

## Peter Schwanzer

»Methodik zur Produktionsgestaltung einer vollflächigen und endmaßnahen galvanischen Beschichtung von tribokorrosiv belasteten rotationssymmetrischen Bauteilen«





# STUTTGARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG BAND 129

**Peter Schwanzer**

»Methodik zur Produktionsgestaltung einer vollflächigen und  
endmaßnahen galvanischen Beschichtung von tribokorrosiv belasteten  
rotationssymmetrischen Bauteilen«

## **Herausgeber**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl<sup>1,2</sup>

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Alexander Sauer<sup>1,3</sup>

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kai Peter Birke<sup>4</sup>

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Marco Huber<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart

<sup>2</sup> Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF) der Universität Stuttgart

<sup>3</sup> Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP) der Universität Stuttgart

<sup>4</sup> Institut für Photovoltaik (*ipv*) der Universität Stuttgart

**Kontaktadresse:**

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA  
Nobelstr. 12  
70569 Stuttgart  
Telefon 0711 970-1100  
info@ipa.fraunhofer.de  
www.ipa.fraunhofer.de

**Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.de> abrufbar.

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2021

**D 93**

2021

**Druck und Weiterverarbeitung:**

Fraunhofer Verlag Mediendienstleistungen, Stuttgart, 2021  
Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Wiedergabe, sind vorbehalten.

# **Methodik zur Produktionsgestaltung einer vollflächigen und endmaßnahen galvanischen Beschichtung von tribokorrosiv belasteten rotationssymmetrischen Bauteilen**

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik  
der Universität Stuttgart  
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von  
Dipl.-Ing. Peter Schwanzer  
aus Leutkirch im Allgäu

Hauptberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl

Mitberichter: Hon. Prof. Dr.-Ing. Tim Hosenfeldt

Tag der mündlichen Prüfung: 21.07.2021

Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb IFF  
der Universität Stuttgart

2021



# Vorwort des Autors

So wie eine Entwicklung selten in einer geraden Linie verläuft, ist auch diese Arbeit das Ergebnis einiger Iterationszyklen – passend zum Inhalt. Sie entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer IPA und hat mich neben diversen Industrie- und Forschungsprojekten über Jahre begleitet, gefordert und vieles gelehrt.

Mein Dank gilt Herrn Professor Bauernhansl für die Übernahme des Hauptberichts, die wissenschaftliche Betreuung und das Einbringen neuer Blickwinkel. Ebenfalls danken möchte ich Herrn Professor Hosenfeldt für die Übernahme des Mitberichts und die Durchsicht der Arbeit.

Meinem Abteilungsleiter Herrn Dr. Martin Metzner danke ich für den Freiraum und die Durchsicht des Manuskripts, speziell bezüglich der galvanotechnischen Aspekte. Für die fachlichen Diskussionen danken möchte ich meinem direkten Vorgesetzten Herrn Klaus Schmid, insbesondere zur Simulation, und Frau Katja Feige als Projektleiterin des Projekts „Poseidon“, in dem das Fallbeispiel entstanden ist. Besonderer Dank gilt Herrn Dr. Stefan Kölle für die hervorragende Zusammenarbeit und die Diskussionen während der Entstehung der Arbeit.

Auch den weiteren Kolleginnen und Kollegen der Abteilung möchte ich meinen herzlichen Dank für die gute Zusammenarbeit und die angenehme Arbeitsatmosphäre aussprechen, insbesondere den Kolleginnen aus Labor und Metallografie für die Unterstützung bei der Durchführung und Auswertung der experimentellen Arbeiten.

Meiner Familie und im Besonderen meinen Eltern möchte ich an dieser Stelle meine Dankbarkeit für die uneingeschränkte Unterstützung ausdrücken, welche mir den eingeschlagenen Lebensweg ermöglicht haben.

Stuttgart, September 2021

Peter Schwanzer





# Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis .....	12
Abbildungsverzeichnis .....	15
Tabellenverzeichnis .....	19
Kurzfassung.....	21
Abstract .....	23
1 Einleitung.....	25
1.1 Motivation .....	26
1.2 Problemstellung und Forschungsfragen .....	28
1.3 Wissenschaftstheoretische Positionierung und Vorgehensweise .....	32
1.3.1 Grundlagenwissenschaften .....	32
1.3.2 Angewandte Wissenschaften und Technikwissenschaften .....	34
1.3.3 Aufbau der Arbeit.....	41
2 Beschichtung von Präzisionsbauteilen für tribokorrosive Belastungen .....	44
2.1 Korrosive und tribologische Beanspruchung .....	44
2.1.1 Kurzüberblick Korrosion.....	44
2.1.2 Tribokorrosion .....	47
2.1.3 Ableitung von Anforderungen an diese Arbeit .....	47
2.2 Beschichtung von rotationssymmetrischen Präzisionsbauteilen am Beispiel von Wälzlagern .....	48
2.2.1 Aufbau und Toleranzen von Wälzlagern.....	48
2.2.2 Beschichtungen .....	50
2.2.3 Ableitung von Anforderungen an diese Arbeit .....	54
3 Galvanotechnik und galvanische Produktionstechnik.....	56

---

3.1	Einführung .....	56
3.2	Schichtdickenverteilung galvanischer Schichten.....	58
3.2.1	Leitfähigkeit und Stromdichteverteilung .....	58
3.2.2	Charakterisierung der Elektrolytstrefähigkeit.....	60
3.2.3	Möglichkeiten zur Optimierung der Stromdichte- und Schichtdickenverteilung.....	64
3.2.4	(Stromdichte-) Simulation in der Galvanotechnik.....	67
3.2.5	Ableitung von Anforderungen an diese Arbeit.....	70
3.3	Galvanotechnische Anlagen.....	71
3.3.1	Allgemeiner Aufbau .....	72
3.3.2	Anlagentypen und -technologien .....	75
3.3.3	Ableitung von Anforderungen an diese Arbeit.....	81
4	Entwicklungstechniken .....	83
4.1	Überblick Methodische Entwicklung .....	83
4.1.1	Bekannte Entwicklungsmethodiken .....	84
4.1.2	Agile Prozesse bzw. agile Entwicklung.....	92
4.1.3	Lösungsfindung und -bewertung.....	97
4.1.4	Ableitung von Anforderungen an diese Arbeit.....	98
5	Reflexion bestehender Ansätze für vorliegende Anforderungen .....	100
5.1	Beschichtung von Präzisionsbauteilen und Galvanotechnik.....	100
5.2	Entwicklungsmethodiken.....	101
5.2.1	Anforderungen an eine Methodik und Bewertung bestehender Ansätze .....	103
5.2.2	Bewertung von Entwicklungsmethodiken im Kontext dieser Arbeit .....	104
5.3	Fazit zum Entwicklungsbedarf dieser Arbeit .....	109
6	Entwicklung der Methodik.....	111
6.1	Generische Methodik zur Entwicklung einer galvanischen Produktionstechnik.....	111

---

6.1.1	Kerngedanken zur Struktur.....	111
6.1.2	Aufbau.....	113
6.1.3	Vorteile und Unterschiede zu bekannten Ansätzen.....	119
6.2	Grundlegende Durchführung der Methodik.....	120
6.3	Voraussetzungen für eine Instanziierung .....	121
7	Instanziierte Methodik.....	123
7.1	Startphase und Voraussetzungen für Instanziierung.....	123
7.1.1	Anforderungen.....	123
7.1.2	Aufgabenstellung und Anlagentypauswahl .....	124
7.2	Instanziierung der Methodik.....	124
7.2.1	Planung der Entwicklung und Segmenteinteilung.....	125
7.2.2	Segmentplanung und weiterer Entwicklungsbedarf.....	127
7.2.3	Segmententwicklung .....	129
7.2.4	Gesamtsystementwicklung .....	130
7.2.5	Umsetzungs- und Validierungsphase.....	131
7.3	Detailmethodik zur Konzeptentwicklung für die kontaktstellenfreie, vollflächige Beschichtung .....	131
7.3.1	Aufbau der Methodik (kontaktstellenfreie Beschichtung) im Entwicklungssegment 1 .....	132
7.3.2	Randbedingungen, Zielsetzungen und Anforderungen .....	134
7.3.3	Vorbetrachtungen: Effekte und Einflussfaktoren an Kontaktstellen .....	135
7.3.4	Recherche: Bekannte Varianten und Aufstellung allgemeiner Lösungskonzepte für kontaktstellenfreie Beschichtung .....	136
7.3.5	Iterationszyklus Lösungsgenerierung .....	144
7.3.6	Umsetzungsanforderungen als parallele Dokumentation .....	146
7.3.7	Iterationszyklus Vorbereitung der Bewertung .....	146
7.3.8	Variantenbewertung.....	148
7.3.9	Sonderfall: Zielerreichung für keine Variante plausibel .....	149

---

7.3.10	Variantenauswahl und Iterationszyklus Erstellung Konzept / Vorentwurf .....	150
7.4	Detailmethodik zur Optimierung der Maßhaltigkeit der Beschichtung.....	150
7.4.1	Aufbau der Methodik zur Optimierung der Schichtdickenverteilung in Entwicklungssegment 2 .....	150
7.4.2	Iterationszyklus Datenerarbeitung.....	155
7.4.3	Bestimmung Korrekturfaktorfunktionen .....	159
7.4.4	Möglichkeiten zur Manipulation der primären Stromdichteverteilung...	163
7.4.5	Iterationszyklen zur Optimierung .....	166
8	Fallbeispiel .....	167
8.1	Anwendung der Detailmethodiken .....	168
8.1.1	Detailmethodik für die Ermittlung / Entwicklung eines Konzepts zur kontaktstellenfreien, vollflächige Beschichtung (Fallbeispiel; Entwicklungssegment 1) .....	168
8.1.2	Detailmethodik zur Optimierung der Maßhaltigkeit (Fallbeispiel; Entwicklungssegment 2) .....	177
8.2	Gesamtsystementwicklung Prototypanlage .....	190
8.2.1	Ausarbeitung und Realisierung Gesamtsystem .....	191
8.2.2	Aufbau und Grundfunktionsprüfung .....	194
8.3	Validierung und Optimierung.....	196
8.3.1	Inbetriebnahme und erste Versuche (Reinnickel) .....	197
8.3.2	Erstversuche Nickel-Wolfram .....	204
8.3.3	Stromdichteoptimierung über Blendenauslegung.....	215
8.3.4	NiW Versuchsreihe 2 .....	219
8.3.5	NiW Versuchsreihe 3 .....	227
8.4	Fazit Fallbeispiele und Versuche .....	237
9	Reflexion der Methodik.....	241
9.1	Fazit Detailmethodik zur Optimierung der Maßhaltigkeit.....	241
9.2	Fazit Detailmethodik für eine kontaktstellenfreie, vollflächige Beschichtung..	244

---

9.3	Fazit allgemeine Methodik .....	245
10	Zusammenfassung und Gesamtfazit .....	247
10.1	Zusammenfassung der Arbeit .....	247
10.2	Diskussion der Forschungsfragen .....	251
10.3	Ausblick .....	253
11	Literaturverzeichnis .....	255
12	Anhang .....	278
12.1	Zusammenfassung methodischer und inhaltlicher Anforderungen .....	278
12.2	Anforderungsliste für Prototypanlage .....	279
12.3	Umsetzung: Konzeptermittlung .....	285
12.4	Anlagensteuerung .....	295
12.5	Versuchsparameter und -daten .....	297
12.5.1	Vorbehandlung .....	297
12.5.2	Reinnickel, Inbetriebnahme und Erstversuche .....	297
12.5.3	Nickel-Wolfram .....	298
12.6	Vorrichtung für außenstromlose Abscheidung .....	301

# Abkürzungsverzeichnis

## Abkürzungen

acatech	Deutsche Akademie der Technikwissenschaften
AR	Außenring
AwSV	Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen
B	Breite
BVT	Beste verfügbare Technik
CAD	Computer-aided Design
CAE	Computer-aided Engineering
CAM	Computer-aided Manufacturing
CVD	Chemical Vapour Deposition, chemische Gasphasenabscheidung
D	Durchmesser
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
DIN	Deutsches Institut für Normung
ED	Einbaudurchmesser (Innenring: Innendurchmesser, Außenring: Außendurchmesser)
EKP	Entwicklungs- und Konstruktionsprozess
ET	Eintauchtiefe
FEM	Finite Elemente Methode
Fraunhofer IPA	Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
H	Höhe
IAS-NT	Integriertes Automatisierungssystem der Fa. Diener Automation
IF	Inhaltliche Anforderung
IR	Innenring
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry
KF	Kontaktfläche
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
LF	Lauffläche (des Wälzkörpers)
Me	Metallisches Element (Platzhalter in allgemeinen Gleichungen)
MF	Methodische Anforderung

---

MS	Messstelle / Messpunkt
MVN	Münchener Vorgehensmodell
MW	Mittelwert
Ni	Nickel
NiW	Nickel-Wolfram
PDM	Produktdatenmanagement
PE	Polyethylen
PEEK	Polyetheretherketon
PEP	Produktentstehungsprozess
PL	Performance Level
PLC	Programmable Logic Controller
PMMA	Polymethylmethacrylat
PP	Polypropylen
PTFE	Polytetrafluorethylen
PVC	Polyvinylchlorid
PVD	Physical Vapour Deposition, physikalische Gasphasenabscheidung
PVDF	Polyvinylidenfluorid
RB	Rollenblende
RFA	Röntgenfluoreszenzanalyse
SD	Stromdichte
SdT	Stand der Technik
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDW	Verein Deutscher Werkzeugmaschinen e. V.
WHG	Wasserhaushaltsgesetz

### Großbuchstaben

<i>A</i>	[m <sup>2</sup> ]	Fläche
<i>C</i>	[mol/cm <sup>3</sup> ]	Konzentration
<i>D</i>	[cm <sup>2</sup> /s]	Diffusionskoeffizient
<i>F</i>	[C/mol]	Faraday-Konstante
<i>I</i>	[A]	Stromstärke
<i>J</i>	[mol/(s cm <sup>2</sup> )]	Massenbewegung
<i>J</i>	[A/dm <sup>2</sup> ; %]	Stromdichte (absolut; prozentual zur Nennstromdichte)
<i>M</i>	[g/mol]	Molekulargewicht

---

$P$	[Pa]	Druck
$Q$	[As]	Ladung
$R$	[ $\Omega$ ]	Widerstand
$S$	[ $\mu\text{m}$ ; %]	Schichtdicke; normierte Schichtdicke
$T$	[K; $^{\circ}\text{C}$ ]	Temperatur
$U$	[V]	Potenzial / Spannung

### Kleinbuchstaben

$d$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte
$e$	[-]	Elektron
$e$	[-]	Eulersche Zahl
$f$	[N]	durch Schwerkraft ausgeübte Kraft
$i$	[A/m <sup>2</sup> ]	Stromdichte / Austauschstromdichte
$j$	[%]	Stromdichte prozentual zur Nennstromdichte
$k$	[-]	Korrekturfaktor
$m$	[kg; g]	Masse
$n$	[-]	Platzhalter für natürlichen Zahlenwert
$v$	[m/s]	Geschwindigkeit
$z$	[-]	Ladungszahl

### Griechische Buchstaben

$\alpha$	[-]	Transferkoeffizient
$\beta$	[-]	Stromausbeute
$\eta$	[kg/(ms)]	Viskosität
$\nu$	[-]	stöchiometrischer Faktor / stöchiometrische Zahl
$\nu$	[cm <sup>2</sup> /s]	kinematische Viskosität
$\sigma$	[1/ $\Omega$ ]	elektrische Leitfähigkeit
$\phi$	[V]	Potenzial



# Abbildungsverzeichnis

1.1: Anforderungen und technische Situation .....	30
1.2: Einordnung der vorliegenden Arbeit in die „Differenzierte Methodik der Technikwissenschaften“ nach Spur .....	40
1.3: Aufbau der Arbeit in Anlehnung an H. Ulrich .....	41
2.1: Arten der Kontaktkorrosion .....	45
2.2: Lochfraßkorrosion (unterbrochene Passivschicht) .....	46
2.3: Fig. 1 und Fig. 2 des Schutzrechts DE19839479 .....	53
3.1: Aufbau eines galvanischen Bades .....	57
3.2: Schematische Darstellung einer Schichtdickenverteilung .....	59
3.3: IPA Beschichtungsstand .....	62
3.4: Primärer Stromdichteverlauf des Profilkörpers .....	63
3.5: Schematische Darstellung der Wirkung von Hilfskathoden .....	67
3.6: Gestell mit Klemmkontakten und eingesetzten Ringen .....	77
3.7: Beispiel einer Gestellgalvanikanlage .....	78
4.1: Drei Produktentwicklungsprozesse nach Ulrich und Eppinger .....	85
4.2: Entwicklungs- und Konstruktionsprozess nach VDI 2221 .....	86
4.3: Münchener Vorgehensmodell (MVN) mit Standardvorgehen .....	87
4.4: Das „integrated Product engineering Model (iPeM)“ .....	88
4.5: Action Model nach Haberfellner .....	89
4.6: Spiralmodell nach Boehm .....	90
4.7: V-Modell in Anlehnung an VDI 2206 .....	92
4.8: Vergleich zwischen einem herkömmlichen (prädiktiven) und einem agilen Prozess	93
4.9: OODA Loop nach Boehm .....	94
4.10: Ablauf von Scrum .....	95

6.1: Im Rahmen der Arbeit erstellte allgemeine Entwicklungsmethodik .....	116
7.1: Instanzierte Methodik für die Problemstellung dieser Arbeit .....	126
7.2: In der Arbeit entwickelte Detailmethodik zur Erarbeitung eines vollflächigen, kontaktstellenfreien Beschichtungskonzepts (Entwicklungssegment 1).	133
7.3: Analyse der Stromdichteauswirkung eines Rollkontakts.....	142
7.4: Entwickelte Methodik zur Schichtdickenprognose und Optimierung der Schichtdickenverteilung (Entwicklungssegment 2).....	153
7.5: Zusammenhang zwischen Messpunkten des Profilkörpers zur primären Stromdichte .....	157
7.6: Grafische Darstellung des Korrekturfaktorverlaufs für 0,5 A/dm <sup>2</sup> und 2 A/dm <sup>2</sup> ...	161
7.7: Vergleich verschiedener Trendlinien für 2 A/dm <sup>2</sup> -Messwerte .....	162
8.1: Beispieldarstellungen eines Schrägkugellagers .....	169
8.2: Skizzierte Lösungsvarianten .....	171
8.3: Varianten zur Umsetzung in horizontaler Lage mit Rollen an den Stirnseiten. ....	174
8.4: Handskizze Vorrichtungsentwurf mit Außenring .....	176
8.5: Exportiertes Bild des Original-Elsy2D-Modells (beschriftet) .....	179
8.6: Modellausschnitt ohne (links) und mit (rechts) Rollenblende .....	180
8.7: Visualisiertes Berechnungsergebnis ohne / mit Rollenblende (Modellausschnitt)..	181
8.8: Primäre Stromdichteverteilung (Draufsicht) .....	182
8.9: Auswertungsrichtlinie für Innen- und Außenring .....	183
8.10: Auswertung Außenring für ein Anodenpotenzial .....	184
8.11: Effektivverteilung des Innenrings mit Prognoselinien bei einem Gleichrichterpotenzial .....	186
8.12: Effektivverteilung des Außenrings mit Prognoselinien bei einem Gleichrichterpotenzial .....	186
8.13: Simulierte primäre und prognostizierte Stromdichte am Außenring .....	188
8.14: Vergleich verschiedener Optimierungsrechnungen ohne Rollenblende.....	189
8.15: Ansichten von Horizontalvorrichtung (mit AR) und Anodensystem .....	192
8.16: Ansicht der Anlage nach Aufstellung im Technikum.....	194

---

8.17: Horizontalvorrichtung (links), Anodensystem mit Behälter (rechts) .....	195
8.18: Entnommene Segmente für Querschliffe .....	199
8.19: Makroaufnahmen der ersten Ringbeschichtungen .....	200
8.20: Kontaktrolle und Kontaktscheibe nach EV02 (IR25) mit 6 U/min .....	202
8.21: Außenring 25 nach Beschichtung ohne Kontaktrollenblende .....	203
8.22: Außenring 35 aus NiW-EV02 .....	207
8.23: Kontaktflächen-Detailansichten .....	208
8.24: Kontaktrolle nach zwei Nickel-Wolfram-Beschichtungen .....	209
8.25: Schmale Stirnseite des Innenrings 45 (EV03) .....	210
8.26: Schichtdickenmesswerte der Innenringe (NiW-Erstversuche) .....	211
8.27: Schichtdickenmesswerte der Außenringe (NiW-Erstversuche) .....	212
8.28: Normierte Verläufe der vermessenen Innenringe der NiW-Erstversuche .....	213
8.29: Modellierte Blendengeometrie für Optimierung .....	216
8.30: Simulationsergebnisse mit Blenden inkl. Prognose für Innenring .....	217
8.31: Simulationsergebnisse mit Blenden inkl. Prognose für Außenring .....	218
8.32: Blenden für Außenringe .....	219
8.33: Kontaktrolle nach mehreren Versuchen ohne Überschleifen .....	221
8.34: Makroansichten aus Versuchsreihe 2 .....	222
8.35: Kontaktflächen-Ansichten .....	222
8.36: Querschliff-Aufnahmen von Kontaktflächen .....	223
8.37: Normierte Verläufe der vermessenen Innenringe aus Versuchsreihe 2 .....	225
8.38: Normierte Verläufe der vermessenen Außenringe aus Versuchsreihe 2 .....	226
8.39: Normierte Verläufe der vermessenen Innenringe aus Versuchsreihe 3 .....	230
8.40: Normierte Verläufe der vermessenen Außenringe aus Versuchsreihe 3 .....	231
8.41: Geätzte Querschliffe der Kontaktflächen .....	232
8.42: Geätzte Querschliffe am Einbaudurchmesser .....	232
8.43: 1 A/dm <sup>2</sup> Nennstromdichte, Ansicht von oben und unten (ungewaschen) .....	234
8.44: 0,5 A/dm <sup>2</sup> Nennstromdichte, Ansicht von oben .....	235

---

8.45: Nickel-Phosphor-Schicht (stromlos abgeschieden), Ansicht von oben.....	236
9.1: Prognoseabweichungen für Innenringe.....	242
9.2: Prognoseabweichungen für Außenringe.....	243
12.1: Anlagenübersicht der Benutzeroberfläche.....	295
12.2: Verwaltung der Betriebsparameter beider Badstationen.....	295
12.3: Beispielhaftes Versuchsprotokoll.....	296
12.4: Diagramm der protokollierten Istwerte für Versuch EV01 (AR55).....	298
12.5: Istwerte-Diagramm NiW-EV02 / AR35.....	300
12.6: Istwerte-Diagramm NiW-V41.....	301
12.7: Ansicht der vereinfachten Vorrichtung zur stromlosen Beschichtung.....	302

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Anforderungserfüllung für verschiedene Anlagentypen.....	81
Tabelle 5.1: Einschätzung bekannter Ansätze für die Anforderungen dieser Arbeit an eine Methodik .....	105
Tabelle 5.2: Auflistung inhaltlicher Anforderungen (IF) .....	109
Tabelle 7.1: Erarbeitete allgemeine Merkmale und Lösungsansätze für kontaktstellenfreie Beschichtung.....	138
Tabelle 7.2: Erarbeitete beispielhafte Kategorien und Kriterien zur Bewertung .....	146
Tabelle 7.3: Stromdichtewerte der Simulationsrechnung für die Profilkörpermesspunkte .....	157
Tabelle 7.4: Normierte Schichtdickenwerte bei verschiedenen Nennstromdichten .....	158
Tabelle 7.5: Zuordnung der normierten Schichtdickenwerten zum prim. Stromdichtewert.....	160
Tabelle 7.6: Korrekturfaktoren der einzelnen Messpunktwerte .....	160
Tabelle 8.1: Zusammengefasste Daten der Wälzlagerringe .....	197
Tabelle 8.2: Übersicht Schichtdicken auf Laufflächen und Einbaudurchmessern .....	201
Tabelle 8.3: Übersicht der Erstversuchsreihe für Nickel-Wolfram .....	205
Tabelle 8.4: Auswertung der Schichtdickendaten der NiW-Erstversuche.....	212
Tabelle 8.5: Schichtdickenauswertung NiW-Versuchsreihe 2 .....	224
Tabelle 8.6: Schichtdickenauswertung NiW-Versuchsreihe 3 und Vergleichsringe.....	229
Tabelle 12.1: Auflistung inhaltlicher Anforderungen (IF) .....	278
Tabelle 12.2: Auflistung methodischer Anforderungen (MF) .....	278
Tabelle 12.3: Vollständige Anforderungsliste für Lagerbeschichtung .....	279
Tabelle 12.4: Prüfung Ausschlusskriterien und Bauteilgeometrie-eignung .....	285
Tabelle 12.5: Bewertungskriterien für Variantenauswahl .....	288
Tabelle 12.6: Variantenbewertung .....	290

---

Tabelle 12.7: Ordnungsschema zur Lösungsfindung („Morphologischer Kasten“) .....	291
Tabelle 12.8: Lösungspfad für Horizontalvorrichtung und Gesamtanlage (orange markiert) .....	293
Tabelle 12.9: Vorbehandlungsabfolge .....	297
Tabelle 12.10: Parameter Reinnickel-Elektrolyt (Referenzelektrolyt).....	297
Tabelle 12.11: Parameter Nickel-Wolfram-Elektrolyt.....	298
Tabelle 12.12: Versuchsparameter der über Querschliff ausgewerteten Lagerringe ....	299

# Kurzfassung

Mittels Beschichtungen werden Oberflächeneigenschaften gezielt beeinflusst. Neben dekorativen Aspekten erfolgen funktionale Modifikationen, beispielsweise für verbesserten Verschleiß- oder Korrosionsschutz. Bei hochkorrosiven Umgebungen wie Meerwasser und besonderen Anforderungen wie dem Verzicht von Dichtungen bei Wälzlagern zur Vermeidung von Reibungsverlusten genügen bekannte konventionelle Schichten und auch deren Herstellungsverfahren nicht den Anforderungen. Neue galvanische Schichten stellen eine potenzielle Lösung dar. Neben dem Schichtsystem ist bei diesen Anforderungen auch die Anlagentechnik für die Schichtabscheidung von signifikanter Bedeutung. Die Beschichtung muss sowohl endmaßnah als auch fehlerstellenfrei, d. h. ohne die bei elektrochemischen Verfahren notwendigen Kontaktpunkte (Schwachstellen), erzeugt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei Forschungsfragen untersucht: Können geometrisch anspruchsvoll geformte rotationssymmetrische Bauteile vollflächig, d. h. ohne Kontaktstellen, und endmaßnah galvanisch beschichtet werden? Wie kann eine Methodik für die Entwicklung einer geeigneten Anlagen- und Vorrichtungstechnik für die galvanische Beschichtung von hochbelasteten, rotationssymmetrischen Bauteilen gestaltet sein?

Es wurde daher einerseits eine für die Galvanotechnik angepasste generische Methodik für die Entwicklung von Anlagen mit besonderen Anforderungen erstellt. Diese wurde für die konkrete Problemstellung instanziiert. Für die beiden Hauptanforderungen der kontaktstellenfreien und endmaßnahen Beschichtung wurden zwei Detailmethodiken für die konkrete Bearbeitung entwickelt. Hierbei ist die Zusammenführung der interdisziplinären Aufgabenstellungen aus Maschinenbau, (Elektro-) Chemie und Physik entscheidend. Die Methodik zur Ermittlung eines Konzepts zur kontaktstellenfreien Beschichtung besteht aus einer strukturierten Vorgehensweise zur Erstellung und Auswahl einer geeigneten Lösung unter Anwendung bekannter Methoden und der Nutzung von im Rahmen der Arbeit erstellten allgemeinen Lösungsprinzipien. Die Methodik zur Optimierung der Maßhaltigkeit

beschreibt eine Kombination von Simulationsrechnungen und experimentellen Versuchen. Für die Nutzung der experimentellen Daten wurde eine Methode zur Bildung von Kennlinien entwickelt, welche eine einfache Schichtdickenprognose erlaubt. Zusätzlich wird eine Vorgehensweise zur Durchführung der Optimierung dargestellt.

Anhand der vorliegenden Anforderungen wurde die instanziierte Methodik für ein Fallbeispiel zur Beschichtung von Wälzlageringern durchgeführt. Die identifizierte Lösung zur kontaktstellenfreien Beschichtung und die Optimierung der Maßhaltigkeit wurden für eine Prototypanlage mit einer neuartigen Vorrichtung umgesetzt. Anhand dieses umgesetzten Prototyps wurde die Anforderungserfüllung experimentell durch die Beschichtung von Wälzlageringern überprüft. Die beschichteten Lagerringe wurden metallografisch ausgewertet bzw. für weitere Prüfstandversuche verwendet. Die Eignung sowohl der Methodik als auch der daraus entwickelten Beschichtungstechnik wurde somit mittels dieser ersten praktischen Anwendung validiert.



# Abstract

Coatings manipulate surface properties to comply with specific requirements. Aside from decorative purposes, there are functional modifications like improved resistance to wear or better corrosion protection. In environments with extreme corrosive conditions (e. g. seawater) and for high requirements like ball bearings without sealing (to reduce power loss caused by friction), known coatings and corresponding manufacturing technologies do not comply with the requirements. New electroplated coatings may provide a solution. Aside from suitable coating systems, corresponding manufacturing technologies are needed to fulfill the specifications of precisely machined parts. The thickness of the coating has to match the final dimensions and surface defects are not permitted, i. e. weak spots like those of contact points (which are necessary to transmit the electric current for electroplating) must be avoided.

Two scientific problems were considered in this thesis: Is it possible to electroplate geometrically challenging parts without contact points or other weaknesses, as well as applying the coating to the final dimension? How can a methodology for the development of a suitable plating device for the electroplating of rotationally symmetric, highly stressed parts be designed?

On the one hand, an overall methodology for the development of plants and devices with special requirements has been proposed. For both of the main technological requirements, i. e. plating to the final dimension without contact points or weaknesses, special methodic approaches have been developed. The interdisciplinary combination of requirements of engineering, (electro-) chemistry and physics is key for those new approaches. The methodology to identify a concept for an electroplated coating without contact points consists of a process model to create and select a solution by using known methods and principle possibilities of solutions that were created within this thesis. The methodology to improve the thickness distribution uses a combination of finite element calculations and laboratory experiments. With use of the experimental data, simplified characteristic

curves can be obtained, which provide an easily usable projection of a thickness distribution of the layer by connecting this experimental data to a calculated primary current density. Additionally, a process model to perform optimizations is described.

The developed overall methodology was adapted according to the requirements at hand and carried out using the electroplating of ball bearings as an example. Solutions for the specifications were created and a prototype device was built. Using a pilot plant containing the designed device, experimental research was conducted to verify the achievement of the requirements. Bearing rings were electroplated, analyzed and tested on special test benches. The results confirmed the practicality of the developed methodology and process models.

# 1 Einleitung

Die Anwendungsgebiete von Beschichtungen sind vielfältig. Als übergreifende Unterteilung lassen sich Schichten mit einem dekorativen und funktionalen Schwerpunkt unterscheiden. (Jelinek 2013, S. 25–27) Eine klare Trennung erscheint nicht möglich und nicht sinnvoll, da dekorative Beschichtungen auch einen funktionalen Aspekt besitzen können und umgekehrt. Als Beispiel können Zierteile aus dem Automobilbau genannt werden. Hierbei handelt es sich häufig um verchromte Kunststoffteile. Diese sind vorrangig aus dekorativen Gründen beschichtet, weisen jedoch auch die Korrosionsbeständigkeit als Anforderung auf. (Voß 2018) Weitere Möglichkeiten für den funktionalen Einsatz von Beschichtungen sind beispielsweise der Korrosionsschutz, die Bereitstellung von bestimmten Eigenschaften (wie z. B. in der Elektronikbranche Edelmetallschichten für bessere Übergangswiderstände oder das Bonden von Kontakten (Endres 2015)) oder der Verschleißschutz, wie u. a. bei hartverchromten Kolbenstangen. Auch für Trends wie beispielsweise die Elektromobilität wird die Oberflächentechnik benötigt, diese bedeutet neue Herausforderungen. (Venz 2018)

Die Gründe für den Einsatz von Beschichtungen sind neben den oben genannten technischen Gesichtspunkten häufig auch wirtschaftlicher Natur. Durch hochwertige Schichten kann ggfs. ein günstigerer Grundwerkstoff eingesetzt werden, die Lebensdauer des Produkts erhöht sich oder es können auf andere Arten Ressourcen eingespart werden, beispielsweise durch geringere Reibwerte bei Verbrennungsmotoren. (König et al. 2015a) Die Oberflächenveredelung wird im Report der Sparkassen als entscheidender Faktor für die Wettbewerbsfähigkeit in vielen Branchen eingeschätzt. Der volkswirtschaftliche Nutzen in Bezug auf Vermeidung von Korrosionsschäden wird auf 3-4 % des BIP beziffert. Bis 2017 ist der Branchenumsatz auf 7,6 Mrd. Euro gestiegen. (Deutscher Sparkassen- und Giroverband e. V. 2017) Auch bei zunehmender Globalisierung erwartet König, dass die „Hoch-Qualität“ in Europa verbleiben wird. (König et al. 2015b).

---

## 1.1 Motivation

Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz sind allgemein anerkannte Ziele. (BMBF 2014) Bei der Energieversorgung ist ein Baustein der Einsatz alternativer Technologien wie Solar- und Windenergie, aber auch Wasserkraft und Gezeitenkraftwerke. Ein weiterer Ansatzpunkt ist die direkte Reduzierung des Energieverbrauchs, welche z. B. im industriellen Maßstab durch verbesserte Energienutzung bei Produktionsprozessen erreicht werden soll und durch Förderprogramme unterstützt wird. (BMBF 2015; BMWi 2018) Auch viele Unternehmen (67 % des Mittelstands) sehen in Energieeffizienz und Umweltschutz einen Investitionsgrund. Durch eine oftmals geforderte kurze Amortisationszeit werden jedoch viele Maßnahmen nicht durchgeführt. (Bauernhansl 2014) Weitere Potenziale sind beispielsweise bei der Reduzierung von derzeit noch enorm hohen verfahrensbedingten Verlusten bzw. der Steigerung von Wirkungsgraden vorhanden. (Bauernhansl 2013, S. 6)

Im Fall von beweglichen Komponenten entstehen Verluste durch Reibung, daher sind die Oberflächen in Form und Werkstoffpaarung möglichst optimal zu gestalten. Ein Beispiel für ein sich bewegendes Maschinenelement stellen Gleit- und Wälzlager dar. Bei Wälzlagern ist dabei die Reibung gegenüber hydrodynamisch geschmierten Gleitlagern um 25–50 % geringer. Die übliche Ausführung eines Wälzlagers besteht aus jeweils einem Innen- und Außenring, einer variierenden Anzahl an Wälzkörpern (z. B. Kugeln oder Zylinderrollen) und einem Käfig, um die Wälzelemente in Position zu halten. (Ettemeyer et al. 2007, S. 4–11) Zur Verschleiß- und Reibungsverbesserung sowie als Korrosionsschutz sind Wälzkörper und Käfig geschmiert. (Matek et al. 2011, S. 495–499) Um den Schmierstoff im Innern des Lagers zu halten und ein Eindringen von Schmutzpartikeln zu verhindern, sind häufig Dichtungen an den Lagerseiten angebracht. Diese Abdichtungen müssen zur Erzielung ihrer Funktion sowohl an der Welle als auch am Gehäuse anliegen, d. h. es entsteht zwangsweise ein Reibungskontakt, welcher im Betrieb einen Widerstand für die Rotation darstellt und damit Verlustleistung erzeugt. (Ettemeyer et al. 2007, S. 26–27) Im Falle von Berührungsdichtungen „sind die durch die Dichtung bedingten Reibungsverluste unter Umständen höher als die Reibungsverluste im Lager selbst.“ (SKF Gruppe 2014, S. 109) Genaue Quantifizierungen sind von den jeweiligen Bedingungen abhängig. Reibungsverluste können eine Größenordnung von bis zu 30 % erreichen. Speziell bei einem

korrosiven Umgebungsmedium kann bisher jedoch nicht auf Dichtungen verzichtet werden, da keine geeigneten dauerstabilen Werkstoffe oder Beschichtungen existieren. (Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2016b)

Betrachtet man die Verluste durch Dichtelemente, dann ist der Verzicht auf eine Abdichtung aus Gründen der Energieeffizienz erstrebenswert. Die technischen Konsequenzen bei einem nicht abgedichteten Lager ergeben sich aus Korrosion und Verschleiß – alle Komponenten sind ohne Dichtung den Umgebungsbedingungen bzw. dem Umgebungsmedium ausgesetzt und es kann kein spezielles Schmiermedium mehr eingesetzt werden. Das Lager muss die tribologischen, korrosiven und auch den daraus kombinierten tribo-korrosiven Beanspruchungen standhalten. Bezogen auf die oben genannten Gezeitenkraftwerke leitet sich der Einsatz in einer Meerwasserumgebung ab, aber auch mit Blick auf andere Bereiche, wie die chemische Industrie, wird eine erhöhte Widerstandsfähigkeit gegen chemischen Angriff benötigt. Der derzeit am verbreitetsten eingesetzte Wälzlagerstahl 100Cr6 kann diese Anforderungen hinsichtlich der Korrosionsbeständigkeit nicht erfüllen, bereits wasserhaltige Hydraulikflüssigkeiten bewirken eine reduzierte Lebensdauer. (Sommer et al. 2010, S. 231) Auch alternative Werkstoffe wie X30CrMoN15-1 (bekannt als Cronidur 30, (Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2019, S. 15)) sind für diese Ansprüche kaum erprobt und nach ersten Untersuchungen nicht einsetzbar. (Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2016b, S. 2) Besonders im Offshore-Bereich sind Wartungen durch die unsichere Wetterlage und den notwendigen Schiffseinsatz sehr aufwändig und kostenintensiv, weshalb eine technische Lösung mit angemessener Lebensdauer benötigt wird. (Bahaj et al. 2003, S. 2208; Uihlein et al. 2016, S. 1077)

Die Beschichtung der Lager, beziehungsweise vorrangig der Stahllagerringe, stellt eine potenzielle Lösung für diese Herausforderung dar. Aus diesem Grund wurden im Rahmen des durch das BMWi geförderten Forschungsprojekts „Poseidon“ galvanische Schichten als Option gesehen und untersucht. (Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2016b) Für ein funktionsfähiges Lager mit diesen Anforderungen ist neben der Entwicklung eines tribo-korrosiv geeigneten Schichtsystems auch eine geeignete Beschichtungstechnik zur Aufbringung des Überzugs auf rotationssymmetrische Teile wie Wälzlager notwendig. Bei galvanischen Beschichtungen wird ein elektrischer Kontakt benötigt, d. h. bei üblicher

Anbringung (z. B. auf einem Gestell) erfolgt dies an Stellen, an denen die nichtbeschichteten Kontaktstellen nicht stören. Auch kann es bei ungünstiger Form des Bauteils zu Bereichen mit einer sehr dünnen Schicht bzw. keiner Schichtabscheidung kommen. (Jelinek 2013, S. 28;81-82) Eine Klärung diese Fragen ist daher für eine erfolgreiche anlagentechnische Umsetzung notwendig. Somit befinden sich die Arbeiten am Anfang der Technologieentwicklung. Diese beginnt nach Schuh und Klappert mit dem Übergang bzw. der Überlappung von Forschung und Vorentwicklung. Die Vorentwicklung dient zur Fortführung von Ideen mit hohem Neuheitsgrad und dem Bedarf von Grundlagenuntersuchungen. In dieser Phase werden der Technologiebedarf und die Eignung der Technologien eingeschätzt und ggfs. in Konzepte oder Prototypen überführt. (Schuh et al. 2011, S. 224)

Da die Verfahrens- und Anlagentechnik voneinander abhängig sind, müssen für einen erfolgreichen Einsatz zusammenhängende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten durchgeführt werden. Diese erfolgten in einer Arbeit zur Verfahrenstechnik (Kölle 2018) und dieser Arbeit. Im vorliegenden Fall ist neben einer anlagentechnischen Umsetzung für einen Einzelfall eine allgemeine Methodik notwendig, welche einen Entwicklungsrahmen für diese Art der Fragestellung mit den interdisziplinären galvanotechnischen Charakteristiken bereitstellt. Mittels der in einer Methodik integrierten Methoden und Vorgehensweisen kann die Entwicklungsqualität sichergestellt und es können Fehlentwicklungen reduziert werden. Die Entwicklung einer passenden Methodik erlaubt des Weiteren durch die strukturierte Abfolge einen nachvollziehbaren Prozess bei der Generierung und Auswahl einer Lösung. Somit wird eine Anpassung an leicht veränderte Anforderungen (beispielsweise bei einer Skalierung der Lösung) erleichtert und der Aufwand minimiert.

## 1.2 Problemstellung und Forschungsfragen

Die Toleranzen von Wälzlagern (Maß- und Formgenauigkeit) sind in DIN 620 festgelegt. (Matek et al. 2011, S. 492) Ein beschichtetes Lager muss daher ebenfalls diese geometrischen Anforderungen erfüllen. Auch die mechanische Belastbarkeit muss vergleichbar zu einer herkömmlich gefertigten unbeschichteten Ausführung sein. Durch die Bedingungen

---

im Kontaktbereich müssen Wälzlager wegen der hohen wechselnden Beanspruchung eine gute Dauerfestigkeit aufweisen. (Scott et al. 1972, S. 21). Die tribologischen Eigenschaften werden durch die makromechanischen Effekte wie Schichthärte, Dicke, Rauheit und chemische Wechselwirkungen dominiert. (Holmberg 1992, S. 2–4) Grundlegend ist immer eine gute Schichthaftung als Voraussetzung anzusehen. Die Auslegung des Schichtsystems (Schichtdicke, Rauheit, Schichtmaterial und -struktur) gestaltet sich schwierig, da erst die Kombination aller Parameter die tribologischen Eigenschaften erzeugt und nur wenige Wechselwirkungen von Parametern bisher (in begrenztem Ausmaß) theoretisch modelliert wurden. (Holmberg et al. 2007, S. 1035)

Die Maßhaltigkeit einer galvanischen Beschichtung ist dagegen zu einem signifikanten Anteil von der Geometrie abhängig, d. h. der Anlagentechnik, insbesondere der Vorrichtung- / Gestelltechnik und der Anodensituation. (Hernández et al. 2013, S. 533) Dies wird im nachfolgenden Kapitel 3 ausführlich erklärt. Da es sich bei Wälzlagern um hochpräzise Maschinenelemente handelt, sind die Anforderungen an die Schichtdickenverteilung auf einem Lagerring sehr hoch. Die Gehäuse- und Wellendurchmesser für den Lagereinbau sind als Passungen gestaltet. (Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2017) Entsprechende Toleranzen des Lagers liegen je nach Toleranzklassen in unterschiedlichen Mikrometerbereichen. (HWG Wälzlager 2016) Die Lauffläche der Wälzkörper muss ebenfalls eine präzise Geometrie aufweisen, so dass für die Beschichtung nur eine sehr geringe Toleranz gestattet ist. Außerdem dürfen Eigenschaften wie z. B. der Rundlauf eines Durchmessers nicht negativ beeinflusst werden, da auch diese nach DIN 620 genormt sind. Als selbstgesetztes Ziel sollte eine konventionelle Nachbearbeitung (beispielsweise durch Schleifen) nach der Beschichtung vermieden werden, da dies zusätzliche Kosten verursacht und durch die notwendigen Schichteigenschaften (hohe mechanische Belastbarkeit, Härte, potenzielle Schichtschädigung durch Rissentstehung usw.) aufwändig ist.

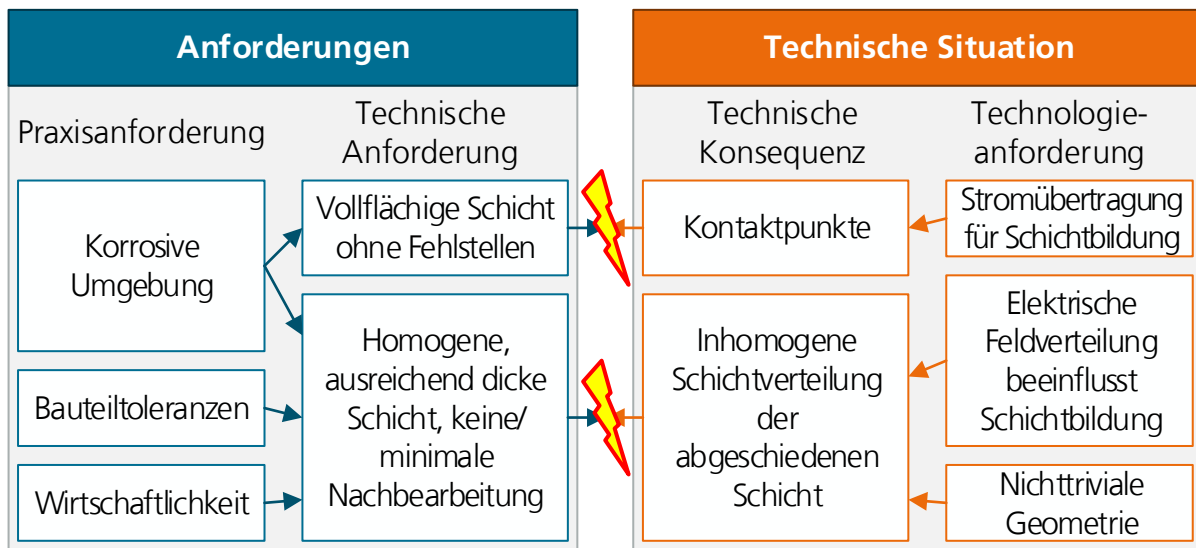


Abbildung 1.1: Anforderungen und technische Situation

Die oben genannten Anforderungen, welche generell für eine Beschichtung bei Wälzlagern gelten, werden durch die Ansprüche aus dem geplanten Einsatzzweck erweitert. Im vorliegenden Fall eines geplanten Einsatzes in korrosiver Umgebung, wie z. B. Meerwasser, erfordert dies eine vollflächige und fehlerfreie Beschichtung der Bauteile, d. h. es dürfen keinerlei Schwachstellen oder Fehlstellen im Schichtsystem auftreten. Sie bieten einen direkten Angriffspunkt für Korrosion (vgl. Kapitel 2.1). Dies steht im Widerspruch zur gebräuchlichen konventionellen Gestelltechnik, bei der die Bauteile über Klammern oder Federn gehalten und kontaktiert werden, denn an diesen Kontaktstellen wird keine durchgehende Schicht erzeugt. Bei einer galvanischen Beschichtung ist eine Stromübertragung auf das Bauteil technologiebedingt zwingend notwendig. Es muss somit eine Lösung gefunden werden, bei der auch bei einer Kontaktierung des Bauteils keine unbeschichteten Stellen verbleiben und eine vollflächige Schutzschicht hergestellt werden kann. Eine Zusammenfassung zu den Anforderungen und der technischen Situation ist in Abbildung 1.1 dargestellt. Daraus lässt sich die Forschungsfrage formulieren:

„Können geometrisch anspruchsvoll geformte rotationssymmetrische Bauteile vollflächig, d. h. ohne Kontaktstellen, und endmaßnah galvanisch beschichtet werden?“



---

Der erste Anspruch einer vollflächigen und kontaktstellenfreien Beschichtungstechnik bedeutet die Notwendigkeit einer neuartigen anlagentechnischen Lösung, bei der eine Stromübertragung auf ein rotationssymmetrisches Bauteil realisiert wird, während gleichzeitig die Schichtbildung ohne dauerhafte Verbindungspunkte stattfindet. Die zweite Forderung nach hoher Maßhaltigkeit bewirkt eine möglichst homogene Abscheidung auf allen Bauteilbereichen, was im Fall der Galvanotechnik eine gezielte Manipulation der primären Stromdichteverteilung erfordert. Wie im folgenden Stand der Technik dargestellt, existieren für beide Anforderungen keine Lösungen. Da selbst Wälzlager bereits unterschiedliche geometrische Randbedingungen aufweisen können (beispielsweise Rillen- und Schrägkugellager, Kegel- und Zylinderrollenlager usw.), muss eine Lösung unabhängig von einem Einzelfall generiert werden können. Für den allgemeinen Entwicklungsprozess ist daher eine weitere, zweite Forschungsfrage interessant:

„Wie kann eine Methodik für die Entwicklung einer geeigneten Produktionstechnik für die galvanische Beschichtung von hochbelasteten, rotationssymmetrischen Bauteilen gestaltet sein?“

Im Rahmen dieser Arbeit soll daher eine Methodik erarbeitet werden, mit der eine Produktionstechnik für die endmaßnahe, vollflächige galvanische Beschichtung eines rotationssymmetrischen Bauteils entwickelt werden kann. Als endmaßnah wird hierbei definiert, dass zur Kompensation von verfahrenstechnischen Effekten (leicht erhöhte Rauheit durch minimalste Aufwachsungen / „Pickel“) ein Finish zulässig ist, da diese Effekte gegebenenfalls während einer Verfahrensentwicklung auftreten und durch anlagentechnische Umsetzungen nicht verhindert werden können. Für die Bauteile wird davon ausgegangen, dass diese zu einem Mindestmaß galvanisiergerecht gestaltet sind und keine abgeteilten Hinterschneidungen aufweisen, welche eine galvanische Schichtabscheidung verhindern. Ein Prototyp einer Vorrichtungstechnik wird unter Nutzung der erarbeiteten Methodik entwickelt und optimiert. Dieser Prototyp erfüllt die oben beschriebenen Anforderungen und ermöglicht die Beschichtung eines ausgewählten Typs von Lagerringen. Die Konstruktion erfolgt dabei beispielhaft für dieses Lager, welches aus einem Innen- und Außenring besteht und im Technikumsmaßstab handhabbar ist. Die Entwicklung einer Verfahrenstechnik und eines Schichtsystems sind dabei nicht Bestandteil dieser Arbeit.

Die Verfahrenstechnik zur Beschichtung wurde in der parallel laufenden Arbeit zur Abscheidung von Nickel-Legierungsschichten und der Prüfung von deren tribokorrosiven Eigenschaften entwickelt. (Kölle et al. 2014; Kölle et al. 2016; Kölle 2018) Die Anlagentechnik ist jedoch nach den Ansprüchen der verwendeten Elektrolyte auszulegen und so zu gestalten, dass Lagerringe zur Überprüfung der Schicht- und Verfahrenstechnik beschichtet und ohne Nacharbeit auf einem Prüfstand getestet werden können.

### 1.3 Wissenschaftstheoretische Positionierung und Vorgehensweise

„Die Frage nach dem Wesen von Wissenschaft steht im Zentrum der Wissenschaftsphilosophie“ (Lyre 2008, S. 395) – damit eröffnet Lyre seinen Bericht einer Bestandsaufnahme in Deutschland. Die Wissenschaftsphilosophie, oft auch als Wissenschaftstheorie bezeichnet, begleitet die Wissenschaft quasi seit deren Entstehen. Francis Bacon, der mit seinem „Novum Organon“ (1620) einen Gegenentwurf zu Aristoteles machte (Bacon 1620a; Bacon 1620b; Gadenne et al. 1999) kann als historischer Vertreter genannt werden, und bis heute werden die Methoden, Vorgehensweisen und Grundlagen der Wissenschaften untersucht. Wie sich alleine an der Zusammenstellung der Jahre 1992 – 2012 zeigt (Unterhuber et al. 2014) existieren eine Vielzahl an Veröffentlichungen. Nachfolgend werden die für die Problemstellung relevanten Ansätze kurz umrissen und die Bedeutung im Kontext der Arbeit beschrieben.

#### 1.3.1 Grundlagenwissenschaften

Der früher verbreitete Induktivismus wird durch Chalmers anschaulich beschrieben. Aufbauend auf Beobachtungen werden über Induktion Theorien aufgestellt, aus denen über Deduktion Erklärungen und Vorhersagen abgeleitet werden können. (Chalmers 2007, S. 35–49) Diese Vorgehensweise beinhaltet jedoch das Induktionsproblem, welches Popper bei seinen Ausführungen zur Erkenntnislogik untersucht. Nach Ansicht von Popper sind Theorien niemals empirisch verifizierbar. Das entscheidende Kriterium stellt für ihn die

---

Falsifizierbarkeit dar, da man von „besonderen Sätzen auf die Falschheit allgemeiner Sätze schließen“ kann, nicht jedoch umgekehrt. (Popper 1935) Jedoch ist auch der Falsifikationismus nicht ohne Probleme, da „es oft nötig ist, an Theorien trotz offensichtlicher Falsifikation festzuhalten“. Für Chalmers hebt die Falsifikation die kritische Komponente bei der wissenschaftlichen Betätigung hervor. (Chalmers 2007, S. 84–86)

Eine eher strukturorientierte Herangehensweise verfolgt Kuhn. Für ihn besteht die Wissenschaft aus Paradigmen. Die „normale Wissenschaft“ arbeitet dabei innerhalb dieser Paradigmen an der Erweiterung, Verdeutlichung und Vertiefung der neuen Erkenntnisse. Die Grenzen sind erreicht, wenn die Erklärung gefundener Phänomene nicht mehr mittels des Paradigmas erfolgen kann – ein Paradigmenwechsel wird notwendig. (Kuhn 1967) Chalmers formuliert diese Auffassung als Abfolge prägnant: „Vor-Wissenschaft – normale Wissenschaft – Krise – Revolution – Neue Normalwissenschaft – Neue Krise...“, wobei die Krisen beispielsweise durch Falsifikation relevanter Theorien ausgelöst werden. (Chalmers 2007, S. 90) Nach Truran sind die vorgeschlagenen Prinzipien und Vorgehensweisen immer mit Unzulänglichkeiten behaftet. Sie geben jedoch einen Rahmen an „normativen Prinzipien“ vor, welche von ihm in vier Punkten (System zur Problemlösung, ethische Grundsätze, Rationalität und Überprüfung) zusammengefasst werden. (Truran 2013, S. 9)

Die dargestellten Ansätze wurden vorrangig mit Blick auf die Grundlagenwissenschaften entwickelt. Da es sich bei der Problemstellung dieser Arbeit nicht um ein rein erkenntnisorientiertes grundlagenwissenschaftliches Problem handelt, sind diese Ansätze für eine Einordnung nicht ausreichend. Der deduktive Ansatz in Kombination mit der Falsifizierbarkeit stellen jedoch allgemein Herangehensweisen dar und sind in Bezug auf experimentelle Untersuchungen und die Validierung der eigenen Ansätze zutreffend.

### 1.3.2 Angewandte Wissenschaften und Technikwissenschaften

Nach H. Ulrich unterscheiden sich angewandte Wissenschaften von Grundlagenwissenschaften. Als Grund führt er u. a. die Problemauswahl an, welche bei den Grundlagenwissenschaften aus „Rätseln“ besteht, während angewandten Wissenschaften ungelöste praktische Probleme zugrunde liegen. Für Lösungen sind in angewandter Forschung über den reinen Erkenntnisgewinn hinaus andere Faktoren relevant. Ulrich zitiert Lenk (Lenk 1979) und führt Kriterien wie „Sicherheit, Kostenminimierung, Haltbarkeit“ usw. an. Das „Forschungsregulativ“ ist für Ulrich bei angewandten Wissenschaften die *Nützlichkeit* und nicht die bei theoretischen Wissenschaften entscheidende *Wahrheit*. (Ulrich 2001, S. 171–172;220) Auch P. Ulrich und Hill unterscheiden Formalwissenschaften und Realwissenschaften (Grundlagenwissenschaften und angewandte Wissenschaften). Die angewandten Wissenschaften umfassen u. a. die Ingenieurwissenschaften und dienen „der Analyse menschlicher Handlungsalternativen zwecks Gestaltung sozialer und technischer Systeme“. (Ulrich et al. 1976, S. 305) Die Gestaltung von Systemen wird auch von Ropohl als Unterschied angeführt. Für ihn weist die Technik trotz Gemeinsamkeiten zwischen Natur- und Technikwissenschaften mit „Erfindungs-, Konstruktions- und Gestaltungspraxis andere Vorgehensweisen auf“. (Ropohl 2009, S. 23)

Ein Praxisbezug bewirkt auch externe, außerwissenschaftliche Ansprüche. Für Ropohl darf die Wissenschaft zwar nicht von Ideologien oder externen Instanzen reglementiert werden, genauso wenig sollte sie sich jedoch auf die rein „wissenschaftsinternen Ziele“ fokussieren, sondern sich auch an praktischen Gesichtspunkten orientieren. (Ropohl 2009, S. 20) Für die Problemlösung sind oftmals mehrere Hypothesen bzw. Möglichkeiten denkbar. Vor einer experimentellen Prüfung müssen diese auf Plausibilität untersucht werden. Dabei stellt das Sparsamkeitsprinzip, nach dem die einfachste Erklärung wahrscheinlich die beste ist, eine der wichtigsten Regeln dar. (Truran 2013, S. 28)

Für P. Ulrich und Hill müssen Grundprobleme in drei Kontexten gelöst werden: Entdeckungs-, Begründungs- und Verwendungszusammenhang. Der Entdeckungszusammenhang befasst sich mit Abgrenzung und konkreter Problemstellung. Der Begründungszusammenhang beinhaltet die empirische Überprüfung und umfasst deduktive Schritte zum

Erhalt von mit der Wirklichkeit übereinstimmenden Aussagen. Der Verwendungszusammenhang beschreibt Zweck und Relevanz der Aussagen. (Ulrich et al. 1976, S. 306–307) Die Definition dieser Zusammenhänge für die vorliegende Arbeit ist im Kontext der Technikwissenschaften sinnvoll, daher erfolgt dies nach einer näheren Betrachtung der hierfür vorhandenen Ansätze.

Nach Auffassung von Spur existiert aktuell keine klare Abgrenzung zwischen Technik, Technologie und Technikwissenschaft, genaue Unterteilungen (Bereiche, Aufgaben) sind nicht vollständig klar. Über die Praxisnähe begründet er, dass die Technikwissenschaften alle Methoden umfassen, „die der Weiterentwicklung von Wissen zur Nutzenanwendung dienen“. (Spur 2007, S. 119) Die deutsche Akademie der Technikwissenschaften (acatech) definiert jedoch folgendermaßen: „Technikwissenschaften schaffen kognitive Voraussetzungen für Innovation in der Technik und Anwendung technischen Wissens und legen die Grundlagen für die Reflexion ihrer Implikationen und Folgen.“ (acatech 2013, S. 8) Weiter verdichtet die acatech die Technikwissenschaften auf drei Aufgabenfelder. Die erste Funktion ist die Erforschung und Entwicklung von Prozessen und Methoden, welche die Grundlage für Modelle und Simulationen darstellen und Vorhersagen erlauben. Die zweite ist die Beurteilung und Erforschung komplexer (technischer) Systeme bezüglich deren Potenzial zur Lösung gesellschaftlicher Probleme. Der dritte Aspekt betrachtet die eigentliche technische Arbeit, hier erlauben die Technikwissenschaften Hilfen bei Auswahl und Bewertung von Komponenten (Lebensdauer, Sicherheit usw.). (acatech 2013, S. 20)

### Entdeckungszusammenhang

P. Ulrich und Hill formulieren im Entdeckungszusammenhang eine Kernfrage: „Unter welchen Bedingungen gelangen Wissenschaftler zu fruchtbaren theoretischen Konzeptionen?“. Dabei soll der Bezugsrahmen des Forschungsprozesses, d. h. Abgrenzung, Problemstellung und Arbeitshypothesen, festgelegt werden. (Ulrich et al. 1976, S. 306) Im Rahmen der Technikwissenschaften ist der Entdeckungszusammenhang somit im Kontext dieser von der acatech postulierten drei Aufgabenfelder zu sehen.

Für H. Ulrich beginnt und endet angewandte Forschung jeweils in der Praxis, eine reale Problemstellung wird beforscht, gelöst (auch unter Einbeziehung bzw. Nutzung von

---

Grundlagen- und Formalwissenschaften) und wieder in die Praxis übertragen. (Ulrich 2001, S. 194–195) Dies trifft für diese Arbeit zu, welche das in der ersten Forschungsfrage formulierte, direkt aus der Praxis stammende Problem als Ursprung aufweist: Für das praktische Problem (endmaßnahe und vollflächige Lagerbeschichtung) wird eine Lösung gesucht. Ziel ist eine Technologie bzw. Vorrichtungstechnik, welche das Aufbringen einer galvanischen Schicht nach den benötigten Anforderungen ermöglicht. Für die Umsetzung von ingenieurwissenschaftlichen Fragestellungen existieren diverse Methodiken und Vorgehensmodelle, jedoch nicht unbedingt direkt passend für die Gestaltung einer Lösung für die vorliegenden sehr speziellen Anforderungen.

Für die technische Gestaltung sind die zugrundeliegenden Zusammenhänge bzw. Funktionen essenziell. Die Entdeckung technischer Funktionen erfolgt dabei häufig bei Gestaltungsversuchen, die theoretischen Beziehungen werden daraus abgeleitet. Bei der Gestaltung ist das Aufwand-Nutzen-Verhältnis relevant, es ist somit nicht nur das reine Erreichen einer Funktion entscheidend. (acatech 2013, S. 21–22) Dabei gilt für die acatech zur Abgrenzung zwischen Technik und Technikwissenschaften der Leitsatz „Gestaltung ist Sache der Technik, Erforschung der Gestaltungsmöglichkeiten ist Aufgabe der Technikwissenschaften.“ (acatech 2013, S. 30) Nach Rammert gilt es bei der pragmatischen Analyse technischen Wissens u. a., neue Handlungsmöglichkeiten zu schaffen und zu erproben. Die neuen Ideen sind „in die technologischen, ökonomischen, ökologischen und sozialen Gegebenheiten einzupassen“, für diese Aufgabe sind geeignete Methoden zu entwickeln. (Rammert 2010, S. 44) Nach den Vorgaben der acatech ist daher im Rahmen der Arbeit nicht nur eine reine Funktion zu erreichen, sondern ein effizientes Aufwand-Nutzen-Verhältnis sicherzustellen. Das Schaffen neuer Handlungsmöglichkeiten zur nachvollziehbaren Ermittlung von geeigneten Gestaltungsmöglichkeiten ist daher neben der praktischen Ursprungsfragestellung mit zu berücksichtigen.

Allgemeiner, über die Gestaltung hinaus formuliert, besteht somit das Ziel der Technikwissenschaften „in der Erzeugung von Gesetzes-, Struktur- und Regelwissen über Technik – in der Absicht, dieses in technischen Anwendungen zu nutzen.“ (acatech 2013, S. 19)

---

Ähnlich formuliert auch Spur: „Technikwissenschaften haben die Aufgabe, die mannigfaltigen Erscheinungsformen der Technik zu erklären und Modelle für ihre optimale Gestaltung zu entwickeln.“ (Spur 2007, S. 122)

Die Konzentration auf die reine Gestaltung einer Technik auf Grund einer unbekanntenen Umsetzungsmöglichkeit ist im Rahmen dieser Arbeit daher zu kurz gegriffen. Eine Methodik mit Identifikation erfolgsversprechender Gestaltungsmöglichkeiten wird für eine zukünftige, effiziente Bearbeitung dieser und ähnlicher Aufgabenstellungen benötigt. Ein interdisziplinärer Ansatz mit Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen anlagentechnischen und verfahrenstechnischen / galvanotechnischen Gesichtspunkten wird dabei als essenziell betrachtet, insbesondere die Schichtdickenverteilung und die Sicherstellung einer anforderungsgemäßen Realisierung stehen bei der Entwicklung der Vorgehensweise im Vordergrund. Die Erarbeitung eines Prognosemodells auf Basis von Simulation dient als wichtige Hilfe während der Planungs- und Entwurfsphase. Hierbei wird ein pragmatischer Ansatz, die Umsetzung eines möglichst effizienten, einfachen und damit praxistauglichen Planungswerkzeugs, bevorzugt. Abstriche bei der absoluten Genauigkeit können unter der Prämisse einer Nützlichkeit hingenommen werden.

### Begründungszusammenhang

Dem Begründungszusammenhang kommt nach Auffassung von H. Ulrich bei angewandter Wissenschaft geringere Bedeutung zu, weil weniger die Prüfung von Hypothesen und mehr die „Gestaltungsmodelle für eine erst zu schaffende Realität“ im Vordergrund steht. Entscheidend für diese Gestaltungsmodelle ist deren Tauglichkeit im Anwendungszusammenhang. Der Geltungsbereich der Erkenntnisse muss dabei sinnvoll abgegrenzt werden. (Ulrich 2001, S. 173–176) Nach Rammert entsteht technisches Wissen, indem es sich über die praktische Funktion als brauchbar erweisen muss. Daher stellen in den Technikwissenschaften „praktisches Können und technische Erfahrung, intuitives Wissen und experimentelles Erproben“ erforderliche Inhalte dar. (Rammert 2010, S. 40–41)

Unabhängig von der Herkunft von Forschungsthemen ist für ein Fortschreiten der Wissenschaft immer ein Erkenntnisgewinn notwendig. Technologische Theorie besteht für

Kornwachs aus verbundenen Regeln, welche anhand ihrer Effektivität beurteilt werden (nicht der Wahrheit). (Kornwachs 2010, S. 144)

Im Rahmen der Arbeit werden die erarbeiteten Ergebnisse daher anhand der vorliegenden Fragestellung als Fallbeispiel durchgeführt. Eine praktische Umsetzung erfolgt im Rahmen des Aufbaus einer Prototypanlage, welche eine experimentelle Überprüfung erlaubt. Anhand der Durchführung der Methodik und der Bewertung der Versuche wird eine Bewertung sowohl bezüglich der Tauglichkeit als auch der Effektivität vorgenommen.

### Verwendungszusammenhang

Den Einfluss der realen (gesellschaftlichen, marktwirtschaftlichen, unternehmerischen) Umgebung sieht Brockhoff bei einer marktorientierten Sicht auf die Technikwissenschaft, u. a. durch eine Rechenschaftspflicht gegenüber anderen und dadurch eine Vorgabe von Themen. Technikwissenschaftler sollen sich zur Verringerung von Misserfolgen somit auf die Nutzer einstellen und unterliegen in ihrer Arbeit einer individuellen Nutzenorientierung. (Brockhoff 2010, S. 183–184)

Eine Nutzung der Ergebnisse dieser Arbeit erfolgt in der direkten Umsetzung für die Entwicklung und Untersuchung von Beschichtungslösungen für Wälzlagerringe. Sie kann darüber hinaus für ähnliche Fragestellungen zur Sicherstellung einer effizienten und risikominierten Entwicklung angepasster Lösungen verwendet werden. Insbesondere eine Skalierung der Umsetzung des Prototyps ist naheliegend.

### Einordnung der Arbeit

Eine Einordnung der Arbeitsinhalte in die differenzierte Methodik der Technikwissenschaften nach Spur findet sich in Abbildung 1.2. Kern der wissenschaftlichen Aufgabe ist die Methodik für die Entwicklung einer kontaktstellenfreien galvanischen Beschichtungsvorrichtung, ergänzt durch die geforderte Maßhaltigkeit für die beschichteten Bauteile. Daraus resultiert eine interdisziplinäre Problemstellung mit Wechselwirkungen zwischen physikalischen, (elektro-)chemischen und anlagentechnischen Herausforderungen.



---

Eine Bewertung der Praktikabilität der Methodik (generische Methodik als auch der Detailmethodiken zur kontaktstellenfreien Beschichtung, Maßhaltigkeit und Schichtdickenoptimierung) sowie der Möglichkeiten und Einschränkungen des Prognosemodells zur Schichtdickenverteilung wird anhand von Versuchsbeschichtungen vorgenommen.



Abbildung 1.2: Einordnung der vorliegenden Arbeit in die „Differenzierte Methodik der Technikwissenschaften“ nach Spur (Spur 2007, S. 124) (eigene Inhalte stichwortartig kursiv in grau hinterlegten Feldern)

### 1.3.3 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit wird nach der von H. Ulrich vorgeschlagenen Strategie angewandter Forschung aufgebaut (siehe Abbildung 1.3). Anhand der unter 1.1 und 1.2 beschriebenen Ausgangssituation werden die für die Arbeit relevanten Anforderungen und der bekannte Stand der Technik bestimmt (Kapitel 2 bis 4), anschließend werden die notwendigen Innovationsinhalte (Kapitel 5) ermittelt.

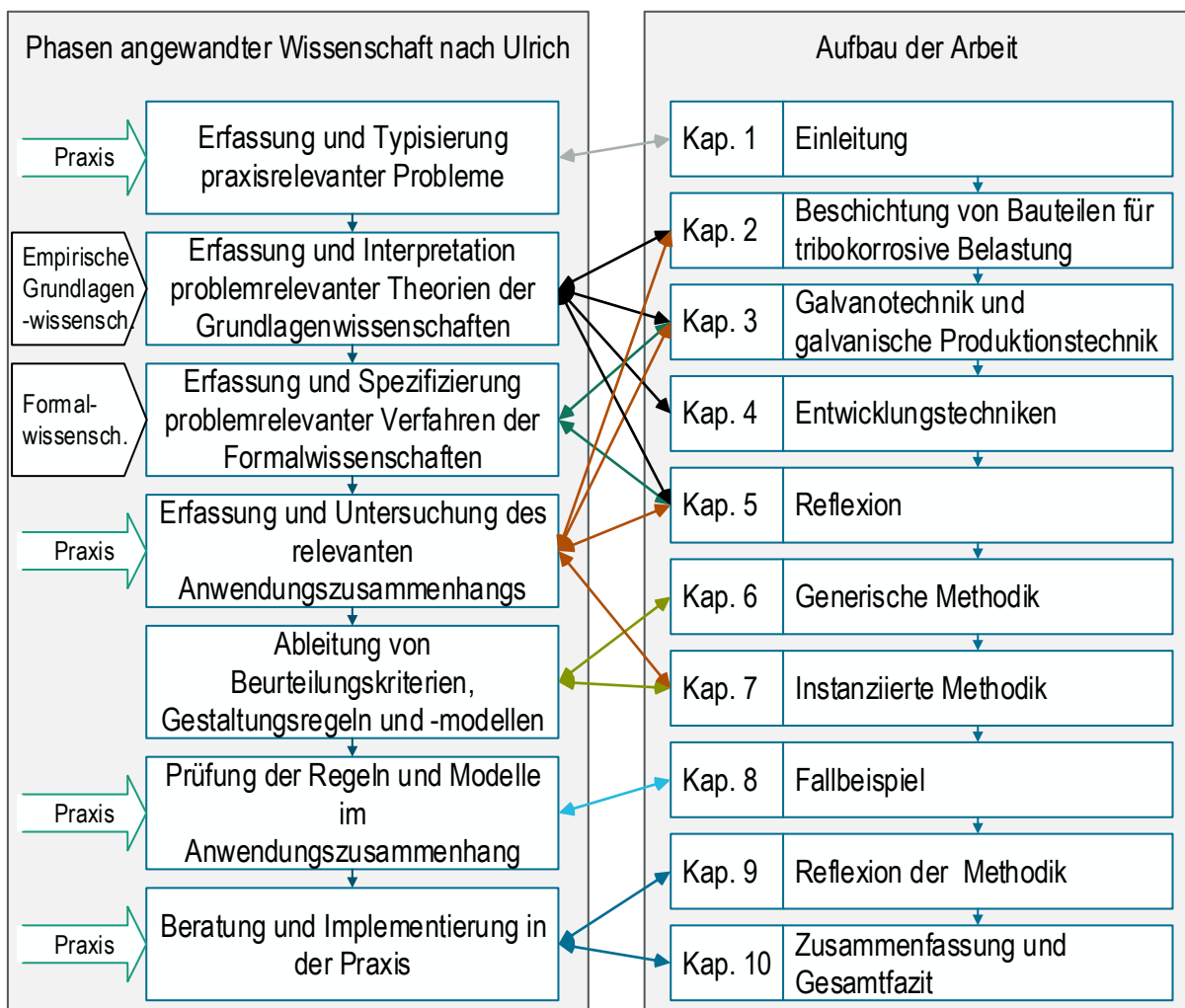


Abbildung 1.3: Aufbau der Arbeit in Anlehnung an H. Ulrich (Ulrich 2001, S. 195)

Im Anschluss an die Grundlagen wird der Forschungskern dieser Arbeit vorgestellt (Kapitel 6). Für die Entwicklung galvanotechnischer Anlagen mit speziellen Anforderungen wird eine Methodik entwickelt, welche den Rahmen für die strukturierte Bearbeitung

---

mehrerer paralleler Herausforderungen bereitstellt. Dabei können durch eine schwerpunktmäßig iterative Herangehensweise auch agile Elemente bei der Bearbeitung des Entwicklungsprozesses integriert werden. Die Methodik wird dabei allgemein formuliert (Kapitel 6) und anschließend für die vorliegende Problemstellung instanziiert (Kapitel 7).

Im Rahmen der Instanziiierung werden die konkreten Hauptaspekte dieser Arbeit in die generische Methodik integriert (Kapitel 7.2). Da für einige technische Problemstellungen keine bekannten Lösungen existieren, werden hierfür zwei Methodiken auf Detailebene entwickelt. Es wird einerseits eine Methodik zur Auswahl und Bewertung einer Technik zur kontaktstellenfreien galvanischen Beschichtung entwickelt (Kapitel 7.3). Diese erlaubt die Ermittlung eines bestmöglichen Konzepts für eine konstruktive Umsetzung und berücksichtigt gegebene Randbedingungen der Galvanotechnik und potenzielle Anforderungen an Schicht und Bauteil. In diesem Rahmen werden die theoretischen Gegebenheiten und Zusammenhänge aufgearbeitet, welche die Grundlage für den späteren Lösungsansatz bilden. Mit eingeschlossen bei dieser Betrachtung werden u. a. die Bedingungen an einer Kontaktstelle (Schichtausbildung, Mitbeschichtung des Kontakts und Umgebungseinfluss) und die Erarbeitung von potenziellen Möglichkeiten für die Vermeidung von Fehlstellen durch die Kontaktierung.

Die zweite Detailmethodik befasst sich mit der Optimierung der Schichtdickenverteilung (Kapitel 7.4). Hierbei wird für die Anforderung der Maßhaltigkeit ein neuartiges Prognosemodell erstellt, welches eine einfache Verknüpfung von experimentellen Daten mit einer simulierten primären Stromdichteverteilung ermöglicht. Dies erlaubt eine praxisnahe, einfache Abschätzung der Schichtdickenverteilung eines galvanischen Beschichtungsprozesses bereits in der Planungsphase einer Anlagen- und / oder Vorrichtungsentwicklung. Für die geforderte Optimierung der Schichtdickenverteilung werden die aus dem Stand der Technik bekannten Möglichkeiten zur Beeinflussung der primären Stromdichteverteilung bezüglich der resultierenden Effekte und Mängel betrachtet. Anhand dieser Betrachtung kann eine Anwendungshierarchie erstellt werden, welche eine strukturiertere Vorgehensweise bei der Optimierung über Simulationsrechnungen erlaubt. In Kombination mit der Simulationsrechnung und der Schichtdickenprognose kann so in iterativen Schritten eine Optimierung der Schichtdickenverteilung erfolgen.

---

In den Technikwissenschaften muss sich die Theorie in der Praxis bewähren, daher werden die erarbeiteten Methodiken in einem Fallbeispiel praktisch angewendet (Kapitel 8). Als Anwendungsbeispiel dient hierbei die ausschlaggebende Zielsetzung dieser Arbeit, die vollflächige und endmaßnahe Beschichtung einzelner Wälzlagerringe. In Kapitel 8.1.1 wird mittels der entwickelten Methode ein erfolgsversprechendes Lösungskonzept für die kontaktstellenfreie Beschichtung identifiziert und ausgewählt. Der galvanische Verfahrensraum wird parallel zum Entwurf der Beschichtungsvorrichtung und der Anlage durch Simulation der primären Stromdichteverteilung ausgelegt und über das Prognosemodell eine mögliche Schichtdickenverteilung beurteilt (Kapitel 8.1.2). Da für eine Bewertung das Verhalten des Prognosemodells für unterschiedliche Zustände / Berechnungen interessant ist, wird eine Endoptimierung der Schichtdickenverteilung in mehreren Schritten erst während der späteren Beschichtungsversuche vorgenommen.

Nach der Zusammenführung aller Aspekte im Gesamtsystem und Realisierung aller Komponenten (Kapitel 8.2) wird die Prototypanlage inkl. der Vorrichtungen in Betrieb genommen und es werden Beschichtungen durchgeführt. Die prinzipielle Funktion wird somit validiert, die Schichtdickenverteilung endoptimiert (Kapitel 8.3) und anschließend die Versuchsergebnisse evaluiert (Kapitel 8.4).

Zum Abschluss werden die Gesamtmethodik und die technischen Detailmethodiken / Prognosemodelle kritisch evaluiert (Kapitel 8.4, 9) und die Ergebnisse der Arbeit sowohl bezüglich der Vorgehensweise als auch durch Berücksichtigung der Anforderungserreichung zur Beschichtung der Wälzlagerringe im Gesamtfazit bewertet (Kapitel 10).

## 2 Beschichtung von Präzisionsbauteilen für tribokorrosive Belastungen

Für eine effektive und fundierte Entwicklung neuer Lösungen ist die Kenntnis der wichtigsten zugrundeliegenden Mechanismen, sowohl bezüglich der Galvanotechnik und Korrosion als auch der Mechanik und Anlagentechnik, und der bereits erfolgten Forschungen und Erfindungen nötig. Für eine Definition der Anforderungen an die Beschichtung von Wälzlagern unter korrosivem Einfluss werden die Vorgänge der Korrosion dargestellt und der aktuelle Stand zur Fertigung und Beschichtung dieser Wälzlager erarbeitet.

### 2.1 Korrosive und tribologische Beanspruchung

#### 2.1.1 Kurzüberblick Korrosion

Die zugrundeliegenden Mechanismen der Korrosion sind kein Bestandteil dieser Arbeit und können ggfs. in der Literatur oder anhand von Beispielen nachvollzogen werden. (Schmitt 2009; Kaesche 2011; Roos et al. 2011) Die Korrosionsanforderungen sind jedoch die signifikante Ursache für die Notwendigkeit einer vollflächigen, kontaktstellenfreien Beschichtung. Für ein Verständnis der Anforderungen an die Anlagen- und Vorrichtungstechnik zur galvanischen Beschichtung werden daher die hierfür relevanten Grundlagen und Konsequenzen bei einem Auftreten von Fehlstellen in der Schicht kurz dargestellt.

Im Grundlagenwerk „Werkstoffkunde für Ingenieure“ wird folgende Definition vorgenommen: „Korrosion ist die unerwünschte, von der Oberfläche ausgehende chemische, physikalisch-chemische oder elektrochemische Reaktion eines Werkstoffes mit einem umgebenden Medium, die mit einem Schädigungsprozess, ausgehend von der Oberfläche, verbunden ist. Die Korrosion ist somit i. Allg. eine Grenzflächenreaktion.“ (Roos et al. 2011, S. 349) Speziell hervorzuheben ist dabei, dass es sich um unerwünschte Effekte

handelt und diese von der Oberfläche ausgehen, weshalb bei der Beschichtungstechnik ein großer Anteil der Prozesse für einen Korrosionsschutz ausgelegt sind, um die Oberfläche als Ausgangspunkt zu schützen und den Angriff zu minimieren oder zu vermeiden.

Wichtig zur Beurteilung des Korrosionsverhaltens eines Metalls ist das Normalpotenzial in der elektrochemischen Spannungsreihe. Metalle mit positiverem Potenzial als Wasserstoff werden von nichtoxidierenden Säuren beispielsweise nicht angegriffen. (Roos et al. 2011, S. 354) Manche Werkstoffe bilden ab einem gewissen Potenzial eine passive Deckschicht aus, welche die Phasendurchtrittsreaktionen behindert und eine sehr geringe Metallauflösung mit sich bringt. (Roos et al. 2011, S. 355–356)

Je nach Beanspruchungsart (mechanisch, chemisch, elektrochemisch, physikalisch) werden unterschiedliche Korrosionsarten unterschieden. Einerseits die allgemeine, gleichmäßige Flächenkorrosion, und andererseits viele Arten mit ungleichmäßigem Angriff, wie beispielsweise Kontakt-, Lochfraß- oder Spaltkorrosion. Am häufigsten tritt die lokale Korrosion auf, bei der der Werkstoff auf Grund von lokalen Aktiv-Passivelementen nur örtlich angegriffen wird. (Roos et al. 2011, S. 349–350)

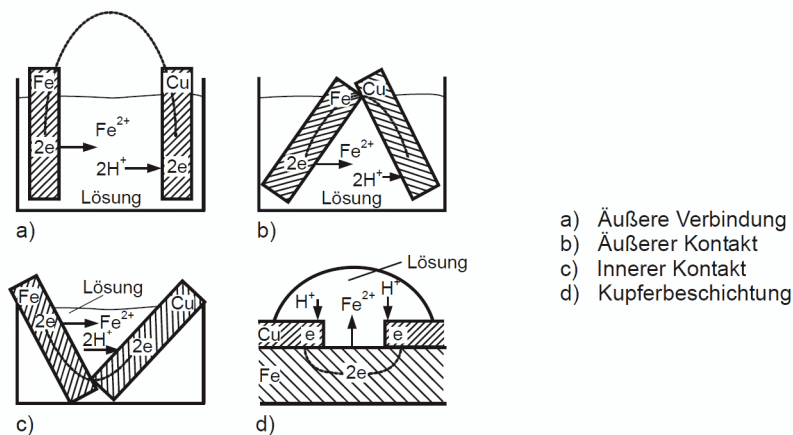


Abbildung 2.1: Arten der Kontaktkorrosion, welche beispielsweise auch bei einer unvollständigen Beschichtung d) auftreten kann. Am abgebildeten Beispiel mit Kupfer / Eisen geht Eisen in Lösung, Wasserstoff scheidet sich auf Kupfer ab. (Roos et al. 2011, S. 358)

Für die Beurteilung der Anforderungen an Beschichtungen in korrosiven Umgebungen sind sicherlich die Kontakt- und Lochfraßkorrosion am relevantesten. Kontaktkorrosion tritt auf, wenn unterschiedliche Metalle (mit meist unterschiedlichen Potenzialen)

elektrisch leitend miteinander kontaktiert und gleichzeitig über eine elektrolytische Lösung verbunden sind. Die Auflösung des unedleren Metalls wird dabei beschleunigt, da eine Elektronenleitung über die leitfähige Verbindung erfolgen kann, während gleichzeitig ein Ionenstrom zwischen Anode und Kathode auftritt. (Roos et al. 2011, S. 358) Die Ausbildung einer Passivschicht an der Oberfläche kann eine Korrosion vermeiden. Sollte sich diese Passivschicht nach einer Beschädigung nicht mehr aufbauen, kann jedoch trotzdem Lochfraßkorrosion auftreten. (Ilchner et al. 2010, S. 191)

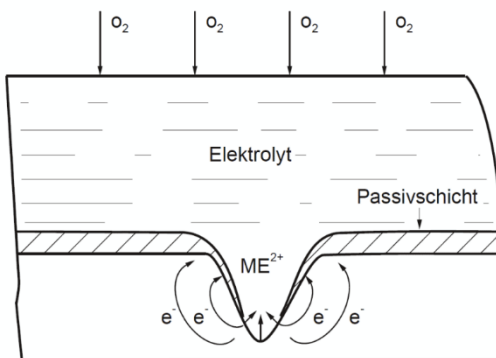


Abbildung 2.2: Lochfraßkorrosion (unterbrochene Passivschicht) (Roos et al. 2011, S. 361)

Lochfraßkorrosion kann beispielsweise bei einer beschädigten korrosionsschützenden Deckschicht auftreten. (Roos et al. 2011, S. 361)

Aus den zitierten Beispielen für Lochfraß- und Kontaktkorrosion wird deutlich, dass eine korrosionsbeständige Beschichtung nur dann richtig wirksam ist, wenn sie unbeschädigt und ohne Unterbrechungen oder Fehlstellen aufgebracht ist. Dies wurde auch in einem Patent zur Beschichtung von Lagerringen konstatiert: „Hinzu kommt die Anforderung, dass die Schicht rissfrei abzuscheiden und das Bauteil möglichst vollständig zu umhüllen ist. Ansonsten bildet die entsprechende Schicht keine perfekte chemische Schutzbarriere gegen die Umwelteinflüsse, was die Lagerstandzeit wiederum verringern würde.“ (Patentschrift DE102009023818 A1 2009, S. 2)



### 2.1.2 Tribokorrosion

Die sogenannte Tribokorrosion ergibt sich aus dem Zusammenspiel von mechanischen Verschleißprozessen und (elektro-)chemische Korrosionsprozessen. (Wood 2007, S. 5502) Grundlagen zur Tribokorrosion werden beispielsweise durch Czichos und Habig beschrieben. (Czichos et al. 2010, S. 185–192) Die korrosionsschützende Deckschicht kann bei einer tribologischen Beanspruchung verringert werden und muss sich anschließend neu aufbauen, um wieder eine stabile Passivschicht zu bilden. (Czichos et al. 2010, S. 187–188) Die Passivschichtbildung und Repassivierung spielen daher eine wichtige Rolle für die tribokorrosiven Eigenschaften. (Wood 2007, S. 5508) Die für diese Arbeit und die verwendeten Schichtsysteme relevanten Aspekte können der parallelen Arbeit zur Verfahrensentwicklung entnommen werden. (Kölle 2018) Hervorzuheben ist jedoch, dass bei einer korrosiven Unterwanderung der Schicht mit Blisterbildung eine gleichzeitige mechanische Beanspruchung durch einen Gegenkörper ein Abplatzen der Schicht erzeugen kann. (Wood 2007, S. 5507) Fehlstellen in einer Schicht sind somit nicht nur aus korrosiver Sicht, sondern auch aus funktionaler Sicht als kritisch einzustufen. Für Wood ist daher eine Erkenntnis seines Reviews zur Tribokorrosion von Beschichtungen, dass unabhängig unterschiedlicher Schichttypen und Schichtaufbauten eine qualitativ hochwertige und vollständig dichte Beschichtung notwendig ist. (Wood 2007, S. 5518)

### 2.1.3 Ableitung von Anforderungen an diese Arbeit

Die Anforderungen an die Arbeit werden anhand der Beschreibung des Stands der Wissenschaft und Technik abgeleitet. Dabei werden sie in inhaltliche Anforderungen (IF) und methodische Anforderungen (MF) strukturiert.

Die rissfreie Abscheidung und die prinzipiellen Korrosions- und Tribokorrosionseigenschaften (wie Härte, Passivierungseigenschaften usw.) sind eine Anforderung an die verwendete Verfahrens- und Werkstofftechnik bzw. die Beschichtungsparameter. Die Sicherstellung einer vollständigen Umhüllung muss jedoch von der verwendeten Vorrichtungs- und Anlagentechnik ermöglicht werden. Für die Arbeit ist daher abzuleiten:

- Bei Fehlstellen der Korrosionsschutzschicht korrodiert das Grundmaterial, wodurch das Bauteil geschädigt und durch Blisterbildung bei tribologischer Beanspruchung die Schicht ausbrechen kann. Dies führt zu veränderten tribologischen Eigenschaften und potenziell zu einem Defekt des Bauteils.
  - ▶ Inhaltliche Anforderung: Die Schicht muss vollflächig und dicht abgeschieden werden. Es dürfen keine durch die Produktionstechnik bedingten Fehlstellen / Schichtunterbrechungen (z. B. unbeschichtete Kontaktpunkte) auftreten. [Anforderung IF1 für diese Arbeit]

## 2.2 Beschichtung von rotationssymmetrischen Präzisionsbauteilen am Beispiel von Wälzlagern

Ein wichtiges Konstruktionselement bei Maschinen und Anlagen stellen Lagerungen dar, diese „ermöglichen Relativbewegungen von Maschinenteilen und stellen somit im Sinne der Getriebelehre die konkrete Ausformung von Gelenken dar“. (Steinhilper 2012, S. 71) Es werden mehrere Typen unterschieden, Linear- und Drehlager mit einem Freiheitsgrad, Dreh-Schubgelenke und Gelenklager mit zwei bzw. drei Freiheitsgraden. Eine Lagerung muss zwei Hauptforderungen erfüllen: Erstens die Gewährleistung der Funktion (Führung der Bauteile zueinander) und zweitens einen möglichst geringen Bewegungswiderstand zur Vermeidung eines unnötigen Energieaufwands. Die Wirkprinzipien sind gleitend / bohrend, rollend oder wälzend, wobei wälzend eine Kombination von rollenden und gleitenden Bewegungen darstellt. (Steinhilper 2012, S. 71–73)

In dieser Arbeit werden als Beispielbauteile Wälzlagerringe verwendet, daher werden spezifische Anforderungen an diese Bauteile beschrieben. Nachfolgend beschriebene Grundlagen beschränken sich dabei auf die in dieser Arbeit relevanten Aspekte.

### 2.2.1 Aufbau und Toleranzen von Wälzlagern

Diese Arbeit behandelt rotationssymmetrische Bauteile, daher werden Linearlager nicht weiter berücksichtigt. Die folgenden Abschnitte geben eine grundlegende Einführung in

die Wälzlager und fokussieren auf die Themenbereiche, welche für eine Beschichtung bzw. für die Anforderungen an die Beschichtungsapplikation relevant sind.

### Aufbau und Funktion

Ein Wälzlager besteht aus mehreren Komponenten: Den Rollbahnelementen (bei Radiallagern der Innen- und Außenring), den Wälzkörpern und einem Käfig, welcher die Wälzkörper in Position hält. Die Wälzkörper können dabei unterschiedliche Geometrien wie Kugeln, Zylinderrollen, Nadeln usw. aufweisen. Die Kontaktpunkte von Wälzkörpern und Rollbahnelementen unterliegen hohen Lasten (je nach Wälzkörper Punkt- oder Linienlasten), so dass spezielle Wälzlagerstähle wie 100Cr6 oder Cronidur 30 eingesetzt werden. (Matek et al. 2011, S. 479)

Rotierende Wälzlager werden nach ihrer Lastrichtung in Axial-, Radial- und Schräglager unterschieden. Die ersten beiden Bauarten sind überwiegend oder sogar ausschließlich auf den jeweiligen Lasttyp ausgelegt, ein Schräglager hingegen ist für beide Belastungen und deren Kombination geeignet. Ein Beispiel dafür ist ein Schrägkugellager, welches über Variation des Druckwinkels auf verschiedene Einsatzbedingungen abgestimmt werden kann. (Steinhilper 2012, S. 138–146)

### Toleranzanforderungen

Wälzlager werden von mehreren Normen abgedeckt, eine Übersicht wird in DIN 611 geliefert. (DIN 611) Die Abmessungen und deren Mess- und Prüfverfahren werden in DIN 620 beschrieben (z. B. Teil 1 für Messverfahren, Teile 2 und 3 die Toleranzen für Radial- und Axiallager (DIN 620-3; DIN 620-1; DIN 620-2)). Die Lager werden hierbei in Toleranzklassen unterteilt.

Wälzlager werden axial über Deckel, Muttern, Sprengringe o. ä. fixiert. Radial sollte vorzugsweise ein fester Sitz angestrebt werden. In der Realität werden häufig auch lose Passungen / Übergangspassungen angewendet. Nach DIN 620 sind die Durchmesser vom Nenndurchmesser aus ins Minus toleriert. Die geeignete Passungsauswahl kann dabei den Herstellerkatalogen entnommen werden. (Steinhilper 2012, S. 151)

Für die Innen- und Außendurchmesser ist die erlaubte Abweichung, wie bei Passungen, abhängig vom Absolutwert des Nennmaßes. Beispielsweise ist bei einem Lager mit einem Innendurchmesser von 90 mm und einem Außendurchmesser von 160 mm eine Abweichung des mittleren Bohrungsdurchmessers  $\Delta_{\text{dmp}}$  von 0 bis -20  $\mu\text{m}$  für den Innenring und 0 bis -25  $\mu\text{m}$  für den Außenring erlaubt (Toleranzklasse P0). Bei einer höheren Toleranzklasse wird der Bereich kleiner, für Toleranzklasse P6 wären es bei gleichen Lagerabmessungen nur noch -15  $\mu\text{m}$  / -18  $\mu\text{m}$  für den Innen-/Außenring. (HWG Wälzlager 2016) Eine solche Größe im Bereich von einigen bis zu mehreren hundert Millimetern wird im allgemeinen Maschinenbau sicherlich am häufigsten eingesetzt, für Großmaschinen werden jedoch auch Lager im Bereich mehrerer Meter Durchmesser hergestellt. (Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2013)

Neben den für den Einbau relevanten Durchmessern sind weitere Abmessungen wichtig und unterliegen vorgegebenen Form- und Lagetoleranzen. Herauszuheben sind dabei die Rundheit und Welligkeit, eine Übersicht findet sich beispielsweise in einer Broschüre des Herstellers Schaeffler. (Schaeffler KG 2007)

### 2.2.2 Beschichtungen

In einer Studie des Vereins Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken (VDW) wurde die Beschichtung von Lagern durch verschiedene Techniken (CVD-/ PVD-Verfahren, thermisches Spritzen, Galvanisieren) untersucht. Die beiden Hauptaufgaben einer Beschichtung, die Minimierung von Reibung und Verschleiß, wurden von keiner Schicht gleichzeitig erfüllt. (Weck et al. 1989, S. 7)

Die Anforderungen an Beschichtungen lassen sich unter den Überbegriffen Haftfestigkeit (kein Abplatzen unter Beanspruchung), Zähigkeit, chemische Verträglichkeit (Schicht und Zwischenstoff), Fertigungstechnik (beherrschbar, reproduzierbar) und Wirtschaftlichkeit gliedern. Wirtschaftlich sind nach Weck und Steinert Beschichtungen bei niedrigen Temperaturen unter der Anlasstemperatur des Wälzlagerstahls vorteilhaft, da dann auf eine thermische Nachbehandlung verzichtet werden kann. (Weck et al. 1989, S. 20–22)

Als Fazit der Studie wurde die Haftung als vorrangige Anforderung ermittelt, welcher ggfs. Reibungs- und Verschleißeigenschaften untergeordnet werden sollen. Aussagen bezüglich einer optimalen Schicht können nicht allgemeingültig getroffen werden, sondern sind immer im Kontext der speziellen Anwendung zu sehen. (Weck et al. 1989, S. 49–51)

In dieser Arbeit sind nur galvanisch aufgebraute Schichten relevant, daher werden im weiteren Verlauf nur solche Beschichtungen näher betrachtet. In der Literatur wird als elektrochemisches Verfahren die Dünnschichtverchromung als Option einer harten Schicht genannt. Abgeleitet von der Hartverchromung werden ca. 3 µm Schichtdicke abgeschieden, bei sehr guter Haftfestigkeit können hohe Belastungen ertragen werden. (Kleinlein 1998, S. 137–138)

### Patente für galvanische Beschichtungen von Wälzlager- ringen

Im Gebrauchsmuster G9116756.6 werden als Ansprüche mehrere Kombinationen aus Oberflächenrauheit und Schichtdicke geltend gemacht. Entweder ist die Oberflächenrauheit größer als die Schichtdicke (Rz 0,3-9,0) oder die Schichtdicke ist bei geschliffenen Lagern 0,1 µm - 3,0 µm dick. Auch die Laufbahn wird mitbeschichtet, es wird jedoch keine Vorrichtung zur Beschichtung beschrieben oder eine Aussage zur kompletten Beschichtung gemacht. Die Härte der Schicht muss mindestens 650 HV betragen. (Gebrauchsmuster G 91 16 756.6 1991)

Im Patent DE102009023818 werden Wälzlager mit einer galvanisch oder außenstromlos abgeschiedenen dünnen Nickel-Legierungsschicht beschrieben. Die geringe Schichtdicke von 2 µm oder weniger verändert die Toleranzklasse des Lagers nicht. Vorzugsweise werden die Schichten außenstromlos / chemisch aufgebracht, d. h. ohne externe Stromquelle. Bei einer elektrischen Kontaktierung würde an den Kontaktstellen keine Schicht abgeschieden, „eine vollständige Schutzschicht wäre so nicht erzeugbar“. (Patentschrift DE102009023818 A1 2009) In der Offenlegungsschrift DE102010031439 wird ein Lager ähnlich zum zuvor genannten Patent beschrieben. Die Beschichtung besteht jedoch aus einer außenstromlos abgeschiedenen Nickel-Phosphor-Schicht. (Patentschrift DE102010031439 A1 2010)

DE102011075497 beansprucht die Ausführung eines Wälzlagers, bei dem diverse Funktionsflächen mit einer Sonderbeschichtung versehen sind, welche auch aus einer elektrolytischen Beschichtung bestehen kann. Über die genaue Zusammensetzung und Applikation dieser Schicht über Vorrichtungen sind keine Angaben vorhanden. Da bei einer Abstimmung der Schicht auf die Anforderungen der Wälzkörperlaufbahn die Korrosionsschutzwirkung nicht zufriedenstellend ist, werden vorrangig die Flächenabschnitte zur Aufnahme eines Dichtrings geschützt. (Patentschrift DE102011075497 A1 2011)

Im Schutzrecht DE102014206701 werden Lagerringe beansprucht, welche auf einem Teilbereich mit verschiedenen galvanischen Schichten wie beispielsweise Zink-Nickel, Zink-Eisen, Nickel o. ä. und auf einem zweiten Teilbereich mit einer Brünierschicht versehen sind. Nach Abschluss aller Beschichtungen verläuft keine Schicht vollflächig über alle Lagerringflächen. (Patentschrift DE102014206701 A1 2014)

Über die verwendete Anlagentechnik liegen im Regelfall bei der Beschreibung von Schichten und Schichtsystemen keine Angaben vor. Bei nicht vollflächigen Schichten können auch herkömmliche Gestelltechniken eingesetzt werden, oder es werden Trommeltechniken oder Umlaufgestelle ohne elektrische Kontaktierung verwendet (genauere Beschreibung galvanischer Techniken / Gestelle folgt in Kapitel 3).

Allein in DE19839479 wird eine Vorrichtungstechnik für die Beschichtung von Großlagern in chemischen / galvanischen Bädern mittels einer geeigneten Haltevorrichtung beschrieben. Dabei wird der Lagerring nur teilweise in den Elektrolyt eingetaucht und konstant rotiert (Abbildung 2.3).

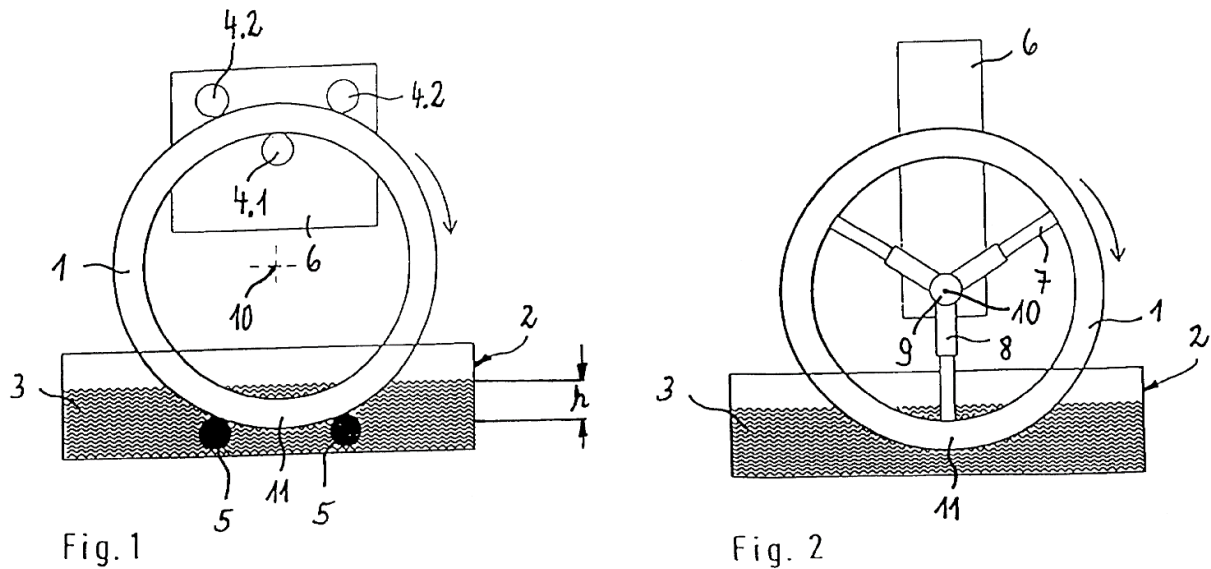


Abbildung 2.3: Fig. 1 und Fig. 2 des Schutzrechts DE19839479 (Patentschrift DE19839479 A1 1998, S. 6)

Die Halterung erfolgt entweder über eine sternförmige Spannvorrichtung auf einem Innendurchmesser oder über mindestens drei Rollen, welche den Ring über den Innen- und Außendurchmesser abstützen. Bei beiden Varianten kann über die Vorrichtung auch Strom übertragen werden. (Patentschrift DE19839479 A1 1998) Das in Abbildung 2.3 rechts (Fig. 2) gezeigte Konzept weist statische Befestigungspunkte auf und erzeugt damit zwangsweise Bereiche ohne ausreichende Beschichtung. Im Fall der Rollentechnik sind keine stationären Kontaktstellen vorgesehen, hier ist eine vollflächige Beschichtung möglich. Es sind jedoch keine Daten zu den Schichteigenschaften verfügbar. Beispielsweise ist durch das teilweise Eintauchen ein Effekt bei der Schichtausbildung möglich (eine Art Multilayer-Schicht), dessen Auswirkungen auf die Schichteigenschaften verschiedener Werkstoffe oder Legierungen variieren können, jedoch auch die Gefahr einer Delamination der einzelnen Schichten aufweisen können. Es ist auch fraglich, ob alle Prozesse mit einem teilweisen Eintauchen realisierbar sind, oder ob ungünstige Einflüsse durch Passivierung im Bereich mit Luftkontakt oder vorrichtungstechnische Probleme durch Antrocknen oder Kristallisation des Elektrolyten entstehen können. Insbesondere bei größeren Bauteilen wäre einem Antrocknen bzw. der Kristallisation des Elektrolyten durch eine hohe Bauteildrehzahl entgegenzuwirken, dies stellt durch die große bewegte Masse auch potenziell ein Sicherheitsrisiko im Fall einer Fehlfunktion dar. Inwiefern die Summe der

entstehenden Effekte einen Einfluss auf die Schichtstabilität, Gefügestruktur und Störstellenfreiheit ausübt, ist unbekannt und abhängig der jeweiligen Verfahrenstechnik. Diese Thematik kann jedoch potenziell kritisch sein. Die Beschichtungszeiten werden bei gleicher Stromdichte durch die Benetzung nur eines Segments höher als bei einer voll eingetauchten Technik ausfallen. Eine Eignung für alle Verfahren ist daher unklar, insbesondere unter Berücksichtigung der tribokorrosiven Anforderungen, welche zur Vermeidung von Korrosion eine schnelle Passivierung der Schicht erfordern können (siehe Abschnitt 2.1.2).

### 2.2.3 Ableitung von Anforderungen an diese Arbeit

Die Beschichtung eines Präzisionsbauteils stellt hohe Anforderungen an die Genauigkeit. Eine galvanische Beschichtung erfolgt bisher, wie die Patentsituation zeigt, mit der Abscheidung geringer Schichtdicken, welche keine signifikanten Toleranzänderungen erzeugen. Bei für einen effektiven Korrosionsschutz notwendigen höheren Schichtdicken ist eine Veränderung der Bauteiltoleranzen möglich. Die Kombination aus Geometrie- und Korrosionsanforderungen erzeugt daher Herausforderung an diese Arbeit.

- Die Anwendung der Beschichtung soll auf einem Wälzlager (Präzisionsbauteil mit engen Toleranzen) erfolgen. Eine Nachbearbeitung soll aus wirtschaftlichen Gründen minimiert / vermieden werden.
  - ▶ Inhaltliche Anforderung: Möglichst homogene, konturtreue und endmaßnahe Beschichtung [Anforderung IF2 für diese Arbeit]
- Eine Produktionstechnik, welche für alle Verfahren sicher funktioniert, konnte nicht identifiziert werden. Eine neue Lösung muss daher entwickelt werden. Zur Sicherstellung einer strukturierten, nachvollziehbaren Entwicklung ist hierfür eine Methodik notwendig.
  - ▶ Übergeordnete Anforderung: Entwicklung einer allgemeinen Methodik zur Entwicklung einer geeigneten Produktionstechnik für die galvanische Beschichtung von Wälzlagerringen bzw. rotationssymmetrischen Präzisionsbauteilen. Bei der galvanischen Produktionstechnik handelt es sich um eine



---

interdisziplinäre bzw. multidisziplinäre Problemstellung durch das Zusammenspiel von Elektrochemie, physikalischen Effekten und maschinenbaulichen Komponenten, eine Methodik muss daher diese Interdisziplinarität abbilden können. [Methodische Anforderung MF1 für diese Arbeit]

- ▶ Detaillierte Anforderung: Entwicklung einer Methodik zur Ermittlung einer geeigneten Beschichtungstechnik für die vollflächige, kontaktstellenfreie Abscheidung einer galvanischen Schicht [Inhaltliche Anforderung IF3 für diese Arbeit]
- ▶ Detaillierte Anforderung: Entwicklung einer Methodik zur Optimierung der Schichtdickenverteilung mit dem Ziel einer endmaßnahen Beschichtung [Inhaltliche Anforderung IF4 für diese Arbeit]
- ▶ Da für die Problemstellung der inhaltlichen Anforderungen IF3 und IF4 keine direkte technische Lösung bekannt ist, muss die Methodik die Generierung neuer Lösungen ermöglichen. Eine Methodik muss daher eine innovative Lösungsfindung für technische Probleme beinhalten können bzw. bereitstellen [Methodische Anforderung MF2 für diese Arbeit]
- ▶ IF3 und IF4 sind zwei Aspekte innerhalb einer Gesamtentwicklung. Für eine erfolgreiche und zeitlich akzeptable Entwicklung müssen die verschiedenen Anforderungen parallel bearbeitet werden können. Die maschinenbauliche Umsetzung der Beschichtungstechnik, die Schichtdickenverteilung und die Gesamtanlagentechnik (siehe 3.3) sind dabei technisch sehr unterschiedliche Aufgabenstellungen, welche sich jedoch gegenseitig beeinflussen. Eine Methodik muss eine parallele, iterative Entwicklung sehr unterschiedlicher technischer Aspekte ermöglichen [Methodische Anforderung MF3 für diese Arbeit]. Die Notwendigkeit einer iterativen Entwicklung wird in Abschnitt 3.3.3 näher beschrieben.

Die sich aus der Galvanotechnik ergebenden Anforderungen an die Produktionstechnik und die Beschichtungsgenauigkeit werden im nächsten Kapitel detaillierter dargestellt.

# 3 Galvanotechnik und galvanische Produktionstechnik

Nachfolgend werden die relevanten galvanotechnischen Grundlagen (d. h. insbesondere bezüglich der Schichtdickenverteilung) beschrieben und um die Anlagen- bzw. Produktionstechnik ergänzt.

## 3.1 Einführung

Die DIN 8580 beschreibt durch die Einordnung als „Beschichten aus dem ionisierten Zustand“ (DIN 8580) bereits einen Kernpunkt der Galvanotechnik: Das Schichtmaterial, welches aus einem oder im Fall der Legierungsabscheidung mehreren Metallen bestehen kann, ist als Ionen in einem flüssigen Elektrolyten gelöst. Durch das Anlegen eines elektrischen Potentials wird das Metall oder die Legierung aus dem Elektrolyten auf einem Bauteil abgeschieden. Eine schematische Darstellung findet sich in Abbildung 3.1.

Zum Schließen des Stromkreises befindet sich neben dem kathodisch polarisierten Bauteil bzw. Substrat eine Anode im Elektrolyt. Für den Stromfluss wird ein Gleichrichter, in manchen Fällen auch eine Pulsstromquelle eingesetzt. Durch den geschlossenen Stromkreis kommt es an der Kathode und der Anode zu einer Reduktions- und Oxidationsreaktion. (Metzner 2013)

Kathodenreaktion:



Anodenreaktion:



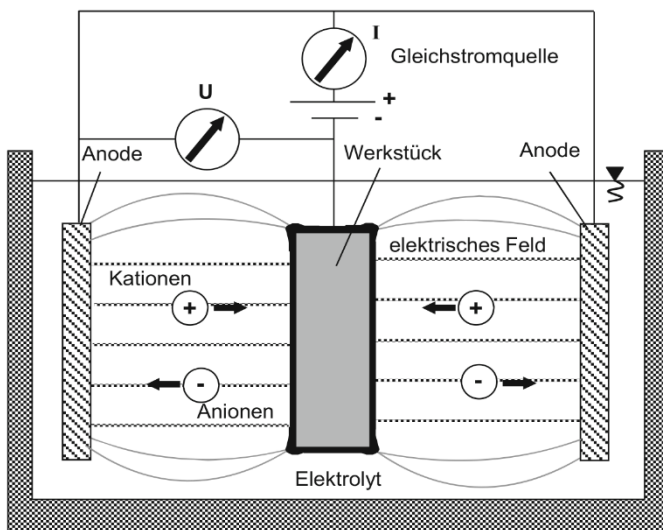


Abbildung 3.1: Aufbau eines galvanischen Bades mit qualitativ dargestellter Schichtdickenverteilung auf dem Werkstück. (Westkämper et al. 2010, S. 195) Zur Ausführung der Kontaktierung werden keine konkreten Angaben gemacht.

Durch die Reduktion der Metallionen am Bauteil bildet sich die gewünschte metallische Schicht. An der Anodenseite wird bei einer löslichen Anode (welche aus dem Schichtmaterial besteht) das Anodenmaterial oxidiert und geht als gelöstes Ion in den Elektrolyten über. Im Fall einer unlöslichen Anode findet keine Metallauflösung statt, sondern Sauerstoffentwicklung. (Metzner 2013)

Auch bei löslichen Anoden und an der Kathode können Nebenreaktionen auftreten, diese werden in der Fachliteratur entsprechend behandelt und hier nicht aufgeführt. Die Art und Intensität sind dabei vom eingesetzten Elektrolyten bzw. den jeweiligen Bedingungen abhängig.

Wie beispielsweise von Schmidt beschrieben, kann über die umgesetzte Ladung die Masse der abgeschiedenen Schicht bestimmt werden. Diese Beziehung zwischen Massenbilanz der Reaktion und ausgetauschten Ladungen wird durch das Faradaysche Gesetz beschrieben. Da jedoch nicht die gesamte Ladungsmenge für die Schichtabscheidung wirksam ist (Nebenreaktionen wie Wasserstoffbildung etc.), wird das Verhältnis der tatsächlichen zur theoretischen Masse als Stromausbeute bezeichnet. Sofern diese Stromausbeute bekannt ist, kann die Masse der elektrochemisch gebildeten Schicht durch die Ladungsmenge berechnet werden. (Schmidt 2003, S. 21–22)

Ein Elektrolyt besteht neben den Metallionen noch aus weiteren Bestandteilen. Zwingend notwendig sind Metallträger (Gegenionen) wie z. B. Sulfate oder Chloride. (Jelinek 2013) Anstatt aus einfachen Anionen bzw. Kationen kann ein Elektrolyt auch aus komplexeren Verbindungen bestehen. (Kanani 2000) Andere anorganische Komponenten können als Leitsalze, Komplexbildner oder Stabilisatoren dienen. Organische Stoffe können beispielsweise Tenside, Glanzbilder oder Puffer sein. (Metzner 2013) Die genaue Zusammensetzung eines Elektrolyten ist je nach eingesetztem Verfahren unterschiedlich. Durch Veränderung der Bestandteile bzw. deren Konzentrationen können sich die Eigenschaften der abgeschiedenen Schicht ändern. Aus diesem Grund müssen die Bestandteile innerhalb von vordefinierten Grenzen gehalten werden, um eine hohe Reproduzierbarkeit der Beschichtungen zu gewährleisten. (Jelinek 2013, S. 500–504) Da die chemische Zusammensetzung von Elektrolyten nicht Thema dieser Arbeit ist, wird darauf nicht näher eingegangen.

Eine wichtige Stellgröße bei der galvanischen Abscheidung ist die Stromdichte am zu beschichtenden Bauteil. Die Höhe der Stromdichte ist vom eingesetzten Verfahren abhängig. Hierbei wird die mittlere Stromdichte angegeben, d. h. der angelegte Strom auf die Oberfläche des Bauteils bzw. aller Bauteile bezogen. (Jelinek 2013, S. 507) In der Praxis wird sie in Ampere pro Quadratdezimeter ( $A/dm^2$ ) angegeben. Auf die Verteilung der Stromdichte an einem Bauteil wird im folgenden Abschnitt näher eingegangen.

## 3.2 Schichtdickenverteilung galvanischer Schichten

### 3.2.1 Leitfähigkeit und Stromdichteverteilung

In Kapitel 3.1 wurden die Grundlagen der Galvanischen Zelle dargestellt. Daraus geht hervor, dass der Stromfluss zwischen Anode und Kathode für die Schichtabscheidung essenziell ist. Die Leitfähigkeit eines Elektrolyten hängt dabei von dem Dissoziationsgrad des Elektrolyten, der Wanderungsgeschwindigkeit der einzelnen Ionen (Überführung) und der Konzentration des Elektrolyten ab. (Jelinek 2013, S. 36) Es handelt sich dabei nicht wie in

Metallen um eine Elektronenleitung, sondern um eine Ionenleitung. (Kanani 2000, S. 86–87)

Aus dem in Abschnitt 3.1 genannten Faraday-Gesetz ergibt sich eine Abhängigkeit der abgeschiedenen Schichtmenge von der umgesetzten Ladung. Die Folge dieser Proportionalität führt zu einem stärkeren Schichtwachstum in Bereichen mit einer höheren Stromdichte und damit größerem Ladungsumsatz. Diese Stromdichteverteilung wird in der Galvanotechnik von verschiedenen Faktoren beeinflusst, weswegen sie wie nachfolgend beschrieben in mehrere Arten unterteilt wird.

Die primäre Stromdichteverteilung ergibt sich durch das Ohm'sche Gesetz und die Elektrostatik, d. h. die Geometrie von Kathode, Anode und den Grenzen des Aktivraums (Behälterwände, Elektrolytspiegel). Auch alle sonstigen dazwischen befindlichen Körper (Halterungen, Vorrichtungen) sind entscheidend. Speziell die Form der Kathode, z. B. deren Ecken, Kanten und Bohrungen, haben einen starken Einfluss. Sie sorgen für eine inhomogene Verteilung der Feldlinien. (Kanani 2000, S. 92) Eine beispielhafte Schichtverteilung für einfache geometrische Körper ist in Abbildung 3.2 gezeigt.

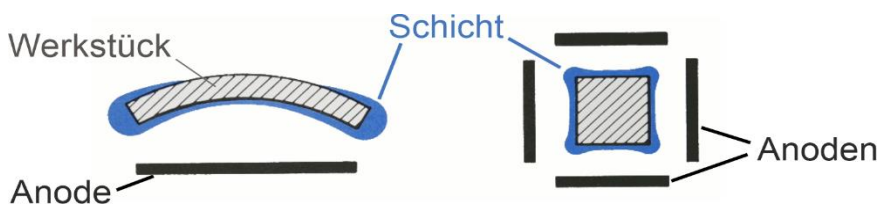


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung einer Schichtdickenverteilung (blau: Schicht; schwarz: Anoden; schraffiert: Werkstück) in Anlehnung an (Arbeitsgemeinschaft der Deutschen Galvanotechnik, S. 8)

Da es sich bei der Elektrochemie nicht um rein physikalische Zusammenhänge handelt, kennzeichnet die sekundäre Stromdichteverteilung „die elektrochemischen Eigenschaften des Systems, die ihren Ausdruck in der kathodischen Überspannung bzw. Polarisierung finden. Darunter sind alle Einflussgrößen zu verstehen, die die kathodische Metallabscheidung behindern.“ (Kanani 2000, S. 92) Durch die sekundäre Stromdichte werden die Extrema der primären Stromdichte meistens abgeschwächt. Durch die Verwendung von Elektrolytzusätzen kann die resultierende Stromdichteverteilung für die Abscheidung gleichmäßiger ausfallen. (Schmidt 2003, S. 218–221)

Als letzte Unterteilung ergibt sich die tertiäre Stromdichteverteilung durch die Durchtritts- und Konzentrationsüberspannungen, welche z. B. durch eine Diffusionshemmung ausgebildet wird. Da sich dann zu den Durchtrittswiderständen zusätzlich die Transportwiderstände addieren, entspricht die Stromverteilung damit den Stofftransportverhältnissen an der Elektrodenoberfläche. (Schmidt 2003, S. 221–222) Dies wird auch als Mikrostreufähigkeit bezeichnet und kann z. B. durch Substanzen wie Inhibitoren beeinflusst werden. (Kanani 2000, S. 94–95)

Die International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) definiert die Unterschiede kompakt als „current distribution“. Dabei stellt sich die primäre Stromverteilung ein, wenn Überspannungen vernachlässigbar sind. Die sekundäre Stromverteilung stellt sich ein, wenn der Einfluss von Überspannungen nicht vernachlässigbar ist, Konzentrationsüberspannungen jedoch schon. Bei der tertiären Stromverteilung können Überspannungen inkl. Konzentrationsüberspannungen nicht vernachlässigt werden. An gleicher Stelle wird die im nachfolgenden Abschnitt näher betrachtete Streufähigkeit („throwing power“) als „die Fähigkeit einer Lösung, ein Metall gleichmäßig auf einer unregelmäßig geformten Kathode abzuscheiden“ (übersetzt aus dem Englischen) definiert. (IUPAC 2014, S. 359–360)

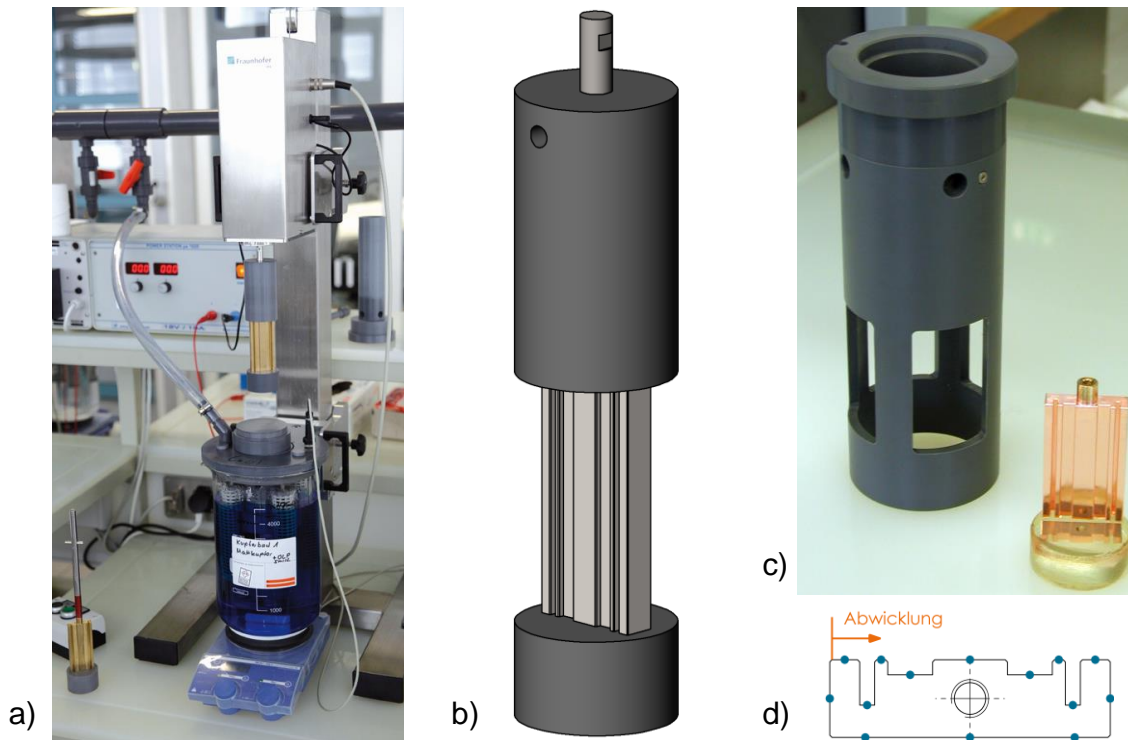
### 3.2.2 Charakterisierung der Elektrolytstreufähigkeit

Aus den verschiedenen Stromdichten bzw. deren Einflussfaktoren ergibt sich ein kompliziertes System, welches über theoretische Berechnungen kaum vollständig abgebildet werden kann. Um dennoch eine Aussage über die Eigenschaften unterschiedlicher Elektrolyte bezüglich der zu erwartenden Schichtdickenverteilung treffen zu können, hat sich in der Praxis eine empirische Charakterisierung der sogenannten Streufähigkeit etabliert. Dieses Kriterium beschreibt die Fähigkeit eines Elektrolyten, gleichmäßige Schichtdickenverteilungen auch bei komplizierten Bauteilgeometrien mit lokal unterschiedlichen Stromdichten zu erzeugen. Eine genaue allgemeingültige Kennzahl ist bisher nicht etabliert, es werden jedoch standardisierte Prüfberichte nach Norm genannt (DIN 50957) oder einfa-

che Kennzahlen vorgeschlagen. (Allmendinger 2010) Allgemein wird von „guter Streufähigkeit“ gesprochen, wenn ein Elektrolyt unempfindlich auf lokale Stromdichteunterschiede reagiert und eine möglichst gleichmäßige Schichtdicke über die gesamte Kathode, d. h. auch an Kanten und in Nuten / Bohrungen erzeugt.

Die (Makro-) Streufähigkeit eines Elektrolyten basiert auf der primären und sekundären Stromdichteverteilung und kann experimentell z. B. über eine Hull-Zelle, Haring-Blum-Zelle o. ä. beurteilt werden. (Kanani 2000, S. 92–93) Die Hull-Zelle wird wegen der einfachen Handhabung auch heutzutage noch sehr häufig verwendet und basiert auf einer älteren Veröffentlichung von R. O. Hull (Hull 1939). Die Verwendung eines trapezförmigen Behälters erlaubt eine reproduzierbare Positionierung von Anode und Kathodenblech, die Abmessungen sind in DIN 50957 genormt. (DIN 50957) Durch diese Anordnung wird ein Stromdichteverlauf auf dem Kathodenblech erzeugt. Neben der Streufähigkeit kann auch ein optischer Eindruck der Schichtqualität gewonnen werden. (Allmendinger 2010, S. 2238)

Durch das geringe Elektrolytvolumen und damit verbundenen Einschränkungen bezüglich Temperaturkonstanz, Hydrodynamik etc. werden viele Einflussfaktoren in der Hull-Zelle nicht berücksichtigt, welche bei einer normalen Beschichtung jedoch eine Rolle spielen. Um auch diese Bedingungen bei der Charakterisierung zu berücksichtigen, sind aufwändigere, aber leistungsfähigere Weiterentwicklungen des Hull-Zellen-Prinzips erfolgt (Patentschrift DE102008061877 B3 2008), bei denen die Stromdichteunterschiede über einen profilierten Versuchskörper erzeugt werden, welcher – wie in Abbildung 3.3a dargestellt – in einem 5 l-Becherglas rotiert wird. (Schmid et al. 2009)



a) Kompletter Beschichtungsstand

b) CAD-Modell Profilkörper mit Blenden

c) Fensterblende mit Profilkörper / Querschliff

d) Querschnitt Profilkörper mit Messpunkten

Abbildung 3.3: IPA Beschichtungsstand (Quelle Bilder a und c: Fraunhofer IPA intern)

Der Profilkörper (Abbildung 3.3 b-d) weist die in Abbildung 3.4 dargestellte, über Simulationsrechnungen ermittelte Verteilung der primären Stromdichte auf. Die Anoden sind mittels einer Fensterblende abgedeckt, um im Beschichtungsbereich eine homogene Stromdichteverteilung zu erzeugen. Die Stromdichteverteilung wird somit durch das Bauteil bestimmt. Die gemessenen Schichtdicken an den definierten Messpunkten (siehe Querschnitt in Abbildung 3.3 d) können damit direkt einem Wert zugeordnet werden.



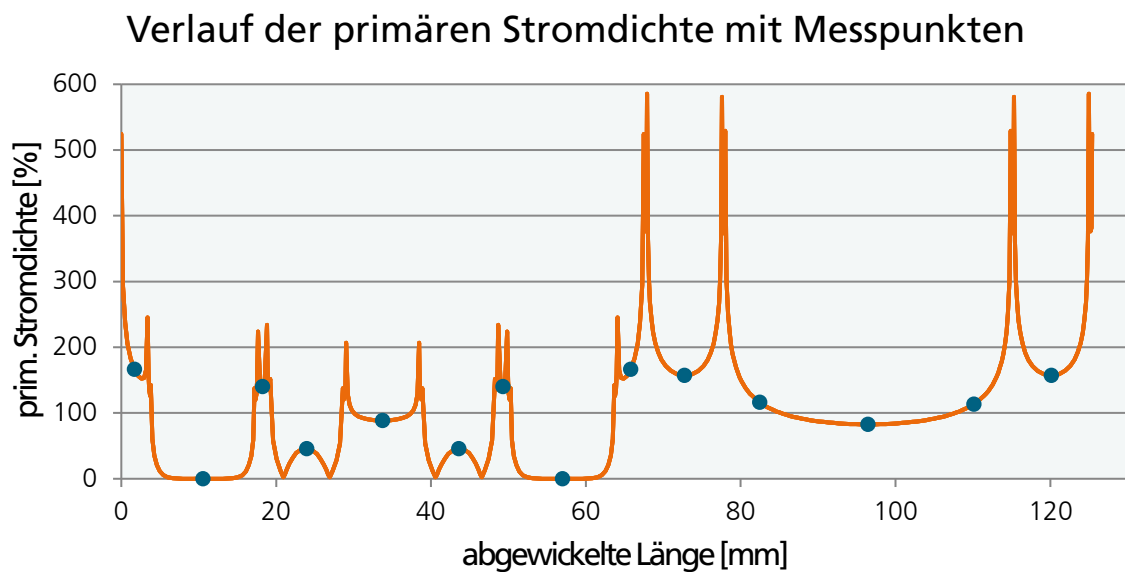


Abbildung 3.4: Primärer Stromdichteverlauf des Profilkörpers. Messpunkte für die Schichtdicke sind blau markiert. Die Abwicklung beginnt an der in Abbildung 3.3 markierten Kante bzw. Fase des Querschnitts d).

Auch wenn durch die Streufähigkeit eines Elektrolyten einige Abweichungen der Stromdichteverteilung oftmals toleriert werden können, gibt es gute Gründe, um bereits die primäre Stromdichteverteilung möglichst optimal zu gestalten. Eine zu hohe Stromdichte kann beispielsweise bei Nickelelektrolyten zu sogenannten Anbrennungen in diesen Bereichen führen. (Gaida et al. 1996, S. 196) Auch können sich die Eigenschaften der abgeschiedenen Schichten ändern. So können Eigenschaften wie beispielsweise die Härte oder im Fall einer Legierungsabscheidung die Zusammensetzung der Schicht von der Stromdichte abhängen. (Schmid 2011)

### Zwischenfazit Elektrolytstrefähigkeit

Die Streufähigkeit ist damit eine Eigenschaft eines Elektrolyten, die bei der Erzielung einer homogenen Schichtdickenverteilung über komplexe Bauteile berücksichtigt wird. Bei einem Elektrolyten mit guter Streufähigkeit muss gegebenenfalls weniger Aufwand betrieben werden, um auf alle Kathodenbereiche eine Mindestschichtdicke aufzutragen oder die starke „Über“-Beschichtung an Kanten zu verhindern. Im Gegenzug spielt bei schlechter Streufähigkeit eine homogene primäre Stromdichteverteilung eine besonders wichtige

Rolle, da hier die Eigenschaften des Elektrolyten nur eine geringe Homogenisierung erzeugen. Da in der Praxis der verwendete Elektrolyt durch die benötigten Schichteigenschaften festgelegt wird und nicht immer zwischen verschiedenen Formulierungen mit unterschiedlichen Streufähigkeiten gewählt werden kann, muss eine gleichmäßige Schichtverteilung auf dem Bauteil hauptsächlich über die Auslegung der primären Stromdichteverteilung erfolgen.

### 3.2.3 Möglichkeiten zur Optimierung der Stromdichte- und Schichtdickenverteilung

Unter der Annahme, dass die chemischen Parameter des Beschichtungsbad nicht verändert werden können, verbleibt für die Verbesserung der Schichtdickenverteilung auf einem Bauteil nur noch die Veränderung der geometrischen und physikalischen / elektrischen Randbedingungen während der Beschichtung. Konkret bedeutet dies, dass sich die Optimierung auf die Anpassung der primären Stromdichteverteilung reduziert.

Die primäre Stromdichte ist nur in sehr wenigen Fällen exakt homogen (z. B. exakt konzentrische, theoretisch unendlich lange Zylinder oder konzentrische Kugeln). In der Realität sollten die Anoden eine äquipotenziale Oberfläche zur Kathode bilden, welche die beste Annäherung an einen gleichmäßigen Stromfluss bilden. Dies kann durch die Verwendungen von in der Form angepassten Anoden, dem Einbringen von Isolatoren zur Steuerung des Stromflusses (Blenden) oder Hilfselektroden wie z. B. Stromfängern erfolgen. (Durney 2000, S. 464–467) Diese Möglichkeiten und einige Ergänzungen werden im Nachfolgenden näher beschrieben.

Das zu beschichtende Bauteilspektrum und die Anlagentechnologie (siehe Kapitel 3.3) spielen eine entscheidende Rolle. Bei einem einzelnen, klar definierten Bauteiltyp kann eine bessere Auslegung erfolgen als bei ständig wechselnden Produkten, wie es in Lohngalvaniken häufig der Fall ist. Im Folgenden werden die Anpassungsmöglichkeiten beschrieben, die im optimalen Fall – also für die Beschichtung eines einzelnen Bauteils in einem darauf angepassten Verfahrensraum – anwendbar sind.

## Geometrie der Elektroden und des Verfahrensraums

Die geometrischen Bedingungen sind ein Einflussfaktor, der bereits bei der Auslegung und Planung eines Beschichtungsbehälters berücksichtigt werden muss. Dort werden neben Behälterabmessungen und Füllstand auch die Schnittstellen zum Bauteil bzw. dem Warenträger und den Anodenkontakten festgelegt. Die Anoden sollten daher im Behälter so angeordnet sein, dass sich ein möglichst homogenes Potenzialfeld ausbilden kann. Bei einfachen Körpern wie Zylindern oder Kugeln ist die theoretisch optimale Anode, wie oben geschrieben, eine Formanode. Doch bereits bei einfachen Teilen mit Ecken / Kanten, wie einem einfachen Winkelblech, ist eine reine Abbildung der Kontur nicht die beste Variante, da dort keine homogene Feldverteilung erreicht wird. (Durney 2000, S. 465)

Bei der Beschichtung mehrerer Teile (z. B. auf Gestellen) sind die Teile so anzuordnen, dass eine gegenseitige Abschirmung vermieden wird. Nach Jelinek muss die optimale Entfernung empirisch bestimmt werden, nur für zylindrische Teile wird ein verfahrensabhängiger Richtwert von einfachem bis doppeltem Durchmesser genannt. (Jelinek 2013, S. 82)

## Bauteilbewegung

Wie in Abschnitt 3.2 erwähnt, ist eine gewisse Bauteilbewegung aus elektrochemischer Sicht sinnvoll. Im Fall von rotationssymmetrischen Teilen ist eine Drehung des Bauteils auch für die Schichtdickenverteilung durch die primäre Stromdichte relevant, da dadurch eine Inhomogenität des Feldes, welche beispielsweise durch ungleichmäßig angeordnete Anoden oder auch passive Anodenbereiche entsteht, ausgeglichen werden kann. (Durney 2000, S. 466) Voraussetzung ist dabei, dass die Rotationsachse konzentrisch zur Bauteilachse ist, da sich bei einer exzentrischen Aufnahme immer die gleiche Teile des Bauteils näher bzw. weiter entfernt von den Anoden befinden und sich damit ein ovaler Schichtdickenverlauf über dem Bauteilumfang einstellen wird.

## Blenden

Unter Blenden versteht man in der Galvanotechnik nichtleitende Hilfsbauteile, welche an ein zu beschichtendes Bauteil oder Gestell angebracht oder an einer bestimmten Position in den Elektrolyten eingehängt werden, um den Stromfluss und damit die Schichtdickenverteilung gezielt zu beeinflussen. Meistens bestehen sie aus Kunststoffen. Auf Grund von

Beständigkeit und Wirtschaftlichkeit wird oftmals Hart-PVC oder PP eingesetzt. Durch die Verwendung von isolierenden Materialien erfolgt keinerlei Stromleitung und auch keine Beschichtung der Blenden selbst, wodurch kein Metall verbraucht wird. In der Fachliteratur werden Blenden wenig behandelt, die Verwendung ist jedoch in der Praxis gebräuchlich.

Die Abblendung von Bereichen hoher Stromdichte kann mit Blenden (oder Hilfskathoden, siehe weiter unten) realisiert werden. (Lausmann et al. 2006, S. 292) Neben den geometrischen Abweichungen, welche durch inhomogene Schichtverteilung entstehen, kann dadurch auch eine Überbeschichtung vermieden werden. So wird im Merkblatt zur besten verfügbaren Technik (BVT) empfohlen, bei großtechnischen Stahlbandanlagen „Kantenabdeckungen (Blenden) zu verwenden, um überschüssige Metallabscheidungen zu vermeiden und um eine Streuung zur Rückseite zu verhindern, wenn nur eine Seite galvanisiert wird“. (Umweltbundesamt 2005, S. 8–9)

### Hilfselektroden

Bei Hilfskathoden, welche auch als Stromfänger oder Stromdiebe bezeichnet werden, handelt es sich um leitfähige Hilfskörper. Sie werden, wie die Blenden, in der Nähe des Substrats in Bereichen hoher Stromdichte an Ecken und Kanten im Elektrolyt positioniert. Im Unterschied zu den nichtleitenden Blenden werden die Stromfänger jedoch mit demselben kathodischen Potenzial beaufschlagt wie das Bauteil, wodurch sie mit beschichtet werden. Bei dieser Anordnung „stehlen“ die Stromfänger, wie in Abbildung 3.5 gezeigt, einen Teil des erhöhten Stromflusses, welcher sich an Bauteilkanten einstellen würde, und bewirken eine gleichmäßigere Schichtdicke am eigentlichen Bauteil. (Arbeitsgemeinschaft der Deutschen Galvanotechnik, S. 19)

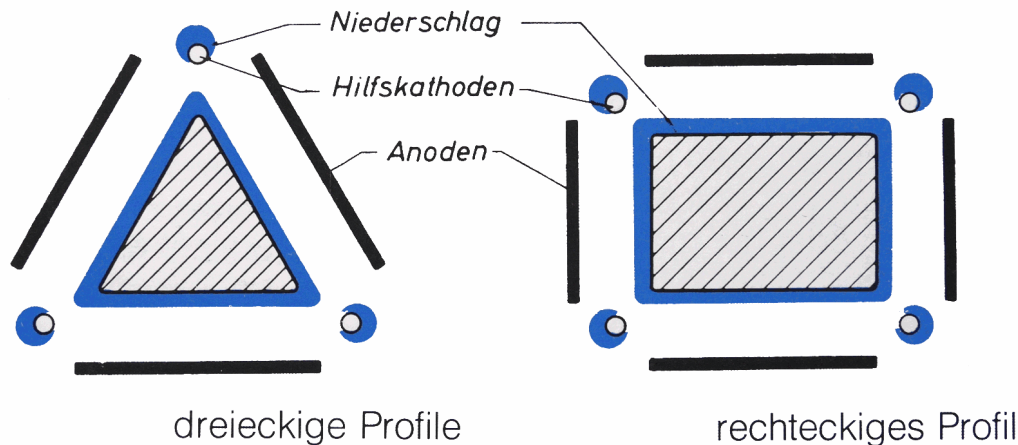


Abbildung 3.5: Schematische Darstellung der Wirkung von Hilfskathoden (Arbeitsgemeinschaft der Deutschen Galvanotechnik, S. 21)

### Mehrere Gleichrichterpotenziale

Ein weiterer Ansatz ist die Verwendung mehrerer Gleichrichterpotenziale für die gezielte Manipulation des Stromflusses direkt an den Anoden. Die Anoden (beispielsweise Stangen, Körbe oder Streckmetallsegmente) werden nicht alle auf ein Potenzial gelegt, sondern getrennt an einen Mehrkanalgleichrichter oder mehrere Stromquellen angeschlossen, während die Kathode als gemeinsames Potenzial mit allen Gleichrichtern verbunden wird. Die flexible Steuermöglichkeit der einzelnen Gleichstromquellen nimmt bei gleichbleibender Anodengeometrie Einfluss auf die Stromdichteverteilung auf der Kathode und gibt die Möglichkeit, geometrische Variationen von ähnlichen Bauteilen innerhalb gewisser Grenzen auszugleichen. Unterschiedliche Anoden-Kathoden-Abstände, beispielsweise bei gebogenen Bauteilen, können ohne Änderung der Anodenpositionen kompensiert werden. (Schwanzer 2013, S. 11) Eine Auswirkung auf die Konzentration der Feldlinien an Kanten / Ecken der Kathode erfolgt nur geringfügig, diesbezüglich sind die oben genannten Maßnahmen wie Blenden oder Stromfänger ergänzend notwendig.

#### 3.2.4 (Stromdichte-) Simulation in der Galvanotechnik

Die Abbildung von elektrochemischen Vorgängen über Modelle und Gleichungen ist ein essenzieller Schritt für die Prognose über eine Simulation. Eines der umfassendsten Werke

stellt sicherlich die Sammlung von Britz dar, in der eine Vielzahl von Gleichungen und Berechnungsmethoden vorgestellt werden. (Britz 2005) Im wissenschaftlichen Bereich wurde eine große Anzahl von Arbeiten mit unterschiedlichen Schwerpunkten durchgeführt, beispielsweise die Verbesserung von Berechnungsmethoden (Nann et al. 1999; Amatore et al. 2006a; Amatore et al. 2006b) oder die Untersuchung von Vernetzungseinflüssen. (Biboulet et al. 2013) Ein wichtiger Aspekt bei der Simulationsentwicklung ist der Vergleich mit praktischen Experimenten, wie er von Bortels am Beispiel einer Kupferabscheidung mit parallelen Elektrodenplatten beschrieben wurde. (Bortels et al. 1996)

Neben den grundlegenden Arbeiten ist für die Optimierung von Beschichtungen auch die anwendungsorientierte Weiterentwicklung relevant, z. B. für die Optimierung der Schichtdickenverteilung an Bauteilen (Rose 2009) oder Gestellen (Belis 2015) über die Nutzung von spezialisierter Simulationssoftware.

Neben den rein mathematisch-rechnerischen Simulationsansätzen existieren weitere Ansätze. Es wird davon ausgegangen, dass für eine vollumfängliche Simulation Verfahren im atomaren Maßstab notwendig und für den anwendungsorientierten Einsatz nicht praktikabel sind. Im Projekt AnSim wurde die Definition von Kennlinien als Lösungsansatz zur Prognose von Schichtdicken und Schichteigenschaften betrachtet. Es sollten dabei alle Effekte, von der Keimbildung bis zu den funktionellen Schichteigenschaften, über Experimente ermittelt und in Kennfelder überführt werden. (Fraunhofer IPK 2015) Dabei handelt es sich um sehr umfangreiche Versuche und Erklärungsmodelle, da die gesamten Schichteigenschaften abgedeckt werden sollen – nicht nur die Schichtdickenverteilung.

### Simulationssoftware

Im Bereich der FEM-Software existieren viele Lösungen für einzelne Anwendungsfälle, modular aufgebaute Programme für viele Bereiche oder auch als zusätzliche Module in CAD/CAE-Programmen (z. B. Solidworks Simulation). Die meisten Programme wurden nicht schwerpunktmäßig auf die elektrochemischen Vorgänge hin entwickelt. Im Rahmen einer Recherche wurden für den Anwendungsfall einer galvanischen Beschichtung vorrangig die Programme COMSOL und Elsyca identifiziert.

Im Fall von COMSOL, einer umfassenden „Multiphysik“-Software, existieren mittlerweile die passenden Module „Electrodeposition“ oder „Electrochemistry“. (Comsol Inc. 2019) Als kommerzielle und auf Elektrochemie spezialisierte Software ist die Firma Elsyca zu nennen, welche Dienstleistungen und Programme für die Galvanotechnik anbietet. (Elsyca NV 2016) Vor den jetzt angebotenen 3D-Programmen wurde ein 2D-Berechnungswerkzeug Elsy vertrieben.

Zwischen 2D und 3D-Simulationen ergeben sich signifikante Unterschiede für die Modellbildung. Für zweidimensionale Vorgaben werden keine Volumenmodelle, sondern nur Linien / Flächen benötigt. Dies hat starken Einfluss auf die Vernetzung und die zu berechnenden Knoten, eine 2D-Simulation mit der Software Elsy ist nach wenigen Sekunden abgeschlossen. Verglichen damit benötigt eine vollständige dreidimensionale Simulation der Stromdichteverteilung eine sehr hohe Rechenzeit. Eine 2010 veröffentlichte Berechnung mit COMSOL dauerte ca. 4 Tage, wobei ein Großteil der Zeit für die Netzgenerierung benötigt wurde. (Wu et al. 2010) Dies trifft durch die gestiegene Rechenleistung für normale Modelle mittlerweile nicht mehr zu, jedoch bleibt die 3D-Berechnung zeitaufwändiger, da durch die zusätzliche Dimension mehr Elemente berechnet werden müssen. Im Gegenzug können dreidimensionale Zusammenhänge in 2D nur über Umwege nachgebildet werden, z. B. durch die Erstellung von Längs- und Querschnitten durch einen Behälter.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Software Elsy (2D) von Elsyca verwendet. Die Ergebnisse von COMSOL und Elsyca für primäre Stromdichteverteilung sind identisch, so dass aus Sicht der Berechnungsqualität keine Unterscheidung vorgenommen werden konnte. Auf Grund des bewährten Einsatzes in der Vergangenheit wurde daher die weitere Verwendung auch im Rahmen des Forschungsprojekts Poseidon und dieser Arbeit beschlossen.

Die Berechnungsgrundlagen und -durchführung werden in den nachfolgenden Abschnitten näher dargestellt. Ein 2D-Modell ist speziell bei rotationssymmetrischem Aufbau – was bei einem rotationssymmetrischen Lagerring zwingend der Fall ist – nur mit geringen Einschränkungen bezüglich der Ergebnisgenauigkeit verbunden. Eine aufwändigere 3D-Modellierung wurde daher im Rahmen dieser Arbeit nicht für notwendig erachtet.

---

## Kurzübersicht Simulationstheorie

Durch das Anlegen der Spannung an den Elektroden bildet sich ein Potenzialfeld im leitfähigen Elektrolyten aus. Für die Simulation einer Beschichtung sind jedoch nicht nur das Ohmsche Gesetz und die primäre Stromdichteverteilung von Interesse, sondern auch die realen durch den flüssigen Elektrolyt auftretenden Effekte (siehe 3.2.1).

Die meisten für eine Simulation relevanten Gleichungen behandeln daher Konzentrationsänderungen im Elektrolyt, d. h. es handelt sich um Transportgleichungen (Diffusion, Konvektion und Migration). An den Elektrodenoberflächen werden diese Gleichungen durch die elektrochemischen Reaktionen zusätzlich beeinflusst, während im Elektrolyt homogene Verhältnisse herrschen. Die Transportvorgänge werden dabei durch die allgemeine Nernst-Planck-Gleichung beschrieben. (Britz 2005, S. 5) Für hydrodynamische Aspekte gelten bei inkompressiblen Fluiden die Kontinuitätsgleichung und die Navier-Stokes-Gleichung. (Bard et al. 2001, S. 333) Die entsprechenden Gleichungen können der Literatur entnommen werden. Die gebräuchlichste Gleichung für die (elektrochemisch-) kinetischen Vorgänge an Elektroden ist die Butler-Volmer-Gleichung. (Dukovic 1990, S. 695)

### 3.2.5 Ableitung von Anforderungen an diese Arbeit

Eine homogene Schichtdickenverteilung bei der galvanischen Abscheidung ist nur unter für das Bauteil bzw. Bauteilspektrum optimalen Bedingungen zu erreichen. Dies erzeugt mit Hinblick auf die geforderte endmaßnahe Beschichtung von Präzisionsbauteilen (Wälzlagern) für den Entwicklungsprozess der Produktionstechnik mehrere Herausforderungen:

- Bei galvanischen Schichten hängt die Schichtdickenverteilung insbesondere von der Geometrie von Bauteil und Anoden ab (primäre Stromdichteverteilung). Bei geometrisch anspruchsvoll geformten Bauteilen können so stark inhomogene Schichtdickenverläufe auftreten, welche den Anforderungen bei der Beschichtung von Präzisionsbauteilen mit endmaßnaher Schicht entgegenstehen. Gegebenenfalls können sie jedoch durch verschiedene Möglichkeiten (Geometrieanpassung Anoden / Gestell, Blenden usw.) optimiert werden.



- ▶ Anforderung: Es wird ein Vorgehen benötigt, um im Entwicklungsprozess die Schichtdickenverteilung zu optimieren. Die genannten Aspekte korrespondieren mit den Anforderungen MF2, MF3 und präzisieren IF4 aus Abschnitt 2.2.3.
- ▶ Anforderung: Die Ausgestaltung des galvanischen Aktivraums beinhaltet maschinenbauliche, physikalische und elektrochemische Anforderungen. Diese interdisziplinäre Orientierung korrespondiert mit MF1 aus Abschnitt 2.2.3.
- Verfahrensabhängig wird die Schichtdickenverteilung durch weitere Faktoren beeinflusst (sekundäre und tertiäre Stromdichteverteilung). Diese Einflüsse können, insbesondere bei neu entwickelten Verfahren, nicht oder nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand berechnet werden.
  - ▶ Anforderung: Die Effekte der sekundären und tertiären Stromdichteverteilung (Streufähigkeit des betreffenden Elektrolyten) sollen über ein einfach zu nutzendes Vorgehen abgeschätzt werden und in der Schichtdickenoptimierung berücksichtigt werden können [Inhaltliche Anforderung IF5 für diese Arbeit].

### 3.3 Galvanotechnische Anlagen

Galvanotechnische Anlagen sind nach Definition in Fachbüchern „Bearbeitungszentren zur nass- und elektrochemischen Behandlung metallischer oder nichtmetallischer Teileoberflächen“. (Gaida et al. 1996, S. 25) Der Aufbau der Anlagen ist vielfältig. Gemeinsam ist den konventionellen Anlagen die Behandlung der Teile auf einem oder mehreren Warenträgern und das Durchlaufen mehrerer Behandlungsschritte. Die Teile behalten dabei ihre Form bei, die Oberfläche wird modifiziert. Anlagen zur Draht- / Bandbehandlung oder Leiterplattenbeschichtung sind Sonderbauarten. (Gaida et al. 1996, S. 25)

Die Verwendung von spezialisierten galvanotechnischen Anlagen ist für die industrielle Beschichtung essenziell. Durch die Vielzahl an unterschiedlichen Bauteilen, Verfahren,

Werkstoffen und Schichtanforderungen ergibt sich eine hohe Individualisierung der einzelnen Anlagen. In den nachfolgenden Abschnitten werden die grundlegenden Anforderungen, die wichtigsten Komponenten und die gebräuchlichsten Arten der galvanischen Anlagen vorgestellt. Die im Rahmen dieser Arbeit erstellte Versuchsanlage für den Technikumsbetrieb entspricht in vielerlei Hinsicht keiner industriellen Großanlage. Die Betrachtung der industriellen Praxis ist dennoch notwendig, da eine Skalierung der verwendeten Lösungen auch für diese Maßstäbe machbar sein muss.

### 3.3.1 Allgemeiner Aufbau

Der allgemeine Aufbau wird mit den notwendigen Komponenten nur grob beschrieben, da dies grundlegendes Standardwissen für galvanische Anlagen darstellt. Die Kontaktierung der Ware ist vom Anlagentyp abhängig und wird dort beschrieben.

#### Behälter, Einbauten und Peripherie

Die Behälter stellen eine der wesentlichen Komponenten einer Anlage dar, Elektrolyt- und Spülbehälter werden dabei häufig als „Arbeitsbehälter“ bezeichnet und damit von Ansetz-, Stapel- oder Ablassbehältern abgegrenzt. (Gaida et al. 1996, S. 39) Die Behälter einer galvanischen Anlage müssen mechanischen, chemischen und thermischen Belastungen standhalten. Am häufigsten werden Rechteckbehälter für die Behandlungsbehälter eingesetzt, Vorlagebehälter sind aus Herstellungs- und Kostengründen oftmals rund ausgeführt. (Jelinek 2013, S. 89)

Die Materialauswahl leitet sich aus den Anforderungen bzw. Belastungen ab, als gebräuchlichste Ausführungen sind Kunststoffbehälter aus Thermoplasten wie PP, PE, PVC oder auch PVDF sowie (Edel-) Stahlbehälter mit einer Kunststoffauskleidung aus diesen Materialien zu nennen. (Jelinek 2013, S. 89–92) Bei der Ausrüstung und Gestaltung eines Behälters sind viele Aspekte zu berücksichtigen. Neben Gesichtspunkten zum allgemeinen Betrieb (Entleerungsmöglichkeiten, Frischwasserzufuhr, Überlaufabteile, Umwälzungs-

möglichkeiten) sind auch die notwendigen An- und Einbauten (Warenbewegung, Stromkontakte, Anodenschienen, Sensoren, Heizungen / Wärmetauscher etc.) zu nennen. (Gaida et al. 1996, S. 42–55)

Die typischen Zustände einer Anlage, welche durch Sensoren überwacht werden, umfassen beispielsweise Elektrolytniveau, -temperatur, -umwälzung oder -parameter (Metallkonzentration, pH-Wert, Konzentration von Zusätzen usw.). Auch die Werte während eines Beschichtungsvorgangs (Gleichrichterspannung und -strom, Amperestunden etc.) werden in modernen Anlagen aufgezeichnet. (Schlesinger et al. 2010, S. 527–528) Welche Technologien im Einzelnen verwendet werden, ist von den Randbedingungen der Anlage und der Prozesse abhängig. Die Sensoren können sich dabei sowohl direkt im oder am Behälter befinden oder auch außerhalb, wie beispielsweise ein pH-Sensor im Umwälzkreislauf.

Die Elektrolytzusammensetzung muss für gleichbleibende Abscheidungsergebnisse innerhalb von bestimmten Grenzen bleiben, daher sind auch diverse Maßnahmen zur Elektrolytkontrolle notwendig. Eine Möglichkeit stellt die chemisch-analytische Untersuchung und eine nachfolgende Ableitung von Korrekturmaßnahmen dar (d. h. Nachdosierung von Elektrolytbestandteilen), jedoch sind für einen kontinuierlichen Betrieb automatisierte Lösungen über Dosierpumpen o. ä. vorteilhaft. (Jelinek 2013, S. 500–504) Eine Absaugung ist notwendig, damit sich Gase, Aerosole und Dämpfe nicht unkontrolliert ausbreiten (Arbeitsschutz und auch Schutz der Anlage). Die Absaugung sollte dabei direkt am Entstehungsort erfolgen, beispielsweise über Absaugstege oder Hauben. (Gaida et al. 1996, S. 57–58)

### Anodentechnik

Die Relevanz der Anodengeometrie wurde im Kapitel 3.2.3 beschrieben. Für die Planung und Konstruktion einer Anlage bzw. von Beschichtungsvorrichtungen ist die Art der Anoden jedoch ebenfalls von großer Bedeutung. Ob lösliche oder unlösliche Anoden zum Einsatz kommen, wird durch die Verfahrenstechnik bestimmt.

Bei der Kupferabscheidung werden beispielsweise Stangen oder Platten aus Kupfer verwendet. Es können auch Stücke aus Kupfer verwendet werden, welche in Titankörbe gefüllt werden. (Schlesinger et al. 2010, S. 40) Bei Nickel-Prozessen werden zumeist lösliche Anodenmaterialien verwendet. Wie bei Kupfer werden häufig Titan-Anodenkörbe eingesetzt, welche mit geeignetem Material befüllt werden. (Schlesinger et al. 2010, S. 99–103) Für Chromelektrolyte werden dagegen unlösliche Anoden genutzt. Generell ist bei unlöslichen Anoden ein großer Vorteil die Formstabilität, wobei nicht alle unlöslichen Anoden uneingeschränkt formstabil bleiben – Bleianoden beispielsweise verändern im Lauf der Zeit ihre Form. Über Streckmetallkonstruktionen können jedoch dauerstabile Anoden hergestellt werden, deren Beschichtung (Platin, Mischoxide) kann je nach Prozess angepasst werden. (Ebert 2015)

### Gleichrichter

In der Galvanotechnik werden vorrangig drei Gleichrichter-Bauarten eingesetzt: Motorisch geregelte Regeltrafos oder elektronische Gleichrichter nach Thyristor- oder Schaltnetzteil-technik. Die Kühlung der Geräte erfolgt über Öl (Regeltrafo, Thyristor), Luft oder Wasser (Thyristor, Schaltnetzteil). Die einzelnen Technologien besitzen dabei unterschiedliche Vor- und Nachteile bezüglich Platzbedarf, Energieeffizienz, Wirkungsgrad usw. (Rombach 2015) Einen entscheidenden, allgemeingültigen Vorteil bietet dabei keine Bauart, daher kann keine Aussage über „DIE richtige Technologie“ getroffen werden. (Kämper 2015) Im Rahmen der Arbeit ist die Bauart der verwendeten Gleichrichters nicht relevant, daher wird dies nicht weiter ausgeführt. Im Laborumfeld werden jedoch auf Grund der geringen Leistungen und Größen hauptsächlich Schaltnetzteil-Geräte für den Einsatz in der Galvanik eingesetzt.

### Warenbewegung

In den vorigen Kapiteln wurde eine Warenbewegung im Beschichtungsbehälter erwähnt, welche den Elektrolytaustausch und das Abschütteln von Gasblasen von der Bauteiloberfläche begünstigt. Eine solche Zwangsbewegung kann am einfachsten in einer Achse (waagrecht, senkrecht im Bad) erfolgen. Je nach Anwendungsfall kann jedoch eine zwei-

oder dreidimensionale Führung des Bauteils durchgeführt werden, beispielsweise über die Verwendung eines Roboters. (Patentschrift DE10310071 B3 2003)

Im Fall von rotationssymmetrischen Bauteilen bietet sich die Drehung um die Bauteilachse an, z. B. bei Druckzylindern oder Kolbenstangen. Im gebräuchlichsten Fall wird eine Dreheinrichtung genutzt und diese Hilfskonstruktion auf das Bad abgesetzt und angetrieben. Das Bauteil wird zur Kontaktierung fest mit der Vorrichtung verbunden, die Stromübertragung auf die rotierenden Teile erfolgt außerhalb des Bads, beispielsweise über Schleifkontakte. (Patentschrift DE2051778 A1 1975) Eine Rotation weist neben der Bereitstellung einer Relativbewegung zum Elektrolyt auch Vorteile bezüglich einer gleichmäßigen Beschichtung auf, da Unregelmäßigkeiten entlang des Umfangs verringert werden.

### 3.3.2 Anlagentypen und -technologien

Die Anlagentechnik für galvanische Verfahren kann über Kennzeichen wie Warentransport oder Elektrolytbereitstellung in verschiedene Gruppen gegliedert werden. Bei einem kontinuierlichen Transport kann zwischen verketteter Transportmimik (Starrtakter) und Durchzugsanlagen unterschieden werden. Die meist eingesetzte Technik sind jedoch Umsetzerautomaten mit diskontinuierlichem Warentransport und einer Volumenbereitstellung über Behälterreihen. Die Reaktortechnik nutzt ebenfalls einen diskontinuierlichen Warentransport, es finden jedoch mehrere Bearbeitungsschritte in einem Behälter statt. Eine Sonderstellung nimmt die Tampon- bzw. Brushtechnik ein, welche eine deutlich abweichende Anlagentechnik benötigt bzw. in vielen Fällen manuell erfolgt. (Schmid 2013)

Form und Größe der Bauteile bestimmen die angewendete Beschichtungstechnik. Bei kleinen Massenteilen wird vorzugsweise eine Trommel- oder Glockenbeschichtung angewendet, während größere oder sperrige Ware über Gestelle beschichtet wird. Für sehr große Sonderteile können Sonderverfahren wie eine Tamponbeschichtung oder an den Einzelfall angepasste Lösungen angewendet werden. (Jelinek 2013, S. 32)

Nachfolgend werden die wichtigsten Anlagentechniken vorgestellt, welche für eine Beschichtung von Lagern prinzipiell in Frage kommen und für die Betrachtung bezüglich der benötigten Anforderungen relevant sind.

## Gestellanlage

Bei Gestellanlagen handelt es sich überwiegend um Umsetzeranlagen bzw. -automaten. Die Bauteile werden in Losgrößen auf vorgefertigte Gestelle aufgebracht, um eine Mehrfachbeschichtung bei gleichen Bedingungen zu ermöglichen.

Gestelle müssen mehrere Aufgaben erfüllen: Mechanische Halterung der Teile (hängend, federnd geklemmt usw.) und Kontaktierung der Teile (sowohl vom Gestell zum Teil als auch vom Gestell zum Warenträger / Kontaktpunkt am Bad). Bis auf die Kontaktpunkte sollten die Gestelle zur Isolation (Vermeidung von Beschichtung) und zum chemischen Schutz mit einer nichtleitenden, beständigen Beschichtung versehen sein. Gebräuchlich sind dabei modifiziertes PVC oder auch E-CTFE. (Gaida et al. 1996, S. 31–33)

Die wichtige Kontaktgebung darf dabei nur an Bereichen der Ware erfolgen, an denen unbeschichtete Stellen nicht stören. Die Art der Befestigung ist dabei auch von Form und Größe der Bauteile abhängig. Bei leichten Produkten können problemlos Federkontakte verwendet werden, bei höherem Gewicht sind ggfs. Haken besser geeignet. Ein Beispiel für eine Ausführung mit Feder-Klemmkontakten ist in Abbildung 3.6 gezeigt.

Weitere Kriterien bei der Anordnung der Teile sind die Elektrolytverschleppung (Ablaufen des Elektrolyten von den Teilen, möglichst wenig Schöpfen), Gasansammlungen am Bauteil (keine Beschichtung) und insbesondere die Schichtdickenverteilung.

Für die Beschichtung in der Anlage werden eines oder mehrere Gestelle an dem sogenannten Warenträger befestigt, welcher über Hebeeinrichtungen oder Fahrwagen zwischen den Behältern bewegt werden. (Jelinek 2013, S. 85–87) Eine beispielhafte Umsetzung kann Abbildung 3.7 entnommen werden. Die Warenträger mit den einzelnen Gestellen werden über Fahrwagen von einem Prozessschritt zum nächsten transportiert. Auch die Hebe- und Absenkbewegungen werden automatisiert durchgeführt, dies hängt jedoch vom Automatisierungsgrad der Anlage ab.

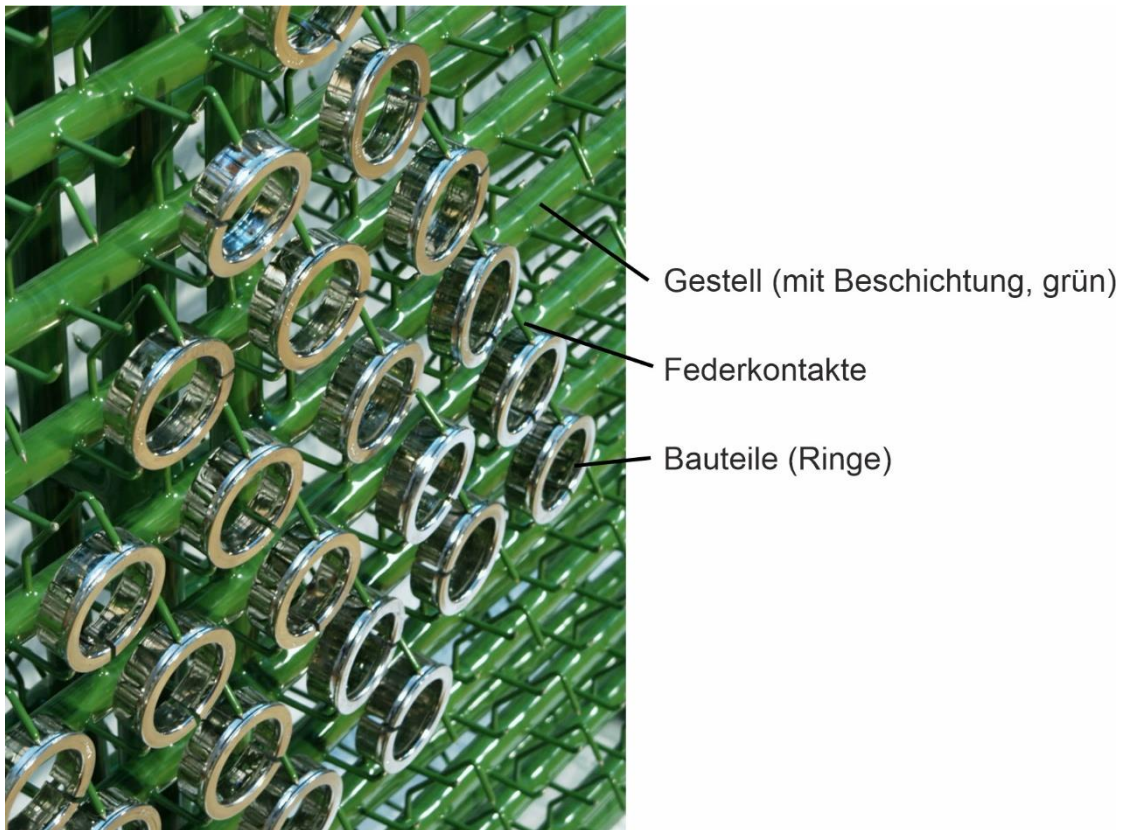


Abbildung 3.6: Gestell mit Klemmkontakten und eingesetzten Ringen. Bildquelle: (Artimax 2016) mit ergänzten Beschriftungen. Kontaktpunkte sind an blanken, nicht isolierten Federenden erkennbar.

Durch die feste Positionierung auf dem Gestell ergeben sich feste statische Kontaktpunkte. Da die Teile während der Beschichtung normalerweise nicht abgenommen und neu aufgesteckt werden, verfügen diese Kontaktstellen auch nach der Beschichtung weiterhin über keine nennenswerte Schichtdicke und stellen bei korrosivem Angriff einen Schwachpunkt dar. Eine Verwendung solcher Gestelle stellt für die Anforderungen in dieser Arbeit daher keine zufriedenstellende Lösung dar.

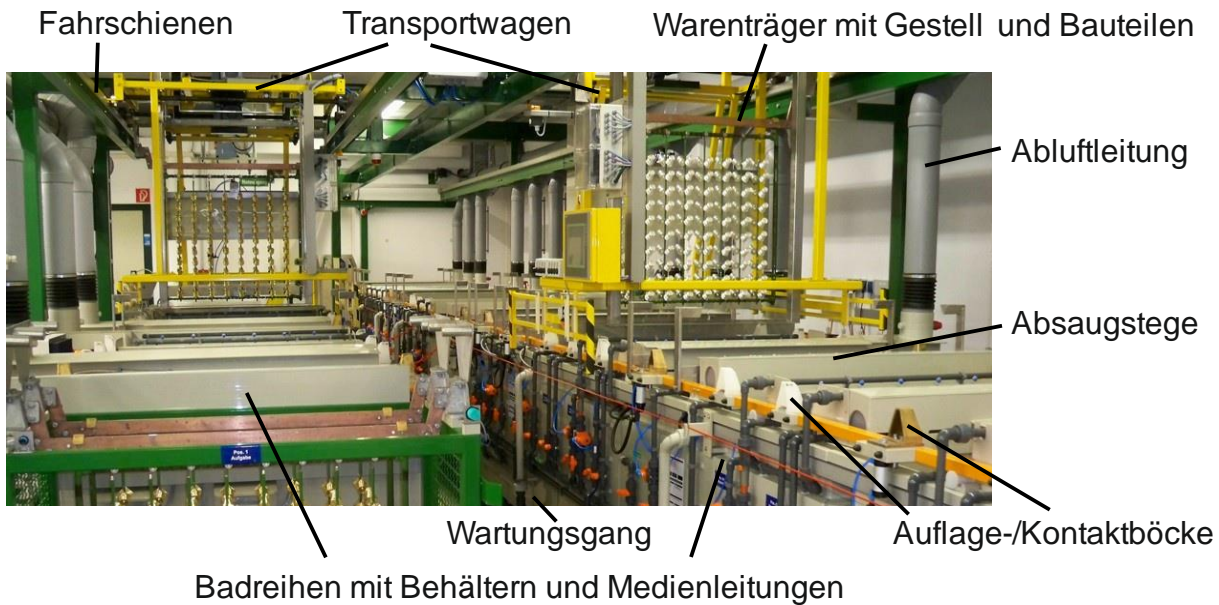


Abbildung 3.7: Beispiel einer Gestellgalvanikanlage. Bildquelle: (Dresdner Silber und Metallveredlung GmbH 2016) mit ergänzten Beschriftungen

### Reaktortechnik

Eine Reaktoranlage unterscheidet sich bezüglich der Bauteilaufnahme nicht von einer Gestellanlage. Die Besonderheit liegt hier in der Nutzung eines Behälters für mehrere Prozessschritte. Dabei werden die Medien in Vorratsbehältern gelagert und nur für den jeweiligen Arbeitsschritt in den Reaktorbehälter gepumpt. Die für diese Arbeit relevanten Aspekte für eine vollflächige und maßgenaue Beschichtung (Kontaktstellen, Stromdichteverteilung) sind für eine Reaktortechnik gleichermaßen anwendbar wie für eine Gestellanlage, daher werden die Besonderheiten dieser Anlagentechnik nicht näher betrachtet.

### Trommelanlage

Trommelanlagen dienen zur Beschichtung von Schüttgut. Bei der Beschichtung mittels Trommeln werden diese auf Warenträgern transportiert und wie Gestelle von einem Prozessbad zum nächsten transportiert. Voraussetzung für eine erfolgreiche Beschichtung ist ein entstehender elektrischer Kontakt beim Aufschütten der Ware in der Trommel, dieser kann unterschiedlich realisiert werden – beispielsweise über Leisten, Ringkontakte oder auch Knopfkontakte in der Trommelwand. Die Trommel rotiert bzw. schaukelt und reversiert bei der Beschichtung, so dass sich die einzelnen Bauteile gegeneinander bewegen.



Der Elektrolyt tritt über eine Perforation in der Trommelwand ein und aus. (Jelinek 2013, S. 84–88)

In einer Trommel treten somit, anders als bei der Gestellbeschichtung, keine festen Kontaktpunkte auf und es können vollflächige Beschichtungen realisiert werden. Dieses Verfahren weist jedoch einige bauartbedingte Eigenschaften auf, welche die Verwendung nicht für alle Bauteile erlauben.

Durch die Trommelbewegung werden Relativbewegungen und Schläge der Werkstücke untereinander hervorgerufen, welche einen negativen Einfluss auf die Oberflächenqualität haben. Daher werden in der Trommel auch nur Werkstücke galvanisiert, die entweder so klein und leicht sind, dass die ausgeübten Schläge die Oberfläche nicht beeinflussen (z. B. Knöpfe), oder die im Hinblick auf die Oberfläche als weniger kritisch einzustufen sind (z. B. Schrauben und elektrische Kontakte). (Bach et al. 2005, S. 121–122)

Ist die geforderte Überzugsdicke eng toleriert, so sind die Massenverfahren weniger geeignet, weil die Streuungen der Schichtdicke bei Teilen, die in der Glocke bzw. in der Trommel bearbeitet werden, verständlicherweise viel größer sind als bei Teilen, die auf Galvanogestelle aufgesetzt und bei gleichbleibendem Kontakt galvanisiert werden. (Dettner et al. 1963, S. 350) Die Beschichtung in einer Glocke eignet sich für kleine Mengen oder sehr kleine Teile. (Jelinek 2013, S. 84)

Als Schlussfolgerung der zuvor beschriebenen Eigenschaften ist eine Eignung für die Beschichtung von größeren Wälzlagern mit einer vollflächigen, homogenen Schicht nicht gegeben. Auf Grund der von Bach beschriebenen Einschränkungen zur Oberflächenqualität und der maximalen Größe sowie die von Dettner angeführte Schichtdickenprobleme ist ein Einsatz nicht erfolgsversprechend. Die Trommeltechnik scheidet damit als Lösungsvariante aus.

### Sonderanlagen

Bei der Vielzahl unterschiedlicher Bauteile und Anwendungen, für welche die Galvanotechnik eingesetzt wird, existieren auch stark individuell gestaltete Sonderanlagen. Es werden beispielsweise Anlagen nur für einen bestimmten Bauteiltyp ausgelegt, um eine größtmögliche Stückzahl bei optimaler Qualität zu erhalten. Bei Großbauteilen können

Gestell- und Reaktortechnik gemischt angewendet werden. Für verbesserte Beschichtungsbedingungen werden spezielle Vorrichtungen genutzt oder es werden Bauteile nur teilweise eingetaucht, rotiert und mit einer gezielten Strömung beaufschlagt. (Patentschrift DE1496892 A1 1969) Eine spezialisierte Anpassung der konventionellen Anlagentypen ist daher in der Praxis allgegenwärtig. Sonderanlagen stellen daher hauptsächlich spezialisierte Ausführungen anderer Anlagentypen bzw. Kombinationen von Anlagentypen dar.

### Brush Plating

Beim Brush Plating, im deutschen Sprachraum auch „Tampongalvanisieren“ genannt, wird das Bauteil nicht in einen Elektrolyten eingetaucht. Eine mit saugfähigem Material (Baumwolle, Vlies o. ä.) umwickelte Anode wird an das Bauteil angelegt, dieses wird kathodisch verbunden, um den Stromkreis zu schließen. Die umwickelte Anode wird auf dem Bauteil an der zu beschichtenden Stelle meist manuell bewegt. Da der aufgesogene Elektrolytvorrat gering ist, muss ein Elektrolytaustausch durch das saugfähige Material erfolgen, dieses wird entweder neu benetzt oder in manchen Fällen auch zwangsdurchströmt. Eine Übersicht zu Vor- und Nachteilen kann der Literatur entnommen werden. (Dennis et al. 1981; Rubinstein 1987; Rubinstein 1994)

Da im Rahmen dieser Arbeit das Gegenteil einer selektiven Beschichtung benötigt wird, wurde das Brush Plating nicht näher betrachtet. Gerade bei rotationssymmetrischen Bauteilen ist zwar eine automatisierte Beschichtung möglich, wie bei dem am Fraunhofer IPA entwickelten Autobrush-System gezeigt. (Schmid et al. 2008) Durch notwendige Überlappungen der Schichten an den Bereichsrändern wäre ein solches Vorgehen sowohl bezüglich der geometrischen Toleranzen als auch bezüglich der Schichteigenschaften in diesem Bereich problematisch.

### Weitere Anlagentypen

Neben den oben beschriebenen Anlagentypen sind weitere Bauarten bekannt, welche für die Beschichtung von rotationssymmetrischen Bauteilen bzw. Wälzlageringern nicht in Frage kommen. Durchlaufanlagen beispielsweise dienen zur Beschichtung von endlosem Material wie Bändern, Drähten oder auch Rohren. Hierbei läuft das Substrat in einem

kontinuierlichen Verfahrensablauf durch die Behandlungslösungen. Dabei wird es ggfs. durch nichtleitende Umlenkrollen geführt, um die behandelte Länge im Elektrolyt zu erhöhen. Die Kontaktierung erfolgt außerhalb des Bads. (Jelinek 2013, S. 115–120)

### 3.3.3 Ableitung von Anforderungen an diese Arbeit

Aus dem vorliegenden Stand der Technik bezüglich der verschiedenen Anlagentypen und -techniken ergibt sich ein eindeutiges Bild für diese Arbeit: Eine direkt geeignete Lösung ist nicht vorhanden. Einzelne Anlagenarten sind geeignet, eine vollflächige Beschichtung zu generieren (Trommel- / Glockentechnik), jedoch nur mit einem eingeschränkten Bauteilspektrum und eingeschränkter Schichtpräzision und -qualität. Bei der gebräuchlichen Gestellanlage ist die Vollflächigkeit nicht gegeben, spezialisierte Verfahren wie das Brush Plating sind gezielt auf eine Selektivität ausgelegt.

Tabelle 3.1: Anforderungserfüllung für verschiedene Anlagentypen

Anlagentyp	Vollflächigkeit	Maßhaltigkeit	Schichtqualität	Bauteilgröße
<b>Gestellanlage</b>	-	x <sup>(1)</sup>	+	x <sup>(2)</sup>
<b>Trommelanlage</b>	+	-	-	-
<b>Brush-/Jetplating</b>	-	+	x <sup>(3)</sup>	+
<b>Sonderanlage</b>	x <sup>(4)</sup>	x <sup>(1)</sup>	+	+
Legende	+	Anforderung erfüllt		
	-	Anforderung nicht erfüllt		
	x	Nicht pauschal zu beurteilen		
(1) abhängig von Gestell- und Anodenauslegung				
(2) auf Gestellen kleine bis mittlere Teile, bei Einzelaufnahme auch größere Teile				
(3) verfahrensabhängig, teilweise Spezialverfahren				
(4) abhängig Vorrichtungstechnik				

Zusammenfassend ergibt sich für diese Arbeit:

- Einzig die Sonderanlagen, welche per Definition für individuelle Anforderungen gedacht sind, kommen als Anlagentyp in Frage. Ein Lösungsansatz für die Fragestellung dieser Arbeit ist jedoch auch in diesem Kontext nicht bekannt.
  - ▶ Anforderung: Es wird eine Methodik benötigt, welche die Entwicklung einer geeigneten galvanischen Anlagen- bzw. Produktionstechnik nachvollziehbar ermöglicht. Durch das Zusammenspiel von Elektrochemie, physikalischen Effekten und maschinenbaulichen Komponenten (inkl. Steuerungstechnik usw.) und in der industriellen Umsetzung ggfs. regulatorischen Anforderungen stellt dies eine interdisziplinäre Herausforderung dar. Die interdisziplinären Anforderungen sind bereits aus MF1 bekannt. Für industrielle Galvanikanlagen ist bereits in der Entwicklung die Dokumentation relevanter Planungsdaten für ggfs. behördliche Genehmigungen notwendig. Dieser Aspekt muss in einer Methodik zur Entwicklung galvanischer Anlagen daher zwingend mit abgedeckt werden können (Methodische Anforderung MF4)
  - ▶ Detaillierte Anforderung für Fallbeispiel: Für die gewählten Wälzlager ist mit der Anwendung der Methodik eine prototypische Umsetzung zu realisieren und zu testen. Die Methodik muss ausreichend detailliert sein, um direkt angewendet und im Fallbeispiel umgesetzt zu werden. [Methodische Anforderung MF5 für diese Arbeit]
- Für die methodische Anforderung MF3 aus Abschnitt 2.2.3 wurde eine iterative Entwicklung als Anforderung definiert. Dies erklärt sich aus dem Gesamtaufbau einer galvanotechnischen Anlage und den inhaltlichen Anforderungen, es wird eine gleichzeitige Entwicklung auf einer makroskopischen Ebene (Prozessabfolge, Behälteranzahl und -anordnung, Anlagentyp, Be- und Entstückung mit Einbindung in den Warenfluss der Produktion) und die Auslegung und Konstruktion des Beschichtungsraums und der Bauteilaufnahmen auf Detailebene benötigt. Dies ist durch die gegenseitigen Wechselwirkungen und Abhängigkeiten nur mit einer schrittweisen Umsetzung sinnvoll darstellbar.

# 4 Entwicklungstechniken

Die Konstruktionstechnik und Konstruktionslehre ist bei der Planung, Entwicklung und Konstruktion von Maschinen und Anlagen ein immens wichtiger Aspekt zur Vermeidung von Fehlentwicklungen und zur Minimierung des Risikos von Fehlern. Der Produktentstehungsprozess (PEP) und Entwicklungsmethodiken sind daher auch im Maschinenbau ein intensives Forschungsthema, welches durch die Weiterentwicklung von computergestützten Werkzeugen, Fertigungstechnologien und in den letzten Jahren der zunehmenden Vernetzung einem konstanten Wandel unterliegt.

## 4.1 Überblick Methodische Entwicklung

Der Dubbel definiert die Punkte „Motivation für die Lösung der Aufgabe sicherstellen, Klarstellen von Rand- und Anfangsbedingungen, Vorurteile auflösen, Varianten suchen, Entscheidungen fällen“ als Voraussetzung für ein methodisches Vorgehen. Außerdem wird bei komplexen Aufgaben ein schrittweises Vorgehen mit einer Strukturierung in Teilaufgaben genannt. (Grote et al. 2014, S. F5) Nach der VDI-Richtlinie 2221 ist eine wettbewerbsfähige Herstellung mit einem leistungsfähigen Entwicklungs- und Konstruktionsprozess verbunden. Durch das methodische Entwickeln sollen Abläufe beispielsweise „die Möglichkeit geben, den vorhandenen Entwicklungs- und Konstruktionsablauf inhaltlich und organisatorisch zu überdenken und gegebenenfalls zu ändern, mit dem Ziel, den Aufwand zu reduzieren.“ (VDI-Richtlinie 2221, S. 2)

Seit dem Beginn einer systematischen Entwicklung von technischen Produkten wurden viele Modelle und Methodiken entwickelt. Eine Übersicht, auch über die historische Entwicklung, wurde beispielsweise von Eder (Eder 2012) zusammengestellt. Tomiyama hatte zuvor bekannte Methodiken aus Industrie und Lehre recherchiert und zusammengefasst. (Tomiyama et al. 2009) Tomiyama gliedert in abstrakte und konkrete Methodiken, bei den

---

konkreten unterscheidet er dabei (allgemeine) Entwicklungsmethodiken („Design methodology“), Methodiken zum Erreichen bestimmter Ziele und Vorgehensmethodiken („Process methodology“). In der Bewertung des Überblicks kommt er zum Schluss, dass viele der Methodiken die moderne Produktentwicklung nicht ausreichend abbilden, z. B. bezüglich komplexen multidisziplinären Produktentwicklungen wie in der Mechatronik. (Tomiya et al. 2009, S. 561–562) Nachfolgend werden vorrangig die allgemeinen Methoden vorgestellt, die für die Arbeit die größte Relevanz aufweisen, sowie neuere Ansätze ergänzt.

#### 4.1.1 Bekannte Entwicklungsmethodiken

Für die Konstruktionslehre und Entwicklungsmethodik stellt im deutschsprachigen Raum der sogenannte Pahl/Beitz das Standardwerk dar. 1977 wurde dabei der Produktentstehungsprozess in die vier Phasen Planen und Klären der Aufgabe, Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten unterteilt. Die Entwurfsphase ist dabei zusätzlich in einen vorläufigen und einen endgültigen Entwurfsschritt unterteilt, zum Ende der jeweiligen Phasen / Schritte erfolgt jeweils die Freigabe für den nächsten Abschnitt. Für die Optimierung der Ergebnisse wird iterativ vorgegangen, ein „Vor- und Rückspringen“ stellt auch eine Kontrolle dar. (Feldhusen et al. 2013, S. 16–17) Klärung der Aufgabenstellung, Konzipieren, Entwerfen, Ausarbeiten werden auch in der aktuellen Auflage des Dubbel als die Hauptphasen im Konstruktionsprozess dargestellt. (Grote et al. 2014, S. F11) Auch nach Lévardy und Browning läuft die Produktentwicklung nicht linear, sondern iterativ ab. Diese Tatsache wird durch viele Modelle anerkannt und unterschiedlich, aber ähnlich behandelt. Beispiele sind ihnen zufolge der Shewhart-Deming-Kreis (Plan-Do-Check-Act, PDCA), der Six-Sigma-Zyklus (define-measure-analyze-improve-control), Boyds OODA-Schleife (observe-orient-decide-act) oder auch "design-build-test" und andere experimentelle Zyklen. (Lévardy et al. 2009, S. 602) Bei der Ermittlung eines geeigneten Lösungswegs können auch Ansätze aus verschiedenen Methodiken zu einer neuen Methodik zusammengeführt werden. (Binz et al. 2015; Posner et al. 2016)

Nach Ulrich und Eppinger lässt sich der Produktentwicklungsprozess in sechs Phasen aufteilen (siehe Abbildung 4.1), nach jeder Phase wird eine Überprüfung vorgenommen. Je nach der Art des Zielprodukts werden drei Varianten unterschieden, welche in der Detailkonstruktions- und Testphase voneinander abweichen und ggfs. Iterationsschleifen oder eine Aufteilung in Einzelkomponenten erlauben. (Ulrich et al. 2012, S. 13–22)

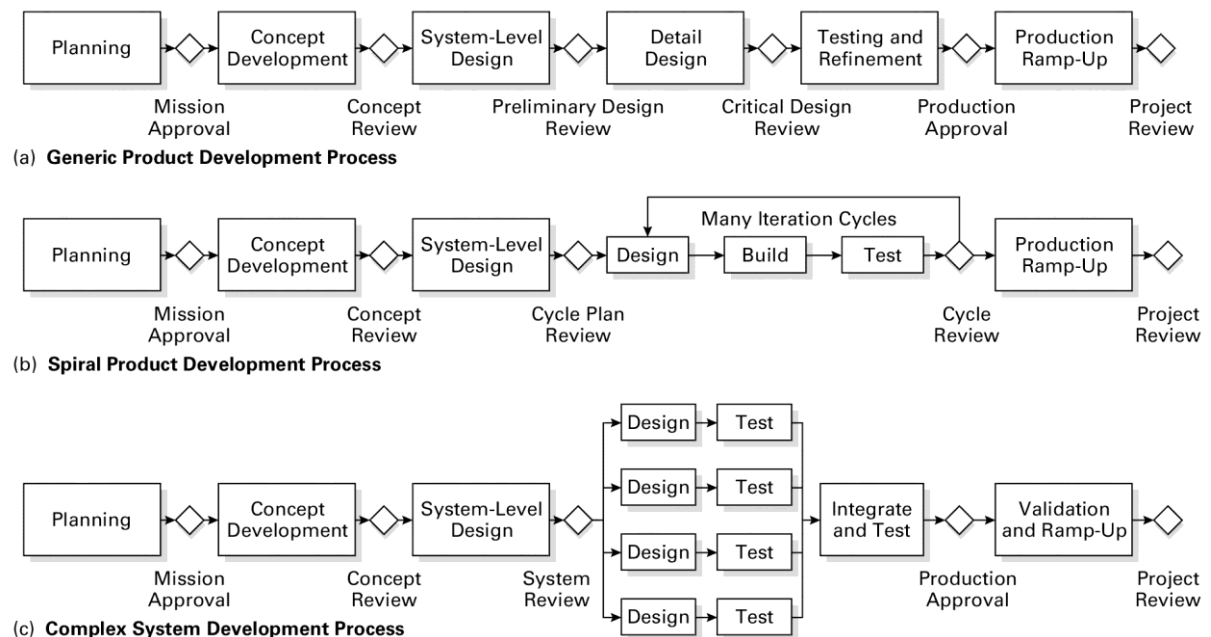


Abbildung 4.1: Drei Produktentwicklungsprozesse nach Ulrich und Eppinger (Ulrich et al. 2012, S. 22)

Die VDI-Richtlinie 2221 (letzte Ausgabe von 1993) gliedert ein generelles Vorgehen in vier allgemeine Phasen und sieben Arbeitsschritte, aus denen jeweils ein zugeordnetes Ergebnis entsteht (Abbildung 4.2). Die Arbeitsschritte erfolgen ggfs. iterativ, können aber je nach Aufgabenstellung auch nur teilweise durchlaufen werden. (VDI-Richtlinie 2221, S. 9–11)

Eine Gemeinsamkeit aller Modelle des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses (EKP) besteht in der unvollständigen Abbildung der Realität. Ein sequenzielles Vorgehen bildet die zumeist vorhandene parallele Bearbeitung nicht ab, auch werden begleitende Prozesse nicht betrachtet. In der aktuellen Auflage des Pahl/Beitz wird daher ein erweitertes Modell des EKP behandelt. (Feldhusen et al. 2013, S. 19–23)

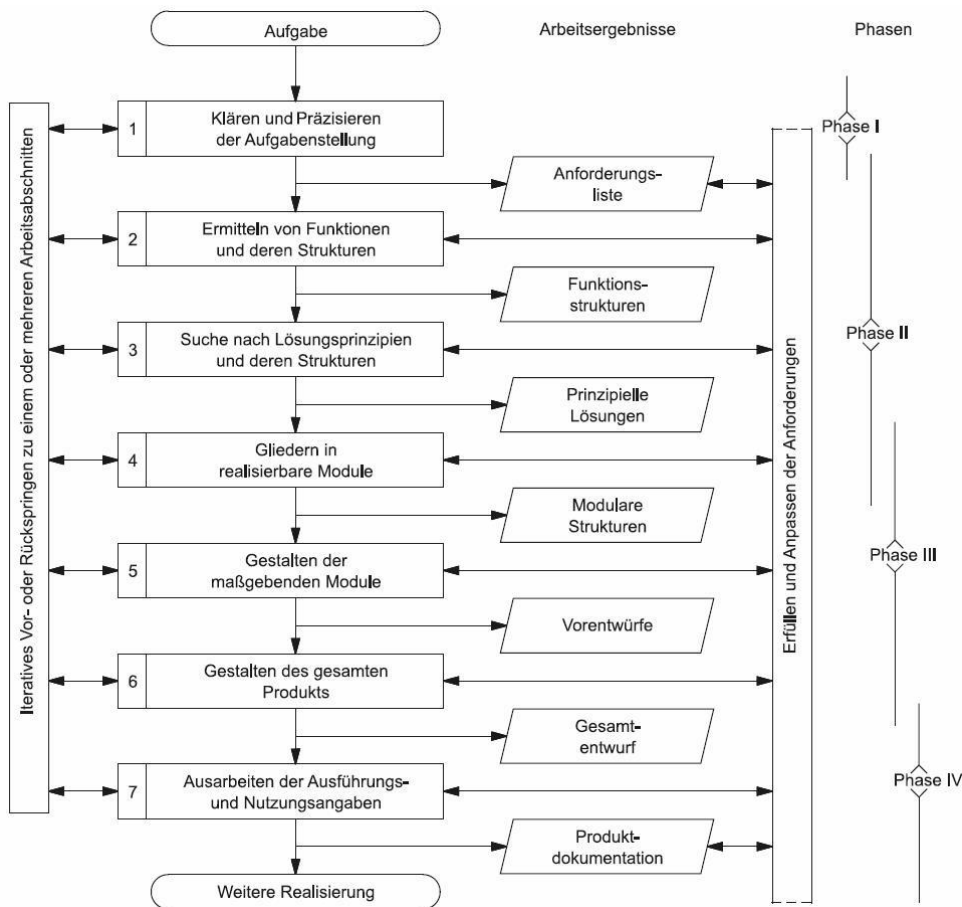


Abbildung 4.2: Entwicklungs- und Konstruktionsprozess nach VDI 2221 (VDI-Richtlinie 2221, S. 9)

Ein Alternative wird durch Lindemann mit dem Münchener Vorgehensmodell (Abbildung 4.3) vorgestellt. Es basiert auf den drei Hauptschritten „Ziel beziehungsweise Problem klären“, „Lösungsalternativen generieren“ und „Entscheidung herbeiführen“, welche in sieben kleinere Einzelemente aufgeteilt werden. Zwischen diesen Elementen kann flexibel gewechselt werden (auch iterativ), es wird jedoch auch ein Standardvorgehen angeboten. (Lindemann 2009, S. 46–52)



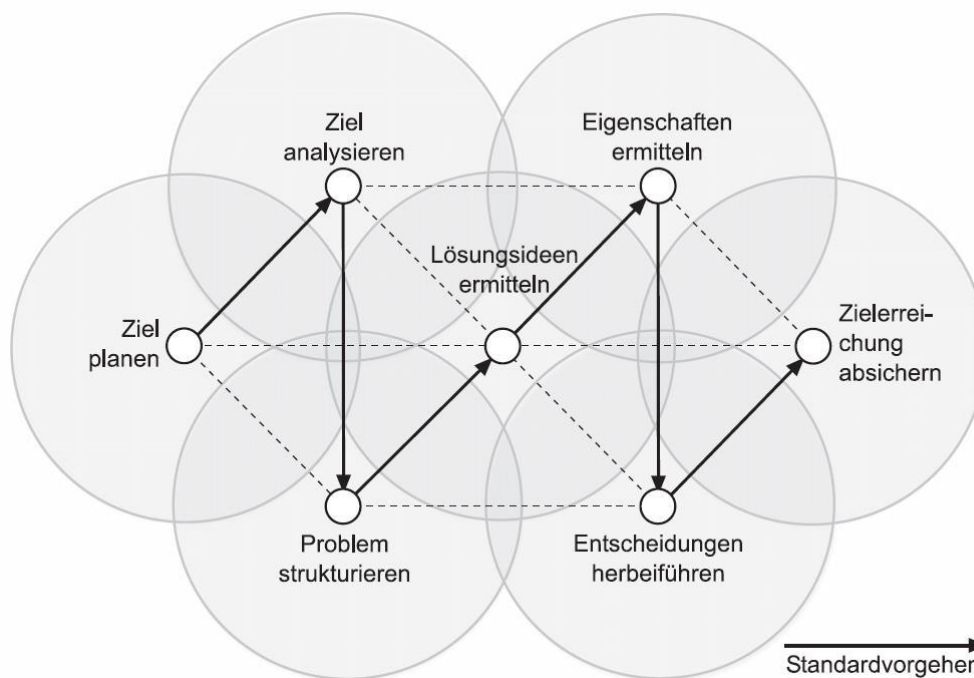


Abbildung 4.3: Münchener Vorgehensmodell (MVN) mit Standardvorgehen (Lindemann 2009, S. 51)

Nach Albers ist die Produktentwicklung der zentrale Prozess des Ingenieurwesens. Das beschriebene „integrated Product engineering Model (iPeM)“ (siehe Abbildung 4.4, früher auch iPeMM (Albers et al. 2007)) ist ein generisches Prozessmodell, um agile Produktentwicklungsprozesse abzuleiten. Dabei wird ein System, welches alle Ziele enthält, über ein Betriebssystem ("Operating System") in ein System von Objekten überführt. Die Objekte erweitern sich während des Entwicklungsprozesses. Im Betriebssystem werden einerseits Schritte der Produktentwicklung, aber auch der Problemlösung (nach der SPALTEN-Methode (Albers et al. 2005; Albers et al. 2016b)) kombiniert und eine Matrix zur Produktentwicklung erstellt. Daraus kann ein Phasenmodell zur Steuerung des Produktentwicklungsprozesses gebildet werden. (Albers et al. 2017, S. 3–5)

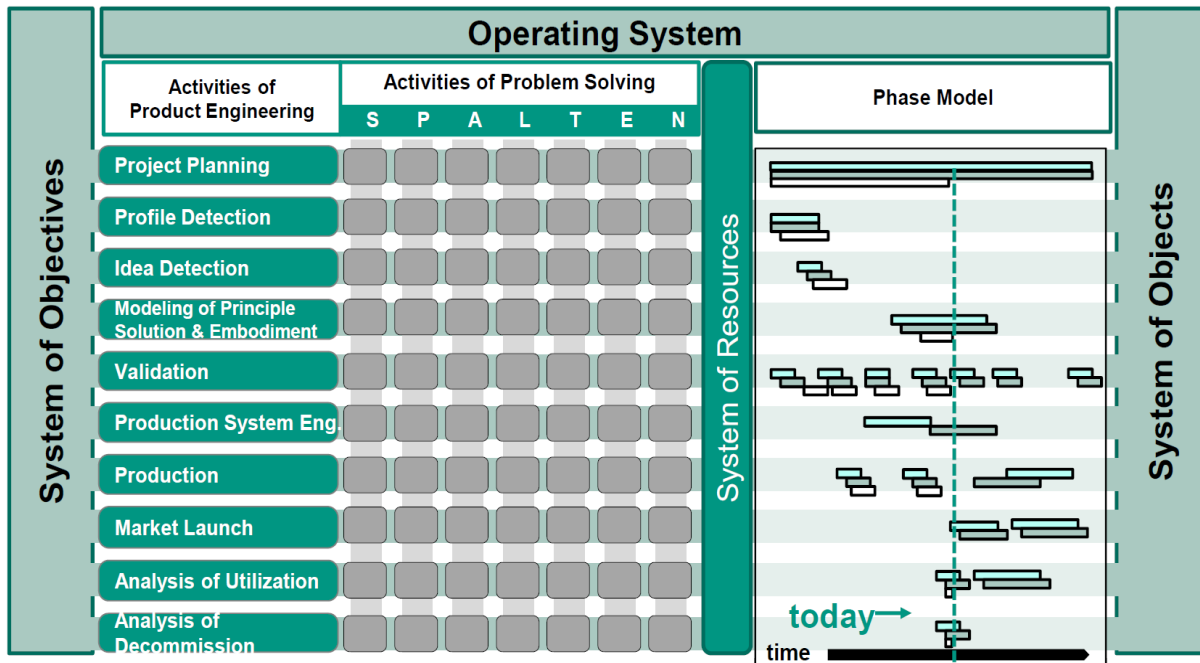


Abbildung 4.4: Das „integrated Product engineering Model (iPeM)“ nach Albers (Albers et al. 2016a, S. 101)

Die Validierung stellt für Albers die zentrale Aktivität im Produktentwicklungsprozess dar. Dies wird mit der "rule of ten" nach Ehrlenspiel begründet. (Albers et al. 2017, S. 8) Nach dieser "rule of ten" nehmen die Kosten für eine Fehlerbeseitigung oder -vermeidung stark zu (je früher, desto günstiger). Nach Ehrlenspiel steigen sie um den Faktor 10 je Abteilung. Abteilungen sind dabei beispielsweise "Entwicklung, Konstruktion, Fertigungsplanung, Qualitätssicherung, Vertrieb usw.". (Ehrlenspiel et al. 2013, S. 518)

Der Ansatz des "Systems Engineering" nach dem Hall-ETH-Modell basiert auf vier Grundsätzen. Erstens eine Top-Down-Vorgehensweise mit der Betrachtung von verschiedenen Konzepten und der Machbarkeit, besonders bei großen Systemen. Zweitens ist die Entwicklung mehrerer Varianten gefordert, d. h. auch bei einer ersten vorhandenen Lösung sollten weitere Alternativen gesucht werden. Als Drittes sollen Projektphasen definiert werden, und der vierte Grundsatz beschreibt die Verwendung eines Problemlösungszyklus in den Phasen. (Haberfellner et al. 2005, S. 1451–1452)

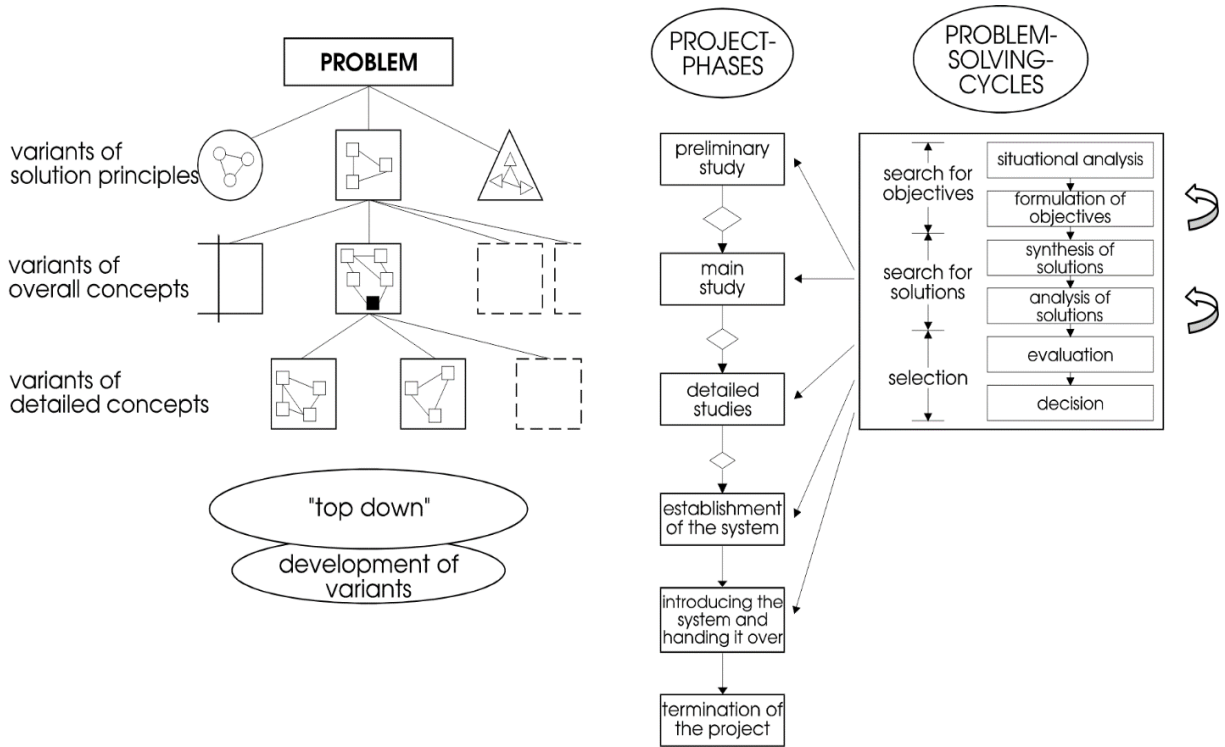


Abbildung 4.5: Action Model nach Haberfellner (Haberfellner et al. 2005, S. 1452)

Außerhalb der klassischen Produktentwicklung im Maschinenbau wurde in der Softwareentwicklung von Royce ein Wasserfallmodell vorgeschlagen, in dem die Entwicklungsschritte sequenziell durchgeführt werden sollen bzw. iterative Interaktion vorzugsweise nur zwischen direkt aufeinanderfolgenden Schritten stattfinden. Dabei benennt er sieben Schritte (analog zur Konstruktionsmethodik mit den Anforderungen). (Royce 1970) Jedoch wurden auch in für die Programmierung alternative, iterative Modelle wie beispielsweise das Spiralmodell (Abbildung 4.6) entwickelt. (Boehm 1986)

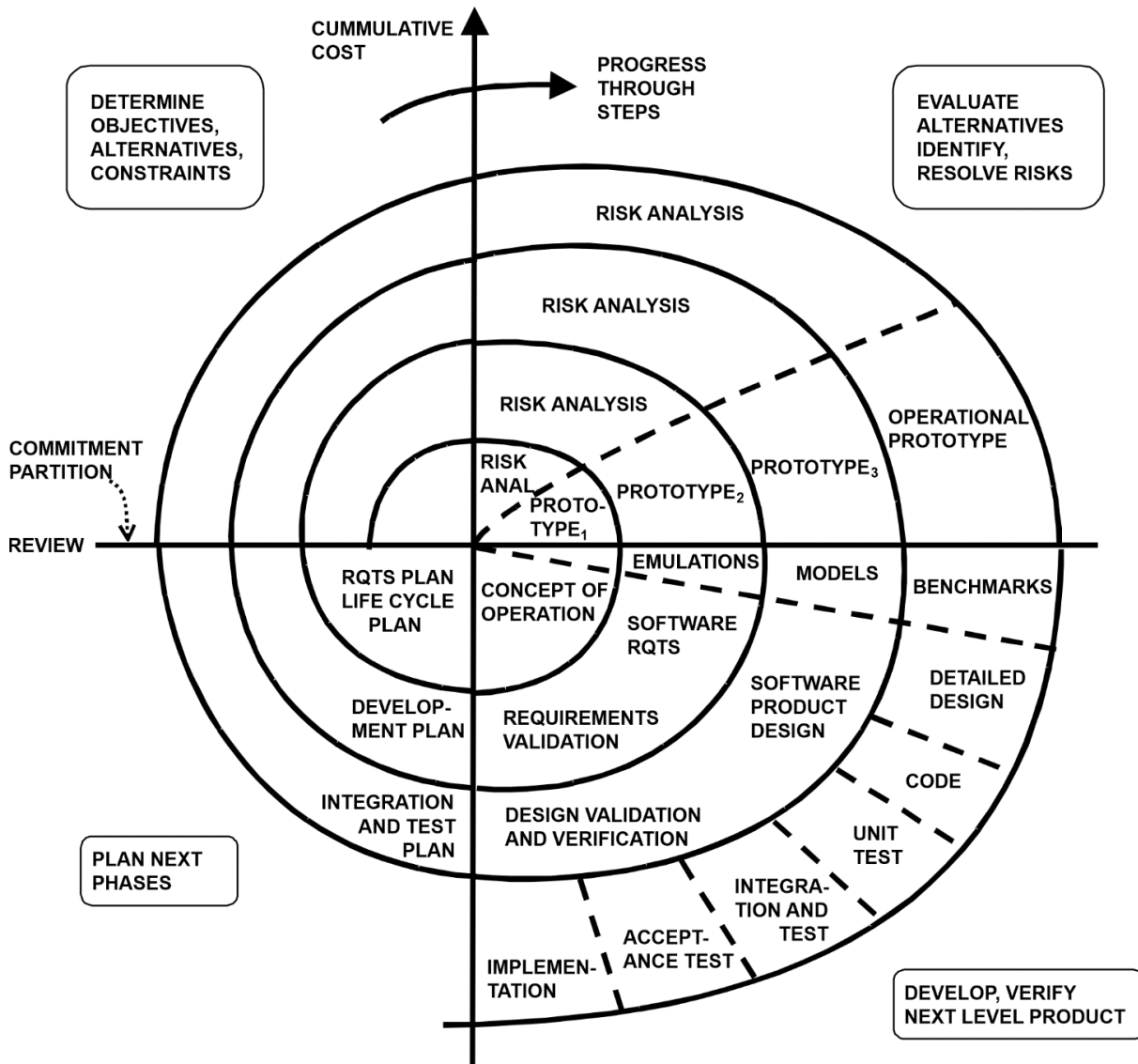


Abbildung 4.6: Spiralmodell nach Boehm (Boehm 1986); Bildquelle: (Boehm et al. 2000, S. 2)

Für den Bereich der Mechatronik wurde die VDI 2206 als Ergänzung zu bestehenden Richtlinien (z. B. VDI 2221, welche "allgemeingültige, branchenunabhängige Grundlagen methodischen Entwickelns und Konstruierens behandelt") vorgesehen. (VDI-Richtlinie 2206, S. 8) Mechatronische Systeme erfordern unter anderem interdisziplinäres Denken und eine ganzheitliche Betrachtung. Infolge der Komplexität wird eine systematische Vorgehensweise als notwendig erachtet. (VDI-Richtlinie 2206, S. 12) Die VDI 2006 zitiert Dörner (Dörner 1994), nach dem es keine „kanonisierte Optimalform des Konstruktionsprozesses gibt, der der Konstrukteur in einem festen Ablaufplan folgen kann.“ (VDI-Richtlinie

---

2206, S. 26) Die Entwicklung einzelner Baugruppen im Bottom-Up-Design und deren Kombination wird als unzureichend angesehen. Der Top-Down-Ansatz wird für Kenntnisse zur Grobstruktur als notwendig angesehen. Jedoch kann im späteren Entwicklungsstadium auch ein Wechsel zurück zum Bottom-Up-Vorgehen erforderlich sein, wenn durch neue Kenntnisse auf Detailebene eine Änderung an abhängigen Elementen notwendig wird. (VDI-Richtlinie 2206, S. 24)

Die VDI 2006 postuliert ein Vorgehensmodell aus drei Elementen: Ein allgemeiner Problemlösungszyklus auf der Mikroebene und das aus der Softwareentwicklung stammende V-Modell (siehe Abbildung 4.7) auf der Makroebene. Das dritte Element sind „vordefinierte Prozessbausteine zur Bearbeitung wiederkehrender Arbeitsschritte“. Der Problemlösungszyklus besteht dabei aus der „Situationsanalyse / Zielübernahme“ (Ist-/Sollzustand), der „Analyse und Synthese“ (Entwicklung und Prüfung von Lösungen), der Analyse und Bewertung sowie einer Entscheidung. Aus der Entscheidung kann ggfs. zur Zielformulierung zurückgekehrt oder in die Planung des weiteren Vorgehens übergegangen werden. Das V-Modell „beschreibt das generische Vorgehen beim Entwurf mechatronischer Systeme, das fallweise auszuprägen ist.“ Für dieses wird bemerkt, dass bei der Anwendung in der Praxis die zeitliche von der logischen Abfolge differieren kann, wenn unterschiedliche Entwicklungsrisiken für einzelne Teilsysteme absehbar sind. Das V-Modell kann bis zur Erreichung der Serienreife auch mehrfach durchlaufen werden (z. B. für verschiedene Muster und Vorserienprodukte). (VDI-Richtlinie 2206, S. 26–29)

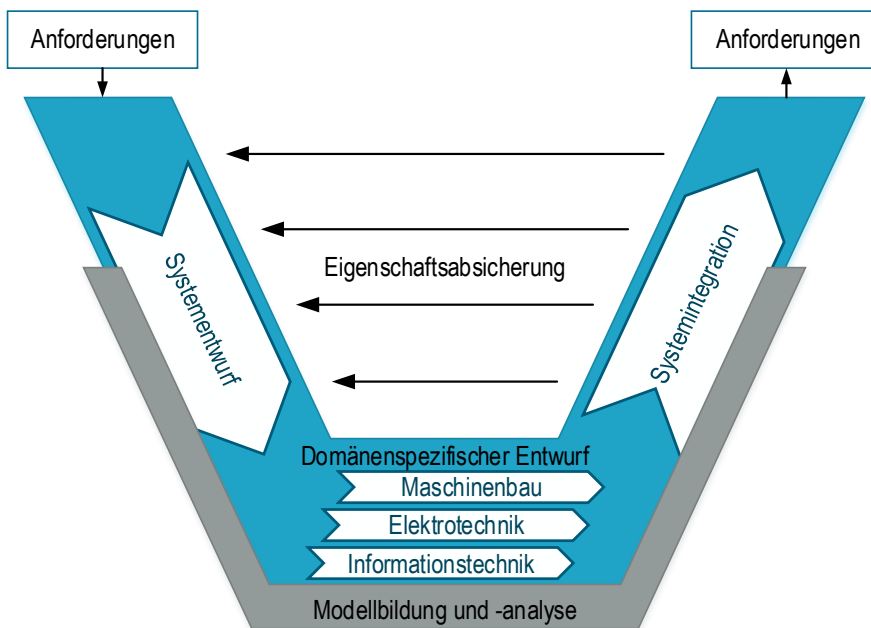


Abbildung 4.7: V-Modell in Anlehnung an VDI 2206 (VDI-Richtlinie 2206, S. 29)

In der domänenspezifischen Entwurfsphase können für die jeweilig relevanten Disziplinen geeignete Entwicklungsmethodiken verwendet werden. Für die Eigenschaftensicherung sind die Verifikation (formale Übereinstimmung mit den Anforderungen) und die Validierung (Eignung für den Einsatzzweck) vorgesehen. (VDI-Richtlinie 2206, S. 35) Das V-Modell wird auch in der Softwareentwicklung verwendet und weiterentwickelt, aus dem V-Modell 97 wurde mittlerweile das V-Modell XT. (Broy et al. 2005) Es stellt auch aktuell noch das deutsche Referenzmodell für Systementwicklungsprojekte dar. (Weit e.V. 2019) Auf Grund der Ähnlichkeit zum V-Modell aus VDI 2206, wird auf die genauen Spezifika der Variante der Softwareentwicklung nicht näher eingegangen.

#### 4.1.2 Agile Prozesse bzw. agile Entwicklung

In der Softwareentwicklung entstanden als Gegenpol zu "schwergewichtigen" Vorgehensmodellen neue, agile Ansätze. Die Grundzüge dieser Ansätze wurden 2001 im mittlerweile breit unterstützten „Agilen Manifest“ definiert. (Hanser 2010, S. 9) Es enthält vier Leitsätze für die Softwareentwicklung: „Individuals and interactions over processes and tools – Working software over comprehensive documentation – Customer collaboration

over contract negotiation – Responding to change over following a plan“. (Beck et al. 2001) Nach Hanser stellen die vier Leitsätze „eine Art Randbedingungen der leichtgewichtigen Software-Entwicklung dar“. Umgesetzt werden sie über Prozessmodelle, welche die agilen Leitsätze beinhalten (wie z. B. Scrum, Extreme Programming oder Crystal in der Softwareentwicklung). (Hanser 2010, S. 10) Haberfellner und de Weck beschreiben einen agilen Entwicklungsprozess über drei Charakteristika: Schnell („nimble, dextrous and swift“), sich anpassend und reagierend auf Unerwartetes bzw. neue Informationen und dass Anforderungen und Lösungen nicht frühzeitig als unveränderlich definiert werden. (Haberfellner et al. 2005, S. 1449)

Nach Feldhusen und Grote zeichnet sich eine agile Vorgehensweise durch Iterationen und "eine anfängliche Fokussierung auf die Hauptkriterien" aus. Statt einer sequenziellen Abfolge (Zwischenergebnis zu Zwischenergebnis) wird das gesamte Produkt gleichzeitig betrachtet und die Detaillierung von Schritt zu Schritt vertieft (Abbildung 4.8). Dies wird über „Vollumfänglichkeit des Prozesses vor der Tiefe der Betrachtung“ zusammengefasst. Agilen Prozessen wird durch die Digitalisierung zunehmende Relevanz zugeschrieben, da die Fertigung zur Beurteilung eines Produktes weniger benötigt wird und somit „die Konstruktion diesbezüglich der Softwareentwicklung zunehmend ähnelt“. (Feldhusen et al. 2013, S. 808–809)

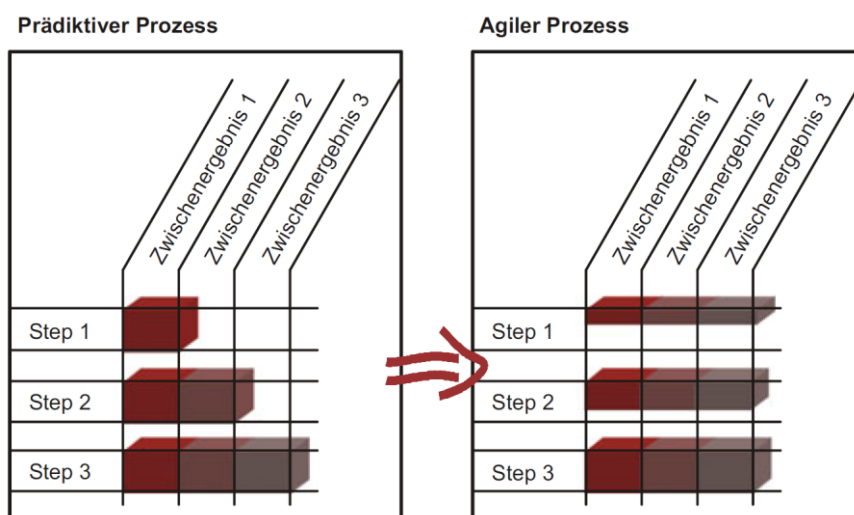


Abbildung 4.8: Vergleich zwischen einem herkömmlichen (prädiktiven) und einem agilen Prozess nach (Feldhusen et al. 2013, S. 809) bzw. (Feldhusen et al. 2009)

Der OODA Loop von 1995 des Piloten Boyd (Boyd 2018), insbesondere in der von Boehm angepassten und in Abbildung 4.9 dargestellten Form (Boehm et al. 2006; Turner 2007), wird wie auch das Spiralmodell von Boehm (Boehm 1986) als Beispiel für Agilität genannt. Daraus ergibt sich als „kleinster gemeinsamer Nenner“ ein zyklisches Vorgehen in kleinen Schritten, d. h. iterativ und inkrementell. Daraus ergibt sich der „Agile Entwicklungszyklus (AEZ)“, bestehend aus der Situationsanalyse, der Planung, der Realisierung und dem Test. Der Test liefert Feedback für die erneute Situationsanalyse, welche auch Impulse durch Veränderungen von Außerhalb und neue Informationen erhält. (Stelzmann 2011, S. 40-48)

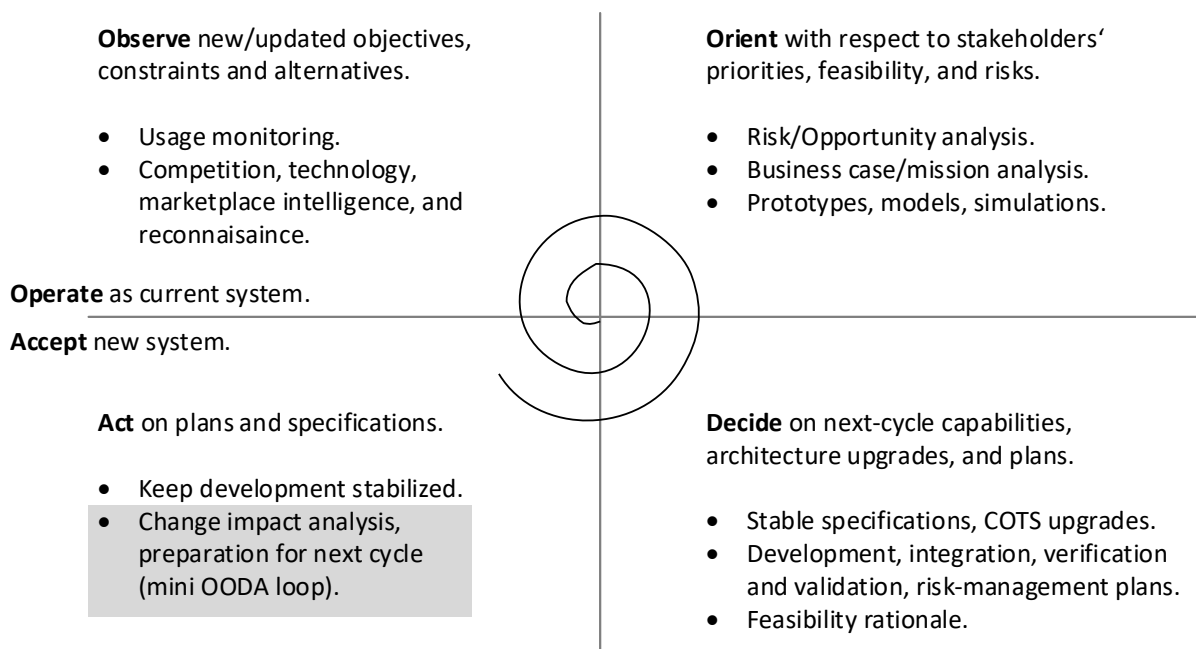


Abbildung 4.9: OODA Loop nach Boehm in Anlehnung an (Turner 2007, S. 13)

In der Studie „Status Quo Agile“ wurde die Verbreitung und Bewertung agiler Methoden untersucht. Sie wurden dabei besser bewertet als klassisches Projektmanagement, vorrangig verbreitet sind Scrum, Kanban und Lean. Oftmals werden Sie mit klassischen Methoden kombiniert, nur 20 % nutzen sie „by the book“. Die Verbreitung ist dabei nicht auf die Softwareentwicklung begrenzt, sondern sie werden auch in anderen Bereichen angewendet. (Komus et al. 2017, S. 6) Die Studie unterscheidet zwischen agilen Werten (nach dem agilen Manifest), agilen Methoden und agilen Praktiken / Techniken. Dabei werden am häufigsten Techniken aus der Scrum-Methode angewendet, welche auch bezüglich



Leistungsfähigkeit von allen Methoden am besten abschneidet. (Komus et al. 2017, S. 14–17)

Das „Herz“ von Scrum ist die Iteration. Dabei werden die Anforderungen betrachtet, die verfügbare Technologie beurteilt und unter Berücksichtigung der Fähigkeiten und Möglichkeiten durch das Team die Herangehensweise für den Aufbau der Funktionalität entschieden. Auftretende Schwierigkeiten und Komplikationen fließen täglich in die Herangehensweise ein und das Vorgehen wird durch das Team entschieden. (Schwaber 2004)

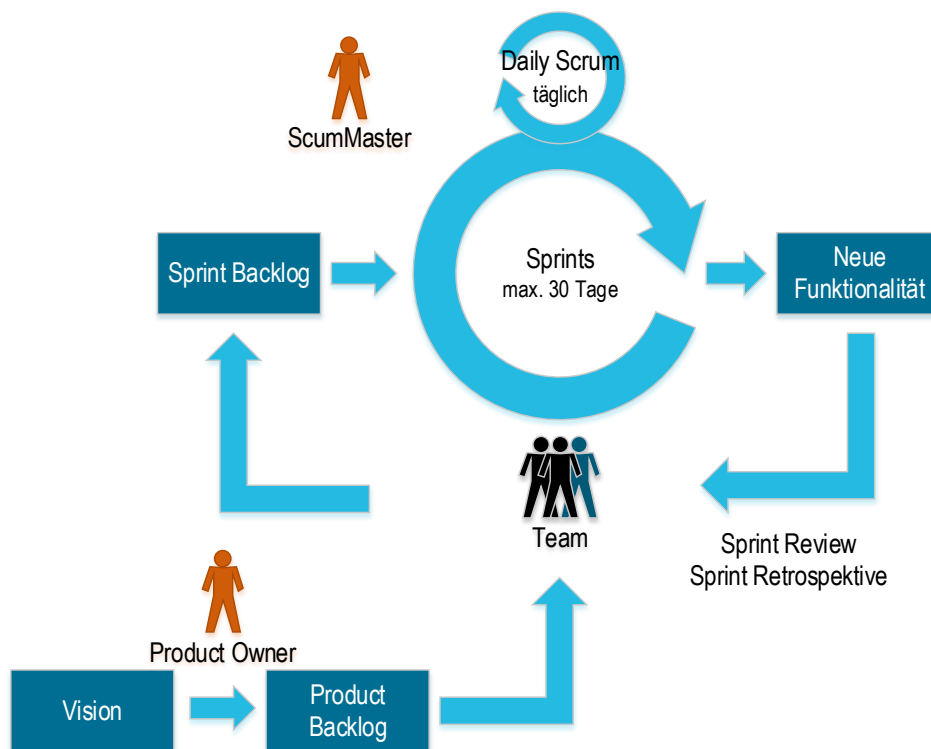


Abbildung 4.10: Ablauf von Scrum. In Anlehnung an (Hanser 2010, S. 69)

Bei Scrum handelt es sich somit um eine Projektmanagementmethode. Kernpunkt sind dabei wie in Abbildung 4.10 gezeigt die Iterationszyklen (Sprints), deren Länge zu Beginn gewählt wird und dann fix vorgegeben ist (die Länge sollte bei einem Monat oder weniger liegen (Schwaber et al. 2020, S. 7)). Übergreifend definiert das „Product Backlog“ (verantwortet vom „Product Owner“) die Anforderungen an die Software bzw. das Projekt. Im sogenannten „Sprint Backlog“, welches zu Beginn in einer Sprint-Planungssitzung generiert wird, werden die Anforderungen an die Software für den Sprint festgelegt. Täglich

wird während des Sprints eine kurze Besprechung namens „Daily Scrum“ mit Anwesenheit des prozessverantwortlichen „ScrumMaster“ abgehalten. Abgeschlossen wird der Sprint inhaltlich mit einem „Sprint Review“ (Prüfung und Abnahme des Ergebnisses) und einer „Sprint-Retrospektive“ zur kontinuierlichen Verbesserung der Zusammenarbeit im Team. (Hanser 2010, S. 61-78) Eine vollständige Übersicht mit Begriffen und Rollen findet sich bei der ursprünglichen Beschreibung von Scrum durch Schwaber. (Schwaber 2004)

Sowohl agile als auch nach geplantem Ablauf durchgeführte Projektformen weisen Defizite auf. Dies umfasst viele Aspekte eines Projekts. Beispielsweise sind agile Ansätze sehr gut für kleine Teams und dynamische Umgebungen geeignet, klassische Projektplanungen besser für große Teams und stabile Planungsbedingungen. Die Auswahl und Balance zwischen den Projektformen kann nach Boehm und Turner durch eine Risikobeurteilung erfolgen. (Boehm et al. 2003) Nach Boehm und Turner werden sowohl Agilität als auch Disziplin benötigt. Bei der Entwicklung einer eigenen Methode sollte diese nicht aus einem allumfassenden Ansatz herunterskaliert, sondern besser auf Basis minimaler Ansätze aufgebaut werden. (Boehm et al. 2007)

Im agilen Systems Engineering postulieren Haberfellner und de Weck drei unterschiedliche Umsetzungsstufen. Stufe 1 beinhaltet die Situationsanalyse der Anforderungen und Ziele im iterativen Problemlösungszyklus und die Bewertung der Lösungen hinsichtlich der Flexibilität. Stufe 2 beschreibt eine stückweise Entwicklung mit einer regelmäßigen Prüfung interner und externer Einflüsse auf die Entwicklung. Dabei werden vorzugsweise existierende Systeme geändert, das System aus einzelnen Modulen zusammengesetzt, welche für sich selbst einen Wert aufweisen sowie in einem neuen System nicht alle Module neu entwickelt bzw. neue Module in bestehenden Systemen getestet. Die dritte Stufe ist das „Set-Based Design“, nach dem nicht nur eine Lösung verfolgt wird, sondern möglichst lange mehrere Alternativen parallel entwickelt werden. (Haberfellner et al. 2005, S. 1456–1458) Die Umsetzbarkeit der agilen Ansätze ist nach Haberfellner und Stelzmann im Systems Engineering teilweise problemlos möglich, teilweise jedoch auch schwer zu realisieren. Personenbezogene Ansätze, Backlogs, User Stories und die Philosophie der Schlankheit / Einfachheit können eingebunden werden. Die Realisierung eines Kundennutzens in

jeder kurzen Iterationsschleife ist jedoch nur schwer umzusetzen, da ein funktionstüchtiges System deutlich schwieriger und aufwändiger darzustellen ist als bei einer Software. Auch für Änderungen ist ein deutlicher Unterschied vorhanden, da z. B. die Veränderung des Lösungsprinzips nachträglich nicht einfach darstellbar ist. (Haberfellner et al. 2008, S. 23–24)

### 4.1.3 Lösungsfindung und -bewertung

In der VDI 2221 wird als grundlegende Methodik für Problemlösungsprozesse ein der Systemtechnik angelehntes Aufteilen des Gesamtproblems in Teilprobleme vorgeschlagen. Diese Teilprobleme werden in Einzelprobleme gesplittet, für die Einzellösungen erarbeitet und daraus wiederum Teillösungen generiert werden können. Diese Teillösungen werden zu einer Gesamtlösung kombiniert. Für den Lösungsprozess wird dabei als Strategie empfohlen, „vom Abstrakten oder Allgemeinen zum Konkreten, Besonderen“ eine zunehmende Konkretisierung vorzunehmen. (VDI-Richtlinie 2221, S. 3–5)

Für die Findung von Lösungen können allgemeine Kreativitätstechniken verwendet werden, am bekanntesten ist das Brainstorming. Andere nennenswerte Methoden sind die „Methode 635“, Synektik oder auch die Galeriemethode (hilfreich bei Gestaltungsproblemen). (Grote et al. 2014, S. F6) Im Maschinenbau sehr verbreitet ist die Erstellung eines Ordnungsschemas, auch bekannt als „morphologischer Kasten“. Diese Technik wird vielfach beschrieben und umfasst die Erstellung einer Matrix, bei der zu (Teil-) Funktionen die denkbaren Lösungsvarianten ermittelt werden. (Grote et al. 2014, S. F7) Aus der erstellten Matrix werden sinnvolle Kombinationen der Einzelfunktionen ausgewählt, woraus sich denkbare Lösungen ableiten lassen. Die Ursprünge dieser Technik finden sich in der Forschung von Zwicky wieder. (Zwicky 1966)

Bei der Lösungsfindung entsteht eine Vielzahl von Kombinationsmöglichkeiten und Varianten, welche eine Lösung darstellen können. Es ist wenig sinnvoll, alle weiter zu betrachten, daher ist die Anwendung von Auswahltechniken notwendig. Im Pahl / Beitz werden als Zielsetzung der Bewertungsverfahren als Faktoren die Unterstützung bei der Entscheidungsfindung, Risikobeurteilung, objektive Beurteilung sowie Nachvollziehbarkeit und

Dokumentation angegeben. Die Bewertungsverfahren sind dabei nicht auf einen einzelnen Zeitpunkt im Entwicklungsprozess beschränkt, sondern können und sollen in allen Phasen angewendet werden. (Feldhusen et al. 2013, S. 381–382)

Im Dubbel sind beim Bewertungsverfahren technische und wirtschaftliche Faktoren einzubeziehen, es werden die Nutzwertanalyse (welche auf Zangemeister zurück geht (Zangemeister 1970)) und die Anwendung der VDI-Richtlinie 2225 (VDI-Richtlinie 2225) vorgeschlagen. Die Bewertungskriterien erfolgen anhand von den Hauptmerkmalen. Die einzelnen Kriterien können gewichtet werden, anhand von Eigenschaftsgrößen werden sie bewertet. Es wird ein Gesamtwert bestimmt und die Varianten werden verglichen. (Grote et al. 2014, S. F8-F9)

Darüber hinaus sind weitere Methoden bekannt. Auf eine umfangreiche Beschreibung im Rahmen dieser Arbeit wird verzichtet. Eine ausführliche Einleitung in die verschiedenen Methoden wird im Pahl/Beitz gegeben, als einfache Verfahren beispielsweise die Argumentenbilanz, Punktbewertung oder der paarweise Vergleich. Aufwändige Methoden sind u. a. die im Dubbel genannten Nutzwertanalyse und die technisch-wirtschaftliche Bewertung. (Feldhusen et al. 2013, S. 386–395)

#### 4.1.4 Ableitung von Anforderungen an diese Arbeit

Wie aus den Abschnitten 4.1.1 und 4.1.2 deutlich wird, werden die Entwicklungsmethodiken stetig weiter entwickelt und an neue Gegebenheiten angepasst. So werden beispielsweise Ansätze aus anderen Fachrichtungen (z. B. der Softwareentwicklung) auch in anderen Disziplinen übernommen, jedoch ist für die unterschiedlichen inhaltlichen Aspekte eine direkte Anwendung oft nicht möglich. Für diese Arbeit ist daher festzuhalten:

- Im Rahmen dieser Arbeit wurden diverse inhaltliche Anforderungen ermittelt. Sie sind jedoch für die Entwicklung einer galvanischen Anlage als nicht vollständig zu betrachten, da es sich um einen Spezialfall und eine Prototypanlage handelt.
  - ▶ Anforderung: In Ergänzung der Anforderung MF3 muss die Methodik flexibel bezüglich der Entwicklungsschwerpunkte sein, um in der Durchführung nur die notwendigen Aspekte zu betrachten, aber ggfs. auch über diese

---

Arbeit hinausgehende technische Gesichtspunkte zusätzlich zu integrieren (z. B. Entwicklung der Galvanikanlage als Cyberphysisches System, siehe (Leiden et al. 2018; Kölle et al. 2019)) [Methodische Anforderung MF6 dieser Arbeit]

- Neuere Ansätze basieren häufig auf einer möglichst schlanken Struktur, bei der eine Anpassung nicht durch Herunterskalierung, sondern aufbauend auf minimaler Basis erfolgen sollte (siehe (Boehm et al. 2007)).
  - ▶ Anforderung: Einfache Grundstruktur auf der allgemeinen Ebene, welche für den betrachteten Anwendungsfall detailliert werden kann. [Methodische Anforderung MF7 dieser Arbeit]

## 5 Reflexion bestehender Ansätze für vorliegende Anforderungen

### 5.1 Beschichtung von Präzisionsbauteilen und Galvanotechnik

Die Galvanotechnik ist eine etablierte Beschichtungstechnologie. Sie wird im Bereich der Beschichtung von Wälzlagern bisher jedoch nur eingeschränkt eingesetzt. In den meisten Fällen werden nur geringe Schichtdicken aufgebracht, wodurch die geometrischen Eigenschaften beibehalten und die Toleranzklassen nicht verändert werden. Die hier vorliegende Aufgabenstellung mit höheren Schichtdicken für die geforderte tribokorrosive Beanspruchung geht somit über die bekannte Praxis hinaus.

Für die Erreichung eines guten Korrosionsschutzes ist neben der Eignung des Schichtwerkstoffs die vollflächige, kontakt- und fehlerstellenfreie Ausführung essenziell (Anforderung IF1). Fehl- und Schwachstellen stellen Angriffspunkte für Korrosionsprozesse dar und beeinträchtigen die gesamte Schutzfunktion der Beschichtung. Bei der konventionellen Gestelltechnik entstehen solche Schwachpunkte an den Kontaktstellen. Die Trommel- oder Glockentechnik als Technologie zur vollflächigen Beschichtung kann auf Grund der erforderlichen Schichtdickenverteilung und der Bauteilgröße nicht genutzt werden. Auch hier erfordert die Aufgabenstellung neue Lösungsansätze.

Der erfolgreiche Einsatz auf realen Lagerringen ist, unabhängig von der verwendeten Schicht, erst mit einer geeigneten Applikationstechnik möglich. Bei den beabsichtigten Schichtdicken erfolgt nach aktuellem Stand der Technik eine nicht vernachlässigbare Änderung der Geometrie. Als Beispiel werden für den Einbau (Welle / Gehäuse) eines Lagers die Toleranzfelder 6 oder 7 (Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2017) angegeben, was bei einem Nenndurchmesser von 90 mm  $22 \mu\text{m} / 35 \mu\text{m}$  entspricht und für die Lager einen ähnlichen Bereich erfordert. Eine Schichtdicke von  $25 \mu\text{m}$  oder höher erfordert deshalb eine exakte Beschichtung (Anforderung IF2), da neben den geometrischen Abweichungen

auch die Formtoleranzen hohe Ansprüche aufweisen. Um auch bereits während der Entwicklungsphase einer Technik eine Vorhersage zur voraussichtlichen Schichtdickenverteilung treffen zu können, ist ein möglichst einfach nutzbares Prognoseverfahren erstrebenswert. Eine vollständige Simulation unter Berücksichtigung aller Einflüsse ist extrem aufwändig und im Fall von unbekanntem Zusammenhängen (neue Elektrolytentwicklung) und unklaren Randbedingungen (konstruktive Umsetzung und somit beispielsweise Hydrodynamik noch unklar) auch nicht sinnvoll anwendbar. Hier wird daher eine Methode zur Schichtdickenprognose benötigt, welche eine für den Planungsprozess ausreichende Genauigkeit aufweist und die auch mit eingeschränkten Verfahrensdaten arbeiten kann (Anforderung IF4 und IF5).

Wie bei den Betrachtungen zur galvanischen Anlagentechnik bereits ausgeführt, ist kein gängiger Anlagentyp für diese Art der kontaktstellenfreien Beschichtung von Wälzlagern geeignet, d. h. Spezialvorrichtungen sind notwendig (vgl. Tabelle 3.1). Bezüglich der Fertigungstechnologie sind mit Ausnahme der Technik für die teileingetauchte Beschichtung von Großlagern (deren allgemeine Eignung für alle Verfahren wie in 2.2.2 beschrieben unsicher ist) keine Lösungen bekannt. Die Funktion dieser Technik ist zwar möglich, es ist jedoch zweifelhaft, ob sie die bestmögliche Lösung darstellen würde. Eine Betrachtung von Alternativen ist folglich sinnvoll. Für die Ermittlung geeigneter, spezialisierter Lösungsansätze existieren somit weder ausreichend Lösungen noch ein bekanntes Vorgehen. Hier wird eine Methode zur strukturierten Ermittlung und Bewertung einer vollflächigen und kontaktstellenfreien galvanischen Beschichtung benötigt (Anforderung IF3).

## 5.2 Entwicklungsmethodiken

Für Entwicklungsprozesse existiert eine Vielzahl verschiedener Modelle für unterschiedliche Fachrichtungen. Das bekannteste für den Maschinenbau ist in VDI 2221 aufgeführt. Im Rahmen der dort genannten allgemeinen Schritte werden unterschiedliche Methoden und Vorgehen angewandt. So existieren beispielsweise (Kreativitäts-) Techniken zur Lösungsfindung oder Methoden zur Bewertung von Varianten. Daneben sind jedoch viele weitere Ansätze in unterschiedlichen Detaillierungsebenen vorhanden.

Aus anderen Fachbereichen, wie etwa der Softwareentwicklung, sind agile Prozesse wie beispielsweise Scrum bekannt, die ein „leichtgewichtiges“ Entwickeln vorsehen. Hier wird ein Gesamtsystem in iterativen Zyklen mit zunehmender Detaillierung entwickelt, nicht mehr sequenziell einzelne Unteraufgaben nacheinander. Diese sind jedoch nicht auf die Softwareentwicklung beschränkt, sondern werden zunehmend auch in anderen Bereichen angewendet. Eine direkte Übernahme aus der Softwareentwicklung ist durch die abweichenden Randbedingungen jedoch nicht für alle Aspekte der agilen Entwicklung gleichermaßen möglich, sondern durch die deutlich unterschiedlichen Möglichkeiten einer Veränderung (Neukompilierung des Quellcodes gegenüber Neuaufbau oder Modifikation von physischen Bauteilen bzw. Systemen) in manchen Bereichen schwieriger zu realisieren. In der agilen Entwicklung wird durch den schlanken Ansatz üblicherweise kein allumfassendes Entwicklungsvorgehen auf die notwendigen Schritte eingekürzt, sondern die Basis aus einer minimalen Entwicklungsabfolge durch notwendige Schritte und Anpassungen erweitert.

Aus dem zuvor dargestellten Auszug zu bestehenden Ansätzen im Bereich der Entwicklungsmethodik können für diese Arbeit notwendige Schlüsselfaktoren extrahiert werden. Auf allgemeiner Ebene zur Entwicklung sind sehr viele Ansätze vorhanden. Diese decken sowohl Vorgehensweisen und auch neuere, agile Ansätze ab. Wird der Fokusbereich auf den Maschinenbau bzw. die Ingenieurwissenschaften verengt, sind im Bereich einer agilen Durchführung mittlerweile Ansätze und Arbeiten vorhanden, jedoch in deutlich geringem Umfang. Dies ist mit der Herkunft der agilen Entwicklung aus der Softwareentwicklung und der Übertragung der Ansätze auf andere Disziplinen zu erklären – was jedoch nicht immer direkt möglich ist und somit Anpassungen erfordert. Im Kerngebiet dieser Arbeit, der Galvanotechnik, sind konkrete Vorgehensmodelle oder gar eine agile Durchführung nicht bekannt. Eine Übertragbarkeit der grundsätzlichen Schritte ist sicherlich plausibel. Bei der detaillierten Durchführung für das Gesamtsystem einer galvanotechnischen Anlage ist durch die erforderliche interdisziplinäre Aufgabenstellung jedoch eine direkte Übernahme nicht möglich, insbesondere, da die vorhandenen Methodiken überwiegend keine interdisziplinären Aufgabenstellungen betrachten (eine Ausnahme stellt die VDI 2206 für die Mechatronik dar). Es konnten somit bei den ermittelten Entwick-



lungstechniken aus Kapitel 4 keine direkt für die Galvanotechnik und den galvanotechnischen Anlagenbau ausgerichtete interdisziplinäre orientierte Lösung ermittelt werden. Nachfolgend werden daher Methodiken hinsichtlich der Anforderungen dieser Arbeit analysiert und bewertet.

### 5.2.1 Anforderungen an eine Methodik und Bewertung bestehender Ansätze

Die beschriebenen Methodiken in Abschnitt 4 unterscheiden sich, weisen jedoch auch Gemeinsamkeiten auf, insbesondere beim prinzipiellen Phasen. Hieraus können grundlegende Gesichtspunkte abgeleitet werden, vorrangig sind zu nennen:

Das Beinhalten essenzieller Aspekte einer Entwicklungsmethodik wie z. B.

- Anforderungsklä rung
- Erarbeitung von Lösungsalternativen
- Entscheidungsprozess
- Abdeckung der Phasen von der Aufgabendefinition bis hin zur Umsetzung, was in den verschiedenen Methodiken in unterschiedlichen Begriffen, aber mit ähnlichen Zielsetzungen vorliegt
- Die Nutzbarkeit („Usability“) und ein das Ziel einer effizienten Entwicklung (Aufwand-Nutzen-Verhältnis)
- Berücksichtigung von Iterationsschleifen (in unterschiedlichen Ausprägungen)
- Validierung bzw. Absicherung der Entwicklungsergebnisse / des Produkts

Über die allgemeinen Betrachtungen hinaus sind für die vorhandene Aufgabenstellung der Arbeit konkrete Ansprüche fassbar. In den Abschnitten 2 bis 4 wurden die Anforderungen an die Arbeit identifiziert und die speziellen Anforderungen an eine Methodik abgeleitet. Dabei ergaben sich sieben methodische Anforderungen (MF1 bis MF7, siehe jeweilige Abschnitte und Übersicht im Anhang 12.1), welche die Grundlage für eine Bewertung der bekannten Methodiken bilden.

### 5.2.2 Bewertung von Entwicklungsmethodiken im Kontext dieser Arbeit

Im Hinblick auf die abgeleiteten Anforderungen werden die bekannten Ansätze aus Abschnitt 4.1 bezüglich der Eignung eingeschätzt. Eine Übersicht ist in Tabelle 5.1 dargestellt, diese beschränkt sich auf die im Rahmen der Recherchen ermittelten und am ehesten zutreffenden Optionen. Das Spiralmodell aus der Softwareentwicklung wurde nicht berücksichtigt, da es die Spezifika einer maschinenbaulich-technischen Entwicklung nicht berücksichtigt. Es beschreibt jedoch die Möglichkeit einer stark iterativen Entwicklung, welche ggfs. einen Anhaltspunkt für angepasste Zyklen darstellen kann und daher dennoch beschrieben wurde.

Tabelle 5.1: Einschätzung bekannter Ansätze für die Anforderungen dieser Arbeit an eine Methodik

<b>Anforderung:</b>	Interdisziplinarität	Lösungsgenerierung	Parallele, iterative Entwicklung versch. Aspekte	Regulatorische Anforderungen, Dokumentation	Detaillierung für konkrete Anwendung	Flexibel für weitere Schwerpunkte	Einfache Grundstruktur für Detaillierung
<b>Methodik nach:</b>	MF1	MF2	MF3	MF4	MF5	MF6	MF7
<b>VDI 2221 (1993)</b>	0	0	-	0	-(3)	0 <sup>(5)</sup>	+
<b>V-Modell / VDI 2206 (2004)</b>	/ <sup>(1)</sup>	+	+	0	/ <sup>(4)</sup>	0	+
<b>Ulrich &amp; Eppinger (2012)</b>	0	0	/	0	-(3)	+	+
<b>MVM, Lindemann (2009)</b>	0	+	-	0	-(3)	0 <sup>(5)</sup>	+
<b>Pahl/Beitz (2013)</b>	0	0	-	/	-(3)	0 <sup>(5)</sup>	+
<b>Hall-ETH-Modell n. Haberfellner (2005)</b>	0	+	/ <sup>(2)</sup>	0	-(3)	0 <sup>(5)</sup>	+
<b>iPeM / SPALTEN nach Albers (2017)</b>	0	+	/	/	-(3)	/	/
Legende	+ Methodik deckt Anforderung ab - Methodik deckt Anforderung nicht ab / Teilweise / Nicht pauschal zu beurteilen 0 Nicht explizit enthalten						
(1) Interdisziplinäre Aspekte enthalten, jedoch für Mechatronik und nicht für Galvanotechnik (2) Problemlösungszyklen in einzelnen Phasen vorgesehen (3) Prinzipielle Abfolge anwendbar, jedoch umfassende Detaillierung und Anpassung erforderlich (4) Beurteilung als „Teilweise“, da Anpassungen in deutlich geringerem Umfang notwendig erscheinen, als bei anderen Methodiken (vorhandene Interdisziplinarität) (5) Sehr allgemeiner Aufbau, Anpassung an Einzelfall erforderlich							

Ein Problem für die Einschätzung ist, dass relevante Aspekte, wie z. B. die interdisziplinäre Aufgabenstellung, häufig nicht explizit genannt sind. Es ist hierbei nicht ausgeschlossen,

dass eine Adaption auch mit diesen Randbedingungen möglich wäre, Anpassungen sind jedoch in erheblichem Umfang zu erwarten. Dies spiegelt sich auch in der Erstellung der VDI 2206 wider, welche explizit mit dem Hintergrund der interdisziplinären Anforderungen der Mechatronik begründet ist. Sie soll andere Richtlinien wie VDI 2221 jedoch nicht ersetzen, sondern explizit ergänzen. (VDI-Richtlinie 2206, S. 8)

### VDI 2221 (1993)

Die VDI2221 ist (was auch deren Zielsetzung ist) sehr generisch formuliert, weshalb die methodischen Anforderungen dieser Arbeit überwiegend nicht explizit enthalten sind. Sie verweist auf gegebenenfalls vorhandene bzw. zu schaffende höhere Detaillierungsgrade für andere Branchen und ist daher als Basis („Dachrichtlinie“) vorgesehen. (VDI-Richtlinie 2221, S. 3) Die parallele Entwicklung verschiedener Schwerpunkte ist möglich bzw. durch die vorgesehen Unterteilung in realisierbare Module auch vorgeschlagen, ein iteratives Vorgehen ist jedoch nur eingeschränkt geplant (es wird genannt, aber nicht näher spezifiziert, wann und in welchem Umfang dies sinnvoll und notwendig ist). Ein ausreichender Detaillierungsgrad für die direkte Anwendung ist nicht gegeben. Eine Nutzung der prinzipiellen Schritte bildet nicht die notwendige Detaillierung für diese Arbeit ab, für einen sinnvollen Einsatz wäre eine spezialisierte Zusatzrichtlinie erforderlich, welche für die ermittelten Anforderungen nicht vorhanden ist.

### V-Modell / VDI 2206 (2004)

Einzig das V-Modell nach VDI 2206 beinhaltet explizit eine interdisziplinäre Aufgabenstellung, jedoch für die Mechatronik und nicht die relevante Galvanotechnik. Die Richtlinie versteht sich als Ergänzung zur VDI 2206 und weist somit einen höheren Detaillierungsgrad auf, nimmt explizit auf die Generierung von Lösungsvarianten Bezug und ist als Makrozyklus gegebenenfalls auch iterativ mehrfach durchzuführen. Eine parallele Entwicklung ist im „Domänenspezifischen Entwurf“ konkret vorgesehen, hier wird auf die Nutzung spezieller, geeigneter Methoden für die jeweilige Domäne verwiesen. Offene Punkte in Bezug auf diese Arbeit verbleiben jedoch die konkrete Integration der galvanotechnischen Aufgabenstellungen in Bezug auf die interdisziplinäre Behandlung sowie die nicht konkret behandelten methodischen Anforderungen MF4 und MF6. Diese betreffen potenziell

nicht nur einen domänenspezifischen Entwurf (d. h. Teilbereich), sondern das gesamte System der galvanischen Anlage und Produktion. Eine direkte Anwendungsmöglichkeit in dieser Arbeit ist somit auch nicht gegeben.

### Methodik nach Ulrich & Eppinger (2012)

Für die Prozessabläufe nach Ulrich und Eppinger (vgl. Abbildung 4.1) gilt überwiegend dieselbe Einschätzung wie für die VDI 2221. Es ist eine sehr generische Abfolge. Ein Unterschied sind die drei vorgesehenen Varianten. Dabei werden in einer Iterationszyklen vorgesehen (Variante (b): „Spiral Product Development Process“), in einer anderen wird eine Aufspaltung in parallele Entwicklungszweige vorgenommen (Variante (c): „Complex System Development Process“) – eine Kombination beider Varianten wird jedoch nicht weiter ausgeführt. Wie für die VDI 2221 ist auch hier ein ausreichender Detaillierungsgrad für die direkte Anwendung nicht gegeben.

### MVM, Lindemann (2009)

Wie bei der VDI 2221 und dem Prozessablauf von Ulrich und Eppinger ist auch das Münchener Vorgehensmodell allgemein gehalten und es fehlt eine Detaillierung für eine konkrete Anwendung in dieser Arbeit. Es ist insofern flexibel, dass ein Hin- und Herspringen zwischen einzelnen Schritten vorgesehen ist und damit eine Iteration erfolgen kann. Es gibt zwar einen bevorzugten Pfad durch das netzartige Modell, der Startpunkt kann jedoch frei gewählt werden – was nach Feldhusen und Grote ggfs. unnötige Iterationsschritte erzeugt und somit das Prozessmodell nicht „auf maximale Effizienz ausgerichtet“ ist. (Feldhusen et al. 2013, S. 20–21) Eine Lösungsgenerierung ist als Schritt eindeutig vorgesehen, jedoch wird bezüglich der Behandlung interdisziplinärer Problemstellungen und paralleler unterschiedlicher Entwicklungsschwerpunkte kein konkretes Vorgehen vorgeschlagen.

### Pahl/Beitz (2013)

Der Entwicklungs- und Konstruktionsprozesse im Pahl/Beitz (siehe (Feldhusen et al. 2013)) nach Feldhusen und Grote ist das Resultat einer Weiterentwicklung u. a. des ursprünglichen Prozesses von Pahl/Beitz aus 1977 und der VDI 2221 und bleibt auf allgemeiner

Ebene. Neben einer Erweiterung des Produktentstehungsprozesses auf die Herstellung werden begleitende Prozesse mit abgebildet. Diese beinhalten u. a. Normung/Patentierung oder Qualitäts- und Risikomanagement. Wenn auch nicht explizit genannt, könnte beispielsweise die Anforderung MF4 entsprechend integriert werden. Dennoch ist auch hier die fehlende konkrete Berücksichtigung der Interdisziplinarität und der Detaillierung für die Anwendung in der Arbeit problematisch. Bezüglich einer iterativen, parallelen Entwicklung sind keine konkreten Ansätze enthalten.

### Hall-ETH-Modell n. Haberfellner (2005)

Der Hall-ETH-Ansatz wird durch ein „Action Model“ dargestellt, welches allgemein gehalten ist, jedoch konkretere Ansätze als die zuvor betrachteten Modelle aufweist. Das Action Model beinhaltet sowohl einen Problemlösungsablauf als auch einen Phasenablauf, für den Zyklen zur Problemlösung vorgesehen sind. Wie jedoch mit interdisziplinären, parallelen Entwicklungszweigen umgegangen werden soll, wird nicht näher behandelt – somit bleibt auch die Integration weiterer Entwicklungsaspekte offen. Auch hier ist ein ausreichender Detaillierungsgrad für die direkte Anwendung im Rahmen der Arbeit nicht gegeben.

### iPeM / SPALTEN nach Albers (2017)

Das „integrated Product engineering Model“ erlaubt die umfangreiche Aufnahme von Aktivitäten (neben der Entwicklung auch Managementaspekte) in den Ablauf und weist mit dem SPALTEN-Ansatz eine Problemlösungsstrategie auf. Wie beim Hall-ETH-Modell bleibt jedoch auch hier offen, wie konkret mit interdisziplinären, parallelen Entwicklungszweigen umgegangen werden soll. Es besteht die Möglichkeit eines mehrdimensionalen Aufbaus mit verschiedenen Schichten. Dieser ist jedoch nur für Produkt, Produktionssystem, Strategie usw. vorgesehen. Im Vergleich zu anderen Modellen wird eine konkretere Struktur vorgegeben, welche jedoch komplizierter aufgebaut ist. Die flexible Aufnahme spezieller Vorgehen bzw. einer Detaillierung auf Basis eines einfachen Ausgangsvorgehens ist daher nicht oder nur eingeschränkt gegeben. Eine passende Detaillierung für die Anforderungen dieser Arbeit ist nicht vorhanden, eine Anwendung somit nicht möglich.

## Zusammenfassung der Bewertung der Methodiken

Anhand der Analyse der bekannten Ansätze lässt sich keine direkt für den Anwendungsfall der Arbeit passende Methodik identifizieren. In Bezug auf eine konkrete Anwendung und eine ausreichende Detaillierung, insbesondere für die vorliegenden Anforderungen, sind somit bei allen bewerteten Ansätzen intensive Anpassungen erforderlich. Bezüglich der allgemeingültigen Modelle bilanzieren auch Feldhusen und Grote im Pahl/Beitz, dass „es in Abhängigkeit von der Abstraktionshöhe kein allgemeingültiges Modell des EKP mit einem erforderlichen Detaillierungsgrad gibt.“ Für eine Praxisanwendung ist ein hoher Detaillierungsgrad erforderlich, was bei einem allgemeinen Prozessmodell nicht möglich ist. (Feldhusen et al. 2013, S. 21) Die größte Übereinstimmung mit den Anforderungen weist die VDI 2206 auf, welche durch den höheren Detaillierungsanspruch und den ebenfalls interdisziplinären Charakter der Mechatronik bedingt ist. Eine direkte Anwendung ist jedoch auch hier aus den genannten Gründen nicht möglich.

### 5.3 Fazit zum Entwicklungsbedarf dieser Arbeit

Aus der Aufgabenstellung und den technischen Anforderungen wurden im Rahmen der Betrachtung des Stands der Wissenschaft und Technik (Kapitel 2 und 3) fünf inhaltliche Anforderungen an diese Arbeit identifiziert (Tabelle 5.2).

Tabelle 5.2: Auflistung inhaltlicher Anforderungen (IF)

Nr.	Beschreibung	aus Kap.
<b>IF1</b>	Die Schicht muss vollflächig und dicht abgeschieden werden. Es dürfen keine durch die Produktionstechnik bedingten Fehlstellen / Schichtunterbrechungen (z. B. unbeschichtete Kontaktpunkte) auftreten.	2.1.3
<b>IF2</b>	Möglichst homogene, konturtreue und endmaßnahe Beschichtung	2.2.3
<b>IF3</b>	Entwicklung einer Methodik zur Ermittlung einer geeigneten Beschichtungstechnik für die vollflächige, kontaktstellenfreie Abscheidung einer galvanischen Schicht	2.2.3
<b>IF4</b>	Entwicklung einer Methodik zur Optimierung der Schichtdickenverteilung mit dem Ziel einer endmaßnahen Beschichtung	2.2.3; 3.2.5

Nr.	Beschreibung	aus Kap.
IF5	Die Effekte der sekundären und tertiären Stromdichteverteilung (Streifähigkeit des betreffenden Elektrolyten) sollen über ein einfach zu nutzendes Vorgehen abgeschätzt werden und in der Schichtdickenoptimierung berücksichtigt werden können	3.2.5

Für den in dieser Arbeit vorliegenden praktischen Anforderungskern, eine kontaktstellenfreie und endmaßnahe Schicht (Anforderung IF1 und IF2), sind keine bekannten und nutzbaren Lösungen vorhanden. Es ergibt sich daher die Notwendigkeit einer Entwicklung zur Lösung dieser Anforderungen, weshalb zusätzlich Entwicklungsmethodiken analysiert und bewertet wurden. Für diese Analyse wurden aus dem Stand der Technik und den inhaltlichen Anforderungen sieben methodische Anforderungen abgeleitet. Eine direkt passende Entwicklungsmethodik für die methodischen Anforderungen ist, wie in Abschnitt 5.2.2 beschrieben, nicht bekannt. Die Kombination einer fehlenden technischen Lösung und fehlenden Methodiken für eine Entwicklung ergibt den Bedarf nach einer neuen Methodik und dementsprechend die bereits in den beiden Forschungsfragen formulierte Basis dieser Arbeit:

1. „Können geometrisch anspruchsvoll geformte rotationssymmetrische Bauteile vollflächig, d. h. ohne Kontaktstellen, und endmaßnah galvanisch beschichtet werden?“
2. „Wie kann eine Methodik für die Entwicklung einer geeigneten Produktionstechnik für die galvanische Beschichtung von hochbelasteten, rotationssymmetrischen Bauteilen gestaltet sein?“

In den folgenden Kapiteln wird daher zur Lösung der Aufgabenstellung eine neue Methodik entwickelt, welche für die Anforderungen der Galvanotechnik vor dem Hintergrund agiler und iterativer Entwicklungstechniken praktikabel ist. Hierbei wird auf allgemeiner Ebene ein generischer Prozess erstellt, welcher für die exakten Anforderungen der Arbeit instanziiert und für die Entwicklung einer Prototypanlage durchgeführt wird.



# 6 Entwicklung der Methodik

In den vorherigen Abschnitten konnte für die Anforderungen keine anwendbare Methodik ermittelt werden. Nachfolgend wird eine im Rahmen der Arbeit neu erarbeitete Methodik beschrieben, welche Charakteristika bei der Entwicklung einer Anlagen- und Vorrichtungstechnik in der Galvanotechnik berücksichtigt und dabei agile Ansätze integriert. Dabei werden methodische Prinzipien (Iterationsschritte, Aufspaltung in einzelne Aspekte usw.) genutzt, es wurden jedoch die speziellen Anforderungen der vorhandenen Problemstellung (galvanotechnische Aspekte wie spezielle Anlagentechniken) berücksichtigt. Diese Methodik wird im nachfolgenden Schritt (Kapitel 7) für die konkrete Problemstellung instanziiert, hierbei werden die für die jeweilige Detailebene in dieser Arbeit erstellten und angewendeten Methodiken vorgestellt.

## 6.1 Generische Methodik zur Entwicklung einer galvanischen Produktionstechnik

### 6.1.1 Kerngedanken zur Struktur

Eine Struktur mit verschiedenen Phasen ermöglicht ein systematisches Vorgehen, daher wird dieses Prinzip übernommen. Allen bekannten Methodiken ist eine Klärung der genauen Entwicklungsaufgabe zu Beginn gemeinsam. Da nur mit einer eindeutig definierten Problemstellung und Zielsetzung eine zielgerichtete Entwicklung möglich ist, ist dies auch in einer neuen Methodik notwendig. Bei einer neuartigen Problemstellung mit unbekanntem technischen Lösungen spielt die Recherche bekannter Ansätze, Patente und des allgemeinen Stands der Wissenschaft und Technik ebenfalls eine wichtige Rolle: Fehl- und Doppelentwicklungen können anhand von bekannten Ergebnissen minimiert werden und

---

möglicherweise vorhandenen Teillösungen können in die spätere Entwicklung mit einfließen. Zu Beginn ist daher eine Startphase mit umfassender Klärung der Anforderungen, Rahmenbedingungen und der bekannten Technik sinnvoll. Sofern anhand dieser Klärung eine bestimmte galvanotechnische Produktionstechnologie (Gestell-, Trommeltechnik usw.) als geeignet identifiziert wird, kann zur Einengung des Entwicklungsumfangs auch eine Basistechnologie festgelegt werden. Dies ist jedoch nur dann sinnvoll, wenn diese Technologie eindeutig bestmöglich geeignet ist – in allen anderen Fällen sollte technologieoffen weiter vorgegangen werden.

Eine interdisziplinäre Aufgabe mit stark unterschiedlichen Herausforderungen benötigt ggfs. unterschiedliche Vorgehensweisen, um ein Ziel zu erreichen. Eine Aufteilung in verschiedene Segmente, erlaubt eine angepasste Entwicklung mit der Nutzung oder Entwicklung geeigneter Methoden für die jeweilige Aufgabenstellung. Unter den Begriff Entwicklungssegment (nachfolgend auch verkürzt Segment) wird in diesem Kontext ein Teil des Gesamtsystems verstanden, welcher auf Grund der technisch-inhaltlichen Kernpunkte und dem Entwicklungsbedarf sinnvoll abgrenzbar aus dem Gesamtsystem aufgeteilt werden kann. Zur Vermeidung von einzelnen, ggfs. zueinander inkompatiblen Lösungen darf bei einer Aufteilung das eigentliche Gesamtziel, d. h. das Gesamtsystem, nicht vernachlässigt werden. Daher ist auch bei einer parallelen Bearbeitung eine Planungsphase mit gemeinsamer Gesamtplanung (Teile und einzelnes Entwicklungsvorgehen) und einem Abgleich zwischen den Segmenten notwendig.

Ein iterativer Gesamtrahmen mit der Möglichkeit einer agilen Durchführung erscheint für die Durchführung der eigentlichen Segmententwicklungsphase geeignet, da beispielsweise die Sprints in Scrum eine Definition von Zwischenzielen erlauben, welche am Sprintende regelmäßig zwischen allen Bereichen abgeglichen werden können. Gegebenenfalls können neue Abhängigkeiten zwischen den Segmenten in der nächsten Iteration berücksichtigt werden (siehe 4.1.2). In dieser Phase können die einzelnen segmentspezifischen Kernpunkte entwickelt, ausreichend detailliert und für die Integration im Gesamtsystem vorbereitet werden.

Ab einem gewissen Punkt ist die Fokussierung auf die Gesamtsystementwicklung notwendig, um keine Ansammlung von Einzelteilen mit suboptimaler Verknüpfung zu erhalten.

Eine getrennte Entwicklung der Segmente wird daher sukzessive aufgehoben und im Gesamtkontext fortgeführt. Ziel ist dabei die vollständige und nahtlose Zusammenführung der einzelnen Segmente, bis diese ein reibungslos funktionierendes Gesamtsystem ergeben. Die prinzipielle Entwicklungsstrategie mit einem iterativen Gesamtrahmen kann dabei beibehalten, aber an die veränderten Projektbedingungen angepasst werden.

Nach Abschluss der Gesamtsystementwicklung wird diese bewertet, ggfs. umgesetzt und validiert. Da ein Entwicklungsergebnis immer einem Risiko unterliegt, wird die Methodik so aufgebaut, dass sie auch insgesamt mehrfach durchgeführt werden kann. Ein mehrfacher Durchlauf bietet die Möglichkeit, verschiedene Entwicklungsstufen vorzusehen, welche beispielsweise eine unterschiedliche Zielsetzung und Detaillierung aufweisen. So kann in einer ersten Entwicklungsstufe beispielsweise eine Machbarkeit oder ein Grobkonzept erstellt werden. In weiteren Stufen entsteht ein Prototyp, ein virtuelles Gesamtsystem usw. bis am Ende das umgesetzte finale galvanische Produktionssystem steht.

### 6.1.2 Aufbau

Aus den Kerngedanken im vorherigen Abschnitt wurde die in Abbildung 6.1 dargestellte generische Methodik entwickelt. Nachfolgend werden anhand der Phasen der Aufbau und die möglichen Entwicklungsinhalte / Schwerpunkte für ein galvanisches Produktionssystem näher beschrieben.

#### Startphase

Wie in Abbildung 6.1 dargestellt folgt in der erstellten Methodik auf den ersten Schritt (Klärung von Zielsetzung, Anforderungen und Randbedingungen, wie aus vielen anderen Entwicklungsmodellen bekannt) bereits eine erste Auswahl der grundlegenden Technologie auf Basis des Stands der Technik bzw. den Aspekten der Galvanotechnik. Dies ist dadurch begründet, dass die Entwicklungskernpunkte für die unterschiedlichen Anlagentechnologien wie Trommel- oder Gestellanlage, aber auch Rolle-zu-Rolle (Bandbeschichtung) und Spezialanlagen gegebenenfalls unterschiedliche Schwerpunkte erfordern. Wenn eine Anlagentechnologie nicht eindeutig auswählbar ist, sollte diese Technologieentscheidung

anhand der Anforderungen und Randbedingungen das Ziel in einer ersten Entwicklungsstufe sein.

### Planungsphase

Die Planungsphase wird in zwei Abschnitte unterteilt. Im ersten Schritt wird aufbauend auf der Startphase mit Recherchen und Anforderungen der Entwicklungsbedarf ermittelt. Bei bekanntem Entwicklungsbedarf wird auch die Anzahl der Entwicklungsstufen festgelegt, analog z. B. zum V-Modell der Mechatronik kann die Methodik mehrfach durchlaufen werden und wie in 6.1.1 beschrieben mehrstufig beispielsweise zuerst eine Prototypanlage und in der zweiten Stufe dann eine hochskalierte Produktionsanlage entwickelt werden.

Für die Bearbeitung der technischen Herausforderungen werden diese in einzelne Segmente unterteilt. Die Anzahl der Segmente sowie deren Inhalte werden an den Entwicklungsbedarf (ggfs. unter Berücksichtigung des Ziels der Entwicklungsstufe) angepasst, eine Unterteilung kann nach den beteiligten technischen Disziplinen (Verfahrenstechnik / Chemie, Maschinenbau / Konstruktion usw.), Entwicklungsrisiko (z. B. unklares Lösungsprinzip), Anzahl der Schnittstellen, betroffener Ebenen im Produktionssystem (Logistik- / Fertigungsplanung, Gesamtfabrik, Arbeitsstation) o. ä. erfolgen. Im Rahmen der Einbindung einer galvanischen Anlage in eine Gesamtproduktion ist neben der Einbindung der Anlage in die Gesamtfertigung (Layout, Gebäudesituation, Logistik) insbesondere die Betrachtung des eigentlichen Beschichtungsraums (Behälter mit Einbauten und Verfahrenstechnik), der Bauteilaufnahme (Gestelle, Trommeln, Einzelaufnahme), der Komponenten der Gesamtanlage (z. B. Transportsystem, Gesamtbehälteraufbau, Be- und Entstückung als Schnittstelle zu vor- und nachgelagerten Prozessen) und der zugehörigen Peripherie (Abluft, Abwasser und Energie- / Medienversorgung) sinnvoll. Beschichtungsraum und Aufnahme der Ware / Bauteile sind dabei als qualitätskritische Aspekte aufzunehmen auf jeden Fall zu betrachten und werden in der Instanziierung näher ausgeführt. Auf Fabrikebene ist vorrangig die Genehmigungssituation mit den rechtlichen Rahmenbedingungen zur Chemikalienverwendung zu nennen, diese können sich durch umfassende Arbeits- und Umweltschutzanforderungen (z. B. Löschwasserrückhaltung, Lagerung) weit über den eigentlichen Anlagenbereich auswirken.

---

Die Aufteilung in Segmente erlaubt die Auswahl unterschiedlicher Methoden und Vorgehensweisen für die jeweiligen Entwicklungsaufgaben, was insbesondere bei der stark interdisziplinären Galvanotechnik mit Elementen aus (Elektro-) Chemie / Verfahrenstechnik, Maschinenbau, Physik und auch IT bzw. Steuerungstechnik vorteilhaft ist. So können für die jeweiligen Segmente unterschiedliche Methoden und Vorgehensweisen gewählt werden. Diese individuellen Gestaltung kann auf Basis bekannter Ansätze (Literaturrecherche, Stand der Technik) für die jeweilige Problemstellung erfolgen, beispielsweise statistische Versuchsplanung (Design of Experiments, DOE) für experimentelle Untersuchungen, Lösungsfindungsmethoden für konstruktive Problemstellungen (siehe 4.1.3) oder Modellbildung bzw. Simulation bei mathematisch beschreibbaren Zusammenhängen.

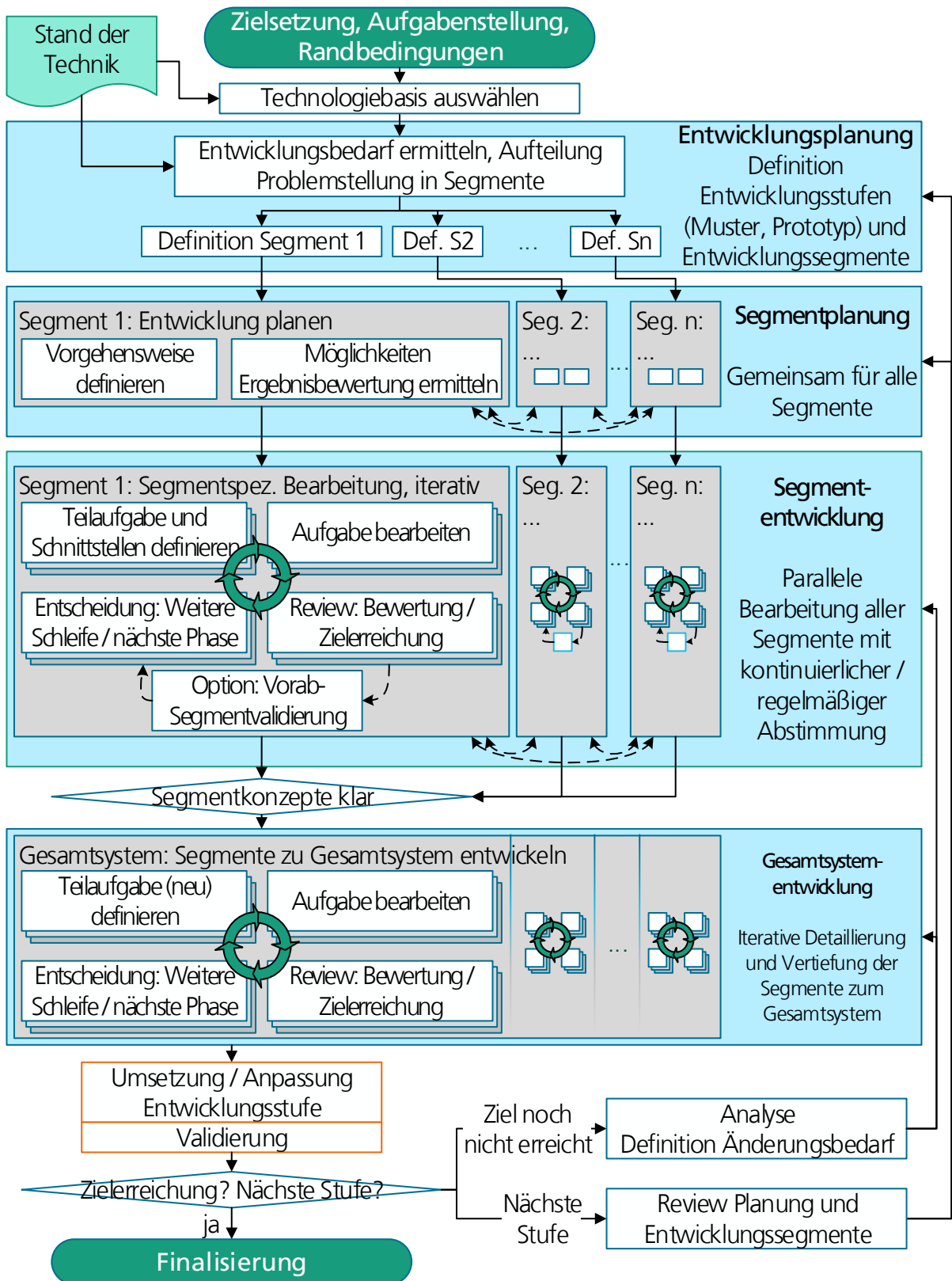


Abbildung 6.1: Im Rahmen der Arbeit erstellte allgemeine Entwicklungsmethodik

Als wichtiger Bestandteil wurde als zweiter Schritt der Planungsphase eine gemeinsame Planung für die einzelnen Segmente erachtet. Für jedes Segment wird in der entwickelten Methodik eine Vorgehensweise definiert und Möglichkeiten zur Bewertung von Entwicklungsergebnissen werden ermittelt – jedoch in konsequenter Abstimmung mit allen Entwicklungssegmenten. Durch die Abstimmung wird sichergestellt, dass auch Abhängigkeiten erkannt und in der Gesamtplanung berücksichtigt werden können. Bei unklarer Datenlage für einzelne Segmente können entsprechende realistische Annahmen getroffen werden, um die Bearbeitung nicht zu verzögern. Diese Annahmen werden im Lauf der Segmententwicklungen zu belastbaren Daten ausgearbeitet.

Die Möglichkeiten zur Bewertung während der Entwicklung sind vielfältig und werden einzelfallabhängig gewählt. Neben qualitativen Bewertungsmethoden nach Stand der Technik (z. B. Nutzwertanalyse, paarweiser Vergleich) werden für quantitative Bewertungen auch Berechnungs- und Simulationsmodelle genutzt. Sind keine ausreichenden theoretischen Kenntnisse bzw. Grundlagen vorhanden oder ergibt eine qualitative Bewertung kein eindeutiges Bild, kann eine experimentelle Überprüfung vorgesehen werden (experimentelle Versuche, Muster, Prototyp).

### Segmententwicklung

Nach der Planungsphase folgt nach der erarbeiteten Methodik die eigentliche Entwicklungsarbeit. In iterativen Zyklen wird jedes Segment bearbeitet. Eine Abstimmung zwischen den Segmenten erfolgt vorzugweise kontinuierlich, mindestens jedoch regelmäßig am Ende eines Iterationszyklus. Nach und nach werden die Segmente bis zur erforderlichen Reife detailliert. Ein Iterationszyklus (bzw. nachfolgend auch Schleife genannt) ist dabei die Abfolge von mindestens vier Schritten: Der Definition der Teilaufgabe für die Bearbeitung (ggfs. in Abstimmung mit allen Segmenten), der inhaltlichen Bearbeitung, einer Bewertung der inhaltlichen Ergebnisse und einer Entscheidung zum weiteren Vorgehen (d. h. notwendige weitere Arbeiten, fehlende Lösungen, notwendige Abhängigkeiten).

Bei der Zielsetzung für eine Schleife werden die Abhängigkeiten und Schnittstellen zu den anderen Segmenten und aufgetretene Unklarheiten / zusätzliche Entwicklungsbedarfe

berücksichtigt. Die Bearbeitung und Bewertung erfolgt an die Aufgabenstellung angepasst. Im Review erfolgt sowohl eine Bewertung der in der Schleife durchgeführten Arbeiten und erzeugten Ergebnisse als auch ein Abgleich mit der übergeordneten Zielsetzung. Als optionaler fünfter Schritt kann innerhalb eines Segments die Bewertung mit einer Vorabvalidierung ergänzt werden, sofern dies inhaltlich sinnvoll und vernünftig machbar ist (z. B. Prüfung eines Funktionsmusters einer technischen Detaillösung oder der Verfahrenstechnik in kleinerem Maßstab in einer bestehenden Versuchsanlage).

### Gesamtsystementwicklung

Sobald für die einzelnen Segmente eine ausreichende Reife erreicht haben, wird die Entwicklung der Segmente im Kontext des Gesamtsystems weitergeführt. Dies wurde in der Methodik dieser Arbeit so früh wie möglich vorgesehen, d. h. der Wechsel zum Gesamtsystem sollte während bzw. spätestens nachdem die Konzepte für einzelne Lösungen gewählt sind erfolgen. Die Schleifen werden analog zur Segmententwicklung durchgeführt, die Bewertung der Ergebnisse erfolgt jedoch konsequent bezogen auf das Gesamtsystem. Auf diese Weise können die Wechselwirkungen, welche in der Galvanotechnik speziell zwischen Vorrichtungen, Gesamtanlage und Verfahrenstechnik auftreten, frühzeitig berücksichtigt und bewertet werden.

### Umsetzungs- und Validierungsphase

Im Anschluss an die Gesamtsystementwicklung erfolgt die Validierung nach der Umsetzung der Entwicklungsstufe. Auf Basis der Validierung erfolgt die Beurteilung der Zielerreichung, sofern die Anforderungen noch nicht vollständig erreicht werden, wird nach einer Analyse der Ursachen der Änderungsbedarf definiert und ggfs. Schritte der Segmententwicklung oder Gesamtsystementwicklung erneut durchlaufen. Die Nutzung dieser Schleife zwischen Validierung und erneuter Entwicklung ist insbesondere im Fall von Prototypen oder Funktionsmustern sinnvoll, da dies auch für die Optimierung bestehender physischer Systeme genutzt werden kann. Im Fall einer neuen Entwicklungsstufe wird ein Review der durchgeführten Entwicklung aus methodischer Sicht durchgeführt und evtl.



eine Anpassung vorgenommen. Hier können beispielsweise die Segmentdefinitionen verändert werden, wenn sich die Entwicklungsschwerpunkte verschieben oder neue Segmente benötigt werden.

Sofern in der Validierung kein signifikanter Änderungsbedarf ermittelt wurde und auch keine weitere Entwicklungsstufe vorliegt, erfolgt die Finalisierung und der Abschluss des Entwicklungsprojekts. Dabei wird die endgültige Dokumentation mit allen im Rahmen der Umsetzung und Validierung vorgenommenen Änderungen erstellt und ein Review des Gesamtprojekts durchgeführt. Das Review beinhaltet dabei sowohl die entwickelten technischen Anlagen und Lösungen als auch den Entwicklungsprozess an sich.

### 6.1.3 Vorteile und Unterschiede zu bekannten Ansätzen

Im Unterschied zu den klassischen, überwiegend sequenziellen Herangehensweisen erlaubt die Methodik durch die iterative Herangehensweise die Durchführung nach neueren, agilen Entwicklungsformen. Es wurde dabei jedoch die grundlegende Struktur mit mehreren Phasen beibehalten, da im Unterschied zur Softwareentwicklung bei der Realisierung von physischen Systemen die Erstellung von funktionsfähigen Entwicklungsstufen aufwändiger zu realisieren und daher die intensivere Planung vor einer Realisierung gerechtfertigt ist.

Die erarbeitete Methodik ist für die galvanotechnischen Aspekte ausreichend detailliert und direkt anwendbar. Die bekannten Methodiken, auch das interdisziplinäre V-Modell, nehmen keinen Bezug zu den relevanten galvanotechnischen Spezifika, sondern sind deutlich allgemeiner beschrieben. Die in der nachfolgenden Instanziierung beschriebene Detailmethodik zur Optimierung der Maßhaltigkeit der Beschichtung kann allgemein für die Optimierung eines galvanischen Behälters bezüglich der Stromdichteverteilung herangezogen werden, ein Aspekt der von keiner bekannten Methodik abgedeckt wird.

Eine zeiteffiziente Entwicklung einer galvanischen Anlage erfordert die parallele Entwicklung sowohl des Gesamtaufbaus (Verfahrensfolge, Layout, Kapazitätsplanung) als auch die Detailentwicklung der einzelnen Aktivbäder (Qualität und ebenfalls Kapazität). Ein rei-

ner Top-Down oder Bottom-Up-Ansatz ist somit nicht sinnvoll, sondern würde zwangsläufig entweder in eine nicht optimale geplante Anlage oder eine verlängerte Entwicklungszeit führen. Der Wechsel von einem anfänglichen Top-Down zu einem Bottom-Up im Entwicklungsprozess wie im V-Modell vorgeschlagen bietet eine Verbesserung auch in der Galvanotechnik. Das in der Methodik dieser Arbeit genutzte Vorgehen mit vielen iterativen Zyklen in paralleler Bearbeitung aller relevanten Aspekte gleichzeitig (in Anlehnung an agile Ansätze und in Verbindung mit einer agilen Projektdurchführung) bietet jedoch auch gegenüber dieser Mischform Vorteile.

Durch die variable Segmenteinteilung ist sichergestellt, dass nicht nur die technischen Aspekte einer galvanischen Anlage betrachtet werden, sondern auch deren Integration in eine übergeordnete Fabrikplanung bzw. die parallele Entwicklung der Peripherie und Infrastruktur mit eingebunden werden kann. Da eine galvanische Anlage selten mehrfach in identischer Ausführung gebaut wird, ist die Betrachtung der betrieblichen Rahmenbedingungen essenziell für eine optimale Integration.

## 6.2 Grundlegende Durchführung der Methodik

Die Anwendung der erstellten Methodik ist nicht auf eine Organisationsform beschränkt. Sie kann prinzipiell auch mit klassischen Projektmanagementmethoden durchgeführt werden, dann würden die Segmententwicklungen ggfs. autarker und eher sequenziell durchgeführt und zur Gesamtbetrachtung überwiegend die Schnittstellen definiert. Vorteilhaft ist jedoch durch den stark iterativen Aufbau eine wie in Abbildung 4.8 dargestellte agile Vorgehensweise mit zunehmender Detaillierung, welche von Beginn an das Gesamtsystem aus Anlage, Vorrichtungen und Verfahrenstechnik betrachtet. Hierdurch kann auf Fortschritte innerhalb der verschiedenen Segmente bei Wechselwirkungen schnell und dynamisch reagiert werden. Diese Fortschritte können direkt in die weitere Entwicklung mit einfließen. Auch in den frühen Entwicklungsphasen, wenn für die einzelnen Entwicklungsschwerpunkte (Segmente) ggfs. noch keine Konzepte vorliegen, ist die Betrachtung im Zusammenhang mit dem Gesamtsystem sinnvoll.

Vorzugsweise erfolgt die Bearbeitung aller Segmente in einem oder einer kleinen Anzahl (<10) von interdisziplinär zusammengesetzten Teams. Eine kleine Anzahl an Teams könnte beispielsweise ein Team für die Verfahrensentwicklung / -abfolge, eines für den Beschichtungsraum (Behälter- und Anodenauslegung, Bauteilaufnahmen) und eines für die Gesamtanlage (inkl. Transportsystem / Automatisierung / Steuerung) gebildet werden. Bei der Bildung mehrerer Teams ist sicherzustellen, dass die Auswirkungen der Entwicklungen der einzelnen Teams auf die anderen Bereiche / Segmente berücksichtigt werden und eine entsprechende Abstimmung erfolgt. Beim Übergang in die Gesamtsystementwicklung sollte der notwendige Arbeitsaufwand geprüft und die Teamstruktur ggfs. überarbeitet werden – die Durchführung dieses letzten Schrittes ist ggfs. in einem einzelnen, aus Teilen der vorherigen Teams neu zusammengesetzten Team sinnvoll. Als Leitfaden zur Durchführung können Elemente ähnlich zu Scrum verwendet werden (sowohl Projektrollen als auch Ablauf), welche beispielsweise bei Hanser (Hanser 2010) ausführlich beschrieben sind. Die iterativen Zyklen können z. B. ähnlich wie Sprints durchgeführt werden, oder auch im bearbeitenden Team selbstorganisiert definiert werden. Hierbei sind allerdings die ggfs. unterschiedlichen Geschwindigkeiten einzelner Segmente zu beachten. So kann es bei der Verfahrensentwicklung durch experimentelle Untersuchungen und relativ aufwändige Auswertungen auch sinnvoll sein, dort Teilaufgaben über mehrere Sprints zu planen.

### 6.3 Voraussetzungen für eine Instanziierung

Eine Instanziierung für einen konkreten Anwendungsfall ist nur mit ausreichend Informationen durchführbar. Die Arbeiten in der Startphase, d. h. die Anforderungsklä rung und die Ermittlung des Stands der Wissenschaft und Technik, müssen daher vorgeschaltet durchgeführt werden. Nur wenn die Problemstellung und bereits verfügbare Technologien bekannt sind, kann der Entwicklungsbedarf ermittelt und für diesen eine Instanziierung erstellt werden.

Neben den technischen und technologischen Randbedingungen ist zusätzlich die projektspezifische Ausgangssituation relevant. Zuallererst umfasst dies das finale Umsetzungsziel

---

(Prototyp, Machbarkeit, industrielle Serienproduktion usw.) und ggfs. bereits bekannte benötigte Zwischenziele (Meilensteine wie beispielsweise Funktionsmuster), um Auswirkungen auf die Anzahl und Gestaltung der Entwicklungsstufen berücksichtigen zu können. Sofern keine Zwischenziele vorab festgelegt sind, können diese im Rahmen der Instandhaltung nach Bedarf gesetzt werden. Weitere projektspezifische Randbedingungen können aus den klassischen Aspekten des Projektmanagements entstehen (Zeit, Kosten, verfügbare Ressourcen – personell wie technisch), da dies direkte Auswirkungen auf die operative Umsetzung hat. Besonders die verfügbaren Ressourcen sind im Rahmen der Instandhaltung kritisch zu prüfen, da die notwendigen Kompetenzen und Werkzeuge vorhanden sein müssen.

Bei galvanischen Anlagen ist zusätzlich der Einsatzort und die dort vorliegenden Rahmenbedingungen relevant. Die Entwicklung oder Berücksichtigung der Peripherie sind ein relevanter Teil bei der planerischen und konstruktiven Auslegung einer Anlage, die Frage von vorhandenen Lösungen, Modifikationen oder Neuplanungen beeinflusst daher signifikant den Umfang der hierfür notwendigen Arbeiten. Ebenso wichtig sind die Randbedingungen in der Verfahrenstechnik – ist diese industriell bewährt und sind die Anforderungen an die notwendige Anlagentechnik bekannt, oder wird diese individuell für den Anwendungsfall entwickelt? Auch regulatorische Rahmenbedingungen und Anforderungen aus Unternehmenssicht beispielsweise bezüglich der Gesamtmenge an Chemikalien (z. B. auf Grund der Störfallverordnung), verwendbare und zu vermeidende Substanzen (beispielsweise Vermeidung cyanidischer Elektrolyte oder Substanzen der SVHC-Liste (ECHA 2021)) spielen eine Rolle und wirken sich potenziell auf die Entwicklungstätigkeiten aus.

## 7 Instanzierte Methodik

Mittels der Instanziierung wird die generische Methodik für einen konkreten Anwendungsfall individualisiert. Aus der beliebigen Anzahl an Segmente wird entsprechend der notwendigen Entwicklungsaufgaben eine Aufteilung vorgenommen, welche alle relevanten Aspekte umfasst. Auf welcher Basis die Instanziierung erfolgt wird nachfolgend beschrieben.

### 7.1 Startphase und Voraussetzungen für Instanziierung

#### 7.1.1 Anforderungen

Vor der Instanziierung sind, wie in 6.3 beschrieben, die Anforderungen und der Stand der Wissenschaft und Technik zu klären. Die Anforderungen an die instanzierte Methodik ergeben sich aus den Randbedingungen dieser Arbeit, insbesondere den in den Abschnitten 1.1 und 1.2 beschriebenen Aspekten. Die detaillierteren Bedarfe entsprechen den in Kapitel 2 und 3 dargestellten technischen Herausforderungen und den dabei identifizierten Anforderungen. Dabei sind IF1 (kontaktstellenfreie und vollflächige Schicht ohne Fehlstellen / korrosive Angriffspunkte) und IF2 (möglichst homogene, konturtreue und endmaßnahe Beschichtung) als übergeordnet herauszuheben, diese stellen im Rahmen der Entwicklung für die genannte Problemstellung der tribokorrosiv belasteten Wälzlager die größte Herausforderung an eine Anlagentechnik dar und sind über die weiteren Anforderungen der Arbeit eingehender detailliert. Für den Anwendungsfall spezifisch ist das Ziel einer Prototypanlage für den Betrieb in einem Technikum. Die Methodik muss daher für dieses Ziel instanziiert werden können (MF5). Die Instanziierung der Methodik bildet die Grundlage für das später beschriebene Fallbeispiel.

---

### 7.1.2 Aufgabenstellung und Anlagentypauswahl

Ausgangspunkt für die Instanziierung ist die Aufgabenstellung mit den Zielsetzungen und Randbedingungen. Diese ergab sich aus der Problemstellung dieser Arbeit, insbesondere aus der ersten Forschungsfrage zur vollflächigen (kontaktstellenfreien) und endmaßnahen Beschichtung. Als Randbedingung bzw. Zielsetzung war die beabsichtigte Umsetzung eines Anlagenprototyps im Technikum zur Beschichtung von Versuchslagern zu ergänzen. Die Verfahrenstechnik wurde in einer der separaten Arbeit (Kölle 2018) entwickelt. Die sich daraus ergebenden Anforderungen mussten jedoch mitberücksichtigt werden.

Der Anlagentyp ergab sich aus der Recherche zum Stand der Technik (Kap. 3.3). Eine Trommeltechnik wurde auf Grund der geforderten Schichtqualität und der Bauteilgröße als nicht geeignet erachtet, insbesondere bei der geforderten Skalierbarkeit auf noch größere Lagertypen als die gewählten Versuchsteile. Selektivbeschichtungsverfahren wie Brush Plating (Tampongalvanisieren) wurden durch die notwendige Vollflächigkeit ebenfalls ausgeschlossen. Somit bleibt nur eine Gestellanlage bzw. eine Einzelteilanlage, welche mit spezialisierten Vorrichtungen ausgestattet wird. Auf Grund der unklaren Lösungen wurde für den Rahmen der Arbeit die Einschränkung auf eine Einzelteilmontage vorgenommen. Bei einer Skalierung oder einer Veränderung der Chargengröße kann die Methodik als zusätzliche Entwicklungsstufe erneut mit den geänderten Rahmenbedingungen durchlaufen werden.

## 7.2 Instanziierung der Methodik

Auf Basis der Vorarbeiten in der Startphase wurde die Instanziierung der Methodik vorgenommen. Dabei wurde die Aufgabenstellung in der Phase für die Planung der Entwicklung anhand des Forschungs- und Entwicklungsbedarfs in Segmente unterteilt und für jedes Segment die Entwicklung geplant. Dabei wurde der Entwicklungsprozess für jedes Segment individuell angepasst und für die beiden Segmente mit dem höchsten Forschungs- und Entwicklungsbedarf jeweils eine Detailmethodik erstellt. Die Instanziierung

---

ist als Übersicht in Abbildung 7.1 dargestellt, die Herleitung der instanziierten Inhalte wird in den nachfolgenden Unterkapiteln näher beschrieben.

### 7.2.1 Planung der Entwicklung und Segmenteinteilung

Die erste Forschungsfrage ergab sich aus dem Stand der Technik und der Problem- bzw. Aufgabenstellung. Umgesetzt in eine konkrete Entwicklungsaufgabe leiteten sich für die Instanziierung somit die beiden Hauptaufgabenstellungen ab: Vorrichtung und Kontaktierung zur Abscheidung einer kontaktstellenfreien, vollflächigen Schicht sowie die maßhaltige (homogene) Schichtabscheidung mit entsprechend optimierter Anodentechnik. Diese Schichtdickenanforderungen weisen starke Wechselwirkungen mit der Vorrichtungstechnik auf, da bereits zu Beginn der Entwicklung absehbar war, dass ggfs. Blenden benötigt werden und diese im System integriert werden müssen. Die beiden Hauptaufgabenstellungen ergeben somit Segment 1 und 2 für die Instanziierung (siehe Abbildung 7.1, Abschnitt Entwicklungsplanung).

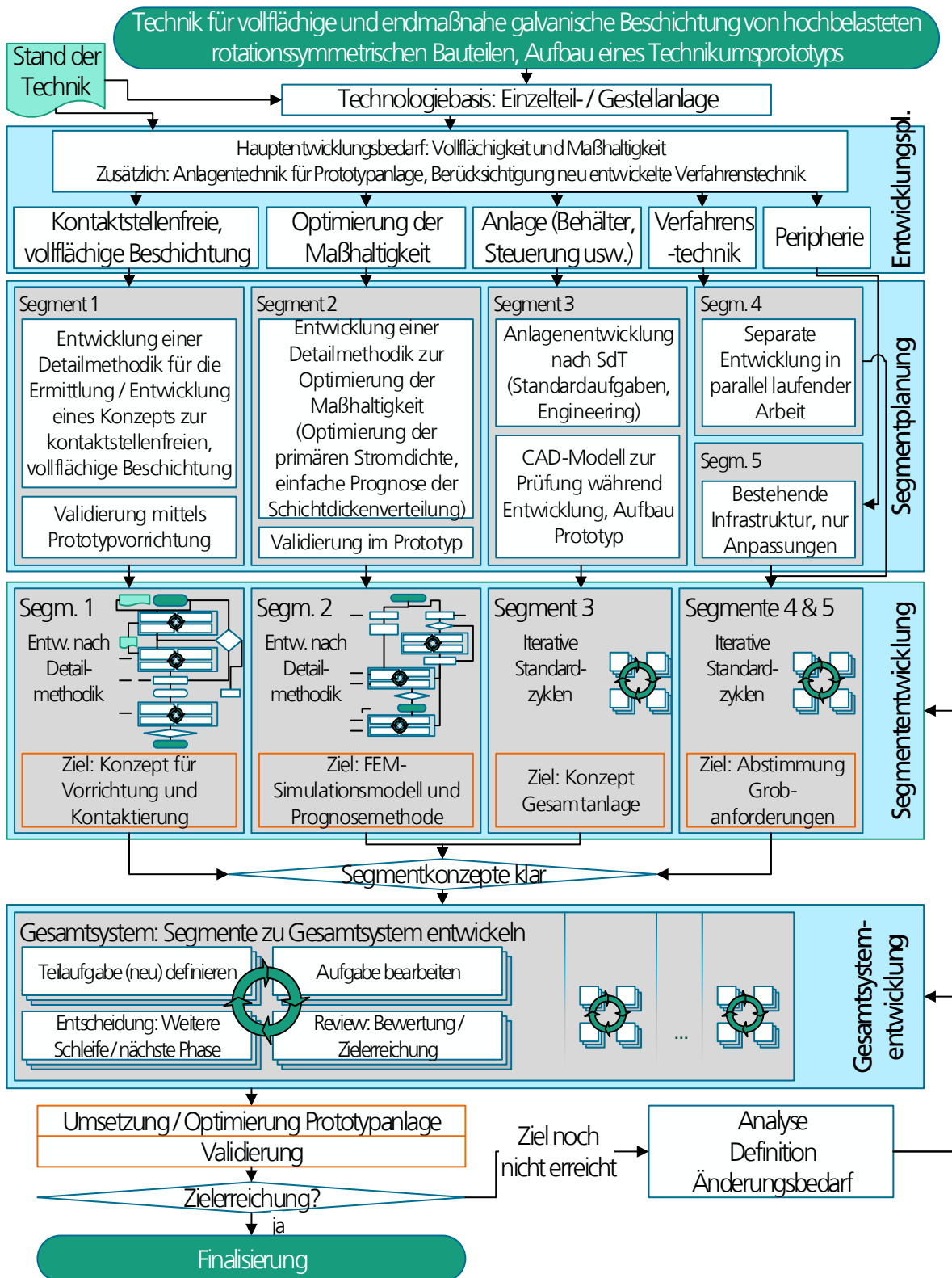


Abbildung 7.1: Instanzierte Methodik für die Problemstellung dieser Arbeit. Innerhalb der Phasen ist eine konstante Abstimmung und Zusammenarbeit zwischen den Segmenten vorgesehen (nicht gesondert grafisch dargestellt).



Das dritte Segment stellen die restliche Anlagentechnik mit Behältern, Steuerung, Pumpen, Rohrleitungen, Spültechnik usw. dar. Die Verfahrenstechnik wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht als Entwicklungsteil betrachtet, stellt jedoch durch die Wechselwirkungen ebenfalls ein relevantes Segment (Segment 4) dar. Abgeschlossen wurden die Segmente mit der Peripherie der Anlage (Segment 5). Für industrielle Anlagen wären die rechtlichen Aspekte (Genehmigung, Umweltschutzauflagen etc.) als weiteres Segment sinnvoll. Da die Entwicklung sich hier auf den Prototyp im Technikum beschränkt, sind diese Aspekte durch den normalen Technikumsbetrieb gedeckt und somit für die Arbeit nicht weiter zu betrachten.

### 7.2.2 Segmentplanung und weiterer Entwicklungsbedarf

Auf Basis der ermittelten Entwicklungssegmente wurde die Methodik aufgebaut und die Ziele für die Planungsphase als erstem Abschnitt definiert. Für die beiden Hauptfragestellungen war eine genauere Detaillierung der iterativen Schritte in der Segmententwicklung notwendig, für die Segmente 3 bis 5 wurde durch das geringere Entwicklungsrisiko (Anlage, Peripherie) bzw. außerhalb erfolgten Arbeiten (Verfahrenstechnik) keine spezielle Anpassung notwendig.

#### Segment 1

Durch die unklare technische Machbarkeit wurde für den Bereich der kontaktstellenfreien Beschichtung speziell die Problemlösung und die Auswahl eines geeigneten Prinzips benötigt, die Vorgehensweise für die einzelnen Phasen wurden daher detaillierter erarbeitet und in die Methodik mit iterativen Zyklen eingebettet. Die Detaillierung über die allgemeinen Iterationszyklen wurde dabei vorgenommen, da es zwar eine große Zahl an verschiedenen Ansätzen zur Lösungsentwicklung gibt (siehe Methodiken mit Problemlösungsansätzen und Abschnitt 4.1.3), dies jedoch in die Gesamtentwicklung eingebettet werden muss und der vorliegende Fall bestmöglich berücksichtigt werden sollte. Eine ausführliche Beschreibung der vorgenommenen Detaillierung erfolgt in Unterkapitel 7.3.

Als Zielsetzung wurde eine Validierung der in der Methodik ermittelten Lösung über eine zu entwickelnde Prototypvorrichtung angestrebt, welche im Rahmen der Gesamtanlage die Durchführung von Versuchsbeschichtungen ermöglicht.

## Segment 2

Sehr ähnliche Voraussetzungen wie für Segment 1 gelten für die zweite Hauptfragestellung zur endmaßnahen, homogenen Beschichtung. Hierfür wurde eine Kombination aus theoretischer Simulation und praktischen Versuchen entwickelt, welche die Elektrolyteigenschaften für eine Prognose mitberücksichtigen kann. Die Verknüpfung experimenteller Daten aus dem unter 3.2.2 beschriebenen Beschichtungsstand mit den Simulationsergebnissen zur Prognose ist im Rahmen dieser Arbeit erstmalig erfolgt. Die genaue Methodik und die notwendigen einzelnen Schritte werden in Abschnitt 7.4 ausführlich beschrieben.

Wie auch für das erste Segment wurde eine Validierung in der Prototypanlage zur Absicherung der entwickelten Methodik angestrebt. Die konkret zu erreichenden Zielsetzungen bezüglich der Toleranzen ergeben sich aus den Anforderungen der beschichteten Lagerringe.

## Segmente 3 und 5

Die Entwicklung der restlichen Anlage erfordert keine spezielle Betrachtung, da es sich bei der Anlage außerhalb der Vorrichtungs- und Anodentechnik um einen überwiegenden Aufbau nach Stand der Technik handelt. Ein erhöhtes Entwicklungsrisiko, welches eine besondere Entwicklungs- oder Bewertungsmethodik zur Absicherung der Ergebnisse erfordert, war somit nicht gegeben. Gleiches gilt für die Peripherie. Durch das vorhandene Technikum mit bereits verfügbarer Infrastruktur waren diese Aspekte zwar zu beachten, es waren jedoch keine kritischen Probleme zu erwarten.

Ziel der Segmente ist eine betriebsbereite Prototypanlage für Versuchsbeschichtungen und geeigneten Schnittstellen zur bestehenden Infrastruktur. Insbesondere für Segment 3 stellt die Bereitstellung ausreichend genauer und aktueller Planungsdaten (z. B. CAD-Modelle und Abmessungen für die Konzepte aus Segment 1 und die Simulationsrechnungen in Segment 2) im Entwicklungsprozess eine essenzielle Aufgabenstellung dar.

---

## Segment 4

Eine Besonderheit für die Instanziierung und das nachfolgende Fallbeispiel stellt die Verfahrenstechnik dar. Wie bereits beschrieben war diese nicht Bestandteil dieser Arbeit und wurde damit auch im Rahmen der Methodik nicht detailliert eingebettet. Auf Grund der Wechselwirkungen mit den anderen Segmenten wurde jedoch ein kontinuierlicher Informationsaustausch vorgesehen. Ziel war hierbei, möglichst alle aus der Verfahrenstechnik notwendigen Anforderungen und Randbedingungen in der Entwicklung berücksichtigen zu können, auch wenn diese ggfs. durch neue Entwicklungen und Erkenntnisse häufigen Veränderungen unterliegen.

### 7.2.3 Segmententwicklung

Für die Phase der Segmententwicklung wurden die Ziele definiert, welche für den Übergang in die Gesamtentwicklung erreicht werden sollen. Die hier definierten Ziele stellen die Grundlage dar, um in den iterativen Schritten der Gesamtentwicklung die notwendigen Informationen und Daten zu erhalten und auch zu bewerten, bzw. im Falle der Vorrichtungstechnik diese auf Basis eines Konzepts zur Umsetzungsreife entwickeln zu können. Die zu erreichenden Ziele für die Segmente vor dem Übergang in die Gesamtsystementwicklung waren dabei

- Segment 1: Erarbeitung eines bestmöglichen Konzepts für die Beschichtungsvorrichtung inkl. der Kontaktierung, welches im Rahmen der Gesamtanlage umgesetzt werden kann.
- Segment 2: Aufbau eines Simulationsmodells, eines Optimierungsvorgehens für die Stromdichteverteilung und einer Prognosemethode zur Berücksichtigung verfahrenstechnischer Einflüsse.
- Segment 3: Konzept für die Gesamtanlage, welches z. B. die Anzahl der Stationen und Spülen, benötigte Komponenten und ein für die Segmente 1 und 2 geeignetes Konzept für das Behälterdesign beinhaltet.
- Segmente 4 und 5: Klärung der Anforderungen, d. h. bekannte Auslegungsparameter aus der Verfahrenstechnik (z. B. Anforderungen an verwendete Werkstoffe

auf Grund der Arbeitstemperaturen und eingesetzten Chemikalien, Stromdichtebereich für Beschichtungen), Schnittstellen von und zur Peripherie / Infrastruktur, Konzept für Steuerungs- und Regelungstechnik usw.

Die durchgeführte Segmententwicklung für die Segmente 1 und 2 wird in den Abschnitten 7.3 und 7.4 beschrieben. Für die Segmente 3 bis 5 erfolgte dies innerhalb der definierten Standardzyklen unter Berücksichtigung der fortschreitenden Ergebnisse aus den jeweils anderen Bereichen.

#### 7.2.4 Gesamtsystementwicklung

Die Gesamtsystementwicklung als Weiterführung der Segmententwicklung wird nach Erreichen der definierten Zielsetzungen gestartet. Dabei wird in iterativen Zyklen der Detaillierungsgrad zunehmend erhöht und im Vergleich zur Segmententwicklung auch stärker miteinander verknüpft entwickelt. Beispielhaft sind hier die eigentliche Vorrichtung und die Schichtdickenoptimierung eng miteinander wechselwirkend: Jede konstruktiv notwendige im Aktivraum zwischen Anode und Bauteil befindliche Komponente wirkt sich auf die Stromdichteverteilung aus, umgekehrt sind zur Optimierung Anpassungen und ggfs. Zusatzbauteile wie Blenden notwendig, welche die Ausführung der Beschichtungsvorrichtung betreffen. Es wird somit ausgehend von den Ergebnissen (Konzepten, Simulationsmodellen usw.) aus der Segmententwicklung eine gemeinsame bestmögliche Lösung entwickelt, welche die Belange aus allen Segmenten berücksichtigt und ineinander integriert.

Durch die zyklischen Schritte zur Bewertung der Zielerreichung wird im Entwicklungsprozess geprüft, ob die Umsetzungsreife erreicht ist, oder eine weitere Entwicklungsschleife benötigt wird. Dies betrifft sowohl die eigentliche Funktion des Gesamtsystems, als auch die ggfs. notwendigen Rahmenbedingungen (projektspezifische Kriterien wie erreichte Meilensteine, externe Abhängigkeiten – z. B. bei größeren Anlagen die Genehmigungsprozesse). Im Rahmen des Fallbeispiels (Kapitel 8) wurden aus projektspezifischen Gründen beispielsweise einige Optimierungsschleifen in den laufenden Anlagenbetrieb verschoben.

### 7.2.5 Umsetzungs- und Validierungsphase

Im Rahmen dieser Arbeit und der Instanziierung wird für das Fallbeispiel nur eine Entwicklungsstufe betrachtet: Eine Prototypanlage zur Beschichtung eines speziellen Wälzlager-typs. Die Hochskalierung auf den industriellen Maßstab war zum aktuellen Forschungsstand noch nicht vorgesehen, so dass die Methodik auch nur für eine Entwicklungsstufe durchlaufen wurde.

Die Umsetzung wurde nach positiver Bewertung und entsprechender Entscheidung in der Gesamtsystementwicklung begonnen, was Beschaffung, Fertigung und Montage bis hin zur Inbetriebnahme umfasst. Mit dem Erreichen eines funktionsfähigen Gesamtsystems konnte die Validierung erfolgen (siehe Fallbeispiel in Kapitel 8 und insbesondere Abschnitt 8.3). Mittels der Validierungserkenntnisse konnten in eng gefassten Optimierungszyklen für die Schichtdickenverteilung weitere Verbesserungen durchgeführt werden. Die Finalisierung betrifft im Rahmen der Instanziierung den Technikums-Regelbetrieb, d. h. die Funktionsprüfung und Optimierungen wurden abgeschlossen und die Betriebsparameter wurden definiert. Mittels der Parameter wurde die Beschichtung von Lagerringen durchgeführt, welche dann weiter analysiert und geprüft werden konnten.

### 7.3 Detailmethodik zur Konzeptentwicklung für die kontaktstellenfreie, vollflächige Beschichtung

In der instanziierten Methodik wurden zu Beginn die Anforderungen und Aufgabenstellungen geklärt und auch bei der Aufteilung in verschiedene Segmente jeweils definiert. Für die Produktionstechnik für eine kontaktstellenfreie galvanische Beschichtung wurde ausgehend von diesem Startpunkt eine spezialisierte Methodik entwickelt. Anhand dieser wird die Auswahl einer geeigneten Variante nachvollziehbar und qualifiziert möglich. Vor der Erstellung der Methodik wurden die wichtigsten Zusammenhänge theoretisch analysiert, um auf dieser Basis die notwendigen Schritte zu ermitteln.

### 7.3.1 Aufbau der Methodik (kontaktstellenfreie Beschichtung) im Entwicklungssegment 1

Analog zur übergeordneten Methodik wurden auch für die Teilentwicklung mehrere Stufen mit Iterationsschleifen genutzt. Ausgangspunkt sind die Anforderungen an das Entwicklungssegment, welche in der Instanziierung der Methodik festgelegt werden. Als erste Phase wurde die Lösungsgenerierung vorgesehen, in diese fließen einerseits der Stand der Technik und andererseits die nachfolgend im Rahmen der Arbeit erstellten prinzipiellen Lösungsmöglichkeiten ein. Im Rahmen der Lösungsgenerierung werden die offensichtlichen Kriterien für die Umsetzungsmöglichkeiten mitberücksichtigt. Es sollen allgemeine Lösungsmöglichkeiten erstellt werden, eine tiefergehende Betrachtung bzw. Detaillierung jedoch nur bei zumindest plausibler Realisierungsmöglichkeit erfolgen.

Die zweite festgelegte Phase bildet die Vorbereitung der Bewertung. Neben der Definition von Bewertungskriterien werden die Varianten soweit ausgearbeitet, dass eine Bewertung sinnvoll möglich ist. Bei ausreichender Datenbasis wird die Bewertung durchgeführt und für die gewählte Variante die konstruktive Konzeptphase gestartet bzw. ein Vorentwurf erstellt.

Zwischen den einzelnen Schritten wurde jeweils eine Kontrolle der potenziellen Zielerreichung integriert. Können keine Varianten für die Anforderungen erstellt werden, müssen diese Anforderungen ggfs. geprüft oder die Entwicklung abgebrochen werden. Wird bei der Bewertung eine Zielerreichung als nicht plausibel eingestuft (z. B. wenn alle Varianten durchgehend schlecht bewertet werden), sollten ebenfalls die Randbedingungen und Anforderungen geprüft werden.

Nach Abschluss des Vorentwurfs erfolgt wie in der erarbeiteten Gesamtmethodik vorgesehen die gemeinsame Entwicklung aller Segmente zum System.

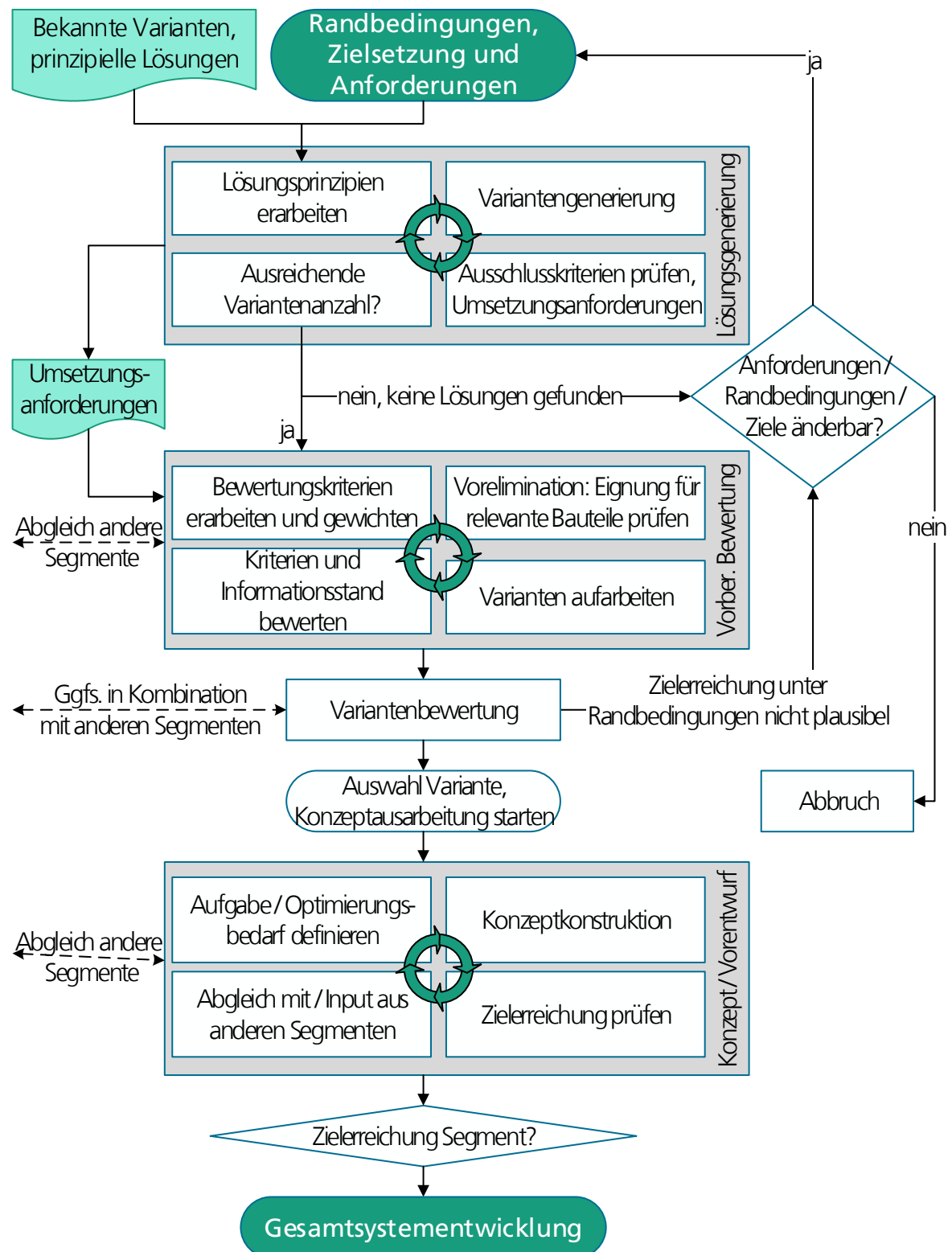


Abbildung 7.2: In der Arbeit entwickelte Detailmethodik zur Erarbeitung eines vollflächigen, kontaktstellenfreien Beschichtungskonzepts (Entwicklungssegment 1)

---

Die Beschreibung der einzelnen Schritte im Detail erfolgt in den nachfolgenden Unterkapiteln. Eine Einschränkung wurde durch die Begrenzung auf rotationssymmetrische Bauteile mit der Anforderung von fehl- bzw. kontaktstellenfreien galvanischen Beschichtungen getroffen. Eine Übertragungsmöglichkeit auf andere Aufgabenstellungen und Technologien wäre separat zu prüfen.

### 7.3.2 Randbedingungen, Zielsetzungen und Anforderungen

Eine klare Aufarbeitung der Ausgangslage mit Anforderungsklä rung ist die Basis jeder technischen Aufgabenstellung, dies erfolgt in diesem Schritt in Abstimmung mit den anderen Segmenten. In Bezug auf eine kontaktstellenfreie galvanische Beschichtung sind zusätzlich zu den immer herrschenden Randbedingungen (geometrische Verhältnisse / Grenzen, Bauteile, Grundmaterial) insbesondere die Elektrolytsysteme (Vor- und Nachbehandlung und Beschichtungsverfahren) und deren zugehörige Eigenschaften / Parameter relevant. Neben typischen Fragestellungen wie beispielsweise Temperatur, Anodentyp, chemische Zusammensetzung und Verfahrensparameter, Bauteilfläche und Abscheidebedingungen (Stromdichte, Spannung, Hydrodynamik) sind weitere Punkte essenziell: Kristallisationsneigung des Mediums, Toleranz der Schichtbildung auf Unterbrechung der Abscheidung und das Verhalten der Schicht bei Luftkontakt sind auszugsweise zu nennen, da auch diese direkten Einfluss auf mögliche konstruktive Umsetzungen bzw. deren Berücksichtigung im Auswahlprozess haben.

Eindeutige Zielsetzungen werden in diesem Schritt ebenfalls definiert, beispielsweise benötigte Toleranzen des fertigen Bauteils und somit auch der Beschichtung (Abmessungen, Form- und Lagetoleranzen wie Rundlauf, Zylindrizität etc. bei der benötigten Sollschichtdicke).



### 7.3.3 Vorbetrachtungen: Effekte und Einflussfaktoren an Kontaktstellen

Bei der Betrachtung werden zwei Teilaspekte unterschieden, der direkte Kontakt von Metall auf Metall und die Umgebung dieses Kontaktpunkts am Bauteil, welche unabhängig von der Ausführung der Kontaktierung in unterschiedlichen Ausprägungen beeinflusst wird.

#### Kontaktbereich mit direkter Auflage

Für eine sichere Stromübertragung ist eine Berührung mit Pressung zwischen Kontaktteil und Bauteil notwendig. An dieser Berührungsstelle ist eine galvanische Abscheidung nicht möglich. Die Berührungsfläche bestimmt den übertragbaren Strom, jedoch sind auch bei einer kleinstmöglichen Ausführung die Ausbildung einer Fehlstelle und damit ein Angriffspunkt für Korrosion die Folge. Eine unterschiedliche maschinenbauliche Ausführung kann bei einem statischen Kontaktpunkt die Fehlstelle somit nur verändern, nicht aber vermeiden. Eine vollflächige Schicht kann nur mit ortsveränderlichen, dynamischen Kontaktpunkten am Bauteil erreicht werden. Es ist eine relative Bewegung zwischen Kontakten und Bauteil notwendig. Möglichkeiten einer dynamischen Kontaktierung wurden für die Durchführung der Methodik im Rahmen dieser Arbeit ermittelt und sind im nachfolgenden Kapitel 7.3.4 beschrieben.

#### Umgebung der Kontaktstelle

In direkter Umgebung zur Kontaktstelle wird die Abscheidung durch die Kontaktierungsbauteile verändert. Die primäre Stromdichteverteilung ist sowohl durch nichtleitende Teile (Blendwirkung, das elektrische Feld bzw. der Stromfluss wird umgeleitet) als auch durch leitende Bereiche betroffen. Während nichtleitende Teile den Strom unterschiedlich auf der Kathode verteilen und lokal Anstiege und Absenkungen bewirken, vermindern leitende Teile lokal die primäre Stromdichte durch ihre zusätzliche Beschichtungsfläche. Die Ausprägung der Stromdichteveränderung ist von der konstruktiven Umsetzung abhängig. Bei leitfähigen Bereichen muss die zusätzliche Beschichtungsfläche bei der Auslegung mitberücksichtigt werden. Eine Abschirmung der metallischen Bereiche ist hierbei häufig

nicht vollständig möglich, so dass in der Praxis auch bei isolierten Kontaktierungen in einem gewissen Maß eine Mitbeschichtung auftritt. Die sekundäre und tertiäre Stromdichteverteilung werden ebenfalls beeinflusst (siehe 3.2), da sich durch die veränderte Geometrie beispielsweise auch eine andere Hydrodynamik einstellt. Die Auswirkungen einzelner Elemente können nicht allgemein beurteilt werden, da die Effekte sich sowohl positiv als auch negativ auswirken können. Beispielsweise kann ein nichtleitendes Element im Bereich einer Bauteilkante eine Stromdichtespitze abmildern und trägt somit zu einer homogenen Schichtverteilung bei (siehe (Arbeitsgemeinschaft der Deutschen Galvanotechnik, S. 21)). In der Nähe eines flächigen Bereichs wird durch dieselbe Abblendwirkung eine Inhomogenität verursacht, sie wirkt an dieser Stelle somit negativ. Wie auch in 3.2 beschrieben haben daher Form, Anordnung und Art (Anode, Kathode, Nichtleiter, Zwischenleiter) aller Elemente einen Einfluss auf die Stromdichteverteilung. Es ist daher vorteilhaft, wenn aus konstruktiver Sicht so wenige Elemente wie möglich in Bauteilnähe notwendig sind und diese entsprechend berechnet und für die Auslegung der Stromdichteverteilung mit einbezogen werden. Diese Wechselwirkungen sind speziell in Kombination mit dem Entwicklungssegment 2 zu betrachten (siehe 7.3.9).

#### 7.3.4 Recherche: Bekannte Varianten und Aufstellung allgemeiner Lösungskonzepte für kontaktstellenfreie Beschichtung

Die Schaffung eigener Ideen ist eine Möglichkeit, neue Lösungskonzepte zu erhalten. Eine Recherche vorhandener bekannter Lösungen ist jedoch immer notwendig und sinnvoll. So werden bei vorhandenen Lösungen einerseits Mehrfacharbeiten vermieden, andererseits ist bezüglich der Thematik von Schutzrechten eine Kenntnis des Ist-Zustands zwingend. Im Rahmen dieser Arbeit wurden für die spätere Durchführung der Methodik zu Beginn die prinzipiellen Lösungsmöglichkeiten erarbeitet, welche die bekannten Varianten aus einer Recherche ergänzen. Diese potenziellen Lösungen können für zukünftige Entwicklungsaufgaben als Ausgangspunkt / Ergänzung genutzt werden, wie es auch im Fallbeispiel erfolgt ist.

---

Ein neuartiges Konzept bedarf der Erstellung kreativer Lösungen. Beim methodischen Konstruktionsprozess wird oftmals auf die Verwendung eines morphologischen Kastens zurückgegriffen, um die Funktionsprinzipien zu ermitteln und Varianten zu generieren. Diese Vorgehensweise wurde auch im Rahmen dieser Arbeit zur Erarbeitung der allgemeingültigen Prinzipien für die Aufgabenstellung genutzt. Die allgemeingültigen Prinzipien können im Rahmen der neuentwickelten Methode als Ansatzpunkt für technische Umsetzungen dienen und somit gegebenenfalls eine schnellere Lösungsfindung ermöglichen.

### Aufstellung und Bewertung von Lösungsprinzipien

Unabhängig von einer konkreten konstruktiven Aufgabenstellung können bei rotations-symmetrischen Teilen verschiedene übergreifende Zusammenhänge ermittelt werden. Eine Unterscheidung kann dabei nach technischen Merkmalen der Beschichtungstechnik (z. B. Elektrolytversorgung), der Halterung und Bewegung des Bauteils und der Stromzufuhr erfolgen. Für diese allgemeingültigen Merkmale und deren Unterpunkte wurden verschiedene Lösungsvarianten bzw. denkbare Funktionsprinzipien aufgestellt.

Tabelle 7.1: Erarbeitete allgemeine Merkmale und Lösungsansätze für kontaktstellenfreie Beschichtung

Merkmal		Variante		V1	V2	V3	V4
		V1	V2	V3	V4		
Beschichtungstechnik	Elektrolytversorgung	vollständig eingetaucht	teileingetaucht	Jetplating / Düsen	Autobrush-System		
Bauteilhalterung	Bauteilorientierung	horizontal (Rotationsachse vertikal)	vertikal (Rotationsachse horizontal)	schräg			
Bauteilbewegung	Relativbewegung Halterung / Lager	konstante Drehung	zyklisch (Pick & Place / drehen im Prozess)	zyklisch (Entnahme & Umspannen, mehrstufiger Prozess)	oszillierend		
	Art Relativbewegung	Bauteil rotieren	Bauteil oszillieren / rollen	Halterung rotieren	zyklisch umsetzen		
Stromzufuhr / Kontaktstellen	Kontaktierungsart	rotierend (Rollen / Kugeln)	stationäre Klemmkontakte	Schleifkontakt (Bürste etc.)	flexibles Band (teilumschlingend)		
	Kontaktierungsort (badbezogen)	im Elektrolyt & Beschichtungsbereich	außerhalb Elektrolyt	im Elektrolyt, vom Beschichtungs-bereich getrennt			
	Kontaktierungsort auf Bauteil	Stirnseite	Innendurchmesser	Außendurchmesser	andere (z. B. Lagerinnen-seite)		

Die erarbeiteten Varianten und Merkmale sind dabei als Hilfestellung bei der späteren Durchführung gedacht, müssen jedoch für den Einzelfall geprüft und ggfs. erweitert werden. Die technische Realisierbarkeit bzw. der damit verbundene Aufwand wurden bei der

Ideensammlung im vorherigen Abschnitt noch nicht berücksichtigt. Die einzelnen Lösungsprinzipien werden nachfolgend näher auf die Vor- und Nachteile sowie Einschränkungen untersucht.

### Analyse Elektrolytversorgung und Bauteilorientierung

Die Lösungsvarianten zur Elektrolytversorgung können anhand der Anforderung nach Vollflächigkeit auf ein teilweises oder vollständiges Eintauchen reduziert werden, die Techniken des Jet- und Brushplating sind auf selektive Beschichtungen bzw. einzelne Flächen eines Bauteils (z. B. Abschnitt eines Zylinders, siehe 3.3.2) ausgerichtet. Ein Teileintauchen bietet den Vorteil einer Trennungsmöglichkeit von Beschichtungsbereich und Vorrichtungsbereich, da Halterung, Kontaktierung usw. ganz oder zumindest überwiegend außerhalb des Elektrolyten erfolgen können. Eine Lösungsmöglichkeit dieser Art stellt die in 2.2.2 beschriebene Vorrichtung dar, die dort genannten Nachteile sind allgemeingültig. Diese Nachteile sind beispielsweise ein unklarer Einfluss auf Schichtbildung und Gefügestruktur, welche sich durch die Beschichtungsverhältnisse ändern kann. (Amblard et al. 1979) Eventuell kommt es zu einer Passivierung der Oberfläche oder einer Kristallisation des Elektrolyten bei Luftkontakt. Bei höheren Temperaturen entsteht durch den nicht eingetauchten Bereich ein hoher Wärmeverlust (Verdunstung). Insbesondere ist im Zusammenhang mit korrosionsbeständigen Schichten (Passivierung) hier auch die Delamination eine potenzielle Gefahr – beispielsweise Oxidschichten können sich ggfs. schnell bilden und bereits in geringer Dicke Auswirkungen aufweisen. (Dini 1993, S. 55–56) Ein vollständiges Eintauchen erfordert hingegen eine Kontaktierung und Halterung im Elektrolyt, inkl. der möglichen Mitbeschichtung der Kontaktelemente.

### Analyse Relativbewegung / Bauteilbewegung

Eine relative Bewegung zwischen Bauteil und Halterung / Kontakten ist notwendig, um Fehlstellen durch feste, nicht beschichtete Kontaktpunkte zu vermeiden. Hierbei kann eine kontinuierliche oder eine zyklische Bewegung eingesetzt werden. Bei kontinuierlicher Bewegung ist eine konstante Drehung des rotationssymmetrischen Teils vorteilhaft, da dies auch eine ausgleichende Relativbewegung zu statischen Anodenaufbauten bewirkt. Die

Rundlaufgenauigkeit der Beschichtung wird dadurch verbessert, da eine fertigungstoleranzbedingte außermittige Positionierung, Unregelmäßigkeiten an Anoden (einzelne Stäbe, passive Bereiche usw.) durch die konstante Rotation ausgemittelt werden. (Durney 2000, S. 466) Voraussetzung für eine kontinuierliche Drehung sind geeignete geometrische Bedingungen, da das Bauteil auf durchgehenden Stirnseiten oder Durchmessern entlang des gesamten Umfangs rotiert wird.

Bei einer oszillierenden Bewegung können bei ausreichendem Oszillationsweg in einem gewissen Maß ebenfalls ausgleichende Effekte erreicht werden, für eine Vermeidung von statischen Kontaktpunkten sind jedoch auch geringe Oszillationsbewegungen denkbar. Vorteil einer geringen Bewegung ist die geringere notwendige Fläche, da nur für den Oszillationsweg ein durchgehender geeigneter Bauteilbereich vorhanden sein muss (z. B. zwischen Bohrungen). Sowohl bei oszillierender als auch bei kontinuierlicher Rotation sind Kontakte erforderlich, welche diese Bauteilbewegung erlauben.

Zyklische Bewegungen sind bezüglich der Beschichtungsgleichmäßigkeit deutlich nachteiliger. Hier ist besonders die Anzahl der inkrementellen Bewegungen von Bedeutung. Ein häufiges „Pick & Place“ während der Abscheidung ist aufwändig zu realisieren, aber vorteilhafter, verglichen mit einem mehrstufigen Prozess mit Entnahme und Umspannen des Bauteils. Bei zyklischer Bewegung bietet die Verwendungsmöglichkeit von Punktkontakten eine höhere Flexibilität zur Kontaktierung. Diese stellen an die Bauteilgeometrie deutlich geringere Anforderungen an geeignete Flächenabschnitte. Allerdings ist die Verteilung der Schichtschwächung kritisch, da am statischen Kontaktpunkt keine Schichtbildung stattfindet und es somit auch bei einem Wechsel zu einer Schwachstelle kommt.

### Analyse Stromzufuhr / Kontaktstellen

Das Merkmal der Stromzufuhr ist bezüglich des Orts (sowohl bezogen auf den Elektrolyten und Beschichtungsbereich als auch im Detail auf dem Bauteil) und der Art der Lösung relevant. Die Art übt durch den direkten Bauteilkontakt einen unmittelbaren Einfluss auf die Schichtbildung aus, daher sind hierbei die auftretenden Belastungen auf Schicht / Bauteil von primärer Relevanz. Da hierzu wenige bzw. keine Behandlung in der Fachliteratur

existiert, sondern dies zumeist praktisches Know-how der Beschichtungsbetriebe ist, werden die Zusammenhänge und Eigenschaften anhand eigener Überlegungen nachfolgend näher analysiert.

Bei rollenden Kontakten tritt im Optimalfall nur eine Rollreibung auf. In der Praxis können jedoch auch gleitende Beanspruchungen mit auftreten, so dass eine Wälzreibung vorhanden ist. Im Fall von Schleifkontakten liegt Gleitreibung vor. Bei einer teilweisen Umschlingung und einem Klemmkontakt handelt es sich um Haftreibung, jedoch kann es auch bei der Umschlingung ggfs. zu Gleitreibungen kommen. Für eine geringstmögliche Belastung des Kontaktbereichs ist die Vermeidung von Gleitreibung vorteilhaft, da ein solcher Verschleiß die Schicht bereits während der Abscheidung durch Abrieb potenziell schädigen kann. Der Abrieb auf dem Bauteil kann durch die Verwendung eines weichen Reibpartners verbessert werden. Dies wird beispielsweise bei Schleifkontakten mit Schleifkohlen genutzt. In diesen Fällen besteht die Gefahr einer Verschmutzung des Elektrolyten und der Ablagerung des Schleifkontaktmaterials auf dem Bauteil, letzteres stellt einen absolut qualitätskritischen Aspekt (Schichthaftung, Einbau anderer Elemente mit Einfluss auf die Korrosionsbeständigkeit der Schicht) dar und muss vermieden werden.

Für die Schichtabscheidung ergeben sich Unterschiede zwischen stationärer und instationärer (rollender, gleitender) Kontaktierung. Bei der instationären Kontaktierung ergeben sich wechselnde elektrochemischen Bedingungen im Bereich der Kontaktierung. Durch die Relativbewegung entstehen eine veränderte Hydrodynamik und eine veränderliche Stromdichteverteilung auf dem Bauteil. Zur besseren Beurteilung wurde eine Simulationsrechnung für eine exemplarische Kontaktrolle durchgeführt, anhand derer prinzipielle Zusammenhänge sichtbar werden. Schematisch lassen sich die Vorgänge in am Beispiel einer Rolle in fünf Bereiche unterteilen (Abbildung 7.3): Bereich 1 sind normale Beschichtungsbedingungen vor der Überrollung. Im Bereich 2 der Kontaktrolle kommt es zu einer Verdrängung des Elektrolyten (starker Einfluss auf die Hydrodynamischen Bedingungen) und einem Absinken der Stromdichte auf dem Bauteil (Abschirmung durch die Rolle und Mitbeschichtung derselben). Der Bereich 3 beinhaltet den eigentlichen direkten Kontakt zwischen Bauteil und Kontaktrolle, hier findet keine Abscheidung statt. Im Bereich 4 nach der Überrollung nimmt die Stromdichte wieder zu, durch den Strömungsschatten der

Rolle tritt hier ähnlich zum Bereich 2 eine starke Hydrodynamik auf. Danach geht es in den Bereich 5 mit wieder normalisierten Beschichtungsbedingungen über. Die genaue Ausprägung ist von der konstruktiven Umsetzung abhängig (Durchmesser, Rollenbreite, ggfs. Isolationshülsen für die Rolle zur Minimierung der Mitbeschichtung usw.). Die Stofftransport- und Diffusionsvorgänge für die Abscheidung werden in den Bereichen 2 und 4 stark beeinflusst, die normalen Abscheidungsbedingungen werden gestört (Bereich 2) bzw. bauen sich neu auf (Bereich 4). Die Bereiche werden durch die Kontaktfläche des Bauteils kontinuierlich durchlaufen, da nur im Bereich 3 keine Schichtabscheidung stattfindet, wird auf der Kontaktfläche zumindest eine in Relation zum Rest des Bauteils verminderte Schichtdicke erzeugt.

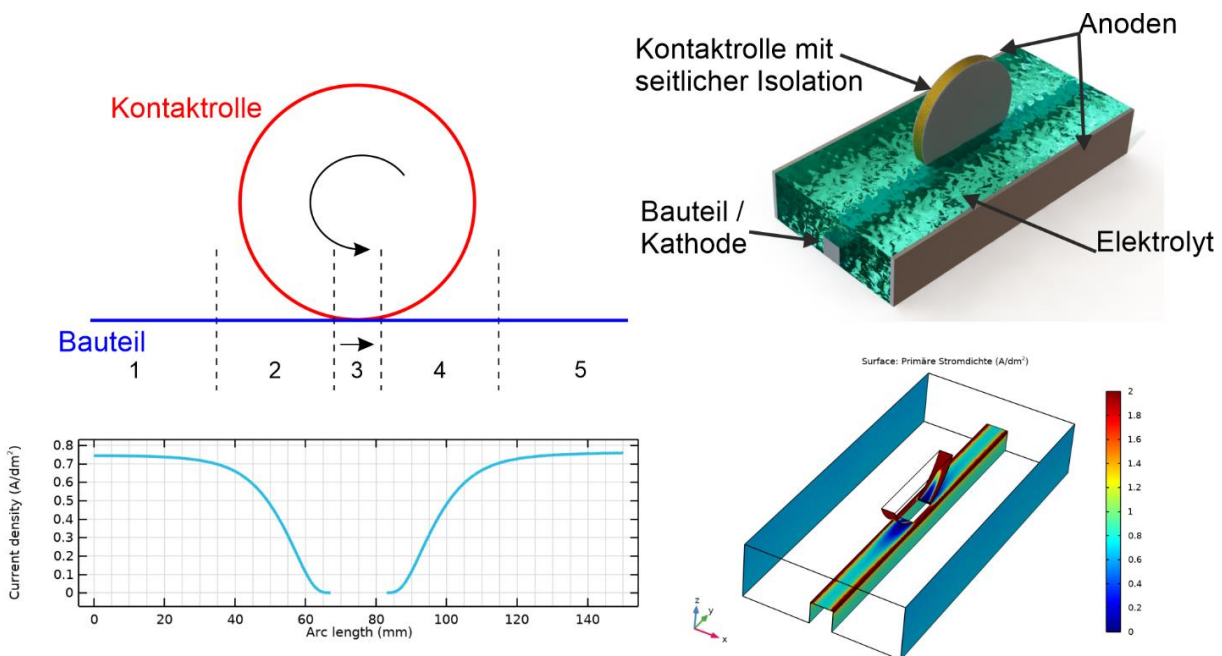


Abbildung 7.3: Analyse der Stromdichteauswirkung eines Rollkontakts. Links oben: Schematische Unterteilung in Bereiche. Links unten: Zugehöriger berechneter primärer Stromdichteverlauf, mittig auf Bauteil. Rechts oben: Gerendertes CAD-Modell (Basis der Berechnungen). Rechts unten: 3D-Darstellung der primären Stromdichteverteilung aus der Simulation mit Comsol Multiphysics.

Bei einem stationären Kontaktpunkt minimieren sich die Stromdichteeffekte in den Bereichen 2 und 4, da eine bessere Isolation des Kontakts möglich ist. Die hydrodynamischen



Auswirkungen beschränken sich durch die fehlende Relativbewegung auf eine Beeinflussung der normalen Badumwälzung / Bad-Relativbewegung durch die Geometrie des Kontaktkörpers. Im Bereich 3 wird jedoch ebenfalls keine Schicht aufgebaut.

Der Kontaktierungsort ist stark von der Wahl des Systems abhängig. Bei einem teilweisen Eintauchen wird die Stromübertragung vorteilhafterweise außerhalb des Elektrolyten erfolgen, um eine Mitbeschichtung der Kontaktelemente zu vermeiden. Erfolgt diese innerhalb des Elektrolyten, müssen konstruktiv zusätzliche Maßnahmen zur Isolation bzw. der Minimierung einer Mitbeschichtung stromführender Teile getroffen werden. Eine Mischform kann die konstruktive Abtrennung eines Bereichs im Elektrolyten darstellen, in dem ein Einstreuen des elektrischen Felds reduziert ist und die aktiven Abscheidungsgebiete von Anode und Kathode außerhalb sind. Hier würde das Bauteil vollständig eingetaucht bleiben, die Beschichtungsbedingungen sind jedoch ähnlich zu einer teileingetauchten Lösung (mit vergleichbaren Vor- und Nachteilen) und eine Mitbeschichtung der Kontakte ist geringer.

Verwendbare Bereiche auf dem Bauteil zur Stromübertragung wurden bereits bei der Bauteilbewegung behandelt. Diesbezüglich sind besonders die Anforderungen an bestimmte Funktionsflächen zu berücksichtigen. Bei der Verwendung von Roll- oder Schleifkontakten müssen die vorhandenen Flächen bzw. Bauteilbereiche entsprechend geeignet sein. Je nach Form des Bauteils kann die Nutzung bestimmter Lösungen auch ausgeschlossen sein.

Für alle Kontaktierungsarten und Orte ist die Sicherstellung eines durchgängigen Kontakts essenziell, um Spannungsspitzen und Überschläge zu vermeiden. Die Verwendung mehrerer Stromüberträger ist somit vorteilhaft. Im Fall einer kurzen Kontaktunterbrechung an einem einzelnen Element steigt die Spannung durch die Widerstandserhöhung an den verbleibenden Kontakten nur leicht an. Bei vollständigem Abbruch des Stromflusses würde der Gleichrichter bis zur maximal möglichen Spannung nachregeln. Hier sind Fixkontakte unempfindlicher. Bei einem zyklischen Wechsel der stationären Kontaktpunkte müsste jedoch entweder eine Beschichtungsunterbrechung erfolgen oder ein Kontaktabbruch beim Versetzen vermieden werden.

## Kombinationsmöglichkeiten und -einschränkungen, Ausschlusskriterien

Die Eignung der unterschiedlichen Merkmale ist bezüglich der Sinnhaftigkeit in Verbindung mit den vorliegenden Anforderungen und auch der Kombination untereinander zu prüfen. Beispielsweise ist ein Schleifkontakt bei zyklischer Entnahme mit Umspannen des Bauteils nicht geeignet. Insbesondere können durch einzelfallabhängige Gegebenheiten zusätzliche Ausschlusskriterien auftreten, welche die Nutzung einzelner Lösungsansätze verhindern (beispielsweise kann ein teilweises Eintauchen aus verfahrenstechnischen Gründen nicht erlaubt sein oder die Teilumschlingung mittels Band ist aus geometrischen Gründen nicht möglich, da der Außendurchmesser nicht geeignet ist).

### 7.3.5 Iterationszyklus Lösungsgenerierung

#### Lösungsprinzipien erarbeiten

Im Initialschritt werden Lösungsprinzipien erarbeitet, als Basis dienen die in 7.3.4 beschriebene Recherche und die erarbeiteten allgemeine Prinzipien. Die vorhandenen Prinzipien sind dabei kritisch auf Vollständigkeit und Sinnhaftigkeit zu prüfen, insbesondere in den Iterationsschleifen, wenn noch keine ausreichende Variantenanzahl für eine aussagekräftige Bewertung erreicht ist. In diesem Schritt ist die Anwendung von Kreativitätstechniken (siehe 4.1.3) sinnvoll.

#### Variantengenerierung

Mittels der geklärten Anforderungen können Funktionsprinzipien und Lösungsvarianten skizziert / konzipiert werden. In diesem Schritt ist auch die Zuhilfenahme von Kreativitätstechniken und die Verwendung von bekannten Hilfsmitteln eines methodischen Konstruktionsprozesses möglich. Im Rahmen der theoretischen Lösungskonzepte (7.3.4) wurde beispielsweise für die Kontaktierung und Bauteilbewegung ein morphologischer Kasten dargestellt. Wie bei Kreativitätstechniken üblich, ist eine Detaillierung oder tiefergehende Machbarkeitsprüfung in diesem Stadium nicht erforderlich. Für eine Bewertung kann der Detaillierungsgrad in den späteren Schritten nach Bedarf erhöht werden, falls dies für eine

belastbare Aussage erforderlich ist. Für eine möglichst vollständige Abdeckung aller denkbaren Alternativen sollten wenige Einschränkungen vorgenommen werden. Nur bei eindeutiger fehlender Eignung sollten Lösungsansätze nicht berücksichtigt werden.

### Ausschlusskriterien prüfen

Der erste Bewertungsschritt umfasst eine Prüfung auf offensichtliche prinzipbedingte Ausschlusskriterien, hierfür kann ein einfaches Checklistenverfahren genutzt werden. Die Kriterien basieren dabei auf den zu Beginn definierten Zielsetzungen und der Vereinbarkeit mit den vorhandenen Randbedingungen. Naheliegende Prüfungen sind beispielsweise geometrische Abmessungen (Orientierung des Teils nur in einer Richtung baulich möglich, z. B. durch Raumhöhe bedingt), verfahrenstechnische Einschränkungen (keine Abscheidungsunterbrechung erlaubt) oder Beschichtungsanforderungen (Hydrodynamik durch Bauteilbewegung, Rundheit nur durch Rotation erreichbar o. ä.). Es werden alle Varianten bezüglich der aufgestellten Kriterien geprüft und jede Nichterfüllung dokumentiert. Eine Prüfung von konstruktiven Details und Umsetzungen (beispielsweise Ort der Kontaktierung, Betrachtung jedes einzelnen Bauteils) erfolgt noch nicht hier, sondern erst in Schritt 8. Das Arbeiten mit Mindest- und Maximalwerten und idealisierten Geometrien ist ausreichend. Eine Trennung dieser Abstraktionsebenen wurde vorgenommen, um die notwendige eingehendere Betrachtung im Rahmen der Bewertung nur für eine reduzierte Variantenanzahl durchführen zu müssen.

In manchen Fällen kann die Erfüllung eines Ausschlusskriteriums mit anderen Bedingungen verknüpft sein. Eine eindeutige Aussage oder ein harter Ausschluss sind dann nicht sinnvoll. Die Bedingungen werden dokumentiert (siehe 7.3.6) und fließen in die endgültige Variantenbewertung mit ein. Einschränkungen, Vor- und Nachteile der Varianten, welche im Verlauf dieser Bewertung auffällig sind, sollten ebenfalls parallel protokolliert werden.

Sobald eine Variante den Anforderungen nicht genügt, wird sie aus der weiteren Betrachtung eliminiert und nicht weiterverfolgt. Im Zweifelsfall sollte von einem endgültigen Ausschluss der Variante abgesehen werden, um eine ausführlichere Bewertung im späteren Verlauf zu ermöglichen.

## Review der Iterationsschleife: Ausreichende Variantenzahl generiert?

Am Ende einer Iterationsschleife werden die Anzahl und Qualität der generierten Varianten geprüft und diskutiert. Hierbei wird noch keine vollständige Bewertung vorgenommen, sondern eine Einschätzung zur Menge der generierten Varianten vorgenommen. Wenn eine als ausreichend eingeschätzte Anzahl mit zufriedenstellender Qualität (d. h. eine Umsetzung erscheint plausibel) erreicht ist, wird der iterative Prozess beendet, ansonsten werden weitere Lösungsprinzipien und Varianten erarbeitet. Der Fall, dass keine Lösungsvarianten generiert werden konnten, ist in 7.3.9 beschrieben.

### 7.3.6 Umsetzungsanforderungen als parallele Dokumentation

Begleitend erfolgt die Dokumentation von weichen Kriterien und Eigenschaften, welche im Rahmen der Lösungsfindung auftauchen und vor- bzw. nachteilig für Varianten sind, aber kein KO-Kriterium darstellen. Die parallel erarbeiteten Daten erleichtern und ergänzen eine spätere Bewertung mehrerer Varianten.

### 7.3.7 Iterationszyklus Vorbereitung der Bewertung

#### Bewertungskriterien

Anhand der theoretischen Überlegungen und auf Basis von allgemeinen (galvanotechnischen) Anforderungen können Bewertungskriterien und –kategorien aufgestellt werden. Erarbeitete allgemeine Kriterien für den im Rahmen dieser Arbeit relevanten Anwendungsfall sind in Tabelle 7.2 aufgelistet. Die Kategorien sollten mindestens die Punkte Verfahrenstechnik, Bauteilhandling, Umsetzungsaspekte und Qualität umfassen und sind für den jeweiligen Praxisfall zur prüfen und zu vervollständigen.

Tabelle 7.2: Erarbeitete beispielhafte Kategorien und Kriterien zur Bewertung

<b>Verfahrenstechnik</b>	Sensibilität auf Temperaturschwankungen
	Kristallisationsneigung Elektrolyt

	Partikel / Dispersionsabscheidung
	Abscheidungsunterbrechung / Entnahme des Bauteils möglich
<b>Umsetzungsaspekte</b>	Eignung der benötigten Bauteilbereiche zur Kontaktierung / Halterung
	Verschleppung bei jeweiliger Orientierung
	Mitbeschichtung von Kontaktelementen
	Umsetzungsaufwand (z. B. Variantenanzahl / Anpassungen für Bauteilspektrum, Komplexität der Konstruktion)
<b>Bauteilhandling</b>	Manuelle oder automatisierte Eingriffe während Abscheidung
	Eignung des Ansatzes für gesamtes Bauteilspektrum
	Be- und Entstücken von Vorrichtung / Gestell
<b>Qualität</b>	Erforderliche Abscheidebedingungen (z. B. Hydrodynamik, Temperaturkonstanz) erreichbar
	Toleranzen (Schichtverteilung und beschichtetes Bauteil) erreichbar
	Belastung der Schicht an Kontaktpunkten

Sofern einzelne Aspekte bereits zuvor als KO-Kriterium definiert wurden, ist eine weitere Betrachtung logischerweise nicht nötig. Bei der Betrachtung der Varianten ist im nachfolgenden Schritt ggfs. eine Aufteilung der Einzelpunkte in möglichst genau formulierte Kriterien sinnvoll, beispielsweise die Bereiche für Angriffspunkte oder die Erreichbarkeit unterschiedlicher Toleranzanforderungen. Aus den Kriterien, den parallel dokumentierten Eigenheiten und Auffälligkeiten und den Anforderungen der Varianten werden die endgültigen Bewertungsmaßstäbe erstellt. Diese werden möglichst eindeutig formuliert, um einen individuellen Interpretationsspielraum bei der Bewertung zu minimieren.

Sofern einzelne Aspekte einen größeren Einfluss für die Zielerreichung aufweisen, können die Kriterien zusätzlich gewichtet werden. Dies ist je nach gewählter Bewertungsmethode sowieso erforderlich.

### Eignung der Varianten für Bauteilgeometrie

Analog zu den Ausschlusskriterien wird ein zweiter Eliminationsschritt durchgeführt, welcher sich detaillierter mit Bauteileigenschaften und Variantenumsetzung befasst. Hierfür werden alle Bauteile des beabsichtigten Spektrums gesichtet und bezüglich der notwendigen Aufnahme- und Kontaktbereiche der Varianten geprüft. In diesem Kontext werden

besonders sensible Bauteilbereiche identifiziert, welche für die Nutzung zur Kontaktierung und Halterung nicht erlaubt sind. Tritt bei dieser Sichtung eine große Variation mit stark unterschiedlichen Eignungen für verschiedene Varianten auf, dann ist eine Clusterbildung der Bauteile zu prüfen. Hierbei kann die Weiterverfolgung von mehreren Entwicklungslinien für die einzelnen Cluster sinnvoll sein.

Sind die Anforderungen der Variante mit den vorliegenden Bauteilen bzw. dem Bauteilcluster nicht vereinbar, wird diese gestrichen. Einschränkungen und Anforderungen für die Umsetzung bzw. Auffälligkeiten zur Eignung werden in der parallel geführten Dokumentation festgehalten.

### Aufarbeitung der Varianten

Für eine sinnvolle Bewertung der Varianten müssen diese soweit aufgearbeitet (z. B. schematische Zeichnungen zur Funktions- / Wirkweise) werden, dass wichtige bzw. insbesondere kritische Punkte für eine Umsetzung erkannt werden können. Bereits zuvor eliminierte Varianten werden nicht weiterbearbeitet, die Gründe für den Ausschluss jedoch dokumentiert.

### Bewertung der Kriterien und des Informationsstands

Am Ende des Iterationszyklus steht eine Einschätzung der erarbeiteten Kriterien und insgesamt des Informationsstands. Hierbei wird geprüft, ob die Kriterien eindeutig und vollständig sind, die notwendigen Informationen für eine Bewertung der Varianten vorliegen oder weitere Arbeiten notwendig sind. Hier wie auch bei der Aufstellung der Kriterien ist die Abstimmung mit anderen Segmenten notwendig, um ggfs. Wechselwirkungen korrekt zu beurteilen. Erst wenn diese Bewertung positiv ausfällt, wird die Iterationsschleife beendet und die Variantenbewertung begonnen.

#### 7.3.8 Variantenbewertung

Bewertungsmethoden sind in der Literatur (z. B. im Dubbel (Grote et al. 2014, S. F8), bei Lindemann (Lindemann 2009, S. 175ff) dem Pahl/Beitz (Feldhusen et al. 2013, S. 380ff))

hinreichend dargestellt, daher werden sie hier nicht weiter ausgeführt. Eine Einschränkung auf eine bestimmte Bewertungsmethode erscheint nicht sinnvoll, je nach Anzahl und Ausprägung der Varianten kann einzelfallabhängig gewählt werden. Für die detailliertere Berücksichtigung der Schichtdickenverteilung für einzelne Ansätze kann auch eine mehrstufige Bewertung erfolgen, bei der die Variantenanzahl im ersten Schritt stark verringert wird und diese dann genauer bezüglich der möglichen Schichtdickenverteilung analysiert werden (siehe 7.4). Diese Erkenntnisse können dann in die endgültige Auswahl mit einbezogen werden.

### 7.3.9 Sonderfall: Zielerreichung für keine Variante plausibel

Die Zielsetzungen und Anforderungen können stark variieren, so dass bei manchen Aufgaben alle Varianten eliminiert werden könnten.

#### a) Iterationsschleife Lösungsgenerierung

Tritt dieser Fall ein, wird zuerst eine Iterationsschleife mit einer erneuten Lösungs- / Variantengenerierung durchgeführt. Voraussetzung ist hierbei, dass weitere, über die bisher betrachteten Varianten hinausgehende Ansätze überhaupt denkbar sind.

#### b) Überprüfung der Anforderungen, Zielsetzungen und Randbedingungen

Falls alle gefundenen Varianten geprüft und eliminiert wurden, sind kritische Prüfungen der Zielsetzungen und Randbedingungen sinnvoll. Insbesondere bei der Eliminierung von Varianten aus wirtschaftlichen oder umgebungsabhängigen Gründen (z. B. eine geforderte Mehrfachbeschichtung oder geometrische Restriktionen) sollten die Anforderungen hinterfragt werden.

#### c) Abbruch als letzte Konsequenz

Das Worst-Case-Szenario besteht aus dem Abbruch der Entwicklung. Vor einem Abbruch ist sicherzustellen, dass alle Ansätze geprüft und hinterfragt wurden.

---

### 7.3.10 Variantenauswahl und Iterationszyklus Erstellung Konzept / Vorentwurf

Am Ende der Variantenbewertung steht die Auswahl einer Lösung für die weitere Umsetzung. Sobald diese gewählt ist, beginnt die konstruktive Umsetzung. Erste Aufgabe dabei ist eine grobe Konzeptkonstruktion, welche auf Basis der schematischen Aufarbeitung für die Vorbereitung der Bewertung umgesetzt werden kann. Eine schnelle Modellierung eines ersten Grobkonzepts erlaubt die Weitergabe erster Daten an die Segmente zur Maßhaltigkeit und Anlagenentwicklung. Dieser Grobentwurf wird in iterativen Schleifen immer weiter detailliert, wobei bei jeder Schleife die Erkenntnisse aus den anderen Segmenten einfließen und die Fortschritte der Konstruktion kontinuierlich den anderen Entwicklungsbereichen zur Verfügung stehen sollten. Ist die Zielerreichung ausreichend gesichert und der Entwurf soweit detailliert, dass die Kernfunktionen (im Rahmen der Arbeit die Halterung bei gleichzeitiger nicht statischer Kontaktierung) erfüllt werden, kann in die Gesamtsystementwicklung übergegangen werden.

## 7.4 Detailmethodik zur Optimierung der Maßhaltigkeit der Beschichtung

Neben der Kontaktstellenproblematik stellt die Maßhaltigkeit des Bauteils nach der Beschichtung den zweiten großen Entwicklungsaspekt dar. Analog zum Vorgehen bei der Vorrichtungsentwicklung wird auch hier eine individuelle Methodik erstellt, welche eine nachvollziehbare Entwicklung ermöglicht.

### 7.4.1 Aufbau der Methodik zur Optimierung der Schichtdickenverteilung in Entwicklungssegment 2

Bei der reinen Simulation der primären Stromdichteverteilung werden die elektrochemischen Abläufe nicht berücksichtigt, weshalb sich, je nach Streufähigkeit eines Elektrolyten, Abweichungen zwischen primärer Stromdichteverteilung und Schichtdickenverteilung



einstellen können. Eine Optimierung kann zwar immer über die primäre Stromdichteverteilung erfolgen, durch den Einfluss der Elektrolytstreuungsfähigkeit ist jedoch die Prognose einer bestimmten Schichtdickenverteilung auf dieser Art nur eingeschränkt möglich (siehe dazu die beschriebenen Zusammenhänge in Abschnitt 3.2). Die Simulation aller elektrochemischen und hydrodynamischen Einflüsse (sekundäre und tertiäre Stromdichteverteilung) ist sehr aufwändig (siehe (Paatsch 2010, S. 113)) und im Planungsprozess einer Anlage auf Grund der fehlenden Daten auch meist nicht ohne weiteres möglich. Zur Absicherung einer Beschichtungs- und Anlagenplanung ist somit eine Möglichkeit zur Schichtdickenprognose wünschenswert, welche einfach nutzbar ist und ausreichend genaue Daten liefert.

Wie in Kapitel 3.2.4 erwähnt, wurde im Rahmen von Forschungsprojekten die Erarbeitung von Kennlinien für die gesamte Schichtabscheidung untersucht. Die dort vorgestellten Ansätze sind in der Praxis jedoch noch nicht verfügbar und können somit auch für diese Arbeit nicht genutzt werden. Eine leichter durchführbare Methode ist daher ein erstrebenswertes Ziel im Rahmen dieser Arbeit.

Es wird ein deutlich vereinfachter Ansatz generiert, welcher mit einfachen praxistauglichen Mitteln eine Korrekturfaktorfunktion ergibt und sich rein auf die Schichtdickenverteilung konzentriert. Über die Durchführung experimenteller Versuche mittels des in 3.2.2 vorgestellten Beschichtungsstands und des zugehörigen Profilkörpers werden die Zusammenhänge zwischen Schichtdicke und primärer Stromdichte analysiert. Aus diesen Daten werden die Korrekturfaktorfunktionen und damit die Kennlinien bezüglich der Schichtdickenverteilung ermittelt. Die übrigen Schichteigenschaften werden nicht betrachtet. Durch die Verrechnung der Korrekturfaktorfunktion mit der simulierten primären Stromdichteverteilung wird eine neue Verlaufslinie generiert, welche eine verbesserte Einschätzung der zu erwartenden Schichtdickenverteilung ermöglicht.

Die erstellte Methodik in Abbildung 7.4 zeigt den zweigliedrigen Ansatz mit Berechnung und experimenteller Untersuchung. Im links dargestellten Zweig wird vor der eigentlichen Optimierung ein Simulationsmodell mit den verfügbaren Geometriedaten aufgebaut und eine bauteilspezifische Auswertung definiert. Die Geometriedaten stammen dabei aus den ersten Konzepten bzw. Entwürfen der anderen Entwicklungssegmente (Vorrichtung,

Anlage) und werden bei Änderungen entsprechend aktualisiert. Bei der Klärung des Simulationsvorgehens werden die relevanten Berechnungsaspekte geplant. Insbesondere bei einer 2D-Simulation müssen die genauen Längs- und Querschnitte definiert und die Abstraktion auf die wesentlichen Modellelemente definiert werden, aber auch im 3D-Bereich werden zur Reduzierung der Knotenanzahl üblicherweise Details vernachlässigt oder vereinfacht, sofern sie nicht für eine Aussage relevant sind (beispielsweise Bohrungen oder Fasen an einzelnen Geometrien).

Beim experimentellen Zweig besteht nach der Klärung der notwendigen Beschichtungsdaten (d. h. verwendete Elektrolyte, Abscheidparameter wie Stromdichte, Temperatur usw.) die Option, auf vorhandene Daten zurückzugreifen, falls nutzbare experimentelle Untersuchungen bereits durchgeführt wurden. Bei der Durchführung neuer Versuche wird die Auswertung in geeigneter Weise zur Bildung der Kennlinien durchgeführt, dies wird in den nachfolgenden Abschnitten 7.4.2 und 7.4.3 eingehender beschrieben.

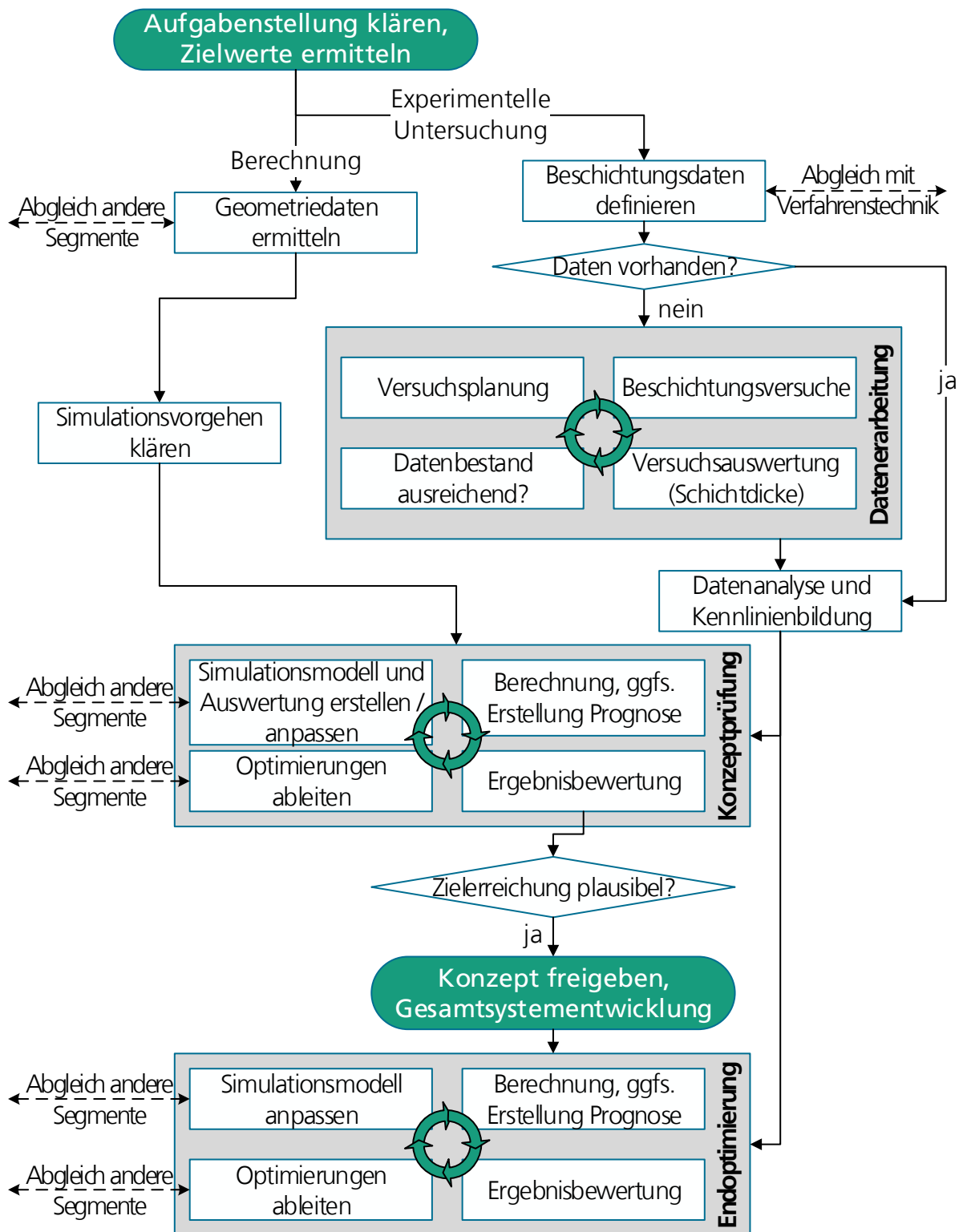


Abbildung 7.4: Entwickelte Methodik zur Schichtdickenprognose und Optimierung der Schichtdickenverteilung (Entwicklungssegment 2)

---

Anschließend werden die Vorarbeiten zur weiteren Bearbeitung kombiniert. Das eigentliche Simulationsmodell wird aufgebaut und die Auswertung definiert. Eine möglichst durchdachte und aussagekräftige Definition der auszuwertenden Daten (Punktwerte, Verläufe, Mittelwerte etc.) erlaubt eine während der gesamten Entwicklungszeit vergleichbare Analyse der Daten, die Bauteilbereiche mit besonderen Toleranzanforderungen sind vorrangig zu behandeln. Es werden möglichst aussagekräftige Werte aus den Rechnungen extrahiert, welche eine qualitative und quantitative Bewertung bei der Gegenüberstellung von Berechnungen erlauben. In den Iterationsschleifen sollte die Auswertung zwar geprüft werden, da eine Veränderung aber ggfs. die Vergleichbarkeit zwischen einzelnen Rechnungen erschwert, sollte eine Anpassung der Auswertungsdefinition möglichst selten vorgenommen werden.

In einem iterativen Zyklus wird mittels der experimentell ermittelten Kennlinien und der errechneten primären Stromdichteverteilung eine Schichtdickenprognose erstellt. Diese Vorhersage kann bewertet und mit der geforderten Zielsetzung verglichen werden. Ist eine Zielerreichung anhand der Daten nicht plausibel, müssen die Beschichtungsverhältnisse verändert werden. Da bei einer Modifikation der Verfahrenstechnik ggfs. die Schichteigenschaften ebenfalls verändert werden, ist die Optimierung des Verfahrensraums, d. h. der geometrischen Verhältnisse notwendig. Mittels der in 7.4.4 dargestellten Einflussmöglichkeiten wird die primäre Stromdichte bis zur plausiblen Zielerreichung der prognostizierten Schichtdickenverteilung optimiert. Hierbei sind gegenseitige Einflüsse der mechanischen Konstruktion und der notwendigen Komponenten zur Stromdichtemanipulation zu berücksichtigen, da alle physischen Teile auch Bestandteil der Vorrichtungstechnik / Bauteilaufnahme oder des Beschichtungsbad sind.

Diese Optimierungszyklen sind in zwei Stufen aufgeteilt. In der ersten Stufe wird das Konzept grob geprüft und bei einer plausiblen Zielerreichung für die konstruktive Detaillierung freigegeben. Sollen aus konstruktiver Sicht mehrere Lösungsansätze erfolgversprechend sein, können hier auch mehrere Konzeptrechnungen bzw. Voroptimierungen erfolgen. Diese Berechnungsergebnisse können dann für die finale Auswahl in die Bewertung der Lösungsansätze mit einfließen. In der zweiten Stufe wird im Rahmen der Gesamtsystementwicklung die Endoptimierung vor der praktischen Umsetzung durchgeführt.

Über den speziellen Anwendungsfall dieser Arbeit hinaus wird bei einem wechselnden Bauteilspektrum (z. B. einer Gestellanlage mit stark unterschiedlichen Teilegeometrien) für die Optimierungszyklen in der Konzeptphase eine Aufteilung in eine Warenfensteroptimierung (ohne Berücksichtigung der einzelnen Teile, sondern nur der Abmessungen des Warenfensters und dessen Verhältnisse zu Behälter, Füllstand und Anoden) und eine darauffolgende Gestelloptimierung vorgeschlagen. Auf diese Weise kann die Anzahl der veränderbaren Parameter besser beherrscht werden und die Grundzusammenhänge und Ursachen für auftretende Effekte werden leichter erkennbar. Dies erlaubt auch die Planung einer Anlage bei unklarem bzw. unvollständig bekanntem Bauteilspektrum: In der Konzeptprüfung kann das Warenfenster optimiert werden und in der Endoptimierung die spezifisch vorliegenden Bauteile auf dem Gestell (oder ggfs. nach ABC-Analyse auch nur die relevantesten Teile des Bauteilspektrums). Später neu dazu kommende Bauteile können dann innerhalb des festgelegten Warenfensters nachträglich auch bei bestehender Anlage ausgelegt werden.

#### 7.4.2 Iterationszyklus Datenerarbeitung

##### Vorbemerkung: Simulation am Beispiel von Elsy (2D)

Zum besseren Verständnis der in der Arbeit dargestellten Rechnungen wird nachfolgend eine stark zusammengefasste Beschreibung der Hauptaspekte der genutzten Software gegeben.

Das von Elsy genutzte Potenzialmodell stellt eine Vereinfachung dar, bei der Konzentrationsgradienten im Elektrolyt vernachlässigt werden. Die Stromdichte ergibt sich daraus in Übereinstimmung mit dem Ohm'schen Gesetz. Es können als zusätzliche Randbedingungen für die Elektrodenreaktionen z. B. eine Butler-Volmer-Gleichung vorgegeben werden. (Elsyca NV 2006, S. 15–20)

Die Modellerstellung erfolgt in Elsy über die Vorgabe von Punkten anhand von Koordinaten in einem 2D-Koordinatensystem. Die Koordinaten werden entweder als Absolutwerte vorgegeben oder über Parameter und Gleichungen berechnet. Für rotationssymmetrische

Geometrien wird die y-Achse als Rotationsachse angenommen, für alle anderen Ausgangssituationen wird das Modell als Querschnitt mit einer vorzugebenden Zelltiefe berechnet. Über die Punkte werden Linien definiert, welche die Geometrie des Modells darstellen und den Simulationsraum begrenzen. Für jede Linie kann die Anzahl der Elemente und deren Verteilung vorgegeben werden, aus denen das Netz generiert wird. Außerdem wird jeder Linie deren Typ (Elektrode, Isolator etc.) zugewiesen, anhand diesem werden spätere Vorgaben von Randbedingungen (Stromstärke, Potenzial) ermöglicht. (Elsyca NV 2006)

Für die Elektroden kann als Randbedingung ein Stromwert oder ein Spannungswert vorgegeben werden. Bei der Berechnung der primären Stromdichteverteilung kann der Vorgabewert fast beliebig gewählt werden, da dies nur Auswirkungen auf die Absolutwerte der primären Stromdichteverteilung erzeugt, die relativen Verhältnisse jedoch gleich bleiben. Es ist daher für eine einfachere Bewertung die Vorgabe eines Werts sinnvoll, welcher eine Prozentuale Auswertung erlaubt (z. B. Sollstromdichte auf den Bauteilflächen von durchschnittlich  $1 \text{ A/dm}^2$  oder  $100 \text{ A/dm}^2$ ). Bei der Berücksichtigung der elektrochemischen Einflüsse über die Butler-Volmer-Gleichung (sekundäre Verteilung) ist der Absolutwert durchaus relevant, hier müssen die realen Werte des betrachteten Elektrolyten vorgegeben werden (sowohl für die Gleichung als auch für die Randbedingungen Spannung / Stromdichte), um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten. Die Berechnungsergebnisse können für die einzelnen Elektroden als Darstellung der Stromdichte über die abgewinkelte Länge einer Elektrode oder im Modell durch verschiedene Visualisierungsmöglichkeiten dargestellt werden. Eine genauere Analyse und die Interpretation müssen ggfs. durch den Benutzer in weiteren Arbeitsschritten durchgeführt werden.

### Datenerarbeitung

Wie in 3.2.2 beschrieben, ist der Profilkörper ein Bauteil mit rechteckigem Querschnitt ( $37,5 \text{ mm} \times 10,25 \text{ mm}$ ), welches auf einer Seite symmetrisch zur Mitte über die gesamte Höhe ( $80 \text{ mm}$ ) von vier Nuten durchzogen ist. Die Nuten sind dabei unterschiedlich breit und tief, an verschiedenen Punkten stellen sich somit unterschiedliche Stromdichten für die Beschichtung ein. Die Position der Messpunkte und die zugehörige simulierte primäre Stromdichteverteilung sind in Abbildung 7.5 dargestellt.

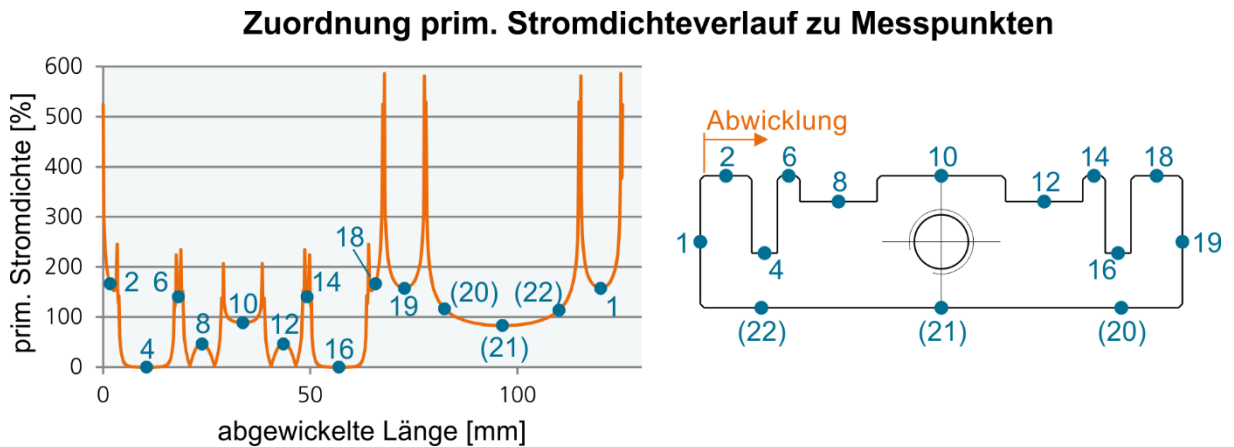


Abbildung 7.5: Zusammenhang zwischen Messpunkten des Profilkörpers zur primären Stromdichte. Messpunkte 20-22 sind optional und werden standardmäßig nicht ausgewertet.

In der Standardauswertung werden 11 Punkte gemessen, die Nummerierung der Punkte ergibt sich durch entfallene Zwischenpunkte. Die Punkte 20-21 der Rückseite werden nur in Sonderfällen mit ausgewertet und wurden im vorliegenden Fall nicht genutzt. Die Versuche werden mit einstellbarer Drehzahl durchgeführt, die Rotation erfolgt dabei immer in gleicher Richtung.

Die primäre Stromdichte der dargestellten Punkte 1-19 beträgt im Mittelwert nahezu exakt 100 %, die an diesen Punkten gemessene Schichtdicke stimmt damit in etwa mit der mittleren Schichtdicke des Bauteils überein. Der Wertebereich liegt zwischen fast 0 % in der tiefsten Nut und 166 % an den äußeren Stegen. Eine Übersicht ist in Tabelle 7.3 gelistet.

Tabelle 7.3: Stromdichtewerte der Simulationsrechnung für die Profilkörpermesspunkte

Messpunkte	4&16	8&12	10	6&14	1&19	2&18	Ø
prim. Stromdichte [%]	0,1	45,9	88,5	140,2	157,2	166,4	100,7

Für die reine Auswertung der Schichtdicke besteht auch die Möglichkeit einer zerstörungsfreien Messung der oberen Punkte 2, 8, 10, 12 und 18, beispielsweise über Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA). Hauptvoraussetzung hierfür ist eine geeignete maximale Schichtdicke, welche material- und geräteabhängig ist. Diese fünf Punkte weisen einen primären

Stromdichtemittelwert von 102,6 % auf und können damit näherungsweise ebenfalls zur Bestimmung der mittleren Schichtstärke zusammengefasst werden.

Die nachfolgend angeführten Ergebnisse auf Profilkörpern erfolgten während der parallel laufenden Verfahrensentwicklung mit dem Beschichtungsstand und wurden über Querschliffe metallografisch ausgewertet. Es wurden die Werte des später in der Anlage eingesetzten Elektrolyten genutzt. Die Profilkörper inkl. der Positionierung der Messpunkte wurden nicht während dieser Arbeit erstellt, sondern sind am Fraunhofer IPA in früheren Entwicklungen entstanden. Die nachfolgend beschriebenen Analysen zur Korrekturfaktorermittlung und die entsprechende Anwendung entstanden im Rahmen dieser Arbeit.

Die Schichtdicke der einzelnen Messpunkte wurde jeweils in einen prozentual normierten Wert umgerechnet, dieser ist auf die mittlere Schichtdicke bezogen. Dies erlaubt auch einen Vergleich mit deutlich unterschiedlichen Beschichtungsdauern bzw. Schichtstärken (Tabelle 7.4). Die Ergebnisse von Versuchen mit identischen Stromdichten wurden zu Mittelwerten zusammengefasst.

Tabelle 7.4: Normierte Schichtdickenwerte bei verschiedenen Nennstromdichten für den in Entwicklung befindlichen NiW-Elektrolyten (Werte in Prozent)

Messpunkt	1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	19
Ø0,5 A/dm <sup>2</sup> normiert	155,9	134,7	35,7	103,0	82,8	94,6	83,9	100,9	35,6	117,1	155,9
Ø1 A/dm <sup>2</sup> normiert	162,6	142,8	28,0	106,7	78,0	90,1	79,8	105,1	28,8	120,2	157,8
Ø2 A/dm <sup>2</sup> normiert	161,4	146,2	23,6	106,6	72,4	92,2	73,3	107,5	23,2	129,5	164,0
Ø6 A/dm <sup>2</sup> normiert	172,3	155,1	13,5	111,9	66,2	86,8	69,7	113,9	15,1	112,9	170,2

Bereits in der normierten Auswertung werden Tendenzen sichtbar, anhand der vorliegenden Daten kann mit zunehmender durchschnittlicher Stromdichte eine schlechtere Streufähigkeit erkannt werden. Dies wird insbesondere an den Messpunkten der tiefsten Nut (Punkte 4 und 16) mit den stark abnehmenden relativen Schichtstärken deutlich. Ebenso wird an den äußeren Stegen (Punkte 2 und 18) eine starke Asymmetrie sichtbar.



Dies ist durch die unterschiedliche Hydrodynamik der eindrehenden und ausdrehenden Seiten bei der Rotation des Profilkörpers zu erklären.

Die Datenerarbeitung ist im Rahmen der Methodik als Iterationszyklus angelegt, da sie erst abgeschlossen ist, wenn ausreichende Datenmengen in der benötigten Qualität vorliegen. Bei der Auswertung ist nach guter wissenschaftlicher Praxis vorzugehen und die Belastbarkeit der Daten sicherzustellen. Dies bedeutet wiederum, dass bei einem nicht eindeutigen Bild im Rahmen der Datenauswertung weitere Wiederholungsversuche vorzusehen sind, bis zufällige Einflüsse ausgeschlossen werden können.

### 7.4.3 Bestimmung Korrekturfaktorfunktionen

Eine Verknüpfung der experimentellen Daten und der Simulationsrechnung stellt die Grundlage für die Ermittlung eines Korrekturfaktors bzw. einer Korrekturfaktorfunktion dar. Durch die Symmetrie des Profilkörpers sind mit Ausnahme des mittleren Messpunkts 10 jeweils zwei Messpunkt mit gleicher primärer Stromdichte vorhanden, welche durch die Rotation unterschiedliche hydrodynamische Verhältnisse aufweisen. Die Elektrolytströmung ist in den seltensten Fällen bereits während der Entwurfsphase bekannt, sie wird nicht näher betrachtet und die Messwerte der zusammengehörigen Punkte werden zu einem Mittelwert zusammengefasst. Es verbleiben daher die in Tabelle 7.3 beschriebenen sechs Stromdichtewerte zur Weiterverarbeitung. Für ein besseres Verständnis und einer Vermeidung von doppelten Ausführungen werden in diesem Abschnitt direkt die Daten des Fallbeispiels verwendet.

Zur Beurteilung der voraussichtlichen Schichtverteilung anhand der primären Stromdichte ist deren Verhältnis relevant. Die Relation von Schichtdicke ( $S$ ) zu primärer Stromdichte ( $J$ ) ist dabei abhängig von der Streufähigkeit des Elektrolyten und der realen Arbeitsstromdichte, für eine Prognoselinie wird es als Korrekturfaktor  $k$  als Funktion der lokalen Stromdichte  $j$  angenommen:

$$\frac{S}{j} = k = f(j)$$

Gleichung 3

Mittels dieses Korrekturfaktors wird der Verlauf der primären Stromdichte modifiziert und dient der Prognose für den potenziellen Schichtdickenverlauf unter Berücksichtigung der im Versuch ermittelten Effekte.

### Datenaufbereitung

Für eine Abdeckung des gesamten prozentualen Stromdichtespektrums wurden aus den sechs zur Verfügung stehenden Stromdichtewerten die Korrekturfaktorgleichungen extrapoliert. Für diese Umsetzung wurden zuerst die Faktoren für den NiW-Elektrolyten an den einzelnen Messpunkten bestimmt und nach der zugeordneten primären Stromdichte sortiert (siehe Tabelle 7.5).

Tabelle 7.5: Zuordnung der normierten Schichtdickenwerten zum prim. Stromdichtewert

Messpunkte	4&16	8&12	10	6&14	1&19	2&18
prim. Stromdichte [%]	0,1	45,9	88,5	140,2	157,2	166,4
Schichtdicke $\varnothing 0,5$ A/dm <sup>2</sup> normiert [%]	35,6	83,3	94,6	101,9	155,9	125,9
Schichtdicke $\varnothing 1$ A/dm <sup>2</sup> normiert [%]	28,4	78,9	90,1	105,9	160,2	131,5
Schichtdicke $\varnothing 2$ A/dm <sup>2</sup> normiert [%]	23,4	72,8	92,2	107,0	162,7	137,8
Schichtdicke $\varnothing 6$ A/dm <sup>2</sup> normiert [%]	14,3	68,0	86,8	112,9	171,2	134,0

Da die Messpunkte der tiefen Nut mit einer primären Stromdichte von nahezu 0 % einen extrem hohen Faktor generieren würden, wurde für die Berechnung zur Vermeidung von 0 % als Divisor an diesen Punkten auf einen Wert von 0,1 % aufgerundet.

Tabelle 7.6: Korrekturfaktoren der einzelnen Messpunktwerte

Messpunkte	4&16	8&12	10	6&14	1&19	2&18
prim. Stromdichte [%]	0,1	45,9	88,5	140,2	157,2	166,4
Schichtdicke $\varnothing 0,5$ A/dm <sup>2</sup> normiert [%]	356,4	1,816	1,068	0,727	0,992	0,756
Schichtdicke $\varnothing 1$ A/dm <sup>2</sup> normiert [%]	284,2	1,72	1,018	0,756	1,019	0,79
Schichtdicke $\varnothing 2$ A/dm <sup>2</sup> normiert [%]	234,4	1,588	1,041	0,764	1,035	0,828
Schichtdicke $\varnothing 6$ A/dm <sup>2</sup> normiert [%]	143,1	1,481	0,981	0,806	1,089	0,805

Wie anhand der Werte und aus Tabelle 7.6 ersichtlich ist, verlaufen die Messwerte an den Stellen mit hoher Stromdichte unregelmäßig. Dies ist durch die stark unterschiedlichen

Strömungsbedingungen zu erklären und spiegelt damit auch die Realität an Kantenbereichen wider. Für die weitere Verarbeitung besteht dabei die Möglichkeit, die Punkte auch als Mittelwert zu betrachten – eine Extrapolation einer Gleichung wird sich diesem Mittelwert aber im Normalfall selbst annähern.

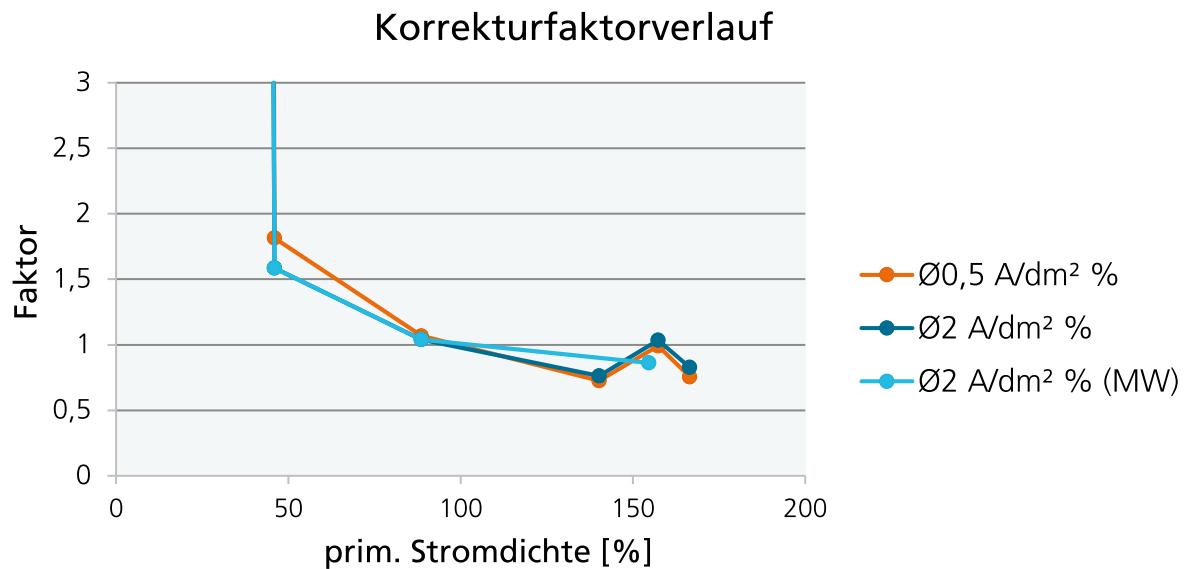


Abbildung 7.6: Grafische Darstellung des Korrekturfaktorverlaufs für 0,5 A/dm<sup>2</sup> und 2 A/dm<sup>2</sup>

Neben der Verwertung aller sechs Stromdichtewerte ist auch eine Alternative mit einer reduzierten Punktzahl möglich, welche nur die zerstörungsfrei auswertbaren Punkte 2, 8, 10, 12 und 18 beinhaltet. Nachfolgend werden beide Varianten ausgewertet und gegenübergestellt.

### Funktionsextrapolation

Aus den vorhandenen Daten können über Regression verschiedene Gleichungen abgeleitet werden. Die Art der Gleichung wird im Verfahren vorgegeben. Anhand des in Abbildung 7.6 dargestellten Verlaufs kann eine lineare Gleichung im Fall des vorliegenden Beispiels ausgeschlossen werden, auch ein Polynom wird verworfen, da dieses mit steigender Stromdichte zwangsweise gegen +/- unendlich tendiert und damit nicht den realen Verlauf abbildet. Anhand der Messwerte der Versuche mit einer Stromdichte von 2 A/dm<sup>2</sup> wird die genutzte Vorgehensweise beschrieben.

In Abbildung 7.7 sind in einem Diagramm die erarbeiteten Verläufe verschiedener Funktionen eingezeichnet, anhand des Bestimmtheitsmaßes und des Verlaufs kann eine Exponentialfunktion als unpassend eingestuft werden. Eine logarithmische Funktion wird zwar mit hohem Bestimmtheitsmaß berechnet, anhand des Verlaufs im hauptsächlich relevanten Bereich zwischen 50 % und 200 % ist jedoch auch dieser Typ auszuschließen. Der Grund für den extremen Verlauf liegt dabei allein im 0 %-Faktor, sofern dieser Wert nicht berücksichtigt wird ist die Übereinstimmung deutlich passender.

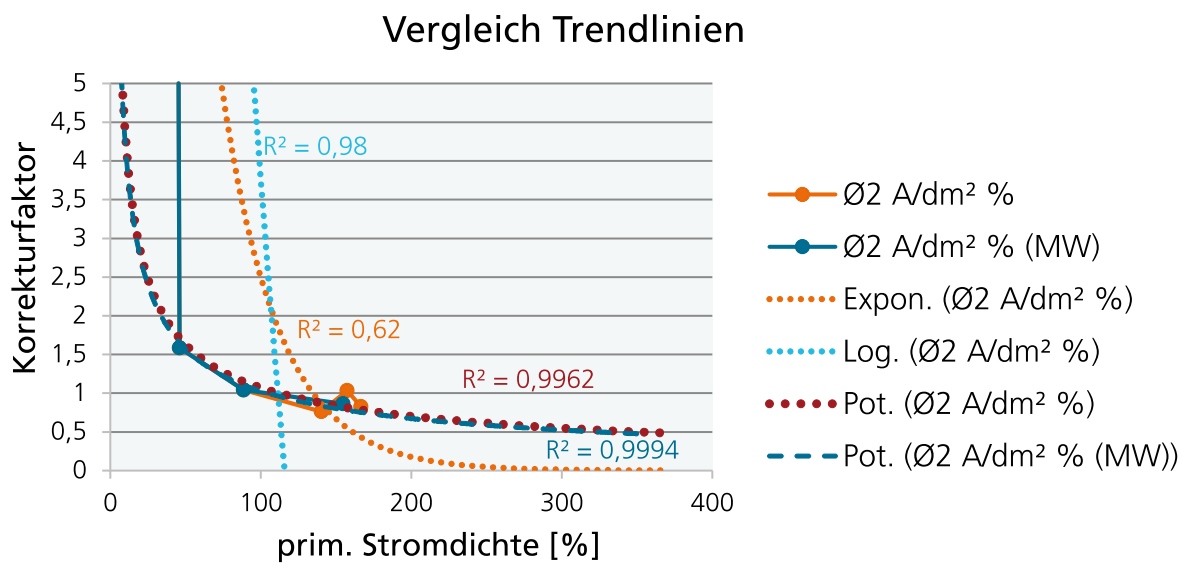


Abbildung 7.7: Vergleich verschiedener Trendlinien für 2 A/dm<sup>2</sup>-Messwerte

Eine Potenzfunktion lässt sich sowohl mit einem hohen Bestimmtheitsmaß als auch mit einem optisch stark übereinstimmenden Verlauf an die Daten anpassen. Dabei ist es nahezu irrelevant, ob die Werte mit hoher Stromdichte zu einem Mittelwert zusammengefasst werden, oder ob sie als Einzelwerte betrachtet sind. Die Korrekturfaktorfunktionen ergeben sich in dem vorliegenden Beispiel zu

$$f(j) = 17,3131 j^{-0,6045} \quad \text{Gleichung 4}$$

Bei Nutzung des Mittelwerts wird folgende Gleichung ermittelt:

$$f(j) = 17,0615 j^{-0,6101} \quad \text{Gleichung 5}$$

Bei der alternativen Auswertung unter alleiniger Berücksichtigung der Punkte 2, 8, 10, 12 und 18 verändern sich die Koeffizienten, die Gleichung dieser 5-Punkt-Auswertung ergibt sich für die 2 A/dm<sup>2</sup>-Daten für die Potenzfunktion zu

$$f(j) = 10,6812 j^{-0,5059} \quad \text{Gleichung 6}$$

Mit Gleichung 4 bis Gleichung 6 kann anhand eines primären Stromdichteverlaufs eine Prognose für den Schichtdickenverlauf erstellt werden. Die Nennstromdichte darf nicht unterschlagen werden, da sie einen bedeutenden Unterschied in der Streufähigkeit eines Elektrolyten bewirken kann. Die experimentellen Versuche müssen repräsentativ sein – ggfs. sind mehrere Korrekturfaktorfunktionen zu erstellen und zu betrachten. Dies wird im späteren Kapitel 8.1.2 näher beschrieben. Die Validierung der Vorgehensweise und der Prognoselinien erfolgt anhand der Auswertung der Beschichtungsversuche in Kapitel 8.3.

#### 7.4.4 Möglichkeiten zur Manipulation der primären Stromdichteverteilung

Die bekannten Ansätze sind in 3.2.3 dargestellt. Die unterschiedlichen Möglichkeiten unterscheiden sich bezüglich der Handhabung, Flexibilität und Wirkungsweise. Für eine spätere Optimierung der Schichtdickenverteilung ist daher eine genauere Betrachtung der Eigenschaften relevant. Es werden daher im Rahmen dieser Arbeit auf Basis der bekannten Ansätze und eigener Erfahrungen die Vor- und Nachteile analysiert und daraus eine Anwendungshierarchie erstellt.

##### Vor- und Nachteile der Möglichkeiten

Eine Untergliederung lässt sich darüber hinaus zwischen Anpassungen an der Badgeometrie bzw. der Anodengeometrie und bauteil- / chargenspezifischen Anpassungen vornehmen. Veränderungen an Bad- und Anodengeometrie wirken für alle eingebrachten Bauteile, was, abhängig von den relevanten Bauteilen, sowohl Vor- als auch Nachteil sein kann. Bei ähnlichen Bauteilen ist eine Anpassung an die gesamte Typfamilie möglich. Positive Effekte werden mit einmaliger Modifikation vervielfältigt. Bei stark veränderlichem

Bauteilspektrum kann sich die Modifikation bei einem Bauteil / Gestell positiv und beim nächsten negativ auswirken. Eine allgemeingültige Optimierung ist somit kaum möglich. Veränderungen für einzelne Bauteile erfordern in diesem Fall einen aktiven Eingriff in die Anlagentechnik bei jeder Charge, d. h. es sind automatisierte Lösungen oder aufwändige manuelle Eingriffe nötig. Im Fall von Formanoden wäre ggfs. ein Wechsel für jedes Bauteil notwendig.

Eine ähnliche Wirkungsweise wie die Änderung der Anodenposition wird durch mehrere, separate Anodenkreise und die Verwendung mehrerer Potenziale erzielt. In diesem Fall können einzelne Anoden gezielt angesteuert und das elektrische Feld manipuliert werden.

Bauteil- und chargenbezogene Anpassungen erfordern dagegen eine Modifikation am Bauteil oder dem Gestell, also Teilen, welche bei veränderlichem Bauteilspektrum immer individuell betrachtet werden. Die Optimierung der Bauteilanordnung auf einem Gestell stellt die häufigste Anpassung dar, weil sie keinen zusätzlichen Handhabungsaufwand erfordert.

Durch die oben genannten Veränderungen an Anoden- und Badgeometrie oder der Positionierung der Bauteile kann auf Makroebene im Bad ein möglichst gleichmäßiges Potenzialfeld erzeugt werden. Es werden die Bauteilbereiche bzw. bei Mehrfachbeschichtung alle einzelnen Teile mit einer relativ gleichmäßigen durchschnittlichen Stromdichte beaufschlagt. Die Detailbereiche, wie beispielsweise Ecken, Kanten und Bohrungen, werden nur eingeschränkt beeinflusst. Hier können Blenden, Stromfänger oder auch Mittelleiter genutzt werden. Diese sind jedoch mit einem gewissen Handhabungsaufwand verbunden, da sie montiert / demontiert und gepflegt werden müssen. Bei Stromfängern werden für die Mitbeschichtung zusätzlich Energie und Beschichtungsstoffe (Metall und ggfs. Elektrolytzusätze) benötigt, darüber hinaus wird für die Entschichtung weiterer Aufwand erforderlich.

### Anwendungshierarchie

Eine starre Anwendungsreihenfolge ergibt sich durch die Vielzahl an Kombinationen und Randbedingungen nicht. Auf Basis der zuvor genannten Einschätzungen erscheint folgende Hierarchie bei der Durchführung einer Stromdichteoptimierung sinnvoll:

1. Anpassung der Bad- und Anodengeometrie an das Bauteilspektrum: Bei geringen Unterschieden an den Bauteilen kann eine hohe Individualisierung erfolgen und ein größerer Effekt erzielt werden. Im Fall von geeigneten Bauteilen mit hohen Stückzahlen ist auch die Verwendung von Formanoden zu berücksichtigen. Da diese Anpassung nur einmalig umgesetzt werden muss und sich bei passendem Bauteilspektrum positiv auf alle Bauteile / Chargen auswirkt, wurde diese Maßnahme in der Hierarchie an erster Stelle aufgenommen.
2. Bauteilpositionierung: Die optimale Positionierung der Bauteile im Elektrolyten und gegebenenfalls die bestmögliche Aufteilung auf einem Gestell erhöht eine homogene Schichtverteilung ohne Einschränkung bei Handhabung oder Erzeugung eines zusätzlichen Aufwands. Dies erfordert ggfs. eine Anpassung aller Gestelle / Vorrichtungen, wirkt sich jedoch auf den späteren Produktionsbetrieb nicht mit zusätzlichem Aufwand aus und wurde für die Betrachtung somit an zweite Position gesetzt.
3. Verwendung von nichtleitenden Blenden: Eine Auslegung erfolgt für jedes Bauteil bzw. für jede Bauteilfamilie. Die Handhabung erfordert einen zusätzlichen Aufwand (ggfs. für jede Charge, daher in der Priorisierung an dritter Stelle), kann jedoch wie die Vorrichtungen / Gestelle zur Beschichtung erfolgen und erzwingt keinen Geometrieumbau am Bad.
4. Stromfänger: Die Auslegung erfolgt wie bei nichtleitenden Blenden, durch die Mitbeschichtung entsteht jedoch ein höherer Aufwand für Wartung und Pflege. Ein Einsatz von Stromfängern ist daher nur in den Fällen empfehlenswert, bei denen die zuvor genannten Maßnahmen nicht ausreichen.

Einen Sonderfall stellen mehrere Gleichrichterkreise dar. Diese können für die Punkte 1 und 2 beispielsweise die Abdeckung von größeren Geometrieunterschieden bei ähnlichen Bauteilen erlauben und sind dort mit einzubeziehen.

Die Verwendung von verschiebbaren Anoden oder wechselbaren Formanoden ist aus Sicht einer homogenen Stromdichteverteilung hocheffektiv, durch den hohen Aufwand (Investition, Handling etc.) jedoch nicht immer praxistauglich umsetzbar.

---

### 7.4.5 Iterationszyklen zur Optimierung

Die beiden Iterationszyklen zur Optimierung der primären Stromdichteverteilung bzw. der Schichtdickenverteilung sind vom prinzipiellen Aufbau identisch, bei der Endoptimierung kann jedoch bereits auf die Daten des vorhergehenden Zyklus zurückgegriffen werden. Erster Schritt stellt die Erstellung des Berechnungsmodells bzw. im weiteren Verlauf dessen kontinuierliche Anpassung dar. Dieses Modell wird berechnet (ggfs. auch als Parameterstudie), die Ergebnisse ggfs. mit den ermittelten Kennlinien kombiniert und ausgewertet. Die Einberechnung der Kennlinien kann bei der reinen geometrischen Optimierung (Auslegung von Blenden, Anodenanordnung etc.) in einzelnen Schritten auch übersprungen werden, da die Verbesserung der primären Stromdichteverteilung auch ohne diese Daten bewertet werden kann. Für die Einschätzung der Zielerreichung sollten die Kennlinien jedoch mitberücksichtigt werden, da ansonsten die verfahrenstechnischen Effekte nicht mit einbezogen sind und eine Aussage bei den meisten Elektrolytssystemen nur eingeschränkt möglich ist.

Bei der Optimierung des gesamten Verfahrensraums und der Umsetzung der Optimierungen können die unter 7.4.4 beschriebenen Manipulationsmöglichkeiten der primären Stromdichteverteilung genutzt werden. Die dort beschriebene Reihenfolge kann als Leitfaden bei der Prüfung verschiedener Maßnahmen dienen, ist jedoch für jeden Anwendungsfall zu prüfen.



---

## 8 Fallbeispiel

Die im vorherigen Kapitel entwickelten und beschriebenen Methodiken wurden zur Bearbeitung der konkreten Problemstellung genutzt und in diesem Kontext auf die Anwendungseignung geprüft. Die Einteilung der Entwicklungssegmente ist bereits in der Instanziierung der Gesamtmethodik erfolgt (siehe Abschnitt 7), nachfolgend werden vorrangig die beiden Hauptfragestellung zur vollflächigen, kontaktstellenfreien Beschichtung und zur Gewährleistung einer maßhaltigen Schichtabscheidung beschrieben.

Ziel des Fallbeispiels ist die Entwicklung einer Prototypanlage für die in den Abschnitten 1.1 und 1.2 beschriebenen Anforderungen und Randbedingungen. Im Rahmen des Entwicklungsprojekts „Poseidon“ werden galvanische Schichten für den Einsatz auf Wälzlagern in Meerwasserumgebung entwickelt, für eine Prüfung dieser Schichten ist die Applikation auf Wälzlagerringen notwendig. Als Wälzlager zur Prüfung wurde ein Schrägkugellager ausgewählt, welches aus dem gebräuchlichen Lagerwerkstoff 100Cr6 hergestellt wurde. Als Zielschichtdicken im Rahmen des Projekts wurden 25  $\mu\text{m}$  und 50  $\mu\text{m}$  vorgegeben, die zu beschichtenden Lagerringe wurden mit einem entsprechenden Untermaß hergestellt. Die genauen Anforderungen werden im nachfolgenden Kapitel näher beschrieben.

Die Beschichtungen wurden in einem Technikum durchgeführt, die gesamte Anlagen- und Vorrichtungstechnik war dabei für eine prototypische Umsetzung neu zu entwickeln und aufzubauen. Die Vorbehandlung wurde dabei nicht betrachtet, da dies in bereits vorhandenen Handanlagen ohne spezielle Vorrichtungen erfolgen kann. Als Beschichtungsverfahren wurde im Rahmen einer parallelen Arbeit ein Elektrolyt zur Legierungsabscheidung von Nickel-Wolfram entwickelt, die Anlage sollte jedoch auch die Beschichtung mit alternativen Verfahren erlauben und über zwei Beschichtungsstationen verfügen.

## 8.1 Anwendung der Detailmethodiken

### 8.1.1 Detailmethodik für die Ermittlung / Entwicklung eines Konzepts zur kontaktstellenfreien, vollflächige Beschichtung (Fallbeispiel; Entwicklungssegment 1)

Das erste Kernsegment ist die Entwicklung eines Lösungsansatzes zur kontaktstellenfreien Beschichtung von Wälzlagering. Anhand der Modellschritte wurde die Auswahl eines Konzepts vorgenommen, dies ist in den nachfolgenden Abschnitten dargestellt.

#### Anforderungskklärung und Randbedingungen

Ein Großteil der Anforderungen wird durch die Auswahl des Schichtsystems / des Schichtwerkstoffs abgedeckt, es sind jedoch auch anlagen- bzw. anwendungstechnische Randbedingungen relevant. Das vorgesehene Einsatzgebiet wurde in Kapitel 0 bereits beschrieben: Meerwasser als korrosives Umgebungsmedium, ohne jegliche Abdichtungen des nicht korrosionsbeständigen Grundwerkstoffs. Daraus ergibt sich die beschriebene Notwendigkeit einer vollflächigen Schicht ohne Schwachstellen (wie Kontaktstellen usw.), unbeschichteten Bereichen oder Fehlstellen. In der parallel ablaufenden Schichtentwicklung wurden Nickel-Legierungsschichten als vorrangig zu betrachtende Schichten identifiziert. Der vorgegebene Nickel-Wolfram-Prozess benötigt lösliche Anodenmaterialien, Entwicklungen zur Verwendung unlöslicher Anoden sind jedoch denkbar.

Für einen ausreichenden Korrosionsschutz sind Nennschichtdicken von 25  $\mu\text{m}$  oder mehrlagige Schichtsystem mit 50  $\mu\text{m}$  vorgesehen. Die Rohteile sind mit entsprechendem Untermaß gefertigt. Es sollen daher neben der vorrangig gewählten NiW-Schicht auch andere Verfahren verwendet werden können, weshalb sich die Prozessvorgaben nicht auf einen einzelnen Elektrolyten einschränken lassen.

#### *Bauteilbezogene Anforderungen*

Jedes Bauteil weist unterschiedliche Eigenschaften und damit Anforderungen auf. Vorrangig zu nennen sind die Geometrie, die daraus abzuleitenden Endmaßtoleranzen und

der Grundwerkstoff. Auf Basis dieser Daten ist in Kombination mit den anwendungsspezifischen Anforderungen die Anlagengröße, Prozessabfolge und Bauteilaufnahmetechnik zu erarbeiten. Die zulässigen Abmessungen eines beschichteten Lagerrings müssen denen eines unbeschichteten Endprodukts entsprechen. Im Rahmen des Projekts und dieser Arbeit wurde für die späteren Prüfstandversuche der Lagertyp 7218-B-TVP ausgewählt, ein Schrägkugellager (siehe Abbildung 8.1) mit einem Außendurchmesser von  $\varnothing 160$  mm, einem Innendurchmesser von  $\varnothing 90$  mm und einer Breite von 30 mm.

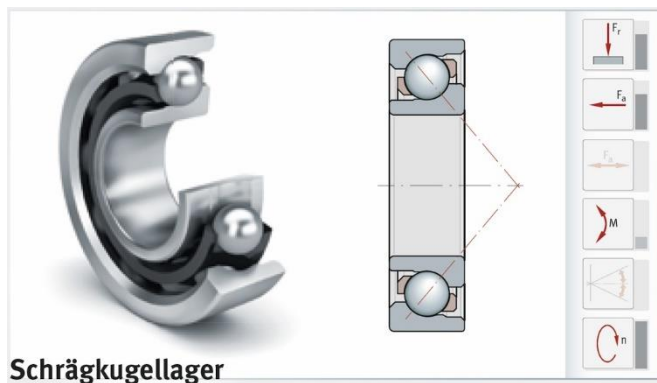


Abbildung 8.1: Beispieldarstellungen eines Schrägkugellagers (Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2016a)

Die Innen- und Außendurchmesser sind als Sitz des Lagers auf der Welle bzw. im Gehäuse mit einer Passung versehen, bei genanntem Lagertyp und Toleranzklasse P0 mit einem Toleranzbereich von  $20 \mu\text{m}$  (Innenring) bzw.  $25 \mu\text{m}$  (Außenring). Die Lagerbreite ist weniger kritisch anzusehen, hier ist eine etwas höhere Abweichung zulässig. Für die Schichtdicke auf der gekrümmten Lauffläche wurde als Zielwert eine Abweichung von max.  $5 \mu\text{m}$  definiert, zusätzlich müssen Lauffläche und die Passungsflächen eine identische Schichtdicke aufweisen. Der Rundlauf muss auch nach der Beschichtung innerhalb enger Grenzen liegen, d. h. es dürfen nur minimalste Schichtdickenunterschiede über den Umfang auftreten. Ebenso ist die Oberflächenqualität zu beachten, insbesondere auf der Lauffläche.

Abgesehen von den definierten Prüfstandslagern für die Schichtprüfungen ist eine zukünftige Applikation der Schichten auf Großlager mit einem Durchmesser von 1 m und mehr beabsichtigt. Eine skalierbare Anlagentechnik ist daher notwendig.

---

### *Individuelle / projektbezogene Aspekte*

Im Fall dieser Arbeit handelt es sich bei der zu entwickelnden Anlagentechnik um einen Prototyp, um sowohl die applizierten Schichten und Bauteile als auch die Anlagentechnik zu prüfen. Daraus ergeben sich bezüglich Stückzahlen, Automatisierungsgrad und Bedienung deutlich von einer Produktionsanlage abweichende Anforderungen. Die geringen Stückzahlen erlauben einen manuellen Betrieb der Anlage, für die Prozessführung sind jedoch alle Parameter einstellbar auszuführen.

Bei den Prozessschritten ist eine Beschränkung auf die eigentlichen Beschichtungsschritte möglich. Die Vorbehandlung muss nicht in der Anlage integriert werden. Im vorliegenden Fall der Aufstellung in einem Galvanik-Technikum kann auf die bereits vorhandene Infrastruktur zurückgegriffen werden, d. h. es können vorhandenen Vorbehandlungsbäder verwendet werden.

### *Allgemeine galvanotechnische Randbedingungen*

Unter diesen Punkt fallen die bereits in Kapitel 2.1.1 beschriebenen allgemeingültigen galvanotechnischen Faktoren. In Verbindung mit der Verfahrenstechnik ergeben sich die prozesstechnischen Anforderungen (z. B. Beheizung, Filtration, chemische Beständigkeit der verwendeten Werkstoffe). Die prozesstechnischen Anforderungen ergeben sich aus den vorgesehenen Elektrolyten, u. a. ist ein pH-Bereich von 3,0 – 9,5 mit nichtoxidierenden Medien vorgegeben. Die Arbeitstemperatur der Medien kann im Bereich von 30 °C bis 75 °C liegen. Eine konstante Umwälzung und Filtration wird benötigt.

### *Gesamtaufarbeitung und Anforderungsliste*

Bei der Erarbeitung der Anforderungen ist eine Untergliederung in verschiedene Herkunftsgebiete sinnvoll, für die weitere Nutzung ist diese Unterscheidung nicht mehr notwendig und eine Sammlung in einer alles übergreifenden Anforderungsliste üblich. Es wurden daher Erfordernisse und Randbedingungen in einer Anforderungsliste nach Stand der Technik zusammengefasst, die vollständige Liste findet sich im Anhang (Abschnitt 12.1, Tabelle 12.3). Nachdem die Anforderungen ausreichend geklärt waren, konnte mit der eigentlichen Entwicklung der Lösung begonnen werden.

## Iterationsschleife Lösungsgenerierung

### Erarbeitung von Lösungsprinzipien, Variantengenerierung

Aus dem Stand der Technik ist eine Lösungsvariante bekannt, ein teileingetauchter Lagering mit Halterung und Kontaktierung außerhalb (und ggfs. Stützrollen innerhalb). Dieser Ansatz wurde mit aufgenommen (Skizzen a) und b) Abbildung 8.2), zusätzlich wurden aus dem morphologischen Kasten (Abschnitt 7.3.4) weitere Varianten entwickelt. Ein Auszug ist in Abbildung 8.2 dargestellt, es wird farblich zwischen Bauteil (blau), stromführenden Teilen (rot) und isolierenden Teilen (schwarz) unterschieden, da die mechanische Ausführung ggfs. deutlich unterschiedlich ausfallen muss. Skizzen c) und d) sind ähnlich zum bekannten Ansatz, jedoch mit alternativer Kontaktierung (Band bzw. Schleifkontakt). Eine geänderte Lagerausrichtung wird in e) und f) genutzt, die Kontaktierung würde über Rollen auf der Stirnseite oder Außen- / Innendurchmesser erfolgen. Diese Varianten sind auch mit Schleifkontakten an ähnlichen Positionen theoretisch denkbar. Ebenso sind zyklisch wechselnde Kontaktpunkte denkbar, sowohl in vertikaler Orientierung als auch in horizontaler Lage (Skizzen g) und h)). In diesen Fällen ist zusätzlich eine Rotation des Gesamtaufbaus (Bauteil inkl. Kontakten) möglich.

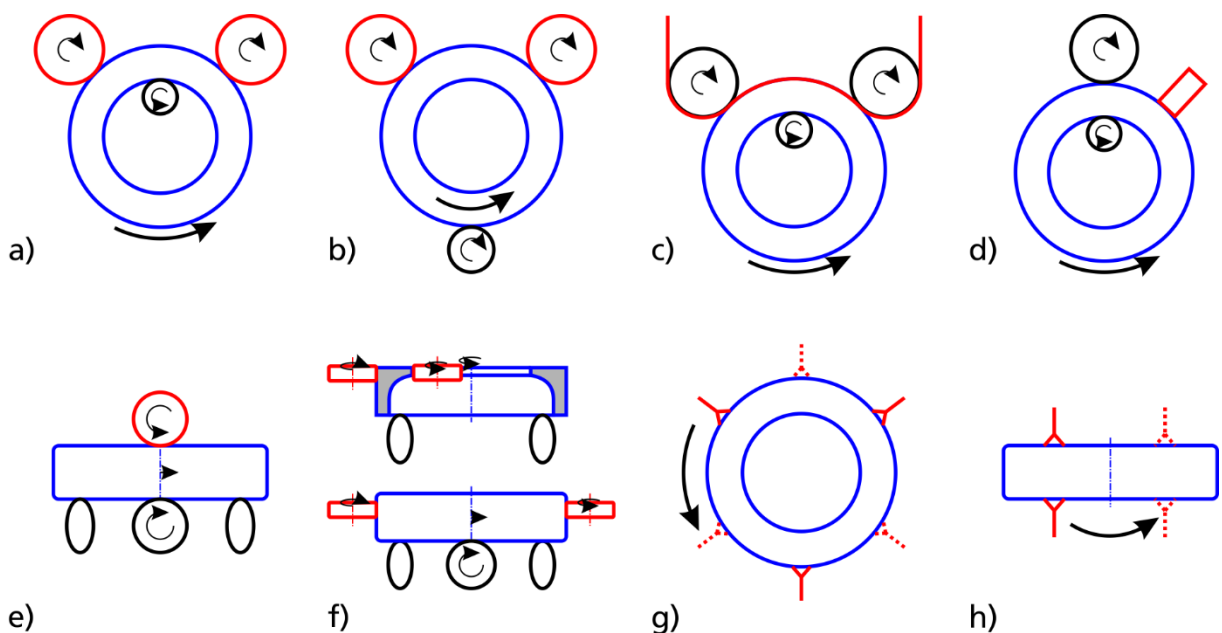


Abbildung 8.2: Skizzierte Lösungsvarianten

Die abgebildeten Varianten zeigen einen Auszug der ermittelten Alternativen. Abwandlungen und Mischungen der dargestellten Lösungsansätze sind ebenfalls denkbar. Die Eigenschaften der einzelnen Kontaktierungsarten wurden bereits in Kapitel 7.3.4 analysiert und werden daher nicht weiter ausgeführt.

#### *Prüfung Ausschlusskriterien und Bauteilgeometrieignung*

Für die erste Beurteilung anhand der Ausschlusskriterien und der Eignung für die Bauteilgeometrie wurde eine Liste erstellt (siehe Anhang 12.3, Tabelle 12.4). Es wurden vier Ausschlusskriterien und zwei Prüfpunkte für die Eignung der Bauteilgeometrie identifiziert und bewertet.

Das letzte Kriterium zur Bauteilgeometrie ist für das Umsetzungsbeispiel mit nur einem Lagertyp und zwei Lagerringen nicht zwingend notwendig, wurde jedoch mit Hinblick auf die Übertragbarkeit mit aufgenommen. Im Fall von Rillenkugellagern oder Zylinderrollenlagern können geometriebedingt bei vertikaler, volleingetauchter Lage Einschlüsse von Luft / Gas auftreten, welche in diesen Bereichen die Abscheidung verhindern. Für den Prototyp wären diese Varianten möglich, würden den Einsatzbereich jedoch stark einschränken. Sie wurden daher nicht weiter betrachtet, da eine Vielzahl von anderen Varianten möglich erscheint.

#### *Prüfung der Variantenanzahl, Ende der Iterationsschleife*

Anhand der zuvor beschriebenen Varianten wird deutlich, dass Lösungsmöglichkeiten existieren, diese wurden in mehreren Schleifen ermittelt. Im Rahmen der Variantengenerierung wurden auch die Ausschlusskriterien schrittweise erweitert. Aus Anhang 12.3, Tabelle 12.4 wird ersichtlich, dass auch nach der Elimination erster Lösungen ausreichend Varianten gefunden wurden, welche eine Bewertung ermöglichen. Der Iterationszyklus wurde somit mit dem beschriebenen Stand beendet, eine Überprüfung der Ziele und Anforderungen wurde nicht notwendig.

### Parallele Dokumentation von Umsetzungsanforderungen und Bewertungskriterien

Wie in der Methode vorgesehen, wurden Auffälligkeiten während der Beurteilung parallel dokumentiert.

- Eine Schwierigkeit der absoluten Bewertung der Ausschlusskriterien trat bei der Behandlung der Innen- und Außendurchmesser auf. Da sowohl Innen- als auch Außenringe beschichtet werden müssen, unterscheiden sich diese Bereiche je nach Lagerringtyp. Die Flächen zur jeweiligen Lagerinnenseite hin sind für eine Führung oder Kontaktierung zwar nicht ausgeschlossen, auf Grund der geringeren Breite jedoch kritisch zu sehen. Je nach Variante kann auch eine Auflage auf zwei Bereichen mit unterschiedlichem Durchmesser notwendig werden, um ein Verkippen zu verhindern.
- Einige Ansätze nutzen die Schwerkraft zur Erzeugung einer Pressung bzw. Positionierung – hier können ggfs. keine variablen Kräfte für die Kontaktierung genutzt werden, was nachteilige Auswirkungen haben kann.

Dies musste bei der Bewertung der Varianten berücksichtigt werden.

### Iterationszyklus Vorbereitung der Bewertung

#### *Bewertungskriterien und Vorelimination für relevante Bauteile*

Die festgelegten Bewertungskriterien wurden erarbeitet und sind im Anhang dokumentiert (Abschnitt 12.3, Tabelle 12.5). Diese wurden mit Faktoren zwischen 1 und 5 bezüglich der Relevanz gewichtet. Wichtigstes Kriterium und als einziges mit dem höchsten Gewichtungsfaktor 5 versehen ist die Belastung der Schicht während der Abscheidung durch die Kontakte und Aufnahmen. Da das Bauteilspektrum für den Rahmen diese Arbeit sehr eng gefasst wurde, wurden nach den zuvor beschriebenen Ausschlusskriterien keine weiteren Varianten mehr eliminiert.

#### *Aufarbeitung der Varianten*

Nach der initialen stichwortartigen Beschreibung der Lösungsmöglichkeiten wurden diese sofern notwendig in Piktogrammen skizziert, um eine verbesserte Vorstellung zur Umsetzung der Kontaktierung bzw. der Bewegungen zwischen den Bauteilen zu erhalten.

Für die Bewertung wurde die Variante „Rollkontakte / Stützrollen auf beiden Stirnseiten“ in zwei mögliche Umsetzungsoptionen aufgeteilt, da im Technikum mit den vorliegenden geringen Bauteilgrößen die Stromzufuhr auf die Kontaktrollen auf verschiedene Arten erfolgen kann (Abbildung 8.3).

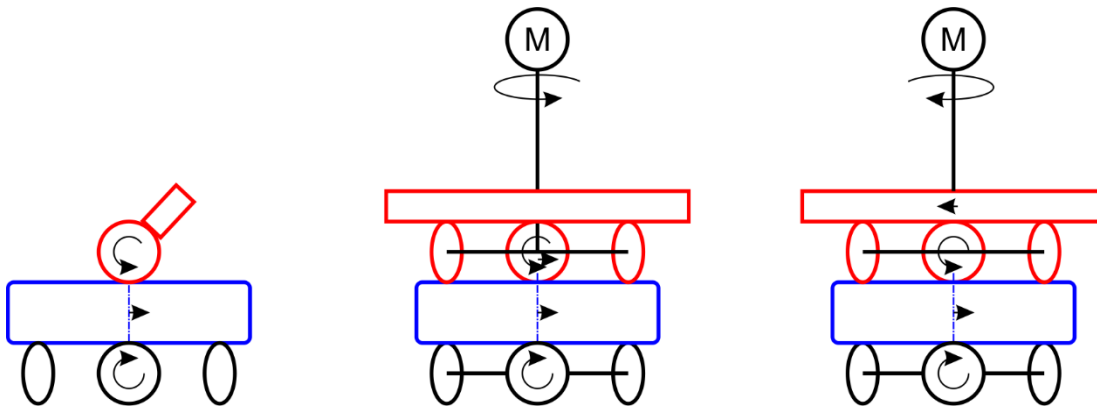


Abbildung 8.3: Varianten zur Umsetzung in horizontaler Lage mit Rollen an den Stirnseiten. Links: Kontaktrolle mit Schleifkontakt. Mitte und rechts: Stromzufuhr über Abrollen auf einer zweiten Fläche, mittig mit stehender Kontaktscheibe, rechts mit rotierender Kontaktscheibe.

#### *Bewertung der Kriterien und des Informationsstands*

Die beschriebenen Kriterien und Skizzen sind im Rahmen mehrerer Schleifen entstanden, die dargestellten Tabellen beschreiben den Stand nach Abschluss des Iterationszyklus. Die Arbeit im Rahmen von iterativen Schleifen hat sich hierbei bewährt, da bei der Aufarbeitung der Varianten und der Erstellung der Kriterien teilweise neue kritische bzw. zu betrachtenden Faktoren erkannt wurden.

### Variantenbewertung und -auswahl

Im Rahmen des später dargestellten Umsetzungsbeispiels wurde jede Variante mit einem Wert zwischen 1 und 3 bewertet. Hierbei beschreibt der Wert 1 eine Einstufung der Zielerreichung als nicht optimal bzw. problematisch, der Wert 2 bezeichnet eine Eignung mit Einschränkungen, bei der Höchstpunktzahl wird von einer vollständigen, bestmöglichen Eignung ausgegangen. Die vollständige Bewertungsmatrix ist im Anhang (Abschnitt 12.3, Tabelle 12.6) dargestellt.

#### *Auswahl*

Anhand der Variantenbewertung ergab sich eine knappe Entscheidung zwischen beiden horizontalen Varianten mit Rollen an beiden Stirnseiten. Die Kontaktierung über eine weitere parallele Platte ist auf Grund der fehlenden Schleifkontakte vorteilhaft (potenzieller



Schmutzeintrag in den Elektrolyten wird minimiert), daher wurde diese für die Umsetzung im Technikumsmaßstab ausgewählt. Die zyklisch wechselnden Kontakte mit gleichzeitiger Bauteilrotation sind vorrangig wegen des hohen Aufwands zur Umsetzung nicht höher bewertet. Die vertikal orientierten Bauteile verlieren hauptsächlich Punkte bei der kurzen Abscheidungsunterbrechung (deren Auswirkungen aktuell nicht eingeschätzt werden können und die daher potenziell problematisch sind) und der Nutzung von Flächen mit Passungen (Innen- bzw. Außendurchmesser zum Einbau des Lagers) zur Kontaktierung und Halterung.

Die konstruktive Umsetzung erfolgt somit für die in Abbildung 8.3 mittig abgebildete Skizze mit feststehender Kontaktscheibe und einer rotierenden Scheibe mit Kontaktrollen, da hier die Kontaktscheibe unbeweglich und somit einfach elektrisch zu kontaktieren ist.

### Iterationszyklus Konzept / Vorentwurf

Nach der Auswahl wurden die Skizzen weiter detailliert und die für die Umsetzung relevanten Punkte ausgearbeitet. Im Rahmen des Vorentwurfs wurde dabei der Bereich um den Lagerring vorrangig betrachtet, die Antriebskonstruktion wurde als weniger kritisch eingestuft und daher erst im Rahmen der Gesamtsystementwicklung ausdetailliert.

Bei dem gewählten Konzept ist ein wichtiger Punkt die zuverlässige Herstellung eines Reibschlusses zwischen der Kontaktscheibe, den Kontakt- / Antriebsrollen und dem Lagerring. Da der Lagerring neben den Antriebsrollen nur mit den Auflagerrollen in Berührung kommt, muss zwischen dem gesamten Aufbau eine leichte Anpresskraft bestehen. Dies wurde durch eine Federverspannung zwischen den einzelnen Baugruppen gelöst (Abbildung 8.4). Durch die Verwendung von leichtlaufenden Kugellagern ist eine leichte Kraft zur Sicherstellung der Drehung des Bauteils ausreichend, da sich der Lagerring auf diese Weise fast widerstandsfrei rotieren lässt.

Die Antriebsrollen bilden dabei den vertikalen Fixpunkt und werden fest mit der zentralen Antriebswelle verbunden. Die einzelnen Rollen sind über Kugellager drehbar auf Achsen positioniert, welche an einer mittigen Befestigungsscheibe angebracht sind. Die nicht rotierende Kontaktscheibe erhält durch Federn eine Anpressung auf die Kontakt- und Antriebsrollen und stellt damit sowohl den elektrischen Kontakt als auch die Reibung sicher.

Durch diese Reibung werden die Kontaktrollen in Rotation versetzt. Auf Grund der verschiedenen Durchmesser der Lagerringe ist die Befestigungsscheibe wechselbar ausgeführt und wird je nach Lagerringtyp ausgetauscht.

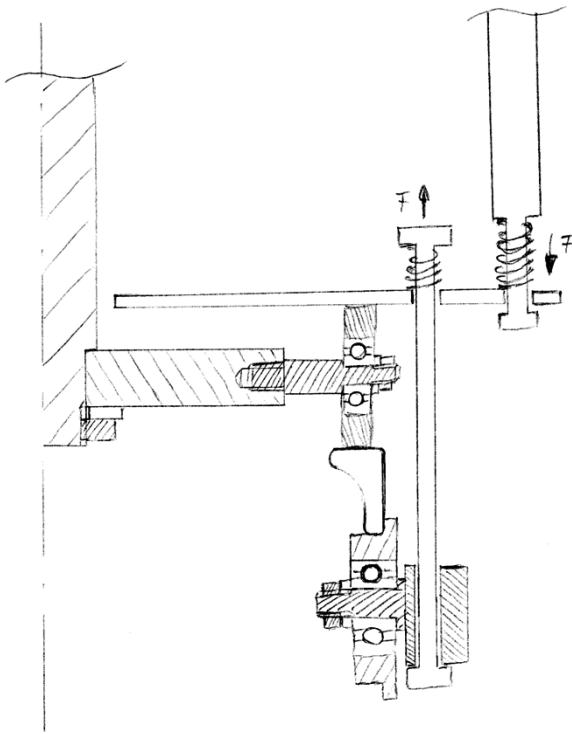


Abbildung 8.4: Handskizze Vorrichtungsentwurf mit Außenring

Der Lagerring wird von unten an die Antriebsrollen gedrückt, dabei liegt er auf den Auflagerrollen, welche an einer nicht rotierenden Auflagerscheibe befestigt sind. Die Kraft wird dabei wiederum über Federn aufgebracht, welche die Auflagerscheibe nach oben pressen. Die unteren Rollen sind mit einem Absatz ausgestattet, welcher den Lagerring axial positioniert. Die Orientierung des Lagerrings wurde so gewählt, dass die breite Stirnseite immer an den oberen Kontaktrollen positioniert ist und somit ein größerer Kontaktbereich realisiert werden kann.

Die skizzierte Lösung wurde für die Bereitstellung der Abmessungen und die Entwicklung der anderen Segmente (Maßhaltigkeit, Behälter und Anlage) in ein erstes CAD-Modell umgesetzt. Die weitere Ausdetaillierung erfolgte in iterativen Schritten, bei denen die Ergebnisse aus den anderen Entwicklungsbereichen nach und nach integriert wurden. Die in der Gesamtsystementwicklung finalisierte Vorrichtung ist in Kapitel 8.2 dargestellt.

### 8.1.2 Detailmethodik zur Optimierung der Maßhaltigkeit (Fallbeispiel; Entwicklungssegment 2)

Für eine Simulation und eine Schichtdickenprognose müssen geometrische Daten vorliegen. Die nachfolgend beschriebenen Berechnungen und Modellierungen wurden parallel zur Konstruktion der Vorrichtung und der gesamten Prototypanlage durchgeführt. Ausgangspunkt waren dabei erste Entwürfe zu Vorrichtung und Anlage, diese wurden weiter detailliert.

#### Ermittlung Geometriedaten und Klärung Simulationsvorgehen

Wie in Kapitel 3.2.4 beschrieben, erfolgten die Simulationsrechnungen für diese Arbeit mit der Software Elsy2D und 2D-Modellen. Für den Aufbau der Modelle wurden vorab die verschiedenen Ringtypen (Innen- und Außenring), notwendige Schnitte und weitere Parameter festgelegt. Die gewählten Lagerringe entsprechen den in 8.1.1 beschriebenen Abmessungen, die Behälter- und Vorrichtungsdaten wurden mit den ersten Entwürfen abgeglichen.

Da der Entwurf der Anodenkonstruktion keine kreisförmige Außenanode, sondern einzelne Körbe aufweist (lösliches Anodenmaterial), ist über den gesamten Umfang hinweg keine exakt homogene Stromdichte zu erwarten. Für ein möglichst vollständiges Bild wurden daher Querschnitte durch die Anodenkörbe und eine Draufsicht als notwendig erachtet, jeweils in Varianten für Innen- und Außenring. In allen weiteren Abschnitten bezieht sich die Verwendung des Begriffs „Stromdichte“ rein auf die simulierte primäre Stromdichte.

#### Iterationszyklus Datenerarbeitung und Kennlinienbildung

Die Bildung der Kennlinien wurde in 7.4.3 bereits mit den Daten des Fallbeispiels beschrieben und wird daher an dieser Stelle nicht nochmals aufgeführt.

---

## Iterationszyklen zur Optimierung

### *Modellierung*

Das Modell stellt eine Hälfte bis zur Drehachse des Lagerrings dar. Als rotationssymmetrisch definiertes Modell wird die Schnittgeometrie für Stromdichte- und Flächenangaben als 360°-Modell interpretiert. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass einzelne Teile, welche sich nur an einzelnen Positionen über den Umkreis verteilt befinden oder nicht zylindrisch sind (z. B. Kontakt- und Auflagerrollen oder die Auflagerungsscheibe für den Innenring mit unterschiedlichen Dicken) nicht korrekt modelliert werden können. Diese Komponenten wurden daher vereinfacht dargestellt (mittlere Dicke für die Auflagerungsscheibe) bzw. nicht berücksichtigt. In Abbildung 8.5 ist ein Modellausschnitt gezeigt, bei dem die Innenanode links und die Außenanode rechts erkennbar sind. Die äußerste rechte Linie stellt die Verfahrensraumgrenze dar, welche die Behälterwand wäre und im vorliegenden Modell einem Rundbehälter entspricht. Dies weicht von der Anlage zwar ab, sollte aber auf Grund der Symmetrie des inneren Raums und der Entfernung keinen signifikanten Einfluss haben.

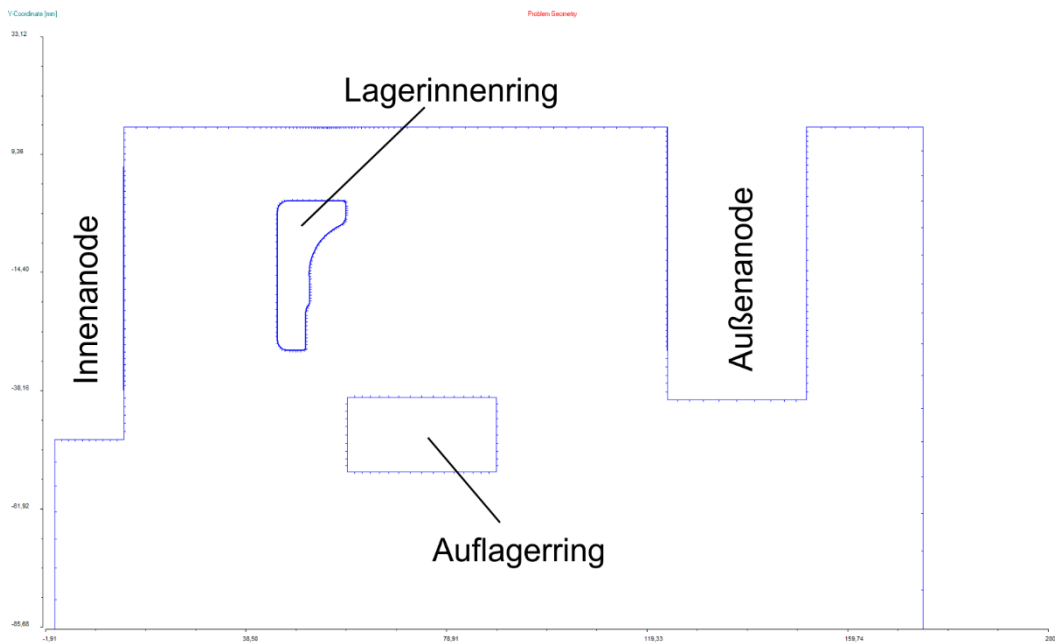


Abbildung 8.5: Exportiertes Bild des Original-Elsy2D-Modells (beschriftet) - Ausschnitt des Lagerring- und Anodenbereichs. Das mittige Rechteck stellt die Auflagerungsscheibe dar, welche beim Innenring eine eher dreieckige Form aufweist und damit vereinfacht mit mittlerer Seitenlänge modelliert wurde.

Die Vernachlässigung von Teilen hat einen Einfluss auf das Simulationsergebnis. Die Signifikanz ist dabei von jedem Einzelfall abhängig. Die Blenden, welche eine Abschirmung für die Kontaktrollen bieten, können nicht vernachlässigt werden. Sie weisen eine veränderliche Position zum Lagerring auf, es wurde daher das Verhältnis des abgedeckten zum nicht abgedeckten Anteil der Ringe verglichen. Dieses Verhältnis liegt im parallel erstellten konstruktiven Entwurf bei 1:1. Über Mittelwertbildung der beiden Modelle mit und ohne Blende wurde ein Ausgleichsverlauf für die primäre Stromdichte ermittelt. Die Unterschiede des Modells sind in Abbildung 8.6 gezeigt, die Rollenblende stellt dabei die einzige Modifikation dar.

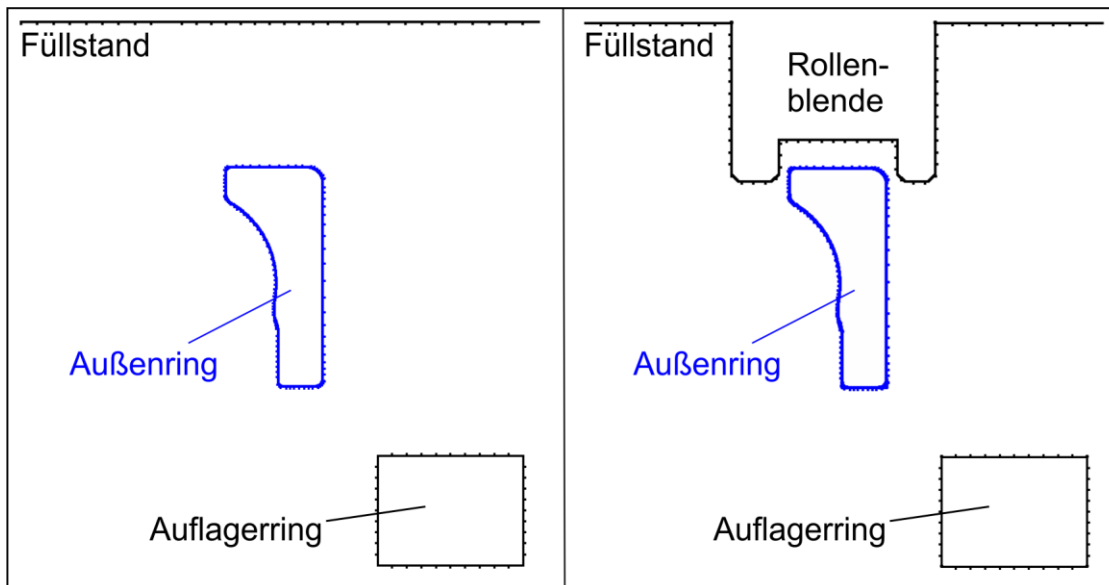


Abbildung 8.6: Modellausschnitt ohne (links) und mit (rechts) Rollenblende (nachbearbeitete Bilder des Elsy2D-Modells). Schwarze Linien stellen den Elektrolytspiegel (oben) bzw. Blenden / Auflagerringe dar, blau zeigt den Lagerring.

Im Simulationsprogramm können mehrere Elektroden definiert werden. Dies wurde genutzt, um neben dem kathodisch geschalteten Ring zwei unterschiedliche Anodenkreise vorzugeben. Innenanode und Außenanode mussten daher nicht das gleiche Potenzial aufweisen, sondern konnten mit unterschiedlichen Stromvorgaben als Randbedingungen belegt werden. Diese erfordert die Verwendung von zwei Gleichrichterkreisen, erlaubt jedoch eine gezieltere Stromverteilung zwischen inneren und äußeren Lagerringbereichen.

### *Berechnung*

Für die Berechnung können in Elsy2D verschiedene Randbedingungen vorgegeben werden. Es besteht die Möglichkeit, mit realen Strömen (für die Zielstromdichten) zu arbeiten. Bei der Berechnung der primären Stromdichte ändert sich dadurch jedoch nur der quantitative Verlauf, die Ausprägung mit Unterschieden zwischen Kanten und Nuten bleibt gleich. Eine Vergleichbarkeit verschiedener Rechnungen und ein vom Absolutwert unabhängiger Verlauf kann durch die Normierung der mittleren Stromdichte für das gesamte Bauteil auf einen bestimmten Wert erreicht werden. Es bietet sich an, die Normierung auf eine mittlere Stromdichte von  $1,0 \text{ A/dm}^2$  oder  $100 \text{ A/dm}^2$  zu legen – im zweiten Fall kann

der Stromdichteverlauf direkt als Prozentwert interpretiert werden. In dieser Arbeit wurde mit einer Normierung auf  $100 \text{ A/dm}^2$  gearbeitet. Die Stromvorgabewerte wurden bei der Vorgabe der Randbedingungen entsprechend angepasst.

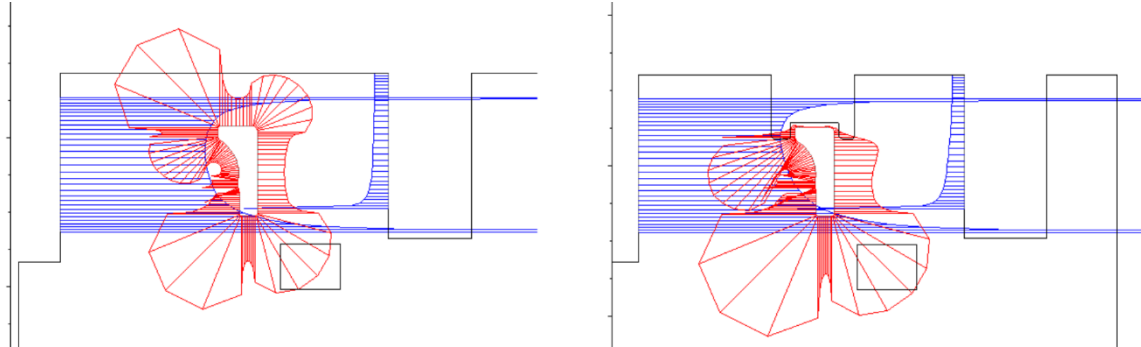


Abbildung 8.7: Visualisiertes Berechnungsergebnis ohne / mit Rollenblende (Modellausschnitt)

Als Berechnungsergebnisse zeigt Elsy2D die Strom- und Stromdichtewerte für die einzelnen Elektroden und einen visualisierten Stromdichteverlauf, welcher beispielhaft in Abbildung 8.7 gezeigt ist. Für jede Elektrode kann der Stromdichteverlauf über die Bauteilabwicklung dargestellt werden.

Die Außenanoden stellen auf Grund der sechs einzelnen Körbe über den Umfang betrachtet keine komplett homogene Stromdichteverteilung zur Verfügung. Durch die Rotation des Lagerrings werden die Ungleichmäßigkeiten bezüglich der Schichtdicke ausgeglichen. Für eine Quantifizierung der Höhe der Schwankungen und der Auswirkung im modellierten senkrechten Schnitt direkt durch einen Anodenkorb wurde eine Draufsicht der Situation berechnet (Abbildung 8.8, links). In diesem Fall liefert die 2D-Modellierung zwei getrennte Bereiche. Der mittlere mit der runden Innenanode ist durch die konzentrische Positionierung vollständig homogen und wurde daher nicht weiter betrachtet.

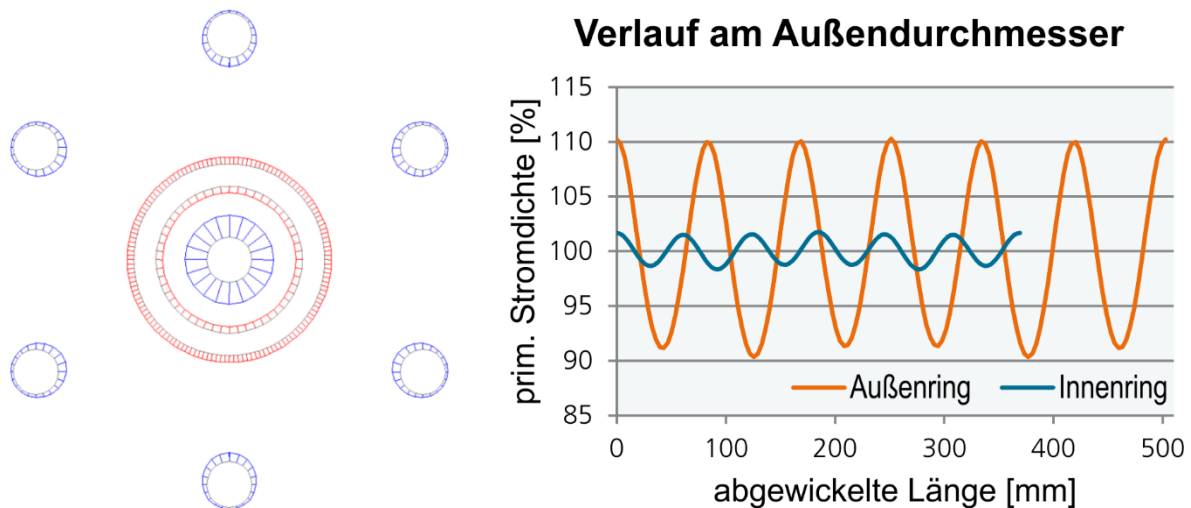


Abbildung 8.8: Primäre Stromdichteverteilung (Draufsicht). Links Ausschnitt des Berechnungsmodells mit Stromdichteverteilung für Innenring, rechts Diagramm der abgewickelten Verläufe am Außendurchmesser von Innen- und Außenring.

Der äußere Ringdurchmesser weist leichte Schwankungen auf. Diese können nur durch Rohdatenbetrachtung der Abwicklung genauer bestimmt werden. In Abbildung 8.8 (rechts) zeigen sich durch die unterschiedlichen Durchmesser von Innen- und Außenring deutlich höhere Schwankungen auf dem größeren Außenring. Dies war durchaus zu erwarten, die absolute Höhe von  $\pm 10\%$  wurde jedoch als akzeptabel eingeschätzt.

Für die spätere Auswertung der Querschnitte ist dieses Ergebnis für die Bewertung der Relation der inneren zu den äußeren Ringbereichen relevant. Da das Modell direkt durch den Außenanodenkorb schneidet, bildet es den Bereich mit  $110\%$  (Außenring) Stromdichte am Außendurchmesser ab. Die mittlere Stromdichte liegt entsprechend niedriger.

### Auswertung

Für die Auswertung wurden die Rohdaten der Lagerringe in Excel importiert. Die später erfolgende Auswertung der Schichtdicken bei der Durchführung von Versuchen muss den entsprechenden Stromdichtewerten zugeordnet werden können, daher wurde, bezogen auf den Start der Abwicklung in Elsy2D, eine Auswertungsrichtlinie erstellt. In dieser Auswertungsrichtlinie wurden die Messpunkte und deren Positionen definiert und nummeriert. Eine Übersicht (ohne Bemaßung) ist in Abbildung 8.9 dargestellt. Die Messstellen 3,



9, 17 und 22 des Innenrings sowie 4, 13, 19 und 23 des Außenrings entsprechen vordefinierten Messpunkten der technischen Zeichnung und sind in den Verlaufsdiagrammen durch senkrechte Linien gekennzeichnet. Auf die Laufbahn der Wälzkörper wurde ebenfalls ein besonderes Augenmerk gelegt, weshalb auch diese in den Diagrammen markiert ist.

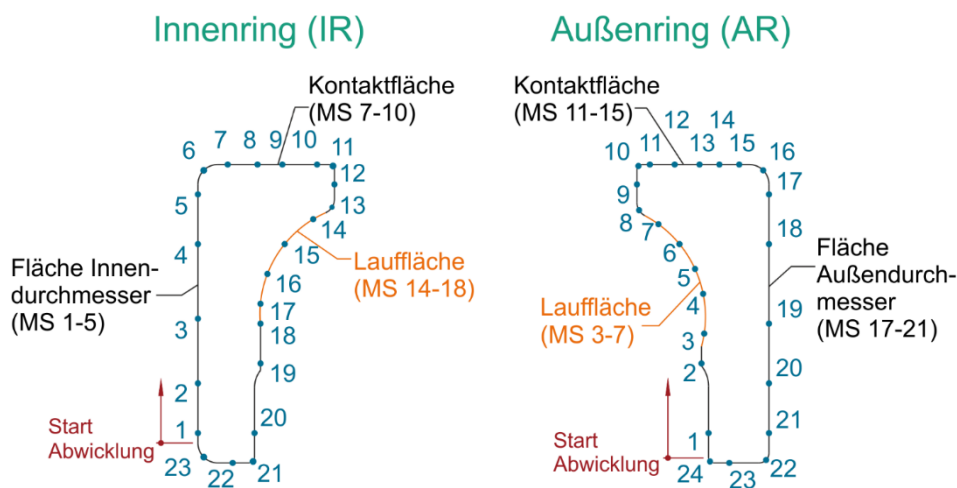


Abbildung 8.9: Auswertungsrichtlinie für Innen- und Außenring mit Messstellen (MS), relevanten Flächenbezeichnungen und Abwicklungsorientierung

Der Start der Abwicklung ergibt sich dabei aus der Modellierung. Die Orientierung ist durch den Aufbau der Simulationssoftware im Uhrzeigersinn vorgegeben und beginnt am Ende eines Kantenradius.

#### *Ausgewertete Simulationsergebnisse*

Die Bewertung der Rollenblende (RB) wurde über die Kombination von zwei Simulationsrechnungen durchgeführt. Im Bereich der Blende trat, wie nicht anders zu erwarten, eine deutliche Veränderung ein. Sowohl die einzelnen Stromdichteverläufe als auch die Mittelwertbildung sind für den Außenring mit einem Anodenpotenzial in Abbildung 8.10 dargestellt.

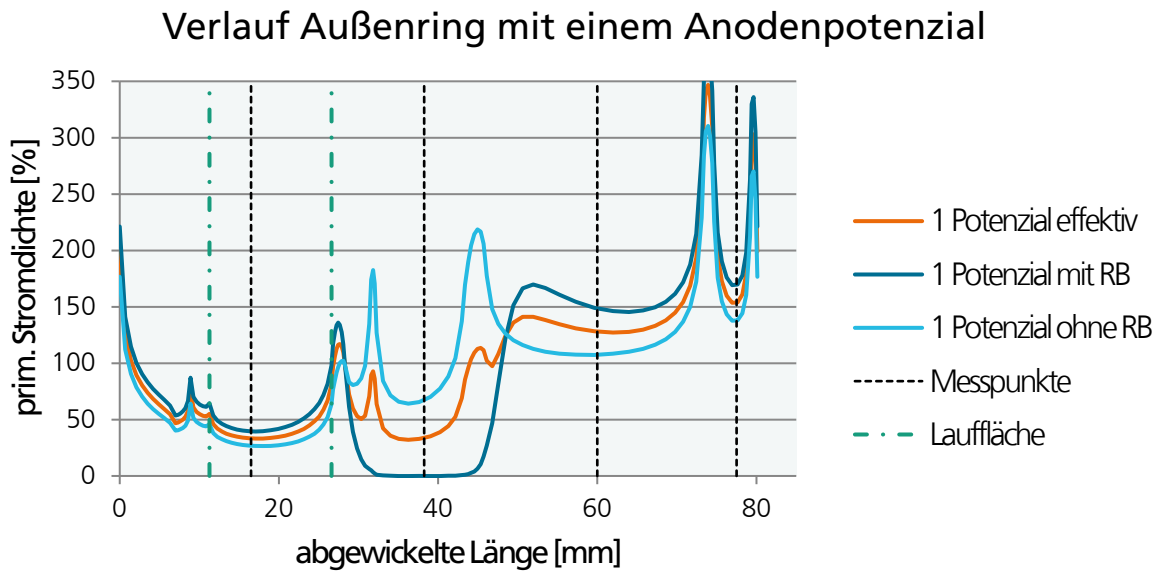


Abbildung 8.10: Auswertung Außenring für ein Anodenpotenzial mit ermittelter effektiver Mittelwertverteilung. Gestrichelte Linien stellen die Position der vier vom Lagerhersteller definierten Kontrollmesspunkte (schwarz) und die Grenzen der Lauffläche (grün) dar.

Der Einfluss der Rollenblende erstreckt sich nicht nur auf die direkt abgeblendeten Bereiche an der Oberfläche (etwa zwischen 30 mm bis 50 mm der abgewickelten Länge), sondern wirkt sich auf den gesamten Lagerring aus und verschiebt die Stromverteilung insgesamt. Ebenfalls auffällig ist das unterschiedliche Niveau der Stromdichte zwischen den inneren Flächen des Außenrings (bis ca. 30 mm abgewickelte Länge) und der Außenfläche um den Messpunkt bei 60 mm. Auch die Berücksichtigung der Umfangsschwankungen und der Tatsache, dass der gerechnete Schnitt durch die Außenanode etwa 10 % über der mittleren Stromdichte liegt, verbessert das Ergebnis nur unzureichend. Eine gleichmäßige Schichtdickenverteilung über den gesamten Ring ist mit dieser Stromdichteverteilung nicht realisierbar.

Eine äquivalente Berechnung wurde für den Innenring durchgeführt. Die Effekte der Rollenblende sind ähnlich zum Außenring. Durch die unterschiedlichen Abstände zur Innen- / Außenanode sind die Verhältnisse zwischen inneren und äußeren Bereichen deutlich ausgeglichener.

Beide Ringtypen weisen geometriebedingt Stromdichtespitzen auf, die höchsten werden an der der Lauffläche zugewandten Kante der schmalen Stirnseite erreicht (Messpunkte IR[21] und [AR]24 in Abbildung 8.9). Dieser Bereich weist einen geringeren Radius als die einbaurelevanten Lagerinnen- bzw. -außendurchmesserkannten auf. Die Stromdichtespitzen zwischen der Lauffläche und der schmalen Stirnseite (AR bei ca. 10 mm Abwicklung, IR bei ca. 65 mm) sollten in der Realität geringer ausfallen, da hier die genaue Geometrie / Abrundung unbekannt war und dies daher scharfkantig modelliert wurde. Die Kanten der Kontaktfläche werden durch die Rollenblende deutlich reduziert und befinden sich bei der effektiven Verteilung auf einem relativ niedrigen Niveau.

#### *Prognose Schichtdickenverteilung*

Über die in Abschnitt 7.4.3 generierten Korrekturfaktorgleichungen können aus den simulierten primären Stromdichteverteilungen die Prognoseverläufe erzeugt werden. In Abbildung 8.11 sind die verschiedenen Prognosekurven der Gleichungen dargestellt, ergänzt wurde eine identisch ermittelte Linie für  $0,5 \text{ A/dm}^2$  Nennstromdichte. Alle Funktionen wurden mit der effektiven Stromdichteverteilung verrechnet. Es wird deutlich, dass für einen Großteil der Abwicklung alle Linien nahezu übereinstimmen, größere Abweichungen ergeben sich nur an Bereichen mit deutlich von 100 % abweichender Stromdichte.

Zur Kontrolle wurde eine logarithmische Funktion mit aufgenommen, welche bei der 5-Punkt-Auswertung sehr nah am Verlauf der Potenzfunktion lag. Auffällig ist hierbei ein gegensätzlicher Verlauf an einer Kante der schmalen Stirnseite (bei ca. 75 mm Abwicklung). Da dies anhand der Erfahrungen in der Galvanotechnik nicht der Realität entsprechen wird, deutet es darauf hin, dass die logarithmische Regressionsgleichung die realen Verhältnisse nur unzureichend abbildet. Für die weiteren Prognosen werden daher nur die Potenzfunktionsgleichungen für  $2 \text{ A/dm}^2$  ohne Mittelwert verwendet, zur Kontrolle jedoch sowohl die Gesamtauswertung als auch die 5-Punkt-Variante. Auf eine zusätzliche Unterteilung in verschiedene Nennstromdichten wurde verzichtet, da die spätere Beschichtungsstromdichte variieren kann und während der Entwicklung noch nicht genau absehbar war.

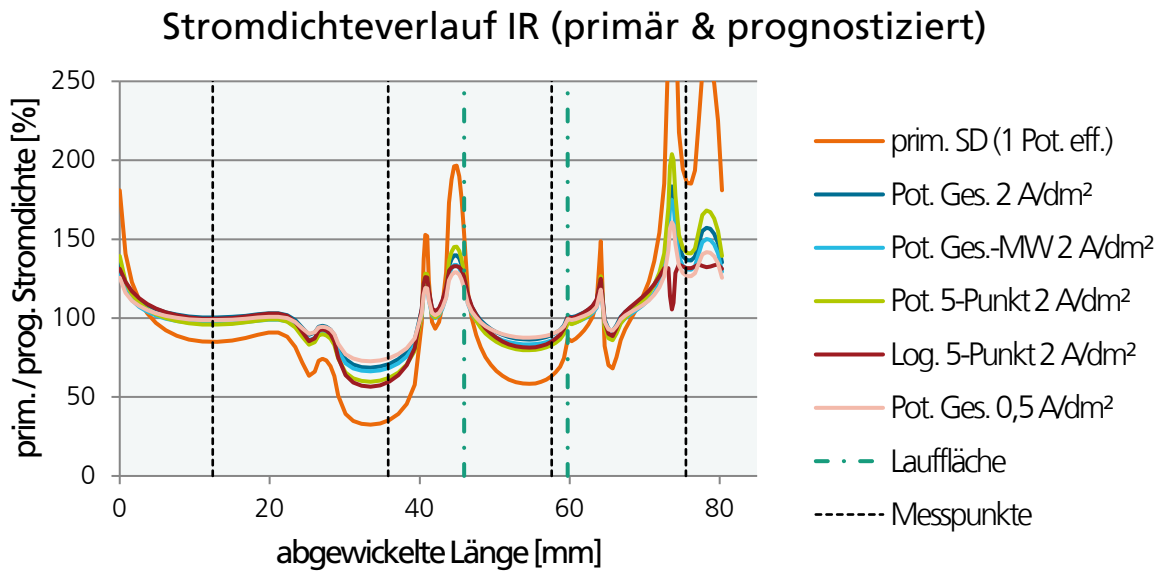


Abbildung 8.11: Effektivverteilung des Innenrings mit Prognoselinien bei einem Gleichrichterpotenzial. „Ges.“ beschreibt die Gesamtauswertung aller Punkte (bei „MW“ wurden der Mittelwert der Hochstrompunkte genutzt), „5-Punkt“ bezeichnet die Kurven aus reduzierter Punktanzahl.

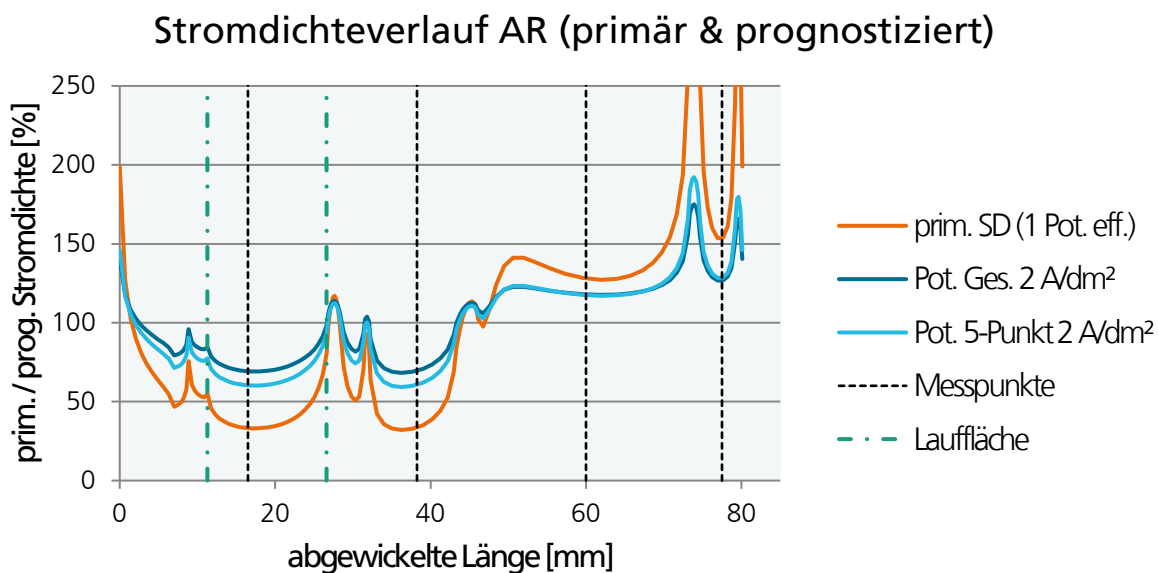


Abbildung 8.12: Effektivverteilung des Außenrings mit Prognoselinien bei einem Gleichrichterpotenzial

Die für den Außenring äquivalent erzeugte Prognose ist in Abbildung 8.12 gezeigt. Anhand der Prognosen kann jedoch von einer guten bis sehr guten Streufähigkeit des Elektrolyten ausgegangen werden, welche ein beträchtliches Maß an Stromdichteschwankungen ausgleicht. Bei eingehender Analyse der Verläufe ist für die Kanten sowohl bei Innen- als auch Außenring ein Handlungsbedarf absehbar.

Die Verhältnisse zwischen Lauffläche und einbaurelevantem Innendurchmesser sind beim Innenring auch für Innen- und Außenanode auf einem Gleichrichterpotenzial in einem akzeptablen Bereich. Beim Außenring hingegen ist das Stromdichteniveau dieser Bereiche sowohl bei der rein primären Verteilung als auch bei der Prognose signifikant unterschiedlich. Es ist keine vergleichbare Schichtdicke zu erwarten.

Da der Schichtaufbau an Kanten vorab nur schwer genau zu quantifizieren ist und speziell bei scharfkantigen Geometrien die Stromdichtespitze in der Simulation durch die Vernetzung des FEM-Modells mit beeinflusst wird, wird der Optimierungsfokus in der Konzeptphase auf das Erreichen eines vergleichbaren Stromdichteniveaus für die relevanten Flächen gelegt. Die Hydrodynamik kann an den Kanten ebenfalls einen signifikanten Unterschied erzeugen. Dies wird in den Prognoselinien nur gemittelt betrachtet und kann daher variieren.

#### *Optimierungsmaßnahmen*

Die Optimierungen sind innerhalb des Iterationszyklus mit Berechnung, Prognose, Bewertung und im Abgleich mit den anderen Entwicklungssegmenten (zur Gewährleistung einer Möglichkeit der konstruktiven Umsetzung) vorgesehen. Je nach Art des Verbesserungsbedarfs fallen einzelne Schritte gering aus oder können übersprungen werden. So ist beispielsweise bei einer Parameterstudie nicht nach jedem einzelnen Parameter eine Prognose / Bewertung zu erstellen, sondern erst nach Abschluss aller vorgesehenen Berechnungen. Eine Prüfung der Auswirkungen ist jedoch in jedem Fall durchzuführen. Dies betrifft insbesondere Annahmen von veränderten Geometriebedingungen in der Simulation zur Optimierung der Stromdichteverteilung. Diese müssen auf ihre Umsetzbarkeit beurteilt werden.

Das Missverhältnis der primären Stromdichte zwischen Lauffläche und Außendurchmesser beim Außenring ist bei der vorgesehenen Anodenkonstruktion durch die unterschiedlichen Abstände bedingt. Eine Änderung der Anodenkonstruktion würde jedoch gleichzeitig auch Veränderungen für den Innenring bedeuten, sofern das Anodensystem nicht für jeden Ringtyp individuell gestaltet und getauscht wird. Ein Wechsel bedeutet zusätzlichen Arbeitsaufwand und eine geringere Reproduzierbarkeit, da die Position jeweils neu ausgerichtet werden muss.

Eine Lösung bei gleichem Anodensystem für beide Ringtypen wurde aus diesen Gründen bevorzugt, was zu einer elektrischen Aufteilung des Aufbaus in eine einzelne Innenanode und die Außenanoden geführt hat. Durch den Anschluss zweier Gleichrichter können unterschiedliche Stromwerte für die einzelnen Kreise vorgegeben und es kann gezielt das Verhältnis zwischen inneren und äußeren Bereichen beeinflusst werden.

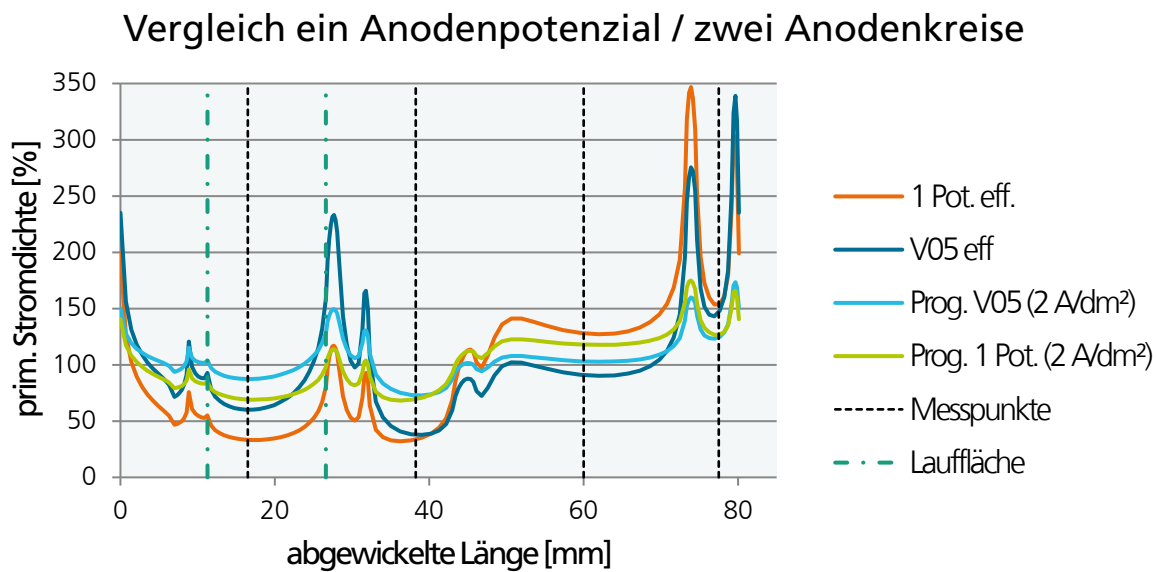


Abbildung 8.13: Simulierte primäre und prognostizierte Stromdichte am Außenring mit einem Potenzial und zwei Anodenkreisen. Bei Rechnung V05 wurde die Stromverteilung entsprechend optimiert, für die Prognoselinien wurde die Gleichung der Gesamt-Punkteauserwertungen verwendet.

Mit einer geeigneten Anpassung der Stromverteilung konnte das Niveau von Außendurchmesser und Lauffläche angeglichen werden. In Abbildung 8.13 sind sowohl die ursprünglichen als auch die optimierten Verläufe inkl. der Prognoselinien eingezeichnet. Unter Berücksichtigung, dass an der simulierten Stelle die äußeren Stromdichten über dem Mittelwert liegen, wird ein nahezu identisches Niveau erreicht. Durch die Verwendung von zwei Gleichrichtern ist die Stromverteilung beeinflussbar und kann während der Inbetriebnahme weiter optimiert werden, ohne mechanische Änderungen durchzuführen.

Rechnung V05 wurde für die Umsetzung der ersten Beschichtungen vorgesehen, da bei der Auswertung der Laufflächenwert und der Messpunkte die geringsten Abweichungen der simulierten Varianten auftraten. In dieser Simulation wurden auch die Höhen der Anoden angepasst und reduziert, dadurch konnten die Spitzen der bei der Beschichtung unten liegenden Kanten verringert werden. Ein Auszug der Rechnungen ist in Abbildung 8.14 gezeigt, der größte Effekt wird dabei durch die Stromverteilung erzielt. Die Eintauchtiefe kann eine leichte Verkipfung des Verlaufs auf dem Außendurchmesser bewirken, sie muss während der Inbetriebnahme an den durch den Überlauf erzeugten Elektrolytspiegel angepasst werden.

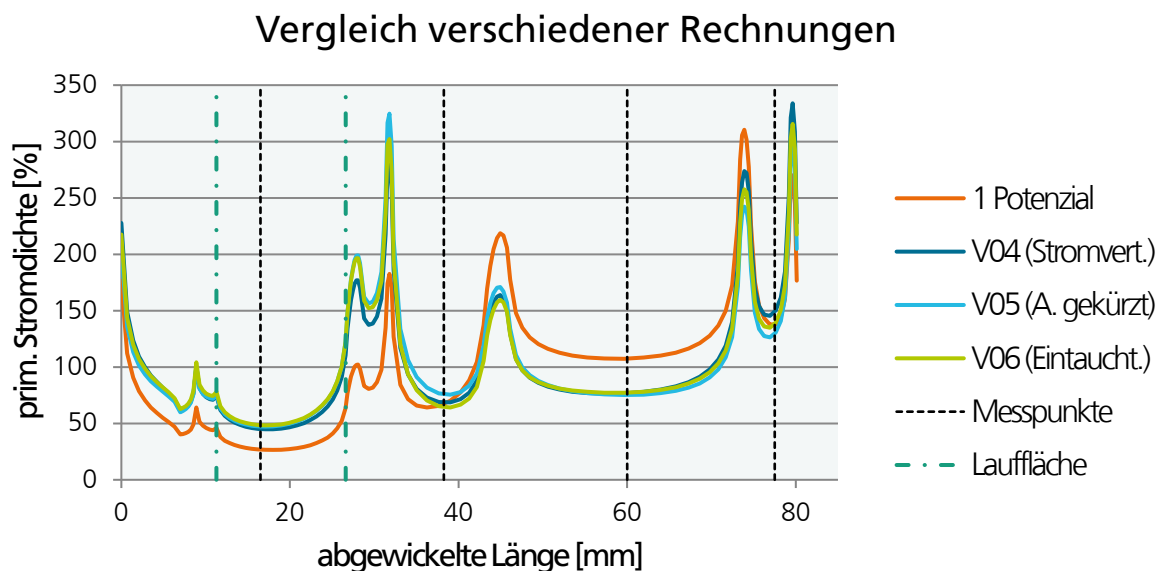


Abbildung 8.14: Vergleich verschiedener Optimierungsrechnungen ohne Rollenblende: Ursprüngliche 1-Potenzial-Rechnung, optimierte Stromverteilung V04, zusätzlich gekürzte Anoden (V05) und erhöhte Eintauchtiefe (17,5 mm bei V06 statt 14 mm).

---

Die Optimierung der Stromverteilung durch zwei Gleichrichter für den Lageraußenring bietet auch für den Innenring die Möglichkeit der gezielten Manipulation der Verhältnisse. Anhand der ersten Daten wurde dies nicht zwingend notwendig, kann jedoch vorteilhaft sein und ist daher als Option positiv zu bewerten. Der Wechsel zwischen dem Betrieb mit einem und zwei Stromkreisen kann im Rahmen der Technikumsanlage durch einfaches Umstecken der Kabel realisiert werden.

In dieser Optimierungsphase wurden noch keine Blenden berücksichtigt. Eine Blendennachrüstung sollte konstruktiv über Befestigungspunkte vorgesehen werden und ist somit während der Optimierungsschleife mit ersten Schichtdickenergebnissen ggfs. leicht machbar. Außer der elektrischen Trennung der beiden Anodenkreise wurden daher mechanisch keine Änderungen am ursprünglichen Konzept erforderlich.

## 8.2 Gesamtsystementwicklung Prototypanlage

Nachdem die Konzepte und Grundaussagen für die Hauptaspekte (Segmente 1 und 2), wie in Kapitel 8.1 beschrieben, abgeschlossen wurden, erfolgte die weitere Entwicklung im Rahmen der Gesamtsystementwicklung bis zur Umsetzung. Die Ausdetaillierung wurde dabei iterativ durchgeführt und die einzelnen Segmente Schritt für Schritt miteinander verbunden. Die ersten Simulationsrechnungen wurden wie beschrieben parallel zum Entwurf durchgeführt, eine weitere Optimierung über ggfs. zusätzliche Blenden sollte nach ersten Versuchen erfolgen. Auf Basis der unter 8 vorgestellten Arbeiten wurden die Vorrichtung inkl. Anodensystem und die Gesamtanlage ausgearbeitet. Dies beinhaltete u. a. die konkrete Werkstofffestlegung, Auswahl von Zukaufteilen und die Festlegung der Fertigungstoleranzen.



## 8.2.1 Ausarbeitung und Realisierung Gesamtsystem

### Detailierung Beschichtungsvorrichtung und Anodensystem

Für die Anlage war zur Gewährleistung zukünftiger Flexibilität vorgesehen, dass optional mehrere Vorrichtungen eingesetzt werden können. Aus diesem Grund wurde eine Schnittstelle notwendig, welche einen Wechsel erlaubt. Diese Schnittstelle wurde am Schlitten der Linearführung definiert, welche ein Absenken der Vorrichtung in das Beschichtungsbad ermöglicht. Die Optimierungsschleifen werden anhand der umgesetzten Vorrichtung beschrieben und durchgeführt, eine entsprechende Übertragung der Vorgehensweise auf andere Aufgabenstellungen und Konstruktionen ist ohne Einschränkungen möglich.

Die Auflagerung inkl. der Rollen und Lager ist zur Vermeidung einer Mitbeschichtung elektrisch nichtleitend ausgeführt, es werden chemisch beständiger und formstabiler Kunststoff (PEEK) und Keramiklager verwendet. Die Kontaktrollen müssen zur Funktionserfüllung elektrisch leitend sein und werden entsprechend auch mitbeschichtet. Um diesen Effekt gering zu halten, wurden wie in der Simulation ermittelt seitliche Abdeckscheiben und eine umgebende Blende vorgesehen (siehe Abbildung 8.15 links). Diese Rollenblenden sind aus nichtleitendem Kunststoff und sorgen für einen geringstmöglichen Spalt, um einen möglichst geringen Stromfluss für die ungewünschte Abscheidung an den Rollen zu erzielen. Gleichzeitig wird dadurch ein Teil des Lagerrings abgeblendet, der diesbezügliche Einfluss wurde bereits in Abschnitt 8.1.2 beschrieben. Eine einzelne Rollenblende deckt dabei einen Winkel von  $60^\circ$  ab.

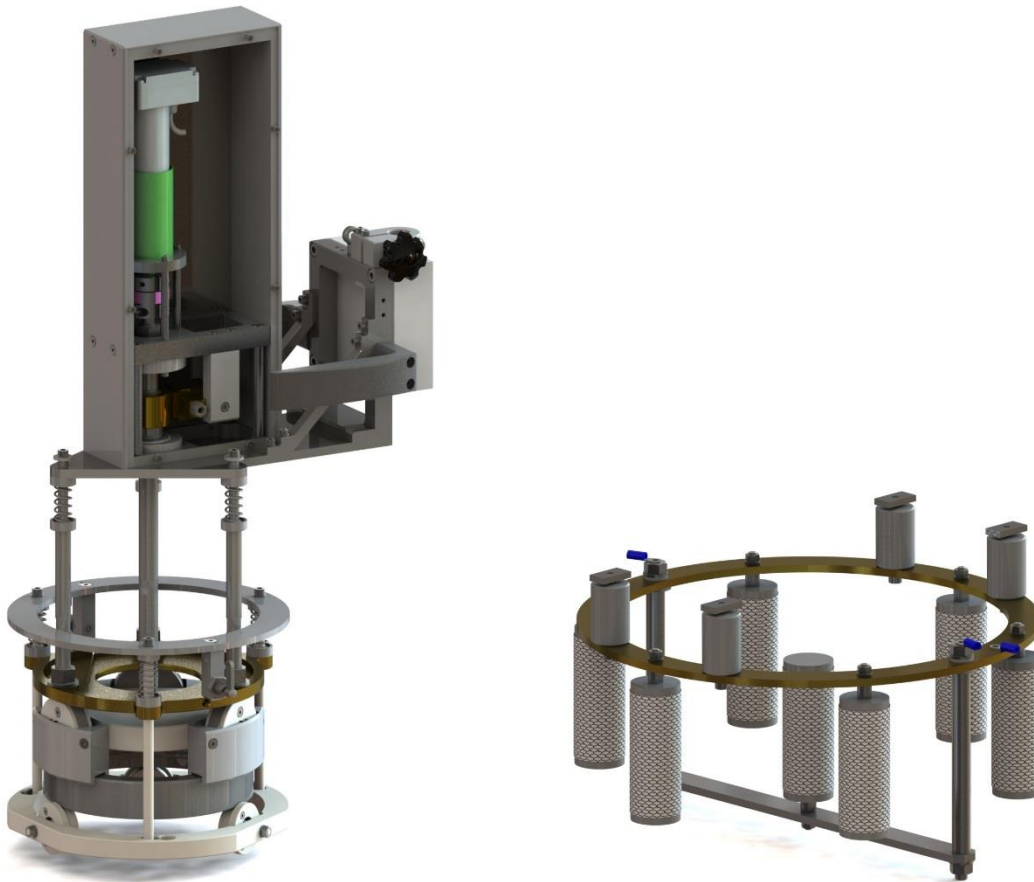


Abbildung 8.15: Ansichten von Horizontalvorrichtung (mit AR) und Anodensystem (gerenderte Darstellungen des CAD-Modells). Links: Horizontalvorrichtung (seitliche Abdeckung ausgeblendet). Rechts: Anodensystem 1. Generation

Oberhalb der Rotationsvorrichtung befinden sich die Mechanik für die Halterung an der Linearführung und die Antriebskomponenten. Der Antriebsaufbau ist vollständig mit einer Einhausung versehen, um die Gefahr durch rotierende Teile zu minimieren. Der gesamte Aufbau setzt auf der Grundplatte auf, welche über eine der Adapterplatten auf dem Linearschlitten montiert wird.

Neben der Vorrichtung ist für die Abscheidung ein Anodenaufbau entscheidend. Durch die erforderliche vollflächige Beschichtung wurden deswegen, wie in Abbildung 8.15 (rechts) gezeigt, eine innere Anode und konzentrisch angeordnete äußere Anoden entworfen. Die Vorrichtung wird dabei entlang des Stativs mit dem Lagerring konzentrisch in den Anodenaufbau abgesenkt. Die Außenanoden sind über einen Messingring verbunden, dieser befindet sich oberhalb des Elektrolytniveaus.

---

## Gesamtanlage

Die grundlegende Anlagenausführung entstand parallel zum Vorrichtungsentwurf. Nach den endgültigen Dimensionierungen der Vorrichtungen erfolgten die Anpassung des Entwurfs sowie die konstruktive Präzisierung aller Komponenten. Insbesondere die Bedienung / Handhabung und Ergonomie wurden neben der Fertigungstechnik in diesem Schritt beachtet.

Die Steuerung bei einer Entwicklungsanlage erfordert eine hohe Flexibilität. Die umfangreichsten Änderungsmöglichkeiten ergeben sich bei einer eigenen Programmierung. Die Steuerung wurde auf einem PC mittels der Software IAS-NT bzw. IASopen (IEC 61131-3 konformes Programmiersystem der Fa. Diener automation) selbst programmiert und mit einer Bedienoberfläche ausgestattet. Über diese Oberfläche werden, abgesehen von einigen sicherheitsrelevanten Aufgaben, alle Funktionen der Anlage gesteuert und Beschichtungsparameter vorgegeben, einige Screenshots der Steuerungsoberfläche finden sich im Anhang unter 12.4.

Neben der Sollwertvorgabe ist für eine Nachvollziehbarkeit der Beschichtungsergebnisse und möglicherweise auftretender Effekte eine Protokollierung der Anlagendaten essenziell. Es können sowohl alle Istwerte in der Oberfläche angezeigt werden als auch für jeden Beschichtungsversuch ein vollständiges Protokoll erstellt werden (vgl. Anhang, Abbildung 12.3). Neben dem Protokoll können das Diagramm als einzelnes Bild und die vollständigen Rohdaten mit allen Beschichtungswerten als Textdatei gespeichert werden. Dies erlaubt eine umfangreiche Auswertung und lückenlose Dokumentation der Versuche.

## Verfahrenstechnik und Peripherie

Da die Verfahrenstechnik nicht Bestandteil der Arbeit war, wurden nur deren relevante (Zwischen-)Ergebnisse in die Entwicklung integriert. Für die Peripherie waren keine besonderen Planungen notwendig, da das Technikum über die notwendige Infrastruktur verfügt.

## 8.2.2 Aufbau und Grundfunktionsprüfung

Nach Abschluss der beschriebenen Vorarbeiten und dem Erstellen der technischen Zeichnungen wurden die Einzelteile gefertigt, die Anlage montiert und im Technikum aufgestellt (Abbildung 8.16). Nachfolgend konnte der Anschluss an die Infrastruktur und die elektrotechnische Fertigstellung erfolgen.



Abbildung 8.16: Ansicht der Anlage nach Aufstellung im Technikum. An beiden Aktivstationen ist je eine Horizontalvorrichtung angebracht, welche für die Durchführung der Beschichtungsversuche eingesetzt wurden.

Im Zuge der elektrotechnischen und steuerungstechnischen Inbetriebnahme wurde die Funktion und Steuerbarkeit der einzelnen Komponenten geprüft, welche wiederum die Grundfunktionsprüfung mit einer Erstbefüllung mit Wasser erlaubte.



Abbildung 8.17: Horizontalvorrichtung (links), Anodensystem mit Behälter (rechts); jeweils vor den ersten Beschichtungen bzw. dem Befüllen der Anlage

Die Vorrichtung wurde ebenfalls wie konzipiert hergestellt und an die Anlage montiert. In Abbildung 8.17 (links) ist die realisierte Horizontalvorrichtung abgebildet, welche über die Stativführung in das im Behälter angebrachte Anodensystem (Abbildung 8.17 rechts) eingefahren wird.

Mit Aufstellung und Inbetriebnahme der Anlage wurde die Grundlage für Beschichtungsversuche geschaffen. Diese Tests erlauben sowohl eine Validierung der Auswahlmethode und der vorgestellten Vorgehensweise zur Simulation als auch eine Optimierung im laufenden Betrieb und die Applikation von Schichten für weitere Prüfungen im Rahmen der Schichtentwicklung.

### 8.3 Validierung und Optimierung

Das übergeordnete Ziel der experimentellen Untersuchung war die Beschichtung von Wälzlagerringen für deren Tests auf Prüfständen. Darüber hinaus wurden die Funktion der Anlage bzw. des Vorrichtungskonzepts und damit der Erfolg der Vorgehensweise kontrolliert und bewertet. Für diese Validierung wurde speziell die Funktion der Vorrichtung untersucht und die ermittelte Schichtverteilung mit den Planungsannahmen verglichen. Anhand der Ergebnisse erfolgte eine weitere Optimierung.

Aus der parallel laufenden Verfahrensentwicklung wurde als Elektrolytssystem / Schichtwerkstoff eine Nickel-Wolfram-Legierungsabscheidung (NiW) gewählt. Die diesbezüglichen Parameter werden in dieser Arbeit nur soweit für den Zusammenhang notwendig vorgestellt. Da sich das gewählte Verfahren in der Entwicklung befindet, waren vorab nicht alle Verhaltensweisen bekannt und es wurden im Lauf der Versuche verschiedene Änderungen vorgenommen. Für die Durchführung von Versuchen mit einem bekannten Elektrolyten (neben dem experimentellen Elektrolytssystem NiW) wurde eines der Bäder für die Beschichtung mit Reinnickel (Ni) genutzt. Dies erlaubte die Prüfung des Vorrichtungsverhaltens mit zwei unterschiedlichen chemischen Medien.

Die Beschichtungsversuche wurden mit speziell hergestellten Wälzlagerringen des gewählten Typs 7218-B-TVP durchgeführt, welche mit einem definierten Untermaß von 25  $\mu\text{m}$  oder 50  $\mu\text{m}$  gefertigt wurden. Jeder einzelne Ring wurde dabei nummeriert angeliefert. Diese Nummerierung wurde zur Identifikation (neben der Versuchsnummer) beibehalten. Da die Nummern je nach Untermaß gleich sein konnten, wurde zur Eindeutigkeit die Zeichnungskennziffer mit übernommen (16 für Untermaß -50  $\mu\text{m}$ , 17 für -25  $\mu\text{m}$ ) und dem Ringtyp vorangestellt. Grundwerkstoff der Ringe ist der Wälzlagerstahl 100Cr6, die für die Beschichtung relevante Oberfläche wurde anhand des CAD-Modells ausgemessen. Die relevanten Daten sind in Tabelle 8.1 aufgelistet.

Tabelle 8.1: Zusammengefasste Daten der Wälzlageringringe

<b>Lagertyp 72188-B-TVP</b>	Innenring (IR)	Außenring (AR)
<b>Oberfläche</b>	2,8 dm <sup>2</sup>	3,8 dm <sup>2</sup>
<b>Innendurchmesser</b>	90 mm	133,4 mm
<b>Außendurchmesser</b>	117,5 mm	160 mm
<b>Breite</b>	30 mm	30 mm

Für die Vorgabe der Nennstromdichte wurde die Gesamtoberfläche der Lageringringe herangezogen, die Kontaktrollen wurden nicht separat berücksichtigt. Durch die unterschiedlichen Durchmesser stellt sich bei gleicher Drehzahl eine unterschiedliche Relativgeschwindigkeit zwischen Lagering und Elektrolyt ein. Hier wurde bei Versuchen mit möglichst identischen Bedingungen für Innen- und Außenring ggfs. das Verhältnis von 0,73 der Außendurchmesser (IR/AR) verwendet und der Innenring entsprechend langsamer rotiert.

### 8.3.1 Inbetriebnahme und erste Versuche (Reinnickel)

Zur Inbetriebnahme mit den ersten Versuchen kam ein Reinnickel-Elektrolyt auf Basis von Nickelsulfat mit Borsäure zum Einsatz. Diese Elektrolytzusammensetzung wird mit verschiedenen Netzmitteln und Konzentrationen häufig für funktionale Nickelschichten eingesetzt, das Verhalten ist daher bekannt und wird für die Anlage als Referenz verwendet. Das Ziel dieser Erstversuche ist die Generierung von Ergebnissen zur Beurteilung der prinzipiellen Funktion und ggfs. der Ableitung eines Änderungsbedarfs vor der Verwendung des geplanten Elektrolyten mit Nickel-Wolfram (NiW).

#### Versuchsparameter

Die Parameter des verwendeten Nickelelektrolyten wurden von bereits in der Verfahrensentwicklung als Referenz genutzten Medien übernommen (siehe Anhang, Tabelle 12.10). Die Einstellung des pH-Werts erfolgte manuell vor Beginn einer Beschichtung. Während der Abscheidung wurden keine Veränderungen vorgenommen. Die Elektrolytzusammensetzung wurde vor den Beschichtungsversuchen analysiert und auf die korrekten Werte eingestellt. Auf Grund der guten Elektrolytstabilität wurden nach der ersten Einstellung,

abgesehen vom pH-Wert, nur in größeren Abständen chemische Analysen durchgeführt. Die Anströmung erfolgte indirekt, das Einströmrohr war nach unten auf den Boden gerichtet. Durch den Überlauf wurde eine konstante Durchmischung des Elektrolyten sichergestellt.

Zur Vorbehandlung wurde die in der Verfahrensentwicklung genutzte und in Tabelle 12.9 dargestellte Abfolge verwendet. Das Umsetzen der Lagerringe zwischen den einzelnen Schritten wurde dabei nass-in-nass durchgeführt, bei längeren Transportwegen wurden die Ringe in einem Wasserbad befördert.

Als Beschichtungsdauer wurden 100 Min. bei der gewählten Stromdichte von  $2 \text{ A/dm}^2$  gewählt, um eine ausreichende Schichtdicke zu erhalten und die Vorrichtung über einen relevanten Einsatzzeitraum zu prüfen. Die Stromverteilung für Innen- und Außenanode wurde wie in der Simulation errechnet vorgenommen:

- Innenring ohne spezielle Verteilung, nur ein Gleichrichter (gleiches Potenzial für Innen- und Außenanode)
- Außenring mit Anteil 45 % des Gesamtstroms auf Außenanode und 55 % auf Innenanode

Der Wechsel zwischen einem und zwei Anodenkreisen erfolgte händisch durch unterschiedlichen Anschluss an den bzw. die Gleichrichter.

### Metallografisches Vorgehen zur Auswertung

Die Auswertung erfolgte über Querschliffe und visuelle Begutachtungen. Für die visuelle Analyse ist zu beachten, dass die Langerringe unterschiedliche Bearbeitungszustände an verschiedenen Bereichen aufweisen: Während die Lauffläche und der Einbaudurchmesser glänzend feinstbearbeitet / poliert sind, weisen die breiten Stirnseiten eine Schleifstruktur auf. Für die Querschliffe der ersten Versuche wurde noch eine von der in Abbildung 8.9 abweichende Auswertungsrichtlinie mit weniger Punkten verwendet, da die endgültige Vorgehensweise nach diesen Tests nochmals angepasst wurde.



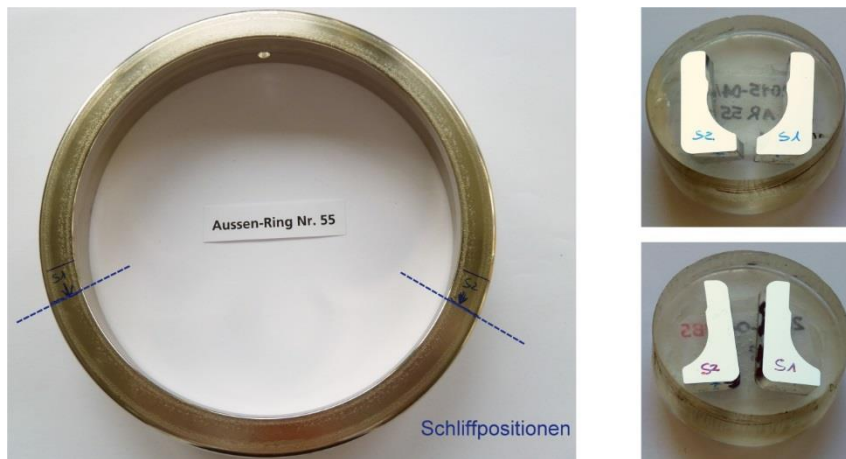


Abbildung 8.18: Entnommene Segmente für Querschliffe links am Beispiel Außenring, rechts eingebettete Schliffe für Außenring (oben) und Innenring (unten).

Als Querschliffe wurden aus jedem Ring zwei Segmente in einem willkürlich gewählten Winkel von ca.  $120^\circ$  entnommen (Abbildung 8.18), welche gemeinsam präpariert und analysiert wurden. Die Schichtdicken und ggfs. Härtewerte wurden für beide Segmente an den festgelegten Punkten vermessen und tabellarisch erfasst. Zur Gesamtauswertung eines Rings bzw. zur Gegenüberstellung wurde für die korrespondierenden Punkte der Mittelwert herangezogen. Zur optischen Begutachtung wurden Sichtbegutachtungen mit Dokumentation über Makroaufnahmen durchgeführt und ggfs. eine zusätzliche Analyse über ein Stereomikroskop ergänzt.

### Versuchsdurchführung und Auswertung

Für den jeweils ersten Versuch eines Außen- und Innenrings wurden die Bauteildrehzahlen frei gewählt und auf 30 U/min bzw. 22 U/min festgelegt (entspricht einer Umfangsgeschwindigkeit am jeweils größten Durchmesser von 0,25 m/s bzw. 0,13 m/s), um etwaige Strömungseffekte sichtbar zu machen. Die Versuche EV01 wurden jeweils mit Rollenblende zum Abblenden der Kontaktrollen durchgeführt und verliefen während der Beschichtung ohne Auffälligkeiten. Die Funktion des erarbeiteten Konzepts war mechanisch wie erwartet und erlaubte die Rotation des Lagerrings bei gleichzeitiger Kontaktierung. Durch die Kontaktrollen wurde über die Kontaktscheibe gleichmäßig Strom übertragen und es kam zu keinen nennenswerten Schwankungen bezüglich Spannung / Strom (siehe Diagramm des Versuchs in Abbildung 12.4). Einzig der aufgezeichnete Temperaturverlauf

des Bads wies sichtbare Schwankungen auf. Dies ist durch die Nachdosierung von kaltem Frischwasser zu erklären und wirkt sich im Überlaufabteil mit relativ geringem Volumen verstärkt aus. Die Badtemperatur im Beschichtungsbereich unterliegt geringeren Abweichungen.

Das Verhalten der Vorrichtung war sowohl für den Innenring als auch für den Außenring vergleichbar und damit gleichermaßen erfolgreich. Auf der Kontaktscheibe waren leichte Spuren der Rollbereiche und Elektrolytablagerungen erkennbar, diese konnten jedoch durch Reinigung entfernt werden. Eine nachhaltige Beeinträchtigung trat nicht auf. Eine Beschichtung der Kontaktrollen wurde nur in sehr geringem Maß optisch festgestellt.

In der optischen Beurteilung der Ringe wurden auf der Kontaktfläche starke Unregelmäßigkeiten festgestellt, eine durchgehende Schicht war nicht sichergestellt. Die übrigen Bereiche der Ringe, d. h. auch die auf den Auflagerrollen rotierende schmale Stirnseite, wiesen optisch eine glänzende Schicht auf (Abbildung 8.19). Die Schichtqualität in diesen Bereichen erschien somit bereits sehr gut, obwohl sich der Elektrolyt noch in der Einarbeitungsphase befand.



Abbildung 8.19: Makroaufnahmen der ersten Ringbeschichtungen. Links: Gesamtansicht des Außenrings AR55 aus EV01. Rechts: Detailaufnahmen der Kontaktfläche (oben: Außenring AR55, unten: Innenring IR1)

Die unterschiedlichen Bereiche im Kontaktflächenbereich wurden auf den Abrollvorgang zurückgeführt, welcher durch die abweichende Umfangsgeschwindigkeit bei gleichbleibender Rollengeschwindigkeit auf der Kontaktlinie entsteht.

In der metallografischen Auswertung ergab sich ein Schichtdickenmittelwert von 39,3  $\mu\text{m}$  für den Außenring und 42,2  $\mu\text{m}$  für den Innenring. Die Kontaktfläche wies durch die Rollenblende eine niedrigere Schichtstärke und eine hohe Schwankung zwischen inneren und äußeren Regionen auf:

- Innenring IR1: Mittelwert 17,6  $\mu\text{m}$  bei Werten von 11,8  $\mu\text{m}$  bis 22,8  $\mu\text{m}$
- Außenring AR55: Mittelwert 24,4  $\mu\text{m}$  bei Werten von 12,2  $\mu\text{m}$  bis 39,5  $\mu\text{m}$

Auf den Laufflächen und Einbaudurchmessern konnte eine unzureichende Verteilung festgestellt werden (siehe Tabelle 8.2). Die Mittelwerte lagen innerhalb einer für den ersten Versuch akzeptablen Spannweite, die hohen Maximalwerte am jeweils untersten Messpunkt der Einbaudurchmesser deuten jedoch auf eine inkorrekte Positionierung zur Anode hin. Ein signifikanter Einfluss der unterschiedlichen Umfangsgeschwindigkeiten auf die Schicht konnte nicht festgestellt werden.

Tabelle 8.2: Übersicht Schichtdicken auf Laufflächen und Einbaudurchmessern

Ring	Lauffläche			Einbaudurchmesser		
	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum
<b>IR1</b>	45,9 $\mu\text{m}$	38,3 $\mu\text{m}$	63,7 $\mu\text{m}$	43,0 $\mu\text{m}$	28,5 $\mu\text{m}$	64,9 $\mu\text{m}$
<b>AR55</b>	36,0 $\mu\text{m}$	31,2 $\mu\text{m}$	45,1 $\mu\text{m}$	43,1 $\mu\text{m}$	34,9 $\mu\text{m}$	56,1 $\mu\text{m}$

Eine genauere Auswertung der Schichtdickenverläufe wurde auf die Nickel-Wolfram-Versuche verschoben, anhand derer ein weiterer Optimierungsbedarf ermittelt werden sollte.

Aus den ersten Versuchen ergab sich die kontaktierte Stirnseite als Schlüsselstelle für die Schichtbildung. In den nächsten Tests wurde somit die Variation der Bauteildrehzahl – und damit der Anzahl der Überrollbewegungen der Kontaktrollen – geprüft. Die Reduzierung der Rotation (6 U/min bzw. Umfangsgeschwindigkeit 0,04 m/s) musste im Versuch EV02 abgebrochen werden: Es traten extreme Schwankungen der Strom- und Spannungswerte auf, welche auf Probleme bezüglich der Ringkontaktierung zurückzuführen

waren. Die geringe Drehzahl führte zu einer geringeren Benetzung der Kontaktrollen außerhalb des Elektrolytniveaus, welche sich in einer Antrocknung und Auskristallisierung des Elektrolyten auf Kontaktrollen und -scheibe niederschlug (Abbildung 8.20). Diese Ablagerungen behinderten die Stromübertragung und erzeugten Spannungsüberschläge mit Anbrennungen, welche bei längerer Dauer sowohl die Kontaktscheibe als auch die Rollen nachhaltig schädigen würden.



Abbildung 8.20: Kontaktrolle und Kontaktscheibe nach EV02 (IR25) mit 6 U/min. Erkennbar sind die Ablagerungen und Anbrennungen, welche eine Stromübertragung behindern bzw. verhindern.

Durch den Abbruch des Versuchs konnten Rollen und Scheibe über Reinigen und Schleifen wiederhergestellt werden, ein Austausch war nicht erforderlich. Die gegenteilige Herangehensweise mit einer Erhöhung der Rotationsgeschwindigkeit (40 U/min) brachte keine Verbesserung der Kontaktfläche verglichen zum ersten Versuch.

Als mögliche Ursachen wurden die Rollenblende oder die rollende Kontaktierung identifiziert, weshalb die Rollenblenden für den zweiten Versuch mit einem Außenring (AR25) entfernt wurden. Als Resultat wurde auch auf der Kontaktierungsseite eine optisch einwandfreie Schicht abgeschieden, welche sich nicht von den anderen Lagerseiten unterschied (Abbildung 8.21). Dieses Ergebnis wurde durch die Beschichtung eines Innenrings ohne Rollenblenden verifiziert.

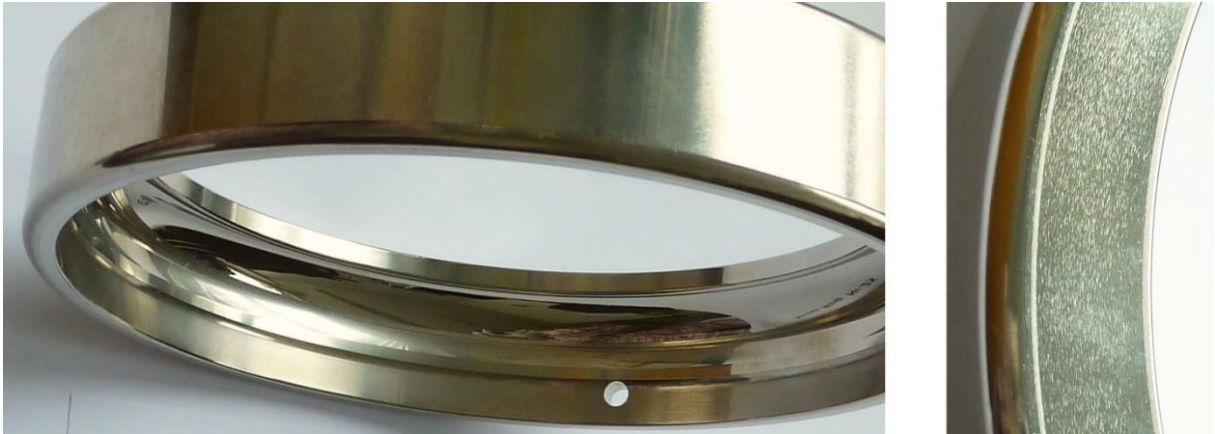


Abbildung 8.21: Außenring 25 nach Beschichtung ohne Kontaktrollenblende. Links Makroansicht des gesamten Rings mit Blick auf Außendurchmesser und Lauffläche, rechts Detailausschnitt der Kontaktfläche mit Abbildung der geschliffenen Struktur des Grundmaterials.

Die rollende Kontaktierung stellt somit für den Reinnickel-Elektrolyten kein Hemmnis für die Schichtbildung dar. Durch die fehlenden Abschirmungen werden die Kontaktrollen nun verstärkt beschichtet, dennoch konnte in der metallografischen Auswertung des Außenrings auf der Kontaktfläche ein höherer Mittelwert ( $32\ \mu\text{m}$ ) bei mit  $7,1\ \mu\text{m}$  geringerer Standardabweichung festgestellt werden (Minimum  $25,7\ \mu\text{m}$  und Maximum  $41,3\ \mu\text{m}$ ).

### Schlussfolgerungen und Änderungsbedarf

Die ersten Versuche sollten vorrangig die prinzipielle Funktion der Vorrichtung sicherstellen, d. h. das Erzeugen einer vollflächigen Schicht. Bezüglich der Mechanik sind keinerlei Fehler aufgetreten, die Gesamtanlage erlaubt eine kontrollierte Beschichtung mit ausführlicher Dokumentation. Die entwickelte Auswahlmethode und die verwendeten Kriterien führten zu einem guten Ergebnis.

Die Kontaktierung funktioniert mit der Einschränkung, dass bei geringen Drehzahlen je nach Elektrolyt eine Auskristallisierung einsetzen kann. Diesbezüglich ist ein borsäurehaltiger Nickelelektrolyt besonders anfällig. Der Effekt ist jedoch auch bei anderen Elektrolyten zu berücksichtigen, eine Abhilfemaßnahme wäre eine konstante Benetzung der Rollen

und der Kontaktscheibe. Diese Maßnahme wurde vorläufig nicht umgesetzt, da die Funktion bei ausreichender Drehzahl sichergestellt ist und die benötigten Drehzahlen ohne Verwendung einer Rollenblende auch eine durchgehende Schicht erzeugen.

Auf der Kontaktscheibe sind die Laufbereiche der Kontaktrollen deutlich zu erkennen, mit leichten Riefen an den Randbereichen. Dies ist in der verstärkten Beschichtung der Rollen an den Kanten begründet. Als Verbesserung werden die Rollen mit einer Fase zum Rand hin ausgestattet. Dies verringert zwar die Auflagefläche, stellt jedoch eine längere Lebensdauer sicher und ist bei den geplanten Stromstärken akzeptabel.

Die ersten Ergebnisse der Schichtdickenverteilung ergaben bereits zu diesem Zeitpunkt einen weiteren Optimierungsbedarf. Die Auslegung von Blenden wurde für die weitere Verbesserung notwendig und erfolgte parallel zu den nachfolgend beschriebenen ersten Nickel-Wolfram-Beschichtungen.

### 8.3.2 Erstversuche Nickel-Wolfram

Die chemische Zusammensetzung des Nickel-Wolfram-Legierungselektrolyten unterscheidet sich von der eines Reinnickel-Elektrolyten. Daher wurde auch dessen Verhalten in einer Erstversuchsreihe untersucht. Als Hauptziele sind dabei die Einarbeitung des Elektrolyten, erste Erkenntnisse zu dessen Verhalten bei größerem Elektrolytvolumen und eine Einschätzung der realen Schichtdickenverteilung zu nennen.

Für die späteren Prüfstandversuche der Lagerringe ist eine zerstörende metallografische Untersuchung zur Schichtdickenkontrolle nicht möglich, daher wurde im Rahmen dieser ersten Versuche eine zerstörungsfreie Vermessung mittels einer 3D-Koordinatenmessmaschine vorgenommen und diese Ergebnisse mit den nachfolgend durchgeführten Querschliff-Auswertungen verglichen. Eine Messung der Schichtdicke mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) ist nicht bei allen Schichtdicken und wegen der Lagergeometrie nicht an allen relevanten Positionen möglich. Zusätzlich kann eine 3D-Messung weitere Aussagen zu Formtoleranzen liefern.

## Versuchsparameter

Der Nickel-Wolfram-Elektrolyt wurde durch die Verfahrensentwicklung vorgegeben, einige Grundparameter sind in Tabelle 12.11 erfasst. Die Vorgehensweise und Vorbehandlung erfolgte entsprechend den Reinnickel-Beschichtungen und deren Ergebnisse. Die für die Schichtbildung kritischen Rollenblenden wurden daher nicht eingesetzt.

Als Änderung zum Nickel-Elektrolyten wurde das Kontaktrollenmaterial aufgrund der besseren alkalischen Beständigkeit von Messing zu Edelstahl geändert. Die Zielschichtdicke der Beschichtungen lag bei 25 µm. Dies entspricht der vorgesehenen Beschichtungstärke für Ein-Schichtsysteme. Da das Untermaß der Ringe für die Versuche mit metallografischer Auswertung keine Rolle spielt, wurden Ringe von beiderlei Fertigungsabmessungen genutzt. Eine Übersicht der Versuche und relevanter Einstellungen ist in Tabelle 8.3 zu finden.

Tabelle 8.3: Übersicht der Erstversuchsreihe für Nickel-Wolfram

<b>Versuch NiW-</b>	<b>EV01</b>		<b>EV02</b>		<b>EV03</b>	<b>EV04</b>
<b>Typ</b>	AR	IR	AR	IR	IR	IR
<b>Ringnr.</b>	154	18	35	7	45	48
<b>Ringuntermaß [µm]</b>	-50	-50	-25	-25	-25	-50
<b>Stromdichte [A/dm<sup>2</sup>]</b>	2	2	2	2	2	2
<b>Gesamtstrom [A]</b>	7,6	5,6	7,6	5,6	5,6	5,6
<b>Außenanode</b>	45 %	1 Pot.	45 %	1 Pot.	75 %	75 %
<b>Innenanode</b>	55 %		55 %		25 %	25 %
<b>Bauteildrehzahl [U/min]</b>	50	50	50	50	50	10
<b>Dauer [min]</b>	110	160	275	275	275	275

Die Stromverteilung für Innen- und Außenanode blieb für den Außenring für die ersten Versuche gleich. Für den Innenring wurden sowohl Versuche mit einem Potenzial als auch mit vorgegebener Verteilung durchgeführt, da eine Vorgabe eine verbesserte Beeinflus-

sung erlaubt. Die Versuchsdauer konnte nur schwer für die Zielschichtdicke vorherbestimmt werden, da die Abscheiderate des Elektrolyten abhängig von der Zusammensetzung ist und der durch die löslichen Anoden ansteigende Nickelgehalt einen Einfluss hat.

### Zerstörungsfreies Messverfahren

Für die Vermessung dreidimensionaler Geometrien sind Koordinatenmessgeräte geeignet. Ein taktiles Messgerät ist zu diesem Zweck am Institut vorhanden und wurde für die Messungen genutzt. Die Messungen wurden hierbei von Fachpersonal durchgeführt, die Vorgehensweise wurde vorher abgestimmt. Als Messtaster wurde eine Kugel mit 5 mm Durchmesser genutzt. Dies erlaubt die Vermessung der Lauffläche mit leichter Hinter-schneidung ohne Kollision des Schafts mit dem Lagerring.

Der Lagerring wurde für die Messung mit der breiten Stirnseite (Kontaktfläche) nach unten positioniert, um eine Vermessung beider Durchmesser ohne neue Referenzierung zu ermöglichen. Die Z-Achse entspricht somit der Ringbreite senkrecht zu den Stirnflächen. Für jeden Lagerringtyp wurden zwei Messpositionen definiert, an diesen wurde der Durchmesser vermessen. Die Positionen entsprachen am Innenring den Messpunkten 3 und 17 und am Außenring den Nummern 4 und 19 nach Abbildung 8.9. Als Referenzierung der Maschine erfolgte die Bestimmung der Lagerachse durch Antasten. Der Z-Nullpunkt wurde durch Antasten von drei Punkten an der schmalen Stirnseite ermittelt (im Bereich der Messpunkte 22 / IR bzw. 23 / AR). Für eine möglichst exakte Positionierung in z-Richtung wurde die geplante Nennschichtdicke mit dem Z-Nullpunkt verrechnet, auf diese Art konnte bei Messungen vor und nach einer Beschichtung eine hohe Übereinstimmung der Messpositionen erreicht werden.

Die Messungen wurden zur Ermittlung der Schichtdicke und der Toleranzen der Einbaudurchmesser durchgeführt. Darüber hinaus gehende Analysen wurden nicht durchgeführt, da die Grenzwerte vertrauliche Angaben des Lagerherstellers sind, teilweise nicht bekannt waren und auch nicht veröffentlicht werden können. Viele Eigenschaften können auch nur mit speziellen Prüfeinrichtungen bewertet werden. Vor den Prüfstandtests wurden durch den Lagerhersteller detailliertere Messungen durchgeführt (siehe 8.3.5).



## Versuchsdurchführung und Auswertung

Der Erstversuch EV01 diente zu einer Annäherung an die geplante Nennschichtdicke von 25  $\mu\text{m}$ , da die Abscheidegeschwindigkeit während der Verfahrensentwicklung durch veränderliche Elektrolytbedingungen nicht exakt bestimmt werden konnte. Mit dem Versuchspaar EV02 wurden Ringe beschichtet, welche nahe an der Nennschichtdicke lagen und somit eine erste Referenz darstellten.

Die Abscheidung verlief bei beiden Versuchspaaren erfolgreich. Es konnte eine optisch ansprechende Schicht vollflächig abgeschieden werden. Ein beispielhaftes Ergebnis ist in Abbildung 8.22 dargestellt. Auffällig waren unterschiedliche Mattierungsgrade, welche durch unterschiedliche Stromdichtebereiche erklärt werden können. Ausnahmen stellten die Kontaktflächen und die Auflagebereiche dar. Die Auflagebereiche erschienen mit einem hohen Glanzgrad – wobei die schmale Stirnseite auch eine Region mit erhöhter primärer Stromdichte darstellt.

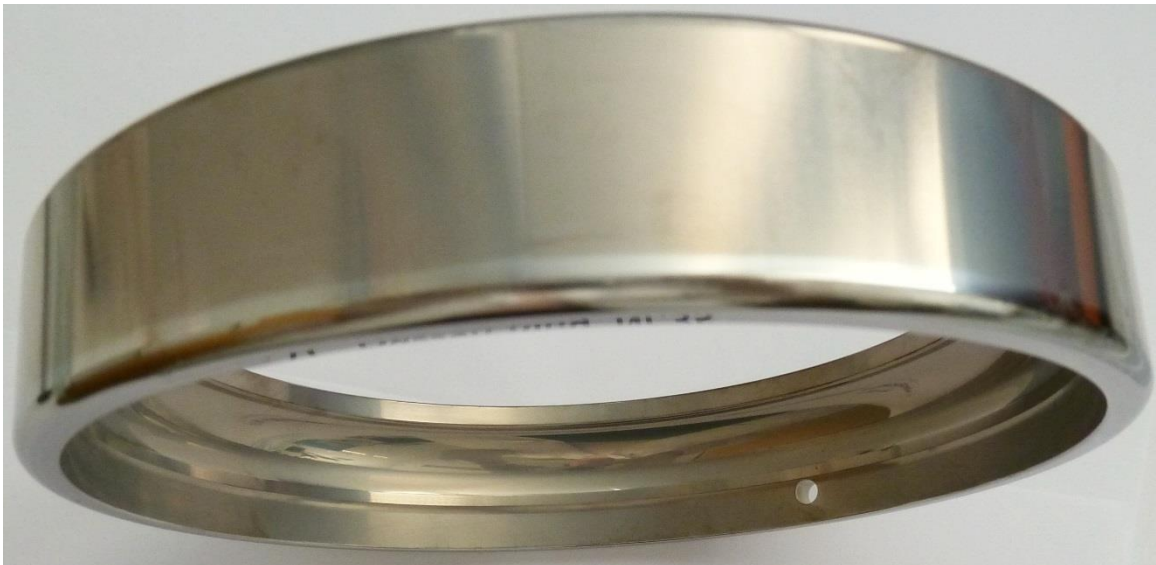


Abbildung 8.22: Außenring 35 aus NiW-EV02 . Erkennbar sind die glänzenderen Bereiche an der schmalen Stirnseite und die insgesamt optisch gute Beschichtung.

Die Kontaktflächen wiesen Unregelmäßigkeiten auf, welche jedoch deutlich geringer waren als die von den Versuchen mit Rollenblende und Nickel bekannten Effekte und größtenteils rein optische Veränderungen darzustellen scheinen (Abbildung 8.23).



Abbildung 8.23: Kontaktflächen-Detailansichten des Innenrings 18 (EV01, links) und Außenrings 35 (EV02, rechts)

Ein potenziell problematischer Effekt wurde bei der Auswertung der Beschichtungsprotokolle festgestellt. Es traten zunehmend Unregelmäßigkeiten im Spannungsverlauf während der Beschichtung auf. Diese konnten, anders als bei den Nickel-Beschichtungen, nicht mit Ablagerungen / Kristallbildungen auf Kontaktscheibe und Kontaktrollen erklärt werden, da die Kristallisationsneigung des vorliegenden Elektrolyten signifikant geringer war und nur geringe Ablagerungen neben den Rollenbereichen auf der Kontaktscheibe festgestellt wurden. Die Kontaktrollen wiesen eine Beschichtung auf, welche zwar nicht komplett haftfest und speziell in den Randbereichen unregelmäßig ausgebildet war (Abbildung 8.24), jedoch keine ausreichende Erklärung für die massiven Schwankungen liefern konnten. Vereinzelt Schichtbestandteile konnten bei der Entnahme der Lagerringe auf der Auflagerscheibe bemerkt werden. Die inhomogene Oberfläche kann eine Ursache für die optischen Effekte auf der Kontaktfläche sein.



Abbildung 8.24: Kontaktrolle nach zwei Nickel-Wolfram-Beschichtungen

Die Schwankungen des Spannungsverlaufs betrafen im Fall des Außenrings mit zwei Anodenkreisen auch nur die Innenanode, der Außen-Anodenkreis wies gleichmäßige Strom-/Spannungskurven auf (beispielhaft Protokollbild im Anhang, Abbildung 12.5). Als Grund konnte die Innenanode selbst identifiziert werden, die Reinnickel-Anodenpellets schienen verstärkt zu passivieren und durch eine ungenügende Kontaktfläche konnte es beim Verutschen einzelner Pellets zu einem erhöhten Übergangswiderstand zwischen Titan-Grundkonstruktion und Anodenmaterial kommen. Durch das höhere anliegende anodische Potenzial wurde darüber hinaus stellenweise die schützende Passivschicht des Titans beeinträchtigt und es kam an der Tragkonstruktion zu Lochfraß. Die Teile wurden gereinigt, abgeschliffen und zum Schutz mit Abdecklack umhüllt.

Ein Einfluss dieses Kontaktierungsproblems auf die Schichtdickenverteilung der Innenringe konnte durch die Verwendung von einem Potenzial nicht ausgeschlossen werden. Bei einem erhöhten Übergangswiderstand an einer Anode verändert sich zwangsweise auch der Stromfluss. Es wurden somit zwei weitere Versuche mit zwei Anodenkreisen und vorgegebener Stromverteilung durchgeführt.

Mit steigender Schichtdicke und Versuchsanzahl wurden in den Bereichen der schmalen Stirnseite verstärkt Risse und Abplatzungen festgestellt (siehe Abbildung 8.25). Da aus der Verfahrensentwicklung eine Zunahme der Eigenspannungen bei höheren Stromdichten bekannt war und diese Regionen sowohl eine hohe primäre Stromdichte als auch einige Kanten aufwiesen, wurde dies als Ursache der Risse identifiziert.

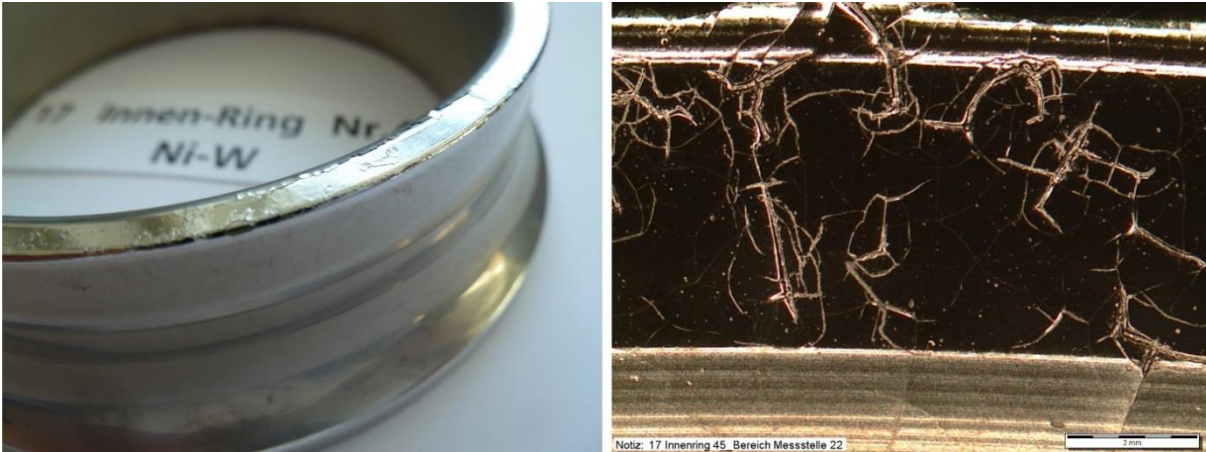


Abbildung 8.25: Schmale Stirnseite des Innenrings 45 (EV03) . Links abgebildet ist eine Makrofotografie, rechts eine Stereomikroskopaufnahme (Draufsicht)

Eine verstärkte Häufung der Risse trat an fertigungstechnisch bedingten minimalen Ab-sätzen / Kanten auf. Eine Wechselwirkung mit der Rollbewegung als Auflage konnte nicht ausgeschlossen werden, wurde anhand der vorliegenden Daten jedoch als unwahrscheinlich eingestuft.

Die Schichtdickenverläufe stellten sich durch die unterschiedlichen Beschichtungszeiten und die Innenanoden-Problematik als schwer auswertbar dar, es konnten jedoch einige wichtige Erkenntnisse gewonnen werden. In Abbildung 8.26 sind die Schichtdickenverläufe der Innenringe dargestellt. Während die niedrigen Werte von EV01 durch die geringere Beschichtungsdauer erklärt werden können, ist durch die steigenden Verläufe eindeutig eine zunehmende Abscheiderate sichtbar. Signifikant ist auch die stark abnehmende Schichtdicke des Innendurchmessers von unten nach oben (MS1 bis MS5), was auf eine zu lange Anode und nicht passende Eintauchtiefe hindeutet.

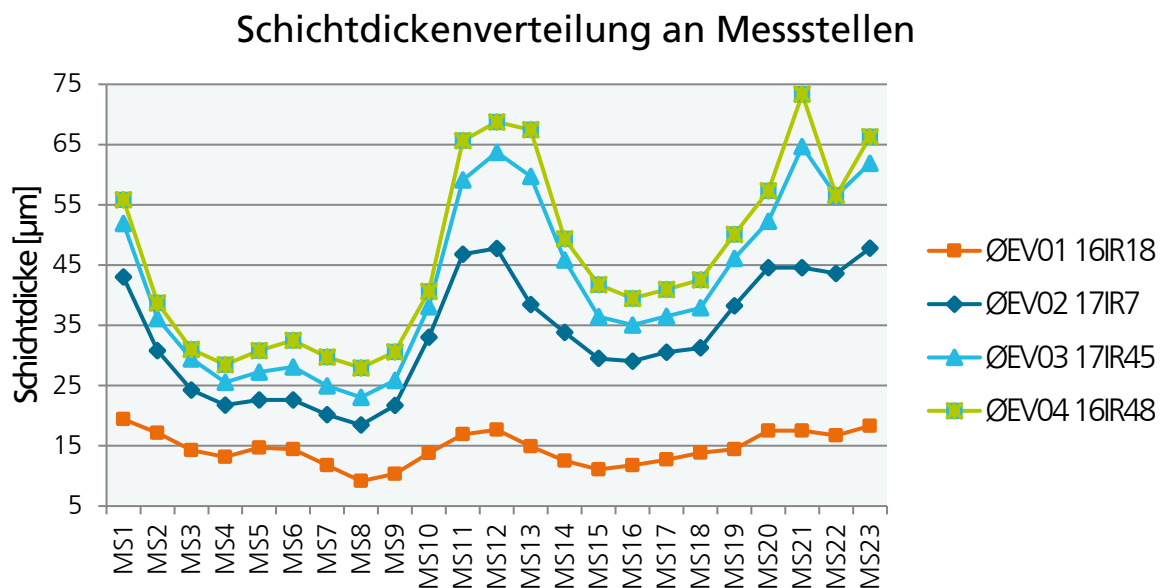


Abbildung 8.26: Schichtdickenmesswerte der Innenringe (NiW-Erstversuche)

Die Verläufe der unterschiedlichen Messungen sind sehr ähnlich, insbesondere die beiden letzten Versuche mit zwei Anodenkreisen sind nahezu identisch und nur um einige Mikrometer verschoben.

Es wurden nur zwei Außenringe mit unterschiedlichen Zeiten beschichtet, daher standen hierfür keine Vergleichsversuche zur Verfügung (Abbildung 8.27). Dennoch kann auch hier eine Schichtdickenzunahme des Außendurchmessers nach unten hin festgestellt werden (MS17 bis MS21), was die Vermutung aus der Auswertung der Innenringe unterstützt.

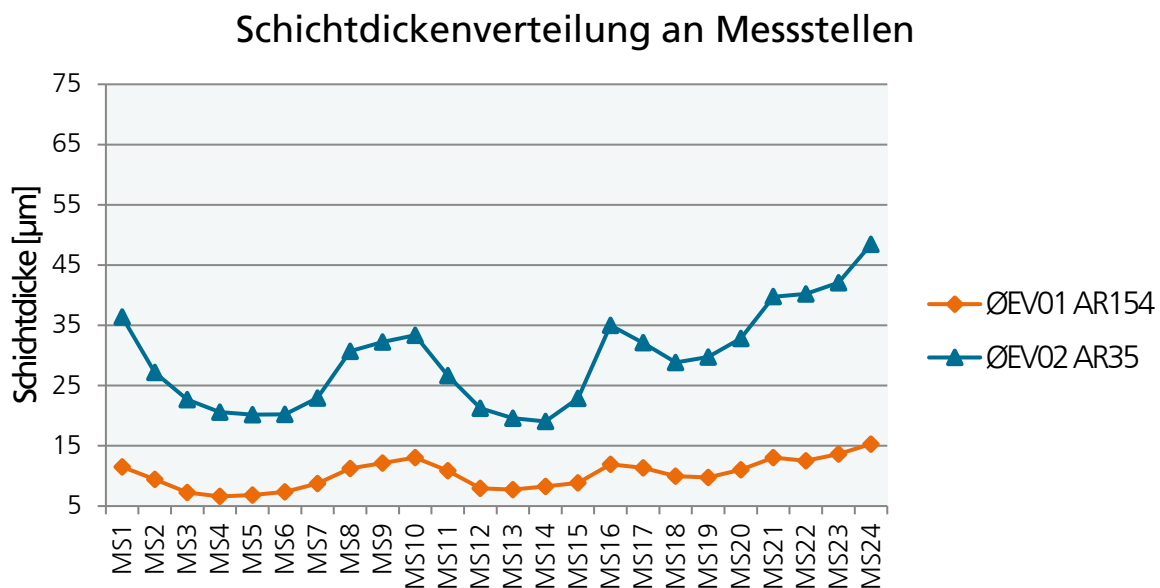


Abbildung 8.27: Schichtdickenmesswerte der Außenringe (NiW-Erstversuche)

Eine vollständige Auswertung der unterschiedlichen Lagerbereiche bezüglich der Schichtdickenmesswerte ist in Tabelle 8.4 dargestellt. Anhand der Daten ist leicht erkennbar, dass die geforderten Genauigkeiten insgesamt noch nicht erreicht werden. In Einzelfällen, wie an der Lauffläche des Außenrings AR35, sind die Messwerte bereits in einem relevanten Bereich innerhalb einer sehr geringen Spannweite.

Tabelle 8.4: Auswertung der Schichtdickendaten der NiW-Erstversuche. MW bezeichnet einen Mittelwert, KF die Kontaktfläche, LF die Lauffläche, ED den Einbaudurchmesser (Innendurchmesser beim Innenring, Außendurchmesser beim Außenring), Diff. die jeweilige Differenz zwischen minimalem und maximalem Messwert und die letzte Spalte gibt das prozentuale Verhältnis der Mittelwerte von Lauffläche und Einbaudurchmesser an.

Werte in [µm]	MW ges.	MW KF	Diff. KF	MW LF	Diff. LF	MW ED	Diff. ED	Verh. LF/ED
<b>EV01 IR18</b>	14,5	11,3	4,7	12,4	2,8	15,7	6,3	79 %
<b>EV02 IR7</b>	33,2	23,3	14,6	30,8	4,8	28,5	21,3	108 %
<b>EV03 IR45</b>	42,0	28,0	15,1	38,4	10,8	34,0	26,4	113 %
<b>EV04 IR48</b>	46,3	32,2	12,7	42,8	9,9	37,0	27,4	116 %
<b>EV01 AR154</b>	10,3	10,1	3,1	10,5	2,2	11,0	3,3	95 %

<b>EV02 AR35</b>	29,4	21,9	7,6	21,3	2,8	32,7	10,9	65 %
------------------	------	------	-----	------	-----	------	------	------

Eine Normierung der Schichtdickenmesswerte erlaubt die Darstellung eines prozentualen Verlaufs und den Vergleich mit der simulierten primären Stromdichte sowie der Prognose. Für die Normierung wurden alle gemessenen Schichtdickenwerte auf den normierten Mittelwert bezogen. Dieser normierte Mittelwert ist der Quotient des gemessenen Mittelwerts und der prozentualen Stromdichte. Diese Vorgehensweise wird für eine bessere Vergleichbarkeit der Messwerte mit der Simulation genutzt, da der errechnete Stromdichtemittelwert der Messpunkte nicht exakt 100 % entspricht. Am Beispiel des Innenrings mit der Berechnung eines Potentials beträgt der Stromdichtemittelwert der Messpunkte 120 %, d. h. für EV02 (IR7) wird der gemessene Mittelwert der Messpunkte von 33,7  $\mu\text{m}$  zum normierten Mittelwert von 27,7  $\mu\text{m}$  korrigiert. In Abbildung 8.28 sind die Kurven grafisch aufbereitet. Dabei ist eine hohe Kongruenz der prozentualen Messwerte erkennbar (der Einstellversuch EV01 wurde nicht berücksichtigt und ist nicht dargestellt). Ein Vergleich mit der Prognose zeigt keine vollständige Übereinstimmung, dies lässt sich jedoch teilweise durch die bereits genannten Effekte der inkorrekten Anodenlängen und Eintauchtiefe erklären. Eine genauere Beurteilung kann erst im Rahmen der späteren Ergebnisse mit korrekter Einstellung des Beschichtungsraums erfolgen.

### Vergleich Simulation / normierte Messwerte

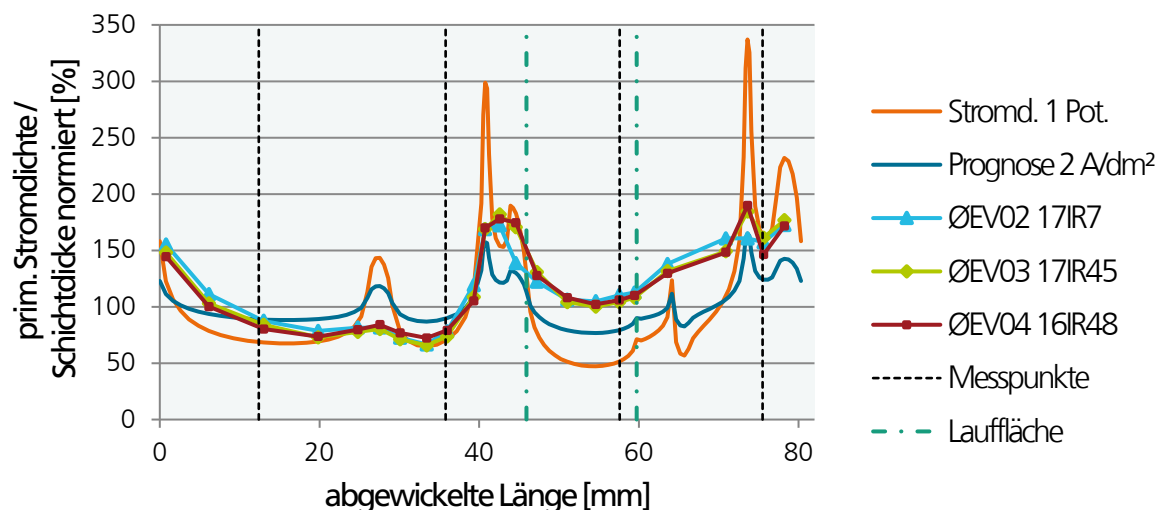


Abbildung 8.28: Normierte Verläufe der vermessenen Innenringe der NiW-Erstversuche (simulierte primäre Stromdichte mit Prognose und normierten Messwerten)

Das zuvor vorgestellte zerstörungsfreie Messverfahren wurde anhand des Innenrings 45 (EV03) geprüft, dieses Bauteil wurde vor und nach der Beschichtung vermessen und die Schichtdicke aus der Differenz beider Messwerte abgeleitet. Das Ergebnis dieses Verfahrens war ein Wert von 29,8  $\mu\text{m}$  für den Innendurchmesser und 34,6  $\mu\text{m}$  am Laufflächenmesspunkt. Eine Gegenüberstellung der äquivalenten Messungen aus dem Querschliff ergab geringe Abweichungen von 0,4  $\mu\text{m}$  am Innendurchmesser (Querschliff 29,4  $\mu\text{m}$ ) und 1,9  $\mu\text{m}$  an der Lauffläche (Querschliff 36,5  $\mu\text{m}$ ). Speziell die Lauffläche durch die Krümmung unterliegt einer höheren Ungenauigkeit durch einen erhöhten Einfluss der Z-Position und auch die Werte der Querschliffe weisen einen gewissen Messfehler auf, so dass hier von einer hohen Übereinstimmung unter Berücksichtigung der unvermeidbaren Messfehler ausgegangen werden kann.

### Schlussfolgerungen und Änderungsbedarf

Die Erstversuche lieferten wichtige Erkenntnisse für die weitere Vorgehensweise. Als essenziell ist sicherlich die weitere Verbesserung der primären Stromdichteverteilung über zusätzliche Blenden zu nennen. Auch das Anodensystem funktionierte noch nicht optimal mit Nickel-Wolfram: Einerseits wurden die Körbe nur außen auf die berechnete Länge abgeklebt und nicht direkt gekürzt, andererseits ist der Kontakt zwischen Titan-Konstruktion und Anodenmaterial nicht zuverlässig sichergestellt. Im Rahmen der folgenden Stromdichteoptimierung und Blendenauslegung wurde daher die Konstruktion und Fertigung neuer Anodenkörbe durchgeführt.

Positiv zu beurteilen ist die reibungslose Funktion der Beschichtungsvorrichtung, welche sich durch die geringe Auskristallisierung des Nickel-Wolfram-Elektrolyten sogar besser verhält. Die Kontaktrollen bedürfen dahingegen regelmäßiger Wartung, um die unregelmäßigen abgeschiedenen Schichten zu entfernen bzw. gleichmäßig zu gestalten. Dies konnte durch manuelles Schleifen problemlos durchgeführt werden und stellte keine Funktionsbeeinträchtigung dar.

Die Rissentwicklung an den Lagerringen und einzelne Haftungsprobleme mussten untersucht werden, ein Ansatzpunkt sind niedrigere Stromdichten. Die Verbesserung der pri-



mären Stromdichteverteilung durch Blenden sollte sich daher nicht nur auf die Schichtverteilung, sondern auch auf die Schichteigenschaften positiv auswirken. Für die Haftfestigkeit ist ggfs. eine Änderung der Vorbehandlung notwendig.

Die taktile Vermessung über eine Koordinatenmessmaschine erlaubt die Bestimmung der Schichtdicke bzw. der relevanten Durchmesser an zwei entscheidenden Punkten und kann somit für eine begleitende Überwachung genutzt werden. Eine Vermessung der gesamten Geometrie fand nicht statt, ist jedoch bei der Erreichung einer hohen Reproduzierbarkeit auch nicht notwendig – die Relationen zwischen den einzelnen Ringbereichen sind dann aus Querschlifffmessungen bekannt.

### 8.3.3 Stromdichteoptimierung über Blendenauslegung

Ziel der weiteren Optimierung war eine homogenere Verteilung der primären Stromdichte und eine Verringerung der Maximalwerte an Kanten, insbesondere an der schmalen Stirnseite. Dies wurde sowohl für die Anforderungen der Schichtdickenverteilung als auch für die Schichteigenschaften als essenziell angesehen. Für die Einbaudurchmesser (Wellen- bzw. Gehäusedurchmesser des Innen- bzw. Außenrings) wurde ein möglichst symmetrischer Verlauf angestrebt.

Der erste Schritt war eine Analyse der bereits bekannten Simulationsrechnungen unter Fokussierung auf die maximalen Stromdichtespitzen. Es wurden neben den gesamten unteren Bereichen beider Ringtypen die Übergänge zwischen Kontaktfläche zur Lauffläche als kritisch identifiziert. Eine nichtleitende Blende sollte daher die Stromverteilung auf eine Reduzierung in diesen Bereichen beeinflussen und gleichzeitig die Stromdichte in den bisher unterdurchschnittlich beaufschlagten Regionen (z. B. die Lauffläche) erhöhen. Gleichzeitig durfte weder der Elektrolyt- und Gasaustausch signifikant behindert noch der mechanische Einbau des Rings verhindert werden. Ausreichende Abstände zwischen Blendekonstruktion und Ringoberfläche wurden daher als essenziell eingestuft.

Im Rahmen der Blendenauslegung sollten für den Nickel-Wolfram-Prozess auch die Anodenkonstruktion überarbeitet und neue Titan-Körbe konstruiert werden. Die notwendigen Abmessungen, insbesondere die Anodenhöhe, wurden anhand der Simulation geprüft.

### Blenden- und Anodenauslegung

Für die Optimierung wurden, ausgehend vom vorhandenen Simulationsmodell, verschiedene Varianten und Geometrien berechnet und verglichen. Anhand der in 7.4.4 beschriebenen Hierarchie wurden vorrangig Blenden betrachtet und in ihren Dimensionen und Abständen variiert. Dabei stellte sich für die schmale Stirnseite eine U-förmige Konstruktion mit einem Spalt als zielführend dar (vgl. Abbildung 8.29). Der Spalt wurde sowohl zur Stromleitung als auch zum Elektrolytaustausch vorgesehen.

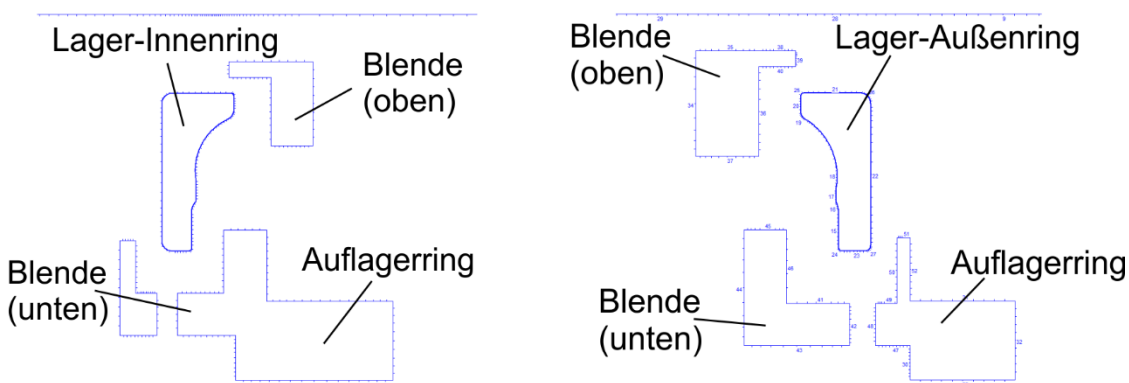


Abbildung 8.29: Modellierter Blenden- und Anodenauslegung (links Innenring, rechts Außenring). Die Anoden sind nicht dargestellt, die Rotationsachse liegt jeweils links des Bildes. Die obere Blende wird am Ring der Kontaktrollen befestigt, die untere an der Auflagerscheibe angebracht.

Für den Übergang zwischen Kontaktfläche und Lauffläche wurde jeweils eine L-förmige Variante als erfolgsversprechend ermittelt. Sie wurde bis in den Laufflächenbereich verlängert, um hier eine homogenere Verteilung zu erzielen. Die Dicke der einzelnen Stege ist nicht allein durch die Stromdichteverteilung vorgegeben, sondern entstand durch die parallele konstruktive Umsetzung und die Notwendigkeit einer ausreichenden mechanischen Festigkeit inklusive Montagepunkten zur Verbindung mit der Vorrichtung.

Die obere Innenkante des Innendurchmessers bzw. die Außenkante des Außendurchmessers bleiben nicht abgeblendet. Durch den geringen Abstand zum Elektrolytfüllstand und die relativ große Verrundung war das Stromdichtemaximum für diesen Bereich weniger extrem als an anderen Kanten. Um den Lagerring nicht komplett zu umschließen und den Elektrolytaustausch zu erleichtern, wurde an dieser Position nichts vorgesehen. Durch die veränderten Bedingungen wurde auch die Stromverteilung zwischen Innen- und Außenanode variiert, die Beschichtung mit einem Potenzial wurde verworfen.

Als Resultat konnten die simulierten maximalen Stromdichtewerte massiv reduziert werden. Wie in Abbildung 8.30 und Abbildung 8.31 gezeigt, liegen sie unter bis maximal um 200 % und wurden verglichen zu den früheren 300 % und mehr nahezu halbiert. Ebenfalls konnte eine Annäherung des jeweiligen Einbaudurchmessers und der Lauffläche an den Optimalwert von 100 % erreicht werden und der gesamte Verlauf ist deutlich gleichmäßiger (beim Außenring ist zu beachten, dass durch die Modellierung die berechnete Stromdichte im Schnitt am Außendurchmesser höher ist, siehe 8.1.2). Die Prognoselinien lassen durch die gute Streufähigkeit auf eine in der Realität nochmals bessere Schichtdickenverteilung schließen.

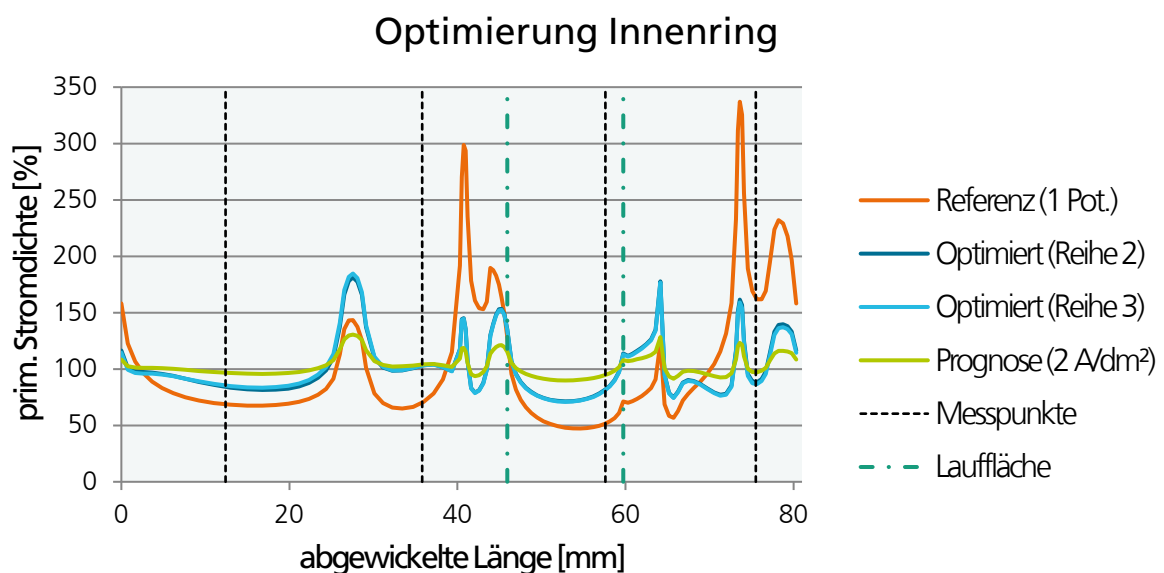


Abbildung 8.30: Simulationsergebnisse mit Blenden inkl. Prognose für Innenring

Die in Abbildung 8.30 gezeigten optimierten Kurven stellen nahezu identische Berechnungen dar, welche sich nur über den Durchmesser der Innenanode unterscheiden. Bei der Auslegung der neuen Titankörbe wurde ein größerer Durchmesser gewählt – die neuen Körbe standen jedoch nicht sofort zur Verfügung und konnten erst in der Versuchsreihe 3 eingesetzt werden. Der Unterschied fällt jedoch minimal aus und kann daher vernachlässigt werden. Die Prognoselinie wurde auf Basis der Optimierung für Reihe 3 erstellt. Die Eintauchtiefe konnte nur gering innerhalb einiger Millimeter variiert werden, da die Lager der Kontaktrollen nicht eingetaucht werden sollten. Es wurden verschiedene Werte geprüft, alle gezeigten Kurven wurden mit dem Zielwert von 15 mm berechnet.

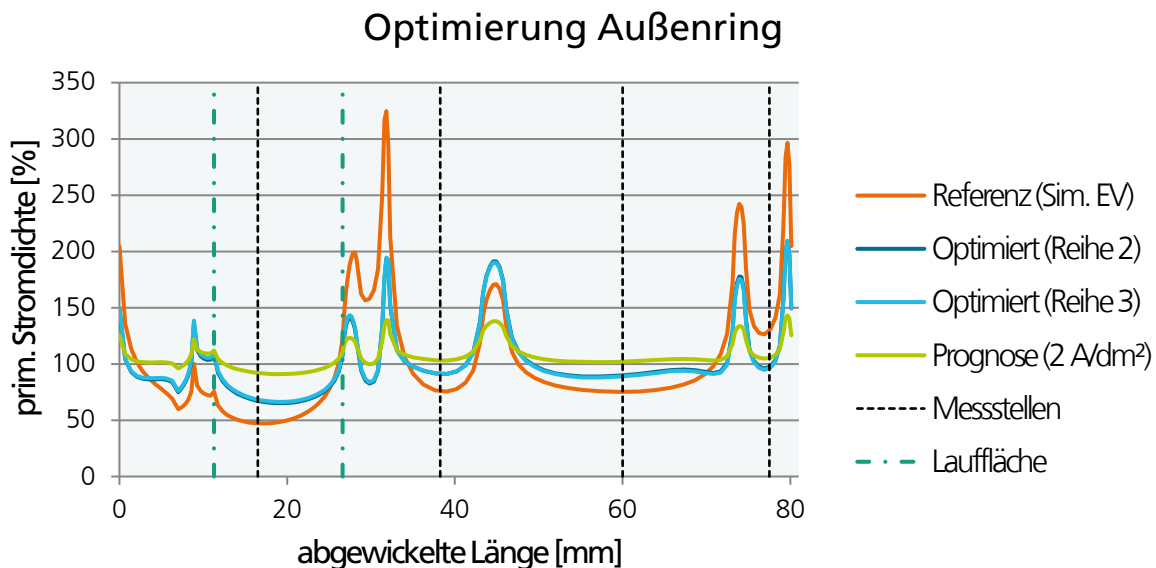


Abbildung 8.31: Simulationsergebnisse mit Blenden inkl. Prognose für Außenring

### Umsetzung

Die Blenden wurden möglichst einfach konzipiert und zur besseren Handhabung an vorhandene Komponenten montiert, sodass keine zusätzlichen Wartungsschritte erforderlich wurden. Für die Auflager- und Kontaktierungsrollen, welche in der Simulation nicht dargestellt wurden, konnte die Geometrie nicht als reines rotationssymmetrisches Teil umgesetzt werden. Es wurden daher Aussparungen und Unterbrechungen vorgesehen. Die realisierten Blenden sind in Abbildung 8.32 am Beispiel des Außenrings gezeigt. Sie wurden

an der Auflagerscheibe bzw. der Halterung der Kontaktrollen befestigt und sind komplett in nichtleitendem PVC ausgeführt.

Für das geänderte Anodensystem der 2. Generation mit Titankörben wurden möglichst viele Komponenten der ersten Variante verwendet. Die Änderungen beschränkten sich somit auf neue Körbe und deren Befestigungen. Durch die Verwendung von Titan-Streckmetall als Korbaußenhüllen ist die Kontaktierung von Anodenmaterial und Tragkonstruktion nicht mehr nur auf eine mittige Stange beschränkt. Da die Fertigung der Titan-Komponenten einige Zeit benötigte, konnten diese Änderungen erst in der Versuchsreihe drei verwendet werden. Für die Versuchsreihe zwei musste das erste System beibehalten werden, es wurde für eine korrekte Einstellung der Anodenlängen jedoch mit nichtleitenden PVC-Einlagehülsen ausgestattet.

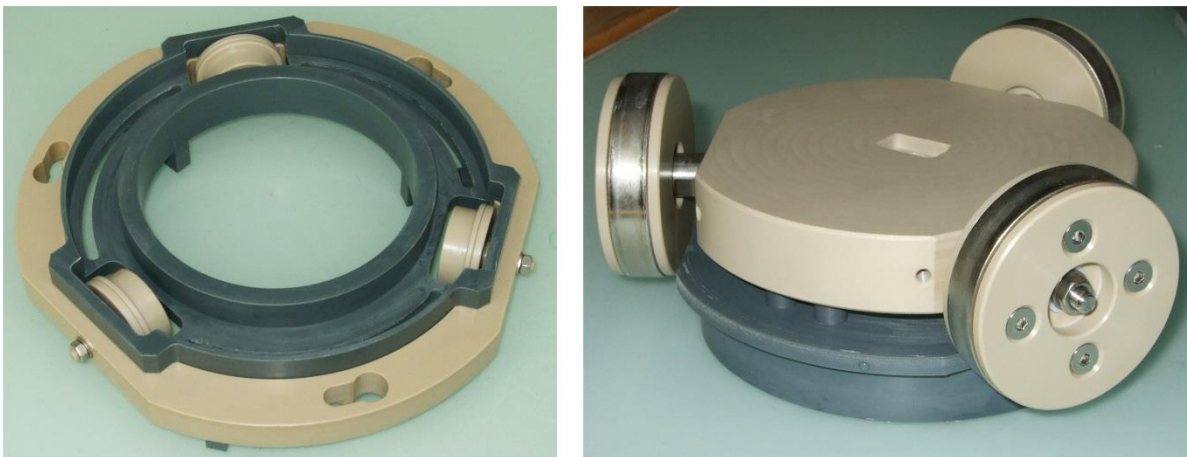


Abbildung 8.32: Blenden für Außenringe (links: untere Blende für schmale Stirnseite; rechts: Blende für Übergangsbereich zwischen Lauffläche und Kontaktfläche)

### 8.3.4 NiW Versuchsreihe 2

In der zweiten Versuchsphase wurde die Herstellung erster beschichteter Lagerringe für Prüfstandtests angestrebt. In diesem Abschnitt mussten somit die Schichteigenschaften und die Abscheidungspräzision so lange verbessert werden, bis die notwendigen Anforderungen erreicht wurden.

---

## Parameter und Änderungen

Die Beschichtungsparameter wurden, abgesehen von den zuvor beschriebenen Optimierungen, nicht verändert, auch die Elektrolytzusammensetzung und -einstellung blieb identisch. Aus den Erfahrungen der Erstversuche wurde eine regelmäßige Wartung der Kontaktrollen abgeleitet, diese wurden vor jedem Versuch geprüft und gegebenenfalls abgeschliffen.

Da im Lauf der ersten Beschichtungen diverse Haftungsprobleme der Schicht auf dem Grundmaterial auftraten (insbesondere beim Trennen der Segmente und der Präparation für die Querschliffe), wurde die Vorbehandlung um einen weiteren Schritt ergänzt. Nach der Nickel-Strike-Schicht wurde vor der Nickel-Wolfram-Beschichtung eine ca. 1,5  $\mu\text{m}$  – 2  $\mu\text{m}$  dicke Reinnickel-Schicht in der zweiten Badstation abgeschieden und somit die Haftfestigkeit deutlich verbessert.

Die Stromverteilung zwischen Innen- und Außenanode wurde anhand der Simulationsrechnungen mit Blenden angepasst und auch für die Innenringe vorgegeben. Die Beschichtungsvorgaben der über Querschliffe auf Schichtdicke ausgewerteten Ringe sind in Tabelle 12.12 dargestellt.

## Versuchsdurchführung und Auswertung

Der Kontaktierungsproblematik der alten Anodenkörbe wurde mit einer häufigen Kontrolle entgegengesteuert. Bei ansteigender Spannung konnte durch leichtes Rütteln / Klopfen am Anodensystem ein Verrutschen der Anodenpellets erzeugt werden.

Die Kontaktrollen erwiesen sich als weniger kritisch. Es wurde zwar keine durchgehende haftfeste Schicht auf den Rollen abgeschieden und es kam zu Abplatzungen, die Funktion und auch das Erscheinungsbild der Kontaktfläche der Ringe wurde jedoch nicht beeinträchtigt. Auch bei mehreren Versuchen ohne Überschleifen der Rolle (Abbildung 8.33) erwies sich die Vorrichtung als tolerant.

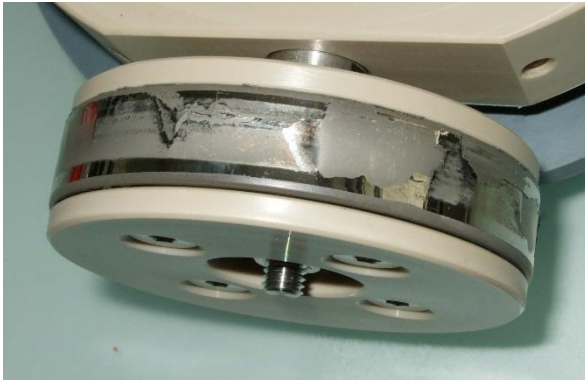


Abbildung 8.33: Kontaktrolle nach mehreren Versuchen ohne Überschleifen

Am Elektrolyt konnten im Verlauf der Versuchsreihe Veränderungen beobachtet werden, welche während der Labor- / Becherglasversuche nicht so auffällig waren. Mit zunehmender Arbeitsdauer traten vermehrt Ausfällungen auf, welche sowohl den Elektrolyten eintrübten als auch in Schlammform auf der Vorrichtung nach einer Beschichtung und am Boden des Bads nachgewiesen werden konnten. Die Ausfällungen wurden durch die Filtration nicht entfernt, eine Beeinträchtigung der Anlagenfunktion war nicht feststellbar. An den Einbauten war jedoch ein Aufwachsen der Ablagerungen sichtbar, welche in feuchtem Zustand eine klebrige Masse waren und mit zunehmender Trocknung fester wurden. Da es sich hierbei um einen verfahrenstechnischen Aspekt handelt, der nicht Teil dieser Arbeit ist, wird dies hier nicht weiter detailliert.

Die Veränderungen der Stromdichteverteilung wurden direkt anhand der Schichtoptik sichtbar, da sich die Nickel-Wolfram-Schicht durch unterschiedliche Mattierungs- bzw. Glanzgrade abhängig der lokalen Stromdichte auszeichnet. Bereiche mit vorher unterschiedlicher Optik stellten sich jetzt wie in Abbildung 8.34 sichtbar als homogen dar.



Abbildung 8.34: Makroansichten aus Versuchsreihe 2. Links ist die Lauffläche eines Innenrings dargestellt (V05, IR32), rechts der Blick auf Außendurchmesser und Lauffläche eines Außenrings (V06, AR45)



Abbildung 8.35: Kontaktflächen-Ansichten. Links AR 10 (V10) mit glänzender Kontaktfläche und relativ klar abgegrenzten Streifen, rechts IR 19 (V15) ohne Streifen, aber mit optischen Unregelmäßigkeiten.

Die Ringe erschienen rundum mit guter optischer Qualität, besonders begutachtet wurden jeweils die Kontaktfläche und die schmale Stirnseite. Die Kontaktfläche wies weiterhin sichtbare Spuren auf, welche sich über die Versuche unterschiedlich darstellten und nicht einheitlich entwickelten. Die Bandbreite verlief von einem schmalen Streifen bis zu unregelmäßigem Erscheinungsbild ohne klare Streifenbildung, siehe beispielhaft in Abbildung 8.35.



In den Querschliffen konnten keine signifikanten Auffälligkeiten für die Kontaktflächen nachgewiesen werden, die Schichten erschienen gleichmäßig mit nennenswerter Schichtdicke (Abbildung 8.36).

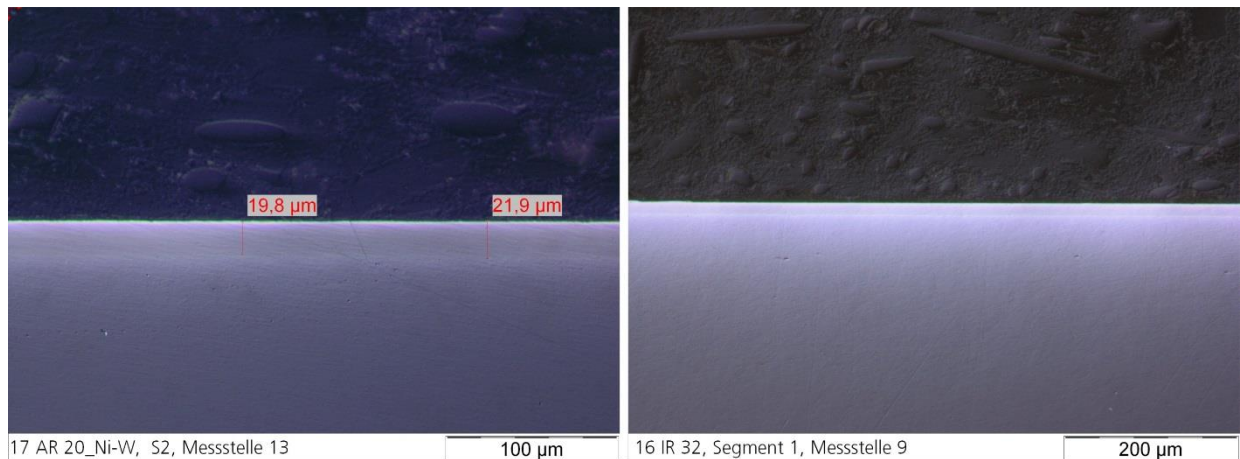


Abbildung 8.36: Querschliff-Aufnahmen von Kontaktflächen. Links V03 (AR20) an Messstelle 13 (Vergrößerung 200x); rechts V05 (IR32) an Messstelle 9 (Vergrößerung 100x).

An der schmalen Stirnseite traten, wie auch bei den Erstversuchen, Risse in der Schicht auf, welche durch die geänderte Vorbehandlung und die teilweise geringere Schichtdicke anfangs zwar verringert aber nicht beseitigt wurden. In Abstimmung mit Experten der Verfahrenstechnik sollten daher für die nächste Versuchsreihe alternative Parameter (insbesondere eine Verringerung der Stromdichte) untersucht werden.

Bezüglich der Schichtdickenverteilung ergaben die Blenden eine entscheidende Verbesserung. Anhand von Tabelle 8.5 sind die Optimierungen im Bereich der Lauffläche deutlich erkennbar, es werden über die relevanten Messstellen nun reproduzierbar maximale Abweichungen unter 5 µm erzielt. Bemerkenswert ist dies insbesondere bei Berücksichtigung der teilweise deutlich erhöhten Schichtdicke (V01 und V19 mit fast 40 µm als Mittelwert).

Die Einbaudurchmesser weisen ebenfalls geringere Abweichungen auf, diese sind aber dennoch mit Ausnahme der letzten ausgewerteten Versuche 19 und 20 höher als erwartet. Da die Maximalwerte weiterhin im unteren Bereich erzielt werden, deutet dies auf eine unzulängliche Korrektur der Eintauchtiefe hin. Anhand der letzten Versuche 19 und

20 wurde sowohl die Eintauchtiefe als auch die Stromverteilung leicht verändert, was eine verbesserte Symmetrie erzeugte und die Differenz verringerte.

Tabelle 8.5: Schichtdickenauswertung NiW-Versuchsreihe 2 (Querschliffmessungen). Bedeutung der Abkürzungen siehe Tabelle 8.4.

Werte in [µm]	MW ges.	MW KF	Diff. KF	MW LF	Diff. LF	MW ED	Diff. ED	Verh. LF/ED
<b>V01 AR40</b>	38,7	31,4	7,2	35,5	2,2	42,3	7,4	84 %
<b>V02 IR18</b>	29,6	20,7	3,8	29,0	4,2	31,0	10,2	94 %
<b>V05 IR32</b>	27,4	18,0	5,1	26,3	3,5	29,4	10,0	89 %
<b>V14 AR30</b>	38,8	29,4	6,4	37,0	4,6	40,2	8,2	92 %
<b>V19 IR4</b>	18,8	14,1	4,2	18,1	1,8	19,6	3,4	93 %
<b>V20 AR13</b>	20,2	17,2	4,4	19,4	1,6	19,5	3,0	99 %

Es konnte eine hohe Übereinstimmung der Mittelwerte von Lauffläche und Einbaudurchmesser erreicht werden. Im Fall des Außenrings 13 wird mit 99 % nahezu der Optimalwert erreicht. Jedoch sind auch die übrigen Werte im Bereich von 90 % akzeptabel, da sie die mechanische Fertigungstoleranz nicht signifikant verändern.

Problematisch gestaltete sich die weiterhin veränderliche Abscheiderate. Nach der Korrektur der Beschichtungszeit nach Versuch 2 wurden durch den fortgesetzten Anstieg der Abscheiderate im Verlauf der Versuche zu hohe Schichtdicken erzielt. Für einen Vergleich der Messwerte mit den Prognoselinien / simulierten Stromdichten wird deswegen auf die normierten Schichtdickenwerte zurückgegriffen. Diese prozentualen Kennzahlen wurden, wie bereits bei den Erstversuchen beschrieben, durch den Bezug auf den zur Simulation normierten Mittelwert ermittelt.

Eine Gegenüberstellung der normierten Schichtdickenwerte zeigt eine hohe Kongruenz im Fall der Innenringe (Abbildung 8.37), ein relevanter Abstand tritt nur bei Versuch 19 mit veränderten Bedingungen am Innendurchmesser auf. Ein Vergleich mit der Prognose zeigt hohe Übereinstimmungen im Bereich der Lauffläche. Der Kontaktflächenabschnitt weicht, wie zu erwarten war, deutlich ab. Da der Kontaktbereich jedoch bewusst auf einer mechanisch nicht belasteten Fläche vorgesehen wurde, ist dies akzeptabel und stellt keine

Funktionseinschränkung dar. Der Grund dafür liegt in der Mitbeschichtung der Kontaktrollen. Dieser Stromabfluss ist in der Simulation nicht berücksichtigt. Im Bereich der Stromdichtespitzen an Kanten ist eine Mittelung über einen größeren Bereich bemerkbar. Am Innendurchmesser stimmt der prinzipielle Verlauf überein, es treten jedoch höhere Abweichungen auf.

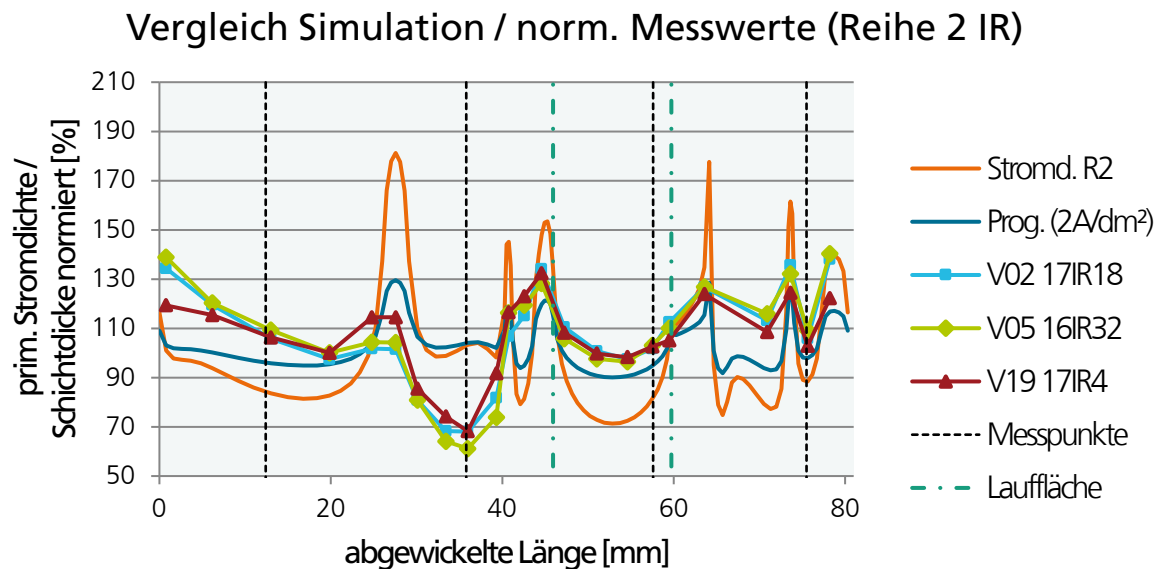


Abbildung 8.37: Normierte Verläufe der vermessenen Innenringe aus Versuchsreihe 2 (simulierte primäre Stromdichte mit Prognose und normierten Messwerten)

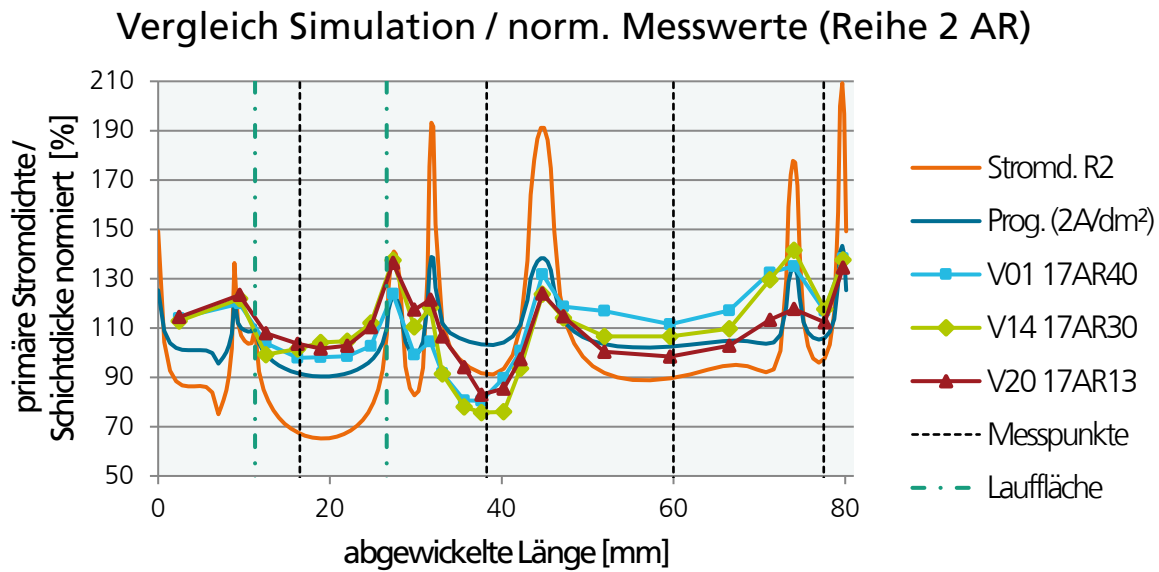


Abbildung 8.38: Normierte Verläufe der vermessenen Außenringe aus Versuchsreihe 2 (simulierte primäre Stromdichte mit Prognose und normierten Messwerten)

Für die ausgewerteten Außenringe ist die Deckungsgleichheit der Messungen etwas geringer, aber immer noch hoch (Abbildung 8.38). Die Übereinstimmung mit der Prognoselinie ist tendenziell höher als bei den Innenringen und weist die gleichen Effekte auf (breitere Mittelung an Kanten, an Kontaktfläche aus identischen Gründen Abweichungen).

Aus der Versuchsreihe 2 konnten somit erste Lagerringe auf den Prüfstand gebracht werden. Es wurde jedoch nicht immer die korrekte Nennschichtdicke von 25  $\mu\text{m}$  erreicht. Die Performance der Schicht auf dem Prüfstand ist vorrangig vom Werkstoff und den Schichteigenschaften abhängig. Dies ist nicht Teil dieser Arbeit und wird somit an dieser Stelle nicht weiter beschrieben.

### Schlussfolgerungen und Änderungsbedarf

Die Schichtdickenverteilung wurde prinzipiell für sehr gut befunden, die veränderliche Abscheiderate erschwert jedoch eine präzise Erreichung der Nennschichtdicke. Bei korrekter Beschichtungszeit erlaubt die Vorrichtung eine den Anforderungen entsprechende Schichtdickenverteilung, bezüglich der Stromdichteverteilung wurden somit für Versuchsreihe 3 keine größeren Änderungen notwendig. Eine Feineinstellung von Eintauchtiefe

und Stromverteilung wurde zur weiteren Optimierung und der Anpassung an das neue Anodensystem angestrebt.

Die Ausfällungen des Elektrolyten sind ein Effekt der Verfahrenstechnik und spielen somit im Rahmen dieser Arbeit keine signifikante Rolle. Die Anlage erwies sich für das bisher auftretende Ausmaß als genügend tolerant, Anpassungen wurden somit nicht notwendig.

### 8.3.5 NiW Versuchsreihe 3

In der Versuchsreihe 3 wurden die Beschichtungen kontinuierlich weitergeführt, über Parameteränderungen wurden Beeinflussungen der Schichteigenschaften durchgeführt. Darüber hinaus wurden in diesem Block Zwei-Schicht-Systeme getestet. Die hergestellten Lager wurden teilweise auf dem Lagerprüfstand analysiert, für Korrosionsuntersuchungen mittels Salzsprühnebeltests oder zur metallografischen Auswertung genutzt. Im Rahmen dieser Arbeit wird nur auf die bezüglich der Anlagentechnik relevanten Ergebnisse eingegangen.

#### Parameter und Änderungen

Einzigste Veränderung der Anlagentechnik war die Umstellung des Anodensystems auf die 2. Ausbaustufe mit Titan-Körben zur Verbesserung der Kontaktierungssituation auf die Anodenpellets. Der Elektrolyt wurde mit identischen Hauptbestandteilen neu angesetzt, die angesammelten Ausfällungen wurden entsprechend aus der Anlage entfernt.

Neben reinen Nickel-Wolfram-Schichten waren Kombinationsschichten mit Reinnickel und außenstromlos abgeschiedenem Nickel-Phosphor geplant. Die Reinnickel-Schichten wurden in der zweiten Badstation appliziert, die stromlosen NiP-Schichten in einer separaten Wanne einer anderen Anlage (Beschreibung siehe Anhang 12.5.3, S. 298)

Die Beherrschbarkeit der veränderlichen Abscheiderate des NiW-Elektrolyten war für eine zielgenaue Beschichtung mit der Nennschichtdicke von 25 µm essenziell. Es wurden parallel Abscheidungen im Becherglas zur Bestimmung der Geschwindigkeit und somit der notwendigen Dauer durchgeführt.

---

## Versuchsdurchführung und Auswertung

In der dritten Versuchsreihe ergaben sich keine auf die Anlagentechnik zurückzuführenden Veränderungen bezüglich der Optik, Haftfestigkeit und Rissproblematik. Durch die verschiedenen getesteten Stromdichten im Bereich von  $0,5 \text{ A/dm}^2$  bis  $2 \text{ A/dm}^2$  traten leichte Veränderungen bezüglich des matten bzw. mattglänzenden Erscheinungsbilds auf. Die Rissigkeit wurde bei sinkender Nennstromdichte besser, sowohl die Anzahl als auch die Länge der Risse nahmen ab. Die deutlich höhere Beschichtungsdauer von bis zu 450 Minuten erzeugte für die Vorrichtung keinerlei Probleme. Eine Aufarbeitung der Kontaktrollen war durch die weiterhin vorhandene Abscheidung in regelmäßigen Abständen notwendig. Da sich bei geringerer Nennstromdichte jedoch auch die Abplatzungen auf den Rollen verringerten, waren diesbezüglich keine negativen Auswirkungen bei den langen Beschichtungsdauern zu bemerken.

Das Anodensystem der 2. Generation erwies sich als zielführend bei der Behebung der Kontaktierungs- bzw. Passivierungsproblematik der Anodenpellets. Durch die größere Kontaktfläche der Streckmetall-Anodenkörbe traten weder an der Innenanode noch an den Außenanoden ansteigende Potenziale auf. Die aufgezeichneten Istwert-Kurven verliefen gleichmäßiger. Ein Rauschen an der Innenanode trat bei zunehmender Beschichtungsdauer in unterschiedlichen Ausprägungen weiterhin auf, welches jedoch im Mittelwert nur einen mäßigen Spannungsanstieg zur Folge hatte.

Die in Tabelle 8.6 dargestellte Schichtdickenauswertung ergab vergleichbare Werte zu den letzten beiden optimierten Versuchen aus Stufe 2 (V19, V20). Die Nennschichtdicke von  $25 \mu\text{m}$  wurde selten exakt erreicht, die ausgewerteten Ringe befanden sich jedoch in einem engen Bereich um den Zielwert. Erwähnenswert ist die höhere Schwankung der Innenring-Werte bezüglich des Verhältnisses von Lauffläche zu Innendurchmesser: Dieses ist mit Werten zwischen 88 % - 115 % am Innenring erheblich breiter gestreut als die bei den Außenringen zwischen 93 % und 99 %. Der Minimalwert von 88 % konnte dabei durch eine falsche Einstellung der Stromverteilung zwischen Innen- und Außenanode erklärt werden (dies entsprach der anfangs in Reihe 2 verwendeten Aufteilung). Die ansteigenden Werte korrelieren mit der Verringerung der Nennstromdichte, eine veränderte Streufähigkeit wurde deswegen als wahrscheinlichste Erklärung identifiziert.

Tabelle 8.6: Schichtdickenauswertung NiW-Versuchsreihe 3 und Vergleichsringe (Querschlifffmessungen). Bedeutung der Abkürzungen siehe Tabelle 8.4.

Werte in [ $\mu\text{m}$ ]	MW ges.	MW KF	Diff. KF	MW LF	Diff. LF	MW ED	Diff. ED	Verh. LF/ED
<b>V21 AR158 (2 A/dm<sup>2</sup>)</b>	19,3	16,7	3,4	18,5	0,7	18,7	2,8	99 %
<b>V23 IR24 (2 A/dm<sup>2</sup>)</b>	20,4	16,8	1,7	18,4	2,4	21,0	5,3	88 %
<b>V25 AR155 (2 A/dm<sup>2</sup>)</b>	24,5	21,1	4,6	22,6	2,2	24,2	4,8	93 %
<b>V26 AR178 (2 A/dm<sup>2</sup>)</b>	24,2	20,3	4,5	22,8	1,7	23,9	4,1	95 %
<b>V32 AR44 (1 A/dm<sup>2</sup>)</b>	33,4	29,5	6,1	31,9	2,8	32,3	4,2	99 %
<b>V37 IR33 (1 A/dm<sup>2</sup>)</b>	29,9	23,3	3,0	30,6	3,5	28,3	8,7	108 %
<b>V42 IR27 (0,5 A/dm<sup>2</sup>)</b>	22,1	19,7	4,4	23,0	2,0	20,0	4,8	115 %
<b>Vergleichsringe</b>								
<b>V22 AR159 (Ni)</b>	23,3	14,7	3,6	23,1	7,9	24,6	4,4	94 %
<b>V24 IR25 (Ni)</b>	29,5	18,7	5,2	30,3	5,3	28,4	9,7	107 %
<b>V31 IR44 (Ni-NiW)</b>	22,2	16,8	3,4	21,9	3,1	21,8	5,8	100 %
<b>IR6 (stromlos NiP)</b>	22,3	22,6	0,3	22,5	0,6	21,8	1,4	103 %

Neben den mit Nickel-Wolfram beschichteten Ringen wurden als Vergleich auch ein Lager mit Reinnickel-Abscheidungen, ein Kombinationsschicht-Ring und ein Bauteil mit stromlos erzeugtem Nickel-Phosphor-Überzug (deren Eignung für Anwendungszweck als alleinige Schicht nicht gegeben ist) ausgewertet. Die Reinnickel-Ringe wiesen deutlich höhere Abweichungen an der Lauffläche auf, welche sich in der Kombinationsschicht nicht in vergleichbarem Maß nachweisen ließen. Das Schichtsystem war aus ca. 9  $\mu\text{m}$  Nickel und etwa 13  $\mu\text{m}$  Nickel-Wolfram aufgebaut, eine höhere Abweichung durch die abweichende Streufähigkeit des Reinnickel-Elektrolyten hätte auch dort auftreten müssen. Eine mögliche Erklärung sind höhere Messungenauigkeiten bei der Bestimmung der Nickel-Schichtdicke, welche durch die geringere Härte bei der Präparation zum Verschmieren neigen können. Eine fundierte Aussage konnte durch die fehlenden Wiederholungsversuche somit nicht getroffen werden.

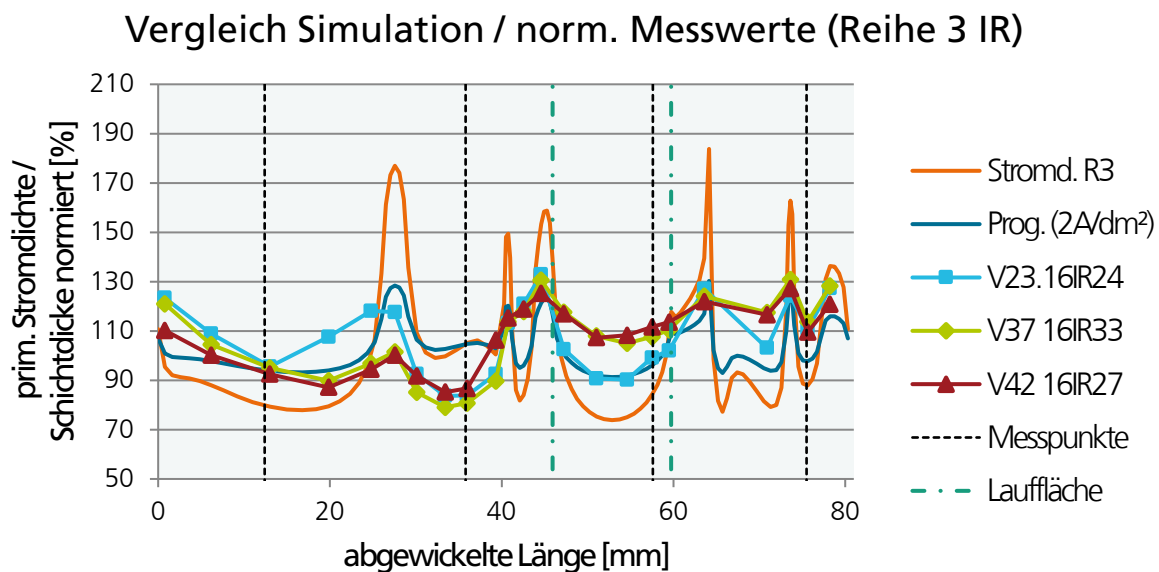


Abbildung 8.39: Normierte Verläufe der vermessenen Innenringe aus Versuchsreihe 3 (simulierte primäre Stromdichte mit Prognose und normierten Messwerten)

Die normierten Schichtdickenverläufe der Innenringe zeigen deutlich die durch unterschiedliche Stromverteilung erzeugte Veränderung an der Lauffläche bei Versuch 23 (siehe Abbildung 8.39), welcher das geringste Verhältnis zwischen Lauffläche und Einbaudurchmesser erreichte. Die simulierte primäre Stromdichteverteilung und die daraus folgende Prognoselinie wurden dabei an die Anoden-Stromaufteilung angepasst. Die Prognose weist insgesamt eine ähnliche Kongruenz mit den Messwerten wie in Versuchsreihe 2 auf. Der Abstand am Innendurchmesser ist geringer, während die Differenz an der Lauffläche leicht höher ausfällt.

Die in Abbildung 8.40 gezeigte Kongruenz zwischen Prognose und Messwerten ist bei den Außenringen, wie bereits für Reihe 2, höher und weist an Lauffläche und Einbaudurchmesser nur minimale Abweichungen auf (wie bei den Innenringen wurde auch hier die Prognoselinie und die primäre Verteilung an die veränderten Stromaufteilungen angepasst). Insgesamt sind die in 8.3.4 beschriebenen Effekte auch für die Vergleiche von Prognose und Messwerten in Versuchsreihe 3 gültig.



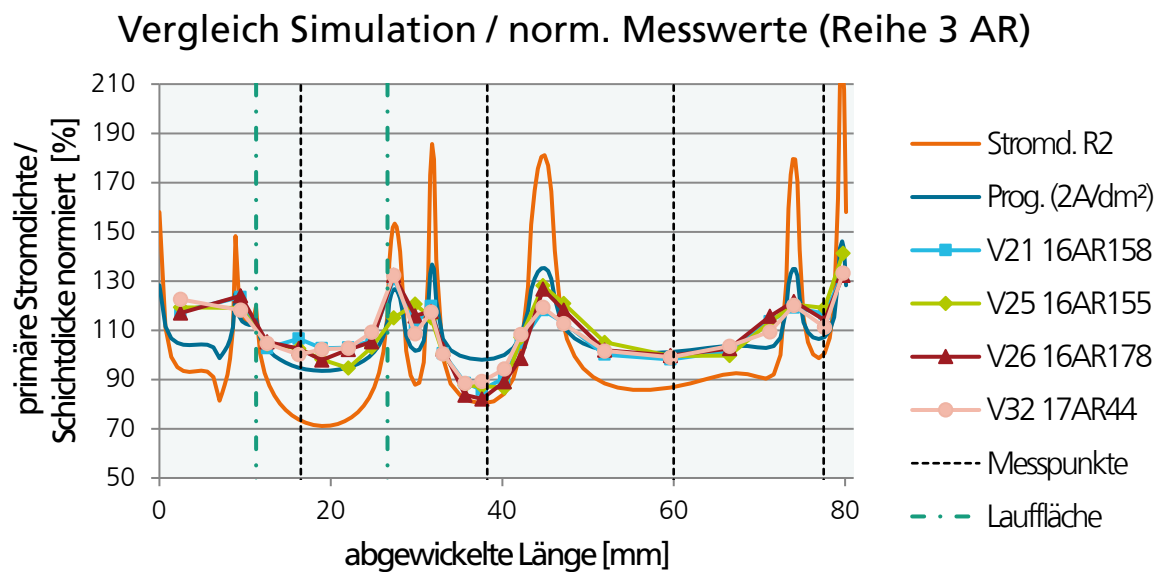


Abbildung 8.40: Normierte Verläufe der vermessenen Außenringe aus Versuchsreihe 3 (simulierte primäre Stromdichte mit Prognose und normierten Messwerten)

In dieser Versuchsreihe wurden verschiedene Ringe mittels Koordinatenmessgerät geprüft. Auf den Einbaudurchmessern trat nur in zwei Fällen eine Toleranzüberschreitung auf ( $5\ \mu\text{m}$  bzw.  $1\ \mu\text{m}$  außerhalb des vorgegebenen Bereichs). Für die Lauffläche waren keine Toleranzen am Messpunkt bekannt, hierfür konnte mit eigenen Mitteln keine Aussage getroffen werden. Für die Formtoleranz der gemessenen Durchmesser ist nach den Beschichtungen eine Verschlechterung festzustellen. Grund schien nach Einschätzung des Messexperten eine höhere Rauheit zu sein. Bei genauer Analyse wies die Nickel-Wolfram-Schicht minimalste topografische Unregelmäßigkeiten auf. Für herkömmliche Maschinenbauteile wäre diese Oberflächenqualität ohne Belang, bei einem hochpräzisen Bauteil fiel die Veränderung im Vergleich zum feinstbearbeiteten (geschliffen und polierten) Rohteil messtechnisch ins Gewicht. Da auch hier die Grenzwerte nicht bekannt waren, konnte keine Aussage über möglicherweise kritische Abweichungen getroffen werden. Dies wird anhand der externen Vermessung der Lagerringe später nochmals aufgegriffen.

Die Auswertungen der Reihen 1 und 2 erfolgten mit dem Fokus auf die Schichtdickenverteilung. Im Rahmen der letzten Reihe wurden eingehendere Analysen zur Schichtstruktur über metallographisches Ätzen und speziell den möglichen Unterschieden zwischen Kontaktfläche und anderen Bauteilbereichen durchgeführt. Hierbei wurden im Bereich der

Kontaktfläche Linien in unterschiedlich starken Ausprägungen festgestellt, welche parallel zur Oberfläche des Grundmaterials verlaufen (Abbildung 8.41). Diese Linien sind jedoch nicht durchgehend über den gesamten Bereich der Kontaktrollenauflage, sondern als einzelne Segmente sichtbar. Wie am Beispielbild des Außendurchmessers sichtbar ist, werden die Bereiche mit diesen Linien beim Ätzen verstärkt angegriffen. Die restlichen Bereiche weisen in den meisten Fällen keine Besonderheiten auf, die auf einen vorrichtungsbedingten Einfluss zurückgeführt werden können (Abbildung 8.42).

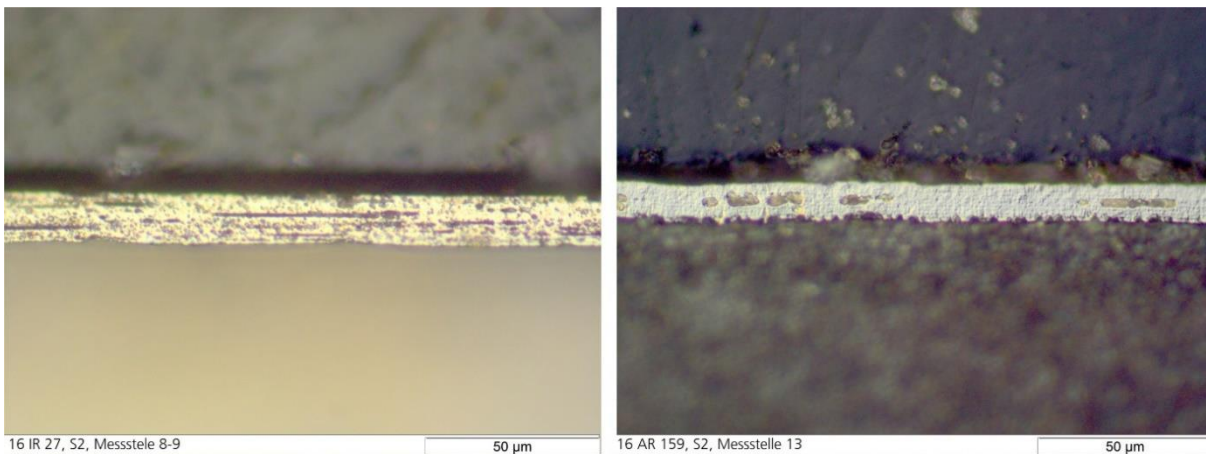


Abbildung 8.41: Geätzte Querschliffe der Kontaktflächen eines Innenrings (IR 16#27, links) und eines Außenrings (AR 16#159, rechts)

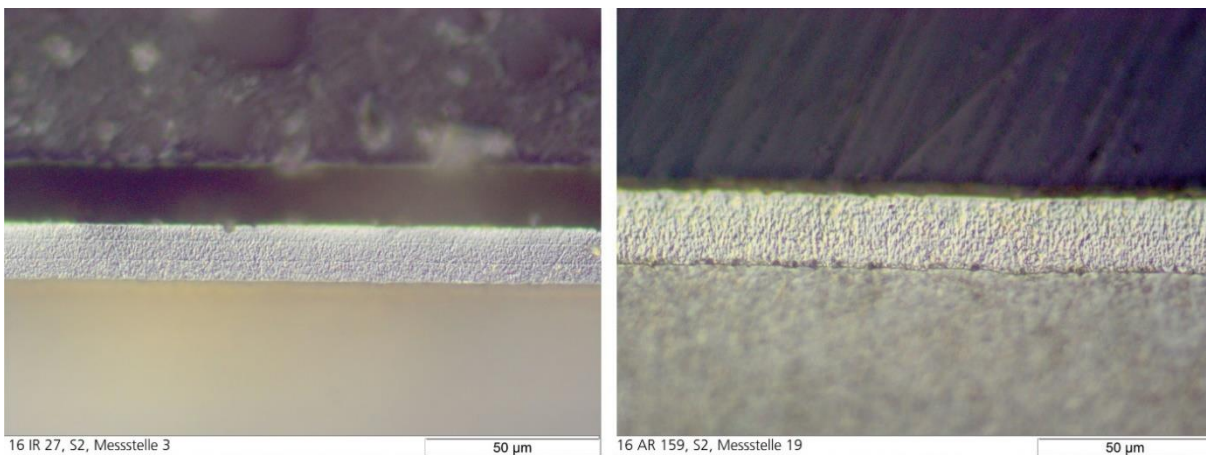


Abbildung 8.42: Geätzte Querschliffe am Einbaudurchmesser: Innendurchmesser eines Innenrings (IR 16#27, links) und eines Außendurchmessers eines Außenrings (AR 16#159, rechts)

Die Abrollbewegung der Kontaktrollen bzw. die Verhältnisse an der Kontaktfläche sind somit die wahrscheinliche Ursache für die auftretenden Linien. Ob es sich bei den Linien um Einschlüsse in der Schicht (Schmutz, Abplatzungen der Kontaktrollen) oder Veränderungen durch die Rollbewegung bei gleichzeitigem Stromfluss (mechanische Belastung, Anbrennungen) handelt, konnte nicht geklärt werden. Die Rollbewegung allein scheint als Ursache ausgeschlossen, da auf der anderen Stirnseite mit den Auflagerrollen keine Effekte in dieser Ausprägung nachgewiesen werden konnten.

### Salzprühtest und Bewertung Korrosionsprüfung

Durch den verstärkten Angriff beim Ätzen erscheint die Korrosionsschutzwirkung an der Kontaktfläche möglicherweise beeinträchtigt. Zur Beurteilung von besonders anfälligen Bereichen an den Lagerringen und evtl. möglichen Korrosionsangriffspunkten wurden an beschichteten Ringen Salzprühtests durchgeführt. Mittels des auch als Salzprühnebelprüfung bekannten Verfahrens können Bauteile bzw. Beschichtung auf die Korrosionsbeständigkeit geprüft werden. Die Vorgehensweise ist in beispielsweise in DIN 9227 standardisiert. (DIN EN ISO 9227) Details zur Art der Messdurchführung können in der parallel gelaufenen Verfahrenstechnik-Arbeit recherchiert werden (Kölle 2018). Die Korrosionsanfälligkeit wird neben Werkstoff- und Schichteigenschaften durch Fehlstellen bestimmt. Die Prüfungen wurden nicht selbst, sondern im Rahmen des Poseidon-Projekts bzw. der Verfahrensentwicklung durchgeführt. Für eine Beurteilung möglicherweise durch die verwendete Applikationstechnik hervorgerufener Schwachpunkte werden die Ergebnisse für die Lagerringe unter diesen Gesichtspunkten im Rahmen dieser Arbeit bewertet.

Für die Korrosionsprüfung wurden mehrere Schichtparameter als Einschichtsystem und in Kombination mit ca. 10 mm Nickel-Phosphor als Grundsicht hergestellt. Alle dargestellten Bilder und Bewertungen basieren auf einer Expositionszeit in der Salzprühkammer von 504 Stunden. Die mit steigender Stromdichte auftretende Rissigkeit der Schicht an der schmalen Stirnseite stellt sich dabei als Hauptangriffspunkt dar. Dies wird in Abbildung 8.43 deutlich sichtbar. Auf der Oberseite ist nur ein Korrosionspunkt zu erkennen (rechtes unteres Ringsegment), die übrigen Verfärbungen sind Ablaufspuren der unteren Korrosionspunkte.

Für die Beschichtung mit  $0,5 \text{ A/dm}^2$  NiW-Monoschicht stellt sich die schmale Stirnseite mit weniger Angriffspunkten dar, auf der Oberseite ist wiederum nur eine Roststelle erkennbar (Abbildung 8.44 links). Bei der Kombinationsschicht mit Nickel-Phosphor traten keinerlei Korrosionsstellen auf – auch die untere Kante war nicht betroffen.



Abbildung 8.43:  $1 \text{ A/dm}^2$  Nennstromdichte, Ansicht von oben und unten (ungewaschen) . Links Oberseite mit einem Korrosionspunkt, rechts Unterseite mit diversen Angriffspunkten an schmaler Stirnseite. Quelle: IPA intern bzw. (Kölle 2018)



Abbildung 8.44: 0,5 A/dm<sup>2</sup> Nennstromdichte, Ansicht von oben. Links Einschichtsystem Nickel-Wolfram mit einem Korrosionspunkt in der Markierung an der Oberseite, rechts Kombinationsschicht NiP-NiW ohne Korrosionsstellen. Quelle: IPA intern bzw. (Kölle 2018)

Als Referenz wurden zusätzlich Ringe mit reiner Nickel-Phosphor-Schicht getestet, um einen Vergleich mit einer anderen Vorrichtung zu erhalten. Nickel-Phosphor weist bei ausreichender Schichtdicke im Salzsprühtest eine gute Beständigkeit auf, doch auch hier sind einzelne Fehlstellen zu erkennen (Abbildung 8.45 rechts).

Insgesamt konnten an den Ringen keine speziell durch die Anlagentechnik bedingten Korrosionsangriffe festgestellt werden. Einzelne Korrosionspunkte traten auch an außenstromlos beschichteten Bauteilen auf. Der beim Ätzen der Querschliffe aufgetretene verstärkte Angriff an der Kontaktfläche trat bei den durchgeführten Prüfungen nicht auf, flächendeckende Unterschiede zwischen der Kontaktfläche und Innendurchmesser / Laufflächen konnten nicht nachgewiesen werden. Die Schwachstelle an der unteren Stirnseite ist durch die Schichteigenschaften (Rissigkeit) und vermutlich auch die Ringgeometrie bedingt. Es sind alle Bauteilbereiche mit ausreichender Schichtdicke überzogen, eine vollflächige Beschichtung ist durch die Korrosionstests nachgewiesen.

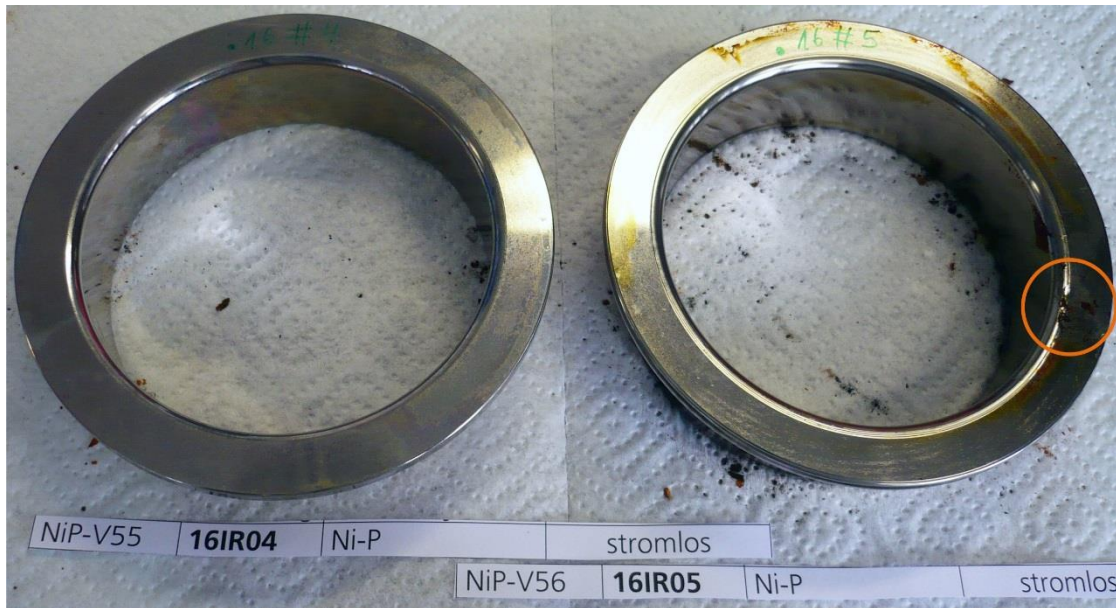


Abbildung 8.45: Nickel-Phosphor-Schicht (stromlos abgeschieden), Ansicht von oben. Links keine Korrosion erkennbar, rechts ist innerhalb der Markierung ein Angriffspunkt vorhanden. Quelle: IPA intern bzw. (Kölle 2018)

### Externe Vermessungen der Lagerringe

Vor den Prüfstandversuchen wurden die einzelnen Ringe beim Lagerhersteller vermessen. Hierbei wurden auch lagerspezifische Toleranzen betrachtet, welche bei eigenen Messungen nicht durchgeführt werden konnten. Die Mantelflächendurchmesser (Außenring) bzw. Bohrungsdurchmesser (Innenring) der vermessenen Ringe lagen vollständig innerhalb der Toleranzgrenzen, ebenso ergab die Rundheitsmessung im Druckwinkel keine Beanstandungen. Am vermessenen Laufbahndurchmesser kam es bei zwei Innenringen zu einer Überschreitung der Toleranzgrenze um wenige Mikrometer, die übrigen wurden als i. O. eingestuft. Bezüglich der Rauheit konnten die sehr hohen Anforderungen nicht erreicht werden, eine nachteilige Veränderung durch die Beschichtung wurde in den eigenen Messungen bereits festgestellt. Bei weiteren lagerspezifischen Prüfmerkmalen wurden in den Vermessungen teilweise Toleranzüberschreitungen festgestellt. Eine genauere Analyse der Ursachen muss in Abstimmung mit dem Lagerhersteller durchgeführt werden. Es wurden alle Ringe auf dem Prüfstand getestet, somit kann für den aktuellen Entwicklungsstand von einer erfolgreichen Beschichtung ausgegangen werden.

## 8.4 Fazit Fallbeispiele und Versuche

Nach der Validierung der entworfenen Anlage, der durchgeführten Beschichtungen und Optimierungen sowie der ausgewerteten Ergebnisse kann für diesen Abschnitt ein Fazit für die relevanten Aspekte gezogen werden.

### Vorrichtungs- und Anlagenfunktion

Die entwickelte und umgesetzte Vorrichtungs- / Anlagentechnik kann als validiert betrachtet werden, die Funktion zur Beschichtung der Wälzlagerringe ist gegeben. Das Konzept einer stehenden Kontaktscheibe mit rotierend befestigten Kontaktrollen erwies sich als erfolgreich, es konnte ein zuverlässiger Kontakt bei gleichzeitigem Antrieb des Lagerings sichergestellt werden. Eine Kontaktierung ohne statische Auflagepunkte wurde erfüllt und die Basis für eine vollständige Beschichtung geschaffen. Aufgrund des neuen Konzepts und der sichergestellten Funktionsweise wurde die Vorrichtungstechnik als Schutzrecht angemeldet und erteilt. (Patentschrift DE102015113129 B4 2015)

Es erfolgten nur zwei nennenswerte Anpassungen: Das Verwerfen der Rollenblende und die Überarbeitung des Anodensystems. Die Rollenblende stellte ein allgemeines Problem für die Abscheidungsbedingungen im betroffenen Bereich dar. Diese Effekte waren vorab nur schwer abzuschätzen und die genauen verfahrenstechnischen Ursachen können nicht eindeutig benannt werden. Als wahrscheinlichste Begründung erscheinen die stark schwankenden Bedingungen, insbesondere wechselnde Stromdichte und Strömungseigenschaften bei gleichzeitigen mechanischen Belastungen durch die Rollen. Eine alleinige Verantwortung der Wälzbewegung kann ausgeschlossen werden. Bei Beschichtungen ohne Rollenblende bzw. mit den nachträglich ergänzten Blenden konnten auch im Kontaktbereich gleichmäßige Schichten erzeugt werden. Ein verfahrensbedingter Faktor ist dennoch vorhanden: Während bei Reinnickel-Schichten bei vielen Ringen keinerlei optische Effekte einstellten, traten diese bei Nickel-Wolfram-Schichten in leicht veränderlichem, geringem Umfang auf. Hier erscheint eine gleichmäßige Schicht des Beschichtungswerkstoffs auf den Kontaktrollen vorteilhaft zu sein, wie sie sich auf den Reinnickel-Kontaktrollen einstellte, durch die auftretenden Abplatzungen an den NiW-Rollen jedoch nicht in gleichem Maß vorhanden war.

Veränderungen am Anodensystem waren aus zweierlei Gründen notwendig: Einerseits weil die Stromdichteverteilung weiter optimiert wurde, andererseits aufgrund verfahrensspezifischer Passivierungseffekte am Anodenmaterial. Die Passivierung der Anoden erforderte eine bessere Kontaktierung des Anodenmaterials zum stromführenden Titan, welche mit einer größeren metallischen Fläche besser sichergestellt werden konnte. Da die Verwendung von Streckmetall-Anodenkörben üblich ist und bei der Prototypanlage nur auf Grund der günstigeren Fertigung das aus dem Becherglas bekannte System übertragen wurde, stellt die zweite Generation nur eine logische Evolution dar. Eine solche Lösung wäre bei einer Industrieanlage bereits von Anfang an eingesetzt worden.

Nur zwei Änderungen sind bei der prototypischen Umsetzung einer neuartigen Lösung eine sehr geringe Anzahl an Überarbeitungen, insbesondere da sich die Verfahrenstechnik ebenfalls im Entwicklungsstadium befand. Die systematische Planung anhand der entwickelten Methodik vor der Umsetzung ermöglichte die Identifikation kritischer Punkte vorab und konnte so größere Umbauten verhindern. Aus der Stromdichtesimulation waren die Notwendigkeit mehrerer Anodenkreise und der Bedarf von Blenden bekannt. Entsprechende konstruktive Anforderungen und Schnittstellen konnten somit bereits bei der ersten Realisierung integriert werden. Eine genaue Aufarbeitung der Anforderungen erlaubte eine optimale Anpassung der Anlage an qualitätsrelevante Aspekte, wie beispielsweise den aus Schichtdickenverteilungssicht notwendigen konstanten Füllstand durch einen Überlauf.

### Vollflächige, kontaktstellenfreie Beschichtung

Die vorgestellte Beschichtungstechnik kann eine nahtlose und vollflächige Beschichtung ermöglichen. In metallografischen Untersuchungen wurden keine vorrichtungsbedingten durchgängigen Fehl- oder Kontaktstellen nachgewiesen. Die Veränderungen an den Kontaktierungs- und Auflagerflächen mit Überrollbelastung weisen im Fall von Nickel-Wolfram optische bzw. verfahrens- und geometriebedingte Effekte auf. In den Ätzungen wurden teilweise Linienartefakte an der Kontaktstelle sichtbar, welche auf die Korrosionsanfälligkeit jedoch keinen entscheidenden Einfluss zu haben scheinen. Anhand der Salzsprühtests wurde eine vollständig umhüllende Beschichtung festgestellt, die auftretenden



Korrosionsangriffspunkte konnten nicht auf vorrichtungstechnische Ursachen zurückgeführt werden.

### Schichtdickenverteilung und Toleranzeinhaltung

Die Schichtdickenverteilung konnte durch Simulation und Optimierung der primären Stromdichteverteilung im Lauf der Versuchsreihen stark verbessert werden. Die gute Streufähigkeit des Nickel-Wolfram-Elektrolyten erzeugte bereits ohne Blenden eine bessere Verteilung als ein Reinnickel-Referenzelektrolyt, welche jedoch den Ansprüchen eines Wälzlagers noch nicht entsprach. Durch die nach der Inbetriebnahme ausgelegten und umgesetzten Blenden konnten die Abweichungen minimiert werden. Für die Laufflächen wurden zuverlässig Schwankungen von weniger als 5 µm erreicht. Das Verhältnis zum jeweiligen Einbaudurchmesser konnte ebenfalls in einem brauchbaren Bereich von 90 % bis 110 % erzeugt werden. Haupteinflussfaktor hierfür ist die vorgegebene Stromverteilung zwischen Innen- und Außenkreis der Anoden. Beachtet werden müssen veränderliche Elektrolytverhaltensweisen, bei unterschiedlichen Nennstromdichten konnte ein verändertes Verhältnis festgestellt werden. Die Stromverteilung der Gleichrichter muss somit für jede Nennstromdichte separat ermittelt und vorgegeben werden. Für den verwendeten Nickel-Wolfram-Elektrolyten war die Optimierung somit ausreichend, bei einem Einsatz alternativer Verfahren muss das jeweilige Streuverhalten berücksichtigt und ggfs. eine neue Auslegung durchgeführt werden. Weil die Anforderungen mit dem relevanten Elektrolyten erreicht wurden, wurde im Rahmen der Arbeit auf weitere Berechnungen verzichtet.

Potenziell problematisch für das möglichst exakte Erreichen der Zielschichtdicke erwies sich die veränderliche Abscheiderate des Elektrolyten, welche erst durch paralleles Referenzieren in Becherglasversuchen beherrschbar wurde. Die Beschichtungen der letzten Versuche zeigten eine gute Maßgenauigkeit und Toleranzeinhaltung in den als Hauptziele definierten Bereichen (Rundheit, geometrische Abmessungen). Nur die Rauheit wurde aufgrund der hohen Vorgaben durchgehend nicht erreicht. Ob eine entsprechende Rauheit mit dem verwendeten Verfahren direkt erreicht werden kann, muss in weiteren Untersuchungen geprüft werden. Alternativ wäre die Durchführung eines nachfolgenden Feinschleif- oder Polierschritts denkbar. Die Notwendigkeit ist in Abstimmung mit dem

Lagerhersteller zu prüfen. Ebenso ist in weiteren Analysen die Ursache für die Messwerte verschiedener lagerspezifischer Toleranzen zu prüfen, welche bei den vorhandenen Messungen außerhalb der Grenzwerte lagen.

Insgesamt konnten die im Rahmen der Arbeit definierten und für die Prüfstandversuche vorrangig relevanten Entwicklungsziele erreicht werden. Die erzeugten Schichtdickenverteilungen und Toleranzwerte sind in Anbetracht der Lagergeometrie bemerkenswert, insbesondere da auf Grund des verwendeten löslichen Anodenmaterials nicht auf die Verwendung von Formanoden zurückgegriffen werden konnte und sowohl Innen- als auch Außenring mit denselben Anoden hergestellt wurden.

---

## 9 Reflexion der Methodik

Nach Abschluss des Fallbeispiels können nicht nur die erarbeiteten technischen Lösungen, sondern auch die durchgeführte Methodik anhand der Erkenntnisse bewertet werden. Es werden daher nachfolgend die beiden Detailmethodiken der Entwicklungssegmente 1 und 2 mit den Hauptfragestellungen dieser Arbeit und die allgemeine Methodik analysiert.

### 9.1 Fazit Detailmethodik zur Optimierung der Maßhaltigkeit

Eine absolut exakte Übereinstimmung der Prognose mit späteren Beschichtungen war aufgrund der angenommenen Vereinfachungen bei der Generierung der Korrekturfaktorfunktion nicht zu erwarten. Viele Einflussfaktoren wie Hydrodynamik, Oberflächen- und Kantenbeschaffenheit (Grate) entsprechen dem Beschichtungsstand (siehe 3.2.2) und unterscheiden sich somit von den realen Zuständen in einem anderen Beschichtungsbehälter. Daher ist die Bewertung der Prognoselinien unter der Prämisse einer Näherung und nicht einer exakten Vorhersage vorzunehmen.

Die erhaltenen Prognosekurven wurden zur besseren Beurteilung für Versuchsreihe 3 den Mittelwerten der einzelnen Ringmesspunkte gegenübergestellt (Abbildung 9.1, Abbildung 9.2).

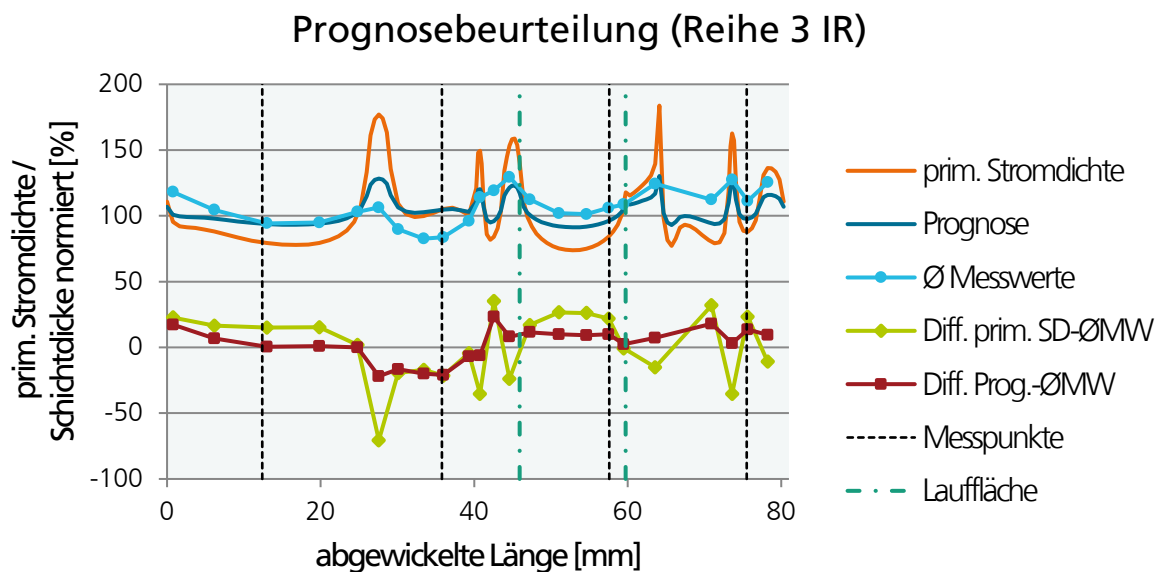


Abbildung 9.1: Prognoseabweichungen für Innenringe. Gegenüberstellung von primärer Stromdichte, Prognose und normierten Messmittelwerten sowie der Differenz zwischen primärer Stromdichte und Prognose zu normierten Messmittelwerten (ØMW: Mittelwerte der ausgewerteten Ringe am jeweiligen Messpunkt).

Die Innenringe zeigen eine hohe Übereinstimmung im Bereich des Einbaudurchmessers und eine gute Näherung an der Lauffläche. Der Kontaktflächenbereich liegt erwartungsgemäß unterhalb der Prognose, insgesamt zeigt sich eine deutlich bessere Näherung als bei der primären Stromdichte. In Zahlen ausgedrückt ergibt sich für die Differenz zwischen Prognose und Messwerten eine Standardabweichung von 12,5 %. Wird die Kontaktfläche aus der Berechnung genommen (die Kontaktrollen-Mitbeschichtung wird weder in der primären Stromdichtesimulation noch bei der Prognose berücksichtigt), verbessert sich dieser Wert auf 9,6 %. Für die Außenringe stellt sich ein ähnliches Bild dar, die Kongruenz ist jedoch mit einer Standardabweichung von 8,9 % etwas besser (ohne Kontaktfläche 8,7 %).

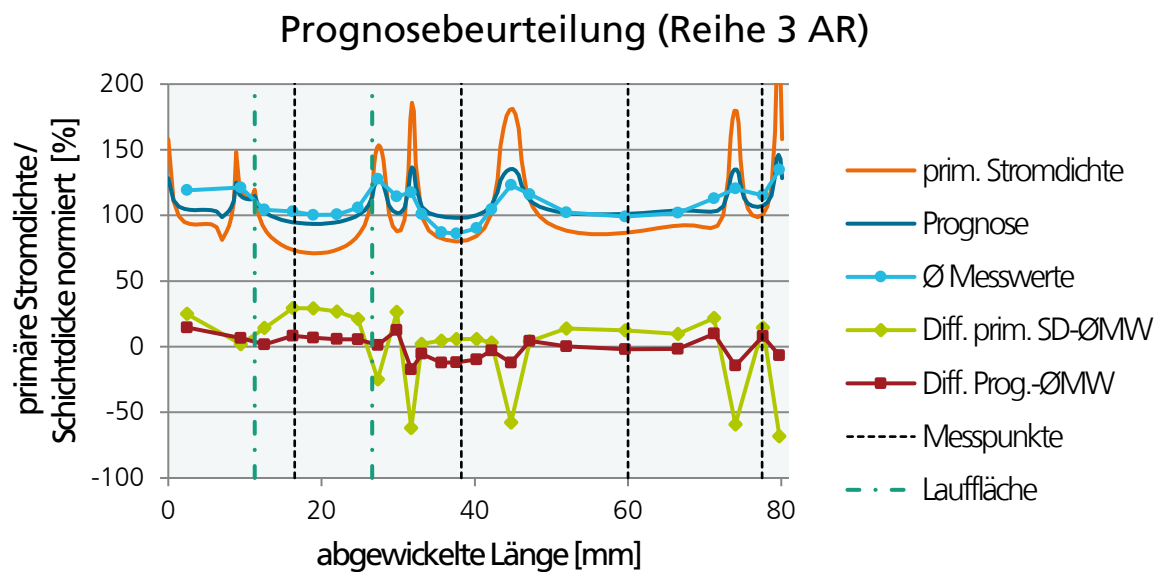


Abbildung 9.2: Prognoseabweichungen für Außenringe. Gegenüberstellung von primärer Stromdichte, Prognose und normierten Messmittelwerten sowie der Differenz zwischen primärer Stromdichte und Prognose zu normierten Messmittelwerten (ØMW: Mittelwerte der ausgewerteten Ringe am jeweiligen Messpunkt).

In den Versuchsauswertungen wurde eine zunehmende Abweichung an den Kanten bzw. in Bereichen mit einer sich auf geringem Raum stark ändernden primären Stromdichte festgestellt. Dies spiegelt sich auch in den ermittelten höchsten Differenzen zu den gemessenen Werten wider. Ursache dürfte eine Beeinflussung der Umgebung durch die hohen Spitzen an den Kanten sein, diese Wechselwirkungen werden durch die rein auf den primären Stromdichteverlauf bezogene Prognoselinie nicht erfasst.

Insgesamt erzeugt die entwickelte Methodik ein deutlich näher an der Realität liegendes Verhalten und gibt somit für eine Vorab-Simulation eine bessere Einschätzungsmöglichkeit der zu erwartenden Schichtdickenverteilung. Durch die einfache Datenermittlung mit einer überschaubaren Versuchszahl im Labor ist ein sehr gutes Verhältnis von Aufwand zu Nutzen gegeben. Die gute Übereinstimmung belegt die für einen „synthetischen“ Versuchskörper hohe Praxisrelevanz des genutzten Profilkörpers. Insgesamt ist die entwickelte Methodik zur Schichtdickenoptimierung mit den verwendeten Optimierungsmöglichkeiten und der iterativen Vorgehensweise als zielführend zu betrachten.

---

Die geringe Anzahl an Änderungen im laufenden Betrieb des Prototyps bestätigt auch die gesamte Detailmethodik in der vorgeschlagenen Abfolge. Durch die Berechnung mit den aus anderen Entwicklungssegmenten abgeglichenen Randbedingungen konnte im Entwicklungsprozess eine Grundlage für die umgesetzte Anlage erstellt werden. Die nachträglichen Änderungen an der Stromverteilung auf die einzelnen Gleichrichterkreise und eine Feinabstimmung der Blenden waren im Entwicklungsprozess absehbar und konnten in der Gesamtkonzeption der Anlage bereits mit vorgesehen werden.

## 9.2 Fazit Detailmethodik für eine kontaktstellenfreie, vollflächige Beschichtung

Die Ergebnisse der Arbeiten zur Vorrichtungsfunktion stellen einen Nachweis für die Eignung der entwickelten Methodik im vorliegenden Fall dar. Über die Durchführung der Methode wurde ein Vorrichtungskonzept ermittelt, das sich bei der Umsetzung als geeignet zur Erreichung der definierten Anforderungen erwies.

Durch die verschiedenen Schritte, Kriterien, Vorauswahl und Bewertung der Methodik wurden im vorliegenden Fall die untauglichen Ansätze erfolgreich eliminiert und eine erfolgsversprechende Lösung ermittelt, welche auch der realen Überprüfung standhält. Ob es sich bei der verwendeten Lösung um die absolut gesehen beste Lösungsvariante handelt, kann bei der Umsetzung von nur einer Vorrichtung nicht geklärt werden. Selbst bei einer Prüfung der bestbewerteten fünf Varianten / Prinzipien könnte diese Aussage nicht absolut getroffen werden, da auch die konkrete konstruktive Umsetzung eine entscheidende Rolle spielt.

Nichtsdestotrotz beweist der geringe Korrekturbedarf die Ermittlung einer hervorragend geeigneten Lösung. Die zwei unter 8.3 beschriebenen Änderungen erfolgten nicht aufgrund des Prinzips der ermittelten Lösung, sondern wegen deren Ausführung. Das gefundene Lösungsprinzip ist somit uneingeschränkt tauglich und basiert auf nachvollziehbaren Entscheidungen. Eine erfolgreiche Anwendung der Methodik für andere Problemstellungen erscheint somit wahrscheinlich.

### 9.3 Fazit allgemeine Methodik

Die allgemeine Methodik ermöglicht eine Evolution bestehender Ansätze mit einer Ausrichtung auf die interdisziplinäre Galvanotechnik. Die Aufteilung in spezifische Segmente für die Entwicklung erlaubt eine Fokussierung auf relevante Entwicklungsaufgaben ohne Vernachlässigung anderer Notwendigkeiten. Hierbei ist jedoch eine klare Definition in der Entwicklungsplanung notwendig, welche jedoch aufgabenspezifisch und ggfs. auch entwicklungsstufenabhängig zu treffen ist. Dies ist für die Anwendung der Methodik von Vorteil, da es für das Fallbeispiel die Beschränkung auf die notwendigen Aspekte ermöglicht, im Falle einer Skalierung jedoch auch eine Veränderung der Prioritäten erlaubt und somit unterschiedliche Randbedingungen optimal abbilden kann.

Ein potenzieller Nachteil der Entwicklung in Segmenten ist die Gewährleistung eines funktionierenden Austauschs zwischen den gegebenenfalls unterschiedlichen Entwicklungsteams. Während dies im Rahmen des Fallbeispiels durch die enge Zusammenarbeit und geringe Anzahl beteiligter Personen gut sichergestellt werden konnte, ist dies im Fall von größeren Teams bzw. höherer Personenanzahl möglicherweise schwieriger. Dies ist zwar kein spezifisches Problem dieser Methodik, sollte jedoch bei der Durchführung mitberücksichtigt werden.

Durch die Charakteristika einer galvanischen Anlage ist ein rein sequenzieller Top-Down- oder Bottom-Up-Ansatz nicht zielführend, um Randbedingungen und Anforderungen zu erfüllen und eine schnelle Entwicklung zu ermöglichen. Im Zuge einer effizienten Entwicklung muss sowohl der Gesamtaufbau als auch die Behälterauslegung parallel erfolgen, um qualitäts- und kapazitätsrelevante Faktoren abzudecken. Die Iterationszyklen sind bei der Entwicklung einer neuartigen galvanischen Produktionstechnik optimal geeignet, da es eine flexible und schnelle Reaktion der verschiedenen Entwicklungssegmente auf neue Informationen bzw. veränderte Randbedingungen erlaubt. Dies hat sich sowohl während der theoretischen Entwicklung in Kombination mit der parallel verlaufenden Verfahrenstechnikentwicklung gezeigt, als auch bei der gleichzeitigen Generierung einer Vorrichtungstechnik, der Optimierung der Schichtdickenverteilung und der Erstellung des Gesamtaufbaus der Anlage.

Der Gesamtaufbau der Methodik mit einer Beschränkung auf Basiszyklen und eine flexible Erweiterung mit ergänzenden Vorgehensweisen bzw. der Anpassung auf Detailebene erlaubt dabei eine sehr gute Anpassung an die Entwicklungsaufgabe. Eine Vorabvalidierung wurde zwar im Rahmen des Fallbeispiels (Entwicklungsstufe als Prototyp) nicht vorgenommen, erscheint jedoch bei entsprechender Möglichkeit speziell bei der Realisierung von neuen Konzepten für industrielle Anlagen als sehr sinnvoll (beispielsweise Funktionsmuster im Kleinmaßstab).



---

# 10 Zusammenfassung und Gesamtfazit

Im Rahmen der Arbeit wurden verschiedene Themenbereiche um und für die Galvanotechnik bzw. den galvanotechnischen Anlagenbau behandelt, neue Methodiken erarbeitet und an einem Fallbeispiel durchgeführt. Abschließend werden nun die Hauptpunkte zusammengefasst und im Kontext der Aufgabenstellung diskutiert.

## 10.1 Zusammenfassung der Arbeit

Eine Vielzahl unterschiedlicher Gründe spricht für die Verwendung von Beschichtungen, beispielsweise kann aus wirtschaftlicher Sicht ein kostengünstiger Grundwerkstoff verwendet werden und die Beschichtung liefert die funktionsnotwendigen Oberflächeneigenschaften. Erwünscht sind Verschleiß- oder / und Korrosionsschutzeigenschaften, welche die Lebensdauer der Bauteile und somit der gesamten Produkte erhöhen. Auf diese Weise dienen Beschichtungen der Verbesserung der Ressourcen- und Materialeffizienz. Die Oberflächeneigenschaften müssen dabei den Neuentwicklungen bei Produkten und Produktionsprozessen, wie beispielsweise im Bereich der erneuerbaren Energien, angepasst und mitentwickelt werden.

Wasser- und Gezeitenkraftwerke können als alternative Energiequellen dienen, sind im Meerwasser jedoch hohen korrosiven Angriffen ausgesetzt. Für eine hohe Effizienz wird darüber hinaus eine niedrige Verlustleistung angestrebt. Im Fall von Wälzlagern könnte der Verzicht auf Dichtungen Reibungsverluste minimieren, sofern die eingesetzten Komponenten und Materialien den Umgebungsbedingungen standhalten. Eine vorteilhafte Entwicklung stellt somit ein korrosionsbeständiges Lager ohne Abdichtungen dar, was in der Konsequenz eine Mediensmierung mit Meerwasser bedeutet. Im Zuge einer solchen Entwicklung werden galvanisch abgeschiedene Schichten als Möglichkeit zur Realisierung dieser Eigenschaften betrachtet. Für die Aufbringung der Schichten wird eine geeignete Fertigungsmöglichkeit benötigt. Ein Ziel der umgesetzten Beschichtungsanlage war somit

die Herstellung beschichteter Lagerringe für realitätsnahe Untersuchungen auf einem speziellen Lagerprüfstand.

Die Kombination einer hochkorrosiven Einsatzumgebung mit dem Präzisionsbauteil Wälzlager definiert die Anforderungen an die Schicht- und Applikationstechnik: Fehlstellen wie beispielsweise Kontaktpunkte müssen als potenzielle Angriffspunkte für Korrosion vermieden werden. Gleichzeitig müssen die Schichten maßhaltig abgeschieden werden, um die Geometrie- und Formtoleranzen eines Lagerrings beizubehalten. Resultierend daraus ergaben sich die Forschungsfragen: Können geometrisch anspruchsvoll geformte rotationssymmetrische Bauteile vollflächig, d. h. ohne Kontaktstellen, und endmaßnah galvanisch beschichtet werden? Und wie kann eine Methodik für die Entwicklung einer geeigneten Produktionstechnik für die galvanische Beschichtung von hochbelasteten, rotationssymmetrischen Bauteilen gestaltet sein?

In der Recherche vorhandener Lösungen konnte keine vollständig passende Produktions- und Vorrichtungstechnik ermittelt werden, die Grundelemente der bekannten Anlagentechnik können jedoch genutzt werden. Es sind Möglichkeiten zur Beeinflussung der Schichtdickenverteilung und Hilfsmittel zur Simulation der Stromdichteverteilung bekannt. Für die Charakterisierung des Abscheidungsverhaltens von Elektrolyten stehen experimentelle Lösungen zur Verfügung, es existiert jedoch keine einfache und praxistaugliche bekannte Vorgehensweise zur Verknüpfung dieser Daten mit Simulationswerten. Die galvanische Beschichtung von Wälzlagerkomponenten ist aus Patenten bekannt, wird jedoch nur im Rahmen geringer Schichtdicken ohne Veränderung der Toleranzeigenschaften genutzt und erfolgt zumeist nur für einzelne Funktionsbereiche. Entwicklungsmethodiken, Methoden und Vorgehensweisen sind für den Produktentstehungsprozess und die allgemeine Entwicklung in verschiedenen Varianten bekannt. Eine spezielle Umsetzung für galvanotechnische Anforderungen konnte jedoch vorab nicht identifiziert werden.

Die im vorletzten Absatz gestellten Forschungsfragen werden also durch den bekannten Stand der Technik nicht beantwortet. Der Mangel einer geeigneten technischen Lösung und das Fehlen einer passenden Methodik erforderten die Entwicklung einer neuen Methodik zur Bearbeitung der Problemstellung. Diese Arbeit wurde daher für die Entwicklung einer Lösung in mehrere Abschnitte gegliedert. Die Aufarbeitung des bekannten

---

Stands der Technik zu den relevanten Aspekten rund um die Anforderungen der Aufgabenstellung zur Korrosion und Lagerbeschichtung, galvanotechnische Grundlagen, Simulationsmöglichkeiten, dem Anlagenbau und allgemeinen Entwicklungsmethodiken bilden den Ausgangspunkt zur Schaffung neuer Methodiken. Die allgemeine Methodik kann die notwendigen Einflussfaktoren und Besonderheiten berücksichtigen. Diese allgemeine Methodik wurde für die Entwicklung einer galvanischen Anlagentechnik mit besonderen Ansprüchen ans Maßhaltigkeit und Vorrichtungstechnik instanziiert. Innerhalb dieser instanziierten Methodik wurden eine weitere Detailmethodik für die Ermittlung und Entwicklung eines Konzepts zur kontaktstellenfreien, vollflächigen Beschichtung erstellt. Im Rahmen des Fallbeispiels wird diese Methodik zur Ermittlung neuer Konzepte für die Entwicklung einer Beschichtungstechnik für Wälzlagerringe genutzt, mit der vollflächige und endmaßnahe Schichtabscheidungen mit dem gewählten Elektrolyten möglich sind. Innerhalb der zweiten entwickelten Detailmethodik zur Optimierung der Maßhaltigkeit wurde ein Vorgehen zur Verbesserung der Stromdichteverteilung und eine einfache Prognose der Schichtdickenverteilung erarbeitet, um eine schnelle Einschätzung der Simulationsergebnisse bezüglich der Schichtdickenverteilung zu erhalten.

Auf Basis der Instanzierung wurden anhand des Fallbeispiels die Entwicklungen bis auf die Detailebene durchgeführt und zu einem Gesamtsystem zusammengeführt, welches als Prototypanlage realisiert wurde. Für die Durchführung der Methodik zur Ermittlung eines Konzepts zur kontaktstellenfreien, vollflächigen Beschichtung wurde eine Reihe von Lösungskonzepten erstellt und wie vorgesehen bewertet oder verworfen. Das ausgewählte Prinzip beinhaltet zur Vermeidung statischer Kontaktpunkte (Fehlstellen) eine rollende Kontaktierung bei rotierendem Lagerring. Durch die Nutzung einer statischen Scheibe zur elektrischen Kontaktierung kann auf schleifende Kontakte verzichtet werden. Die Rotation des Lagerrings ist für die Einhaltung der anspruchsvollen Formtoleranzen erforderlich und stellt eine notwendige Relativbewegung zwischen Bauteil und Elektrolyt sicher.

Die eingetauchten Teile der Vorrichtung und der Aktivraum wurden im Rahmen der Methodik zur Optimierung der Maßhaltigkeit des beschichteten Lagerrings über Simulation berechnet und optimiert. Beeinflussungsmöglichkeiten zur Einstellung einer bestimmten

Schichtdickenverteilung wurden auf Basis der Simulationsrechnungen mit der Planung von zwei Anodenkreisen bereits in einer frühen Phase vorgesehen. Um die Vorrichtung herum wurde eine komplette Versuchsanlage entworfen, welche auf die Nutzung des gewählten Nickel-Wolfram-Elektrolyten ausgelegt wurde. Die Auswahl des Elektrolyten erfolgte in einer parallel laufenden Arbeit zur Verfahrens- und Schichtentwicklung und war somit vorgegeben. Nach Abschluss der Entwurfsphase wurden Anlage und Vorrichtungen ausgearbeitet und als Prototyp im Technikum realisiert.

Die Validierung des erarbeiteten Lösungskonzepts und somit auch die Plausibilität der genutzten Methodiken erfolgten im Rahmen experimenteller Versuche, welche mit der Inbetriebnahme der Anlage mit einem Sulfatnickel-Elektrolyten begann. Somit wurde die prinzipielle Funktion mit einem Verfahren geprüft, für das ausreichende Erfahrungswerte bekannt waren und sich im Gegensatz zum Nickel-Wolfram-Elektrolyten nicht in der Entwicklung befindet. Anhand dieser Inbetriebnahme und den Erstversuchen mit Nickel-Wolfram wurde die Notwendigkeit einer weiteren Stromdichteoptimierung festgestellt und eine vorgesehene Abschirmung der Kontaktrollen verworfen, da diese die Schichteigenschaften negativ beeinflusste. Diese Endoptimierung der Stromdichte wurde im Entwicklungsprozess bewusst zurückgestellt, hätte jedoch auch bereits in einer früheren Phase erfolgen können. Auf Grund des frühzeitig absehbaren Bedarfs wurden jedoch bereits Schnittstellen für die Nachrüstung von Blenden vorgesehen. In der folgenden Stromdichteoptimierung wurden nichtleitende Blenden berechnet und konstruktiv umgesetzt, zusätzlich wurde das Anodensystem überarbeitet.

Mit den Optimierungen konnten homogenere Schichtdickenverteilungen hergestellt werden, welche im Rahmen der gesteckten Anforderungen lagen und somit die Beschichtung von Lagerringen für weitere Untersuchungen auf dem externen Lagerprüfstand erlaubten. Nach der experimentellen Beschichtung wurden die Lagerringe metallografisch ausgewertet und die Schichtdickenverteilung analysiert. In diesen Untersuchungen konnten zwar Effekte an der Kontaktfläche, jedoch keine systematischen Fehlstellen für die Korrosion festgestellt werden. Die vollflächige Beschichtung wurde anhand von Salzsprühtests verifiziert, dabei aufgetretener korrosiver Angriff konnte nicht auf vorrichtungstechnische Ursachen zurückgeführt werden. Die zuvor ermittelten Schichtdickenwerte wurden darüber

hinaus zur Prüfung der Korrekturfaktorfunktionen mit den generierten Prognoselinien verglichen.

## 10.2 Diskussion der Forschungsfragen

Die Frage „Können geometrisch anspruchsvoll geformte rotationssymmetrische Bauteile vollflächig, d. h. ohne Kontaktstellen, und endmaßnah galvanisch beschichtet werden?“ wurde für das Fallbeispiel der vorliegenden Lagerringe bearbeitet. Die entwickelte Vorrichtung ist dabei eine Möglichkeit zur Kontaktierung und Rotation eines Bauteils ohne statische Aufnahmepunkte. Somit konnten diese Fehlstellen ausgeschlossen werden. Als Fragestellung blieb der Einfluss rollender Belastungen während der Schichtabscheidung. Die hierbei festgestellten optischen Effekte zeigen, dass Veränderungen auftreten – eine vollflächige Beschichtung konnte jedoch durch metallografische Untersuchungen bestätigt werden und Korrosionstests ergaben keine systembedingten Auffälligkeiten. Für den wichtigen Korrosionsaspekt wurden die gewünschten Eigenschaften somit erreicht. Die Patenterteilung (Patentschrift DE102015113129 B4 2015) für die Vorrichtung bestätigt die Neuartigkeit des Lösungsansatzes. Im Rahmen der Versuche wurde die Funktionsfähigkeit bewiesen. Der Einsatz in unterschiedlichen Elektrolyten wird hauptsächlich durch die verwendeten Materialien bestimmt, die vorliegende Konstruktion wurde mit einem sauren Nickel-Elektrolyten und einem alkalischen Nickel-Wolfram-Elektrolyten geprüft. Eine Bestätigung der pauschalen Eignung für alle galvanischen Elektrolyte ist auf Grund der Vielzahl an Variationsmöglichkeiten nicht möglich, durch die Verwendung beständiger Werkstoffe ist jedoch ein breites Spektrum potenziell nutzbar. Eine Einzelfallbewertung der chemischen Beständigkeit und spezieller Eigenschaften (z. B. schnell kristallisierende Bestandteile) ist vor dem Einsatz eines neuen Mediums notwendig, gegebenenfalls sind Änderungen und Ergänzungen vorzunehmen.

Die endmaßnahe Beschichtung wurde mit dem verwendeten Nickel-Wolfram-Elektrolyten und den beiden Beispiellagerringen erreicht. Eine allgemeine Auslegung von Blenden und Anodensystem für beliebige Bauteile ist dabei nicht möglich. Sie hat für jedes Bauteil bzw. zumindest jeden Bauteiltyp individuell zu erfolgen. Die erarbeitete Konfiguration bietet

einen Anhaltspunkt für Ringe eines Schrägkugellagers. Wie in der Arbeit gezeigt, sind die erreichbaren Schichtdickenverteilungen nicht nur von der Geometrie, sondern auch von der Elektrolytstrefähigkeit abhängig. Für andere Elektrolyte können daher weitere Maßnahmen notwendig werden. Zur Durchführung dieser Planungen und Auslegungen kann das erarbeitete Vorgehensmodell verwendet werden.

An einigen Lagern traten Überschreitungen bei einigen Wälzlagertoleranzen auf. Hier sind weitere Entwicklungen nötig, vor allem in Abstimmung mit dem Wälzlagerhersteller und mittels einer genauen Analyse der Ursachen. Für die ersten Prüfstandversuche waren die erreichten Beschichtungen ausreichend. Eine Serientauglichkeit erfordert jedoch ggfs. weitere Optimierungen und Tests.

Die zweite Forschungsfrage („Wie kann eine Methodik für die Entwicklung einer geeigneten Produktionstechnik für die galvanische Beschichtung von hochbelasteten, rotationssymmetrischen Bauteilen gestaltet sein?“) ergab sich aus dem Bedarf nach einer konkreten Lösung. Da sie als Basis für das entwickelte Praxisbeispiel diente, ist eine Diskussion unter Berücksichtigung der dort beschriebenen Erfahrungen sinnvoll.

Durch die spezifischen Anforderungen war eine einfache, isolierte Nutzung vorhandener Entwicklungsmethodiken nicht möglich und es musste eine neue Methodik mit weiteren Methodiken auf Detailebene erarbeitet werden. Die allgemeine Methodik erwies sich mit den Iterationszyklen als geeignet für die Entwicklung einer galvanischen Produktionstechnik. Sie ermöglicht eine flexible und schnelle Abstimmung zwischen unterschiedlichen Entwicklungsschwerpunkten, was rasche Anpassungen an neue Erkenntnisse oder veränderte Randbedingungen erlaubt. Die Möglichkeit zur Ergänzung und Präzisierung bezüglich galvanotechnisch entscheidender Aspekte in Segmenten erlaubt gegebenenfalls eine flexible Anpassung an unterschiedliche Aufgabenstellungen (Prototyp, Industrieanlage) ohne einen starren Rahmen.

Die Detailmethodik zur Ermittlung eines Konzepts für eine kontaktstellenfreie Beschichtung erwies sich bei der Behandlung der ersten Forschungsfrage als praxistauglich. Bei den Kriterien und Auswahlritten ist die Zusammenführung der interdisziplinären Aufgabenstellungen aus Maschinenbau, (Elektro-) Chemie und Physik entscheidend, um ein gutes Konzept zu ermitteln und später ein geeignetes Beschichtungsergebnis zu erzielen.

Anhand der wenigen Änderungen an der umgesetzten Anlage nach der Inbetriebnahme kann dies als zielführend angesehen werden.

Die Kennlinienbildung bzw. die Bestimmung der Korrekturfaktorfunktionen bringt die elektrochemischen Effekte in das Prognosemodell. Die Nutzung dieser Daten erlaubt die bessere Einschätzung des Optimierungsbedarfs bzw. der Erreichung von Optimierungszielen bezüglich der Maßhaltigkeit während des Entwurfs der Vorrichtungs- und Anlagentechnik. Die entwickelte Prognosemethode liefert verglichen zur reinen primären Stromdichteverteilung genauere Abschätzungen der realen Schichtdickenverteilung, stellt jedoch keine exakte Simulation der elektrochemischen Vorgänge dar und ist unter dem Gesichtspunkt einfacher und praxistauglicher Anwendung zu sehen.

### 10.3 Ausblick

Die allgemeine Methodik kann in weiteren Entwicklungsprojekten zu unterschiedlichen Anlagentypen eingesetzt werden. Hierdurch können Erfahrungen gesammelt werden, welche in die Methodik zurückgespiegelt und für deren weitere Optimierung genutzt werden können. Die bisherige Nutzung im Fallbeispiel hat eine Eignung bisher bestätigt, stellt jedoch nur einen Anwendungsfall dar. Eine weitere Analyse der Methodik bei zukünftiger Durchführung und, sofern notwendig, eine Weiterentwicklung oder Anpassung sind daher sinnvoll.

Für das generierte Prognoseverfahren ist die Sammlung weiterer Daten und Erfahrungen interessant. Aus wissenschaftlicher Sicht steht eine tiefergehende Beurteilung mit Vergleich zu anderen Streufähigkeitscharakterisierungen wie beispielsweise der Hull-Zelle oder der rotierenden Hull-Zelle aus. Diese Aufbauten verwenden sehr gleichmäßige Probekörper ohne Ecken / Kanten, deutliche Unterschiede zu dem verwendeten Profilkörper sind daher nicht auszuschließen.

Mit der umgesetzten Anlage und den erarbeiteten Ergebnissen wurde eine Entwicklungsplattform zur Beschichtung von Wälzlageringern geschaffen. Die begonnenen Entwicklungen können weitergeführt und optimiert werden, sowohl aus Sicht der Applikations-

---

technik als auch für die Verfahrenstechnik. Konkrete Ansätze für die weitere Vorgehensweise sind im Rahmen eines Forschungsprojekts bereits in der Durchführung. Der industrielle Einsatz für die Lagerbeschichtung ist dabei auch entscheidend vom Verhalten der abgeschiedenen Schicht bei auftretenden Belastungen abhängig. Dies wurde im Zusammenhang dieser Arbeit nicht betrachtet, da hier die verwendeten Schichtmaterialien bzw. das Schichtsystem mit entscheidend ist. Bei entsprechend positiver Leistungsstärke ist die reguläre industrielle Anwendung denkbar. Im Fall von kleineren Lagern wie den Beispielen wären Änderungen von der bisherigen Einzelfertigung zu einer Mehrfachfertigung bzw. Parallelisierung vorteilhaft. In Bezug auf die geänderten Randbedingungen ist hier eine neue Durchführung der Methode gegebenenfalls sinnvoll, um die abweichenden Anforderungen neu gewichten und bewerten zu können.

Eine Skalierung der Technik für größere Bauteile ist jedoch denkbar. Für die Schichtdickenverteilung und die Toleranzveränderung durch die Beschichtung dürfte sich dies sogar positiv auswirken, da die Toleranzen mit steigender Größe normalerweise ebenfalls breiter werden. Die Schichtdickenverteilung wird bei ähnlicher Geometrie mit zunehmender Größe tendenziell besser, da der Einfluss der Kanten in Relation zu den Flächen abnimmt und durch höheren Einbauraum die Beeinflussungsmöglichkeiten über Blenden höher sind. Die Blenden können aber gleichzeitig komplexer werden. Die entwickelte Methodik kann für eine Anpassung ebenso genutzt werden wie für die Bearbeitung ähnlicher Fragestellungen. Die Methodik zur Optimierung kann auch isoliert von der Gesamtmethodik für eine beliebige Optimierung galvanischer Beschichtungen verwendet werden, sofern die entsprechenden Daten der restlichen Verfahrens- und Anlagentechnik vorliegen oder parallel auf andere Weise erarbeitet werden.



# 11 Literaturverzeichnis

- acatech 2013** acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Hrsg.), 2013. *Technikwissenschaften: Erkennen - Gestalten - Verantworten*. Berlin: Springer.  
ISBN 978-3-642-34604-0  
DOI: 10.1007/978-3-642-34605-7
- Albers et al. 2005** Albers, Albert; Burkhardt, N; Meboldt, M; Saak, M., 2005. SPALTEN Problem Solving Methodology in the Product Development.  
In: Samuel, Andrew E. (Hrsg.): *Engineering design and the global economy*, S. 3513–3524  
DOI: 10.5445/IR/1000007075
- Albers et al. 2007** Albers, Albert; Meboldt, Mirko, 2007. IPEMM-integrated product development process management model, based on systems engineering and systematic problem solving.  
In: Bocquet, Jean-Claude (Hrsg.): *DS 42: Proceedings of ICED 2007, the 16th International Conference on Engineering Design*, Paris, 28.-31.07.2007, 611-612, full paper no. DS42\_P\_537
- Albers et al. 2016a** Albers, Albert; Reiss, Nicolas; Bursac, Nikola; Richter, Thilo, 2016. iPeM – Integrated Product Engineering Model in Context of Product Generation Engineering.  
*Procedia CIRP* **50**, S. 100–105  
DOI: 10.1016/j.procir.2016.04.168
- Albers et al. 2016b** Albers, Albert; Reiß, Nicolas; Bursac, Nikola; Breitschuh, Jan, 2016. 15 Years of SPALTEN Problem Solving Methodology in Product Development.  
In: Boks, Casper (Hrsg.): *Proceedings of NordDesign 2016*. Bristol, United Kingdom: The Design Society, S. 411–420  
ISBN 9781904670810

- 
- Albers et al. 2017** Albers, Albert; Behrendt, Matthias; Klingler, Simon; Reiß, Nicolas; Bursac, Nikola, 2017. Agile product engineering through continuous validation in PGE – Product Generation Engineering.  
*Design Science* **3**, S. 1–19  
DOI: 10.1017/dsj.2017.5
- Allmendinger 2010** Allmendinger, Thomas, 2010. Theorie und Praxis der Hüllzelle.  
*Galvanotechnik* **101** (10), S. 2237–2251
- Amatore et al. 2006a** Amatore, Christian; Oleinick, Alexander I; Svir, Irina, 2006. Construction of optimal quasi-conformal mappings for the 2D numerical simulation of diffusion at microelectrodes.  
*Journal of Electroanalytical Chemistry* **597** (1), S. 77–85  
DOI: 10.1016/j.jelechem.2006.07.035
- Amatore et al. 2006b** Amatore, Christian; Oleinick, Alexander I; Svir, Irina, 2006. Construction of optimal quasi-conformal mappings for the 2D-numerical simulation of diffusion at microelectrodes. Part 1: Principle of the method and its application to the inlaid disk microelectrode.  
*Journal of Electroanalytical Chemistry* **597** (1), S. 69–76  
DOI: 10.1016/j.jelechem.2006.08.001
- Amblard et al. 1979** Amblard, J; Epelboin, I; Froment, M; Maurin, G., 1979. Inhibition and nickel electrocrystallization.  
*Journal of Applied Electrochemistry* **9** (2), S. 233–242  
DOI: 10.1007/BF00616093
- Arbeitsgemeinschaft der Deutschen Galvanotechnik** Arbeitsgemeinschaft der Deutschen Galvanotechnik (Hrsg.), o. J. *Galvanisiergerechtes Konstruieren*.  
Düsseldorf
- Artimax 2016** Artimax, 2016. *Galvanogestelle*.  
Verfügbar unter: <http://artimax.de/galvano-gestelle/>  
Zugriff am: 28.11.2016
- Bach et al. 2005** Bach, Friedrich-Wilhelm; Laarmann, Andreas; Möhwald, Kai; Wenz, Thomas, 2005. *Moderne Beschichtungsverfahren*.  
Weinheim: Wiley.  
ISBN 3-527-30977-2  
DOI: 10.1002/3527604278
- Bacon 1620a** Bacon, Francis, 1620. *Novum Organum*

- 
- Bacon 1620b** Bacon, Francis, 1999. Aphorismen über die Interpretation der Natur und die Herrschaft des Menschen.  
In: Gadenne, Volker; Visintin, Aldo (Hrsg.): *Wissenschaftsphilosophie*.  
Freiburg, München: Alber, S. 35–51  
ISBN 3-495-48005-6
- Bahaj et al. 2003** Bahaj, A.S; Myers, L.E, 2003. Fundamentals applicable to the utilisation of marine current turbines for energy production.  
*Renewable Energy* **28** (14), S. 2205–2211  
DOI: 10.1016/S0960-1481(03)00103-4
- Bard et al. 2001** Bard, Allen J; Faulkner, Larry R., 2001. *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications*.  
2nd ed.  
New York: Wiley.  
ISBN 0-471-04372-9
- Bauernhansl 2013** Bauernhansl, Thomas, 2013. Zukünftige Rahmenbedingungen und Entwicklungstendenzen in der Produktionstechnik.  
In: Zentralverband Oberflächentechnik; Deutsche Gesellschaft für Galvano- und Oberflächentechnik (Hrsg.): *Produktionsprozesse - Anforderungen und aktuelle Entwicklungen*,  
Neu-Ulm,  
25.-26.04.2013
- Bauernhansl 2014** Bauernhansl, Thomas (Hrsg.), 2014. *Energieeffizienz als Wettbewerbsfaktor - Investitionen in die Zukunft: Vortrag gehalten auf dem Marktpartnerkongress der Energiewirtschaft 2014, 4. und 5. November 2014, Berlin*.  
Berlin  
URN: nbn:de:0011-n-3194947
- Beck et al. 2001** Beck, Kent; Beedle, Mike; Van Bennekum, Arie; Cockburn, Alistair; Cunningham, Ward; Fowler, Martin; Grenning, James; Highsmith, Jim; Hunt, Andrew; Jeffries, Ron; Kern, Jon; Marick, Brian; Martin, Robert C; Mellor, Steve; Schwaber, Ken; Sutherland, Jeff; Thomas, Dave, 2001. *Manifesto for Agile Software Development*.  
Verfügbar unter: <https://agilemanifesto.org/>  
Zugriff am: 23.06.2019

- 
- Belis 2015** Belis, Robrecht, 2015. Möglichkeiten der Simulation für die Optimierung bei der Gestellbeschichtung.  
In: Verl, Alexander; Bauernhansl, Thomas (Hrsg.): *Aktuelle Themen bei Modernisierung und Neubau galvanotechnischer Anlagen*.  
Stuttgart: Stuttgarter Produktionsakademie, Seminar SPA 171, Stuttgart, 17.03.2015
- Biboulet et al. 2013** Biboulet, Nans; Gravouil, Anthony; Dureisseix, David; Lubrecht, Antonius A; Combescure, Alain, 2013. An efficient linear elastic FEM solver using automatic local grid refinement and accuracy control.  
*Finite Elements in Analysis and Design* **68**, S. 28–38  
DOI: 10.1016/j.finel.2012.12.007
- Binz et al. 2015** Binz, Hansgeorg; Posner, Benedikt; Roth, Daniel; González Vila, Noelia; Burkhardt, Jochen, 2015. Entwicklung von Leichtbau-Lösungen im Maschinenschutz.  
*News. Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktentwicklung* (1), S. 10–11
- BMBF 2014** Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2014. *Forschungsagenda Green Economy*.  
Verfügbar unter: [https://www.green-economy-plattform.de/medien/pdf/Green\\_Economy\\_Agenda\\_bf.pdf](https://www.green-economy-plattform.de/medien/pdf/Green_Economy_Agenda_bf.pdf)  
Zugriff am: 05.09.2019
- BMBF 2015** Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2015. *Innovationen für eine ressourceneffiziente Produktion*.  
Internet.  
Verfügbar unter: <http://www.bmbf.de/de/12596.php>  
Zugriff am: 30.08.2015
- BMWi 2018** Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2018. *7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung: Innovationen für die Energiewende*.  
Berlin.  
Verfügbar unter: [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/7-energieforschungsprogramm-der-bundesregierung.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=11](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/7-energieforschungsprogramm-der-bundesregierung.pdf?__blob=publicationFile&v=11)  
Zugriff am: 25.03.2020
- Boehm 1986** Boehm, Barry, 1986. A spiral model of software development and enhancement.  
*ACM SIGSOFT Software engineering notes* **11** (4), S. 14–24  
DOI: 10.1145/12944.12948

- 
- Boehm et al. 2000** Boehm, Barry; Hansen, Wilfred J., 2000. *Spiral Development: Experience, Principles, and Refinements: Spiral Development Workshop February 9, 2000*, SPECIAL REPORT CMU/SEI-2000-SR-008.  
Pittsburgh, PA  
Verfügbar unter: [https://resources.sei.cmu.edu/asset\\_files/SpecialReport/2000\\_003\\_001\\_13655.pdf](https://resources.sei.cmu.edu/asset_files/SpecialReport/2000_003_001_13655.pdf)
- Boehm et al. 2003** Boehm, B; Turner, R., 2003. Using risk to balance agile and plan-driven methods.  
*Computer* **36** (6), S. 57–66  
DOI: 10.1109/MC.2003.1204376
- Boehm et al. 2006** Boehm, Barry; Lane, Jo Ann, 2006. 21 st century processes for acquiring 21 st century software-intensive systems of systems.  
*CrossTalk* **19**, S. 4–9
- Boehm et al. 2007** Boehm, B; Turner, R., 2007. Observations on balancing discipline and agility.  
In: *Second Annual IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human-Computer Systems, 2007*, Salt Lake City, UT, USA,  
6/28/2003 - 6/28/2003, S. 32–39  
DOI: 10.1109/ADC.2003.1231450
- Bortels et al. 1996** Bortels, Leslie; Deconinck, Johan; van den Bossche, Bart, 1996. The multi-dimensional upwinding method as a new simulation tool for the analysis of multi-ion electrolytes controlled by diffusion, convection and migration. Part 1. Steady state analysis of a parallel plane flow channel.  
*Journal of Electroanalytical Chemistry* **404** (1), S. 15–26  
DOI: 10.1016/0022-0728(95)04371-3
- Boyd 2018** Boyd, John R., 2018. *A Discourse on Winning and Losing*. Maxwell AFB: Air University Press.  
Verfügbar unter: [https://www.airuniversity.af.edu/Portals/10/AUPress/Books/B\\_0151\\_Boyd\\_Discourse\\_Winning\\_Losing.PDF](https://www.airuniversity.af.edu/Portals/10/AUPress/Books/B_0151_Boyd_Discourse_Winning_Losing.PDF)  
Zugriff am: 07.03.2021
- Britz 2005** Britz, Dieter, 2005. *Digital simulation in electrochemistry*. 3. Auflage.  
Berlin Heidelberg: Springer.  
ISBN 3-540-23979-0

- 
- Brockhoff 2010** Brockhoff, Klaus, 2010. Marktorientierte Technikwissenschaft.  
In: Kornwachs, Klaus (Hrsg.): *Technologisches Wissen*.  
Berlin, New York: Springer, S. 183–209  
ISBN 978-3-642-14371-7
- Broy et al. 2005** Broy, Manfred; Rausch, Andreas, 2005. Das neue V-Modell@XT.  
*Informatik-Spektrum* **28** (3), S. 220–229  
DOI: 10.1007/s00287-005-0488-z
- Chalmers 2007** Chalmers, Alan F., 2007. *Wege der Wissenschaft: Einführung in die Wissenschaftstheorie*.  
6., verb. Aufl.  
Berlin Heidelberg New York: Springer.  
ISBN 978-3-540-49490-4
- Comsol Inc. 2019** Comsol Inc., 2019. *Specification Chart*.  
Verfügbar unter: <https://www.comsol.de/products/specifications/>  
Zugriff am: 04.09.2019
- Czichos et al. 2010** Czichos, Horst; Habig, Karl-Heinz, 2010. *Tribologie-Handbuch*.  
3. Auflage.  
Wiesbaden: Springer Fachmedien.  
ISBN 978-3-8348-0017-6
- Dennis et al. 1981** Dennis, J. K; Jones, D., 1981. Brush plating.  
*Surface Technology* **12** (1), S. 57–73  
DOI: 10.1016/0376-4583(81)90136-9
- Dettner et al. 1963** Dettner, Heinz W; Elze, Johannes (Hrsg.), 1963. *Handbuch der Galvanotechnik: Band 1 - Grundlagen, Einrichtungen, Vorbehandlungen*, Teil 1.  
München: Carl Hanser Verlag
- Deutscher Sparkassen- und Giroverband e. V. 2017** Deutscher Sparkassen- und Giroverband e. V., 2017. *Branchenreport 2017: Oberflächenveredelung und Wärmebehandlung*.  
Stuttgart: Deutscher Sparkassen Verlag GmbH
- Dini 1993** Dini, Jack W., 1993. *Electrodeposition: The materials science of coatings and substrates*.  
Park Ridge, N.J., U.S.A: Noyes Publications.  
ISBN 0-8155-1320-8

- Dörner 1994** Dörner, Dietrich, 1994. Gedächtnis und Konstruieren.  
In: Pahl, Gerhard (Hrsg.): *Psychologische und pädagogische Fragen beim methodischen Konstruieren*.  
Köln: Verlag TÜV Rheinland, S. 150–160  
ISBN 3824902214
- Dresdner Silber und Metallveredlung GmbH 2016** Dresdner Silber und Metallveredlung GmbH, 2016. *Gestellgalvanik*.  
Verfügbar unter: <http://www.dresdnersilber.de/galvanische-oberflaechenveredlung/gestellgalvanik.html>  
Zugriff am: 28.11.2016
- Dukovic 1990** Dukovic, John O., 1990. Computation of current distribution in electrodeposition, a review.  
*IBM Journal of Research and Development* **34** (5), S. 693–705  
DOI: 10.1147/rd.345.0693
- Durney 2000** Durney, Lawrence J. (Hrsg.), 2000. *Electroplating Engineering Handbook*.  
4th Ed., Reprint of the 1st Indian Edition 1987.  
New Delhi, India: CBS Publ
- Ebert 2015** Ebert, Thomas, 2015. Optimale Konstruktion und Dimensionierung formstabiler Anoden.  
In: Zentralverband Oberflächentechnik (Hrsg.): *Oberflächentage 2015*, Berlin, 23.-25.09.2015, 25 Folien
- ECHA 2021** European Chemicals Agency, 2021. *Liste der für eine Zulassung in Frage kommenden besonders besorgniserregenden Stoffe*.  
Verfügbar unter: <https://echa.europa.eu/de/candidate-list-table>  
Zugriff am: 06.02.2021
- Eder 2012** Eder, W. Ernst, 2012. *Comparisons of several design theories and methods with the legacy of Vladimir Hubka*.  
Verfügbar unter: <https://www.designsociety.org/download-publication/33288/Comparison+of+several+design+theories+and+methods+with+the+legacy+of+Vladimir+Hubka>  
Zugriff am: 21.05.2020

- 
- Ehrlenspiel et al. 2013** Ehrlenspiel, Klaus; Meerkamm, Harald, 2013. *Integrierte Produktentwicklung*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG. ISBN 978-3-446-43548-3 DOI: 10.3139/9783446436275
- Elsyca NV 2006** Elsyca NV, 2006. *ELSYCA Software Documentation: ELSy v6.0*
- Elsyca NV 2016** Elsyca NV, 2016. *Elsyca Solutions*. Wijnmaal (Leuven). Verfügbar unter: <http://www.elsyca.com/solutions> Zugriff am: 24.06.2016
- Endres 2015** Endres, Bernd, 2015. Einsatz und Wirtschaftlichkeit von Edelmetallbeschichtungen in der Elektronik. *WOMag* **4** (3), S. 26–27 DOI: 10.7395/2015/Endres3
- Ettemeyer et al. 2007** Ettemeyer, Andreas; Olbrich, Otto, 2007. *Konstruktionselemente - Kapitel 11: Wälzlager*. Verfügbar unter: [http://www.fb06.fh-muenchen.de/fb/index.php/de/download.html?f\\_id=2298](http://www.fb06.fh-muenchen.de/fb/index.php/de/download.html?f_id=2298) Zugriff am: 31.10.2017
- Feldhusen et al. 2009** Feldhusen, Jörg; Löwer, Manuel; Bungert, Frederik, 2009. Agile Methods for Design to Customer. In: Norell Bergendahl, Margareta; Grimheden, M; Leifer, L; Skogstad, P; Lindemann, Udo (Hrsg.): *DS 58-6: Proceedings of ICED 09, the 17th International Conference on Engineering Design, Vol. 6, Design Methods and Tools (pt. 2)*, Palo Alto, 24.-27.08.2009, S. 451–460
- Feldhusen et al. 2013** Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich, 2013. *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. 8., vollst. überarb. Aufl. 2013. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN 978-3-642-29568-3 DOI: 10.1007/978-3-642-29569-0



- 
- Fraunhofer IPK 2015** Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK, 2015. *AnSim Anwendungsorientierte Simulation*.  
Verfügbar unter: [https://www.ipk.fraunhofer.de/fileadmin/user\\_upload/IPK\\_FHG/projekte/AnSim\\_web.pdf](https://www.ipk.fraunhofer.de/fileadmin/user_upload/IPK_FHG/projekte/AnSim_web.pdf)  
Zugriff am: 12.06.2016
- Gadenne et al. 1999** Gadenne, Volker; Visintin, Aldo (Hrsg.), 1999. *Wissenschaftsphilosophie*.  
Freiburg, München: Alber.  
ISBN 3-495-48005-6
- Gaida et al. 1996** Gaida, Bernhard; Aßmann, Kurt, 1996. *Technologie der Galvanotechnik*.  
Saulgau/Württ.: Leuze.  
Lehrbuchreihe Galvanotechnik.  
ISBN 3-87480-114-4
- Gebrauchsmuster G 91 16 756.6 1991** INA Wälzlager Schaeffler KG. *Bauteil aus Stahl mit galvanisch aufgebracht Korrosionsschutzschicht*.  
G 91 16 756.6,  
23.12.1993
- Grote et al. 2014** Grote, Karl-Heinrich; Feldhusen, Jörg (Hrsg.), 2014. *Doppel Taschenbuch für den Maschinenbau: Mit Tabellen*.  
24., aktualisierte und erw. Aufl.  
Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.  
ISBN 978-3-642-38891-0  
DOI: 10.1007/978-3-642-38891-0
- Haberfellner et al. 2005** Haberfellner, Reinhard; Weck, Olivier de, 2005. Agile SYSTEMS ENGINEERING versus AGILE SYSTEMS engineering.  
*INCOSE International Symposium* **15** (1), S. 1449–1465  
DOI: 10.1002/j.2334-5837.2005.tb00762.x
- Haberfellner et al. 2008** Haberfellner, Reinhard; Stelzmann, Ernst Stefan, 2008. Systems Engineering, neu überdacht.  
*WING-Business* (3/08), S. 18–25
- Hanser 2010** Hanser, Eckhart, 2010. *Agile Prozesse: Von XP über Scrum bis MAP*.  
Berlin, Heidelberg: Springer.  
ISBN 978-3-642-12312-2  
DOI: 10.1007/978-3-642-12313-9

- 
- Hernández et al. 2013** Hernández, P; Socas, A; Benítez, A; Díaz, N; Marrero, M; Ortega, F; Monzón, M., 2013. Computer Aided Electroforming. Elecform3D™. *Procedia Engineering* **63**, S. 532–539  
DOI: 10.1016/j.proeng.2013.08.198
- Holmberg 1992** Holmberg, Kenneth, 1992. A concept for friction mechanisms of coated surfaces. *Surface and Coatings Technology* **56** (1), S. 1–10  
DOI: 10.1016/0257-8972(92)90189-H
- Holmberg et al. 2007** Holmberg, Kenneth; Ronkainen, Helena; Laukkanen, Anssi; Wallin, Kim, 2007. Friction and wear of coated surfaces — scales, modelling and simulation of tribomechanisms. *Surface and Coatings Technology* **202** (4-7), S. 1034–1049  
DOI: 10.1016/j.surfcoat.2007.07.105
- Hull 1939** Hull, R. O., 1939. Current Density Range Characteristics. their Determination and Application. *Proc. Am. Electroplaters Soc.* **27**, S. 52–60
- HWG Wälzlager 2016** HWG Wälzlager, 2016. *Maß-, Form- und Lagetoleranzen nach DIN 620*.  
Verfügbar unter: <http://h-w-g.com/?wpdmact=process&did=MTEuaG90bGluaw==>  
Zugriff am: 07.08.2016
- Ilchner et al. 2010** Ilchner, Bernhard; Singer, Robert F., 2010. *Werkstoffwissenschaften und Fertigungstechnik*.  
Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg  
DOI: 10.1007/978-3-642-01734-6
- IUPAC 2014** International Union of Pure and Applied Chemistry, 2014. *Compendium of Chemical Terminology: Gold Book*, Version 2.3.3 2014-02-24.  
DOI: 10.1351/goldbook  
Zugriff am: 10.12.2020
- Jelinek 2013** Jelinek, Thomas Walter, 2013. *Praktische Galvanotechnik: Ein Lehr- und Handbuch ; mit 96 Tabellen im Text, einem speziellen Tabellen-Anhang und einer Übersicht "Chemikalien für die Galvanotechnik"*.  
7. Auflage.  
Bad Saulgau: Leuze.  
Lehrbuchreihe Galvanotechnik.  
ISBN 978-3-87480-277-2

- 
- Kaesche 2011** Kaesche, Helmut, 2011. *Die Korrosion der Metalle: Physikalisch-chemische Prinzipien und aktuelle Probleme*. 3. Auflage 1990; Nachdruck in veränderter Ausstattung 2011. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN 978-3-642-18427-7 DOI: 10.1007/978-3-642-18428-4
- Kämper 2015** Kämper, Heinrich-W., 2015. Der elektronische Gleichrichter - ein trojanisches Pferd? In: Zentralverband Oberflächentechnik (Hrsg.): *Oberflächentage 2015*, Berlin, 23.-25.09.2015
- Kanani 2000** Kanani, Nasser, 2000. *Galvanotechnik: Grundlagen, Verfahren, Praxis*. München: Hanser. ISBN 978-3-446-21024-0
- Kleinlein 1998** Kleinlein, Erich, 1998. *Einsatz von Wälzlagern bei extremen Betriebs- und Umgebungsbedingungen: Optimierung durch geeignete Konstruktion und Entwicklung von Wälzlagern, Schmierung und Abdichtung ; mit 25 Tabellen*. Renningen-Malmsheim: Expert-Verl. Kontakt & Studium 574. ISBN 978-3-8169-1608-6
- Kölle 2018** Kölle, Stefan, 2018. *Entwicklung eines hochbeständigen, galvanisch abgeschiedenen Schichtsystems für den Einsatz in maritimer Technik bei starker tribokorrosiver Belastung*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag. Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung 84. Stuttgart, Univ., Diss., 2018. ISBN 978-3-8396-1381-8 DOI: 10.18419/opus-10212
- Kölle et al. 2014** Kölle, Stefan; Romankiewicz, Katja; Santos, Claudia Beatriz dos, 2014. Nickel-Legierungsschichten für extreme Einsatzbedingungen - Projektzwischenbericht. In: Deutsche Gesellschaft für Galvano- und Oberflächentechnik (Hrsg.): *REACH-konforme Oberflächen: Entwicklung und Anwendung*, 08./09.05.2014, 20 Folien

- 
- Kölle et al. 2016** Kölle, Stefan; dos Santos, Claudia; Feige, Katja; Schwanzer, Peter; Bauernhansl, Thomas, 2016. Beschichtungen für extreme Einsatzbedingungen: Teil 1 – Tribokorrosionsuntersuchungen an Nickel-Legierungsschichten.  
*WOMag* **5** (3), 29-31  
DOI: 10.7395/2016/Koelle03
- Kölle et al. 2019** Kölle, Stefan; Mock, Christian, Klaus, Schmid, Claudia Beatriz dos Santos, 2019. Von der Industrie 4.0 zu Galvanik 4.1 - Elektrolytführung neu gedacht.  
*WOMag* (4), S. 32–34
- Komus et al. 2017** Komus, Ayelt; Kuberg, Moritz, 2017. *Status Quo Agile: Studie zu Verbreitung und Nutzen agiler Methoden Eine empirische Untersuchung*.  
Nürnberg.  
Verfügbar unter: [https://www.gpm-ipma.de/fileadmin/user\\_upload/GPM/Know-How/Studie\\_Status\\_Quo\\_Agile\\_2017.pdf](https://www.gpm-ipma.de/fileadmin/user_upload/GPM/Know-How/Studie_Status_Quo_Agile_2017.pdf)  
Zugriff am: 10.06.2019
- König et al. 2015a** König, Johannes; Lahres, Michael; Methner, Oliver, 2015. Quality Designed Twin Wire Arc Spraying of Aluminum Bores.  
*Journal of Thermal Spray Technology* **24** (1-2), S. 63–74  
DOI: 10.1007/s11666-014-0170-6
- König et al. 2015b** König, Uwe; Käzmann, Herbert, 2015. Trendmonitor Oberflächentechnologie.  
*WOMag* **4** (7-8)  
DOI: 10.7395/2015/Koenig6
- Kornwachs 2010** Kornwachs, Klaus, 2010. Logische Strukturen technischen Wissens - zur Wissenschaftstheorie der Technikwissenschaften.  
In: Kornwachs, Klaus (Hrsg.): *Technologisches Wissen*.  
Berlin, New York: Springer, S. 137–157  
ISBN 978-3-642-14371-7
- Kuhn 1967** Kuhn, Thomas Samuel, 1967. *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen*.  
Frankfurt a.M.: Suhrkamp

- 
- Lausmann et al. 2006** Lausmann, Günther A; Unruh, Jürgen N. M., 2006. *Die galvanische Verchromung: Mit 66 Tabellen*. 2., komplett überarb. Aufl. Bad Saulgau: Leuze. Schriftenreihe Galvanotechnik und Oberflächenbehandlung 35. ISBN 978-3-87480-216-1
- Leiden et al. 2018** Leiden, Alexander; Thiede, Sebastian, Herrmann, Christoph, 2018. Von der Industrie 4.0 zu Galvanik 4.1 - Cyber-physische Produktionssysteme für die Galvanoprozesskette. *WOMag* (12), S. 28–31
- Lenk 1979** Lenk, Hans, 1979. *Pragmatische Vernunft: Philosophie zwischen Wissenschaft und Praxis*. Stuttgart: Reclam. Universal-Bibliothek 9956. ISBN 978-3-150-09956-8
- Lévárdy et al. 2009** Lévárdy, Viktor; Browning, Tyson R., 2009. An Adaptive Process Model to Support Product Development Project Management. *IEEE Transactions on Engineering Management* **56** (4), S. 600–620  
DOI: 10.1109/TEM.2009.2033144
- Lindemann 2009** Lindemann, Udo, 2009. *Methodische Entwicklung technischer Produkte*. 3., korrigierte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer  
DOI: 10.1007/978-3-642-01423-9
- Lyre 2008** Lyre, Holger, 2008. „Was ist Wissenschaft?: Darstellung und Bestandsaufnahme der deutschen Wissenschaftsphilosophie“; Wissenschaftszentrum Bonn, 17–19. März 2008. *Journal for General Philosophy of Science* **39** (2), S. 395–401  
DOI: 10.1007/s10838-008-9071-z
- Matek et al. 2011** Matek, Wilhelm; Muhs, Dieter; Roloff, Hermann, 2011. *Roloff / Matek Maschinenelemente: Normung, Berechnung, Gestaltung*. 20. Aufl. Braunschweig [u.a.]: Vieweg. ISBN 978-3-8348-1454-8

- 
- Metzner 2013** Metzner, Martin (Hrsg.), 2013. *Oberflächentechnik: Galvanotechnik und PVD/CVD: Grundlagen galvanische Abscheidung*, Vorlesung Sommersemester 2013. Stuttgart: Universität Stuttgart, Inst. für Industrielle Fertigung  
Zugriff am: 17.08.2015
- Nann et al. 1999** Nann, Thomas; Heinze, Jürgen, 1999. Simulation in electrochemistry using the finite element method: Part 1. The algorithm. *Electrochemistry Communications* **1** (7), S. 289–294  
DOI: 10.1016/S1388-2481(99)00055-7
- Norm DIN 50957** DIN 50957:1978-01.  
*DIN 50957: Prüfung galvanischer Bäder. Galvanisierungsprüfung mit der Hull-Zelle. Allgemeine Grundsätze.*
- Norm DIN 611** DIN 611:2010-05.  
*DIN 611: Wälzlager - Übersicht.*
- Norm DIN 620-1** DIN 620-1:1982-06.  
*DIN 620 Teil 1: Wälzlager: Meßverfahren für Maß- und Lauf toleranzen*
- Norm DIN 620-2** DIN 620-2:1988-02.  
*DIN 620 Teil 2: Wälzlager; Wälzlagertoleranzen: Toleranzen für Radiallager*
- Norm DIN 620-3** DIN 620-3:1982-06.  
*DIN 620 Teil 3: Wälzlager: Toleranzen für Axiallager*
- Norm DIN 8580** DIN 8580:2003-09.  
*DIN 8580: Fertigungsverfahren: Begriffe, Einteilung*
- Norm DIN EN ISO 9227** DIN EN ISO 9227:2017-07.  
*DIN EN ISO 9227: Korrosionsprüfungen in künstlichen Atmosphären - Salzsprühnebelprüfungen (ISO 9227:2017) : Deutsche Fassung EN ISO 9227:2017.*
- Paatsch 2010** Paatsch, W., 2010. *Anwendungsorientierte Simulation zur Planung und Produktion maßgeschneiderter, elektrolytisch erzeugter Oberflächen : AnSim ; gemeinsamer Schlussbericht ; Projektlaufzeit: 01.07.2007 - 31.12.2010*: Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek  
DOI: 10.2314/GBV:669247707

- 
- Patentschrift DE102008061877 B3 2008** Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. *Vorrichtung zur Bestimmung von Prozessbedingungen bei der elektrochemischen Beschichtung eines Profilkörpers und Verfahren.*  
DE102008061877 B3,  
02.09.2010
- Patentschrift DE102009023818 A1 2009** Aktiebolaget SKF. *Wälzlager und Verfahren zur Beschichtung eines Bauteils des Wälzlagers.*  
DE102009023818 A1,  
16.12.2010
- Patentschrift DE102010031439 A1 2010** Aktiebolaget SKF. *Wälzlager und Verfahren zur Beschichtung eines Bauteils eines Wälzlagers.*  
DE102010031439 A1,  
19.01.2012
- Patentschrift DE102011075497 A1 2011** Schaeffler Technologies AG & Co. KG. *Verfahren zur Verbesserung des Korrosionsschutzes bei Wälzlagern und nach diesem Verfahren hergestelltes Wälzlager.*  
DE102011075497 A1,  
15.11.2012
- Patentschrift DE102014206701 A1 2014** Aktiebolaget SKF. *Beschichteter Lagering, Lager und Verfahren zur Herstellung eines beschichteten Lagerrings.*  
DE102014206701 A1,  
08.10.2015
- Patentschrift DE102015113129 B4 2015** Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V. *Aufnahmevorrichtung zum Halten und Drehen eines rotationssymmetrischen Bauteils sowie Verfahren zum galvanischen oder nasschemischen Beschichten mit einer solchen Aufnahmevorrichtung.*  
DE102015113129 B4,  
16.02.2017
- Patentschrift DE10310071 B3 2003** Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. *Verfahren und Vorrichtung zum Galvanisieren von Bauteilen.*  
DE10310071 B3,  
26.08.2004

- 
- Patentschrift DE1496892 A1 1969** Martin, R. *Einrichtung zur Herstellung galvanischer Niederschläge auf Unterlagkörper, wie z.B. Tiefdruck-Zylinder.*  
DE1496892 A1,  
10.04.1969
- Patentschrift DE19839479 A1 1998** INA-Schaeffler KG. *Verfahren zur chemischen oder elektrochemischen Behandlung eines rotationssymmetrischen Hohlkörpers und zugehörige Halte- und Drehvorrichtung.*  
DE19839479 A1,  
02.03.2000
- Patentschrift DE2051778 A1 1975** The Udylite Corp. *Vorrichtung zum Galvanisieren von zylindrischen Gegenständen.*  
DE2051778 A1,  
10.07.1975
- Popper 1935** Popper, Karl, 1935. *Logik der Forschung: Zur Erkenntnistheorie der modernen Naturwissenschaft.*  
Wien: Springer-Verlag.  
Schriften zur wissenschaftlichen Weltauffassung Bd. 9.  
ISBN 9783709141779
- Posner et al. 2016** Posner, Benedikt; Binz, Hansgeorg; Roth, Daniel; González Vila, Noelia; Burkhardt, Jochen, 2016. Systematische Entwicklung von Leichtbau-Lösungen im Maschinenschutz. *Konstruktion* **68** (6), S. 90–93
- Rammert 2010** Rammert, Werner, 2010. Die Pragmatik des technischen Wissens oder: "How to Do Words with Things".  
In: Kornwachs, Klaus (Hrsg.): *Technologisches Wissen.*  
Berlin, New York: Springer, S. 37–59  
ISBN 978-3-642-14371-7
- Richtlinie VDI 2206** VDI-Richtlinie 2206:2004-06.  
*VDI 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme.*
- Richtlinie VDI 2221** VDI-Richtlinie 2221:1993-05.  
*VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte.*
- Richtlinie VDI 2225** VDI-Richtlinie 2225:1997-1998.  
*VDI 2225: Konstruktionsmethodik - Technisch-wirtschaftliches Konstruieren (Blätter 1-4).*



- 
- Rombach 2015** Rombach, Mario, 2015. Gleichrichtertechniken im Vergleich. In: Verl, Alexander; Bauernhansl, Thomas (Hrsg.): *Aktuelle Themen bei Modernisierung und Neubau galvanotechnischer Anlagen*. Stuttgart: Stuttgarter Produktionsakademie, Seminar SPA 171, Stuttgart, 17.03.2015
- Roos et al. 2011** Roos, Eberhard; Maile, Karl, 2011. *Werkstoffkunde für Ingenieure: Grundlagen, Anwendung, Prüfung*. 4. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN 978-3-642-17463-6 DOI: 10.1007/978-3-642-17464-3
- Ropohl 2009** Ropohl, Günter, 2009. *Allgemeine Technologie: Eine Systemtheorie der Technik*. 3., überarb. Aufl. Karlsruhe: Univ.-Verl. ISBN 978-3-86644-374-7
- Rose 2009** Rose, Alan, 2009. Design for electroplating. *Metal Finishing* **107** (4), S. 47–50 DOI: 10.1016/S0026-0576(09)80075-5
- Royce 1970** Royce, Winston W., 1970. Managing the Development of Large Software Systems. *Proceedings of IEEE WESCON* **26** (328-388)
- Rubinstein 1987** Rubinstein, Marvin, 1987. *Das Tampongalvanisieren*. 1. Aufl., unveränd. Nachdr. Saulgau/Württ.: Leuze. Schriftenreihe Galvanotechnik und Oberflächenbehandlung 17. ISBN 3-87480-019-9
- Rubinstein 1994** Rubinstein, Marvin, 1994. *Das Tampongalvanisieren - Band 2*. Saulgau/Württ.: Leuze. Schriftenreihe Galvanotechnik und Oberflächenbehandlung 25. ISBN 3-87480-099-7

- Schaeffler KG 2007** Schaeffler KG, 2007. *Wälzlagertoleranzen: Definitionen / Messprinzipien*.  
Verfügbar unter: [http://www.schaeffler.com/remotemedien/media/\\_shared\\_media/08\\_media\\_library/01\\_publications/schaeffler\\_2/tpi/downloads\\_8/tpi138\\_de\\_de.pdf](http://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/08_media_library/01_publications/schaeffler_2/tpi/downloads_8/tpi138_de_de.pdf)  
Zugriff am: 28.10.2015
- Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2013** Schaeffler Technologies AG & Co. KG, 2013. *Lagerlösungen für Großmaschinen*.  
Verfügbar unter: [http://www.schaeffler.com/remotemedien/media/\\_shared\\_media/08\\_media\\_library/01\\_publications/schaeffler\\_2/tpi/downloads\\_8/tpi\\_205\\_de\\_de.pdf](http://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/08_media_library/01_publications/schaeffler_2/tpi/downloads_8/tpi_205_de_de.pdf)  
Zugriff am: 07.08.2016
- Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2016a** Schaeffler Technologies AG & Co. KG, 2016. *Übersicht Radiallager, Axiallager und Linearführungen auf zwei Postern: Plakat | 2016-09 | SUEP | 180-0005904 | Deutsch*.  
Verfügbar unter: [http://www.schaeffler.com/remotemedien/media/\\_shared\\_media/08\\_media\\_library/01\\_publications/schaeffler\\_2/poster/downloads\\_19/suep\\_de\\_de.pdf](http://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/08_media_library/01_publications/schaeffler_2/poster/downloads_19/suep_de_de.pdf)  
Zugriff am: 18.04.2017
- Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2016b** Schaeffler Technologies AG & Co. KG (Hrsg.), 2016. *Abschlussbericht zum BMWi-Projekt "POSEIDON" im Rahmen des 5. Energieforschungsprogramms des BMWi mit dem Titel "Energieeffizienz durch Standzeiterhöhung von Lagern unter tribokorrosiven Betriebsbedingungen": Projektlaufzeit: 01.08.2012 bis 31.12.2015*: Schaeffler Technologies GmbH & Co. KG  
DOI: 10.2314/GBV:871040050
- Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2017** Schaeffler Technologies AG & Co. KG, 2017. *Gestaltung der Lagerung*.  
Internetdokument.  
Verfügbar unter: [http://medias.schaeffler.de/medias/de!hp.tg.cat/tg\\_hr\\*ST4\\_1652155275](http://medias.schaeffler.de/medias/de!hp.tg.cat/tg_hr*ST4_1652155275)  
Zugriff am: 30.04.2017
- Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2019** Schaeffler Technologies AG & Co. KG, 2019. *Werkstoffe für die Wälzlagertechnik*.  
Verfügbar unter: [https://www.schaeffler.com/remotemedien/media/\\_shared\\_media/08\\_media\\_library/01\\_publications/schaeffler\\_2/tpi/downloads\\_8/tpi\\_226\\_de\\_de.pdf](https://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/08_media_library/01_publications/schaeffler_2/tpi/downloads_8/tpi_226_de_de.pdf)  
Zugriff am: 14.12.2019

- Schlesinger et al. 2010** Schlesinger, Mordechay; Paunovic, Milan, 2010. *Modern electroplating*. 5th ed. Hoboken, N.J.: Wiley; John Wiley & Sons, Inc. The Electrochemical Society series. ISBN 978-0-470-60263-8 DOI: 10.1002/9780470602638
- Schmid 2011** Schmid, Klaus, 2011. Elektrolytprüfstand - die Hullzelle geht in die dritte Dimension: Teil 2: Praktischer Einsatz am Beispiel der Nickellegierungsabscheidung von Ni-Co und Ni-Fe. *Galvanotechnik* **102** (3), S. 503–513
- Schmid 2013** Schmid, Klaus, 2013. Spezifika verschiedener Konzepte für Galvanikanlagen. In: Zentralverband Oberflächentechnik; Deutsche Gesellschaft für Galvano- und Oberflächentechnik (Hrsg.): *Produktionsprozesse - Anforderungen und aktuelle Entwicklungen*, Neu-Ulm, 25.-26.04.2013
- Schmid et al. 2008** Schmid, Klaus; Metzner, Martin, 2008. Selektive robotergeführte Beschichtung. *Galvanotechnik* **99** (8), S. 1904–1906
- Schmid et al. 2009** Schmid, Klaus; Wiedemann, Erik; Schwanzer, Peter, 2009. Elektrolytprüfstand - die Hullzelle geht in die dritte Dimension: Teil 1: Einführung und Systemaufbau. *Galvanotechnik* **100** (11), S. 2491–2498
- Schmidt 2003** Schmidt, Volkmar M., 2003. *Elektrochemische Verfahrenstechnik: Grundlagen, Reaktionstechnik, Prozessoptimierung*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. ISBN 3-527-29958-0 DOI: 10.1002/3527602143
- Schmitt 2009** Schmitt, Günter, 2009. *Global Needs for Knowledge Dissemination, Research, and Development in Materials Deterioration and Corrosion Control*. Verfügbar unter: [http://www.corrosion.org/wco\\_media/whitpaper.pdf](http://www.corrosion.org/wco_media/whitpaper.pdf) Zugriff am: 30.08.2015

- 
- Schuh et al. 2011** Schuh, Günther; Klappert, Sascha, 2011. *Technologiemanagement*. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN 978-3-642-12529-4 DOI: 10.1007/978-3-642-12530-0
- Schwaber 2004** Schwaber, Ken, 2004. *Agile project management with Scrum*. Microsoft Press. Verfügbar unter: <https://www.semanticscholar.org/paper/Agile-Project-Management-with-Scrum-Schwaber/43e7ddf062e81253083e2a5b7c619f9bc0d42333> Zugriff am: 31.05.2020
- Schwaber et al. 2020** Schwaber, Ken; Sutherland, Jeff, 2020. *The Scrum Guide: The Definitive Guide to Scrum: The Rules of the Game*, November 2020. [scrumguides.org](https://www.scrumguides.org). Verfügbar unter: <https://www.scrumguides.org/docs/scrum-guide/v2020/2020-Scrum-Guide-US.pdf> Zugriff am: 17.01.2021
- Schwanzer 2013** Schwanzer, Peter, 2013. Potenziale des Sonderanlagenbaus: Seminar „Aktuelle Trends bei Modernisierung und Neubau galvanotechnischer Anlagen“, 19. März 2013, Vortrag. In: Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA; Deutsche Gesellschaft für Galvano- und Oberflächentechnik (Hrsg.): *Aktuelle Trends bei Modernisierung und Neubau galvanotechnischer Anlagen: Seminar „Aktuelle Trends bei Modernisierung und Neubau galvanotechnischer Anlagen“, 19. März 2013*. Stuttgart, 31 Folien
- Scott et al. 1972** Scott, D; McCullagh, P. J., 1972. Hardenable electrodeposited coating for rolling bearings — A preliminary assessment. *Electrodeposition and Surface Treatment* **1** (1), S. 21–30 DOI: 10.1016/0300-9416(72)90011-9
- SKF Gruppe 2014** SKF Gruppe (Hrsg.), 2014. *Wälzlager* Verfügbar unter: [http://www.skf.com/binary/tcm:41-121486/Walzlager%20-%2010000\\_2%20DE\\_tcm\\_41-121486.pdf](http://www.skf.com/binary/tcm:41-121486/Walzlager%20-%2010000_2%20DE_tcm_41-121486.pdf) Zugriff am: 14.01.2017

- 
- Sommer et al. 2010** Sommer, Karl; Heinz, Rudolf; Schöfer, Jörg, 2010. *Verschleiß metallischer Werkstoffe: Erscheinungsformen sicher beurteilen ; mit zahlreichen Tabellen*.  
1. Auflage.  
Wiesbaden: Springer Vieweg.  
ISBN 978-3-8351-0126-5
- Spur 2007** Spur, Günter, 2007. Erscheinungsformen und Modelle technischer Systeme: Beitrag zur theoretischen Begründung der Technikwissenschaften.  
In: Parthey, Heinrich; Spur, Günter (Hrsg.): *Wissenschaft und Technik in theoretischer Reflexion*.  
Bern, New York: P. Lang, S. 103–130  
ISBN 978-3-631-55523-1
- Steinhilper 2012** Steinhilper, Waldemar (Hrsg.), 2012. *Konstruktionselemente des Maschinenbaus 2: Grundlagen von Maschinenelementen für Antriebsaufgaben*.  
7. Auflage.  
Berlin, Heidelberg: Springer.  
ISBN 978-3-642-24303-5
- Stelzmann 2011** Stelzmann, Ernst Stefan, 2011. *Agile Systems Engineering: Eine Methodik zum besseren Umgang mit Veränderungen bei der Entwicklung komplexer Systeme*.  
Graz, Technische Universität Graz, Dissertation, 2011.  
URN: <https://diglib.tugraz.at/agile-systems-engineering-2011>
- Tomiyama et al. 2009** Tomiyama, T; Gu, P; Jin, Y; Lutters, D; Kind, Ch; Kimura, F., 2009. Design methodologies: Industrial and educational applications.  
*CIRP Annals* **58** (2), S. 543–565  
DOI: 10.1016/j.cirp.2009.09.003
- Truran 2013** Truran, Peter, 2013. *Practical Applications of the Philosophy of Science: Thinking About Research*.  
Heidelberg: Springer International Publishing  
DOI: 10.1007/978-3-319-00452-5
- Turner 2007** Turner, Richard, 2007. Toward Agile systems engineering processes.  
*Crosstalk. The Journal of Defense Software Engineering*, S. 11–15

- 
- Uihlein et al. 2016** Uihlein, Andreas; Magagna, Davide, 2016. Wave and tidal current energy – A review of the current state of research beyond technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **58**, S. 1070–1081  
DOI: 10.1016/j.rser.2015.12.284
- Ulrich 2001** Ulrich, Hans, 2001. *Systemorientiertes Management: Das Werk von Hans Ulrich*. Studienausg. Bern, Stuttgart, Wien: Haupt. ISBN 3-258-06359-1
- Ulrich et al. 1976** Ulrich, Peter; Hill, Wilhelm, 1976. Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre (Teil I). *WiST Zeitung für Ausbildung und Hochschulkontakt* **5** (7), S. 304–309
- Ulrich et al. 2012** Ulrich, Karl T; Eppinger, Steven D., 2012. *Product design and development*. 5. ed. New York, NY: McGraw-Hill Irwin. ISBN 978-0-07-340477-6
- Umweltbundesamt 2005** Umweltbundesamt, 2005. *Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung: Merkblatt zu den besten verfügbaren Techniken für die Oberflächenbehandlung von Metallen und Kunststoffen*. Dessau. Verfügbar unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/419/dokumente/bvt\\_galvanik\\_vw.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/419/dokumente/bvt_galvanik_vw.pdf)  
Zugriff am: 21.11.2015
- Unterhuber et al. 2014** Unterhuber, Matthias; Gebharter, Alexander; Schurz, Gerhard, 2014. Philosophy of Science in Germany, 1992–2012: Survey-Based Overview and Quantitative Analysis. *Journal for General Philosophy of Science* **45** (S1), S. 71–160  
DOI: 10.1007/s10838-014-9270-8
- Venz 2018** Venz, Rainer, 2018. Electromobility and Surface Finishing. In: Zentralverband Oberflächentechnik (Hrsg.): *ZVO-Oberflächentage 2018*, Leipzig, 19.-21.09.2018

- Voß 2018** Voß, Torsten, 2018. Chrom(VI)-freie Vorbehandlung von Kunststoffen für die dekorative Metallisierung. In: Zentralverband Oberflächentechnik (Hrsg.): *ZVO-Oberflächentage 2018*, Leipzig, 19.-21.09.2018
- Weck et al. 1989** Weck, M; Steinert, T., 1989. *Beschichtung der Gleit- und Wälzbeanspruchten Oberflächen in Wälzlagern und Hydrodynamischen Gleitlagern: Studie*. Frankfurt a.M. VDW Forschungsberichte 0152
- Weit e.V. 2019** Verein zur Weiterentwicklung des V-Modell XT e.V. (Weit e.V.), 2019. *V-Modell XT: Das deutsche Referenzmodell für Systementwicklungsprojekte*, Version: 2.3. Verfügbar unter: <http://ftp.tu-clausthal.de/pub/institute/informatik/v-modell-xt/Releases/2.3/V-Modell-XT-Gesamt.pdf> Zugriff am: 07.03.2021
- Westkämper et al. 2010** Westkämper, Engelbert; Warnecke, Hans-Jürgen, 2010. *Einführung in die Fertigungstechnik*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner. ISBN 978-3-8348-0835-6 DOI: 10.1007/978-3-8348-9798-5
- Wood 2007** Wood, Robert J. K., 2007. Tribo-corrosion of coatings: a review. *Journal of Physics D: Applied Physics* **40** (18), S. 5502–5521 DOI: 10.1088/0022-3727/40/18/S10
- Wu et al. 2010** Wu, Zeng-Qiang; Zhou, Ting; Wang, Kang; Zhang, Jian-Rong; Xia, Xing-Hua, 2010. Current distribution at electrode surfaces as simulated by finite element method. *Electrochimica Acta* **55** (17), S. 4870–4875 DOI: 10.1016/j.electacta.2010.03.079
- Zangemeister 1970** Zangemeister, Christof, 1970. *Nutzwertanalyse in der Systemtechnik : Eine Methodik z. multidimensionalen Bewertung u. Ausw. von Projektalternativen*. Berlin [West], TU Berlin, Dissertation, 1970
- Zwicky 1966** Zwicky, Fritz, 1966. *Entdecken, Erfinden, Forschen im morphologischen Weltbild*. München, Zürich: Droemer Knaur

# 12 Anhang

## 12.1 Zusammenfassung methodischer und inhaltlicher Anforderungen

Tabelle 12.1: Auflistung inhaltlicher Anforderungen (IF)

<b>Nr.</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>aus Kap.</b>
<b>IF1</b>	Die Schicht muss vollflächig und dicht abgeschieden werden. Es dürfen keine durch die Produktionstechnik bedingten Fehlstellen / Schichtunterbrechungen (z. B. unbeschichtete Kontaktpunkte) auftreten.	2.1.3
<b>IF2</b>	Möglichst homogene, konturtreue und endmaßnahe Beschichtung	2.2.3
<b>IF3</b>	Entwicklung einer Methodik zur Ermittlung einer geeigneten Beschichtungstechnik für die vollflächige, kontaktstellenfreie Abscheidung einer galvanischen Schicht	2.2.3
<b>IF4</b>	Entwicklung einer Methodik zur Optimierung der Schichtdickenverteilung mit dem Ziel einer endmaßnahen Beschichtung	2.2.3; 3.2.5
<b>IF5</b>	Die Effekte der sekundären und tertiären Stromdichteverteilung (Streifähigkeit des betreffenden Elektrolyten) sollen über ein einfach zu nutzendes Vorgehen abgeschätzt werden und in der Schichtdickenoptimierung berücksichtigt werden können	3.2.5

Tabelle 12.2: Auflistung methodischer Anforderungen (MF)

<b>Nr.</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>aus Kap.</b>
<b>MF1</b>	Interdisziplinarität Bei der galvanischen Produktionstechnik handelt es sich um eine interdisziplinäre bzw. multidisziplinäre Problemstellung durch das Zusammenspiel von Elektrochemie, physikalischen Effekten und maschinenbaulichen Komponenten.	2.2.3; 3.2.5; 3.3.3
<b>MF2</b>	Lösungsgenerierung Innovative Lösungsfindung für technische Probleme	2.2.3; 3.2.5



	Da für die Problemstellung keine direkte technische Lösung bekannt ist, muss die Methodik die Generierung neuer Lösungen ermöglichen.	
<b>MF3</b>	Parallele, iterative Entwicklung verschiedener Aspekte Für eine erfolgreiche und zeitlich akzeptable Entwicklung müssen die verschiedenen Anforderungen parallel bearbeitet werden können. Die maschinenbauliche Umsetzung der Beschichtungstechnik, die Schichtdickenverteilung und die Gesamtanlagentechnik sind dabei technisch sehr unterschiedliche Aufgabenstellungen, welche sich jedoch gegenseitig beeinflussen. Ein iteratives Vorgehen mit einem (agilen) Entwicklungszyklus erscheint hierfür geeignet.	2.2.3; 3.2.5
<b>MF4</b>	Regulatorische Anforderungen, Dokumentation Bereits in der Entwicklung ist die Dokumentation relevanter Planungsdaten für ggfs. behördliche Genehmigungen während Entwicklung notwendig.	3.3.3
<b>MF5</b>	Detaillierung für konkrete Anwendung Die Methodik muss ausreichend detailliert sein, um direkt angewendet und im Fallbeispiel umgesetzt zu werden.	3.3.3
<b>MF6</b>	Flexibel für weitere Schwerpunkte Die Methodik muss flexibel bezüglich der Entwicklungsschwerpunkte sein, um in der Durchführung nur die notwendigen Aspekte zu betrachten, aber ggfs. auch über diese Arbeit hinausgehende technische Gesichtspunkte zusätzlich zu integrieren.	4.1.4
<b>MF7</b>	Einfache Grundstruktur für Detaillierung Die Struktur der Methodik auf der allgemeinen Ebene sollte möglichst einfach gehalten sein und für den betrachteten Anwendungsfall detailliert werden können, d. h. bei der Anwendung soll eine Anpassung aufbauend erfolgen und nicht durch Herunterskalierung einer umfangreichen Methodik.	4.1.4

## 12.2 Anforderungsliste für Prototypanlage

Tabelle 12.3: Vollständige Anforderungsliste für Lagerbeschichtung

<b>Anforderungsliste Lagerbeschichtung</b>			
<b>Projekt:</b>	<b>„Poseidon“: Galvanische Beschichtung von Wälzlagern</b>	<b>Ersetzt Ausgabe vom:</b>	<b>27.03.2014</b>

Bearbeiter:		Peter Schwanzer	Ausgabe vom:	07.04.2014	
F W	Nr.	Anforderungen Forderung (F), Wunsch (W)	Quantifizierung, Beschreibung	Ver- antw./ Quelle	Än- der- ung
	1	Geometrie			
F	1.1	Wälzlagering	Schrägkugellager 7218-B-TVP	Projekt	
F	1.2	Innendurchmesser minimal	90 mm	Projekt	
F	1.3	Außendurchmesser maximal	160 mm	Projekt	
F	1.4	Breite Lagering	30 mm	Projekt	
F	1.5	Zielschichtdicke	25 µm / 50 µm, Rohteile mit entsprechendem Untermaß gefertigt (Toleranzbereich wie Endprodukt)	Projekt	
F	1.6	Endmaß	Toleranzen wie unbeschichtetes Bauteil	INA	
F	1.6.1	Toleranzbereich Innenring Innendurchmesser	20 µm	INA	
F	1.6.2	Toleranzbereich Außenring Außendurchmesser	25 µm	INA	
F	1.6.3	Toleranz Lageringbreite	62 µm	INA	
F	1.6.4	Toleranz Wälzlagerbereich	Schichtdickenabweichung < 5 µm	INA	
F	1.7	Werkstoff Lagering	100Cr6	INA	
W	1.8	Skalierbarkeit	für Lager mit Ø1 m und mehr	Projekt	
	2	Kinematik			
F	2.1	Bauteilaufnahme	Bauteil auf Beschichtungsposition bewegen und halten	PBS	
F	2.2	Bauteilbewegung	Rotation für gleichmäßigere Schichtdickenverteilung	PBS	
F	2.3	Einfahren Bauteil in Elektrolyt	manuell oder automatisiert	PBS	
F	2.4	Umwälzung Elektrolyt	kontinuierlich über Filterpumpe, einstellbar	IPA	
	3	Kräfte			
	3.1	Bewegung Bauteilaufnahme	über Handkraft	PBS	
	4	Energie			
F	4.1	Gleichstrom für Beschichtung / Bauteilkontaktierung	< 20 V; bis 20 A	IPA	

W	4.2	Pulsstrom für Beschichtung / Bauteilkontaktierung	< 20 V: bis 20 A	IPA	
F	4.3	Elektrische Versorgung 24 V	für Sensoren, Steuerung etc. über Schaltschrank	PBS	
F	4.4	Wechselstromversorgung	für Pumpen, Heizungen	PBS	
	5	Arbeitsstoffe / Medien			
F	5.1	VE-Wasser	Befüllen & Nachdosierung Elektrolyte / Spülen	IPA	
F	5.2	Elektrolyte	Wässrige Elektrolyte für Beschichtung NiW, Ni (rein) und evtl. weitere	IPA	
F	5.2.1	pH-Bereich	3,0 - 9,5	IPA	
F	5.2.2	Elektrolytbestandteile Beschichtungsbäder	Nickelsulfat, Wolframat, Chlorid, Hypophosphit, Citrat, Ammoniak, Netzmittel	IPA	
F	5.2.3	Elektrolyttemperatur Beschichtungsbäder	30 °C - 75 °C	IPA	
F	5.3	Abluft	abgesaugte Luft aus Aktivbädern, Wasserdampf, geringste Mengen Wasserstoff	PBS	
F	5.4	Vorbehandlungsprozesse	separat, nicht in Anlage integriert	IPA	
F	5.5	Umsetzen	in transportablem Wasserbad	IPA	
	6	Beschichtung			
F	6.1	Einsatzanforderungen	Wälzbelastung (rollen und gleiten) mediengeschmiert in Meerwasser: tribokorrosive Belastung	Projekt	
F	6.2	Anforderungen Korrosionsbeständigkeit	hoch, dauerhafte Beständigkeit in Meerwasser erforderlich	Projekt	
F	6.2.1	Schichtfehler / Kontaktstellen	keine (Angriffspunkte Korrosion)	IPA	
F	6.2.2	unbeschichtete Bereiche	keine, vollflächige Umhüllung	IPA	
F	6.3	Schichthärte	> 600 HV	Projekt	
F	6.4	Schichtaufbau	mindestens 2-lagig	IPA	
F	6.5	Parametervorgabe	alle physikalischen Parameter einstellbar	PBS	
	7	Werkstoffe			

F	7.1	Chemische Beständigkeit Behälter und Rohrleitungen	für dauerhaften Betrieb mit spezifizierten Elektrolyten: sauer, alkalisch, nicht oxidierend	PBS	
F	7.2	Thermische Beständigkeit Behälter und Rohrleitungen	Raumtemperatur bis 75 °C	PBS	
F	7.3	Werkstoffe Bauteilaufnahme	Für mechanische und thermische Belastungen und zyklischen Kontakt mit Elektrolyt, Edelstahl beständig gegen Chlorid	PBS	
F	7.4	Anode	löslich, Nickel	IPA	
W	7.5	Anode alternativ	unlöslich, z. B. Mischoxid	IPA	
F	7.6	Anodenhalterung / -körbe	Titan	IPA	
	8	Signal			
F	8.1	Istwerte Elektrolyttemperatur	Pt100 3-Leiter oder 4-Leiter	PBS	
F	8.2	Messung Elektrolytniveau	Stabsonde: Überlauf, Arbeitsniveau (2 Messpunkte), Trockenlauf	PBS	
F	8.3	Istwerte Beschichtungsstrom	Strom, Spannung (Gleichrichterwerte)	PBS	
F	8.4	Vorgabe Elektrolyttemperatur	Softwareseitige Regelung der Beheizung	PBS	
F	8.5	Vorgabe Umwälzleistung	Analogsignal, direkte Vorgabe an Pumpe oder Frequenzumrichter	PBS	
F	8.6	Vorgabe Bauteilbewegung	Analogsignal, Drehzahl	PBS	
W	8.7	In-Situ-Messung pH-Wert	optional nachrüstbar bei Bedarf	IPA	
	9	Sicherheit			
F	9.1	Verwendungszeck	Technikumsversuche in Beschichtungslabor	PBS	
F	9.2	Aufstellungsort	Zutrittsbeschränktes Galvaniklabor mit existierender Laborordnung	PBS	
F	9.3	Bediener	Geschultes Laborpersonal	PBS	
F	9.4	Not-Aus	Schaltet alle stromführenden und bewegten Komponenten ab	IPA	
F	9.5	Auffangwanne	Sammelt Elektrolyt bei Leckage an Behälter / Rohrleitungen	PBS	

F	9.6	Gefährdungsbeurteilung	Festlegung PL für Schaltschrank und notwendige mechanische Anpassungen	IPA	
F	9.7	Betrieb nur mit Absaugung	Überwachung des Abluftstroms, ggfs. Abschaltung der Anlage	IPA	
F	9.8	Temperaturbegrenzung Heizung	Separate Temperaturbegrenzungsschalter, steuerungsunabhängig	PBS	
	10	Ergonomie			
F	10.1	Handbetrieb	alle durchzuführenden Arbeiten mit akzeptabler körperlicher Belastung machbar	PBS	
W	10.2	Steuerung	einfach zu bedienendes Interface	PBS	
W	10.3	Start / Abbruch Beschichtungsvorgang	direkt am Aktivbad bedienbar	PBS	
W	10.4	Bauteilwechsel	ohne Schraubenverbindungen	PBS	
W	10.5	Zugänglichkeit	Bereiche für regelmäßige Wartungen einfach zugänglich	PBS	
	11	Fertigung			
F	11.1	Ggfs. Aufteilung in Segmente	Maximale Abmessungen Aufzug dürften nicht überschritten werden	PBS	
F	11.2	Fertigstellung Rohrleitungen	Anschluss an Gebäudeinfrastruktur am Aufstellungsort	PBS	
W	11.3	Günstige, bewährte Fertigungsverfahren	Konventionelle, kostengünstige Fertigungsverfahren sind zu bevorzugen (Drehen, Fräsen, Schweißen, Kleben...)	PBS	
F	11.4	Werkstofffarben	bei mehreren verfügbaren Farben einheitliche Verwendung für gesamte Anlage	PBS	
	12	Montage			
F	12.1	Endmontage	Am Aufstellungsort	PBS	
W	12.2	Vormontage	beim Lieferanten	PBS	
F	12.3	Verbindung Anlagensegmente	lösbare Verbindung (Schraubverbindung o. ä.)	PBS	
	13	Transport			

F	13.1	Hebezeuge	Hubwagen, keine Deckenkräne o. ä. verfügbar	PBS	
F	13.2	Lieferort	bis Aufstellungsort	PBS	
F	13.3	Maximale Abmessungen	Maximale Abmessungen Aufzug dürften nicht überschritten werden	PBS	
	14	Gebrauch			
F	14.1	Geräuschemission	Technikumsgebung ohne Gehörschutz	PBS	
F	14.2	Lebensdauer	Für Projekt-Restlaufzeit und mindestens dreijähriges mögliches Folgeprojekt einsatzfähig	IPA	
F	14.3	Umgebungsbedingungen	Galvaniklabor, alle Bauteile mit ausreichendem Korrosionsschutz	PBS	
	15	Instandhaltung			
F	15.1	Regelmäßige Wartungen	Ohne Spezialwerkzeug durch geschultes Personal durchführbar	PBS	
F	15.2	Reinigung	Glatte Oberflächen für einfach Reinigung	PBS	
F	15.3	Komplettwartung mit Anlagenabschaltung	max. 2x pro Jahr notwendig.	PBS	
	16	Nachhaltigkeit / Umwelt			
F	16.1	Stoffentsorgung	Über Labor-Chemieabfälle, keine direkte Verbindung zur Kanalisation	PBS	
W	16.2	Betriebszeiten	Mehrere Betriebsmodi zur Energieeinsparung (Nachtabsenkung, Wochenende)	PBS	

### 12.3 Umsetzung: Konzeptermittlung

Tabelle 12.4: Prüfung Ausschlusskriterien und Bauteilgeometrieignung

Ausschlusskriterien	
1	Abscheidungsunterbrechung mit Elektrolytentnahme erforderlich
2	Keine kontinuierliche Rotation des Bauteils vorgesehen (Rundlauf nicht erreichbar)
3	Wälzfläche des Bauteils wird für Halterung / Kontaktierung benötigt
4	Kontaktanpressung / Bauteilführung nicht sichergestellt (zusätzliche Stützung erforderlich)
Bauteileignung	
5	Erforderliche Kontakt- / Aufnahmefläche(n) für Lösungsansatz nicht geeignet / zur gering
6	Gas- / Luftansammlungen können während Abscheidung statisch an Bauteilbereichen eingeschlossen werden (unbeschichtete Bereiche)

Ort	Lage	Beschreibung	Kriterien					
			1	2	3	4	5	6
volleingetaucht	horizontal	Rollkontakte / Stützrollen an beiden Stirnseiten						
		Rollkontakte / Stützrollen an einer Stirnseite (unten, Pressung über Schwerkraft)						
		Rollkontakt nur am AD, Stützrollen an einer Stirnseite					X	
		Rollkontakt nur am ID, Stützrollen an einer Stirnseite					X	
		Rollkontakt am ID+AD, Stützrollen an einer Stirnseite						
		Stützrollen an einer Stirnseite, Schleifkontakt gegenüber						
		Stützrollen und Schleifkontakt an einer Stirnseite (unten, Pressung über Schwerkraft)						
		Stützrollen an einer Stirnseite, Schleifkontakt am ID				X		
		Stützrollen an einer Stirnseite, Schleifkontakt am AD				X		
		zykl. im El. automatisch wechselnder Kontakt ohne BT-Rot.		X				
		zykl. im El. automatisch wechselnder Kontakt mit BT-Rot.						
		zykl. wechselnde Kontaktpunkte, manueller Wechsel mit Bauteilentnahme		X	X			

vertikal		zykl. wechselnde Kontaktpunkte in rot. Vorrichtung, manueller Wechsel mit Entnahme	X						
		Rollkontakte nur am AD							(X)
		Rollkontakte nur am ID							(X)
		Rollkontakte am ID+AD							(X)
		(Kontakt-)Rollen an beiden Stirnseiten, Stützrollen nur am AD							(X)
		(Kontakt-)Rollen an beiden Stirnseiten, Stützrollen nur am ID							(X)
		(Kontakt-)Rollen an beiden Stirnseiten, Stützrollen an ID+AD							(X)
		Stützrollen am ID oder AD, Kontakt über teilumschlingendes Band am AD							(X)
		Stützrollen am ID oder AD, Schleifkontakt an AD oder ID							(X)
		Stützrollen am ID oder AD, Schleifkontakt an einer Stirnseite							(X)
		zykl. im El. automatisch wechselnder Kontakt ohne BT-Rot.		X					(X)
		zykl. im El. automatisch wechselnder Kontakt mit BT-Rot.							(X)
		zykl. wechselnde Kontaktpunkte, manueller Wechsel mit Bauteilentnahme	X	X					(X)
		zykl. wechselnde Kontaktpunkte in rot. Vorrichtung, manueller Wechsel mit Entnahme	X						(X)
teileingetaucht	vertikal, Kontakt außerhalb	Rollkontakte am AD, Stützrolle getaucht							
		Rollkontakte am ID außerhalb							
		Rollkontakte an ID+AD außerhalb							
		Teilumschlingendes Band am AD, Stützrollen getaucht am AD							
		Teilumschlingendes Band am AD, Stützrolle außerhalb am ID							
		Schleifkontakt außerhalb & Antriebs- / Stützrollen an AD und ID außerhalb							
		Schleifkontakt außerhalb & Antriebs- / Stützrollen am AD außerhalb und getaucht							
		zykl. autom. wechselnder Kontakt außerhalb ohne BT-Rot.		X					
		zykl. automatisch wechselnder Kontakt (innerhalb und außerhalb) mit BT-Rot.							



	zykl. wechselnde Kontaktpunkte außerhalb, manueller Wechsel mit Bauteilentnahme	X	X						
	zykl. wechselnde Kontaktpunkte in rot. Vorrichtung, manueller Wechsel mit Entnahme	X							

Tabelle 12.5: Bewertungskriterien für Variantenauswahl

Nr.	Bewertungskriterium	Gew. (1-5)	Beschreibung / Begründung	Kurzbezeichnung
1	Sensibilität auf Temperaturschwankungen	2	bei teileingetauchten Lösungen kühlt das Bauteil ggfs. ab	Temperaturschwankungen
2	Kristallisationsneigung Elektrolyt	3	für alle elektrolytbenetzten Teile relevant, insbesondere bei Luftkontakt außerhalb (Kontaktrollen etc.)	Kristallisationsneigung
3	Dispersionsabscheidung / Partikel im Elektrolyt	1	aktuell keine Dispersionsabscheidung geplant, aber für bewegliche Teile im Elektrolyten relevant	Partikel
4	Kontinuierliche Abscheidung ohne kurze Unterbrechungen	2	Bewertet wird der Bauteilbereich ohne Kontaktierung / Halterung, ggfs. Multilayer o. ä. als Effekt oder geringere Haftung / höhere Eigenspannungen	Kurze Abscheidungsunterbrechung
5	Außendurchmesser AR geeignet (ausreichende Fläche, keine Bohrung, Nut, o. ä.)	2	Bei Verwendung der jeweiligen Fläche zur Kontaktierung ggfs. Unregelmäßigkeiten im Abrollen oder nur geringe Flächen	AD Außenring geeignet
6	Innendurchmesser IR geeignet (ausreichende Fläche, keine Bohrung, Nut, o. ä.)	1	Bei Verwendung der jeweiligen Fläche zur Kontaktierung ggfs. Unregelmäßigkeiten im Abrollen oder nur geringe Flächen	ID Innenring geeignet
7	Lagerinnenseite AR/IR geeignet (ausreichende Fläche, keine Bohrung, Nut, o. ä.)	1	Bei Verwendung der jeweiligen Fläche zur Kontaktierung ggfs. Unregelmäßigkeiten im Abrollen oder nur geringe Flächen	Lagerinnenseite AR/IR geeignet
8	Stirnseiten geeignet (ausreichende Fläche, keine Bohrung, Nut, o. ä.)	1	Bei Verwendung der jeweiligen Fläche zur Kontaktierung ggfs. Unregelmäßigkeiten im Abrollen oder nur geringe Flächen	Stirnseiten geeignet
9	Geringe Verschleppung	2	vertikal voraussichtlich höhere Verschleppung, speziell bei Upscaling - in vertikaler Lage leicht schöpfend, bei Rillenkugellagern ggfs. deutlich schlechter, daher geringer bewertet als horizontal	Geringe Verschleppung
10	Mitbeschichtung der Kontaktelemente	3	Funktion der Kontaktierung kann eingeschränkt werden (bewertet wird zustand bei normalem Betrieb, ggfs. Wartung nach Beschichtung -	Mitbeschichtung Kontakte

			Abplatzungen möglich, Unregelmäßigkeiten auf Kontaktteilen)	
11	Anzahl der Varianten für Bauteilspektrum	3	Anzahl der Aufnahmen, Anodenkonfigurationen (verschiebbare Anoden etc.). Blenden werden nicht berücksichtigt (voraussichtlich immer angepasst notwendig)	Variantenanzahl Bauteilspektrum
12	Handlingsaufwand am Bauteil während Abscheidung	4	Automatisierung für zyklisches Versetzen bzw. manuelle Durchführung	Handlingsaufwand während Abscheidung
13	Schätzung Umsetzungsaufwand Halterung und Kontaktierung	3	Zyklisches automatisches Umsetzen mit hohem Automatisierungsaufwand, Anzahl der Antriebe, Synchronisierung von Rollen etc.	Umsetzungsaufwand
14	Anodensystem mit beweglichen Teilen notwendig / anpassbar	3	Innenanode muss bei vertikaler Ausrichtung nach Absenken in den Ring eingefahren werden, anpassbar an Ringachse (durchmesserabhängig)	Anodensystem
15	Mechanische Belastung der Schicht durch Kontaktierung	5	Direkte Einwirkung auf Schicht (Schädigung) möglich. Fix mit voller Punktzahl, dann rollend und umschlingend (schonender), danach wälzend bzw. rollend mit leichten Gleitanteilen (Stirnseite mit Linienkontakt), Schlusslicht schleifend	Schichtbelastung
16	Kontaktierung und/oder Halterung auf tolerierten Funktionsflächen	4	Toleranzangaben der Zeichnung maßgebend: ID/AD Passung, Stirnseiten im Zehntelsbereich	Nutzung tolerierter Flächen
17	Gefahr von Schmutzeintrag	2	Schleifkontakte erzeugen ggfs. Abrieb (Eintrag muss konstruktiv verhindert werden, sofern möglich)	Schmutzeintrag
18	Stromübertragung auf Kontaktkomponenten erfolgt komplett außerhalb des Elektrolytspiegels	3	Sofern Kontakte keine fixe Verbindung bis außerhalb des Elektrolytspiegels aufweisen, muss innerhalb eine Stromübertragung erfolgen (bei rotierenden Teilen hoher Aufwand, Abdichtungen erforderlich, relevant bei Rollkontakten mit Achse innerhalb des Elektrolyten parallel zum Badspiegel)	Stromübertragung Kontaktteile außerhalb
19	Anpressung der Kontakte einstellbar	2	Einstellbare Presskraft für Kontaktteile	Anpressung einstellbar

Tabelle 12.6: Variantenbewertung

	Variantenbeschreibung	Kriterien (Nr. Beschreibung, Gewichtungsfaktor)																			Auswertung		
		Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	Σ gewichtete Werte	Platzierung
		Faktor	2	3	1	2	2	1	1	1	2	3	3	4	3	3	5	4	2	3	2		
vollengegäutert, horizontal	Rollkontakte / Stützrollen an beiden Stirnseiten, Strom auf Rollen über Schleifkont. außerhalb	Wert	3	2	1	3	3	3	3	3	2	1	2	3	2	3	2	2	2	3	3	111	2
		Gew.	6	6	1	6	6	3	3	3	4	3	6	12	6	9	10	8	4	9	6		
	Rollkontakte / Stützrollen an beiden Stirnseiten, Strom auf Rollen über abrollen außerhalb	Wert	3	2	1	3	3	3	3	3	2	1	2	3	2	3	2	2	3	3	3	113	1
		Gew.	6	6	1	6	6	3	3	3	4	3	6	12	6	9	10	8	6	9	6		
	Rollkontakte / Stützrollen an einer Stirnseite (unten, Pressung über Schwerkraft)	Wert	3	3	1	3	3	3	3	3	2	1	2	3	2	3	2	2	2	1	1	104	10
		Gew.	6	9	1	6	6	3	3	3	4	3	6	12	6	9	10	8	4	3	2		
	Rollkontakt am ID+AD, Stützrollen an einer Stirnseite	Wert	3	3	1	3	2	3	2	3	2	1	1	3	1	3	3	1	2	3	3	106	5
		Gew.	6	9	1	6	4	3	2	3	4	3	3	12	3	9	15	4	4	9	6		
vertikal teileingegäutert, Kontakt außerhalb	Stützrollen an einer Stirnseite, Schleifkontakt gegenüber	Wert	3	3	1	3	3	3	3	2	1	2	3	2	3	1	2	1	3	3	107	3	
		Gew.	6	9	1	6	6	3	3	3	4	3	6	12	6	9	5	8	2	9	6		
	Stützrollen und Schleifkontakt an einer Stirnseite (unten, Pressung über Schwerkraft)	Wert	3	3	1	3	3	3	3	3	2	1	2	3	2	3	1	2	3	3	1	107	3
		Gew.	6	9	1	6	6	3	3	3	4	3	6	12	6	9	5	8	6	9	2		
	zykl. im El. automatisch wechselnder Kontakt mit Bauteilrotation	Wert	3	3	3	3	3	3	3	3	2	1	1	1	1	3	3	2	3	3	105	7	
		Gew.	6	9	3	6	6	3	3	3	4	3	3	4	3	3	15	12	4	9	6		
	Rollkontakte am AD, Stützrolle getaucht	Wert	2	2	2	1	2	3	1	3	1	3	1	3	2	2	3	1	2	3	3	101	13
		Gew.	4	6	2	2	4	3	1	3	2	9	3	12	6	6	15	4	4	9	6		
vertikal teileingegäutert, Kontakt außerhalb	Rollkontakte am ID außerhalb	Wert	2	2	3	1	3	3	1	3	1	3	2	3	2	3	1	2	3	1	103	11	
		Gew.	4	6	3	2	6	3	1	3	2	9	6	12	6	6	15	4	4	9	2		
	Rollkontakte an ID+AD außerhalb	Wert	2	2	3	1	2	3	1	3	1	3	2	3	2	2	3	1	2	3	3	105	7
		Gew.	4	6	3	2	4	3	1	3	2	9	6	12	6	6	15	4	4	9	6		
	Teilumschlingendes Band am AD, Stützrollen getaucht am AD	Wert	2	1	2	1	3	3	1	3	1	3	1	3	2	2	3	1	3	3	3	102	12
		Gew.	4	3	2	2	6	3	1	3	2	9	3	12	6	6	15	4	6	9	6		
	Teilumschlingendes Band am AD, Stützrolle außerhalb am ID	Wert	2	1	3	1	3	3	1	3	1	3	2	3	2	2	3	1	3	3	3	106	5
		Gew.	4	3	3	2	6	3	1	3	2	9	6	12	6	6	15	4	6	9	6		
vertikal teileingegäutert, Kontakt außerhalb	Schleifkontakt außerhalb & Antriebs- / Stützrollen an AD und ID außerhalb	Wert	2	1	3	1	2	3	2	3	1	3	2	3	2	2	1	2	1	3	3	95	14
		Gew.	4	3	3	2	4	3	2	3	2	9	6	12	6	6	5	8	2	9	6		
	Schleifkontakt außerhalb & Antriebs- / Stützrollen am AD außerhalb und getaucht	Wert	2	1	2	1	2	3	2	3	1	3	1	3	2	2	1	2	1	3	3	91	15
		Gew.	4	3	2	2	4	3	2	3	2	9	3	12	6	6	5	8	2	9	6		
vertikal teileingegäutert, Kontakt außerhalb	zykl. automatisch wechselnder Kontakt (innerhalb und außerhalb) mit BT-Rot.	Wert	2	3	2	1	3	3	3	3	1	3	1	1	1	2	3	3	2	3	3	105	7
		Gew.	4	9	2	2	6	3	3	3	2	9	3	4	3	6	15	12	4	9	6		

Die Bewertung der einzelnen Kriterien erfolgt mit den Werten 1 bis 3: Bei 1 wird die Umsetzung / Zielerreichung als nicht optimal bzw. problematisch eingestuft, der Wert 2 bezeichnet eine Eignung mit Einschränkungen, bei der Höchstpunktzahl wird von einer vollständigen, bestmöglichen Eignung ausgegangen

Tabelle 12.7: Ordnungsschema zur Lösungsfindung („Morphologischer Kasten“)

Morphologischer Kasten					
Projekt:	Dissertation im Rahmen des Forschungsprojekts „Poseidon“				
Bearbeiter:	P. Schwanzer				
Version:	3				
Aufgabe:	Entwicklung einer Anlagen- und Vorrichtungstechnik zur vollflächigen, nahtlosen Beschichtung von Lagerringen aus wässrigen galvanischen Elektrolyten				
	Variante	V1	V2	V3	V4
Beschichtungseigenschaften	Elektrolytversorgung	vollständig eingetaucht	teileingetaucht	Jetplating / Düsen	Autobrush-System
	Bauteilanzahl / Charge	einzelner Ring (IR/AR separat)	Lager (IR+AR)	mehrere Ringe IR / AR	mehrere Lager (IR+AR)
Bauteilhalterung	Bauteilorientierung	horizontal (Lagerachse vertikal)	vertikal (Lagerachse horizontal)	schräg	taumelnd
	Bauteilaufnahme	Rollen	Haken	Klammern / Federklammern	schwimmend („Elektrolytkissen“)
	Aufnahme- / Auflagepunkte	1	2	3	vielfach
	Kraftaufbringung Bauteil / Aufnahme	mechanisch (Federkraft o.ä.)	hydraulisch	pneumatisch	Eigengewicht (Gravitation)
Bauteilbewegung	Relativbewegung Halterung / Lager	konstant	zyklisch (Pick & Place / drehen im Prozess)	zyklisch (Entnahme & Umspannen, mehrstufiger Prozess)	oszillierend
	Art Relativbewegung	Lager rotieren	Lager rollen	Halterung rotieren	zyklisch umsetzen
	Bewegungsübertragung auf Bauteil	Reibung	hydrodynamisch (gezielte Strömung)	formschlüssig	
	Antriebsart Bauteilbewegung	elektrisch	hydraulisch	pneumatisch	hydrodynamisch

	Kraftübertragung Antriebsmotor zu Bauteil-antrieb	Welle / Kupp-lung	Zahnrad	Riemen	Kette
Stromzufuhr	Kontaktierungsart	drehende Rollen	stationäre Klemmkontakte	Schleifkontakt (Bürste etc.)	flexibles Band (teilumschlingend)
	Kontaktierungsort (badbezogen)	im Elektrolyt & Beschichtungsbereich	außerhalb Elektrolyt	im Elektrolyt, vom Beschichtungsbereich getrennt	
	Kontaktierungsort auf Lagerring	Stirnseite	Innendurchmesser	Außendurchmesser	Lagerinnen-seite
Schnittstellenausführung	Aufnahme / Kontaktierung	separat	identisch (Aufnahme = Kontaktierung)	gemischt	
Anodentechnik	Anodenform	unlösliche Ringe	unlösliche Formanode	Stäbe, Platten, Bleche (löslich / unlöslich)	Körbe
	Anodenort	Badrand	Konzentrisch um Lager	Lagerzentrum	Badboden
	Anodenposition	fix	verschiebbar		
Badbehälter & Einbauten	Niveauregelung Aktivbereich	Sensor + autom. Nachdosierung	Überlaufabteil	Externer Vorlagebehälter	
	Niveausensoren	Schwimmer	konduktiv	kapazitiv	Ultraschall / Radar
	Position Sensoren	Behälterrand (Ecken)	Überlaufabteil		
	Heizung	Überlaufabteil	Behälterboden	Behälterwand	extern (Vorlage / Durchlauf)
	Badbewegung	(Filter-) Pumpe	Rührer	nur über Vorrichtung	

Tabelle 12.8: Lösungspfad für Horizontalvorrichtung und Gesamtanlage (orange markiert)

Morphologischer Kasten					
Projekt:	Dissertation im Rahmen des Forschungsprojekts „Poseidon“				
Bearbeiter:	P. Schwanzer				
Version:	3				
Aufgabe:	Entwicklung einer Anlagen- und Vorrichtungstechnik zur vollflächigen, nahtlosen Beschichtung von Lagerringen aus wässrigen galvanischen Elektrolyten				
Variante		V1	V2	V3	V4
Merkmale					
Beschichtungseigenschaften	Elektrolytversorgung	vollständig eingetaucht	teileingetaucht	Jetplating / Düsen	Autobrush-System
	Bauteilanzahl / Charge	einzelner Ring (IR/AR separat)	Lager (IR+AR)	mehrere Ringe IR / AR	mehrere Lager (IR+AR)
Bauteilhalterung	Bauteilorientierung	horizontal (Lagerachse vertikal)	vertikal (Lagerachse horizontal)	schräg	taumelnd
	Bauteilaufnahme	Rollen	Haken	Klammern / Federklemmen	schwimmend („Elektrolytkissen“)
	Aufnahme- / Auflagepunkte	1	2	3	vielfach
	Kraftaufbringung Bauteil / Aufnahme	mechanisch (Federkraft o.ä.)	hydraulisch	pneumatisch	Eigengewicht (Gravitation)
Bauteilbewegung	Relativbewegung Halterung / Lager	konstant	zyklisch (Pick & Place / drehen im Prozess)	zyklisch (Entnahme & Umspannen, mehrstufiger Prozess)	oszillierend
	Art Relativbewegung	Lager rotieren	Lager rollen	Halterung rotieren	zyklisch umsetzen
	Bewegungsübertragung auf Bauteil	Reibung	hydrodynamisch (gezielte Strömung)	formschlüssig	
	Antriebsart Bauteilbewegung	elektrisch	hydraulisch	pneumatisch	hydrodynamisch

	Kraftübertragung Antriebsmotor zu Bauteil-antrieb	Welle / Kupp-lung	Zahnrad	Riemen	Kette
Stromzufuhr	Kontaktierungsart	drehende Rollen	stationäre Klemmkontakte	Schleifkontakt (Bürste etc.)	flexibles Band (teilumschlingend)
	Kontaktierungsort (badbezogen)	im Elektrolyt & Beschichtungsbereich	außerhalb Elektrolyt	im Elektrolyt, vom Beschichtungsbereich getrennt	
	Kontaktierungsort auf Lagerring	Stirnseite	Innendurchmesser	Außendurchmesser	Lagerinnen-seite
Schnittstellenausführung	Aufnahme / Kontaktierung	separat	identisch (Aufnahme = Kontakt.)	gemischt	
Anodentechnik	Anodenform	unlösliche Ringe	unlösliche Formanode	Stäbe, Platten, Bleche (löslich / unlöslich)	Körbe
	Anodenort	Badrand	Konzentrisch um Lager	Lagerzentrum	Badboden
	Anodenposition	fix	verschiebbar		
Badbehälter & Einbauten	Niveauregelung Aktivbereich	Sensor + autom. Nachdosierung	Überlaufabteil	Externer Vorlagebehälter	
	Niveausensoren	Schwimmer	konduktiv	kapazitiv	Ultraschall / Radar
	Position Sensoren	Behälterrand (Ecken)	Überlaufabteil		
	Heizung	Überlaufabteil	Behälterboden	Behälterwand	extern (Vorlage / Durchl.)
	Badbewegung	(Filter-) Pumpe	Rührer	nur über Vorrichtung	



## 12.4 Anlagensteuerung



Abbildung 12.1: Anlagenübersicht der Benutzeroberfläche, die Istwerte beider Badstationen werden angezeigt.

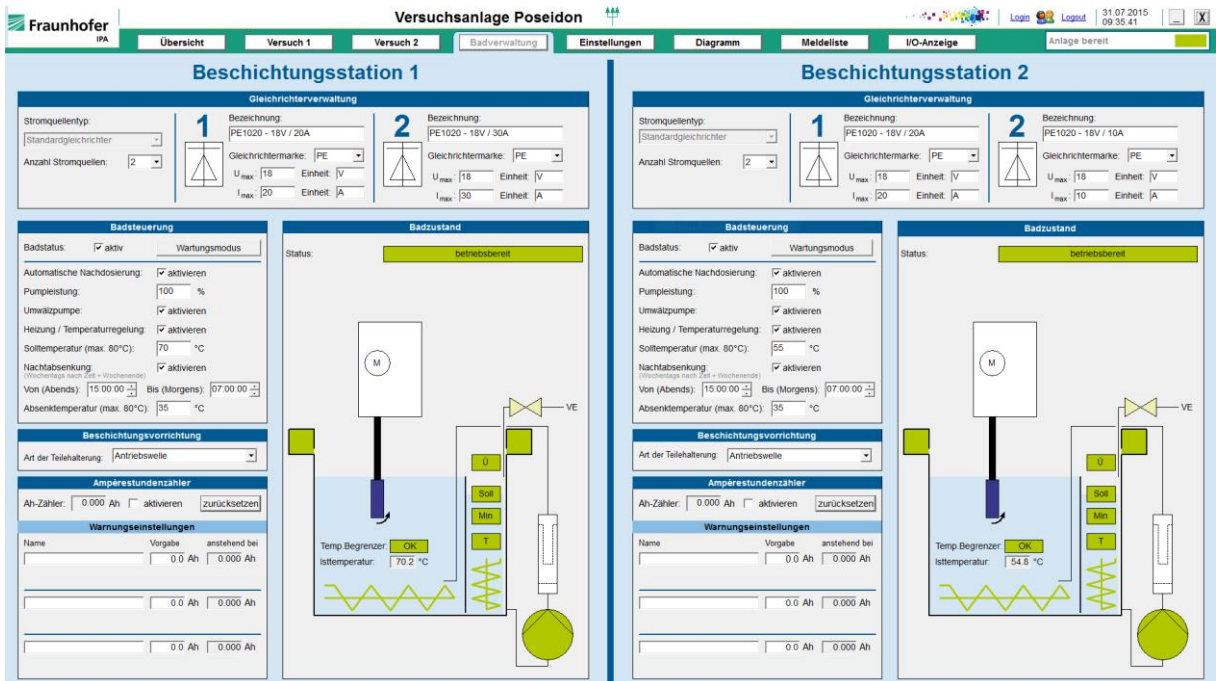


Abbildung 12.2: Verwaltung der Betriebsparameter beider Badstationen

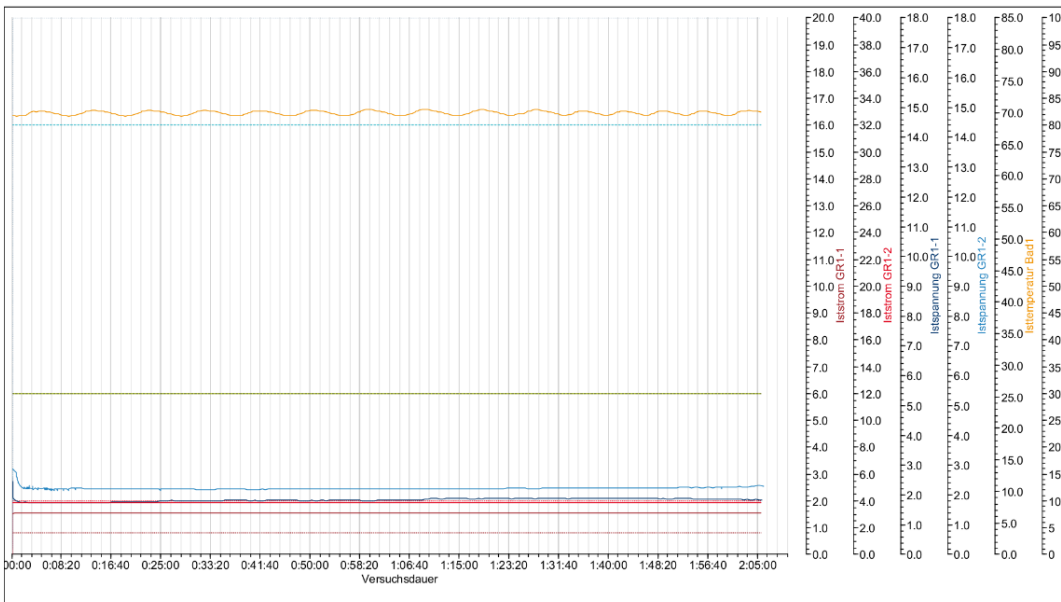
# Versuchsprotokoll

**Projekt / Auftrag:** Poseidon  
**Versuchsbezeichnung:** NiW-V19

<b>Bearbeiter:</b>	PBS	<b>Versuchsdauer:</b>	02:05:59 [hh:mm:ss]
<b>Bauteiltyp:</b>	Innenring	<b>Versuchsbeginn:</b>	29.05.2015 - 13:13:34
<b>Teilenr.:</b>	.17#04	<b>Versuchsende:</b>	29.05.2015 - 15:19:34
<b>Vorrichtung:</b>	Horizontaldrehvorrichtung	<b>Antriebsdrehzahl:</b>	30 1/min
<b>Gleichrichter 1:</b>	PE1020 - 18V / 20A	<b>Soll-Badtemperatur:</b>	70 °C
<b>Gleichrichter 2:</b>	PE1020 - 18V / 40A	<b>Umwälzleistung:</b>	100 %

**Bemerkung:**

## Verlaufsdiagramm



## Vorgabewerte (Stufenanzahl: 1)

<b>Stufe 1</b>	Stufenart: Konstantstrom	GR1 Sollstrom:	1.6 A	GR1 Sollspannung:	18 V
	Dauer: 02:06:00 [hh:mm:ss]	GR2 Sollstrom:	4 A	GR2 Sollspannung:	18 V

Abbildung 12.3: Beispielhaftes Versuchsprotokoll

## 12.5 Versuchsparemeter und -daten

### 12.5.1 Vorbehandlung

Tabelle 12.9: Vorbehandlungsabfolge

<b>Abfolge</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>Parameter</b>
<b>1</b>	Reinigung	manuell mit Aceton
<b>2</b>	Heißentfettung	5 Min.
<b>3</b>	Beize	1 Min.
<b>4</b>	Elektrolyt. Entfettung	anodisch 1 Min. / 3,5 V
<b>5</b>	Dekapieren	1 Min.
<b>6</b>	Nickel-Strike	2 Min. / 1 A/dm <sup>2</sup>

### 12.5.2 Reinnickel, Inbetriebnahme und Erstversuche

Tabelle 12.10: Parameter Reinnickel-Elektrolyt (Referenzelektrolyt)

<b>Badstation</b>	2
<b>Hauptbestandteile</b>	Nickelsulfat Nickelchlorid Borsäure
<b>Zusatzmittel</b>	Saccharin
<b>Netzmittel</b>	1,4-Dihexyl-Sulfosuccinat
<b>Temperatur</b>	55 °C
<b>pH-Wert</b>	3,6 - 4,0; Einstellung vor jedem Versuch
<b>Anodenmaterial</b>	P-Nickel
<b>Umwälzung</b>	konstant mit Filtration 1 µm (nominell), indirekte Anströmung mit 100 % Pumpleistung

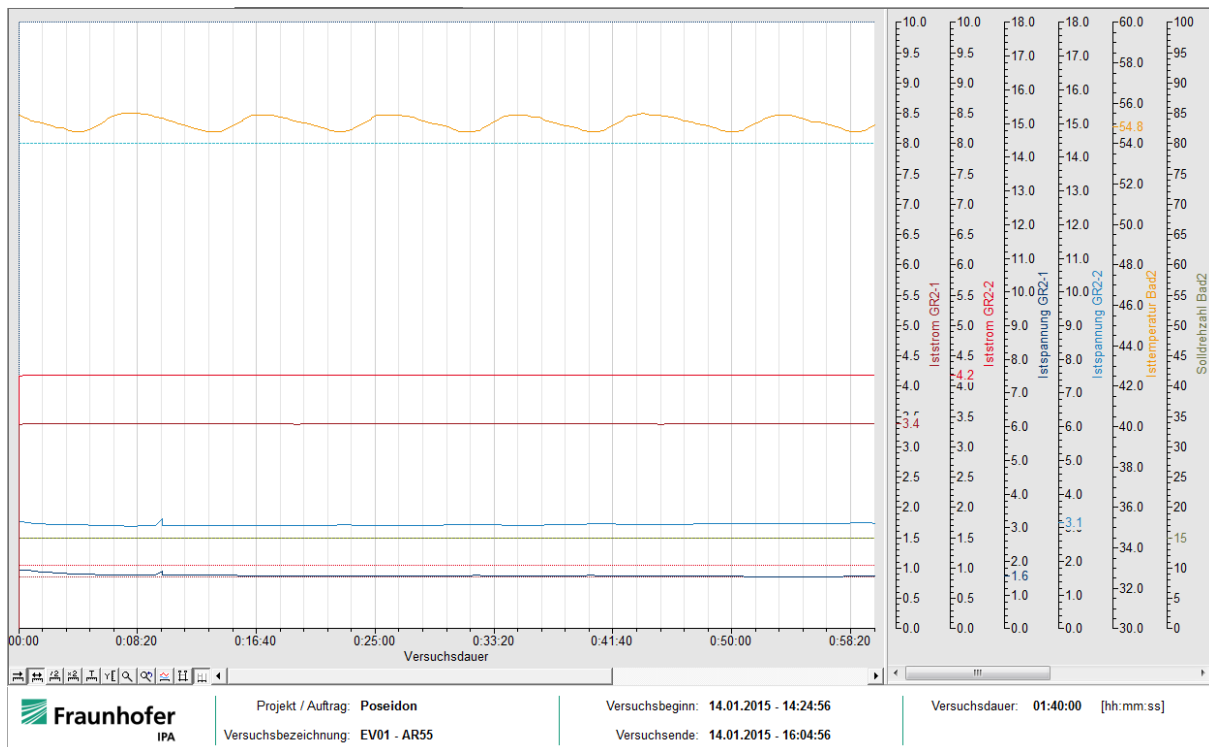


Abbildung 12.4: Diagramm der protokollierten Istwerte für Versuch EV01 (AR55) (beispielhaft für durchgeführte Reinnickel-Versuche)

### 12.5.3 Nickel-Wolfram

#### Tabellen

Tabelle 12.11: Parameter Nickel-Wolfram-Elektrolyt

<b>Badstation</b>	1
<b>Hauptbestandteile</b>	Natrium-Wolframat Nickelsulfat Natriumcitrat Ammoniumchlorid
<b>Zusatzmittel</b>	-
<b>Netzmittel</b>	Natriumlaurylsulfat
<b>Temperatur</b>	70 °C

<b>pH-Wert</b>	9,0 (Raumtemperatur), Einstellung 7,9-8,0 bei Arbeitstemperatur
<b>Anodenmaterial</b>	P-Nickel
<b>Umwälzung</b>	konstant mit Filtration 1 µm (nominell), indirekte Anströmung mit 100 % Pumpleistung

Tabelle 12.12: Versuchsparameter der über Querschleif ausgewerteten Lagerringe

Versuch	V01	V02	V05	V14	V19	V20
<b>Typ</b>	AR	IR	IR	AR	IR	AR
<b>Ringnr.</b>	40	18	32	30	4	13
<b>Ringuntermaß [µm]</b>	-25	-25	-50	-25	-25	-50
<b>Stromdichte [A/dm<sup>2</sup>]</b>	2	2	2	2	2	2
<b>Gesamtstrom [A]</b>	7,6	5,6	5,6	7,6	5,6	7,6
<b>Außenanode</b>	35,5 %	68 %	68 %	35,5 %	71,5 %	33 %
<b>Innenanode</b>	64,5 %	32 %	32 %	64,5 %	28,5 %	67 %
<b>Bauteildrehzahl [U/min]</b>	40	30	60	40	60	40
<b>Dauer [min]</b>	240	240	180	180	126	126

## Abbildungen

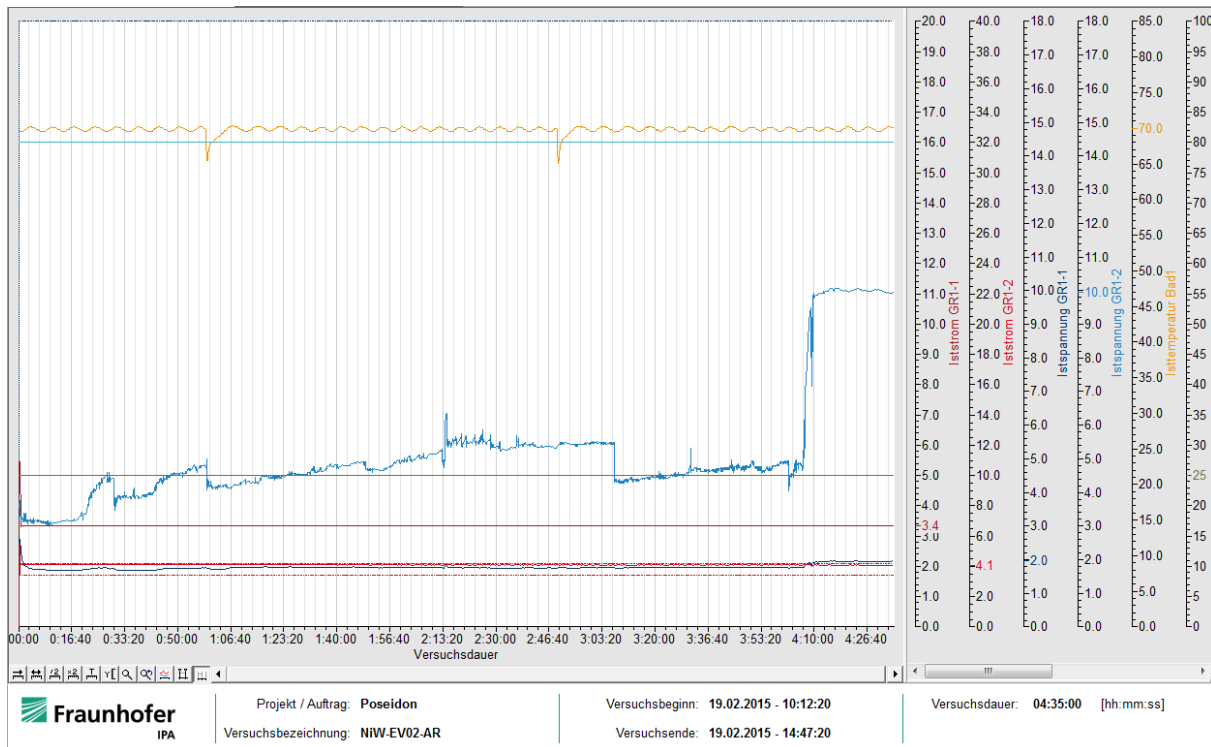


Abbildung 12.5: Istwerte-Diagramm NiW-EV02 / AR35 (beispielhaft für auftretende Spannungsschwankungen an der Innenanode)

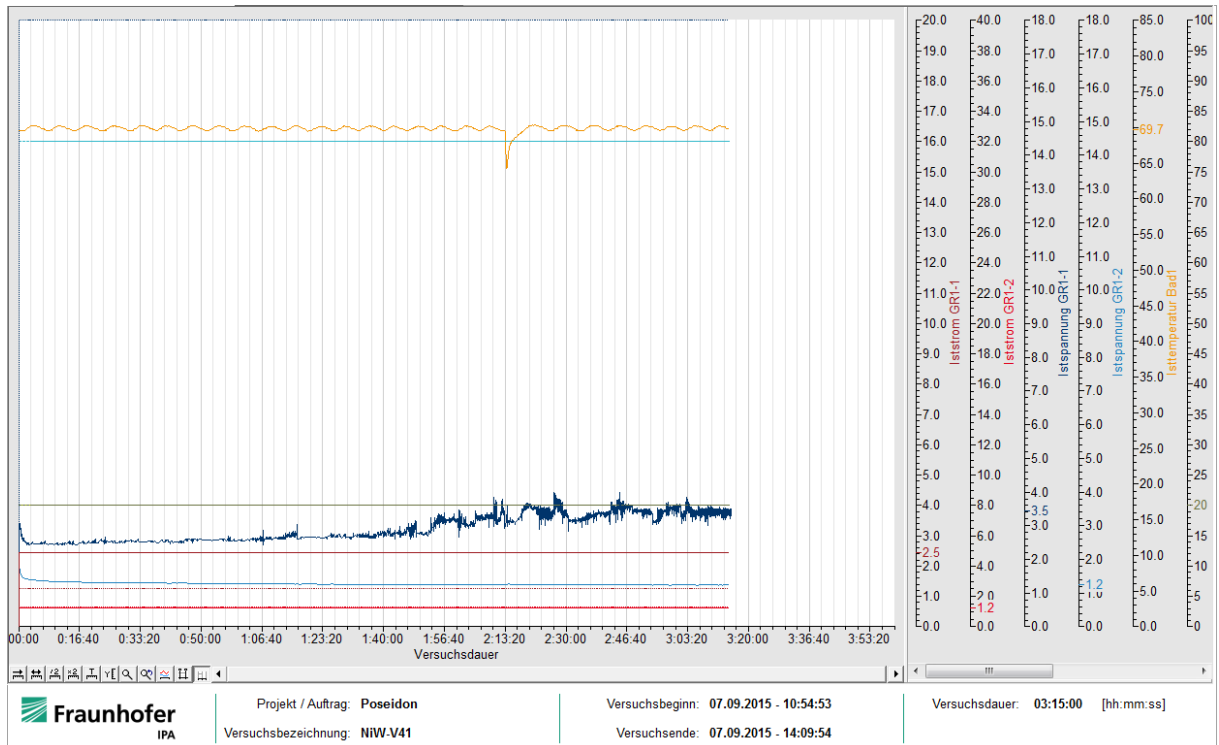


Abbildung 12.6: Istwerte-Diagramm NiW-V41 (beispielhaft für auftretende überarbeitetes Anodensystem)

## 12.6 Vorrichtung für außenstromlose Abscheidung

Für die außenstromlosen Beschichtungen wurde die in Abbildung 12.7 gezeigte vereinfachte Vorrichtung erstellt, welche eine vollflächige Abscheidung bei einer Rotation des Bauteils erlaubt. Die Vereinfachungen wurden möglich, da durch das Fehlen der elektrischen Kontaktierung und der exakten Positionierung zur Anode deutlich geringere Anforderungen zu erfüllen waren: Ein vollständiges Eintauchen des Bauteils mit Rotation veränderlichen Auflagepunkten ohne statische Fixierung war ausreichend. Die geringen Dimensionen und Gewichte erlaubten ein Einhängen der Lagerringe an einer rotierenden Achse, welche über ein Kegelradgetriebe mit einem Laborrührwerk verbunden war. Die gesamte Vorrichtung ist über das Rührwerk an einem manuell verschiebbaren Stativ angebracht, welches ein Versenken im Elektrolyten zur Beschichtung ermöglichte.

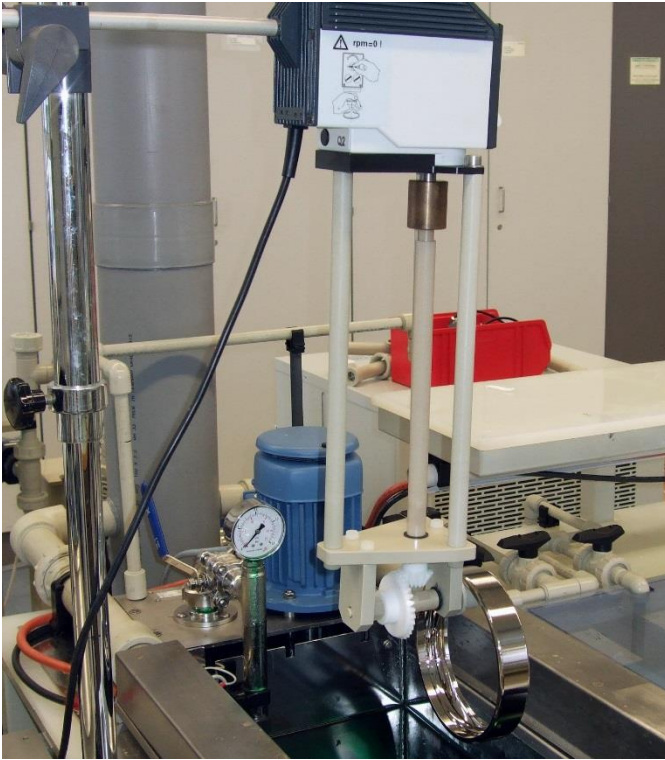


Abbildung 12.7: Ansicht der vereinfachten Vorrichtung zur stromlosen Beschichtung

Die Vorrichtung wurde für die Beschichtung von Lagern mit einer Kombinationsschicht aus chemisch Nickel-Phosphor und galvanisch Nickel-Wolfram verwendet.





