zum 3D Erfahrungsforum Werkzeug- und Formenbau, 26./27. Februar, Darmstadt, 1998

Scheibe 2004 Scheibe, A.:

Bestehende Fragestellungen und Ausblick auf zukünftige Entwicklungen. In: Simulation in der Lackiertechnik, 4. November 2004, Stuttgart. Fraunhofer IPA - Workshop, 2004

- Scheibe 1999      Scheibe, A.:  
 Teilchenbahnberechnung zur Simulation von elektrostatischen  
 Lackiervorgängen mit Hochrotationszerstäubern. Heimsheim: J.-J. Verlag,  
 1999 (IPA-IAO Forschung und Praxis 382) Stuttgart, Univ., Fak.  
 Maschinenbau, Diss. 1999
- Schlichting 1997      Schlichting, H.G., K.:  
 Grenzschicht-Theorie. 9. Aufl., Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag,  
 1997
- Schlichting 2000      Schlichting, H.G., K.:  
 Boundary layer theory. XXIII. Aufl., Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2000
- Schwab 2002      Schwab, A.J.:  
 Begriffswelt der Feldtheorie. 6. Aufl., Berlin: Springer-Verlag, 2002
- Shellabear 2000      Shellabear, M.J., V.:  
 Schnell und flexibel zur Kleinserie. In: Form+Werkzeug, 9 (2000), S. 58-60
- Stöcker 2004 Stöcker, H.:  
 Taschenbuch der Physik. 5. Aufl., Frankfurt am Main: Verlag Harri Deutsch,  
 2004
- Strauch 1987      Strauch, A.:  
 Galvanotechnisches Fachwissen, Leipzig: VEB Deutscher Verlag für  
 Grundstoffindustrie, 1987
- Strauch 1990      Strauch, A.:  
 Galvanotechnisches Fachwissen. 3. Aufl., Leipzig: VEB Deutscher Verlag für  
 Grundstoffindustrie, 1990
- SurTec 2004 SurTec:  
 Datenblatt für  $\mu$ Chem 510 Z, Zwingenberg, 2004
- Tannenberger 2002a      Tannenberger, H.:  
 Die Hullzelle mit rotierender Zylinderelektrode (RZH-Zelle). In:  
 Galvanotechnik, 3 (2002a), S. 938-943

- Tannenberger 2002b      Tannenberger, H.:  
 Die Anwendung der RZH-Zelle in der Praxis. In: Galvanotechnik, 4 (2002b), S. 938-943
- Trenker 2001      Trenker, D.:  
 Die Rapid Tooling Verfahrenskette. In: 8. Fachausschuss der Deutschen Keramischen Gesellschaft, 10. Mai 2001, Clausthal-Zellerfeld, 2001
- Turan 2002      Turan, H.C.:  
 Ein Anwendungsbeispiel zum Einsatz der Rapid Tolling Prozessketten "Die Fertigung von Einem Oldtimer-Ersatzteil". In: IMW-Institutsmitteilung (2002), Nr. 27, S. 1-4
- Unicore 2003      Unicore:  
 Elektrolyte zur galvanischen Abscheidung von Nickel-Phosphor-Legierungsschichten. In: Datenblatt (2003)
- Unruh 2001      Unruh, J.N.:  
 Tabellenbuch Galvanotechnik. 7. Aufl., Bad Saulgau: Eugen G. Leuze Verlag, 2001
- Vakhidow 1970      Vakhidow, R.S.P., V. I.; Starchenko A. A.:  
 Electrokhimiya, 6 (1970), S. 1720
- Vakhidow 1971      Vakhidow, R.S.P., V. I.; Starchenko A. A.; Baeshov, A. B.:  
 Effect of cathodic material on alternating potential oscilations during the elektrodepositin of NI-P-alloys. In: Izv. Vyssh. Ucheb. Zaved. Khim Khim. Thekhnol, 15 (1971), Nr. 7, S. 1050-1052
- Weber 2004      Weber, T.:  
 Neue Technologien in der Fahrzeugproduktion. In: Vorlesung: Technologien in den Prozessketten des Automobilbaus, Stuttgart. Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb, 2004
- Westkämper 2002a      Westkämper, E.:  
 Wandlungsfähigkeit der industriellen Produktion, München: TCW Transfer-Centrum GmbH, 2002a

Westkämper 2002b Westkämper, E.:

Fast Engineering - Gewinn an Zeit und Effizienz. In: Westkämper, Engelbert (Leitung); VDI Nachrichten / Konferenzen: Fast Engineering: Entwicklungs- und Anlaufzeitverkürzung für industrielle Produkte. 23./24. Oktober 2002, Augsburg. Düsseldorf, 2002, o. Z., Augsburg, 2002b

Westkämper 1996 Westkämper, E.:

Null-Fehler-Produktion in Prozeßketten: Maßnahmen zur Fehlervermeidung und -kompensation, Berlin: Springer, 1996

Westkämper 2004a Westkämper, E.; Gerth, C.:

Oberflächentechnik als integrativer Teil der Prozesskette. In: 26. Ulmer Gespräche. Bad Saulgau: Eugen G. Leuze Verlag, 2004a, S. 96-101

Westkämper 2004b Westkämper, E.; Gerth, C.:

Integration von Feinbearbeitung und Beschichtung. In: Moderne Schleiftechnologie und Feinstbearbeitung. 2004b, S. 1.1-1.10

Westkämper 2002c Westkämper, E.; Gottwald, B.; Gerth, C.:

Multi-Scaling Modeling and Simulation of Manufacturing Systems. In: Proceedings of the 4th International Workshop on Emergent Synthesis - IWES'02 (2002), May 9-10, Kobe University, Japan., 2002c, S. 109-114

Westkämper 2004c Westkämper, E.; Warnecke, H.-J.:

Einführung in die Fertigungstechnik. 6. Aufl., Stuttgart u.a.: B. G. Teubner, 2004c

Wildemann 2002 Wildemann, H.:

Leitfaden zur Verkürzung der Hochlaufzeit und Optimierung der An- und Auslaufphase von Produkten, München: TCW Transfer-Centrum GmbH, 2002

Wingenfeld 2004 Wingenfeld, P.:

Selektive Hochgeschingigkeitsabscheidung von Edelmetallen auf Bandanlagen (Teil 3). In: Galvanotechnik, 1 (2004), S. 72-78

Winkler 2004 Winkler, F.; Guttman, M.:

Galvanisch-Nickel-Phosphor - eine Alternative zur stromlosen Beschichtung von Bauteilen oder Material für die Mikrosystemtechnik. In: Galvanotechnik, 9 (2004), S. 2260-2274

Witt 2002a Witt, G.B., T.:

Vom Metallpulver zum Gesenk/Bauteil. In: 2. Forum Rapid Prototyping & Tooling 2002. VDI-Bericht-Nr. 1686 Düsseldorf, 2002a

Witt 2002b Witt, G.B., T.; Sauer, A.; Taube, V.:

Lasersintering of die casting moulds for prototypes

and short-runs for plastics industry.

In: Euro-u Rapid 2002: International User's Conference on Rapid Prototyping & Rapid Tooling & Rapid Manufacturing, December 2-3 2002, Frankfurt/Main. Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung / Fraunhofer-Allianz, 2002b

Wolfhard 1980 Wolfhard, D.:

Schichtdickenverteilung auf galvanisierten Paßteilen am Beispiel kleiner abgesetzter Wellen und Bohrungen, Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 1980

Zeller 1988 Zeller, R.L.L., U.:

Electrodeposition of Nickel-Phosphorus amorphous alloys - modeling and experimental verification. In: Proc.-Electrochem., Soc.88-1 (1988)

Zierep 1997 Zierep, J.:

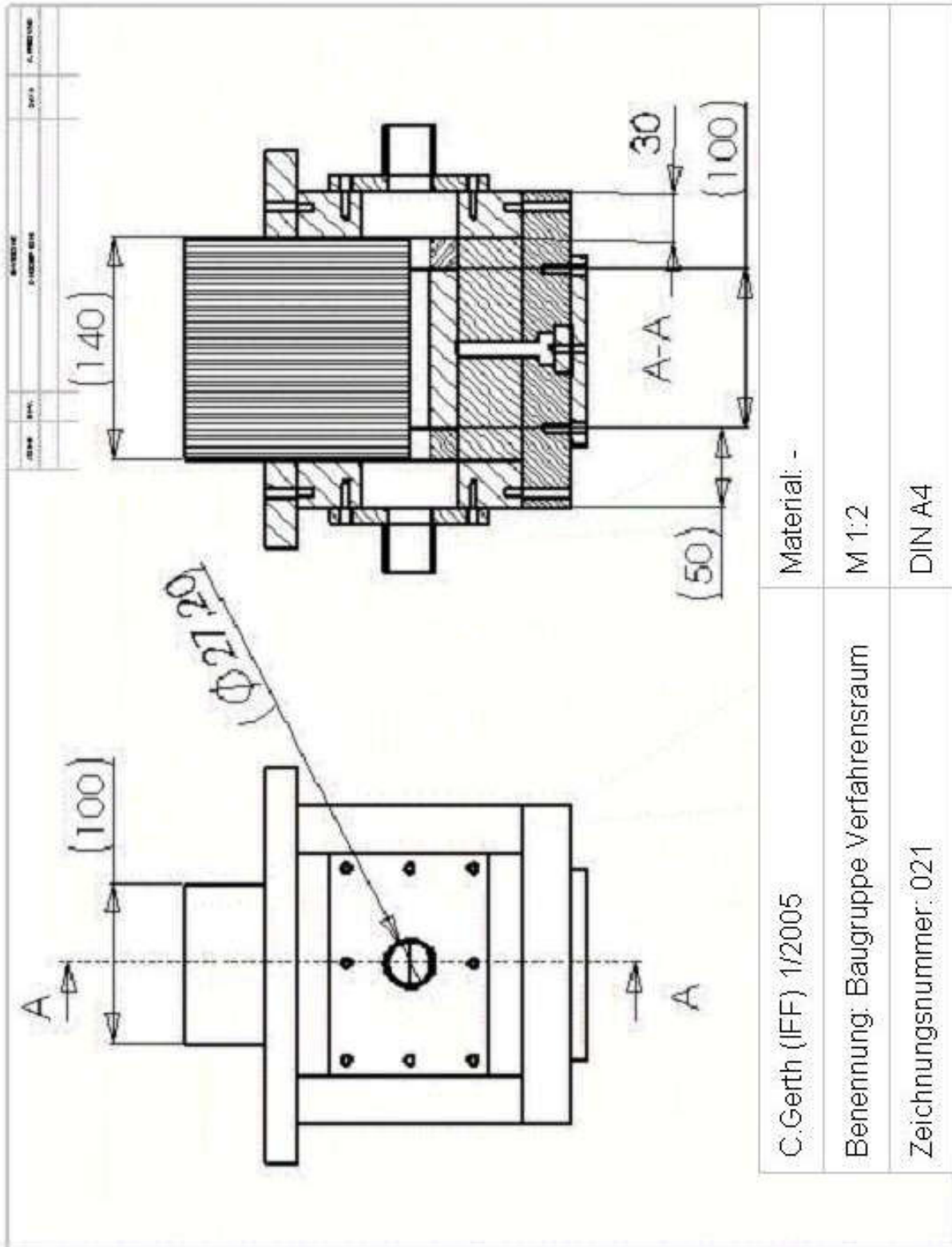
Grundzüge der Strömungslehre. 6. Aufl., Berlin: Springer, 1997

Zimmer 2003 Zimmer, O.; u.a.:

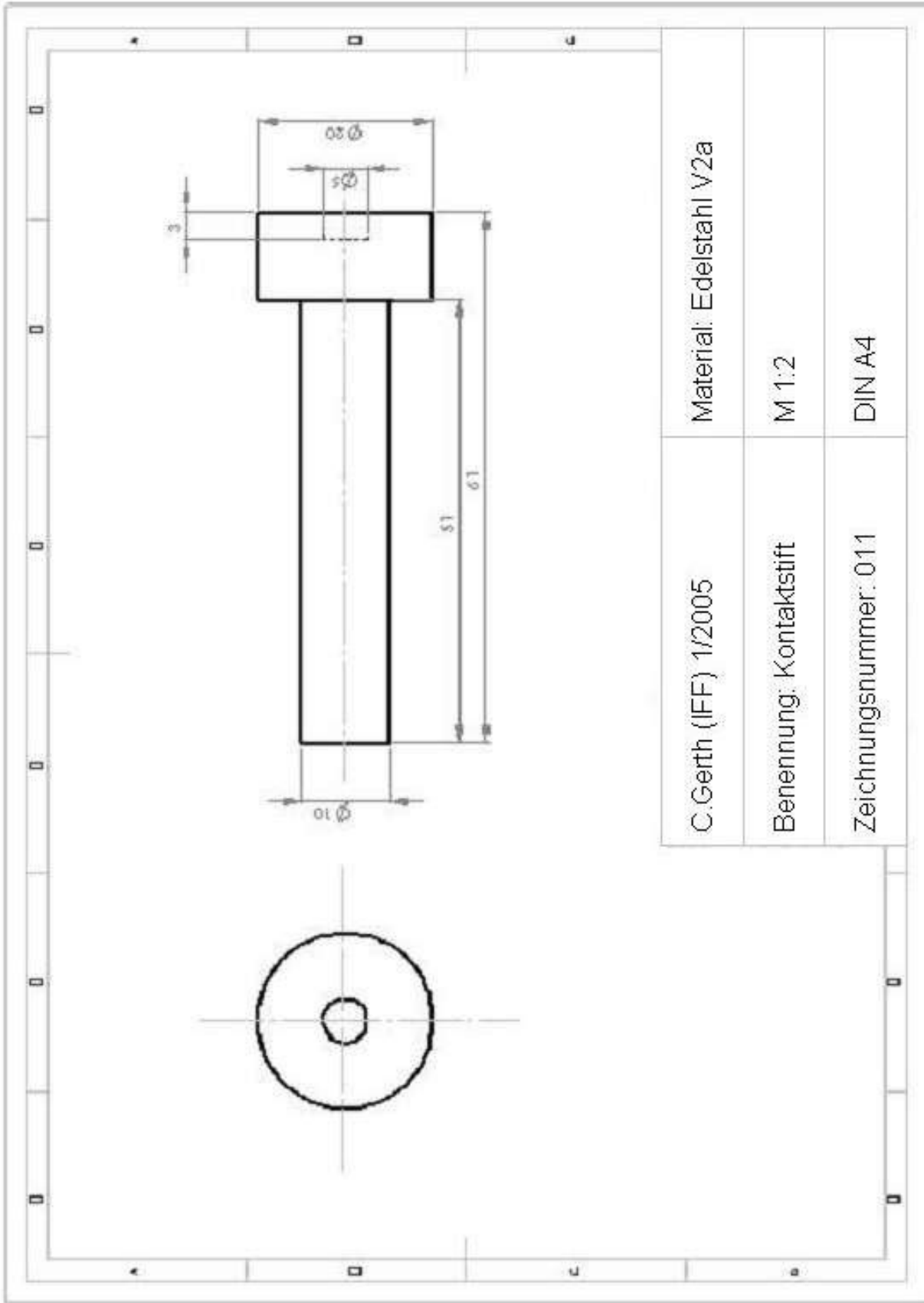
Maßgeschneiderte Beschichtungen zur Leistungssteigerung im Werkzeug- und Formenbau für die Kunststoffverarbeitung. In: Kolloquium Werkzeugbau und Kunststoffverarbeitung, 15. Mai 2003, Dresden, 2003, S. 20-21

# 14 Anhang

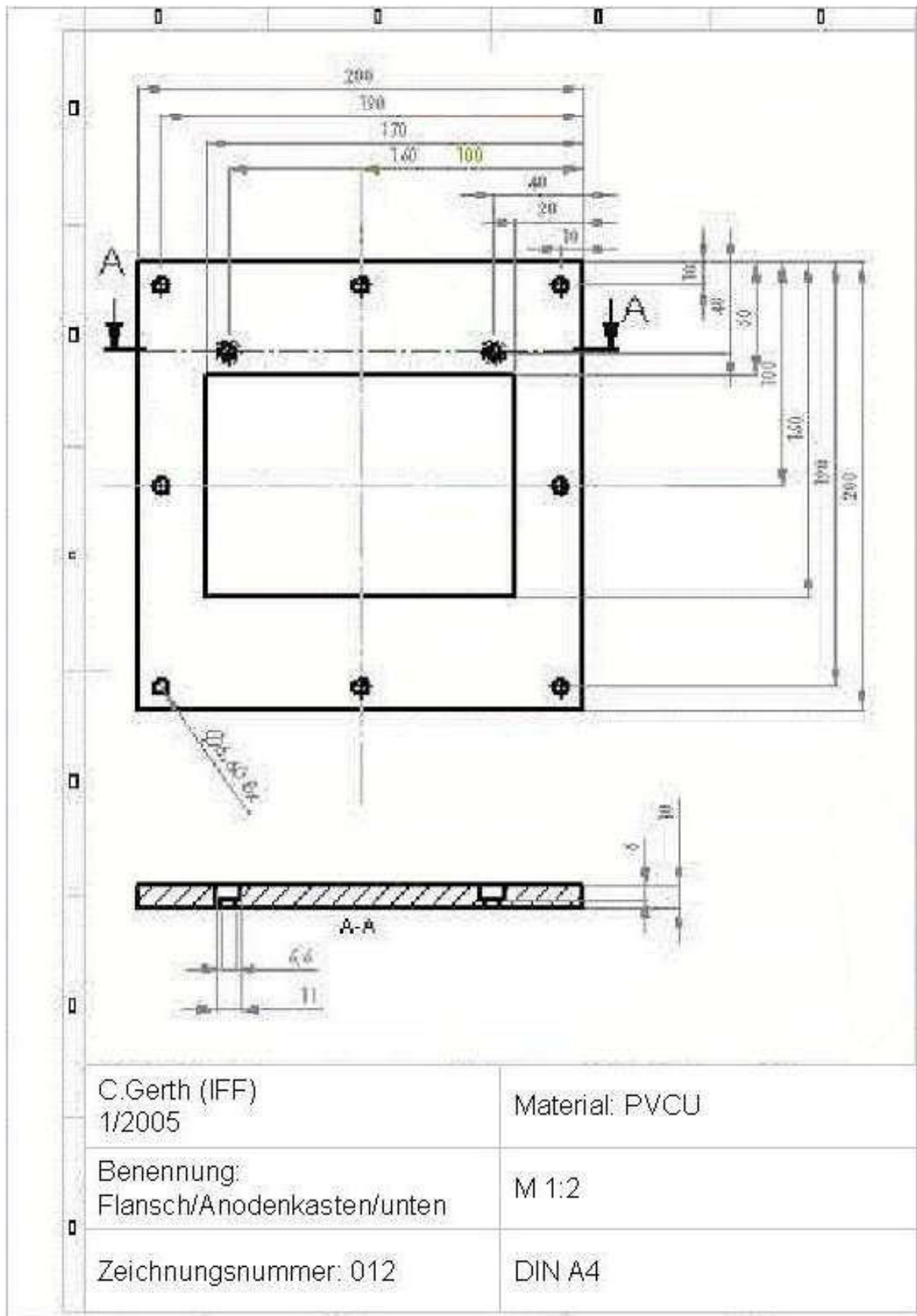
## 14.1 Zeichnungssatz des Verfahrensraums Vorversuche

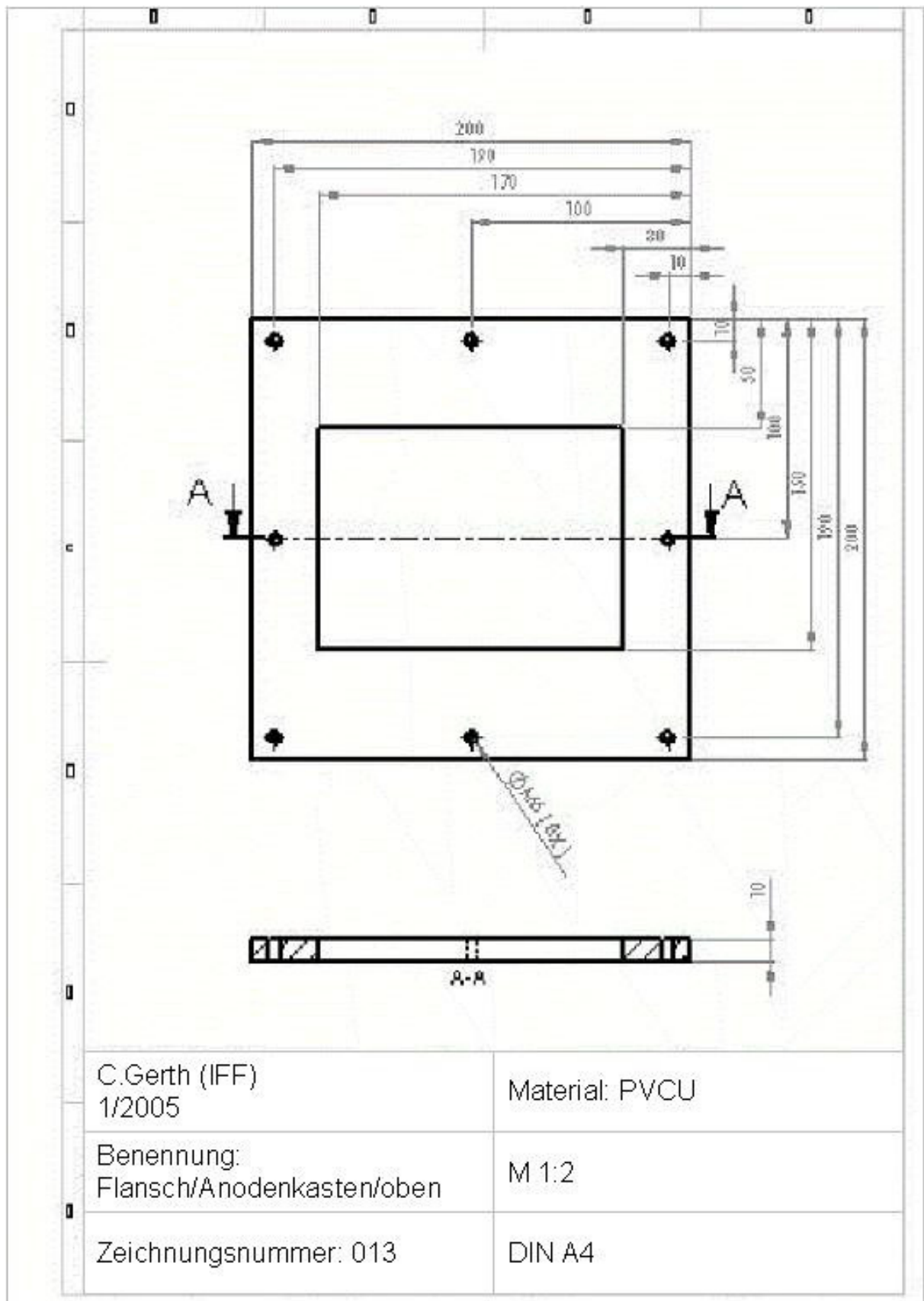


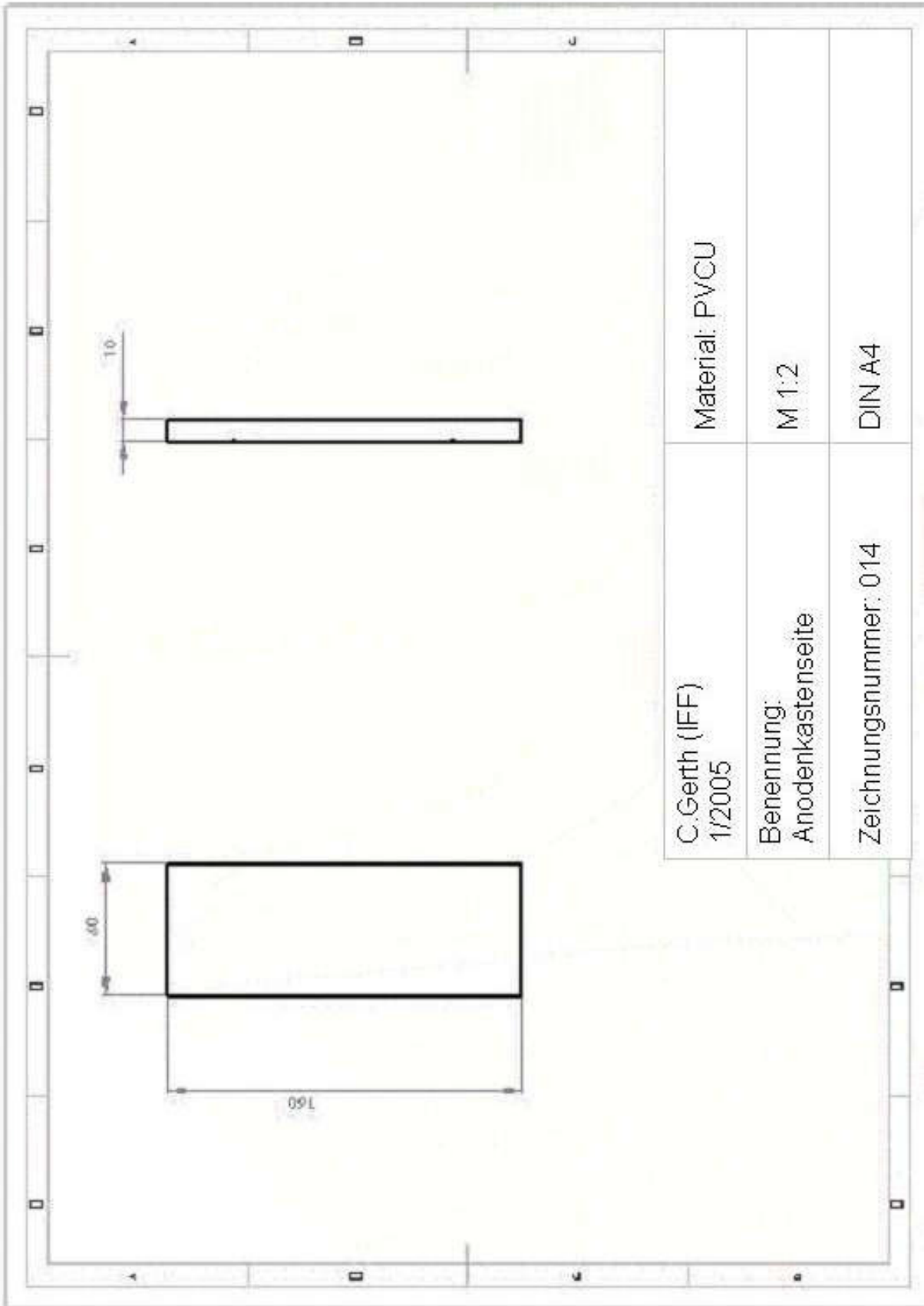




C.Gerth (IFF) 1/2005	Material: Edelstahl V2a
Benennung: Kontaktstift	M 1:2
Zeichnungsnummer: 011	DIN A4







C.Gerth (IFF)  
1/2005

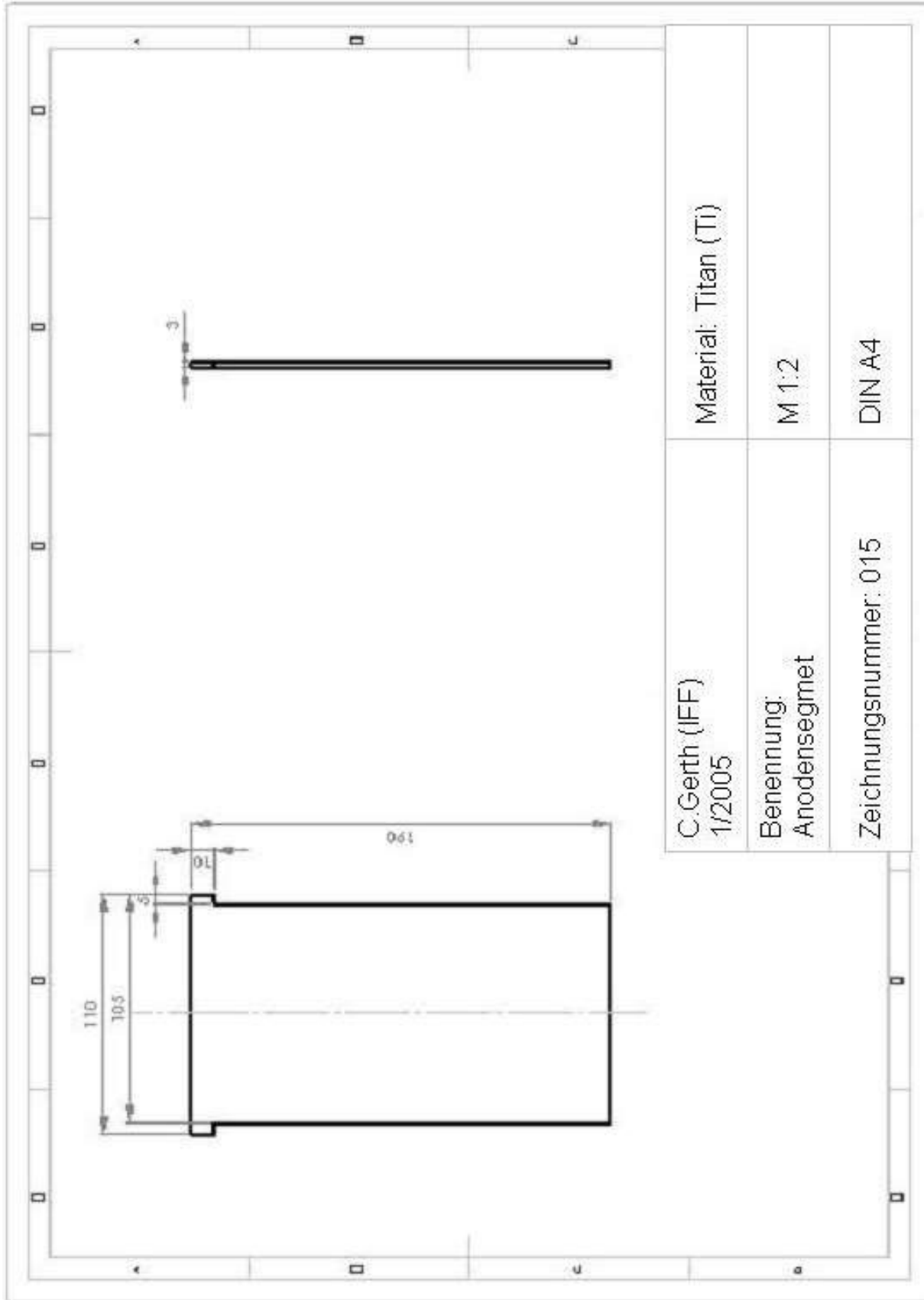
Material: PVCU

Benennung:  
Anodenkastenseite

M 1:2

Zeichnungsnummer: 014

DIN A4



C.Gerth (IFF)  
1/2005

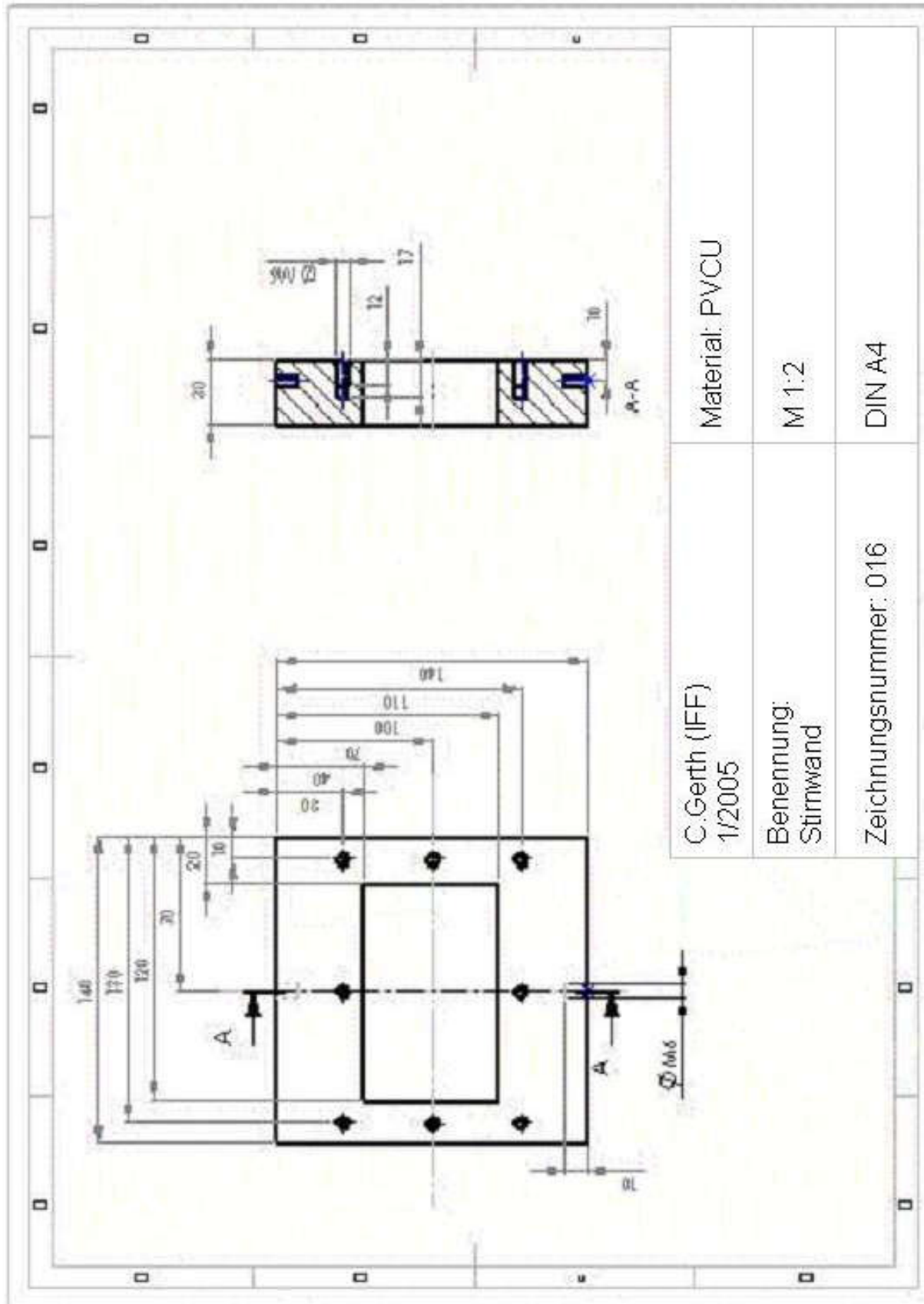
Material: Titan (Ti)

Benennung:  
Anodensegmet

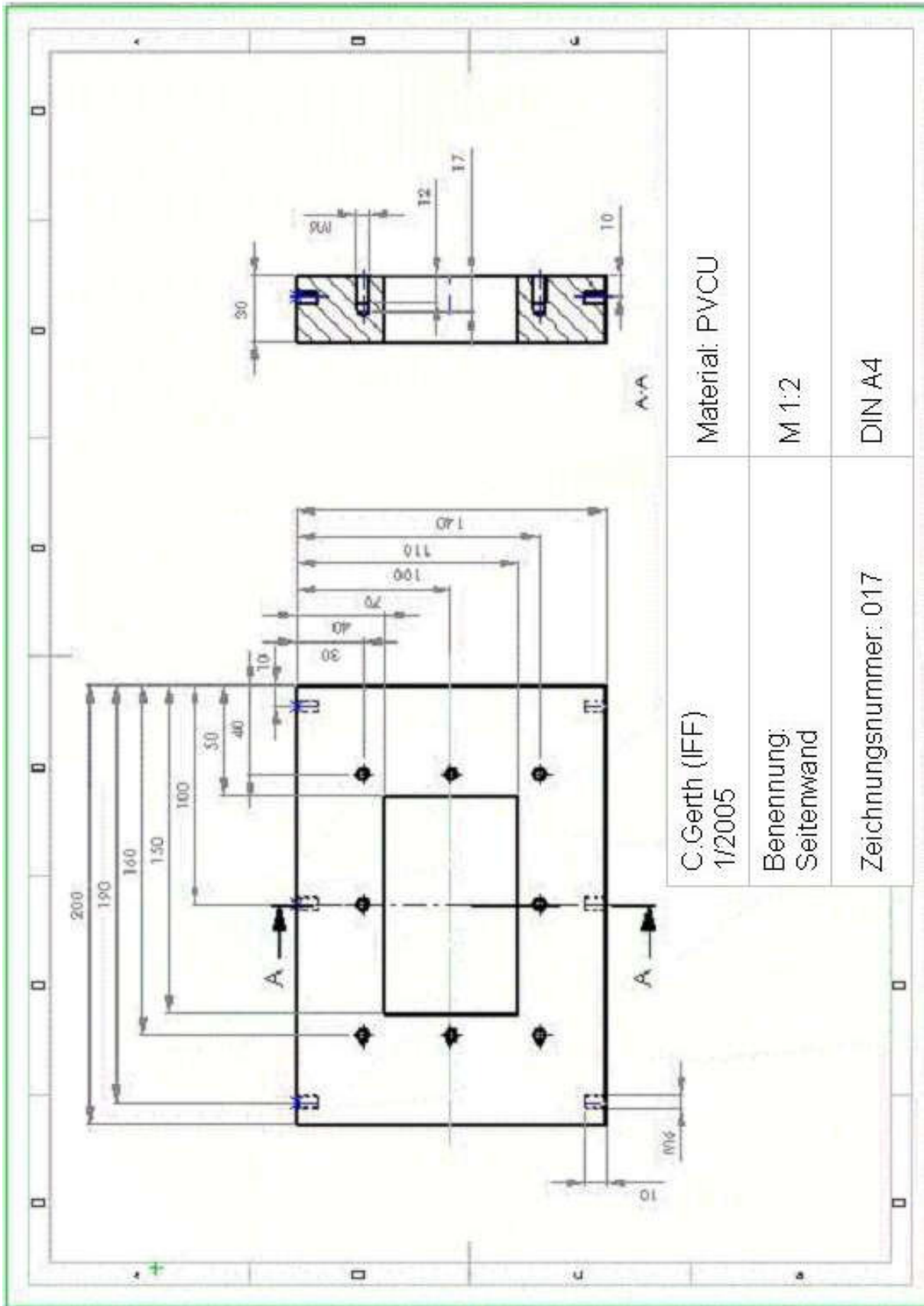
M 1:2

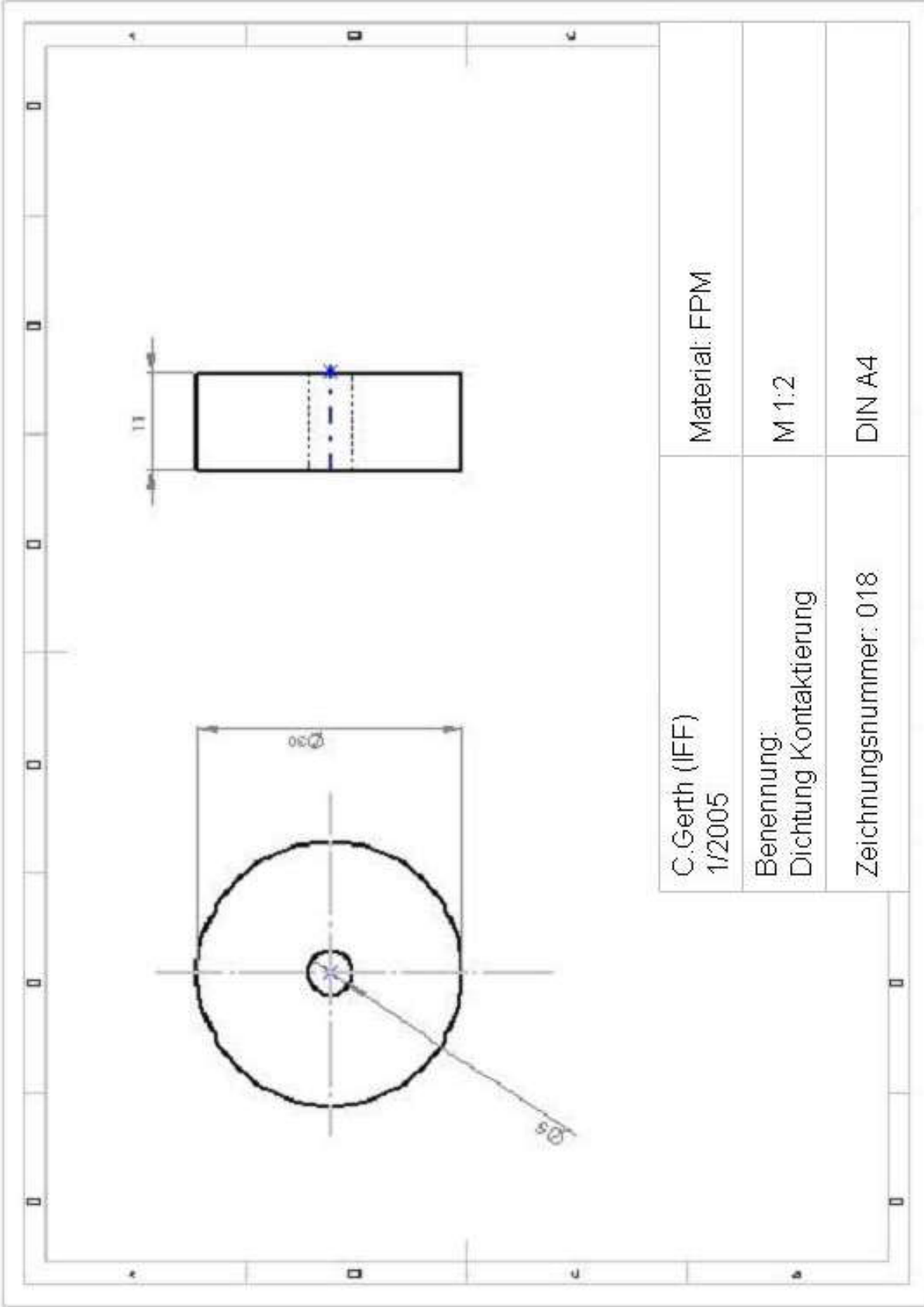
Zeichnungsnummer: 015

DIN A4



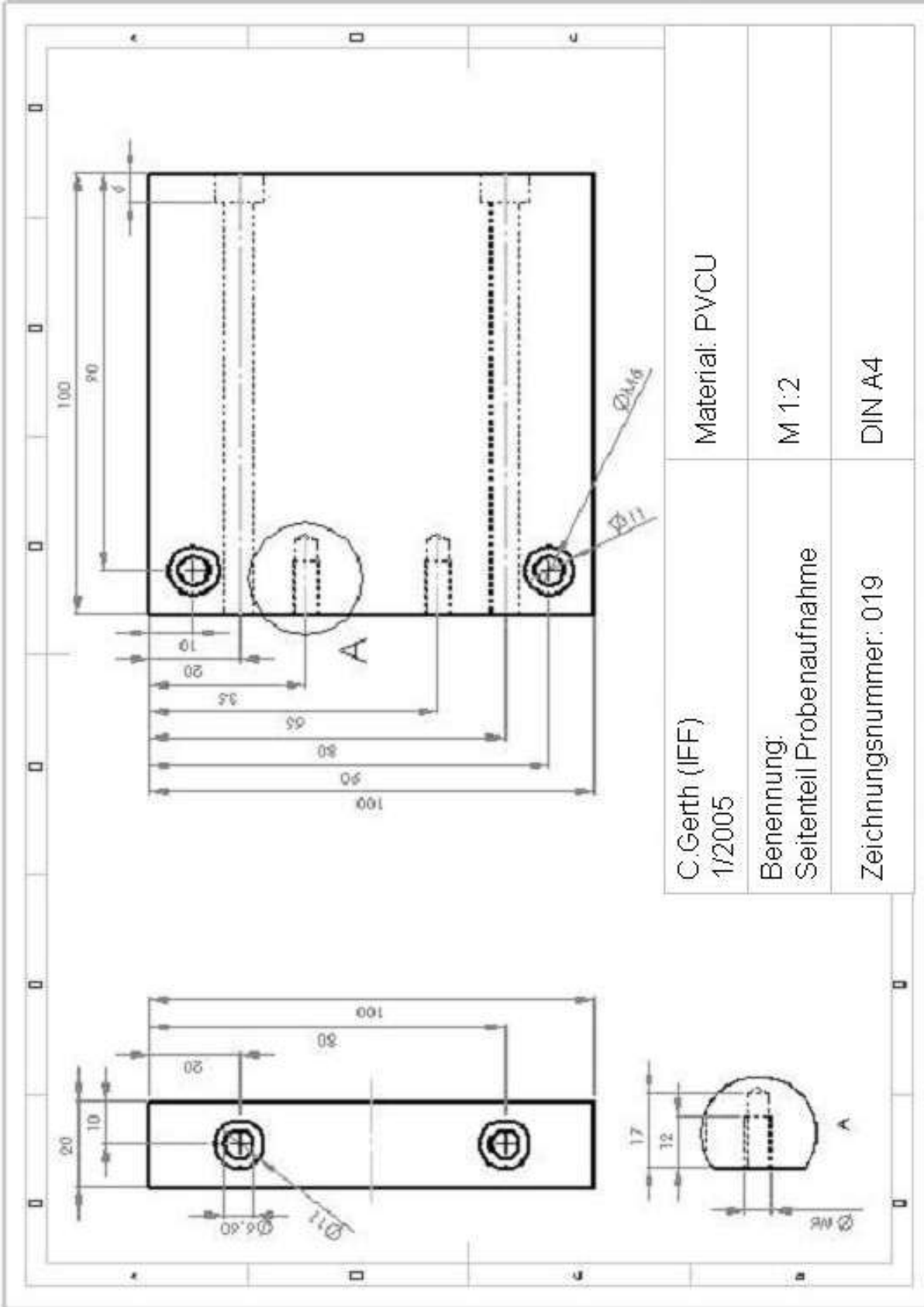
C.Gerth (IFF) 1/2005	Material: PVCU
Benennung: Stirnwand	M 1:2
Zeichnungsnummer: 016	DIN A4





C. Gerth (IFF) 1/2005	Material: FPM
Benennung: Dichtung Kontaktierung	M 1:2
Zeichnungsnummer: 018	DIN A4





C. Gerth (IFF)  
1/2005

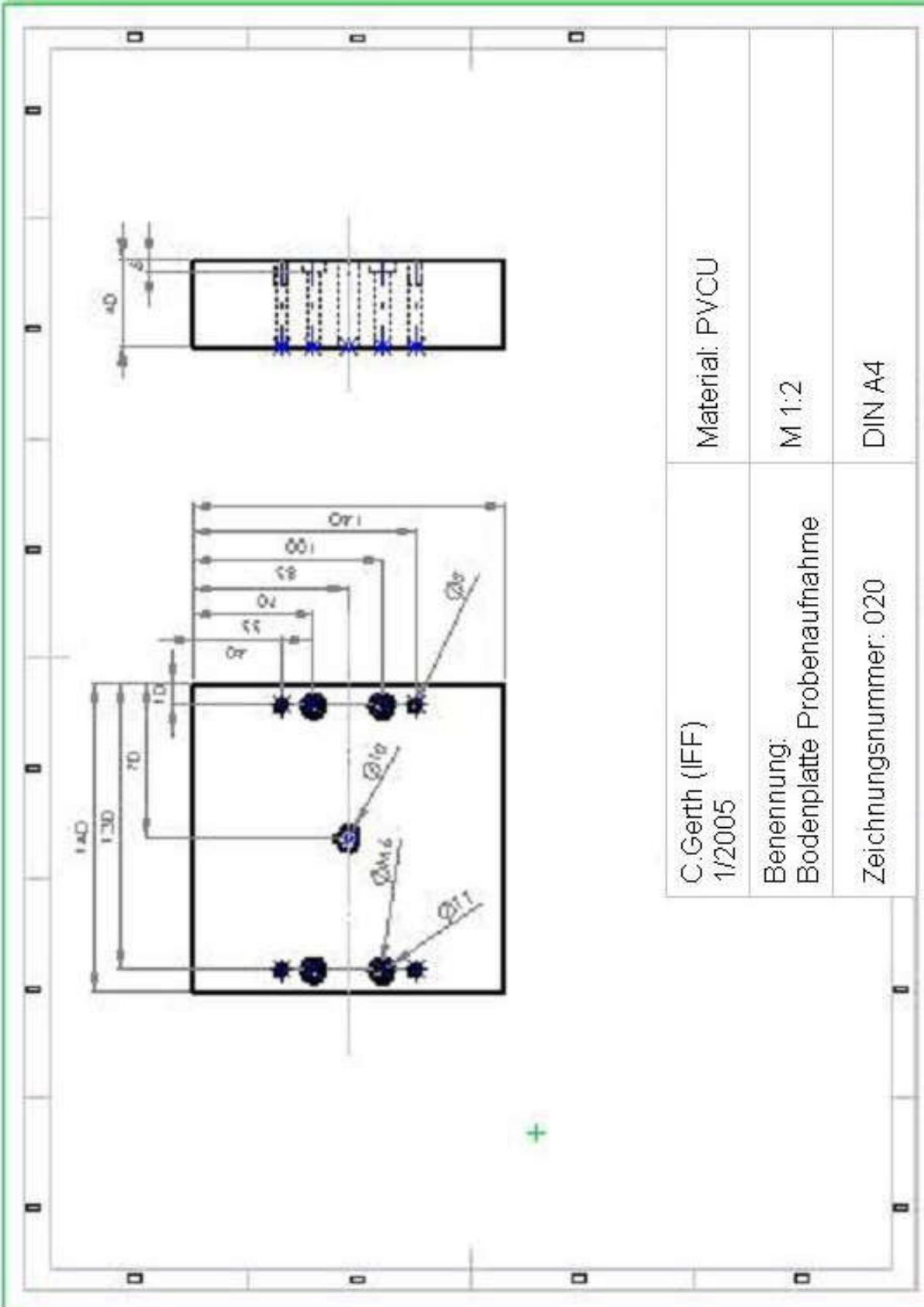
Benennung:  
Seitenteil Probenaufnahme

Zeichnungsnummer: 019

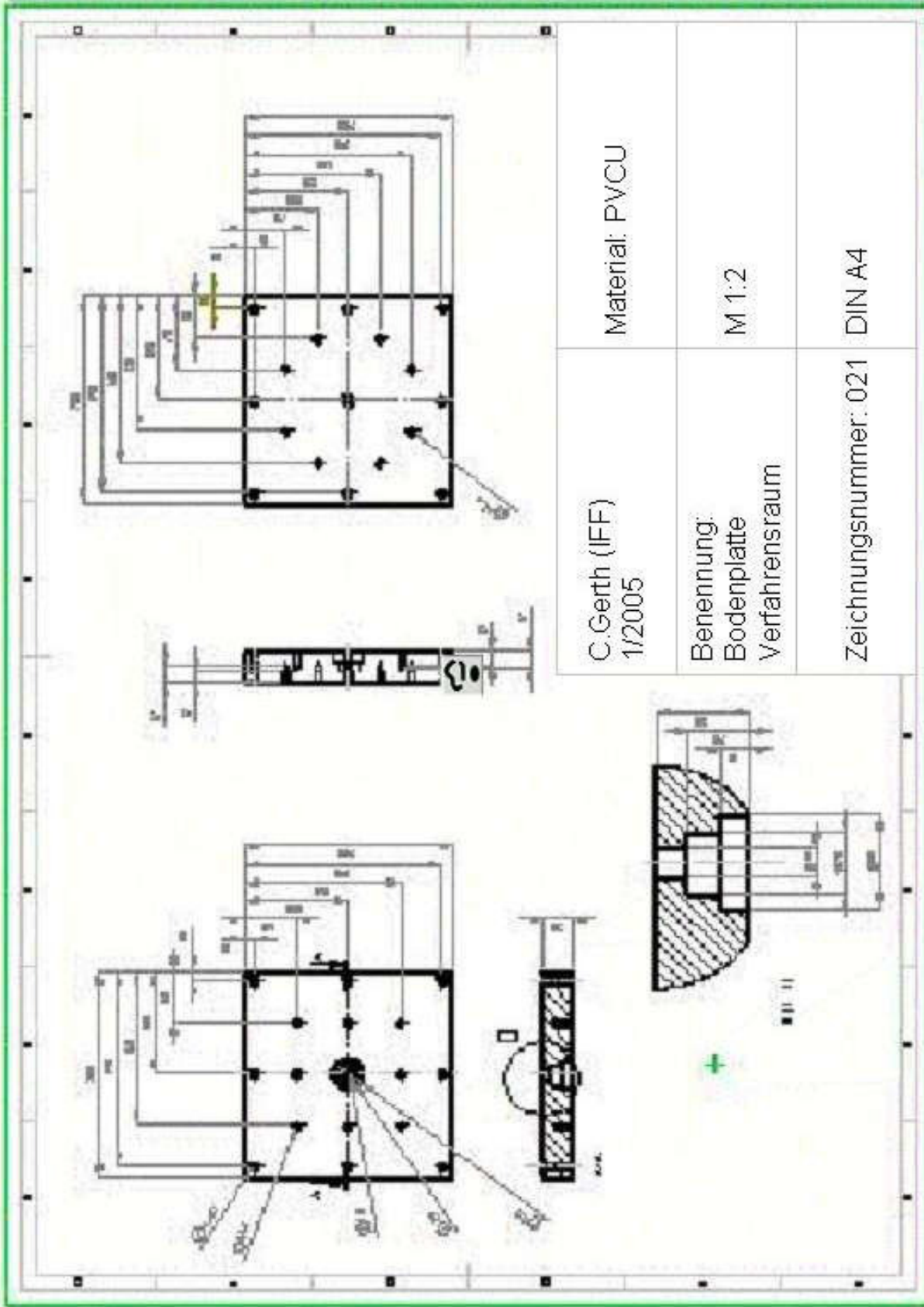
Material: PVCU

M 1:2

DIN A4



C.Gerth (IFF) 1/2005	Material: PVCU
Benennung: Bodenplatte Probenaufnahme	M 1:2
Zeichnungsnummer: 020	DIN A4



C.Gerth (IFF)  
1/2005

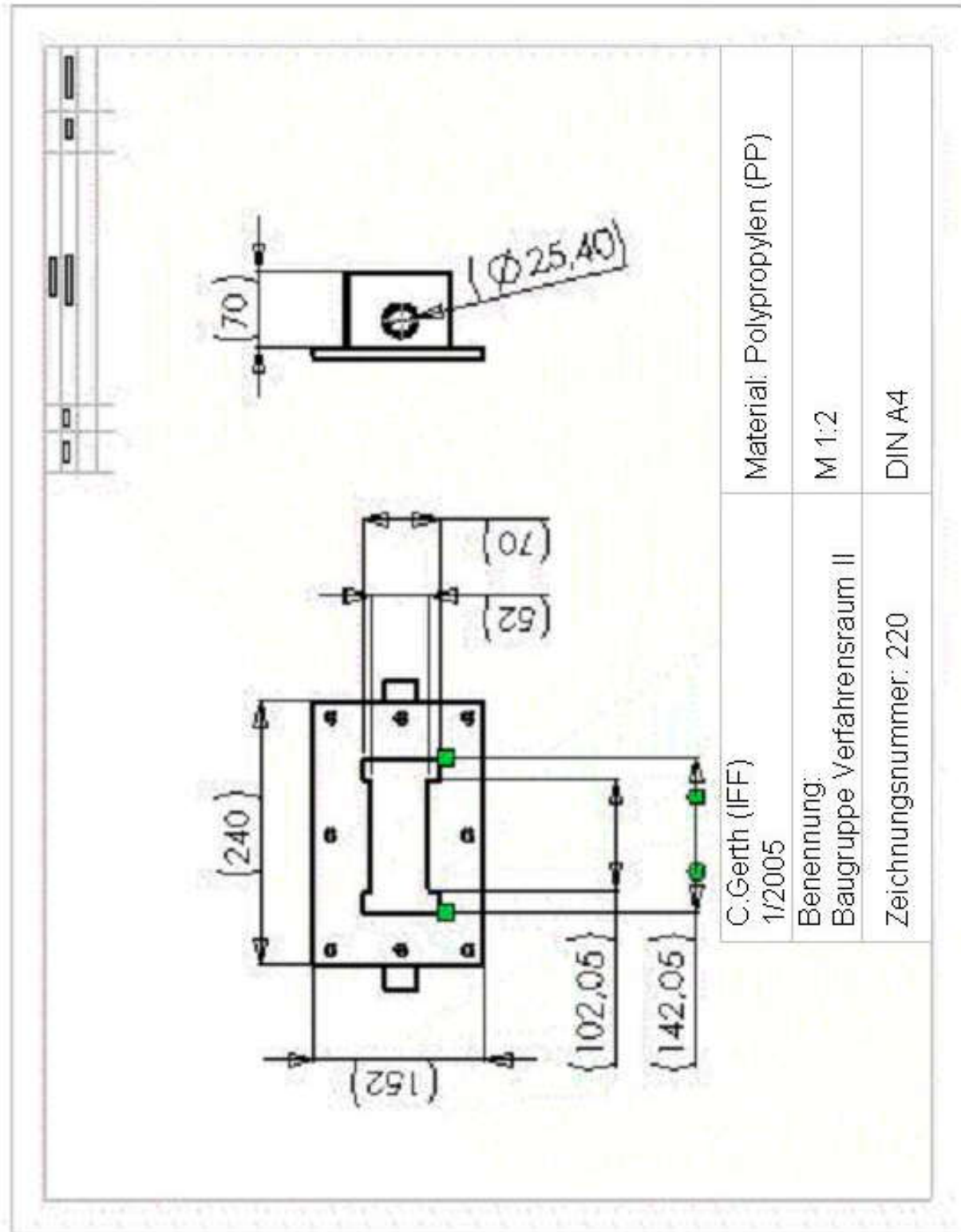
Material: PVCU

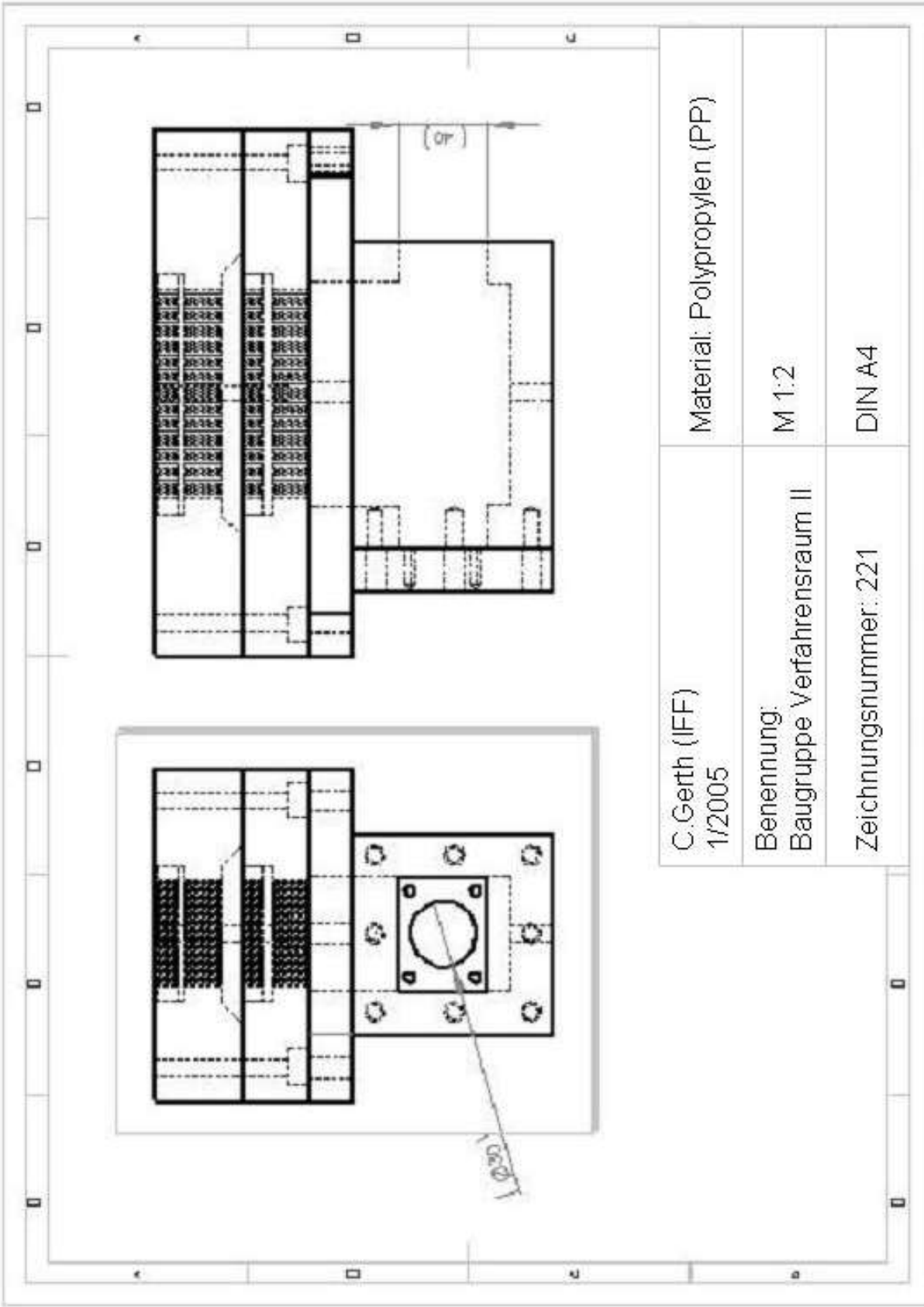
Benennung:  
Bodenplatte  
Verfahrensraum

M 1:2

Zeichnungsnummer: 021 DIN A4

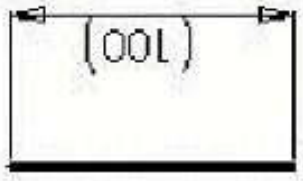
## 14.2 Zeichnungssatz des Verfahrensraums für das formangepasste Anodesystem





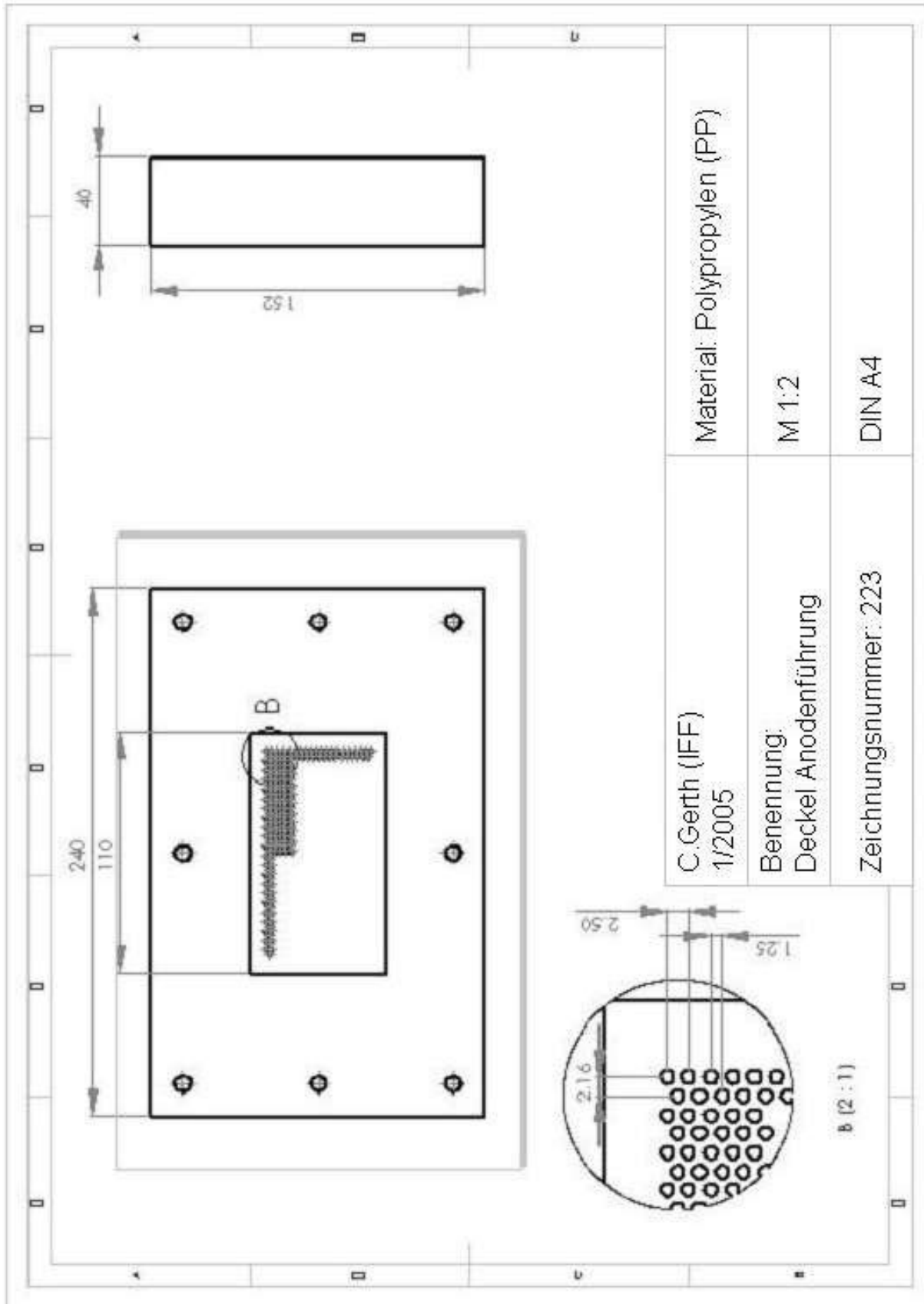
C. Gerth (IFF) 1/2005	Material: Polypropylen (PP)
Benennung: Baugruppe Verfahrensraum II	M 1:2
Zeichnungsnummer: 221	DIN A4

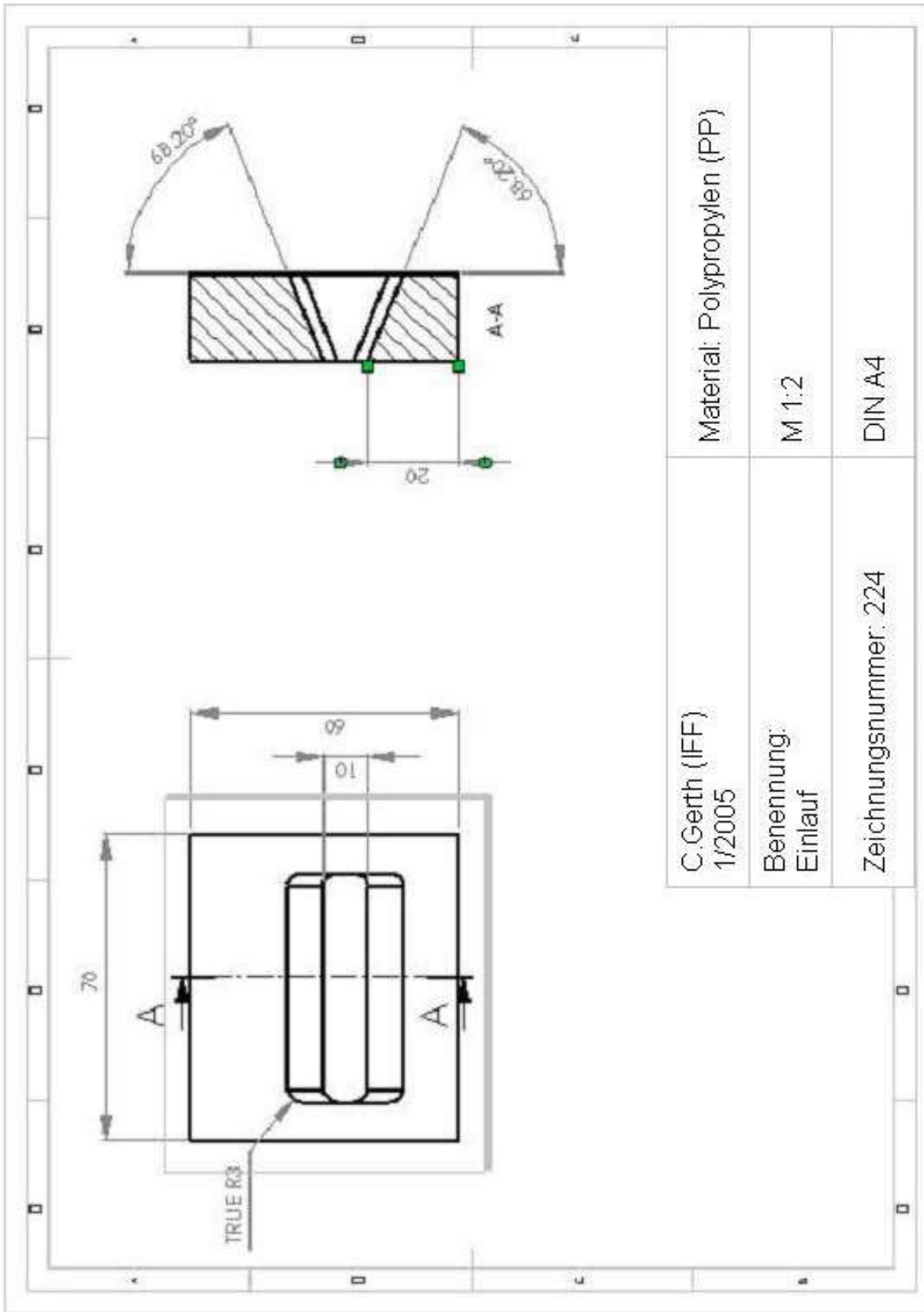
NO.	REV.	DATE	DESCRIPTION



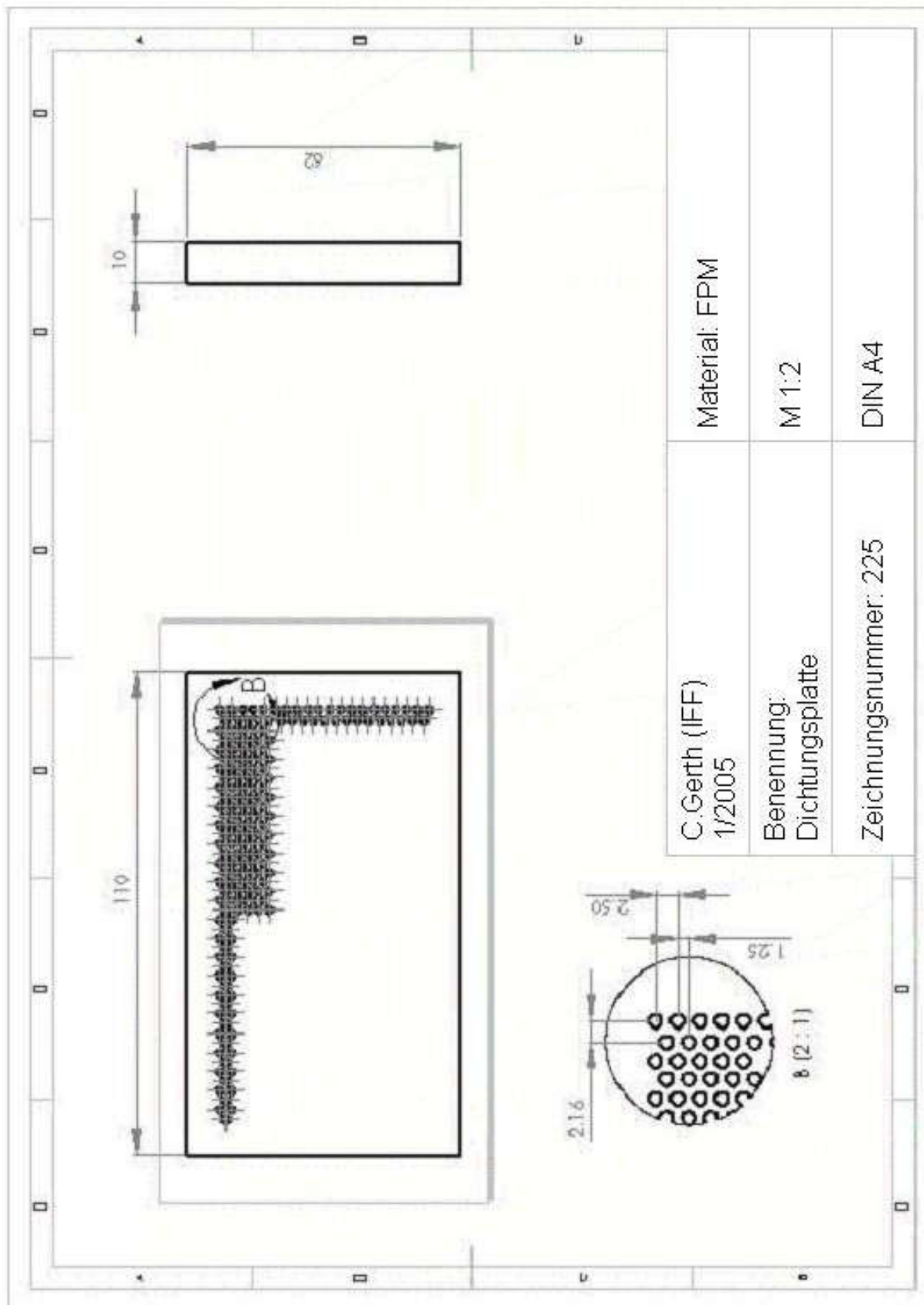
+

C.Gerth (IFF) 1/2005	Material: Titan (Ti)
Benennung: Anodenstift	M 1:2
Zeichnungsnummer: 222	DIN A4









### 14.3 Auszug aus dem Stoffdatenblatt NIPHOS 966

(Auszug aus der Arbeitsanleitung für den Elektrolyten Niphos 966 Umicore Galvanotechnik GmbH)

Niphos 966 ist chloridfrei und im Betrieb pH-stabil.

Der Phosphorgehalt der Überzüge beträgt ca. 12 %. Die Härte der Schichten beträgt 550 HV0.05 im Zustand wie abgeschieden.

Überzüge aus Niphos 966 werden als Zwischenschicht vor einer anschließenden Hartvergoldung (z.B. mit AURUNA® 526 oder AURUNA® 539) von Kontaktoberflächen eingesetzt.

Weiterhin können Schichten aus Niphos 966 als Alternative zu hochphosphorhaltigen Schichten aus chemisch-Nickel Elektrolyten verwendet werden.

#### **Badcharakteristik:**

	Optimum:	zulässiger Bereich:
Nickelgehalt:	80 g/l	(70 -90 g/l)
Phosphorgehalt:	25 g/l	(22 - 28 g/l)
pH-Wert::	2,6	(2,5 - 2,7)
Temperatur:	60 °C	(55 - 65 °C)

#### **Schichtcharakteristik:**

Überzug: Nickel-Phosphor

Nickel: 87 - 89 %

Phosphor: 13 - 11 %

Härte: 550 - 1100 HV (je nach Wärmebehandlung und Phosphorgehalt)

Abrieb: 2 [mg/1000 Hübe]

0,256 [mm<sup>3</sup>/1000 Hübe]

(Abriebversuch nach Bosch-Weinmann, Sandpapier: Schweizer Norm 6/0, Auflagegewicht: 300 g)

**Arbeitsbedingungen:**

Warenbewegung: 5 m/min. (Gestell) bzw. Trommelrotation

Filtration: kontinuierlich

Abscheidungsgeschwindigkeit: Gestell: 0,4  $\mu\text{m}/\text{min}$  bei 4  $[\text{A}/\text{dm}^2]$

Trommel: 0,15  $\mu\text{m}/\text{min}$  bei 1,5  $[\text{A}/\text{dm}^2]$

Stromausbeute: ca. 50 %

Legierungszusammensetzung: Nickel: 87 - 89 Gew. %

Phosphor: 13 - 11 Gew. %

	Optimum:	zulässiger Bereich:
Stromdichte:	Gestell: 4 $[\text{A}/\text{dm}^2]$	(3 - 5 $[\text{A}/\text{dm}^2]$ )
	Trommel: 1,5 $[\text{A}/\text{dm}^2]$	(1 - 2 $[\text{A}/\text{dm}^2]$ )

## 14.4 Auszug aus dem Stoffdatenblatt $\mu$ Chem 510 Z

(Auszug aus dem Datenblatt für  $\mu$ Chem 510 Z, Sur Tec GmbH)

Kupferelektrolyt, alkalisch, cyanidfrei mit folgenden Eigenschaften:

- speziell entwickelter Elektrolyt für die Mikrosystemtechnik
- verkupfert direkt Nickel, Nickellegierungen, Zink, Messing und oxidiertes Titan
- macht den Einsatz von cyanidischen Elektrolyten für Kupferstrikes mit ihrem hohen Gesundheits- und Umweltrisiko überflüssig
- bildet guten Untergrund für haftfeste Nickel- und sauer Kupferschichten
- ausgezeichnete Deck- und Streufähigkeit
- produziert feinkörnige, matt bis halbgänzende, duktile und porenfreie Niederschläge
- geeignet zur Herstellung nasschemisch selektiv ätzbarer Opferschichten
- gebrauchsfertige Lieferform

### **Anwendung:**

Ansatzwerte Kupferelektrolyt  $\mu$ Chem 510 Z unverdünnt:

Zugehörige Einzelkomponenten: Kupferkonzentrat  $\mu$ Chem 510/1 zum Nachschärfen des

Cu-Gehaltes Komplexbildner  $\mu$ Chem 510/2 Verbrauchszusatz

### **Analysensollwerte:**

Kupfer: 18 g/l (16-18 g/l)

Phosphor als Komplex: 72 g/l (70-80 g/l)

### **Ansatz:**

Der gelieferte Elektrolyt ist eingestellt und nach dem Erwärmen auf Prozesstemperatur einsatzbereit.

### **Badcharakteristik**

Temperatur: 55 °C (50-70 °C)

pH-Wert: 9,2 (9,0-9,6)

einstellen mit 50%iger KOH oder mit  $\mu$ Chem 510/2

Stromdichte: 0,5-3 A/dm<sup>2</sup>

Badspannung: 1-6 V

**Anoden:**

OFHC-Kupfer (Oxygen Free High Conductivity / sauerstoffreies hochleitendes Kupfer), Platten oder Pellets in Titan-Körben mit Anodensäcken;

Verhältnis Anode : Kathode: 1 bis 1,5 : 1

Bewegung: starke Strömung notwendig

Badbehälter: Stahl mit Kunststoffauskleidung; Kunststoffwannen verstärkt

Filtration: kontinuierlich mit 0,2 µm Porenweite und ca. 2-3 Badumwälzungen pro Stunde

Heizung: Edelstahlbadwärmer, PTFE-ummantelt

**Instandhaltung:**

Verdunstungsverluste müssen mit entionisiertem Wasser ausgeglichen werden. Die Badgrundwerte müssen eingehalten werden. µChem 510/2 wird möglichst täglich dosiert,

