Prototypenanlage und Prozessuntersuchung zum elektrolytischen Plasmapolieren von Rohrinnenoberflächen

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
der Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik
der Universität Rostock



vorgelegt von
Matthias Sören Cornelsen,
geb. am 03.08.1980 in Stralsund

Rostock
3. Januar 2020

https://doi.org/10.18453/rosdok_id00002881

Erstgutachter:	Prof. Dr.-Ing. Hermann Seitz
	Lehrstuhl für Mikrofluidik
	Universität Rostock
Zweitgutachter:	Prof. Dr.-Ing. habil. Detlef Behrend
	Lehrstuhl Werkstoffe für die Medizintechnik
	Universität Rostock

Tag der Verteidigung: 27. August 2020

Vorwort

Die vorliegende Doktorarbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Mikrofluidik der Universität Rostock unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Hermann Seitz. Ihm gilt mein besonderer Dank für die hervorragende fachliche Betreuung sowie die vielen Anregungen und Verbesserungsvorschläge im Rahmen der Erstellung dieser Arbeit. Des Weiteren gebührt mein Dank dem Zweitgutachter dieser Arbeit, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Detlef Behrend, Inhaber des Lehrstuhls Werkstoffe für die Medizintechnik der Universität Rostock.

Für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Jens Falkenstein bedanken.

Den Mitarbeitern des Lehrstuhls für Mikrofluidik, hier vor allem Herrn Dr.-Ing. Horst Mund und Herrn Alexander Riess M.Sc., gilt mein Dank für die freundschaftliche Zusammenarbeit und die offenen Diskussionen, ebenso den Mitarbeitern der anderen Lehrstühle, hier vor allem Herrn Dr.-Ing. Jöran Ritzke.

Ich danke ebenfalls den Mitarbeitern des Labors, den Herren Fred Sokolowski und Jörn Daebeler, für die Anfertigung der mechanischen Komponenten sowie Herrn Enrico Voß für die elektrische Installation des Prüfstands. Weiterhin möchte ich an dieser Stelle auch den Mitarbeiterinnen des Sekretariats, den Damen Angela Frankenberg, Kathrin Hollatz, Susanne Seibold und Angelika Gehl, für ihre zuverlässige Hilfe in allen administrativen Dingen danken.

Kurzfassung

Das elektrolytische Plasmapolieren (EPP) zählt neben dem Elektropolieren (EP) zu den elektrochemisch oberflächenabtragenden Fertigungsverfahren und kann als Stand der Technik für metallische Freiformflächen angesehen werden. Es findet Anwendung in vielen Wirtschafts- und Industriebereichen, wo besonders hohe Anforderungen an die Produkt- bzw. Werkstückoberfläche gestellt werden. Beim EPP wird das anodisch gepolte Werkstück in eine kathodisch gepolte Elektrolytwanne gefahren. Bei Kontakt mit dem Elektrolyten bildet sich durch Anlegen eines elektrischen Potentials ein prozessbedingtes Plasma um die gesamte Werkstückoberfläche aus. Die Reduzierung der Oberflächenrauheit erfolgt durch den auf diese Weise induzierten Materialabtrag. Wird ein Rohr in der Elektrolytwanne elektrolytisch plasmapoliert, erfolgt prozessbedingt nur die Bearbeitung der Außen-, nicht aber der Innenoberflächen. Ziel ist es, durch eine Weiterentwicklung des Plasmapolierprozesses mit Hilfe einer Prototypenanlage unter Verwendung eines Polierkopfes den Nachweis zu erbringen, dass das elektrolytische Plasma auch an der Rohrinnenoberfläche erzeugt und somit die Rauheit im Inneren des Rohres reduziert werden kann. Die Entwicklung eines Prozesses zum elektrolytischen Plasmapolieren von Rohrinnenoberflächen mit entsprechender Anlagentechnik und notwendigen Werkzeugen erfordert einen komplett neuen technischen Ansatz. Mit der Etablierung eines elektrolytischen Plasmapolierprozesses zum Polieren von Rohrinnenoberflächen soll die vorliegende Arbeit einen Beitrag zur Erweiterung des Anwendungsbereichs des EPP liefern.

Im Detail stellen sich die Ziele wie folgt dar:

- Entwicklung einer Prototypenanlage zum elektrolytischen Plasmapolieren von metallischen Rohrinnenoberflächen,
- Entwicklung und Implementierung eines Polierkopfes zur Erzeugung eines Plasmas an einer Rohrinnenoberfläche,
- Experimenteller Nachweis der Funktionsfähigkeit der Prototypenanlage und Identifikation geeigneter Prozessparameter für das Erreichen minimaler Oberflächenrauheiten,
- Vergleich der Prozessergebnisse mit dem Stand der Technik im Bereich des elektrolytischen Plasmapolierens von Außenflächen, wie z. B. Blechen.

Im Rahmen der Arbeit konnten eine Prototypenanlage und ein Prozess zum elektrolytischen Plasmapolieren von Rohrinnenoberflächen erfolgreich etabliert werden. Es war erstmals möglich, Rohrinnenoberflächen mit dem elektrolytischen Plasmapolierprozess zu bearbeiten. Mittels experimenteller Untersuchungen konnten Prozessparameter identifiziert werden, die zu einer deutlichen Reduktion der durchschnittlichen Oberflächenrauheiten, vergleichbar den

Ergebnissen beim elektrolytischen Plasmapolieren von Außenflächen, führen. Die aus den durchgeführten Untersuchungen zum elektrolytischen Plasmapolieren von Rohrinnenflächen gewonnenen Erkenntnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

(i) Mit der Prototypenanlage und dem Polierkopf können Rohrinnenoberflächen elektrolytisch plasmapoliert werden.

(ii) Eine Erhöhung der Spaltbreite des Polierkopfes über 2 mm hat keinen maßgeblichen Einfluss auf die arithmetischen Rauheiten von elektrolytisch plasmapolierten Rohrinnenoberflächen.

(iii) Die effektive Polierdauer ist der entscheidende Parameter, der einen deutlichen Einfluss auf den EPP-Prozess und somit auf die durchschnittlichen Oberflächenrauheiten der bearbeiteten Rohrinnenflächen hat.

(iv) Die gewählte elektrische Potentialdifferenz hat insbesondere bei langen effektiven Polierdauern keinen maßgeblichen Einfluss auf die Oberflächenrauheit. Für eine bessere Prozessstabilität sollte eine möglichst hohe elektrische Potentialdifferenz gewählt werden.

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis **IX**

Abbildungsverzeichnis **XI**

Symbolverzeichnis **XV**

1 Einleitung **1**
1.1 Motivation 2
1.2 Aufbau und Zielsetzung der Arbeit 3

2 Stand der Technik **5**
2.1 Oberflächen 5
2.1.1 Definition und Bedeutung des Begriffes Oberfläche 5
2.1.2 Kenngrößen zur Charakterisierung einer Oberfläche 7
2.1.3 Messverfahren zur Charakterisierung von Oberflächen 13
2.2 Fertigungsverfahren 18
2.2.1 Unterteilung der Fertigungsverfahren 18
2.2.2 Fertigungsverfahren Trennen 21
2.3 Fertigungsverfahren zur Nachbehandlung metallischer Oberflächen 22
2.3.1 Mechanisches Polieren 22
2.3.2 Optisches Polieren 23
2.3.3 Chemisches Polieren 24
2.3.4 Elektrochemisches Polieren (elektrochemisches Abtragen) 25
2.4 Elektrochemisch oberflächenabtragende Fertigungsverfahren 27
2.4.1 Elektropolieren 27
2.4.2 Elektrolytisches Plasmapolieren 39
2.4.3 Vor- und Nachteile elektrolytischer Fertigungsverfahren 52

3 Prototypenanlagen zum elektrolytischen Plasmapolieren von Rohrinnenoberflächen **55**
3.1 Konzeption der Prototypenanlage 55
3.2 Aufbau der Prototypenanlage 60

3.3 Bewertung der Prototypenanlage 63
3.4 Polierkopfentwicklung 64

4 Material und Methoden 67
4.1 Herstellung und Charakterisierung des Elektrolyten 67
4.2 Charakterisierung der Oberflächenrauheit 68
4.3 Probenvorbereitung, Nachbereitung und Versuchsdurchführung 69

5 Auswertung und Diskussion 77
5.1 Vergleich elektrolytischer Fertigungsverfahren 77
5.2 Nachweis der Funktionsfähigkeit des Polierkopfes 78
5.3 Einfluss der Bearbeitungsgeschwindigkeit v_b auf Sa 79
5.4 Einfluss der Spaltbreite h_{gap} des Polierkopfes auf Sa 81
5.5 Einfluss der effektiven Polierdauer t_{ept} auf Sa 84
5.6 Fazit 101

6 Zusammenfassung und Ausblick 105

Literaturverzeichnis 107

Tabellenverzeichnis

2.1 Gesamtübersicht über die Gestaltabweichungen 6
2.2 Überblick der 2D- und 3D-Profilkenngrößen. 12
2.3 Komponenten einer Anlage zum elektrolytischen Polieren (Elektrolysezelle). . 25
2.4 Bereichsunterteilung der charakteristischen *j*-*U*-Kurve beim Elektropolieren. . 35
2.5 Bereichsunterteilung der charakteristischen *j*-*U*-Kurve beim Plasmapolieren. . 48

3.1 Kernkomponenten der Prototypenanlage zum Plasmapolieren von Rohrinnenoberflächen. 57
3.2 Auflistung der anlagenspezifischen Prozessparameter. 63
3.3 Kernkomponenten des Polierkopfes zum elektrolytischen Plasmapolieren. . . . 64

4.1 Temperaturkoeffizientenbereich für verschiedene Lösungen. 68
4.2 Anzahl an Polierdurchgängen n_{v_b} für unterschiedliche Bearbeitungsgeschwindigkeiten v_b und die daraus resultierenden effektiven Polierdauern t_{ept}. 74

5.1 Ermittelte Oberflächenrauheit Sa_n mit Standardabweichung für fünf Polierdurchgänge ($n = 5$) mit einer elektrischen Potentialdifferenz von 300 V. 78
5.2 Durchschnittliche arithmetische Oberflächenrauheiten *Sa* in Abhängigkeit von der elektrischen Potentialdifferenz U für unterschiedliche Bearbeitungsgeschwindigkeiten v_b des Polierkopfes. 80
5.3 Durchschnittliche arithmetische Oberflächenrauheiten *Sa* und die Stromstärke I in Abhängigkeit von der elektrischen Potentialdifferenz U für Spaltbreiten h_{gap} von 2 mm bis 10 mm bei einer Bearbeitungsgeschwindigkeit $v_b = 1\,\mathrm{mm\,s^{-1}}$ und Ausgangsoberflächenrauheit $Sa_0 = 0{,}75\,\mu\mathrm{m}$. 81
5.4 Sa_{ept} der Rohrinnenoberfläche und der Naht für die elektrischen Potentialdifferenzen 260 V und 320 V. Die Bearbeitungsgeschwindigkeit betrug $0\,\mathrm{mm\,s^{-1}}$, d. h. das Rohr wurde nicht verfahren, sondern es wurde auf der Stelle poliert. . 84
5.5 Sa_{v_b} von Rohrinnenoberflächen und elektrische Stromstärke I_{v_b} für unterschiedliche Bearbeitungsgeschwindigkeiten v_b und Anzahl n_{v_b} der Polierdurchgänge bei einer elektrischen Potentialdifferenz U von 260 V. 87

5.6 Sa_{v_b} der Naht für unterschiedliche Bearbeitungsgeschwindigkeiten v_b und Anzahl n_{v_b} der Polierdurchgänge bei einer elektrischen Potentialdifferenz U von 260 V. 90
5.7 Sa_{v_b} von Rohrinnenoberflächen und elektrische Stromstärke I_{v_b} für unterschiedliche Bearbeitungsgeschwindigkeiten v_b und Anzahl n_{v_b} der Polierdurchgänge bei einer elektrischen Potentialdifferenz U von 320 V. 93
5.8 Durchschnittliche arithmetische Oberflächenrauheiten Sa_{v_b} von der Naht der Rohrinnenoberflächen für unterschiedliche Bearbeitungsgeschwindigkeiten v_b und Anzahl n_{v_b} der Polierdurchgänge bei einer elektrischen Potentialdifferenz U von 320 V. 97

Abbildungsverzeichnis

2.1 Darstellung der ersten (1) bis vierten (4) Ordnung der Gestaltabweichungen, welche überlagert die Istoberfläche (5) ergeben [6]. 6
2.2 Messkette für die Ermittlung von 2D-Profilkenngrößen 7
2.3 Grafische Darstellung des arithmetischen Mittenrauwerts *Ra* 8
2.4 Grafische Darstellung des gleichen arithmetischen Mittenrauwerts *Ra* für verschiedene zweidimensionale Oberflächentopologien 9
2.5 Grafische Darstellung des quadratischen Mittenrauwerts *Rq* 9
2.6 Grafische Darstellung der ermittelten maximalen Höhenwerte z_i 10
2.7 Messkette für die Ermittlung der 3D-Profilkenngrößen 11
2.8 Schematische Darstellung eines Tastschnittgerätes 13
2.9 Schematische Darstellung eines Rasterkraftmikroskops 14
2.10 Abtastung einer realen Oberfläche 15
2.11 Schematischer Aufbau eines Rasterelektronenmikroskops 16
2.12 Funktionsprinzips eines konfokalen Laser-Scanning-Mikroskops anhand des Strahlenverlaufes 17
2.13 Unterteilung der Fertigungsverfahren 19
2.14 Arithmetische Mittenrauwerte *Ra* für ausgewählte Hauptgruppen der Fertigungsverfahren 20
2.15 Schematische Darstellung einer Anlage zum elektrochemischen Polieren 25
2.16 Etablierter Fertigungsablaufplan für das Elektropolieren von metallischen Oberflächen 30
2.17 Schematische Darstellung des Metallauflösungsprozesses 32
2.18 Idealisierte Stromdichte-Potential-Kurve (*j*-*U*-Kurve) beim Elektropolieren . . 35
2.19 Schematische Darstellung des idealisierten Materialabtrags 37
2.20 Schematische Darstellung des Materialabtragsprozesses beim Elektropolieren . 38
2.21 Arithmetische Linienrauheit *Ra* und Wirkstromdichten *j* über Prozesstemperatur T_P 40
2.22 Arithmetische Linienrauheit *Ra* und Wirkstromdichte *j* über die Elektrolytmassenkonzentration β 41

2.23 Etablierter Fertigungsablaufplan für das elektrolytische Plasmapolieren von metallischen Oberflächen 43
2.24 Darstellung der Aggregatszustandsänderung. 45
2.25 Schematische Darstellung der Stoßionisation (a) und der Photoionisation (b) mit den zugehörigen Reaktionsgleichungen 2.18. 46
2.26 Charakteristische Stromdichte-Potential-Kurve sowie Temperatur-Potential-Kurve beim EPP 48
2.27 Schematische Darstellung einer Plasmaentladung nach der Streamertheorie . . 50
2.28 Schematische Darstellung des Materialabtragprozesses beim elektrolytischen Plasmapolieren 52

3.1 Schematische Darstellung der Prototypenanlage. 56
3.2 Prototypenanlage zum elektrolytischen Plasmapolieren von Rohrinnenoberflächen. 60
3.3 Detailansicht der Prototypenanlage. 62
3.4 Schematische Darstellung des Polierkopfes 65
3.5 Elektrolytaustritt bei einem Spalt des Polierkopfes von circa 1 mm. 66

4.1 Edelstahlstreifen (c) und Polierkopf (b) im transparenten Rohr (d) an einer Schelle (a) befestigt. 71

5.1 Durchschnittliche arithmetische Oberflächenrauheiten Sa über die effektive Polierdauer t_{ept} für elektropolierte und elektrolytisch plasmapolierte Proben. . 77
5.2 Sa_n in Abhängigkeit der Anzahl der Polierdurchgänge n der elektrolytisch plasmapolierten Edelstahlstreifen. 79
5.3 Durchschnittliche arithmetische Oberflächenrauheite Sa über die elektrische Potentialdifferenz U für Bearbeitungsgeschwindigkeiten v_b von 0,3 mm s^{-1}, 1,0 mm s^{-1} und 5,0 mm s^{-1}. 80
5.4 Durchschnittliche arithmetische Oberflächenrauheit Sa über der elektrischen Potentialdifferenz U für unterschiedliche Spaltbreiten des Polierkopfes h_{gap} mit einer durchschnittlichen arithmetischen Ausgangsoberflächenrauheit Sa_0 von 0,75 µm. 82
5.5 Durchschnittliche elektrische Stromstärke I über der elektrischen Potentialdifferenz U von 260 V, 280 V, 300 V und 320 V für unterschiedliche Spaltbreiten des Polierkopfes h_{gap} von 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm und 10 mm. 83
5.6 Durchschnittliche arithmetische Oberflächenrauheit Sa_{ept} der Rohrinnenoberfläche und der Naht über die effektive Polierdauer t_{ept} für eine elektrische Potentialdifferenz von 260 V. 85

5.7 Durchschnittliche arithmetische Oberflächenrauheit Sa_{ept} der Rohrinnenoberfläche und der Naht über die effektive Polierdauer t_{ept} für eine elektrische Potentialdifferenz von 320 V. 86
5.8 Sa_{v_b} der Rohrinnenoberfläche über die Polierstrecken n_{v_b} für verschiedene Bearbeitungsgeschwindigkeiten v_b ($U = 260$ V). 88
5.9 Sa_{v_b} der Rohrinnenoberfläche über die effektive Polierdauer t_{ept} für verschiedene Bearbeitungsgeschwindigkeiten v_b ($U = 260$ V). 89
5.10 Sa_{ept} der Rohrinnenoberfläche über die effektive Polierdauer t_{ept} bei einer elektrischen Potentialdifferenz von 260 V. 90
5.11 Durchschnittliche arithmetische Oberflächenrauheit Sa_{v_b} der Naht über der effektiven Polierdauer t_{ept} für verschiedene Bearbeitungsgeschwindigkeiten v_b von 0,3 mm s^{-1} bis 4,8 mm s^{-1} bei einer elektrischen Potentialdifferenz U von 260 V. 91
5.12 Mittlere Oberflächenrauheit Sa_{ept} der Naht über der effektiven Polierdauer t_{ept} ($U = 260$ V). 92
5.13 Mittlere Oberflächenrauheit Sa_{ept} der Rohrinnenoberfläche und der Naht sowie die durchschnittliche elektrische Stromstärke I über der effektiven Polierdauer t_{ept} ($U = 260$ V). 92
5.14 Mittlere arithmetische Oberflächenrauheit Sa_{v_b} der Rohrinnenoberfläche über den Polierstrecken n_{v_b} für verschiedene Bearbeitungsgeschwindigkeiten v_b ($U = 320$ V). 94
5.15 Mittlere arithmetische Oberflächenrauheit Sa_{v_b} der Rohrinnenoberfläche über t_{ept} für verschiedene Bearbeitungsgeschwindigkeiten v_b ($U = 320$ V). 95
5.16 Mittlere arithmetische Oberflächenrauheit Sa_{ept} der Rohrinnenoberfläche über t_{ept} ($U = 320$ V). 95
5.18 Durchschnittliche arithmetische Oberflächenrauheiten Sa_{v_b} der Naht über der effektiven Polierdauer t_{ept} für verschiedene Bearbeitungsgeschwindigkeiten v_b bei einer elektrischen Potentialdifferenz von 320 V. 98
5.19 Durchschnittliche arithmetische Oberflächenrauheiten Sa_{ept} der Naht über die effektive Polierdauer t_{ept} bei einer elektrischen Potentialdifferenz von 320 V. . . 98
5.20 Durchschnittliche arithmetische Oberflächenrauheiten Sa_{ept} der Rohrinnenoberfläche und der Naht über der effektiven Polierdauer t_{ept} bei einer elektrischen Potentialdifferenz von 320 V. 99

Symbolverzeichnis

Abkürzungen

AFM	Rasterkraftmikroskop
CLSM	Konfokales Laser Scanning Mikroskop
EP	Elektropolieren
EPP	Elektrolytisches Plasmapolieren
Gew.-%	Gewichtsprozent
H	Hygieneklasse (mechanisch bearbeitet)
HE	Hygieneklasse (elektropoliert)
P	Primärprofil
R	Rauheitsprofil
REM	Rasterelektronenmikroskop
RMS	Root Mean Square (Quadratisches Mittel)
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
W	Welligkeitsprofil
WIG	Wolfram-Inertgasschweißen

Chemische Verbindungen

Cu^{2+}	Kupferionen

Cu	Kupfer
H_2	molekularer Wasserstoff
H_3O^+	Hydroniumionen
Me^{n+}	Metallionen
Me	Metall
Mg^{2+}	Magnesiumionen
Mg	Magnesium
Zn^{2+}	Zinkionen
Zn	Zink
$(NH_4)_2SO_4$	Ammoniumsulfat
$\cdot OH$	Hydroxyl-Radikal
$C_2H_6O_2$	Ethylenglykol
CH_3OH	Methanol
Cu^+	Kupferionen
H_2O	Wasser
H_2SO_4	Schwefelsäure
H_3PO_4	Phosphorsäure
Me_{ad}	Adsorbierte Metallatome
ne^-	Doppelschicht Valenzelektronen
OH^-	Hydroxidionen
EDTA	Ethylendiamintetraessigsäure

NTA	Nitrilotriessigsäure	
PEEK	Polyetheretherketon	
PVC	Polyvinylchlorid	

Griechische Symbole

β	Massenkonzentration	$\mathrm{kg\,l^{-1}}$
$\epsilon_{r(H_2O)}$	Dielektrizitätskonstante für Wasser	$\mathrm{A\,s\,V^{-1}\,m^{-1}}$
λc	Profilfilter, der den Übergang von der Welligkeit zur Rauheit definiert (Grenzwellenlänge)	µm
λf	Profilfilter, der den Übergang von der Welligkeit zu noch längeren Wellenlängen definiert	µm
λs	Profilfilter, der den Übergang von der Rauheit zu Anteilen mit noch kürzeren Wellenlängen definiert	µm
σ	Standardabweichung	µm

Lateinische Symbole

A	Fläche	μm^2
F_c	Coulombsche Kraft	$\mathrm{kg\,m\,s^{-2}}$
f	Frequenz	Hz
G	Glanzgrad	GU
h, h_1, h_2	Materialabtragshöhe	µm
h_{gap}	Spaltbreite des Polierkopfes	mm
I	Elektrische Stromstärke	A
j_A	Passive Auflösungsstromdichte	$\mathrm{A\,cm^{-2}}$
j_P	Elektrische Passivierungsstromdichte	$\mathrm{A\,cm^{-2}}$

j	Elektrische Stromdichte	$\mathrm{A\,cm^{-2}}$
ln	Einzelmessstrecke	µm
n_{v_b}	Anzahl der Polierdurchgänge für unterschiedliche Bearbeitungsgeschwindigkeiten v_b	
n	Anzahl der Polierdurchgänge	
$Q_1,\ Q_2$	Kugelsymmetrisch verteilte Ladungsmengen	$\mathrm{kg\,m^2\,V^{-1}\,s^{-2}}$
Ra	Arithmetischer Mittenrauwert	µm
Rq	Quadratischer Mittenrauwert	µm
Rz	Gemittelte Rautiefe	µm
r	Abstand zwischen den Ladungsträgern	µm
S_1, S_2	Materialabtragsvolumina	$\mu\mathrm{m}^3$
Sa	Arithmetischer Mittenrauwert im 3D-Raum	µm
Sq	Quadratischer Mittenrauwert im 3D-Raum	µm
T_P	Prozesstemperatur des Elektrolyten	°C
T_W	Temperatur des Werkstückes	°C
t_{ept}	Effektive Prozess- bzw. Polierdauer	s
t	Prozess- bzw. Polierdauer	s
U_A	Aktivierungspotential	V
U_D	Transpassives Durchbruchspotential	V
U_P	Passivierungspotential (Flade-Potential)	V
U_R	Ruhepotential	V
U	Elektrische Potentialdifferenz	V

v_1	Abtragsgeschwindigkeit an den Rauheitsspitzen	$\mathrm{mm\,s^{-1}}$
v_2	Abtragsgeschwindigkeit an den Rauheitstälern	$\mathrm{mm\,s^{-1}}$
v_b	Bearbeitungsgeschwindigkeit	$\mathrm{mm\,s^{-1}}$
V	Volumenstrom	$\mathrm{l\,min^{-1}}$

Konstante Variablen

ϵ_0	Dielektrizitätskonstante	$\mathrm{A\,s\,V^{-1}\,m^{-1}}$
$\hbar$	Plancksches Wirkungsquantum	$\mathrm{J\,s}$

1 Einleitung

Technische Oberflächen spielen in vielen Industriebereichen, die sich beispielsweise mit der Produktion von Lebensmitteln, Medizinprodukten oder Pharmazeutika beschäftigen, eine bedeutende Rolle. Verschärfte Standards, unter anderem im Bereich der Hygiene, sorgen für steigende Anforderungen an jene Oberflächen [1]. Dabei gewinnen im Bereich der metallischen Oberflächen neben den technischen Eigenschaften, wie der Linien- oder Oberflächenrauheit, der Korrosions- und Alterungsbeständigkeit, der Härte, dem Reinigungs- und Keimanhaftungsvermögen [2], zunehmend auch die optischen Eigenschaften, wie das dekorative Äußere respektive der Glanzgrad sowie das Reflexionsvermögen, an Bedeutung. Um den wachsenden Ansprüchen an die Produktoberfläche gerecht zu werden und industriell konkurrenzfähig bleiben zu können, werden auch die Fertigungsverfahren stetig verbessert bzw. technologisch innovative Verfahrenstechniken entwickelt. Ein Hauptaugenmerk der unterschiedlichen Bearbeitungstechniken liegt in der Verringerung der Rauheit verschiedener metallischer Materialien, um potenzielle Keim- und Verschmutzungsquellen minimieren zu können. Durch die steigenden Anforderungen und die immer komplexeren Werkstückgeometrien (Bohrungen, Hinterschneidungen, Kanäle ...) sind mechanische Bearbeitungsverfahren zur Verringerung der Rauheit häufig unzweckmäßig, da die Werkstückoberfläche nur mit erhöhtem zeitlichen Aufwand und entsprechend hohen Kosten bearbeitet werden kann.

Unter diesem Aspekt kommen die positiven Eigenschaften der elektrochemisch abtragenden Fertigungsverfahren besonders zum Tragen. In Abhängigkeit von den Anforderungen an die Produkteigenschaften und den zu bearbeitenden Materialien müssen bei diesen Verfahren der Elektrolyt sowie die systemspezifischen Anlagen- bzw. Prozessparameter angepasst werden. Der in der Industrie weit verbreitete Prozess des Elektropolierens (EP) ermöglicht auf einfache Weise das Polieren von metallischen Werkstückoberflächen. Der verwendete Elektrolyt besteht in der Regel aus einem Gemisch von verschiedenen umweltbelastenden Mineralsäuren, wie etwa Phosphor- und Schwefelsäure für die Anwendung bei Edelstahl oder Aluminium sowie Wasser und Alkoholen, die zusätzlich bei Messing oder Kupfer benötigt werden. Eine Alternative zum Elektropolieren ist das elektrolytische Plasmapolieren (EPP) als eine Methode zur Oberflächenbearbeitung. Es kommt zum Einsatz, wenn metallische Werkstücke gereinigt, poliert, entgratet und besonders glatte Oberflächen mit sehr geringen Rauheiten erzeugt werden

sollen. Anders als beim Elektropolieren werden bei diesem Verfahren wässrige Salzlösungen als Elektrolyt verwendet, die eine unbedenkliche Umweltwirkung aufweisen, sodass es als umweltschonende Alternative zum Elektropolieren angesehen werden kann. Auch industriell findet das elektrolytische Plasmapolieren bereits Anwendung und wird hinsichtlich der Materialvielfalt und Anwendungsbereiche stetig weiterentwickelt [3].

1.1 Motivation

Die Anforderungen an technische Oberflächen hinsichtlich der Rauheit, der Gleiteigenschaften bei tribologischen Oberflächen, der Biokompatibilität, des Reinigungsverhaltens und der Korrosionsbeständigkeit des verwendeten Materials sind in zahlreichen Normen definiert. In der Lebensmittelindustrie zum Beispiel müssen produktberührende Oberflächen einen arithmetischen Mittenrauwert $Ra \leq 0{,}8\,\mu m$ aufweisen (siehe DIN EN 1672-2:2009-07 [1, 4]). Die DIN 11866:2016-11 [5] hingegen führt in der Chemie- und Pharmaindustrie sogenannte Hygieneklassen für Rohre aus nichtrostendem (austenitischem) Stahl ein. Es werden hierbei sowohl die Rauheiten für die Innen- als auch für die Außenflächen berücksichtigt. Dabei wird unterschieden zwischen mechanisch bearbeiteten und elektropolierten Werkstückoberflächen. Die Hygieneklasse H5 (mechanisch bearbeitet) bzw. HE5 (elektropoliert) verlangt dabei arithmetische Mittenrauwerte von $Ra \leq 0{,}25\,\mu m$. Industrielle Anwendungen unterliegen einer fortwährenden Dynamik in puncto Innovation und Sauberkeit. Aus diesem Grund kann davon ausgegangen werden, dass in Zukunft nicht nur im Bereich der Hygieneklassen weitere Anpassungen der Standards vorgenommen werden. In der Milchindustrie verwendete Rohre bestehen in der Regel aus Edelstahl und weisen so eine hohe Beständigkeit gegenüber aggressiven Umwelteinflüssen wie beispielsweise Salzwasser auf. Die in diesen Rohren permanent entstehenden Produktablagerungen durch Pasteurisierungsprozesse werden in regelmäßig durchgeführten Reinigungsvorgängen unter Zuhilfenahme von Säuren, Basen und Brüdenkondensaten (bei organischen Verunreinigungen) entfernt, um einen kontinuierlichen Anlagenbetrieb gewährleisten zu können. Diese Reinigungsprozesse werden hinsichtlich einer Zeitoptimierung und der damit einhergehenden Kostenersparnis stetig weiterentwickelt und verbessert. Neben den Reinigungsprozessen wird bei den verwendeten Rohren auch die Oberflächengüte hinsichtlich ihrer Rauheit optimiert, denn je geringer die Rauheit einer solchen Produktoberfläche ist, desto weniger bietet sie eine Angriffsfläche für Verunreinigungen jedweder Güte [2].

Den genannten Herausforderungen müssen sich die Fertigungsverfahren nicht nur in Medizin und Lebensmitteltechnik, sondern auch in vielen anderen Anwendungsbereichen stellen. Es

zeigt sich, dass gerade bei komplexen Freiformflächen die konventionellen Fertigungsverfahren wie das Drehen oder das Fräsen schnell an ihre Grenzen stoßen. Hier kommen die elektrochemisch abtragenden Verfahren zum Einsatz. Die wichtigsten Vertreter sind dabei das Elektropolieren und das im Mittelpunkt dieser Arbeit stehende elektrolytische Plasmapolieren. Die grundlegenden Unterschiede dieser beiden Verfahren liegen im verwendeten Elektrolyten und den Prozessparametern wie der elektrischen Potentialdifferenz oder der Elektrolyttemperatur. Diese und weitere Parameter erfahren genauere Betrachtung im späteren Verlauf dieser Arbeit. Nach dem derzeitigen Stand der Technik können elektrisch leitfähige Rohrinnenoberflächen ausschließlich elektropoliert werden. Wird ein Rohr in einer elektrolytischen Plasmapolieranlage bearbeitet, wirkt das entstehende Plasma prozessbedingt nur an den Außen-, nicht aber an den Rohrinnenoberflächen. Da der elektrolytische Plasmapolierprozess später noch ausführlich dargestellte Vorteile gegenüber dem Elektropolieren aufweist, ist es erstrebenswert, das Anwendungsspektrum des EPP-Verfahrens auf das Polieren von Rohrinnenflächen zu erweitern. Die Entwicklung eines Prozesses zum elektrolytischen Plasmapolieren von Rohrinnenoberflächen mit entsprechender Anlagentechnik und notwendigen Werkzeugen erfordert einen komplett neuen technischen Ansatz, der im Rahmen dieser Arbeit vorgestellt werden soll.

1.2 Aufbau und Zielsetzung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit stellt einen Ansatz zur Erweiterung der Anwendungsbereiche des elektrolytischen Plasmapolierprozesses vor. Zum besseren Verständnis der elektrolytisch oberflächenabtragenden Fertigungsverfahren und den daraus resultierenden Oberflächengüten soll zu Beginn der Begriff Oberfläche grundlegend erläutert werden. Neben einer allgemeinen Definition und Darstellung der Bedeutung einer Oberfläche werden im Anschluss Kenngrößen zur Oberflächencharakterisierung mit entsprechenden Analysemethoden genauer vorgestellt.

Nach einer Beschreibung der Unterteilung aktueller Fertigungsverfahren werden die im Fokus stehenden elektrolytisch abtragenden Fertigungsverfahren detaillierter vorgestellt. Dies beinhaltet die theoretische Beschreibung des elektrolytischen Polierprozesses, wobei speziell das angewandte elektrolytische Plasmapolieren sowie das Elektropolieren als Vergleichsverfahren erläutert werden. Dabei stehen neben dem Prozessablauf und den Vor- und Nachbehandlungen auch die Abtragsmechanismen, die elektrochemischen Reaktionen und die Grenzen des Verfahrens hinsichtlich der erreichbaren Oberflächengüten im Zentrum der Betrachtung. Im Anschluss werden an einigen Einsatzbeispielen die Anwendungsbereiche der elektrolytisch abtragenden Fertigungsverfahren dargelegt.

Ziel dieser Arbeit ist die Neuentwicklung einer Methode zum elektrolytischen Plasmapolieren von Rohrinnenoberflächen. Die dafür notwendige Prototypenanlage wird im Detail beschrieben und ausgehend von den dargelegten Merkmalen des Plasmapolierprozesses werden die systemspezifischen Prozessparameter erläutert. Es wurde ein für den Prozess notwendiger Polierkopf entwickelt, der im Detail erklärt wird. Dieser Polierkopf ermöglicht es, ein Plasma innerhalb des Rohres zünden zu können. Der Laboraufbau ist modular und flexibel ausgelegt, um die Untersuchung eines breiten Spektrums an Prozessparametern gewährleisten zu können.

Der abschließende Teil der Arbeit befasst sich mit der Etablierung eines stabilen Plasmapolierprozesses sowie von optimalen Parametern für das Erreichen minimaler Oberflächenrauheiten. Zu Validierungszwecken werden neben der elektrischen Potentialdifferenz auch die Bearbeitungsgeschwindigkeit, die Spaltbreite des entwickelten Polierkopfes sowie die Anzahl der Polierdurchgänge variiert. Der Fokus liegt dabei auf minimal erreichbaren Oberflächenrauheiten der elektrolytisch plasmapolierten Rohrinnenoberflächen.

2 Stand der Technik

Im folgenden Kapitel werden der Begriff Oberfläche und deren charakteristische Kenngrößen sowie zugehörige Messverfahren erläutert. Im Anschluss werden die im Fokus dieser Arbeit stehenden elektrolytisch oberflächenabtragenden Fertigungsverfahren EP und EPP verglichen und Gemeinsamkeiten sowie Unterschiede aufgezeigt.

2.1 Oberflächen

Die Oberfläche als Grenzfläche zwischen einem metallischen Werkstück und seiner Umwelt gewinnt aufgrund des steigenden Bedarfs an funktionalen Oberflächen mit definierten Eigenschaften zunehmend an Bedeutung. Deshalb werden im folgenden Abschnitt ausgewählte charakteristische Kenngrößen erläutert, die bei metallischen Oberflächen in zahlreichen Anwendungsgebieten von Relevanz sind. Die entscheidende Kenngröße zur Beurteilung der Oberfläche ist der Mittenrauwert. Aufgrund der fehlenden Relevanz werden im Rahmen dieser Arbeit weitere charakteristische Kenngrößen von Rohrinnenoberflächen, wie z. B. die Härte, der Glanzgrad oder der Verschleiß der Oberfläche, nicht weiter erläutert.

2.1.1 Definition und Bedeutung des Begriffes Oberfläche

Der Begriff Oberfläche lässt sich aufgrund der vielseitigen Betrachtungsmöglichkeiten nur schwer einheitlich definieren. Häufig wird der Begriff jedoch verwendet, wenn von der Trennfläche eines Festkörpers als Grenzfläche gegenüber einer flüssigen oder gasförmigen Phase gesprochen wird. Das Wort Phase beschreibt in den Naturwissenschaften einen Bereich, in dem die chemische Zusammensetzung des Stoffes räumlich homogen angeordnet ist. Die auf verschiedene Weisen hergestellten Werkstückoberflächen unterscheiden sich fertigungstechnisch bedingt dabei immer von der geometrischen Idealoberfläche, d. h. es kommt zu Gestaltabweichungen des Istprofils vom Sollprofil infolge der Maschinen- und Werkzeugeinstellungen.

Diese werden nach DIN 4760:1982-06 [6] in sechs verschiedene Ordnungen unterteilt. Dabei überlagern sich die Gestaltabweichungen der ersten bis vierten Ordnung zur Istoberfläche.

Die erste Ordnung berücksichtigt Geradheits- und Ebenheitsabweichungen, die z. B. durch falsches Einspannen des Werkstücks in die Fertigungsmaschine oder durch nachträglichen Härteverzug verursacht werden. Die zweite Ordnung bezieht zusätzlich Wellen mit ein. Diese können durch Schwingungen des Werkzeuges entstehen und werden als Welligkeit bezeichnet. In der dritten Ordnung (Rauheit) werden Abweichungen in Form von Rillen berücksichtigt, die z. B. durch den Vorschub einer Fertigungsmaschine hervorgerufen werden können. Die vierte Ordnung wird in Analogie zur dritten Ordnung auch als Rauheit bezeichnet und berücksichtigt zusätzlich Abweichungen in Form von Riefen. Eine Zusammenfassung aller Ordnungen ist in Tabelle 2.1 aufgezeigt.

Tabelle 2.1: Gesamtübersicht über die Gestaltabweichungen nach [6].

Ordnung	Gestaltabweichung	Art der Abweichung
(1)	Formabweichungen	Ebenheitsabweichung
(2)	Welligkeit	Wellen
(3)	Rauheit	Rillen
(4)	Rauheit	Riefen
(5)	Rauheit	Gefügestruktur
(6)	-	Gitteraufbau

Die Gestaltabweichungen der dritten bis fünften Ordnung bilden ein Maß für die Oberflächengüte eines Werkstückes, die sogenannte Rauheit. In Abbildung 2.1 ist die grafische Überlagerung der ersten vier Ordnungen dargestellt. Die fünfte und sechste Ordnung beziehen sich auf die Gefügestruktur und den Gitteraufbau des Werkstoffes und sind in diesem Maßstab nicht sinnvoll darstellbar.

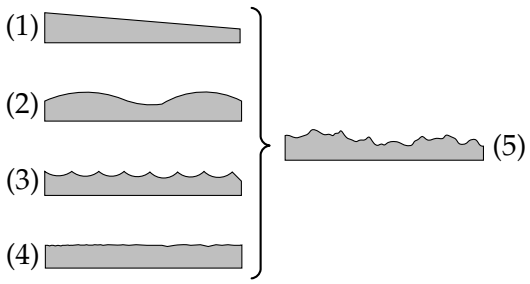


Abbildung 2.1: Darstellung der ersten (1) bis vierten (4) Ordnung der Gestaltabweichungen, welche überlagert die Istoberfläche (5) ergeben [6].

2.1.2 Kenngrößen zur Charakterisierung einer Oberfläche

Die Charakterisierung von Oberflächenkenngrößen durch einen 2D-Profilschnitt mittels Tastschnittverfahren kann als Stand der Technik angesehen werden. Die wichtigsten Profilkenngrößen zur Beschreibung einer Werkstückoberfläche sind in der DIN EN ISO 4287:2010-07 [7] zusammengefasst und definiert. Die Profilkenngrößen werden unterteilt in Kenngrößen, die aus dem Primärprofil (P), dem Rauheitsprofil (R) und dem Welligkeitsprofil (W) berechnet werden. Dabei kommen sogenannte Profilfilter zum Einsatz, die entsprechend ihrer Funktion unterschiedliche Wellenlängenbereiche extrahieren [8, 9].

Der Profilfilter λs reduziert kurze Wellenlängenanteile des tatsächlich gemessenen Profils, die durch den Tastspitzenradius des Messgerätes auftreten können und erzeugt mit Hilfe eines Tiefpassfilters einen definierten Wellenlängenbereich, das sogenannte Primärprofil (P). Wird anschließend auf dieses Primärprofil zusätzlich noch der λf-Profilfilter angewendet, so werden die in Abbildung 2.1 aufgezeigten Formabweichungen erster Ordnung extrahiert, die an das Welligkeitsprofil grenzen und einen noch größeren Wellenlängenanteil aufweisen. Der Profilfilter λc wird dabei auch als Grenzwellenlänge λc bezeichnet. Wird diese Grenzwellenlänge auf das Primärprofil (P) angewendet, so wird dieses in einen kurzwelligen Anteil, das Rauheitsprofil (R), und einen langwelligen Anteil, das Welligkeitsprofil (W), zerlegt. Die Grenzwellenlänge gibt also an, ab wann die Welligkeit einer Oberfläche in die Rauheit bzw. ab wann die Rauheit einer Oberfläche in die Welligkeit übergeht. Die Auswertung der 2D-Profilkenngrößen kann der in Abbildung 2.2 dargestellten Messkette entnommen werden. In Abhängigkeit der gewählten Filter können somit Aussagen über die Rauheits-, Welligkeits- und Primärprofilkenngrößen getroffen werden.

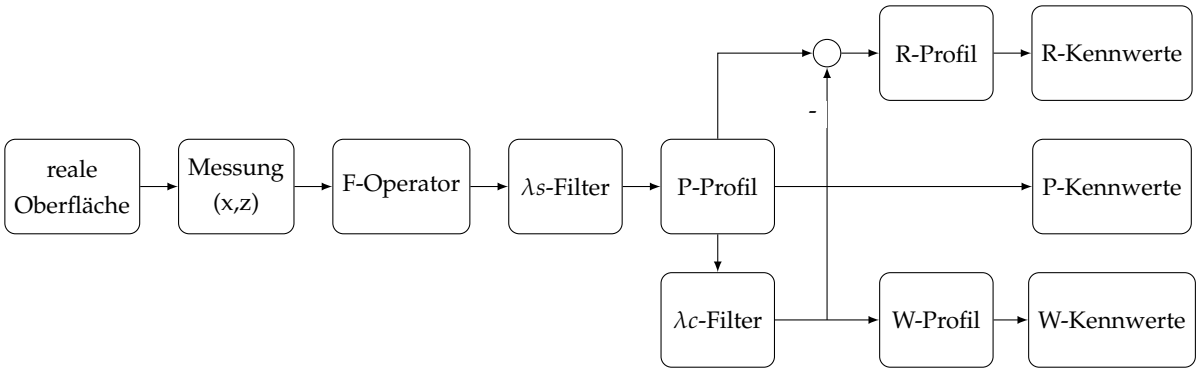


Abbildung 2.2: Messkette für die Ermittlung von 2D-Profilkenngrößen [10].

Nachfolgend werden die wichtigsten Rauheitskenngrößen, wie der arithmetische Mittenrauwert *Ra*, der quadratische Mittenrauwert *Rq* und die gemittelte Rautiefe *Rz*, vorgestellt [11]. Diese drei Rauheitsparameter zählen zu den Amplitudenparametern, durch die Höhenabweichungen eines Profils beschrieben werden können.

Ra - Arithmetischer Mittenrauwert

Der arithmetische Mittenrauwert *Ra* errechnet sich aus den Beträgen aller gemessenen Höhenwerte $z(x)$ innerhalb einer definierten Einzelmessstrecke *ln* und ist in der Industrie ein gängiger Parameter. Gleichung 2.1 zeigt den mathematischen Zusammenhang zur Bestimmung von *Ra*:

$$Ra = \frac{1}{ln} \int_0^{ln} |z(x)|\, dx. \tag{2.1}$$

In Abbildung 2.3 ist qualitativ dargestellt, wie *Ra* aus einer Messkurve ermittelt werden kann.

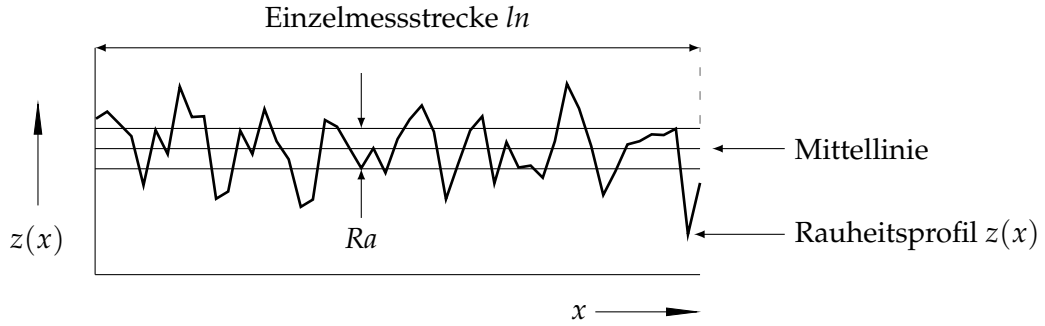


Abbildung 2.3: Grafische Darstellung des arithmetischen Mittenrauwerts *Ra*.

Durch die Mittelwertbildung über die Einzelmesstrecke *ln* reagiert *Ra* nur gering auf einzelne Riefen oder Spitzen im Oberflächenprofil, wodurch es nicht möglich ist, zwischen Riefen und Spitzen zu unterscheiden oder Aussagen zur Oberflächentopologie zu machen. Wie in Abbildung 2.4 zu sehen ist, sind die drei dargestellten Oberflächentopologien stark unterschiedlich ((a) ist eine gehonte, (b) eine gedrehte und (c) eine erodierte Oberfläche). Der arithmetische Mittenrauwert ist jedoch für alle drei Oberflächen nahezu identisch. Die Mittelwertbildung führt dazu, dass beim Auftreten von Störungen in der Oberfläche keine signifikanten Abweichungen des arithmetischen Mittenrauwert *Ra* zu erwarten sind.

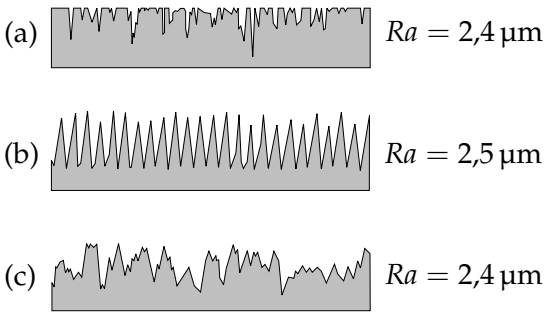


Abbildung 2.4: Grafische Darstellung des gleichen arithmetischen Mittenrauwerts *Ra* für verschiedene zweidimensionale Oberflächentopologien ((a) gehonte Oberfläche (b), gedrehte Oberfläche (c), erodierte Oberfläche) [12].

Rq - Quadratischer Mittenrauwert

Der quadratische Mittenrauwert *Rq* errechnet sich aus der Quadratwurzel aller gemessenen und quadrierten Höhenwerte $z(x)$ innerhalb einer definierten Einzelmessstrecke *ln* und wird durch Gleichung 2.2 beschrieben.

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{ln}\int_0^{ln} z^2(x)\,dx} \tag{2.2}$$

Die Ermittlung von *Rq* aus einer gemessenen Rauheitskurve ist in Abbildung 2.5 dargestellt.

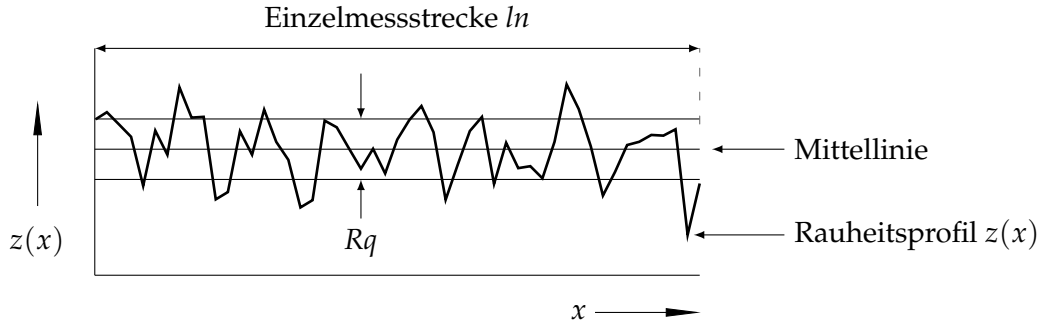


Abbildung 2.5: Grafische Darstellung des quadratischen Mittenrauwerts *Rq*.

Der quadratische Mittenrauwert *Rq* ist identisch mit dem RMS-Wert, dem sogenannten Root-Mean-Square. Anders als bei *Ra* reagiert *Rq* sensitiver auf vorkommende Riefen und Spitzen in der Oberflächentopologie. Weiterhin entspricht der quadratische Mittenrauwert der allgemeinen Standardabweichung σ für die gemessene Profilhöhenverteilung [11].

Rz - Gemittelte Rautiefe (maximale Höhe der Oberflächenkontur)

Als letzter Rauheitswert ist hier die gemittelte Rautiefe genannt und durch Gleichung 2.3 beschrieben.

$$Rz = \frac{1}{5}\sum_{i=1}^{5} z_i \tag{2.3}$$

In Abbildung 2.6 ist die grafische Ermittlung von *Rz* dargestellt. Anders als bei *Ra* und *Rq* wird das gemessene Oberflächenprofil in fünf Abschnitte unterteilt. Jeder Abschnitt hat dabei eine Länge, die der zuvor definierten Grenzwellenlänge λc entspricht. Die gemittelte Rautiefe ergibt sich nun aus den arithmetischen Mitteln aller fünf bestimmten maximalen Höhenwerte z_i.

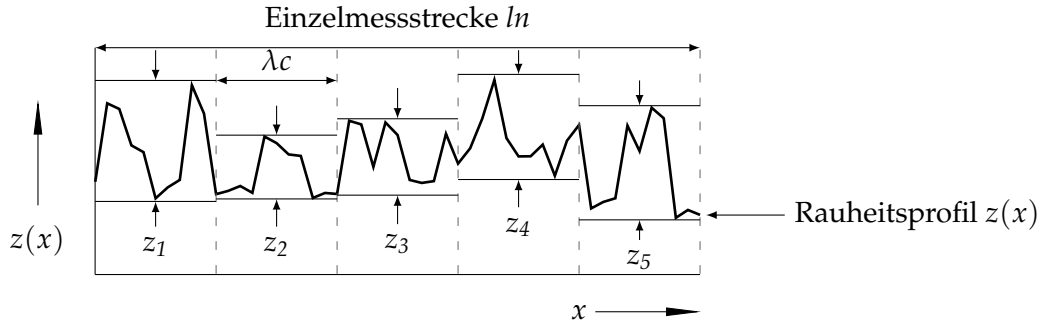


Abbildung 2.6: Grafische Darstellung der ermittelten maximalen Höhenwerte z_i bei einer definierten Grenzwellenlänge λc für die Einzelmessstrecke *ln*.

Weist die Oberflächentopologie des Werkstoffes jedoch lokal ausgeprägte Strukturen auf, so ist der 2D-Profilschnitt mittels eines Tastschnittverfahrens nicht mehr ausreichend, um diese Oberfläche charakterisieren zu können [10]. Solche Oberflächen können z. B. bei der Laserbearbeitung entstehen. Es kommen Messverfahren zur Bestimmung der flächenhaften Profilkenngrößen zum Einsatz, die in der DIN EN ISO 25178-1:2016-12 [13] zusammengefasst wurden. Dies ermöglicht eine flächenmäßige Betrachtung und Charakterisierung technischer Oberflächen. In Analogie zum 2D-Profilschnitt kommen auch bei der 3D-Auswertung verschiedene Filter zum Einsatz die, in Anlehnung an die 2D-Auswertung, vorgestellt und erläutert werden sollen.

Mit Hilfe eines Messgerätes, wie z. B. dem konfokalen Laser-Scanning-Mikroskop (Confocal Laser Scanning Microscope (CLSM)) als optisches Messverfahren zur flächenhaften Rauheitsmessung, wird die Oberfläche Punkt für Punkt abgetastet und quantifiziert. Am Ende entstehen digitale Messdaten der untersuchten realen Oberfläche, die sowohl die Formabweichungen, die Welligkeit als auch die kurzwelligen Abweichungen beinhaltet. Durch Einsatz des sogenannten F-Operators (entfernt die Form) und des S-Filters (reduziert mittels eines Tiefpassfilters

die kurzwelligen Abweichungen) entsteht als resultierende Oberfläche die S-F-Oberfläche. Um die charakteristischen 3D-Oberflächenkenngrößen zu ermitteln, ist es zusätzlich noch notwendig, die Welligkeit und die Formabweichungen aus der S-F-Oberfläche durch einen L-Filter, in Form eines linearen Gaußfilters, zu eliminieren. In Abbildung 2.7 ist die für die 3D-Profilkenngrößen angepasste Messkette dargestellt.

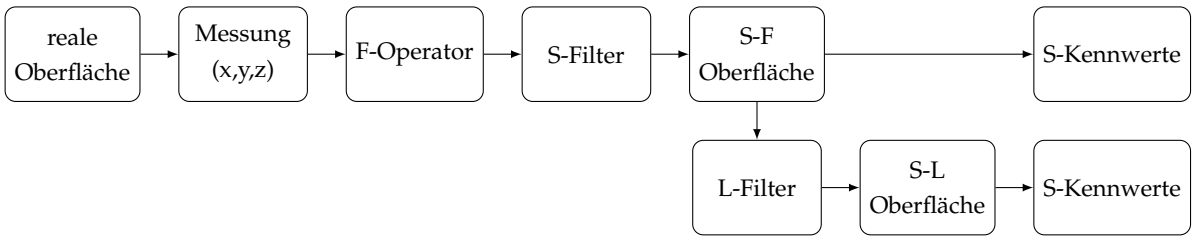


Abbildung 2.7: Messkette für die Ermittlung der 3D-Profilkenngrößen [10, 13].

Nachfolgend werden die 3D-Äquivalente zu den 2D-Profilkenngrößen *Ra* und *Rq* sowie die dazugehörigen Berechnungsgleichungen vorgestellt.

Sa - Mittlere arithmetische Höhe der skalenbegrenzten Oberfläche im 3D-Raum

Sa berechnet sich nach Gleichung 2.4 und kann als Erweiterung des auf eine Fläche A bezogenen Mittenrauwerts *Ra* verstanden werden.

$$Sa = \frac{1}{A} \int_0^{lx} \int_0^{ly} |z(x,y)| \, dx \, dy \qquad \text{mit } A = lxly \tag{2.4}$$

Sq - Mittlere quadratische Höhe der skalenbegrenzten Oberfläche im 3D-Raum

Analog zu *Sa* handelt es sich bei *Sq* um die mittlere quadratische Rauheit, bezogen auf eine Fläche A, die nach Gleichung 2.5 berechnet wird.

$$Sq = \sqrt{\frac{1}{A} \int_0^{lx} \int_0^{ly} z^2(x,y) \, dx \, dy} \qquad \text{mit } A = lxly \tag{2.5}$$

Tabelle 2.2 gibt einen Überblick der 2D- und 3D-Profilkenngrößen. Diese wurden den Normen DIN EN ISO 4287:2010-07 und der DIN EN ISO 25178-1:2016-12 entnommen. Neben den

bereits beschriebenen Amplitudenparametern sind zusätzlich noch funktionale Parameter, Hybridparameter und räumliche Parameter aufgeführt. Amplitudenparameter beschreiben flächenhafte Höhenstrukturen, funktionale Parameter beschreiben die Oberflächenreibung, Hybridparameter beschreiben die Spitzenanzahl pro Fläche. Oberflächenstrukturmuster werden durch räumliche Parameter beschrieben.

Tabelle 2.2: Überblick der 2D- und 3D-Profilkenngrößen unterteilt in Amplitudenparameter, funktionale Parameter, Hybridparameter und räumliche Parameter.

2D-Parameter	3D-Parameter	Bedeutung
Amplitudenparameter:		
Ra	*Sa*	Arithmetischer Mittenrauwert
Rq	*Sq*	Quadratischer Mittenrauwert
Rz	*Sz*	Maximale Höhe der Oberflächenkontur
Rsk	*Ssk*	Schiefe
Rsku	*Ssku*	Kurtosis
Funktionale Parameter:		
Rk	*Sk*	Kernrautiefe
Rpk	*Spk*	Reduzierte Spitzenhöhe
Rvk	*Svk*	Reduzierte Riefentiefe
Mr1	*Smr1*	Materialanteil/Flächenanteil
Mr2	*Smr2*	Materialanteil/Flächenanteil
Vmp	*A1*	Spitzenfläche/Spitzenvolumen
Vvv	*A2*	Riefenfläche/Riefenvolumen
–	*Vmc*	Materialkernvolumen
–	*Vvv*	Materialfreies Kernvolumen
Hybridparameter:		
Rdq	*Sdq*	Mittlere quadratische Oberflächensteigung
–	*Sdr*	Relatives Flächenverhältnis von Istoberfläche zur Messfläche
Räumliche Parameter:		
–	*Sds*	Dichte der Oberflächenspitze
–	*Str*	Textur-Aspekt-Verhältnis
–	*Sal*	horizontaler Abstand der Autokorrelationslänge

2.1.3 Messverfahren zur Charakterisierung von Oberflächen

In diesem Abschnitt werden die notwendigen Messverfahren vorgestellt, um die im vorherigen Kapitel aufgeführten Kenngrößen zur Oberflächencharakterisierung zu ermitteln. Dabei sind Kriterien wie die Messgenauigkeit, Messgeschwindigkeit und Messunsicherheit ausschlaggebend für die Wahl des Messverfahrens. In Abhängigkeit von der Art der Messdatenerfassung kann grundsätzlich zwischen taktilen und optischen Messverfahren unterschieden werden.

2.1.3.1 Taktile Messverfahren

Im Folgenden werden zwei wichtige Vertreter der taktilen Messerverfahren vorgestellt [14]. Dazu gehören das Tastschnittverfahren und die Rasterkraftmikroskopie (Atomic Force Microscope (AFM)). Das Tastschnittverfahren kommt üblicherweise in der Industrie zum Einsatz. Das AFM hingegen wird vornehmlich im wissenschaftlichen Bereich eingesetzt. Neben dem generellen Aufbau wird auch das allgemeine Funktionsprinzip näher erläutert, Auflösungsgrenzen dargestellt sowie Vor- als auch Nachteile des jeweiligen Messverfahrens aufgezeigt.

Tastschnittverfahren

Das Tastschnittverfahren ist eine Methode zur Charakterisierung von Oberflächen, die vornehmlich industriell angewendet wird. Die Auflösungsgrenze dieses Verfahrens liegt im µm-Bereich. Der allgemeine Aufbau eines Tastschnittgerätes kann Abbildung 2.8 entnommen werden.

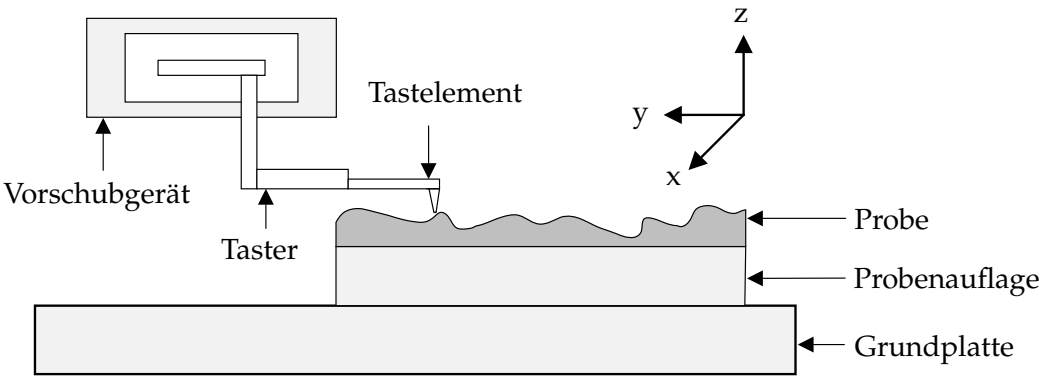


Abbildung 2.8: Schematische Darstellung eines Tastschnittgerätes bestehend aus einer Auflage für die Probe, welche auf einer Grundplatte liegt und einem Vorschubgerät mit einem integrierten Tastelement [15].

Dieses besteht aus einer Grundplatte, einer Probenauflage und einem Vorschubgerät, an dem der Taster mit entsprechendem Tastelement (in der Regel eine Diamantspitze) angebracht ist, sowie der Probe. In der DIN EN ISO 3274:1998-04 [16] ist der allgemeine Aufbau und die Funktionsweise zusammengefasst. Beim Tastschnittverfahren wird die Probenoberfläche von einer Diamantspitze senkrecht zur Rillenrichtung mit konstanter Geschwindigkeit abgetastet. Es wird ein Kegel mit abgerundeter Spitze, einem Radius von 2 µm, 5 µm und 10 µm und einem Kegelwinkel von 60° und 90° als Tastspitze verwendet. In Abhängigkeit vom gewählten Spitzenradius und Kegelwinkel werden Rauheitsspitzen formbedingt abgerundet und Rauheitstäler ausgelassen. Über ein induktives Wegmesssystem wird die vertikale Änderung und somit Auslenkung der Diamantspitze aufgenommen, in ein elektrisches Signal umgewandelt, aufgezeichnet und ausgewertet. Das aufgenommene Primärprofil enthält sowohl den langwelligen Anteil der Welligkeit, den kurzwelligen Anteil der Rauheit als auch den Anteil der Formabweichung. Im weiteren Verlauf kommen die in Abschnitt 2.1.2 aufgeführten Filter zur Anwendung, mittels derer Aussagen über die Primärprofil-, die Welligkeitsprofil- und die Rauheitsprofilkenngrößen gemacht werden können. Nach ist DIN EN ISO 4288:1998-04 [17] ist die Grenzwellenlänge λc entsprechend der zu erwartenden Rauheitswerte anzupassen.

Rasterkraftmikroskop

Das Rasterkraftmikroskop wurde von Binnig, Quate und Gerber entwickelt [18] und ist eine zeitgemäße Methode, um quantitative Informationen der abgetasteten topographischen Oberflächenprofile auf Mikro- und Nanometerskala zu erhalten. Der Aufbau eines Rasterkraftmikroskops ist in Abbildung 2.9 dargestellt.

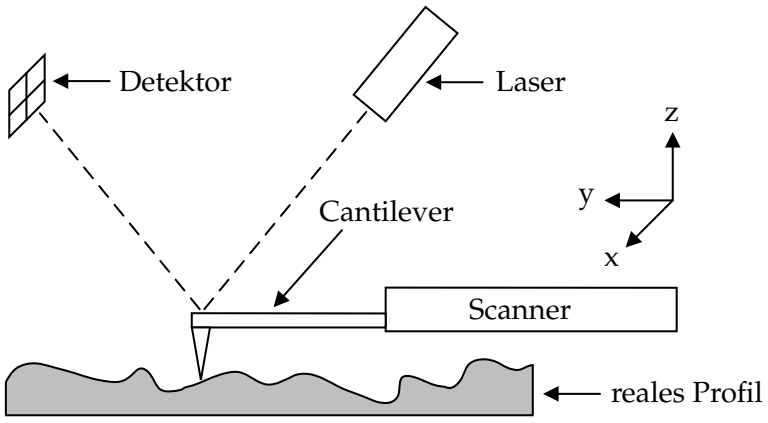


Abbildung 2.9: Schematische Darstellung eines Rasterkraftmikroskops bestehend aus einem Scanner, an dem der Cantilever befestigt wird, sowie einem Laser und einem Detektor [19].

Wie in Abbildung 2.9 dargestellt, besteht das Rasterkraftmikroskop aus Scanner, Cantilever, Laser und einem Detektor. Der Cantilever ist an dem piezoelektrischen Scanner befestigt, der in alle Raumrichtungen ausgelenkt werden kann. Dabei wird grundlegend unterschieden zwischen einer sich bewegenden Oberflächentopologie und einem festen Scanner oder umgekehrt. Der Cantilever besteht aus einem Rumpf, einer Blattfeder mit bekannter Federkonstante und einer Spitze, die durch standardisierte Lithographie- und Ätztechniken hergestellt wird. Die Spitze weist einen Krümmungsradius von 5 nm bis 20 nm auf und wird auf die Blattfeder montiert. Die Breite eines solchen Cantilever variiert dabei von 0,2 µm bis 0,3 µm bei einer Länge von 100 µm bis 300 µm. Während der Punkt-für-Punkt-Abtastung der Topologie mit einer Scanrate von 0,5 Hz bis 2 Hz wird jede Veränderung der Spitzenposition, die durch repulsive und attraktive Kräfte zwischen der Spitze und der Probenoberfläche auftritt, durch den vom Cantilever reflektierten Laserstrahl auf den Vier-Quadranten-Detektor registriert und ausgewertet [20]. Die ermittelten Rauheitskenngrößen liegen im Gegensatz zum Tastschnittverfahren im Nanometerbereich.

Sowohl beim Tastschnitt- als auch beim AFM-Verfahren werden Spitzen mit unterschiedlichen Krümmungsradien verwendet, wodurch es während der Messung zu systematischen Fehlern kommt. Durch die Wahl einer geeigneten Spitze können diese systematischen Fehler reduziert werden. Gemessen wird nicht die reale Probenoberfläche sondern eine Faltung der Spitzen- mit der Probengeometrie (siehe Abbildung 2.10).

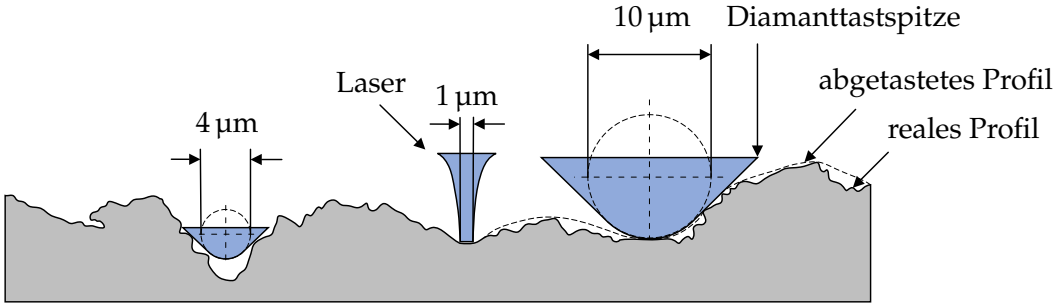


Abbildung 2.10: Abtastung einer realen Oberfläche am Beispiel von zwei taktilen und einem optischen Messverfahren. Es ist erkennbar, dass nicht die tatsächliche Form der Oberfläche abgebildet wird, sondern eine Faltung der jeweiligen Spitzen- oder Lasergeometrie mit der untersuchten Probengeometrie erfolgt [15].

Ein Vorteil der taktilen Messverfahren ist, dass alle festen Oberflächen, unabhängig von der Art des Materials und der Farbe, ausgemessen und analysiert werden können. Werden jedoch Messungen an weichem Material durchgeführt, können diese Oberflächen durch die jeweilige Messspitze zerkratzt oder sogar zerstört werden.

2.1.3.2 Optische Messverfahren

In Anlehnung an den Abschnitt der taktilen Messverfahren werden im folgenden Unterabschnitt Aufbau und Funktionsweise von zwei optischen Messverfahren erläutert. Dazu zählen zum einen das Rasterelektronenmikroskop (REM) und zum anderen das konfokale Laser Scanning Mikroskop.

Rasterelektronenmikroskop

Das REM wurde von Ardenne entwickelt, patentiert [21] und erste theoretische Grundlagen publiziert [22]. Aufbau und Funktionsweise eines Rasterelektronenmikroskops sind in Abbildung 2.11 grafisch dargestellt.

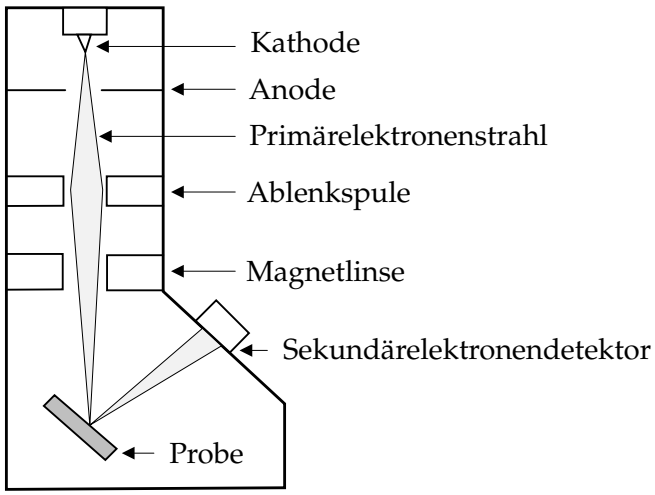


Abbildung 2.11: Schematischer Aufbau eines Rasterelektronenmikroskops.

Durch Anlegen eines elektrischen Potentials wird der an der Kathode befindliche Wolframdraht erhitzt und Elektronen emittiert. Durch die an die Anode angelegte Beschleunigungsspannung von einigen kV und dem daraus resultierenden elektrischen Feld werden die emittierten Elektronen beschleunigt und es entsteht ein Primärelektronenstrahl. Mit Hilfe von Ablenkspulen kann der Elektronenstrahl, welcher durch die Elektronenlinse nochmals gebündelt wird, auf die Oberfläche fokussiert werden und diese punktweise abgetastet werden. Es entstehen an jedem Punkt der Probenoberfläche durch verschiedene Wechselwirkungen der Elektronen unter anderem Röntgenstrahlung, absorbierte Elektronen, Rückstreuelektronen und Sekundärelektronen, die durch geeignete Elektronendetektoren erfasst werden. Aus diesen Informationen können Rückschlüsse auf die Oberflächenbeschaffenheit gezogen werden. In Abhängigkeit

von der gewählten Beschleunigungsspannung liegt das Auflösungsvermögen bei weniger als 10 nm bei 50 kV [23].

Konfokales Laser-Scanning-Mikroskop

Die konfokale Laser-Scanning-Mikroskopie ist heute ein gängiges Verfahren, um Oberflächentopologien im nm-Bereich zu charakterisieren. Erstmals wurde ein Prototyp eines CLSM von Davidovits und Egger konstruiert und erste Ergebnisse in den Jahren 1969 und 1971 veröffentlicht [24, 25]. Weiterführende Arbeiten sind durch Masters entstanden [26]. In Abbildung 2.12 ist das Funktionsprinzip eines CLSM grafisch dargestellt.

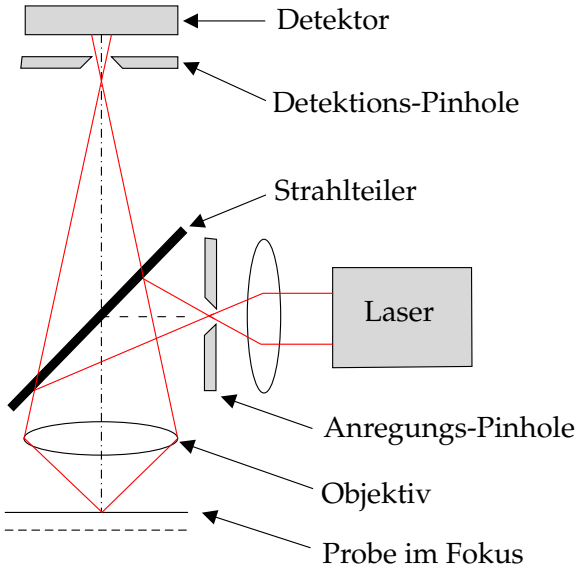


Abbildung 2.12: Funktionsprinzips eines konfokalen Laser-Scanning-Mikroskops anhand des Strahlenverlaufes.

Bei dem CLSM kommt als Lichtquelle ein Laser zum Einsatz. Dieser erzeugt einen polarisierten, kollimierten Laserstrahl, der in x-und y-Richtung abgelenkt wird und die Fokusebene abtastet. Dieser Laserstrahl trifft auf einen Strahlteiler, der das Anregungslicht reflektiert und das zu detektierende Licht durchlässt. Über einen beweglichen Spiegel wird der reflektierte Strahlanteil durch das Mikroskopobjektiv auf die Oberfläche fokussiert. Das von der Fokusebene reflektierte langwelligere Licht durchläuft den Strahlteiler und wird durch das Detektionspinhole auf den Detektor abgebildet und ausgewertet. Durch Änderung der Fokusebene und erneutes Abtasten ist eine 3D-Darstellung der Oberfläche möglich.

2.2 Fertigungsverfahren

Bereits seit Jahrtausenden beschäftigen sich Menschen mit diversen Fertigungstechniken, um Oberflächen aus verschiedensten Materialien wie Holz, Stein und Metall und deren spezifische Eigenschaften anzupassen. Alle Verfahren zur Herstellung von geometrisch bestimmten festen Werkstücken werden in der Fertigungstechnik als Fertigungsverfahren bezeichnet [27–30]. Das Spanen oder Zerspanen mit geometrisch bestimmter und unbestimmter Schneide zählt zu den wichtigsten Fertigungsverfahren. Diese Verfahren stoßen jedoch durch geometrisch immer komplexer werdende Werkstücke in Form von Hinterschneidungen oder gegossenen Kanälen und steigenden Anforderungen an die Werkstückqualität und Oberfläche an ihre Grenzen. Dies liegt zum einen in den verwendeten Werkzeugen begründet und zum anderen in der Zugänglichkeit dieser zum Werkstück. Bedingt durch diesen Umstand gewinnen bei geometrisch komplexen Werkstücken die elektrochemisch oberflächenabtragenden Fertigungsverfahren immer mehr an Bedeutung und sollen im Folgenden genauer erläutert werden.

Eine genaue Unterteilung der Fertigungsverfahren erfolgt durch die Normen DIN 8580:2003-09 [31], DIN 8589:2003-09 [32] und DIN 8590:2003-09 und soll im folgenden Kapitel erläutert werden. Grundlegend werden ausgewählte mechanische Fertigungsverfahren wie das Trennen oder Polieren und der Einfluss diverser Bearbeitungsparameter näher erläutert. Hauptaugenmerk liegt aber bei den elektrochemisch oberflächenabtragenden Fertigungsverfahren wie dem Elektropolieren und dem elektrolytischen Plasmapolieren, welches im Mittelpunkt dieser Arbeit steht. Im weiteren Verlauf werden neben dem allgemeinen Prozess auch die verschiedenen materialabhängigen Elektrolyten, etablierte Fertigungsabläufe, ablaufende elektrochemische Reaktionen, die typische Stromdichte-Potential-Kurve sowie die Theorie zum Materialabtrag während des Polierprozesses näher erläutert. Dabei sollen die Unterschiede und Grenzen beider Verfahren dargestellt werden. Zum Abschluss wird erläutert, warum nach dem derzeitigen Stand der Technik keine Rohre elektrolytisch plasmapoliert werden können, und es werden die Vor- und Nachteile des EPP gegenüber dem EP dargelegt.

2.2.1 Unterteilung der Fertigungsverfahren

Die verschiedenen Fertigungsverfahren werden nach den Normen DIN 8580:2003-09 und DIN 8590:2003-09 hinsichtlich der gemeinsamen Verfahrensprinzipien in sechs Hauptgruppen eingeteilt. Während beim Urformen (Druckgießen, Modellieren ...) ein Stoffzusammenhalt geschaffen wird, wird dieser beim Umformen (Tiefziehen, Fließpressen ...) beibehalten, beim Trennen (Fräsen, Bohren ...) vermindert und beim Fügen (Kleben, Löten) und Beschichten (Galvanisieren ...) vermehrt. Fertigungsverfahren, welche die Eigenschaften eines Werkstückes

verändern, wie z. B. Härten, zählen zur Kategorie Stoffeigenschaften ändern. Diese Hauptgruppen wiederum werden in weitere Untergruppen unterteilt. Das wichtigste Merkmal der einzelnen Hauptgruppe ist dabei die Art des Stoffzusammenhalts. Abbildung 2.13 zeigt anhand eines Blockdiagramms die Unterteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8590:2003-09. Die grau unterlegten Blöcke zeigen den Pfad von den allgemeinen Fertigungsverfahren bis hin zu den in dieser Arbeit untersuchten elektrochemisch oberflächenabtragenden Fertigungsverfahren.

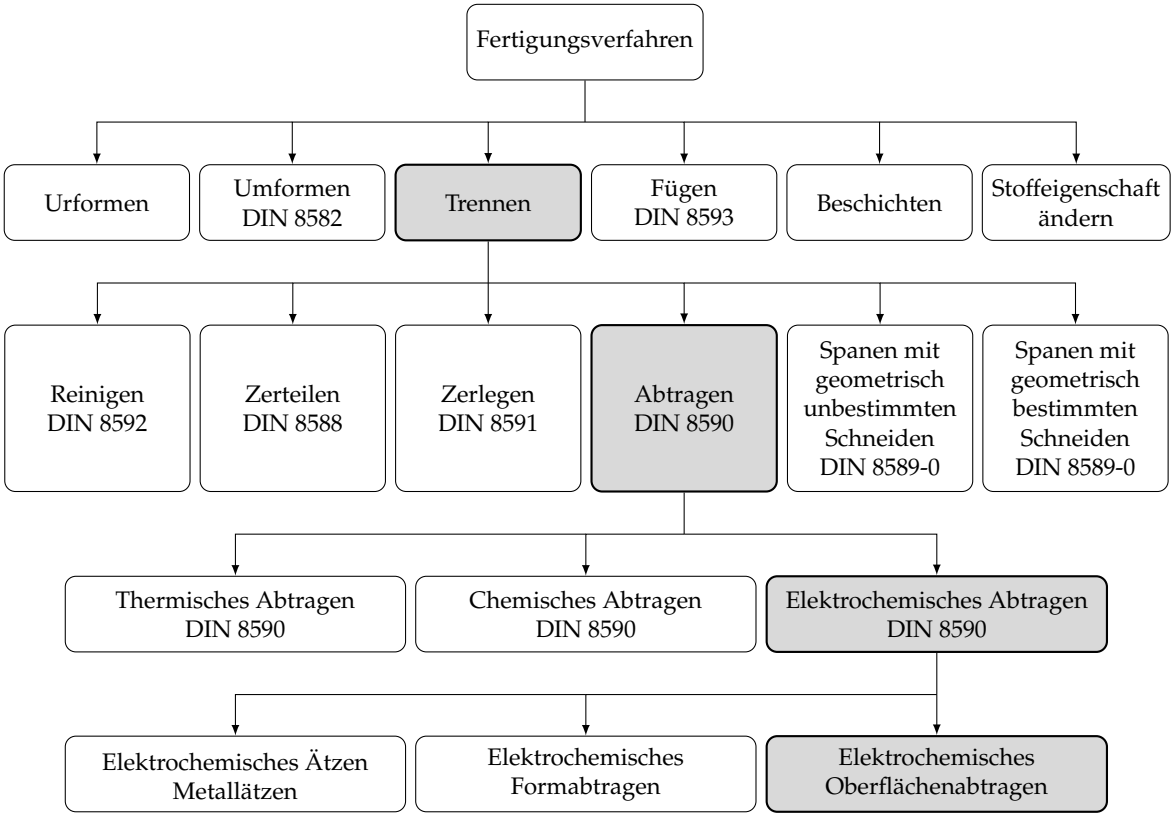


Abbildung 2.13: Unterteilung der Fertigungsverfahren nach [31]. Die grau unterlegten Blöcke zeigen den Weg von den allgemeinen Fertigungsverfahren hin zu den elektrochemisch oberflächenabtragenden Fertigungsverfahren.

Die VDI-Richtlinie 3401:2009-01 [33] unterteilt die elektrochemisch oberflächenabtragenden Fertigungsverfahren hinsichtlich anlagen- bzw. verfahrenstechnischer Gesichtspunkte. Dabei stehen unter anderem Prozesse im Mittelpunkt, bei denen eine äußere Stromquelle verwendet wird (elektrochemisches Schleifen) oder aber lediglich Chemikalien zum Einsatz kommen (Ätzentgraten oder Tiefätzen). Beim Prozess des elektrolytischen Plasmapolierens finden chemische und physikalische Prozesse statt, die zu einem Materialabtrag an der Oberfläche des Werkstückes führen. Das elektrolytische Plasmapolieren ist in Analogie zum Elektropolieren

den elektrochemisch oberflächenabtragenden Fertigungsverfahren und somit der Hauptgruppe Trennen zuzuordnen.

Die Wahl des Fertigungsverfahrens hat dabei maßgeblichen Einfluss auf die zu erwartenden arithmetischen Mittenrauwerte *Ra* und *Sa* und somit auf die Güte der Werkstückoberfläche. Die Rauheit gilt als Maß für die Oberflächengüte und wurde in DIN 4768:1990-05 [34] zusammengefasst und genormt. Eine Auswahl an erreichbaren arithmetischen Mittenrauwerten *Ra* (siehe Kapitel 2.1.1 zur genauen Erläuterung des Begriffes Oberfläche und Kapitel 2.1.2 zur Charakterisierung der Oberflächenkenngrößen) für verschiedene Fertigungsverfahren, die den entsprechenden Hauptgruppen zugeordnet werden, sind in Abbildung 2.14 auszugsweise dargestellt.

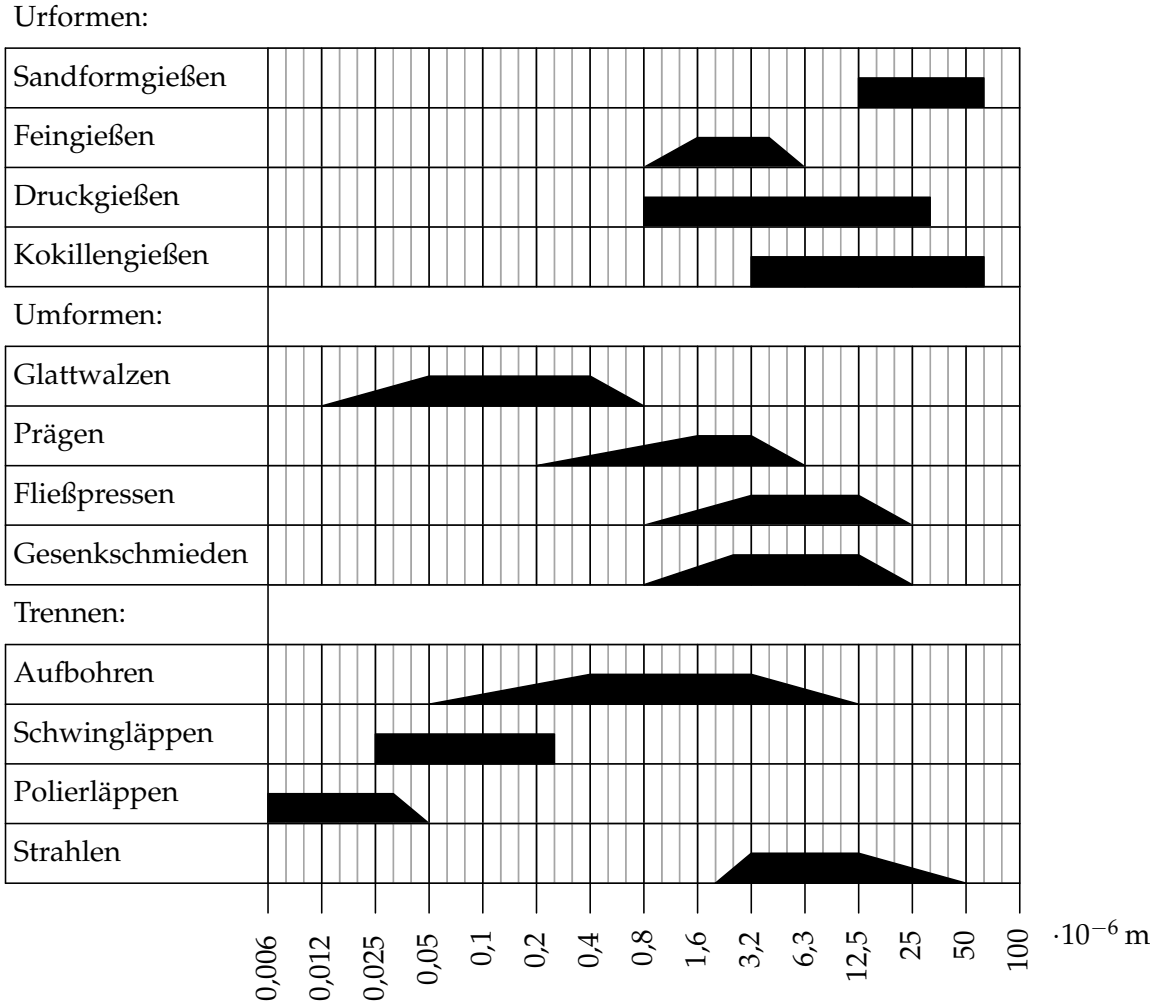


Abbildung 2.14: Arithmetische Mittenrauwerte *Ra* für ausgewählte Hauptgruppen der in Abbildung 2.13 dargestellten Fertigungsverfahren mit je vier Beispielen [34].

Für die elektrochemisch oberflächenabtragenden Fertigungsverfahren existiert nach dem derzeitigen Stand keine Norm, in der erreichbare arithmetische Mittenrauwerte *Ra* zusammengefasst wurden.

2.2.2 Fertigungsverfahren Trennen

Nachfolgend soll die Unterteilung des Fertigungsverfahrens Trennen genauer erläutert werden. Wie Abbildung 2.13 aufzeigt, ist das Trennen, bei dem die Form des zu bearbeitenden Werkstückes geändert wird, eine Hauptgruppe der Fertigungsverfahren. Dabei wird der Zusammenhalt örtlich aufgehoben, d. h. Material wird bzw. Teilchen des Ausgangsmaterials werden entfernt, um das Endprodukt herzustellen. Das Fertigungsverfahren Trennen wird laut DIN 8590:2003-09 unterteilt in die folgenden sechs Untergruppen:

Reinigen: Nach DIN 8592:2003-09 [35] wird die Untergruppe eingeteilt nach den entsprechenden physikalischen Wirkprinzipien. Dabei wird unter anderem unterschieden zwischen Lösemittelreinigen (Abbeizen), chemischem Reinigen (Beizen, Ablaugen), thermischen Reinigen (Abdampfen, Abflammen) und dem Reinigungsstrahlen (Dampfstrahlen).

Zerteilen: Wie der Name impliziert, werden bei zerteilenden Verfahren Werkstoffe teilweise oder vollständig in zwei oder mehrere Teile getrennt. Laut DIN 8588:2013-08 [36] wird dabei zwischen dem Spalten, Brechen und Reißen unterschieden.

Zerlegen: Nach DIN 8591:2003-09 [37] wird das Zerlegen allgemein beschrieben als das Teilen definierter Formen und beinhaltet unter anderem das Entleeren, Ablöten und Lösen von Klebeverbindungen.

Abtragen: Beim Abtragen über einen thermischen, chemischen oder elektrochemischem Abtragsprozess wird Material von dem Werkstück abgetrennt. Nach DIN 8590:2003-09 [38] zählen dazu unter anderem die Laserstrahlbearbeitung sowie das chemische und elektrochemische Ätzen. In diese Untergruppe, genaugenommen in das elektrochemische Abtragen bzw. der dazugehörigen Untergruppe, dem elektrochemischen Oberflächenabtragen (siehe grau unterlegte Blöcke in Abbildung 2.13), sind das Elektropolieren sowie das elektrolytische Plasmapolieren einzuordnen, das im Mittelpunkt dieser Arbeit steht.

Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide: Nach DIN 8589-0:2003-09 [32] sind diesem unter anderem das Drehen, Fräsen und Sägen zuzuordnen.

Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide: Nach DIN 8589-0:2003-09 sind diesem unter anderem das Hohnen, Läppen sowie Bandschleifen zuzuordnen.

2.3 Fertigungsverfahren zur Nachbehandlung metallischer Oberflächen

Einige Fertigungsverfahren werden zur Nachbehandlung der Werkstückoberfläche genutzt, um hinsichtlich der Rauheit bestmögliche Oberflächengüten zu erzeugen. In diesem Abschnitt werden die Prozesse des Polierens, darunter das mechanische (Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide), optische (thermisches Abtragen), chemische und elektrochemische Polieren (elektrochemisches Oberflächenabtragen), genauer betrachtet. All diese Verfahren sind jedoch Teil unterschiedlicher Fertigungsverfahren. Dabei wird besonderes Augenmerk auf die im Zentrum dieser Arbeit stehenden elektrochemischen Prozesse wie das Elektropolieren und das elektrolytische Plasmapolieren (die Teil der elektrochemisch oberflächenabtragenden Fertigungsverfahren sind) gelegt.

2.3.1 Mechanisches Polieren

Das mechanische Polieren (maschinell oder manuell) zählt nach DIN 8589-0:2003-09 zu den spanenden Fertigungsverfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide. Dieses Verfahren besteht in der Regel aus einem mehrstufigen Schleif-, Reinigungs- und Polierprozess mit wechselnden Werkzeugen. Dabei kommen verschiedene Poliermittelträger wie z. B. Polierscheiben, Polierbürsten oder Polierbänder mit unterschiedlicher Körnung sowie Poliermitteln als Festpaste oder als Suspension zum Einsatz. Diese Poliermittel bestehen in der Regel aus einem Abrasivmedium, wie z. B. Mineralien, und einem Träger, der dafür sorgt, dass die Mineralien an dem Poliermittelträger haften und die auftretende Reibungswärme abgeführt werden kann. Ja nach Anwendungsgebiet besteht das Poliermittel z. B. aus Tonerde, Korund, Chrom-, Kalzium- oder Aluminiumoxid. In Abhängigkeit von den zu erreichenden Oberflächengüten können die Poliermittel angepasst und grundlegend unterteilt werden in weiche und harte Trägermaterialien sowie grob- und feinkörnige Abrasivmedien.

Während des mechanischen Polierens kommt es zur Interaktion zwischen dem Poliermittelträger, dem Poliermittel und der Werkstückoberfläche. Hinsichtlich der Abtragsmechanismen wird unterschieden zwischen der Abtragshypothese, der Fließhypothese und der chemischen Hypothese. Bei der Abtragshypothese wird der Materialabtrag aus der weicheren Werkstückoberfläche durch härtere Poliermittel erreicht. Die Fließhypothese hingegen berücksichtigt auch den Fall, dass das Poliermittel weicher als die zu polierende Oberfläche sein kann. Der Materialabtrag ergibt sich durch den aufgebrachten Druck und die gleichzeitige Relativbewegung

zwischen dem Poliermittelträger und dem Werkstück sowie der dabei umgesetzten Wärmemenge. Während des Bearbeitungsprozesses können vereinzelt Temperaturspitzen auftreten, die zu einem Aufschmelzen des Materials führen. Dieses geschmolzene Material gelangt in die möglichen Rauheitstäler, wo es im Anschluss abkühlt und Oberflächen mit geringeren Mittenrauwerten erzeugt.

Folgt man der chemischen Hypothese stehen üblicherweise Korrosionsvorgänge zwischen dem Poliermittel (in der Regel ein wasserbasiertes Medium) und der Werkstückoberfläche im Mittelpunkt der Materialabtragsmechanismen. Die Relativbewegung während des Polierens gewährleistet, dass das abrasive Material von der Werkstückoberfläche abtransportiert wird. [28]

2.3.2 Optisches Polieren

Weitere Verfahren zur Veredlung von Oberflächen stellen die optischen Polierverfahren da. Der bekannteste Vertreter dieses Bereiches ist das automatisierte Laserpolieren. Dabei wird hinsichtlich der Oberflächengüte grundlegend unterschieden zwischen dem Makro- und dem Mikropolieren [39]. Beim Makropolieren wird mit Hilfe kontinuierlicher Laserstrahlung mit einem definierten Strahldurchmesser, die auf die Werkstückoberfläche fokussiert wird, soviel Energie eingebracht, dass lediglich eine dünne Randschicht aufgeschmolzen und somit kein Material abtragen wird. In dieser Phase wird das Material auf Grund der Grenzflächenspannung von den Profilspitzen in die Profiltäler verteilt, wo es anschließend erstarrt und zu einer deutlichen Glättung der Oberfläche führt [40–42]. Das Makropolieren findet besonders bei Fräs- oder Drehteilen Anwendung, die Oberflächentiefen von bis zu 80 µm aufweisen und durch das Verfahren geglättet werden können. Dabei können Rauheiten von $Ra \leq 0{,}1$ µm bei Ausgangsrauheiten $Ra = 1$ µm bis 5 µm bei einer Bearbeitungszeit von circa $1\,\mathrm{min\,cm^{-2}}$ erzielt werden [43].

Im Gegensatz dazu wird die Oberfläche beim Mikropolieren durch einen gepulsten Betrieb des Lasers nur wenige Mikrometer tief aufgeschmolzen. Die Strukturen mit größeren Mittenrauwerten, die beim Makropolieren beseitigt werden, bleiben beim Mikropolieren unbeeinflusst. Während des Prozesses wird der Glanzgrad deutlich verbessert und es kommt zu einer Reduzierung der Rauheit durch Beseitigung der Mikrorauheiten, was mit Hilfe des quadratischen Mittenrauwertes Rq gezeigt werden kann. Das Mikropolieren kommt unter anderem in der Medizintechnik bei Oberflächen aus Titan (TiAl6V4) zur Anwendung. Dabei können Rauheiten von $Ra \leq 0{,}08$ µm bei Ausgangsrauheiten $Ra = 0{,}3$ µm bis 0,5 µm bei einer Bearbeitungszeit von circa $0{,}1\,\mathrm{min\,cm^{-2}}$ erzielt werden [43]. Wie beim mechanischen Polieren müssen auch

beim Laserpolieren, in Abhängigkeit vom gewählten Material und der angestrebten Oberflächengüten, die Prozessparameter wie die Laserleistung, der Laserstrahldurchmesser, der Einstrahlwinkel und die Vorschubgeschwindigkeit angepasst und mehrstufige Prozessabläufe durchgeführt werden. Neben metallischen Werkstückoberflächen können auch Thermoplaste und Gläser (z. B. Quarzglas [44]) bearbeitet werden.

2.3.3 Chemisches Polieren

Das Verfahren Ätzen wird nach DIN 8590:2003-09 dem chemischen Abtragen und nach der VDI-Richtlinie 3401:2009-01 dem elektrochemischen Abtragen ohne äußere Stromquelle zugeordnet und wie folgt unterteilt:

- Nassätzen:
  - Auflösen,
  - chemisches Ätzen,
  - elektrochemisches Ätzen,
- Trockenätzen:
  - physikalisches Trockenätzen,
  - chemisches Trockenätzen,
  - chemisch-physikalisches Trockenätzen.

Im Allgemeinen wird unter Ätzen das Abtragen von anorganischen oder organischen Materialien durch chemische Medien (Ätzflüssigkeiten) mit entsprechend ätzender Wirkung, wie z. B. starken Säuren (Salpeter-, Salz-, Schwefelsäure ...) oder Basen (Natron-, Seifenlauge ...) aber auch Lösungen aus Wasser und verschiedenen Alkoholen, verstanden [45]. Dabei sind nicht nur die Art des Mediums sondern auch die Konzentration sowie die Prozesstemperatur von Bedeutung. Mit Hilfe von Abdecklack oder Ätzgrund können Teile der zu bearbeitenden Oberfläche geschützt werden. Dazu wird die gesamte Werkstückoberfläche mit dem Abdecklack überzogen, welcher anschließend wieder partiell entfernt. Im Anschluss kann die ungeschützte Oberfläche weggeätzt oder gezielt Vertiefungen im einstelligen µm-Bereich erzeugt werden.

Industriell wird das Ätzverfahren unter anderem in der Elektrotechnik angewendet. In der Halbleitertechnik z. B. wird durch Sputtern oder physikalische Gasphasenabscheidung eine Metallschicht aus Kupfer auf ein Halbleitersubstrat aufgebracht. Über Ätzprozesse wird auf diese Art Material abgetragen und Leiterbahnen erzeugt.

2.3.4 Elektrochemisches Polieren (elektrochemisches Abtragen)

Das EP zählt laut DIN 8590:2003-09 zu den elektrochemisch oberflächenabtragenden Fertigungsverfahren. Aufgrund der sehr großen Ähnlichkeit kann außer dem EP-Verfahren auch das EPP dieser Verfahrensgruppe zugerechnet werden. Der Aufbau eines elektrochemischen Polierprozesses soll im Folgenden grundlegend erläutert werden.

Tabelle 2.3: Komponenten des in Abbildung 2.15 dargestellten Aufbaus einer Anlage zum elektrochemischen Polieren (Elektrolysezelle).

Nummer	Komponenten
(1)	Elektrolytbecken (Kathode)
(2)	aktives Medium
(3)	Werkstück (Anode)
(4)	Elektrolyt
(5)	Gleichspannungsquelle

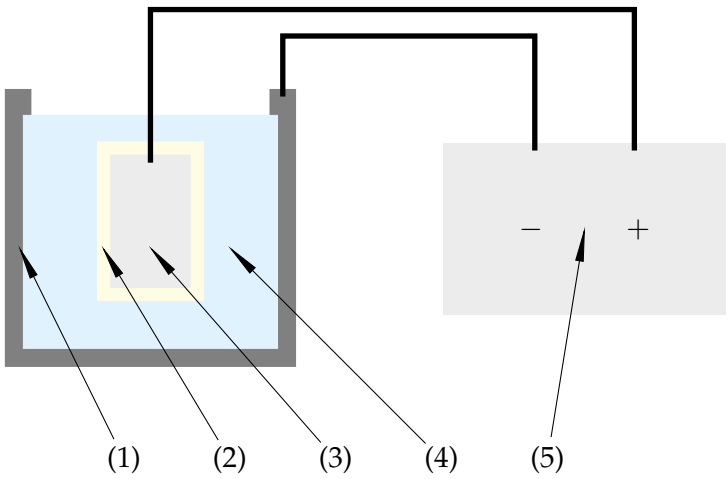


Abbildung 2.15: Schematische Darstellung einer Anlage zum elektrochemischen Polieren.

Eine wie in Abbildung 2.15 dargestellte Anlage besteht im Regelfall aus einem Becken (1) (Kathode) mit einem entsprechenden werkstoffspezifischen Elektrolyten (4), in welchem sich ein Werkstück (3) (Anode) befindet. Durch das Anlegen eines elektrischen Potentials U zwischen dem Werkstück und dem Becken bzw. einer entsprechend kontaktierten Elektrode im Elektrolytbecken wird bei niedrigen Stromdichten j von 0,04 A cm^{-2} bis 3,0 A cm^{-2} ein aktives Medium erzeugt und infolgedessen Material abgetragen. Dieser Prozess wird als Elektrolyse bezeichnet.

Elektrolyt

Im Allgemeinen wird unter einem Elektrolyten eine chemische Verbindung verstanden, die aus Ionen besteht. Wird die chemische Verbindung in Wasser gelöst, so gehen Ionen in Lösung über, was als sogenannte elektrolytische Dissoziation bezeichnet wird. Dabei gilt das Coulombsche Gesetz, d. h. die Coulombsche Kraftwirkung F bzw. die elektrischen Bindungskräfte zwischen den Ionen werden durch die Wassermoleküle stark verringert und können durch die Gleichung 2.6 beschrieben werden:

$$F_c = \frac{1}{\epsilon_0 \epsilon_{r(H_2O)}} \cdot \frac{Q_1 Q_2}{4\pi r^2}. \tag{2.6}$$

Dabei ist $\epsilon_0 = 8{,}8542 \cdot 10^{-12}\,\mathrm{F\,m^{-1}}$ die Dielektrizitätskonstante im Vakuum, $\epsilon_{r(H_2O)} = 81{,}5$ die Dielektrizitätskonstante für Wasser, Q_1 und Q_2 sind die Ladungsmengen und r der entsprechende Abstand zwischen diesen Ladungen.

Die Hauptaufgabe des Elektrolyten besteht darin, einen Ladungsträgertransport zu ermöglichen. Es werden jedoch noch weitere Anforderungen an die Elektrolytlösung gestellt, die in der VDI 3401:2009-01 zusammengefasst sind:

- geringe Korrosionswirkung auf die Polieranlage,
- hohe chemische Stabilität,
- physiologische Neutralität (Arbeitsschutz, Umweltschutz ...) und
- Kosteneffektivität.

Abhängig von dem Werkstoffmaterial kommen verschiedene Elektrolytlösungen zum Einsatz. Die Leitfähigkeit des Elektrolyten ist ein entscheidender Parameter bei der Elektrolyse und ist abhängig von:

- der Temperatur und Konzentration des Elektrolyten,
- der Wasserstoffentwicklung an der Kathode,
- der Art der Abtragsprodukte und
- der Zusammensetzung des Elektrolyten,

die im folgenden Abschnitt auszugsweise erläutert werden.

2.4 Elektrochemisch oberflächenabtragende Fertigungsverfahren

Im folgenden Abschnitt wird auf die beiden elektrochemisch abtragenden Fertigungsverfahren, das elektrolytische Plasmapolieren und das Elektropolieren, genauer eingegangen. Dabei werden Fertigungsabläufe, d. h. alle notwendigen Schritten vom Entfetten der Werkstückoberfläche vor dem Polieren bis hin zum Spülen und Trocknen nach dem Polieren (Kapitel 2.4.1 und 2.4.2), die charakteristischen Abtragsmechanismen, die spezifischen Prozessparameter und gängige Anwendungsgebiete ausführlich dargestellt.

2.4.1 Elektropolieren

Der Prozess des Elektropolierens von metallischen Oberflächen (Zink, Cadmium und Silber) wurde Anfang des 20. Jahrhunderts von Spitalsky untersucht und zum Patent angemeldet [46]. Weiterführende systematische Untersuchungen zum Thema Elektropolieren an Kupfer wurden später von Figour [47] und von Jacquet [48] in den 1930er Jahren veröffentlicht. Während des Prozesses kam es zur typischen Gasentwicklung sowie zu einer Erhöhung der Elektrolyttemperatur, die Jacquet dokumentierte. Des Weiteren konnte er zeigen, dass nach dem Polieren in einer Elektrolytlösung aus Mineralsäuren, Wasser und Alkoholen die zuvor noch vorhandenen Grate und Riefen komplett entfernt werden konnten und dass das Verfahren deutlich schneller und ökonomischer war als das bisherige Polieren mit Aluminium. Im Verlauf seiner Arbeit konnte er ebenfalls nachweisen, dass mit Hilfe des Verfahrens neben Kupfer weitere Metalle, wie z. B. Aluminium, Blei, Eisen und auch nichtrostender Stahl, bearbeitet werden können [49]. 1968 meldete Gillwald das „Bad und Verfahren zum anodischen Glänzen von Metallen und Metalllegierungen“zum Patent an [50].

1987 fasste Landolt [51] die wesentlichen Aspekte des Elektropolierens zusammen und versuchte die elektrochemischen Mechanismen, die der Glättung im Makro- und Mikrobereich zugrunde liegen, zu charakterisieren. Er stellte fest, dass die Glättung im Makrobereich maßgeblich durch das angelegte elektrische Potential und die Konzentration des verwendeten Elektrolyten bestimmt wird. Weiterführende Arbeiten wurden von Gerlach [52] und Buhlert [53–55] durchführt.

Der Prozess wurde hierbei systematisch analysiert und verschiedene Materialien, wie z. B. Titan, Aluminium, Edelstahl, Magnesium und Messing, elektropoliert. So konnten u. a. Aussagen über den Einfluss der Elektrolytzusammensetzung auf die Oberflächengüte gemacht werden. Neben dem Elektrolyten wurden auch Prozess- bzw. Bearbeitungsparameter, wie die

Lage des Werkstückes, die Elektrolyttemperatur und die Polierdauer, variiert. Die Oberflächen der Proben wurden hinsichtlich der Linienrauheit und des Glanzgrades ausgewertet und Aussagen zum Materialabtrag gemacht. Buhlert konnte zeigen, dass für den Edelstahl 1.4301 ein optimaler Glanzgrad ab einer Wirkstromdichte von mehr als 20 A dm^{-2} und einer Elektrolyttemperatur von 55 °C erreicht wird. Neben den Prozessparametern gibt es auch äußere Parameter (die Stromdichteverteilung, die Strömungsgeschwindigkeit des Elektrolyten ...) und Werkstoffparameter (die Gefügestruktur, die Zusammensetzung und Passivierbarkeit des gewählten Werkstoffes ...), die einen maßgeblichen Einfluss auf die Oberflächengüte elektropolierter Werkstücke haben. Abschließend wurde der Prozess und die Funktionsweise des Elektropolierens in verschiedenen Normen wie z. B. DIN 3769:1997-05 [56] und DIN 65230:1988-12 [57] zusammengefasst.

2.4.1.1 Elektrolyt EP

Im folgenden Abschnitt werden zwei ausgewählte Elektrolyte vorgestellt, die beim Elektropolieren von metallischen Werkstückoberflächen aus Kupfer und Edelstahl in der industriellen Praxis zum Einsatz kommen. In Abhängigkeit von der gewählten Legierung ist häufig eine Anpassung des Elektrolyten sowie der Prozessparameter notwendig, um gleichbleibende Oberflächengüten zu gewährleisten. Es gibt weitere Elektrolyt-Material-Kombinationen, die für die folgenden Betrachtungen jedoch nicht relevant sind.

Edelstahlelektrolyt

Der Elektrolyt für den Edelstahl 1.4301 setzt sich wie folgt zusammen [2, 54]:

- 45 % bis 55 % Phosphorsäure (H_3PO_4),
- 14 % bis 35 % Schwefelsäure (H_2SO_4),
- 20 % bis 31 % Wasser (H_2O).

Kupferelektrolyt

Als Elektrolyten zur Kupferbearbeitung hat sich folgende Zusammensetzung bewährt [58]:

- 55 % Phosphorsäure (H_3PO_4),
- verschiedene Additive:

- 0,79 g ml^{-1} Methanol (CH_3OH),
- 1,11 g ml^{-1} Ethylenglykol ($C_2H_6O_2$).

Diese Elektrolytzusammensetzung wurde von Awad [2, 58] gewählt, um Proben aus Edelstahl und Kupfer zu polieren. In Abhängigkeit vom gewählten Material wird die Konzentration der verwendeten Säure im Elektrolyten angepasst. Dabei standen die mittlere Linienrauheit *Ra* sowie der Glanzgrad *G* im Mittelpunkt seiner Betrachtung. Weiterführend wurden auf den polierten Edelstahlproben Biofilmuntersuchungen durchgeführt und ausgewertet. Buhlert [54] verwendete z. B. den Elektrolyten zum Elektropolieren von Aluminium, den Awad genutzt hat, um den Edelstahl 1.4301 zu bearbeiten.

2.4.1.2 Fertigungsablauf

Im Allgemeinen gibt es für Fertigungsverfahren sogenannte Fertigungsablaufpläne bzw. Materialflüsse, die alle Prozessschritte des jeweiligen Fertigungsverfahrens enthalten. Im folgenden Abschnitt wird ein etablierter Fertigungsablaufplan für das Elektropolieren erläutert (siehe Abbildung 2.16). Dies ermöglicht so einen Vergleich mit dem elektrolytischen Plasmapolieren.

Grundvoraussetzung für das Elektropolieren ist, dass die gesamte zu bearbeitende Werkstückoberfläche elektrisch leitfähig ist. Daher müssen alle Verunreinigungen in Form von Rost, Ölen, Fetten oder Farbrückständen vor Beginn des Prozesses restlos entfernt werden, um ein gleichmäßiges Polierergebnis zu gewährleisten. In der Regel erfolgt die Reinigung unter anderem in Lösungsmitteln, in wässrigen Seifenlösungen aber auch in Laugen, wobei die Wahl abhängig von der Art der Verunreinigung ist. Dabei ist darauf zu achten, dass keine Reste des Reinigungsmittels in den Elektrolyten gelangen. Dies kann durch einen weiteren Spülvorgang gewährleistet werden.

Ist die Oberfläche des Werkstückes, z. B. durch störende Passivschichten, nicht elektrisch leitend, kommen chemisch oder elektrochemisch abtragende Verfahren wie das Beizen oder Ätzen zum Einsatz, um diese Schichten vor Prozessbeginn abzutragen. Dabei wird erneut darauf geachtet, dass keine Restlösungsmittel in den Elektrolyten gelangen bzw. es kommen Lösungen zum Einsatz, die in Art und Zusammensetzung dem Elektrolyten ähneln, wodurch eine zusätzliche Reinigung überflüssig wird. Sind die zu polierenden Werkstückoberflächen hingegen ungleichmäßig oder zu rau, wird auf mechanische Vorbehandlungsprozesse zurückgegriffen. Beim mechanischen Polieren (Kapitel 2.3.1) ist darauf zu achten, dass die verwendeten abrasiven Medien wieder komplett, notfalls über einen separaten Reinigungsschritt, entfernt werden. Auch der Elektrolyt muss in regelmäßigen Abständen ersetzt, teilweise getauscht oder

aufgefüllt werden, da während des Polierens ein Teil des Elektrolyten durch den Energieeintrag verdampft sowie durch die prozessbedingte Gasblasenbildung entweicht. Des Weiteren kommt es zu Materialabscheidungen in Form von Ionen, welche ins Medium gelangen und die Prozessstabilität beeinflussen.

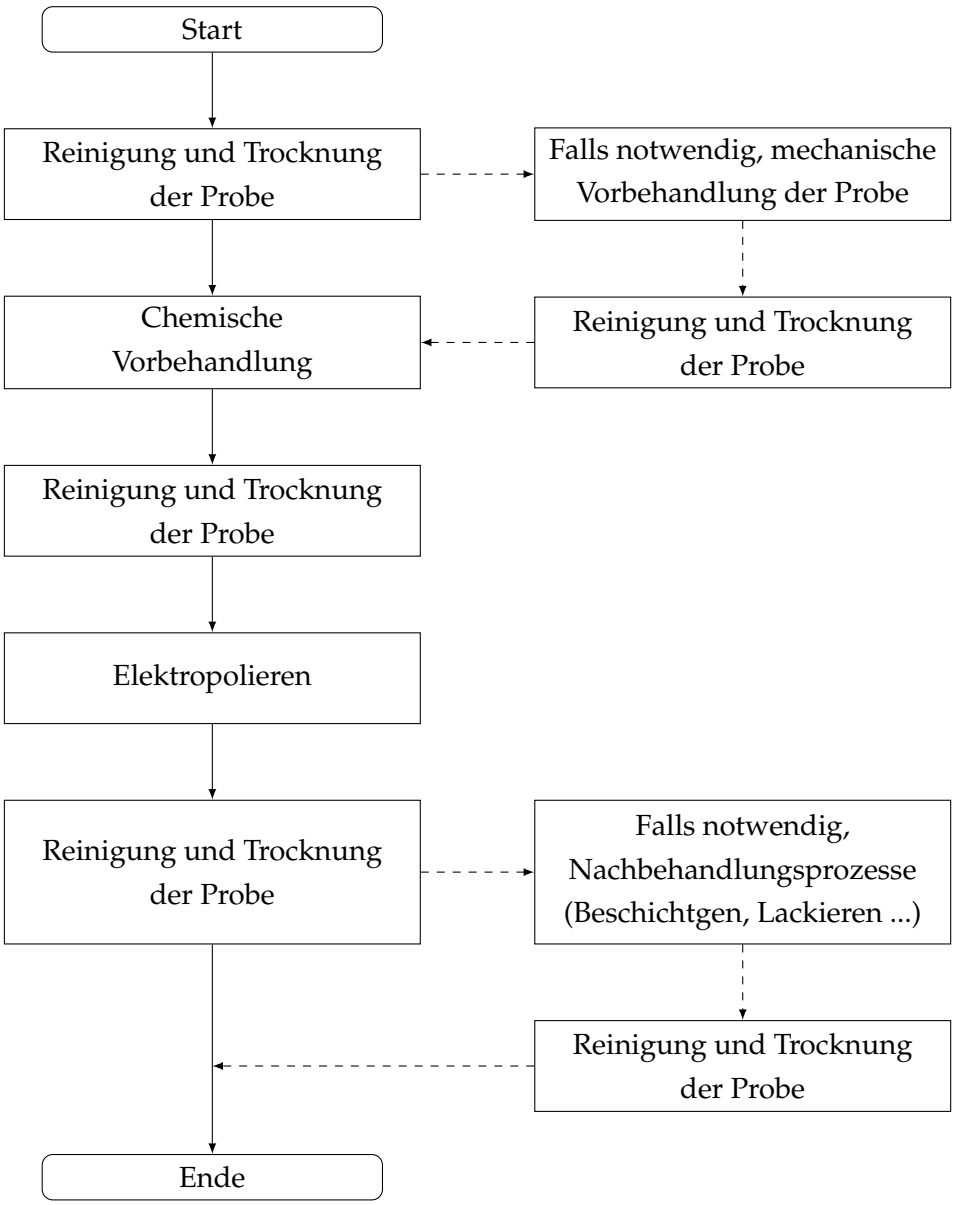


Abbildung 2.16: Etablierter Fertigungsablaufplan für das Elektropolieren von metallischen Oberflächen [55].

Nach Abschluss der eventuell notwendigen chemischen bzw. mechanischen Vorbehandlungen mit anschließender Reinigung der Oberfläche sowie Vorbereitung des Elektrolyten wird das Werkstück in der Regel stromlos in das Elektrolytbecken gefahren und im Anschluss elektropoliert. Nur wenn der Elektrolyt das zu polierende Material im spannungslosen Zustand bereits anätzt, wird das elektrische Potential bei Eintritt des Werkstücks in das Elektrolytbecken zugeschaltet. Während des Prozesses kommt es bedingt durch den Energieeintrag zu einer Erhöhung der Elektrolyttemperatur. Für die Prozessstabilität und somit gleichbleibende Polierergebnisse hinsichtlich der Oberflächenrauheit ist, auf Grund der Ionenbeweglichkeit, die Elektrolyttemperatur ein entscheidender Parameter. Somit muss während des Polierens der Elektrolyt gekühlt oder vor Beginn auf die dem Material entsprechend notwendige Prozesstemperatur erwärmt und so lange poliert werden, bis das geforderte Fertigungsergebnis erreicht wurde.

Nach dem Elektropolieren wird das Werkstück entnommen und Reste des Elektrolyten, der stromlos weiterhin mit der Oberfläche reagieren kann, entfernt. Dies geschieht häufig in einem mehrstufigen Reinigungsprozess, einer sogenannten Spülkaskade. So kann sichergestellt werden, dass keine Ionen auf der Werkstückoberfläche verbleiben, die nachträglich zu einer Korrosion führen könnten.

2.4.1.3 Ablaufende elektrochemische Reaktionen beim Elektropolieren

Zum besseren Verständnis der elektrochemisch abtragenden Fertigungsverfahren sollen im folgenden Abschnitt grundlegende Begriffe der Elektrochemie wie die Anoden- und die Kathodenreaktion mit der prozessbedingten Sauerstoff- und Wasserstoffbildung sowie die klassische Metallauflösung, die sowohl beim Elektropolieren als auch beim elektrolytischen Plasmapolieren auftreten, beschrieben werden. Diese grundlegenden Reaktionen sind in Abhängigkeit von dem zu bearbeitenden Ausgangsmaterial unterschiedlich stark ausgeprägt und abhängig von der gewählten Elektrolytzusammensetzung und den Elektrolytparametern, wie der Temperatur und dem pH-Wert, sowie den systemspezifischen Anlagenparametern, wie zum Beispiel dem elektrischen Potential, der daraus resultierenden Stromdichte und der effektiven Prozess- bzw. Polierdauer t_{ept}.

Metallauflösung (Anode)

An der Anode laufen diverse chemische Wirkmechanismen ab, wie z. B. die Metallauflösung. Der Prozess beschreibt den Übergang der Atome vom festen Metallzustand in den gelösten

bzw. hydratisierten Zustand eines Metallions. Es wird generell zwischen der aktiven und der passiven bzw. transpassiven Metallauflösung [59] unterschieden.

Aktive und passive Metallauflösung (Anode)

Die Reaktionsmechanismen umfassen dabei mehrere Zwischenschritte. Allgemein kann die Reaktionsgleichung vereinfacht wie folgt dargestellt werden:

$$\mathrm{Me} \longrightarrow \mathrm{Me}^{n+} + \mathrm{ne}^{-}. \tag{2.7}$$

In Abbildung 2.17 sind die verschiedenen Zwischenschritten der klassischen Metallauflösung schematisch dargestellt.

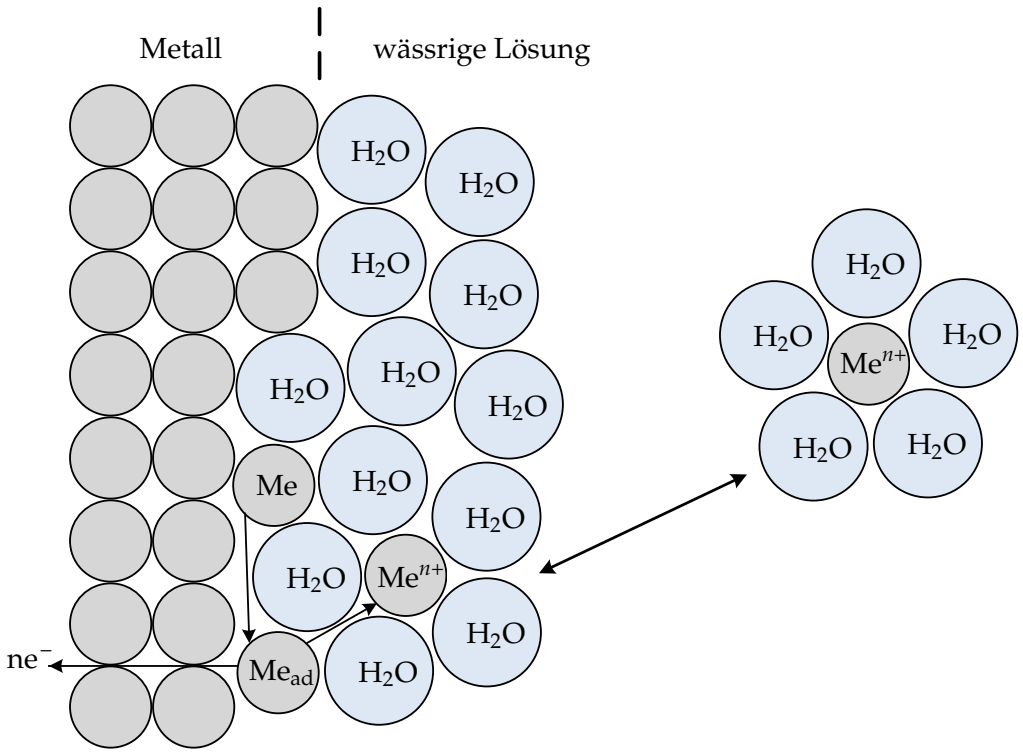


Abbildung 2.17: Schematische Darstellung des Metallauflösungsprozesses, d. h. Darstellung des Übergangs des Atoms von der Gitterstruktur zum hydratisierten Metallion [60].

Die an die Metalloberflächen grenzenden Gitteratome Me sind seitlich beweglich und werden in adsorbierte Atome $\mathrm{Me}_{\mathrm{ad}}$ umgewandelt. Diese adsorbierten Atome geben, in Abhängigkeit der Oxidationsstufen, bei Durchtritt durch die Doppelschicht Valenzelektronen ne^{-} in

einer oder mehreren Zwischenstufen ab und es entstehen Metallionen Me^{n+} (Reaktionsgleichung 2.7). So dissoziiert Kupfer beim Elektropolieren unter Verwendung eines Elektrolyten aus Phosphorsäure, Alkohol und Wasser zu Cu^{+}. Unter Abgabe von insgesamt zwei Elektronen entsteht Cu^{2+} (Reaktionsgleichung 2.8).

$$Cu \longrightarrow Cu^{2+} + 2\,e^{-} \tag{2.8}$$

Zink und Magnesium verhalten sich beim Elektropolieren wie Kupfer und gehen zweiwertig in Lösung (Reaktionsgleichung 2.9 und 2.10).

$$Zn \longrightarrow Zn^{2+} + 2\,e^{-} \tag{2.9}$$

$$Mg \longrightarrow Mg^{2+} + 2\,e^{-} \tag{2.10}$$

Im weiteren Verlauf werden die Metallionen durch Mechanismen wie Konvektion und Diffusion weiter ins Elektrolytinnere transportiert. Dort werden sie vollständig von Wassermolekülen umgeben und liegen in hydratisierter Form $Me^{n+}_{hydr.}$ vor. Der gesamte Ablauf der aktiven Metallauflösung nach Abbildung 2.17 lässt sich schematisch wie folgt darstellen:

$$Me \longrightarrow \underbrace{Me_{ad}}_{\text{adsorbierte Metallatom}}, \tag{2.11}$$

$$Me_{ad} \longrightarrow Me^{n+} + ne^{-}, \tag{2.12}$$

$$Me^{n+} \longrightarrow \underbrace{Me^{n+}_{hydr.}}_{\text{hydratisiertes Metallion}}. \tag{2.13}$$

Bei Metallen mit einer Passivierungsschicht hingegen wird von einer passiven bzw. transpassiven Metallauflösung gesprochen. Diese Passivierungsschicht wird während der Metallauflösung zerstört. Hinsichtlich der ablaufenden Reaktionsmechanismen gibt es nur wenige Theorien in der Literatur zu finden. Einen Überblick zu dieser Thematik geben Datta [61], Landolt [51] und Lohrengel [62].

Sauerstoffentwicklung (Anode)

Beim Elektropolieren von metallischen Oberflächen, die über eine Oxid- und somit eine Passivierungsschicht verfügen, kommt es zur prozessbedingten Sauerstoffentwicklung [63]. Grundvoraussetzung ist, dass die Passivierungsschicht eine gewisse elektrische Leitfähigkeit aufweist. Die gesamten Wirkmechanismen sind abhängig von den elektrochemischen Gegebenheiten und Gegenstand aktueller wissenschaftlicher Untersuchungen. Nach Buhlert [53] sind beim Elektropolieren mit hochkonzentrierten Elektrolyten die Hydroxidionen

OH^- und die unter Abgabe eines Elektrons entstehenden reaktionsfreudigen $\cdot OH$-Radikale (Reaktionsgleichung 2.14) maßgeblich für die Sauerstoffentstehung verantwortlich (Reaktionsgleichung 2.15).

$$4\,OH^- \longleftrightarrow 4 \cdot OH + 4\,e^- \tag{2.14}$$

$$4 \cdot OH \longleftrightarrow O_2 \uparrow + 2\,H_2O \tag{2.15}$$

Der Sauerstoff, der sich während des Elektropolierens bildet, wird durch den Elektrolyten aufgenommen bis eine vollständige Sättigung eintritt. Ab diesem Zeitpunkt bilden sich Gasblasen, die im Elektrolyten aufsteigen. Die dabei entstehenden Gasbahnen haben laut Buhlert einen maßgeblichen Einfluss auf die Oberflächengüte, da diese den Prozess des Materialabtrags stören können [54].

Metallabscheidung (Kathode)

Der Mechanismus der Metallabscheidung läuft grundsätzlich in entgegengesetzter Reaktionsrichtung zur Metallauflösung ab (Reaktionsgleichung 2.16).

$$Me^{n+} + e^- \longleftrightarrow Me \tag{2.16}$$

Entsprechend ihrer Wertigkeit nehmen die im Elektrolyten gelösten Metallionen Elektronen auf und werden an der Kathode abgeschieden.

Wasserstoffbildung (Kathode)

Maßgeblich für die Entstehung von molekularem Wasserstoff H_2 sind die beim Elektropolieren zum Einsatz kommenden Elektrolyten aus Mineralsäuren. Dabei entstehen die sogenannten Hydroniumionen H_3O^+ durch Bindung eines Protons der Mineralsäure an eines der freien Elektronenpaare des Sauerstoffs im Wassermolekül (Reaktionsgleichung 2.17).

$$2\,H_3O^+ + 2\,e^- \longleftrightarrow 2\,H_2O + H_2 \tag{2.17}$$

Diese Hydroniumionen bilden während des Prozesses unter Aufnahme von Elektronen Wasser und Wasserstoff.

2.4.1.4 Verfahrensbeschreibung nach der Stromdichte-Potential-Kurve

Beim Elektropolieren erfolgt der Materialabtrag an der Oberfläche infolge eines Ladungsträgeraustausches zwischen dem Elektrolyten und dem anodisch gepolten Werkstück. Die Wirkungsweise des Elektropolierens kann unter Zuhilfenahme der idealisierten Stromdichte-Potential-Kurve nachvollzogen werden (Abbildung 2.18). [64, 65]

Tabelle 2.4: Bereichsunterteilung der charakteristischen Stromdichte-Potential-Kurve beim Elektropolieren (Abbildung 2.18).

Bereich	Bedeutung
(1)	Bereich des aktiven Zustands
(2)	Bereich des passiven Zustands
(3)	Bereich des transpassiven Zustands
(4)	Bereich, in dem es zur Wasserstoffentwicklung kommt
(5)	Bereich, in dem es zur Sauerstoffentwicklung kommt
(a)	Bereich anodischer Stromdichte
(b)	Bereich kathodischer Stromdichte

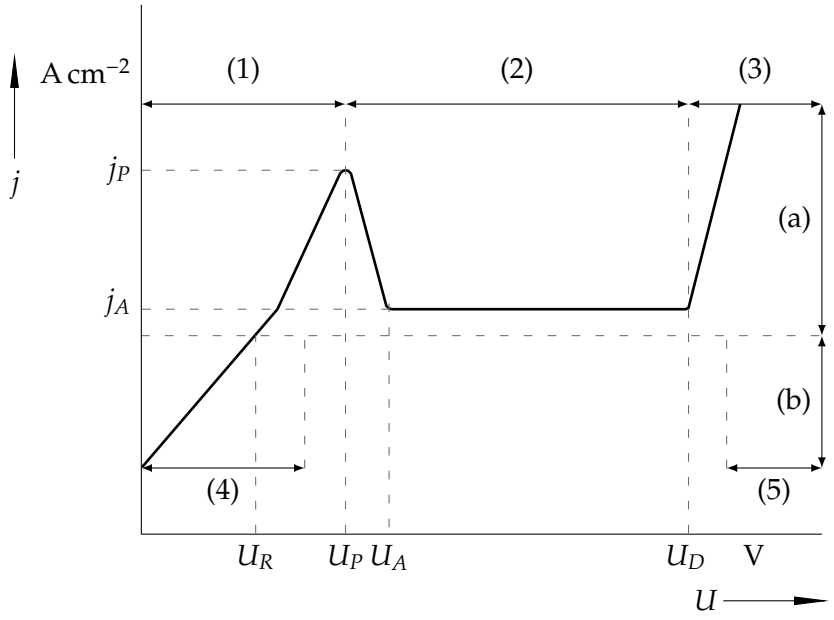


Abbildung 2.18: Idealisierte Stromdichte-Potential-Kurve beim Elektropolieren mit der Passivierungsstromdichte j_P, der passiven Auflösungsstromdichte j_A, dem Ruhepotential U_R, dem Passivierungspotential U_P (Flade-Potential), dem Aktivierungspotential U_A und dem transpassiven Durchbruchpotential U_D [65].

Im Folgenden werden die in Tabelle 2.4 aufgezählten Bereiche genauer erläutert [54, 64, 65]:

Bereich (1): Im aktiven Zustand steigt die elektrische Stromdichte j bis zum Erreichen der elektrischen Passivierungsstromdichte j_P stark an. Mit ansteigendem Potential, d. h. vom Ruhepotential U_R bis zum Erreichen des Passivierungspotentials U_P, wird die anodisch gepolte Metalloberfläche aktiv angeätzt und es kommt zur typischen Metallauflösung (Korrosion). Die in diesem Bereich erzeugte Oberfläche erscheint durch Bildung einer porösen Deckschicht als matt.

Bereich (2): Übersteigt das Potential U das Passivierungspotential U_P fällt die Stromdichte j durch die beginnende Bildung einer porenfreien oxidischen Deckschicht, der sogenannten Passivschicht, ab. Dabei kommt es an der Anode, bedingt durch den Einsatz von viskosen hochkonzentrierten Mineralsäuren als Elektrolyt, zur Ausbildung einer Diffusionsschicht. Die Materialabtragsraten in diesem Bereich sind dabei durch Viskosität und die natürliche und erzwungene Konvektion bzw. Umwälzung des Elektrolyten bestimmt. Erst nach dem Erreichen des Aktivierungspotentials U_A und somit des passiven Zustandes findet kein aktiver Materialabtrag mehr statt. Trotz steigender Spannung bleibt die Stromdichte j_A über einen weiten Bereich durch die entstandene Passivierungsschicht, die jegliche Reaktion oder Wanderung von Ionen und Molekülen an der Phasengrenze nahezu komplett verhindert, auf einem weitestgehend konstanten Niveau.

Bereich (3): Ab dem transpassiven Durchbruchpotential U_D steigt die Stromdichte j stark an und der Materialabtrag an der Anode nimmt wieder zu. Im transpassiven Bereich kann keine geschlossene Passivierungsschicht mehr entstehen, da die Materialsabtragsraten deutlich größer sind als im aktiven und passiven Bereich. In diesem Bereich kommt es zur typischen Sauerstoffentwicklung durch die am anodisch gepolten Werkstück bestehende Passivierungsschicht. Durch die einsetzende Sauerstoffbildung in Form von Gasblasen und die damit verbundenen Umwälzungen des Elektrolyten am Werkstück können Inhomogenitäten im Abtrag sowie Strukturbildungen auftreten [53, 65]. Die transpassive Metallauflösung, die Sauerstoffentwicklung und die Bildung einer Passivschicht sind die charakteristischen Prozesse, welche an der Anode und somit am Werkstück stattfinden.

Bereich (4): Prozessbedingt kommt es an der Kathode zur Wasserstoffbildung.

Bereich (5): An dem anodisch gepolten Werkstück kommt es zur Sauerstoffbildung. Diese beginnt langsam beim Übergang vom passiven in den transpassiven Bereich. Die dabei entstehenden Sauerstoffbläschen bleiben an der Werkstückoberfläche hängen und beeinflussen die an der Anode entstehende Schicht. Diese transportlimitierende Schicht ist für den Elek-

tropolierprozess notwendig, um Oberflächenrauheiten abtragen zu können. Mit steigender Stromdichte nimmt auch die Sauerstoffentwicklung weiter zu.

2.4.1.5 Theorien zum Materialabtrag

Ziel der elektrochemisch oberflächenabtragenden Fertigungsverfahren und daher auch Ziel des elektrolytischen Elektropolierprozesses ist die Einebnung der Oberflächentopologie und somit der Abtrag sowohl der makroskopischen als auch der mikro- und nanoskopischen Unebenheiten der Metalloberfläche. Ziel der elektrochemisch oberflächenabtragenden Fertigungsverfahren ist ein gleichmäßiger Materialabtrag, bei dem lediglich Material an den Rauheitsspitzen und nicht an den Rauheitstälern abgetragen wird (Abbildung 2.19).

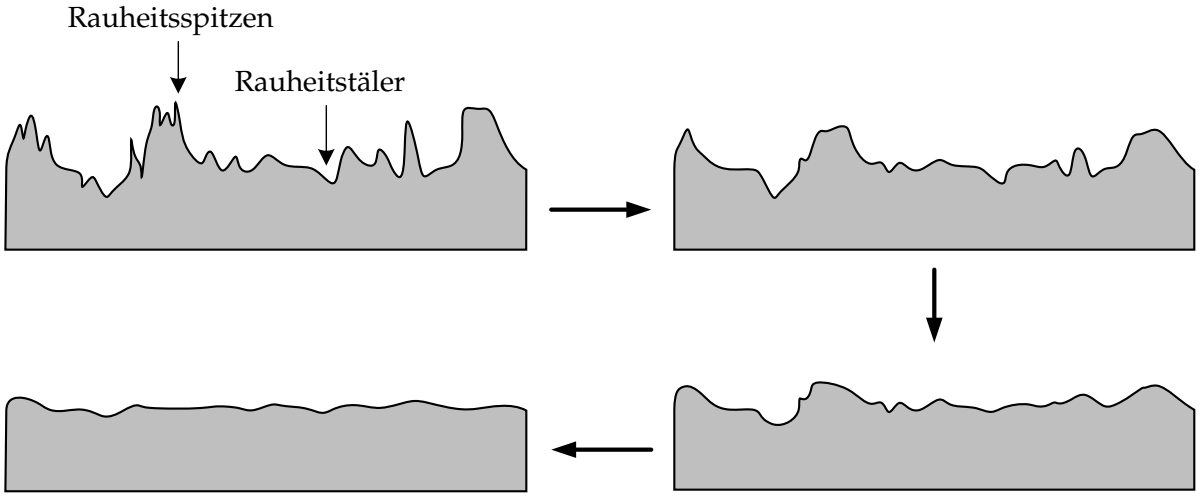


Abbildung 2.19: Schematische Darstellung des idealisierten Materialabtrags. Die Rauheitsspitzen werden mit fortwährender Dauer (in Pfeilrichtung) zunehmend abgetragen [65].

Beim Elektropolieren findet jedoch prozessbedingt ein Materialabtrag sowohl an den Rauheitsspitzen als auch in den Rauheitstälern statt. Während des Prozesses laufen die unter Punkt 2.4.1.3 aufgezeigten komplexen Reaktionen gleichzeitig und unterschiedlich stark ab. Einen maßgeblichen Einfluss auf den Materialabtrag haben die konkurrierenden Reaktionen der Metallauflösung und der Sauerstoffbildung, die nicht gleichzeitig auf der gesamten Metalloberfläche beginnen.

Um eine Einebnung der Oberflächentopologie zu erreichen, ist es somit notwendig, dass Rauheitsspitzen schneller abgetragen werden als Rauheitstäler. Im makroskopischen Bereich

wird dies durch höhere Stromstärken, somit auch höhere Stromdichten und daraus resultierend höhere lokale Materialabträge erreicht. Nach Datta und Buhlert [55, 66] werden mikro- bzw. nanoskopische Unebenheiten durch die beim Elektropolieren mit einem Gemisch aus Mineralsäuren und Alkoholen entstehenden transportlimitierenden Schichten lokal vor dem anodisch gepolten Werkstück abgetragen.

Neben der Stromdichte-Potential-Kurve finden sich in der Literatur weitere Ansätze hinsichtlich des Materialabtragsprozesses und der ablaufenden komplexen Wirkmechanismen. Nach Vaňa [67] kann der Materialabtrag beim Elektropolieren wie in Abbildung 2.20 dargestellt ablaufen.

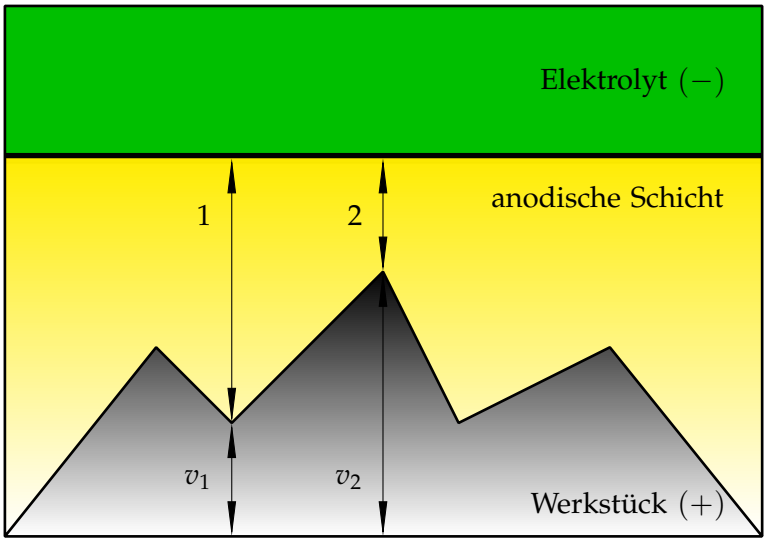


Abbildung 2.20: Schematische Darstellung des Materialabtragsprozesses beim Elektropolieren einer Werkstückoberfläche mit der Reaktionsgeschwindigkeit v_2 an den Rauheitsspitzen und v_1 im Rauheitstal. Abgebildet sind die anodische Werkstückoberfläche (grau), die sich ausbildende anodische Schicht (gelb) und der Elektrolyt (grün) [67].

Durch den Einsatz von Mineralsäuren als Elektrolyt bildet sich während des Elektropolierens an der Anode eine viskose Schicht um das gesamte Werkstück aus. Diese Schicht weist eine geringere Leitfähigkeit als der umgebende Elektrolyt auf. Innerhalb der anodischen Schicht findet durch Elektronenabgabe der Metallionen in den Elektrolyten eine anodische Metallauflösung statt. Hierbei läuft der Prozess aufgrund der vergleichsweise geringen Schichtdicke und den damit einhergehenden unterschiedlichen elektrischen Widerständen an den Rauheitsspitzen (2) wie auch den Rauheitstälern (1) (entlang des gesamten Oberflächenprofils) mit unterschiedlichen Reaktionsgeschwindigkeiten ab. Dabei ist die Reaktionsgeschwindigkeit v_1

der Metallauflösung an den Rauheitsspitzen größer als die Reaktionsgeschwindigkeit v_2 in den Rauheitstälern.

Weitere Ergebnisse zum Thema Elektropolieren wurden von Buhlert [53–55] und Gerlach [52] veröffentlicht. Sie konnten zeigen, dass durch den während des Elektropolierens entstehenden Sauerstoff Gasbahnen hervorgerufen werden. Prozessbedingte Konvektionsströmungen und inhomogene Stromdichteverteilungen haben letztendlich einen Einfluss auf den Materialabtrag und somit auf die Oberflächengüte des Werkstückes.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass in der Vergangenheit verschiedene Ansätze postuliert wurden, welche die unterschiedlichen Wirk- bzw. Reaktionsmechanismen wie den Materialabtrag sowie die erreichbaren Rauheiten und die Gasbildung beim Elektropolieren theoretisch erläutern [51, 54, 55, 67, 68]. Die ablaufenden Gesamtreaktionen sind auf Grund der zahlreichen Wirkmechanismen bis heute Gegenstand der Forschung.

2.4.2 Elektrolytisches Plasmapolieren

Erste Arbeiten im Bereich des elektrolytischen Plasmapolierens wurden 1950 von Kellogg veröffentlicht [69]. Er sprach dabei von „Anodeneffekten“und beschrieb erstmals das Entstehen einer Gashülle um die Anode. Weitere Versuche wurden von Duradzhi 1979 durchgeführt [70]. Dabei untersuchte er den Einfluss eines elektrolytischen Plasmas auf die Anodenoberfläche. 1985 wurde das Verfahren von Hoyer als „Verfahren zum Hochglänzen stromleitender Werkstücke im anodischen Elektrolytplasma“ [71] und 2002 von Lingath mit „Verfahren zum Plasmapolieren von Gegenständen aus Metall und Metalllegierungen“ [72] zum Patent angemeldet.

Es hat sich gezeigt, dass ab einem bestimmten Potential zwischen zwei Elektroden in einem wässrigen Elektrolyten Effekte in Form von kontinuierlicher Gasblasenentwicklung an der Arbeitselektrode auftreten. Dies wiederum führt zur Entstehung einer Gashülle um die Anode bzw. Kathode und wird begleitet von leuchtenden Entladungen. Die wichtigsten Einflussfaktoren für die Bildung dieser Gashülle sind das angelegte elektrische Potential, das Elektrodenmaterial sowie die chemischen Eigenschaften des verwendeten Elektrolyten.

Einen Überblick zum Thema des elektrolytischen Plasmapolierens geben die Arbeiten von Yerokhin, Gupta, Kalenchukova und Nestler [3, 73–75]. Yerokhin wies nach, dass die auftretenden Plasmaphänomene die grundlegenden Elektrodenprozesse, wie z. B. anodische Auflösung, anodische Oxidation und kathodische Reduktion, maßgeblich verändern. Dies ist sowohl begründet in einer Verstärkung der chemischen und physikalischen Nebenprozesse

als auch in weiteren plasmachemischen Prozessen (u. a. Wärme- und Diffusionsprozesse sowie Makropartikeltransport), die an der Elektrodenoberfläche stattfinden. Gupta [74, 76] und Kalenchukova [75] hingegen beleuchteten die chemische Seite des elektrolytischen Plasmapolierprozesses genauer.

Weitere Ergebnisse zum Thema des elektrolytischen Plasmapolieren wurden von Vaňa [67, 77], Wang [78–80], Danilov [81, 82] und Mihal [83] veröffentlicht. Wang untersuchte dabei sowohl den Einfluss der Elektrolyt- bzw. Prozesstemperatur T_P als auch unterschiedliche Massenkonzentrationen β des Elektrolyten (Zusammensetzung nicht erläutert) auf die mittlere Linienrauheit *Ra* und die Wirkstromdichte *j* plasmapolierter Werkstückoberflächen aus Edelstahl 1.4301. Abbildung 2.21 zeigt den grafischen Verlauf der mittleren Linienrauheit *Ra* und der Wirkstromdichte *j* für unterschiedliche Prozesstemperaturen T_P und einer Elektrolytmassenkonzentration von 4 Gew.–% (Gewichtsprozent).

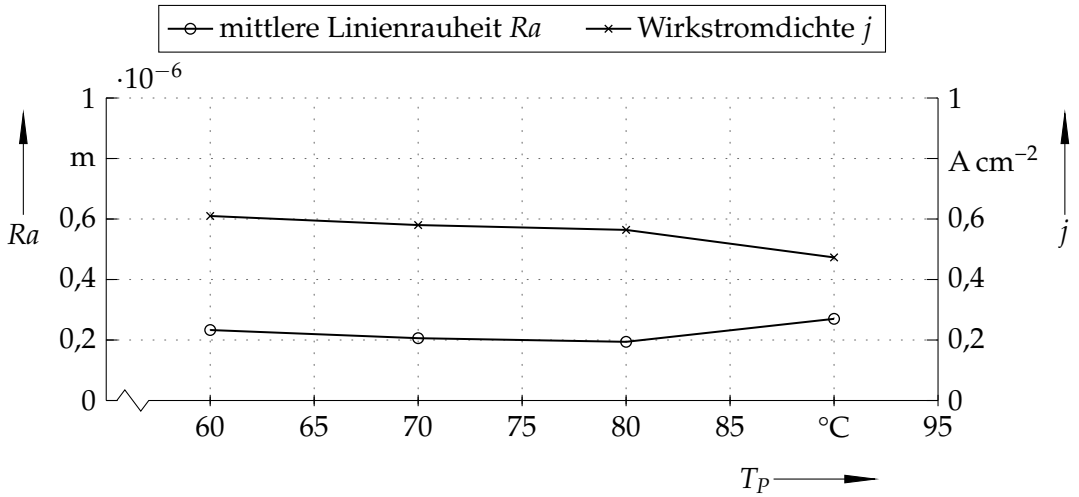


Abbildung 2.21: Arithmetische Linienrauheit *Ra* von elektrolytisch plasmapolierten Werkstückoberflächen aus Edelstahl 1.4301 mit den dazugehörigen gemessenen Wirkstromdichten *j* über der Prozesstemperatur T_P [78].

Die Prozesstemperatur T_P in Abbildung 2.21 wurde dabei schrittweise von 60 °C auf 90 °C in 10 °C-Schritten erhöht. Die mittlere Linienrauheit *Ra* erreichte mit 0,19 µm ein Minium bei 80 °C bei einer mittleren Ausgangslinienrauheit von 0,50 µm. Weiterhin konnte er zeigen, dass mit steigender Prozesstemperatur die Wirkstromdichte kontinuierlich verringert wurde von 0,61 A cm^{-2} bei 60 °C auf 0,47 A cm^{-2} bei 90 °C. Als Schlussfolgerung konnte er nachweisen, dass die Prozesstemperatur einen Einfluss auf die erreichbaren Oberflächengüten hat und identifizierte 80 °C daher als optimale Prozesstemperatur hinsichtlich der erreichbaren arithmetischen Linienrauheit.

In Abbildung 2.22 ist der Verlauf der mittleren Linienrauheit *Ra* und der Wirkstromdichte *j* für unterschiedliche Elektrolytmassenkonzentrationen β dargestellt. Die Elektrolytmassenkonzentration wurde schrittweise von 1,5 Gew.–% auf 6 Gew.–%, in 1,5 Gew.–%-Schritten, erhöht. Die mittlere Linienrauheit verringerte sich auf 0,25 µm bei 1,5 Gew.–% und erreichte ein Minimum von 0,19 µm bei 6,0 Gew.–%. Die Wirkstromdichte hingegen stieg zunehmend mit der Elektrolytmassenkonzentration von 0,52 A cm^{-2} bei 1,5 Gew.–% auf 0,58 A cm^{-2} bei 6,0 Gew.–%.

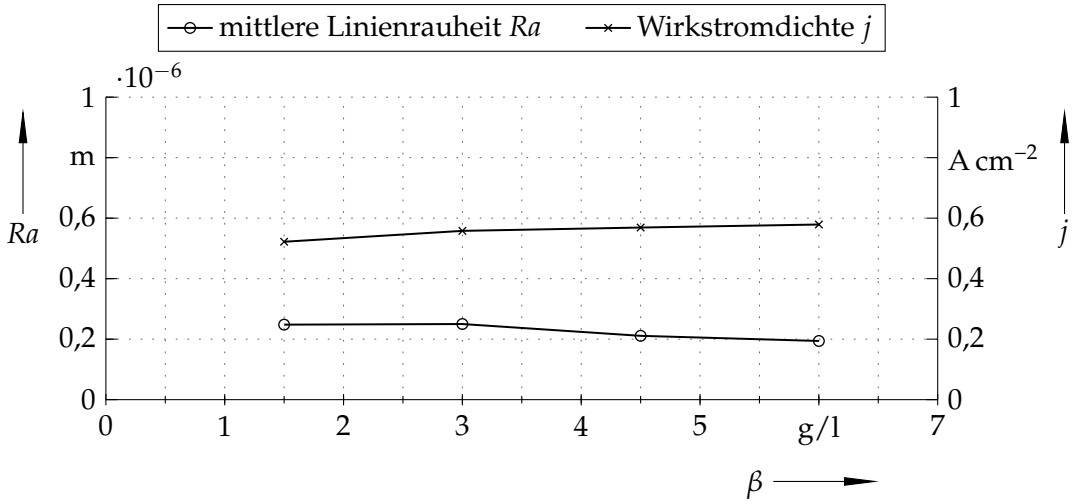


Abbildung 2.22: Arithmetische Linienrauheit *Ra* von elektrolytisch plasmapolierten Werkstückoberflächen aus Edelstahl 1.4301 mit den dazugehörigen gemessenen Wirkstromdichte *j* über die Elektrolytmassenkonzentration β [78].

Als optimale Prozessparameter hinsichtlich der erreichbaren arithmetischen Linienrauheiten *Ra* wurden eine Massenkonzentration von 6,0 Gew.–% und eine Elektrolyttemperatur von 80 °C ermittelt [78].

Vaňa macht neben der mittleren Linienrauheit *Ra* zusätzliche Aussagen über den Glanzgrad *G* von plasmapolierten Edelstahloberflächen (1.4310). Die mittlere Ausgangslinienrauheit betrug 1,69 µm mit einem Glanzgrad von 8,8 GU, was einem geringen Glanz entspricht. Die Prozess- bzw. Polierdauer *t* betrug bis zu 5 min. In Analogie zu Wang konnte auch Vaňa zeigen, dass die mittlere Linienrauheit mit steigender Prozesszeit kontinuierlich abnahm und ein Minimum von 0,78 µm erreichte, während der Glanzgrad sukzessiv zunahm und ein Maximum von 205,7 GU aufwies, was bedeutet, dass eine Verringerung von *Ra* eine Erhöhung von *G* zufolge hat [67].

Wie beim Elektropolieren haben auch beim elektrolytischen Plasmapolieren die gewählten Prozess- und Werkstoffparameter einen entscheidenden Einfluss auf die erreichbaren Oberflächengüten. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden, in Analogie zum Elektropolieren, der Fertigungsablauf, die elektrochemische Reaktionen, die Stromdichte-Potential-Kurve und eine Theorie zum Materialabtrag beim elektrolytischen Plasmapolieren erläutert.

2.4.2.1 Elektrolyt EPP

Im Gegensatz zum Elektropolieren, bei dem Elektrolyten aus Mineralsäuren, Alkoholen und Wasser zum Einsatz kommen, werden beim elektrolytischen Plasmapolieren schwach konzentrierte und weniger umweltbelastende Salzlösungen verwendet. In Analogie zu Kapitel 2.4.1.1 wird auch beim elektrolytischen Plasmapolieren die Elektrolytzusammensetzung für Edelstahl und Kupfer näher vorgestellt. Auch hier muss wieder berücksichtigt werden, dass in Abhängigkeit von der gewählten Legierung der Elektrolyt und damit auch systemspezifische Prozessparameter angepasst werden müssen. Weitere Elektrolyt-Material-Kombinationen geben Gupta [74] sowie Nestler [3] an.

Edelstahlelektrolyt

Für Edelstahl 1.4301 wird eine 3 Gew.−% bis 6 Gew.−% Ammoniumsulfatelektrolyt verwendet [78], das in der Land- und Forstwirtschaft als gängiges Düngemittel zum Einsatz kommt. Je mehr Salz verwendet wird, desto größer ist die Elektrolytmassenkonzentration und damit die elektrische Leitfähigkeit. Diese hat wiederum einen Einfluss auf die mittlere Linienrauheit Ra (siehe Abbildung 2.22). Des Weiteren wird in Abhängigkeit vom gewählten Edelstahl der pH-Wert durch Zugabe von Additiven, wie z. B. Schwefelsäure, angepasst. Nach Nestler werden dadurch ein stabiles Plasma und damit gleichbleibende Polierergebnisse garantiert [3].

Kupfer- und Zinkelektrolyt

Nestler [3] verwendete verschiedene organische Salze zur Elektrolytherstellung, um Kupfer und Kupferlegierungen zu bearbeiten:

- Weinsäure,
- Zitronensäure,
- Nitrilotriessigsäure (NTA),

- Ethylendiamintetraessigsäure (EDTA).

Die verschiedenen organischen Salze sorgen dafür, dass Kupferionen und Ionen anderer Legierungselemente gebildet werden, um diese von der Werkstückoberfläche abzuführen und in Lösung zu halten. Nestler konnte mittlere Linienrauheiten von 0,015 µm bei einer Ausgangsrauheit von 0,081 µm erreichen.

2.4.2.2 Fertigungsablauf

Wie beim Elektropolieren gibt es auch beim elektrolytischen Plasmapolieren, in Abhängigkeit von den Vor- und Nachbehandlungen der Proben, verschiedene Fertigungsablaufpläne. In Abbildung 2.23 ist ein etablierter Fertigungsablauf dargestellt.

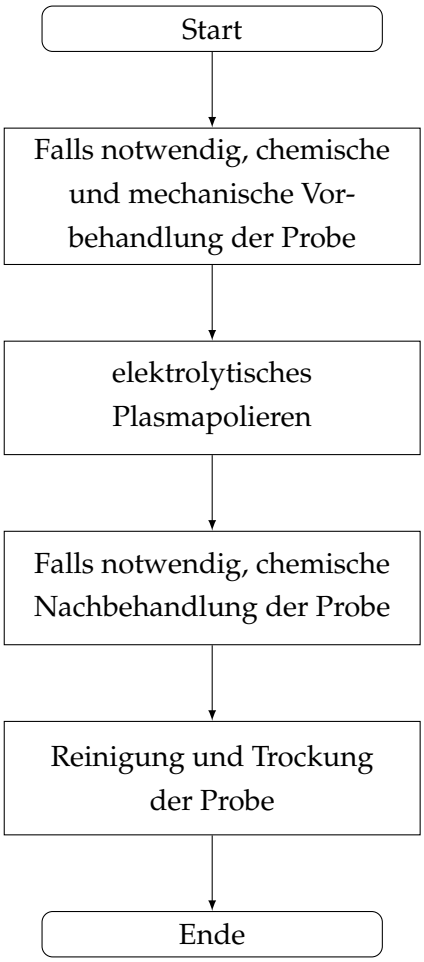


Abbildung 2.23: Etablierter Fertigungsablaufplan für das elektrolytische Plasmapolieren von metallischen Oberflächen wie z. B. Edelstahl 1.4301, Kupfer und Zink.

Ein Vergleich mit dem Fertigungsablauf in Abbildung 2.16 verdeutlicht, dass beim elektrolytischen Plasmapolieren weniger Zwischenschritte notwendig sind als beim Elektropolieren. Auch beim EPP muss die gesamte Werkstückoberfläche elektrisch leitfähig sein. Dabei haben jedoch Verunreinigungen in Form von Ölen, Fetten und Farbrückständen keinen nachweisbaren Einfluss auf die erreichbaren Oberflächengüten und werden während des Polierens restlos vom Werkstück entfernt.

In Analogie zum Elektropolieren ist in Abhängigkeit von der Oberflächengüte eine mechanische bzw. chemische Vorbehandlung mit anschließender Reinigung notwendig. Dieser Reinigungsschritt ist notwendig, um etwaige Rückstände in Form von abrasiven Medien und Restchemikalien zu entfernen und um zu gewährleisten, dass keine Rückstände in den Elektrolyten gelangen. Im Anschluss wird das Werkstück eingespannt und unter Gleichspannung in den für das Werkstückmaterial passenden Elektrolyten eingetaucht. Die Zuschaltung des elektrischen Potentials im Elektrolyten ist aufgrund der resultierenden Anlaufströme, die sich aus den zu polierenden Werkstückoberflächen ergeben, nicht möglich. Ähnlich wie beim Elektropolieren kommt es auch beim elektrolytischen Plasmapolieren durch den permanenten Energieeintrag während des Prozesses zu einer Erhöhung der Elektrolyttemperatur. In Abhängigkeit vom gewählten Material können nach dem elektrolytischen Plasmaprozess weitere chemische Nachbehandlungsprozesse erfolgen.

Nach dem Prozessende wird das plasmapolierte Werkstück entnommen. Durch einen Spülprozess im Wasserbecken wird der Restelektrolyt von der Oberfläche entfernt. Zum Abschluss wird die Werkstückoberfläche mit sauberer Druckluft getrocknet.

2.4.2.3 Allgemeine Definitionen

Zum besseren Verständnis des Prozesses des elektrolytischen Plasmapolierens werden Teilbereiche zum Thema Plasma näher vorgestellt. Dies beinhaltet neben der grundlegenden Definition eines Plasmas auch eine Erläuterung der Stoßprozesse im Plasma. Neben den bereits im Kapitel 2.4.1.3 aufgezählten Reaktionen sollen im Folgenden die abweichenden chemischen Vorgänge an der Anode sowie der Kathode erläutert werden. Grundlegende Prozesse wie die aktive und passive Metallauflösung finden auch beim elektrolytischen Plasmapolieren statt.

Definition eines Plasmas

Zu den Aggregatzuständen zählen fest (Festkörper), flüssig (Flüssigkeit) und gasförmig (Gas). Unter Zuhilfenahme des sogenannten Teilchenmodells kann der Übergang eines Stoffes von einem Aggregatzustand zu einem anderen auf einfache Weise beschreiben werden [84, 85]. Das Teilchenmodell reduziert dabei die Teilchen eines Stoffes auf Kugeln. Mit steigender Temperatur und abhängig vom vorherrschenden Druck kann ein Stoff bei Veränderung dieser Zustandsgrößen vom festen, in den flüssigen, in den gasförmigen Zustand und bei weiterer Energiezufuhr in den Plasmazustand übergehen. In Abbildung 2.24 ist der Übergang von einem in den anderen Aggregatzustand dargestellt.

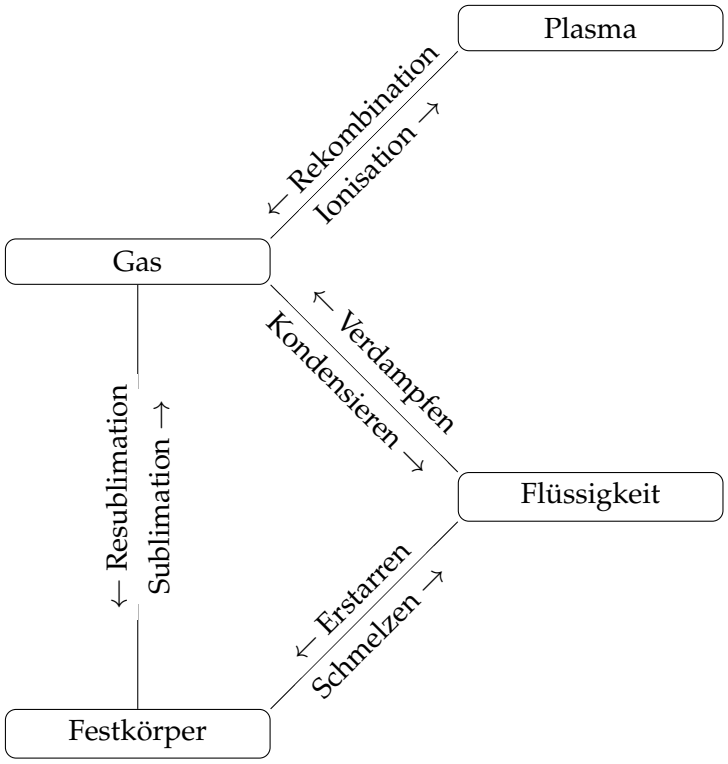


Abbildung 2.24: Darstellung der Aggregatszustandsänderung.

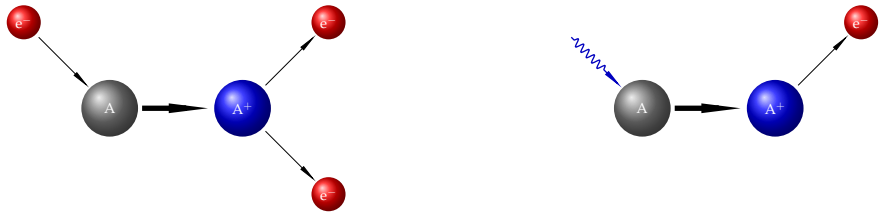
Als einfaches Beispiel sei hier Wasser bzw. Eis als Festkörper genannt. In einem Festkörper schwingen die Teilchen ortsfest um ihre Gleichgewichtslage. Dabei wirken zwischen den Teilchen starke Anziehungskräfte, unter anderem Van-der-Waals-Kräfte oder kovalente Bindungen. Wird dem Festkörper ausreichend Energie z. B. in Form von Wärme zugeführt, so beginnen die Teilchen immer stärker zu schwingen, bis sie ihren ortsfesten Platz in der Gitterstruktur verlassen. Ein Anteil der Teilchen kann sich frei bewegen. Wird dieser entstehenden

Flüssigkeit weiter Energie zugefügt, kommt es vermehrt zu Teilchenkollisionen einer solchen Stärke, dass die vorherrschenden Kohäsionskräfte nicht mehr ausreichen und die Flüssigkeit in den gasförmigen Zustand übergeht. Wird die Temperatur erhöht, werden die Atome aufgrund von Teilchenkollisionen ionisiert und ergeben mit den vorhandenen Elektronen und den ungebundenen Ionen ein quasineutrales Gas, ein Plasma. Quasineutralität bedeutet, dass sich in dem ionisiertem Gas annähernd gleich viele positive wie auch negative Ladungen pro Volumeneinheit befinden. Plasma wird auch als vierter Aggregatzustand bezeichnet [85].

Stoßprozesse

Wie bereits aus Abbildung 2.24 ersichtlich, sind Ionisationsprozesse notwendig, um vom gasförmigen Zustand zu einem Plasma zu gelangen. Trifft ein Elektron e^- auf ein Atom A, so wird ein weiteres Elektron herausgeschlagen und es entsteht ein elektrisch positiv geladenes Ion. Dieser Prozess wird als Elektronen-Stoßionisation bezeichnet (Abbildung 2.25 (a)). Trifft hingegen ein Strahlungsquant mit der Frequenz f und der Energie $\hbar f$ auf ein Atom, wird unter Energiezufuhr ein Elektron aus dem Atom gelöst (Abbildung 2.25 (b)).

$$e^- + A \longrightarrow A^+ + 2\,e^- \qquad\qquad \hbar f + A \longrightarrow A^+ + e^- \tag{2.18}$$



(a) Stoßionisation (b) Photoionisation

Abbildung 2.25: Schematische Darstellung der Stoßionisation (a) und der Photoionisation (b) mit den zugehörigen Reaktionsgleichungen 2.18.

Ist die Energiezufuhr durch Wärme- oder Stoßprozesse nicht ausreichend, kommt es lediglich zu einer Anregung des Atoms, was bedeutet, dass das angeregte Elektron auf das nächst höhere Energieniveau gehoben wird. Erst durch weitere Stoßprozesse findet eine Ionisation oder auch Mehrfachionisation statt.

2.4.2.4 Ablaufende elektrochemische Reaktionen beim elektrolytischen Plasmapolieren

Im folgenden Abschnitt wird die Wasserstoff- bzw. Sauerstoffentwicklung an der Kathode bzw. Anode erklärt.

Wasserstoffentwicklung (Kathode)

Durch das Anlegen einer Gleichspannung entsteht eine gerichtete Bewegung der im Elektrolyten enthaltenen Anionen und Kationen zur Anode bzw. zur Kathode. Neben dem Transport elektrischer Ladungsträger durch die Elektrolytlösung findet an den Elektroden durch Abgabe oder Aufnahme von Elektronen ein Stofftransport infolge sich bildender solvatisierter Ionen statt. Da an der Kathode eine Reduktion erfolgt, kommt es, wie beim Elektropolieren auch, zur typischen Wasserstoffentwicklung (Reaktionsgleichung 2.19).

$$2\,H_2O + 2\,e^- \longrightarrow H_2\uparrow + 2\,OH^- \tag{2.19}$$

Sauerstoffentwicklung (Anode)

An der Anode kommt es zur Metallauflösung. Es gilt somit die Reaktionsgleichung 2.7.

$$2\,H_2O \longrightarrow O_2\uparrow + 4\,H^+ + 4\,e^- \tag{2.20}$$

$$Me^{2+} + 2\,OH^- \longrightarrow Me(OH)_2 \tag{2.21}$$

Die entstehenden Metallionen bilden mit den an der Kathode entstehenden Hydroxidionen ein Metallhydroxid (siehe Gleichung 2.21). An der Anode kommt es während des elektrolytischen Plasmapolierens zur charakteristischen Sauerstoffentwicklung (siehe Gleichung 2.20).

2.4.2.5 Verfahrensbeschreibung nach der Stromdichte-Potential-Kurve

Beim elektrolytischen Plasmapolieren kommt es zum Materialabtrag infolge von Plasmaentladungen. Wie beim Elektropolieren kann auch beim Plasmapolieren die allgemeine Wirkungsweise unter Zuhilfenahme der charakteristischen Stromdichte-Potential-Kurve (zum besseren Prozessverständnis wurde die entsprechende Temperatur-Potential-Kurve in das Diagramm eingefügt), die sich in vier Bereiche einteilen lässt, erklärt werden (siehe Tabelle 2.5 und Abbildung 2.26).

Tabelle 2.5: Bereichsunterteilung der charakteristischen Stromdichte-Potential-Kurve (Abbildung 2.26) beim elektrolytischen Plasmapolieren.

Bereich	Charakteristische Merkmale
(1)	Bereich der Metallauflösung
(2)	Instabiler Bereich
(3)	Plasmaerzeugender Bereich
(4)	Elektrohydrodynamischer Bereich (Bereich des Plasmapolierens)

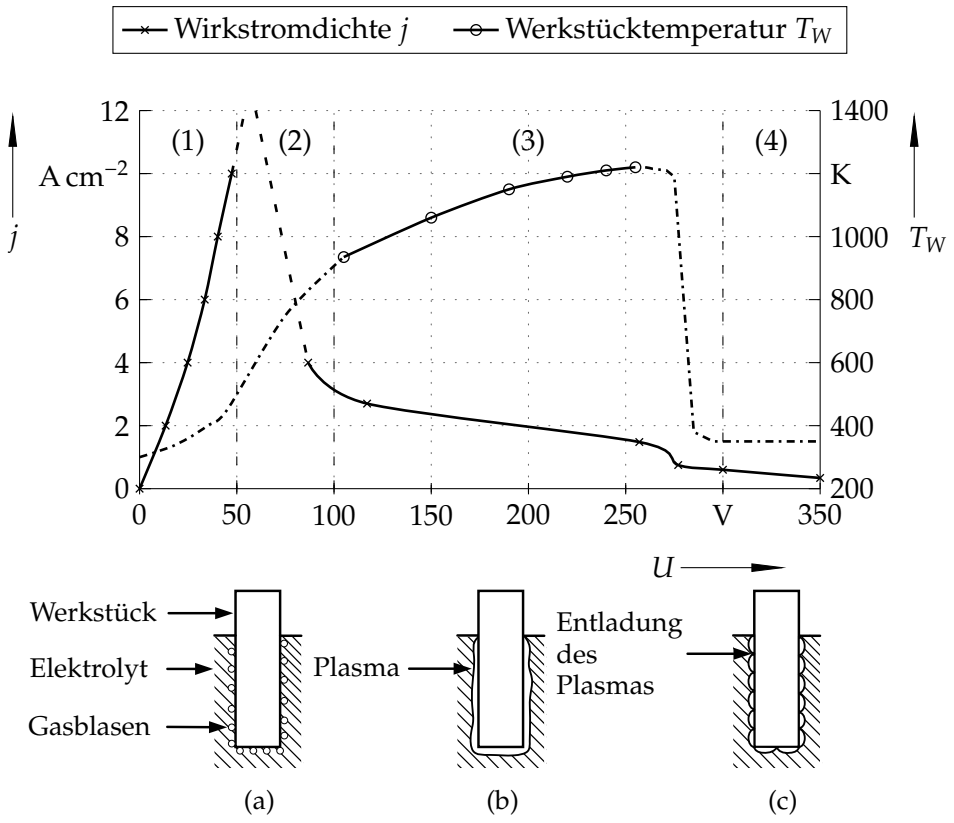


Abbildung 2.26: Charakteristische Stromdichte-Potential-Kurve sowie Temperatur-Potential-Kurve beim EPP sowie die grafische Darstellung der Entstehung eines Plasmas auf der Werkstückoberfläche bis hin zur Zerstörung des Plasmas (siehe Abbildung (a) bis (c)) [86]. Teilaspekt (a) ist dem Bereich 2, (b) dem Bereich 3 und (c) dem Bereich 4 zuzuordnen.

Im Folgenden werden die in Tabelle 2.5 aufgezählten Bereiche genauer erläutert [75, 86]:

- Bereich (1): Die Stromdichte-Potential-Kurve steigt bis zu einer elektrischen Potentialdifferenz von 50 V linear an. In diesem Bereich gilt näherungsweise das ohmsche Gesetz. Der elektrische Widerstand ergibt sich aus dem Widerstand des verwendeten Elektrolyten. In diesem Bereich kommt es an der Anode bzw. Kathode in Analogie zum Elektropolieren zur Wasserstoff- bzw. Sauerstoffentwicklung. Es findet eine Elektrolyse statt.

- Bereich (2): Die Stromdichte-Potential-Kurve weist periodische Stromunterbrechungen auf und ist damit durch eine instabile Charakteristik gekennzeichnet. Diese Stromunterbrechungen entstehen durch die im Bereich (1) stattfindenden Prozesse wie Elektrolyse, Gasentwicklung und weitere thermische Effekte an der Werkstückoberfläche. Durch die vereinzelt entstehenden ladungstragenden Gasblasen kann es, bedingt durch Elektrolytbrücken, zu explosionsartigen Entladungsvorgängen kommen. Diese Entladungsvorgänge wiederum führen zu einer Elektrolytverdrängung an der anodisch gepolten Werkstückoberfläche (Abbildung 2.26a). Dadurch bedingt kommt es zu immer wiederkehrenden Stromunterbrechungen und Stromdichten von bis zu 100 A cm^{-2} bei erneuter Elektrolytbenetzung der Werkstückoberfläche.

- Bereich (3): In diesem Bereich steigt die Werkstücktemperatur T_W weiter an. Gleichzeitig sinkt die Stromdichte j bis auf circa 1 A cm^{-2} ab. Durch die hohen Temperaturen bildet sich zwischen dem anodisch gepolten Werkstück und dem Elektrolyten somit eine Gas-Dampfschicht, das sogenannte Elektrolytplasma, aus, das die komplette Werkstückoberfläche umschließt (Abbildung 2.26b). Nach Tien hängt die Dicke dieser Dampfschicht dabei maßgeblich von der Elektrolytzusammensetzung ab. Sie ist lediglich ein paar Zehntel Millimeter dick und besitzt gegenüber dem verwendeten Elektrolyten einen hohen elektrischen Widerstand. Ab einer Spannung von circa 270 V wird diese Gas-Dampfschicht durch auftretende Entladungen teilweise zerstört. Dadurch gelangt periodisch Elektrolyt an die Werkstückoberfläche. Dies wiederum hat den Nebeneffekt, dass eine Werkstückabkühlung stattfindet. Laut Tien [86] bilden sich in diesem Bereich Oxidschichten auf den untersuchten Werkstoffen aus.

- Bereich (4): Dieser Bereich ist der Plasmapolierbereich. Dabei wird das im Bereich (3) entstandene Elektrolytplasma, welches die Anodenoberfläche komplett umschließt, durch das anliegende elektrische Feld teilweise zerstört und es entstehen die für das Plasmapolieren typischen zischenden Geräusche (Abbildung 2.26c). Tien [86] konnte nachweisen, dass infolgedessen die Stromstärke nochmals auf unter 1 A cm^{-2} sinkt und es in diesem Bereich zu einem verstärkten Materialabtrag auf der gesamten Werkstückoberfläche kommt. Dabei wird die Rauheit der Oberfläche deutlich verringert.

Während des elektrolytischen Plasmapolierens muss darauf geachtet werden, dass die für das zu bearbeitende Material bekannten spezifischen Prozessparameter eingehalten werden. Dazu zählt neben dem pH-Wert und der elektrischen Leitfähigkeit auch die Prozesstemperatur des Elektrolyten. Diese wiederum hat einen Einfluss auf die Konzentration, somit auf den Dissoziationsgrad und damit letztendlich auch auf die Ladungsträgerdichte des Elektrolyten. Nicht vernachlässigbar ist der Wasserverlust in Form von Wasserdampf infolge des Energieeintrages während des Polierens. Hierdurch könnten Schwankungen in der elektrischen Leitfähigkeit und der Elektrolytkonzentration auftreten, die ein ständiges Nachfüllen des Elektrolyten notwendig machen, um gleichbleibende Prozessergebnisse zu erzielen. [78–80]

2.4.2.6 Theorien zum Materialabtrag

Auch beim elektrolytischen Plasmapolieren gibt es Ansätze zur Beschreibung des Materialabtrags von der Werkstückoberfläche. Wang und Holzer erklären den Materialabtrag mit Hilfe der Entladungserscheinungen, den sogenannten Streamern [79, 87].

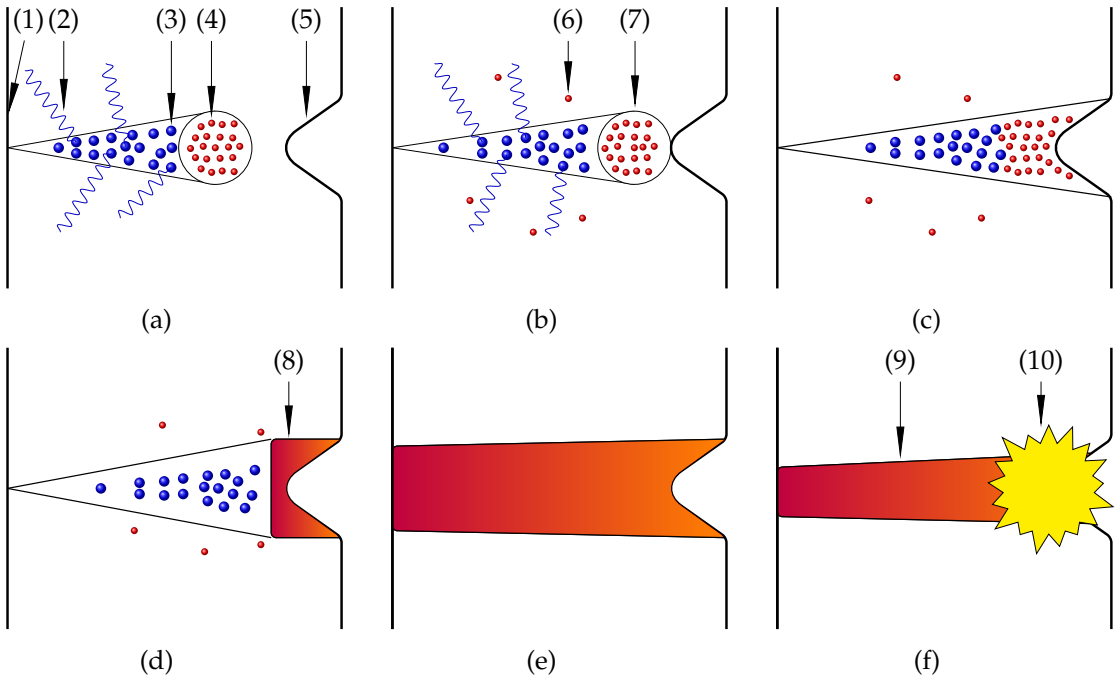


Abbildung 2.27: Schematische Darstellung der Entstehung einer Plasmaentladung nach der Streamertheorie [79]. (1) Elektrolyt, (2) Stoßprozesse, (3) Ionen, (4) Elektronen, (5) Werkstückoberfläche, (6) Sekundärelektronen, (7) Lawinenkopf, (8) Streamer, (9) Plasmakanal, (10) explosionsartige Entladung

Im Folgenden werden die in Abbildung 2.27 dargestellten Vorgänge genauer erläutert [79, 87]:

- (a) Durch das angelegte elektrische Potential zwischen dem kathodischen Becken, welches den Elektrolyten (1) enthält, und der anodischen Werkstückoberfläche (5) sowie dem daraus resultierenden elektrischen Feld werden die in der Gasschicht enthaltenden freien Ladungsträger in Richtung der Anode beschleunigt. Durch die Beschleunigung stoßen die frei beweglichen Elektronen mit denen in der Dampfschicht vorkommenden Neutralteilchen zusammen. Durch diese Stoßprozesse (2) werden Elektronen frei und Photonen emittiert. Elektronen (4) und Ionen (3) bilden eine homogene Schicht, die durch das angelegte Potential zum Werkstück gerichtet ist. Dabei sind die kleineren Elektronen aufgrund ihrer geringeren Masse deutlich schneller als die größeren und schwereren Ionen.

- (b) Die Elektronen bilden den Lawinenkopf (7) und die Ionen den nahezu stationären Lawinenschwanz. Durch Photoionisation entstehen Sekundärelektronen (6).

- (c) Diese Elektronen werden durch das angelegte elektrische Feld beschleunigt und bilden sogenannte Sekundärlawinen.

- (d) Aufgrund von Feldverzerrungen werden die Sekundärlawinen vom Kopf der Primärlawine angezogen und es kommt zur Bildung eines schwach leitfähigen Kanals, dem Streamer (8). Infolge der hohen Ladungsträgerdichte im Kanal kommt es immer häufiger zu Stoßprozessen und damit zu einer erhöhten Teilchenbewegung.

- (e) Durch die steigenden Temperaturen wird der Streamer weiter komprimiert und es entsteht ein Plasmakanal. Der Strom, welcher durch diesen Kanal fließt, induziert ein Magnetfeld, das den Kanal zu einem dünnen Faden verdichtet.

- (f) Durch den Pinch-Effekt wird der Plasmakanal (9) weiter verdichtet und die Temperatur steigt abermals an. Das Ergebnis der gegenläufigen Prozesse von Gasausdehnung und Verdichtung ist eine explosionsartige Entladung (10). Nach dieser Entladung bricht der Plasmakanal zusammen.

Vaňa [67] beschreibt den Prozess des Materialabtrags wie in Abbildung 2.28 dargestellt.

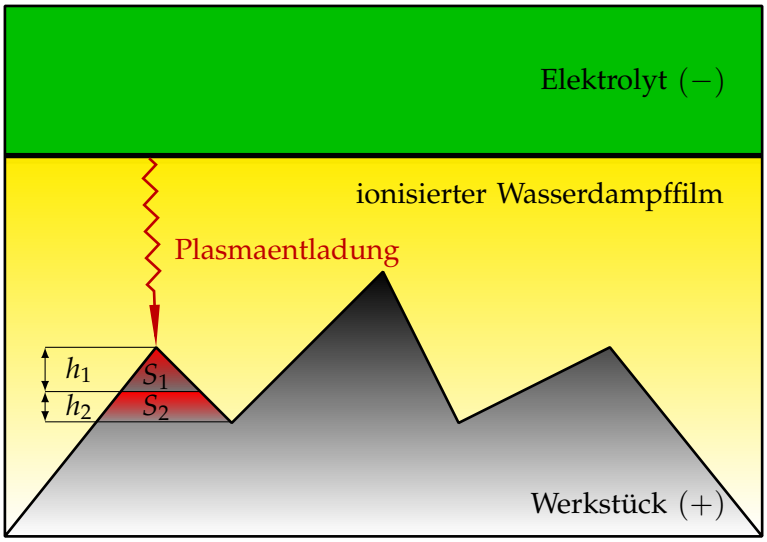


Abbildung 2.28: Schematische Darstellung des Materialabtragprozesses beim elektrolytischen Plasmapolieren einer Werkstückoberfläche. Abgebildet sind die anodische Werkstückoberfläche (grau), die Plasmaentladung (rot), der ionisierte Wasserdampffilm (gelb) und der Elektrolyt (grün) [67].

Dabei wird die Entstehung des Streamers nicht genauer erklärt, sondern vielmehr der Abtrag entlang des Oberflächenprofils. Abbildung 2.28 verdeutlicht, dass die Plasmaentladungen entlang des gesamten Oberflächenflächenprofils an den Rauheitsspitzen stattfinden, da dort der zurückgelegte Weg und somit die Distanz zwischen Elektrolyt und Werkstückoberfläche am geringsten ist. Die während des Polierprozesses freiwerdende Energie kann als nahezu konstant angesehen werden. Infolgedessen wird die gleiche Materialmenge bei jeder Plasmaentladung abgetragen, d. h. das abgetragene Volumen S_1 ist gleich dem abgetragenen Volumen S_2. Die Höhe h des Materialabtrags von der Rauheitsspitze hingegen nimmt mit größer werdender Grundfläche ab. Das bedeutet, dass die Materialabtragshöhe h_1 größer ist als h_2.

Zusammen bilden die beiden Theorien eine Grundlage und tragen zum besseren Verständnis des Abtragsprozesses beim elektrolytischen Plasmapolieren bei.

2.4.3 Vor- und Nachteile elektrolytischer Fertigungsverfahren

Die vorgestellten elektrolytisch oberflächenabtragenden Fertigungsverfahren mit äußerer Fremdstromquelle bewirken einen definierten Materialabtrag ohne Einwirkung mechanischer Kräfte auf die Werkstückoberfläche. Eine Änderung der Materialzusammensetzung, wie z. B. nichtmetallische Stoffe in der Werkstoffmatrix, hat zur Folge, dass diese nicht poliert werden.

Sind Grate an der Werkstückoberfläche vorhanden, müssen diese nicht in einem separaten Bearbeitungsschritt entfernt werden. Durch den Materialabtrag während des elektrolytischen Polierens kommt es prozessbedingt, in Abhängigkeit von der Prozesszeit, zur Entfernung dieser Grate, aber auch zu einer Abrundung der Kanten. Die Prozesse sind jedoch nicht geeignet, geometrisch bestimmte Formen zu erzeugen.

Sowohl beim Elektropolieren als auch beim elektrolytischen Plasmapolieren wurden in Abhängigkeit von dem zu bearbeitenden Material optimale Prozessparameter hinsichtlich der Rauheit identifiziert, um einen kontrollierten und definierten Materialabtrag und somit reproduzierbare Oberflächengüten zu gewährleisten, wodurch die Prozesse für technische Anwendungen geeignet sind. In Abhängigkeit von der gewünschten Oberflächengüte kann jedoch eine mechanische oder chemische Vorbehandlung der Werkstückoberfläche notwendig und hilfreich sein.

In Abhängigkeit von der Form und dem zu polierenden Material kommt entweder das Elektropolieren oder das elektrolytische Plasmapolieren zur Anwendung [3, 55, 65]. Metallische Bleche, z. B. aus Edelstahl oder Kupfer, können mit beiden Verfahren bearbeitet werden. Soll jedoch die Bearbeitung von Rohrinnenflächen erfolgen, muss nach dem derzeitigen Stand der Technik auf das Elektropolieren zurückgriffen werden, weil sich beim elektrolytischen Plasmapolieren das Plasma prozessbedingt ausschließlich um dass Rohr herum, nicht aber in dessen Inneren ausbildet. Dadurch findet ein Materialabtrag lediglich auf der Außenfläche und damit nur dort eine Reduzierung der Oberflächenrauheit statt.

3 Prototypenanlagen zum elektrolytischen Plasmapolieren von Rohrinnenoberflächen

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Wachstumskerns Centifluidic Technologies wurde in Zusammenarbeit mit der plasotec GmbH (Rathenow, Deutschland) ein Maschinenkonzept für eine Prototypenanlage zum elektrolytischen Plasmapolieren von Rohrinnenoberflächen entwickelt. Diese wurde von der ICS Industriedienstleistungen GmbH (Roßleben, Deutschland) hergestellt und an der Universität Rostock in Betrieb genommen. Im Zuge der wissenschaftlichen Arbeit wurden weiterhin die anlagenspezifischen Prozessparameter erarbeitet, der Polierkopf entwickelt und technisch umgesetzt sowie die experimentellen Untersuchungen durchgeführt.

Im Folgenden wird neben dem Konzept, der Umsetzung, dem Aufbau, der Funktionsweise und den anlagenspezifischen Prozessparametern der Prototypenanlage außerdem der für den Plasmapolierprozess von Rohren notwendige Polierkopf zur Bearbeitung von Oberflächen vorgestellt. Im darauffolgenden Kapitel wird die Vor- und Nachbereitung der Proben, die Charakterisierung des Elektrolyten und der Oberflächenrauheit beschrieben sowie ein Konzept zur Parameteridentifikation und damit zur Identifizierung von optimalen Prozessparametern hinsichtlich der erreichbaren Rauheiten vorgestellt.

3.1 Konzeption der Prototypenanlage

Metallische Bleche aus Edelstahl oder Kupfer können mit beiden Verfahren (EP und EPP) bearbeitet werden. In Abhängigkeit von der Form und der zu polierenden Materialoberfläche kommt entweder das Elektropolieren oder das elektrolytische Plasmapolieren zur Anwendung [3, 55, 65]. Sollen aber Rohrinnenoberflächen bearbeitet werden, ist es nach dem derzeitigen Stand der Technik nicht möglich, die Rohrinnenoberfläche mittels eines elektrolytischen Plasmas zu bearbeiten. In diesen Fällen muss auf das Elektropolieren zurückgegriffen. Beim elektrolytischen Plasmapolieren bildet sich prozessbedingt, wenn das Rohr elektrisch

kontaktiert und in das Elektrolytbecken gefahren wird, ein Plasma auf der Rohraußenoberflächen, nicht aber auf der Rohrinnenoberfläche aus. Die Lösung ist ein Werkzeug, welches das notwendige Plasma an der Rohrinnenoberfläche erzeugen kann. Dafür ist die Entwicklung einer Prototypenanlage zum elektrolytischen Plasmapolieren von Rohrinnenflächen mit entsprechenden Werkzeugen notwendig. Der allgemeine Aufbau einer EPP-Anlage ist in Abbildung 2.15 dargestellt. Dieser Aufbau muss dementsprechend weiterentwickelt und angepasst werden [88]. Des Weiteren müssen Prozessparameter gefunden werden, welche das elektrolytische Plasmapolieren von Rohrinnenoberflächen bei konstanten Oberflächengüten ermöglichen. Dazu werden diverse charakteristische Parameter, wie das angelegte elektrische Potential, die effektive Polierdauer, die Elektrolyttemperatur, die elektrische Leitfähigkeit, der pH-Wert usw., angepasst und die Oberflächen charakterisiert [89]. In Abbildung 3.1 ist der Aufbau einer Prototypenanlage zum Rohrinnenoberflächenpolieren schematisch dargestellt.

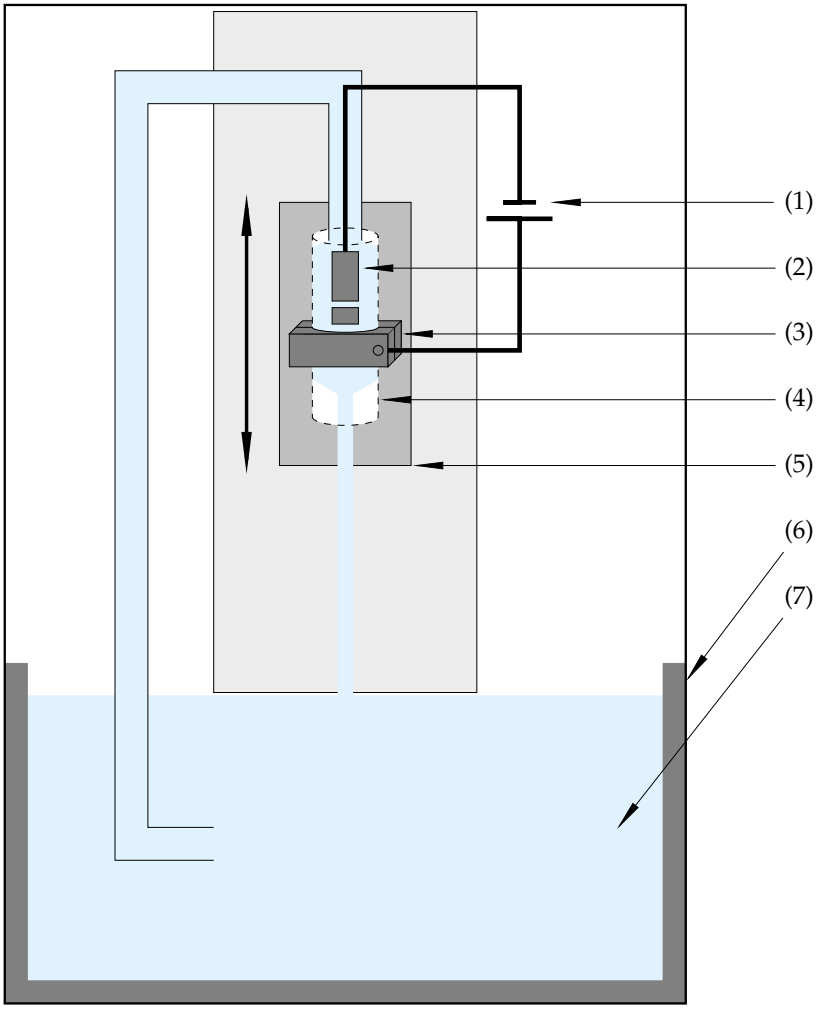


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung der Prototypenanlage [88].

Über einen Polierkopf (2) wird der Elektrolyt mit Hilfe eines Pumpensystem aus der Elektrolytwanne (7) in das Rohr (4) gepumpt. Durch das angelegte elektrische Potential (1) soll in dem durch eine Halterung (3) befestigten Rohr (4) ein Plasma gezündet und durch den Spindelantrieb (5) das Rohr in vertikaler Richtung verfahren werden können. In der nachfolgenden Tabelle 3.1 werden alle Komponenten der Prototypenanlage aufgezählt.

Tabelle 3.1: Kernkomponenten der Prototypenanlage zum Plasmapolieren von Rohrinnenoberflächen.

Nummer	Kernkomponenten
(1)	Gleichspannungsquelle
(2)	Polierkopf
(3)	Rohrhalterung
(4)	Probe bzw. Werkstück (Rohr)
(5)	vertikaler Spindelantrieb
(6)	Elektrolytwanne
(7)	Elektrolyt

In Anlehnung an Abbildung 3.1 setzt sich die Prototypenanlage einschließlich aller baulichen Forderungen sowie den anlagenspezifischen Prozessparameter wie folgt zusammensetzt:

Anlagengestell und Aufbau

Die gesamte Prototypenanlage (exklusive dem elektrischen Schaltschrank für die Steuer- und Leistungselektronik) steht in einem Kunststoffbecken, das die Gesamtmenge des Elektrolyten bei einem möglichen Auslaufen aus der Anlage fassen kann. Der gesamte Prozess des elektrolytischen Plasmapolierens findet in einer geschlossenen Kabine statt, welche über die gesamte Bearbeitungszeit nicht geöffnet werden kann. Des Weiteren wird ein Spültisch installiert, welcher der Ablage und Reinigung der Proben dient.

Elektrolytwanne

Die Prototypenanlage zum elektrolytischen Plasmapolieren von Rohrinnenoberflächen verfügt über eine Elektrolytwanne aus Edelstahl 1.4301. Die Abmaße der Elektrolytwanne betragen circa 1,5 m $\times$ 0,8 m $\times$ 1,0 m mit einem Fassungsvermögen von circa 200 l. Im unteren Bereich

werden drei Rohrhülsen aus Edelstahl 1.4301 mit entsprechenden Keramikheizkörpern untergebracht, die eine Gesamtheizleistung von circa 10 kW aufweisen. Eine Temperaturregelung im Bereich von ±3 °C ist gegeben. Eine Kühlung für den Elektrolyten ist nicht vorgesehen.

Elektrolytpumpe

Die Prototypenanlage soll mindestens zwei Rohre gleichzeitig elektrolytisch plasmapolieren können und verfügt somit über zwei Polierköpfe. Die Kathodenkontaktierung der Polierköpfe erfolgt über Edelstahllitzen, die in die Elektrolytzufuhr integriert werden. Jeder Polierkopf wird durch eine eigene Pumpe versorgt. Die Pumpen werden über einen Frequenzumrichter angesteuert, in isolierter Ausführung geliefert und galvanisch vom Motor getrennt. Jede Pumpe ist für ein Volumenstrom von $0{,}5\,\mathrm{l\,min^{-1}}$ bis $5{,}0\,\mathrm{l\,min^{-1}}$ mit einer maximalen Schwankung von ±10 % ausgelegt und arbeitet pulsationsarm. Des Weiteren kann der Volumenstrom über die Pumpe bzw. über Drosselklappen oder elektrische Ventile geregelt werden. Zum Schutz der Pumpen wird in jeden Kreislauf ein Rückschlagventil verbaut, um ein Trockenlaufen der Pumpen zu verhindern. Weiterhin sind alle Rohrleitungen durch Schaumstoffdämmung gegen Wärmeverlust geschützt. Das Elektrolytbecken verfügt über eine weitere Pumpe, die zum Abpumpen des verbrauchten Elektrolyten verwendet werden kann. Diese kann durch einen pneumatischen Drei-Wege-Kugelhahn zugeschaltet werden. Zum Ablassen des Pumpensumpfes wird ein weiterer pneumatischer Kugelhahn installiert, der eine vollständige Entleerung der Elektrolytwanne ermöglicht.

Absaugung

Durch die während des elektrolytischen Plasmapolierens entstehenden Gase ist eine Absauganlage notwendig. Die Absaughaube wird direkt über der Poliereinheit installiert. Diese ist so konstruiert, dass das kondensierte Wasser soweit wie möglich wieder vollständig in die Anlage zurückgeführt wird. Über eine Außenkonsole werden alle nicht kondensierten Gase aus der Prototypenanlage abgesaugt. Die gesamte Anlage wird dem Abgasaufkommen entsprechend angepasst.

Antriebe und Werkstückhalterung

Der Hubschlitten, an dem die Edelstahlrohre befestigt sind, wird über einen Vertikalantrieb in Form einer Spindelantriebsachse mit einem maximalen Hub von 600 mm bewegt. Die Verfahrwege sind über eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) frei einstell- und jederzeit

ablesbar. Zur weiteren Kontrolle ist im Außenbereich, neben dem Hubschlitten, ein optisches Messsystem in Form eines Maßbandes installiert. Die maximale Hub- bzw. Senklast beträgt 5 kg. Die Geschwindigkeiten sind im Bereich von 0,5 mm s^{-1} bis 5,0 mm s^{-1} frei einstellbar.

Der Hubschlitten verfügt über eine Vorrichtung zur Aufnahme von mindestens zwei Rohren. Die Vorrichtung fasst unterschiedliche Rohrdurchmesser und ist leicht wechselbar. Die Hub- und Senkbewegungen erfolgen gleichmäßig und ohne Vibrationen. Die Polierköpfe werden über starre Kunststoffrohre angeschlossen, um ein Verkanten oder Verbiegen bei Hitze und Bewegung zu vermeiden.

Das gesamte System aus Spindelachsenantrieb und Hubschlitten ist über ein Drehlager manuell einstellbar. Der Schwenkbereich liegt zwischen −45° und 45° und wird in der jeweiligen Position über eine mechanische Vorrichtung arretiert und angezeigt (Skala). Damit kann eine Schräglage des Poliersystems untersucht werden.

Polierstrom

Die Strom- und Spannungsversorgung wird in einem separaten Schaltschrank untergebracht. Der Anschlusswert beträgt 400 V bei 63 A. Die Polierspannung, die über die SPS auswählbar ist, muss variierbar am Gleichrichter des Trafos abgenommen werden können. Es werden Spannungen von 180 V, 260 V, 280 V, 300 V und 320 V Gleichspannung zur Verfügung gestellt bei einem maximalen Polierstrom von 60 A.

Messtechnik

Die Steuer- und Regelungstechnik inklusive des Bedienpanels sind in einem separaten Steuerschrank untergebracht. Es werden Temperaturen, Geschwindigkeiten, Fahrwege, Druck, Durchflussvolumina, elektrische Potentiale, Polierdauern und Absaugleistungen gesteuert. Um den Druck und Volumenstrom im System zu messen, werden Druck- und Volumenstromsensoren nach der Pumpe und in jedem Elektrolytstrang vor den Polierköpfen installiert. Die Temperaturen werden im Elektrolytbad und kurz vor der Aufteilung der Elektrolytstränge gemessen. Die gesamte Messsensorik hat eine Fehlertoleranz $<5\,\%$. Für die Messung des pH-Wertes und Leitwertes wird die Anlage mit einem Handmessgerät ausgestattet. Zusätzlich ist für die Messung des Leitwertes eine fest installierte Messung am Elektrolytbehälter vorgesehen. Die oben genannten Werte und Parameter sowie der sich einstellende Strom werden in der SPS als Paket für den jeweiligen aktuellen Vorgang gespeichert. Dieses Paket kann mittels optionaler Software durch einen PC von der SPS abgerufen werden.

3.2 Aufbau der Prototypenanlage

Die Prototypenanlage (Abbildung 3.2) besteht aus der Plasmapoliereinheit (a), die zum Auslaufschutz in eine Wanne aus Polyvinylchlorid (PVC) (g) mit ein Fassungsvermögen von 200 l gestellt wurde, einem Bedienelement zur Steuerung (e) und einem Schaltschrank (d) der Firma Rittal GmbH & Co. KG (Herborn, Deutschland), in dem die gesamte Steuer- und Leistungselektronik untergebracht ist.

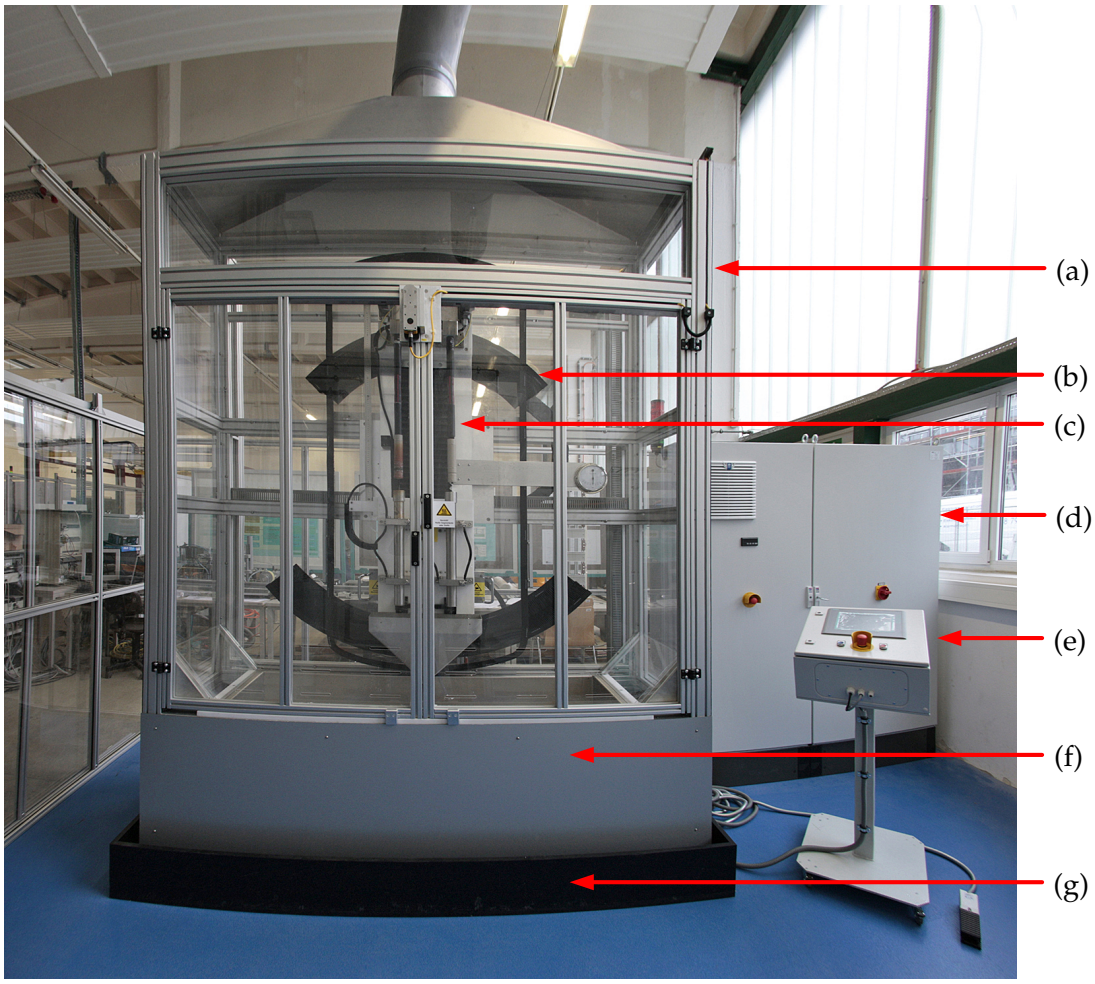


Abbildung 3.2: Prototypenanlage zum elektrolytischen Plasmapolieren von Rohrinnenoberflächen. Sie setzt sich wie folgt zusammen: (a) Plasmapoliereinheit, (b) Dreheinheit, zu verkippen um 45°, sowohl nach rechts, als auch nach links, (c) Spindelantriebsachse aus Edelstahl, (d) Schaltschrank, (e) Bedienelement zur Steuerung, (f) Elektrolytbecken aus Edelstahl 1.4301 und (g) Wanne aus Polyvinylchlorid (PVC).

Die Plasmapoliereinheit wurde mit Bosch-Profilen (Gerlingen, Deutschland) zusammengebaut und besteht unter anderem aus einem Elektrolytbecken (f) aus Edelstahl 1.4301 mit einem Fassungsvermögen von 200 l. In dem Becken ist zur Prozessüberwachung und Regelung ein Einschraubtemperaturfühler PT100 der Firma FuehlerSysteme eNET International GmbH (Nürnberg, Deutschland), eine Leitfähigkeitsmesszelle LF4633-C0,4-G14-00 der Firma GHM Messtechnik GmbH (Remscheid, Deutschland) sowie ein Füllstandsgrenzschalter Liquiphant T FTL20 der Firma Endress+Hauser Messtechnik GmbH & Co. KG (Reinach, Schweiz) verbaut. Dadurch ist es möglich, die Prozesstemperatur zu regeln und die elektrische Leitfähigkeit des Elektrolyten während des Polierprozesses zu dokumentieren. In das Becken wurden drei Rohrhülsen eingearbeitet. Durch Keramikheizkörper der Firma Thomas Elektrowärme GmbH (Schmölln, Deutschland), die eine Gesamtheizleistung von 10,5 kW bei 400 V aufweisen, kann der Elektrolyt auf die notwendige Prozesstemperatur erwärmt werden. Die Anlage wurde so konzeptioniert, dass ein oder bei Bedarf zwei Rohre gleichzeitig elektrolytisch plasmapoliert werden können. Jeder Polierkopf wird von einem eigenen Kreislauf versorgt und verfügt über eine Pumpe vom Typ K21R 63 K2 TPM der Firma Stevens Pumpen- & Mischtechnik (Friedrichsdorf, Deutschland), über einen Edelstahlfilter, der ausgebaut und gereinigt werden kann, sowie einen Durchflussmesser FCH-midi-PVDF der Firma B.I.O-TECH e.K. (Vilshofen an der Donau, Deutschland) und einen Druckmessumformer SITRANS P200 der Siemens AG (München, Deutschland). Der Elektrolyt wird über ein isoliertes Rohrsystem zum kathodisch kontaktierten Polierkopf gepumpt, wo er austritt und die Innenflächen des anodisch gepolten Rohres benetzt. Das anodisch gepolte Rohr wird über eine eingehauste Spindelantriebsachse aus Edelstahl (c) der Firma RK Rose+Krieger GmbH (Minden, Deutschland), die von einen Servomotor vom Typ EMMS-AS-70-S der Firma Festo Vertrieb GmbH & Co. KG. (Esslingen am Neckar, Deutschland) angetrieben wird, in vertikaler Richtung verfahren. Sowohl die verbauten Pumpen als auch der Motor werden über Frequenzumrichter Sinamics G120 DP der Siemens AG angesteuert. Der Polierkopf ist fest und wird während des Prozesses nicht bewegt. Zusätzlich wurde in die Anlage eine Dreheinheit (b) integriert, um die gesamte Poliereinheit inklusive Elektrolytzufuhr über einen Zahnkranz um 45° sowohl nach rechts als auch nach links zu verkippen. Die Dreheinheit kann über einen Fußschalter 3SE29 von der Siemens AG entriegelt und nach dem Erreichen der gewünschten Schrägstellung verriegelt werden. Zur Verdeutlichung dient hierbei Abbildung 3.3. Es sind zwei Edelstahlrohre (g) in die entsprechenden Halterungen (f) eingespannt und fixiert. Diese Halterungen sind durch das Kabel (e) elektrisch kontaktiert (Anode). Der bereits installierte Polierkopf (d) wird über die Elektrolytzufuhr (a) mit Elektrolyt aus der Wanne (h) versorgt. Der Polierkopf ist durch ein weiteres Kabel (b) elektrisch kontaktiert (Kathode). Nach dem Zuschalten des elektrischen Potentials wird der Elektrolyt über die Pumpen in das Rohr gepumpt, ein Plasma gezündet. Das Rohr wird anschließend durch den Spindelantrieb (c) verfahren.

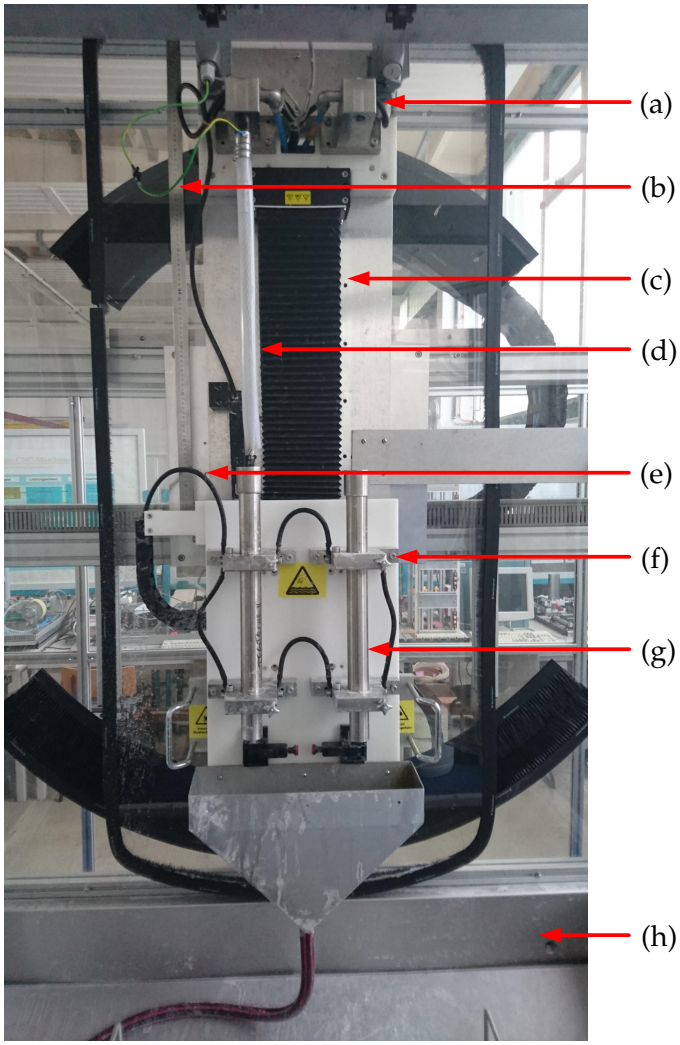


Abbildung 3.3: Detailansicht der Prototypenanlage zum elektrolytischen Plasmapolieren von Rohrinnenoberflächen. Sie setzt sich wie folgt zusammen: (a) Elektrolytzufuhr, (b) Polierkopfkontaktierung, (c) Spindelantriebsachse aus Edelstahl, (d) Polierkopf, (e) anodische Kontaktierung der Halterung, (f) Halterungen, (g) befestigtes Edelstahlrohr und (h) Elektrolytbecken aus Edelstahl 1.4301.

Des Weiteren wurde ein Transformator mit Brückengleichrichter Typ DGS der Firma SBA-TrafoTech GmbH (Heiligenstadt, Deutschland) mit einer Maximalleistung von 19,2 kW installiert, der Spannungen von 180 V, 260 V, 280 V, 300 V und 320 V bei einem maximalen Prozessstrom von 60 A bereitstellen kann. Der elektrische Strom, der während des elektrolytischen Plasmapolierens fließt, kann für jedes Rohr separat über einen Shuntwiderstand der Firma Hobut (Walsaal, England) mit entsprechendem Shunt-Trennverstärker DS7200 AG 51-01 von der DRAGO Automation GmbH (Berlin, Deutschland) ermittelt werden. Über der gesam-

ten Plasmapoliereinheit wurde eine Absaugung installiert, um die bei der in Kapitel 2.4.2.4 beschriebenen Entwicklung von Wasser- und Sauerstoff entstehenden Gase während des elektrolytischen Plasmapolierens zu entfernen. Während des Polierens ist es nicht möglich, die Türen der Prototypenanlage zu öffnen und die Rohre zu berühren, da diese über ein Magnetverschluss geschlossen gehalten werden.

Steuerung und Betrieb

Gesteuert wird die Prototypenanlage über das in Abbildung 3.2 dargestellte Bedienpult (e). Dieses besteht aus dem 10 Zoll Touchdisplay MP277 von der Siemens AG sowie einem Notaus und einem manuellen Stopptaster. Das Touchdisplay ist über einen Bootloader in der Lage, direkt mit der verbauten Siemens SPS Simatic S7-300 zu kommunizieren, über welche die gesamte Prototypenanlage gesteuert wird. Alle Prozessparameter werden dabei von der SPS aufgenommen und im Sekundentakt dokumentiert.

In der Tabelle 3.2 sind die anlagenspezifischen Prozessparameter aufgezählt. Zu den wichtigsten Parametern zählen die Prozesszeit, die Elektrolyttemperatur, die Achsengeschwindigkeit, die Anzahl der Hübe und die angelegte elektrische Potentialdifferenz.

Tabelle 3.2: Auflistung der anlagenspezifischen Prozessparameter.

Prozessparameter	Parametergrenzen
Prozesszeit	bis zu 9999 s
Elektrolyttemperatur	bis zu 99 °C
Volumenstrom	0,1 l min^{-1} bis 5,0 l min^{-1}
Achsengeschwindigkeit	0,0 mm min^{-1} bis 20,0 mm min^{-1}
Polierbereich	0 mm bis 500 mm
elektrische Potentialdifferenz	180 V, 260 V, 280 V, 300 V, 320 V
Anzahl der Hübe	1 bis 99
Winkel der Dreheinheit	−45° bis 45°

3.3 Bewertung der Prototypenanlage

Die Prototypenanlage verfügt, wie in Abbildung 3.1 zu erkennen, über einen Hubschlitten, der zwei Rohre aufnehmen und über einen Spindelantrieb verfahren werden kann. Die Achsengeschwindigkeit ist zwischen 0,0 mm min^{-1} bis 20,0 mm min^{-1} frei wählbar (siehe Tabelle 3.2).

Weiterhin können zwei Polierköpfe verbaut und somit zwei Rohre gleichzeitig bearbeitet werden, der maximale Polierbereich beträgt 500 mm. Jeder einzelne Polierkopf wird über einen eigenen Versorgungsstrang mit separater Pumpe mit einem Volumenstrom von 0,1 l min^{-1} bis 5,0 l min^{-1} mit Elektrolyt versorgt. Zur Steigerung der Temperaturstabilität fasst die Elektrolytwanne entgegen dem Pflichtenheft 200 l. Der gesamte Versorgungsstrang wird mit Schaumstoffdämmung gegen Wärmeverlust geschützt. Durch die drei integrierten Rohrhülsen mit Keramikheizkörpern können Elektrolyttemperaturen von bis zu 99 °C erreicht werden. Die Steuer-, Leistungs- und Messelektronik wird in einem Schaltschrank untergebracht. Weiterhin können Spannungen von 180 V, 260 V, 280 V, 300 V und 320 V bei einem maximalen Strom von 63 A bereitgestellt werden. Die gesamte Prototypenanlage lässt sich über ein Touchdisplay steuern. Ein Vergleich mit den in Kapitel 3.1 geforderten Anforderungen aus dem Pflichtenheft zeigt, dass somit alle Forderungen umgesetzt wurden.

3.4 Polierkopfentwicklung

Beim klassischen, in einem Elektrolytbecken durchgeführten, Plasmapolierprozess können lediglich die Rohraußenoberflächen poliert werden. Der Polierkopf ist ein notwendiges Werkzeug, um das elektrolytische Plasma an der Rohrinnenoberfläche zu erzeugen. In Tabelle 3.3 sind die Komponenten des zum Zwecke des elektrolytischen Plasmapolieren entwickelten Polierkopfes aufgelistet. Die nachfolgende Abbildung 3.4 zeigt eine schematische Darstellung des patentrechtlich geschützten Polierkopfes [90].

Tabelle 3.3: Kernkomponenten des Polierkopfes zum elektrolytischen Plasmapolieren.

Nummer	Komponenten
(1)	Elektrolytzufuhr
(2)	Metallischer Kern aus Edelstahl 1.4301 (Kathode)
(3)	Isolator aus Polyetheretherketon (PEEK)
(4)	Einstellbarer Spalt des Polierkopfes mit einer Plasmaentladung (gelb)
(5)	Rohr (Anode) vertikal verfahrbar
(6)	Abstand zwischen dem Isolator und der Rohrinnenwand

Die Aufgabe des Polierkopfes besteht darin, den für das EPP notwendigen Elektrolyten in das Rohrinnere zu transportieren und somit eine dauerhafte und gleichmäßige Benetzung der Oberfläche über den gesamten Bearbeitungszeitraum zu gewährleisten. Gleichzeitig stellt der

Polierkopf die Kathode dar. Durch Anlegen einer elektrischen Potentialdifferenz zwischen dem Polierkopf und dem Rohr kann ein elektrolytisches Plasma gezündet werden und ein lokaler Materialabtrag der Innenoberflächen erfolgen.

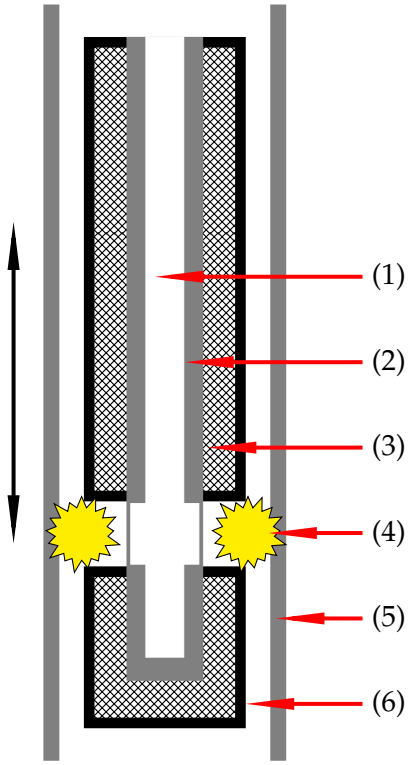


Abbildung 3.4: Schematische Darstellung des Polierkopfes [89]. Dieser setzt sich wie folgt zusammen: (1) Elektrolytzufuhr, (2) metallischer Kern aus Edelstahl 1.4301 (Kathode), (3) Isolator aus Polyetheretherketon (PEEK), (4) einstellbarer Spalt des Polierkopfes mit einer Plasmaentladung (gelb), (5) Rohr (Anode) vertikal verfahrbar und (6) Abstand zwischen dem Isolator und der Rohrinnenwand

Wie aus Tabelle 3.3 ersichtlich, besteht der Polierkopf aus einem metallischen Kern aus Edelstahl 1.4301. Am oberen Ende des Metallkerns befindet sich ein Schlauchanschluss aus PVC, über den der Polierkopf mittels eines Schlauches an der Elektrolytaustrittsöffnung befestigt wird, die ebenfalls über einen Schlauchanschluss verfügt. Gleichzeitig wird der Polierkopf über ein separat mitgeführtes Kabel im Schlauch an den Metallkern anodisch kontaktiert. Zur Sicherheit wird ein Teil der beiden Schlauchanschlüsse, wie auch der Schlauch selbst, mit einem Schrumpfschlauch überzogen, der im Hochspannungsbereich verwendet wird. Damit es während des elektrolytischen Plasmapolierprozesses nicht zur Kontaktierung des anodisch gepolten Rohres und des kathodisch gepolten Metallkerns kommt, wird der Kern,

der ein Außengewinde besitzt, mit einem oberen und einem unteren Isolator mit entsprechend dimensionierten Abstandshaltern versehen. Gleichzeitig kann über die Außengewinde am Metallkern ein definierter variabler Abstand bzw. die Breite des Polierspaltes h_{gap} zwischen der oberen und unteren Isolierung eingestellt werden. Der Polierspalt h_{gap} kann von 0,5 mm bis 10 mm variiert werden. Dies wiederum hat einen maßgeblichen Einfluss auf die benetzte Rohrinnenfläche. In Abbildung 3.5 ist beispielhaft der Elektrolytaustritt aus einem 1 mm großen Polierspalt bei einem Volumenstrom von 5 l min^{-1} dargestellt.

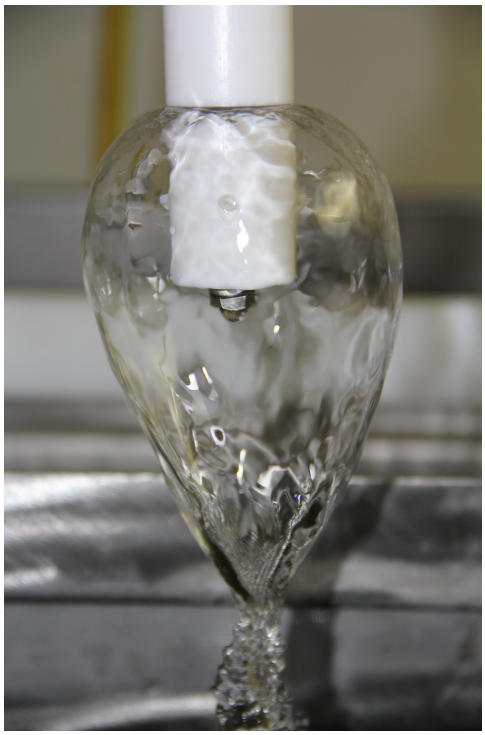


Abbildung 3.5: Elektrolytaustritt bei einem Spalt des Polierkopfes von circa 1 mm.

In Abhängigkeit vom gewählten Volumenstrom V und der Breite des Polierspalts h_{gap} bildet sich ein Flüssigkeitsschirm aus. Dadurch wird sichergestellt, dass das gesamte Rohr am Spalt des Polierkopfes flächig mit dem Elektrolyten benetzt wird. Weiterhin wird über Abstandshalter am Isolator ein Verkippen des Polierkopfes im Rohr verhindert. Der entwickelte Polierkopf hat einen Gesamtdurchmesser von 36 mm inklusive Abstandhaltern und ist für Rohre mit einem Durchmesser von circa 42 mm geeignet. Der Abstand des PEEK-Isolators des Polierkopfes zur Rohrinnenfläche beträgt bei Rohren mit einem Durchmesser von 42,3 mm und einer Wandstärke von 2 mm circa 1 mm.

4 Material und Methoden

In diesem Kapitel wird die Herstellung und Charakterisierung des Elektrolyten zum elektrolytischen Plasmapolieren von Edelstahlrohren sowie die durchgeführte Vor- und Nachbereitung der Proben erläutert, die vor jedem Poliergang notwendig sind. Dabei werden auch die verwendeten Edelstahlrohre genauer charakterisiert. Zum Abschluss wird eine ausführliche Durchführung der Experimente und deren Auswertung dargelegt. Dabei stehen einige der im Kapitel 3.2 aufgezählten Prozessparameter, wie z. B. die elektrische Potentialdifferenz, die Bearbeitungsgeschwindigkeit, die Spaltbreite des Polierkopfes und die effektive Polierdauer, im Mittelpunkt der Betrachtung.

4.1 Herstellung und Charakterisierung des Elektrolyten

Die Konzentration c der Elektrolytlösung lässt sich nach Gleichung 4.1 bestimmen und beschreibt das Verhältnis des Massenanteils des gelösten Stoffes m_{Stoff} in der Masse der Gesamtlösung $m_{Lösung}$:

$$c = \frac{m_{Stoff}}{m_{Lösung}} \cdot 100\,\%. \tag{4.1}$$

Die elektrische Leitfähigkeit wird mit dem Handmessgerät SevenGo Conductivity meter SG3 der Firma Mettler-Toledo GmbH (Giessen, Deutschland) mit der Leitfähigkeitsmesszelle InLab 738 mit einem Messbereich von 0,01 $\mathrm{mS\,cm^{-1}}$ bis 1000 $\mathrm{mS\,cm^{-1}}$ und einem Temperaturbereich von 0 °C bis 100 °C bestimmt. Da die Leitfähigkeitsmessung stark temperaturabhängig ist, werden alle Messungen auf eine Referenztemperatur bezogen, die üblicherweise bei 20 °C oder 25 °C liegt [91]. Der dafür notwendige lineare Temperaturkoeffizient α wird nach Gleichung 4.2 bestimmt.

$$\alpha = \frac{(\kappa_{T_2} - \kappa_{T_1})}{(T_2 - T_1) \cdot \kappa_{T_1}} \cdot 100 \tag{4.2}$$

Da die elektrische Leitfähigkeit über einen größeren Temperaturbereich ein nicht durchgehend lineares Temperaturverhalten aufweist, empfiehlt die Mettler-Toledo GmbH α im Bereich der geplanten Prozesstemperatur zu ermitteln. Vor Beginn der Messung wird das Handmessgerät

ohne Temperaturkoeffizient mit einer Standardlösung, die eine elektrische Leitfähigkeit von 12,88 mS cm^{-1} aufweist, bei 25 °C kalibriert. Nach der Kalibrierung mit der Standardlösung wird die elektrische Leitfähigkeit κ_{T_i} für zwei Temperaturen T_1 und T_2 gemessen und mit Hilfe von Gleichung 4.2 der lineare Temperaturkoeffizient bestimmt. Dieser Koeffizient wird dann sowohl im Handmessgerät als auch in der Steuereinheit des Leitfähigkeitsmesssystems der Prototypenanlage eingespeichert, so dass sich die im Folgenden gemessenen und angegebenen elektrischen Leitfähigkeiten immer auf eine Referenztemperatur von 25 °C beziehen. Die Mettler-Toledo GmbH gibt dabei einen Temperaturkoeffizientenbereich für verschiedene Lösungen an (siehe Tabelle 4.1).

Tabelle 4.1: Temperaturkoeffizientenbereich für verschiedene Lösungen.

	Lösung	Temperaturkoeffizient α in %/°C
(1)	Säuren	von 1,0 bis 1,6
(2)	Basen	von 1,8 bis 2,2
(3)	Trinkwasser	von 2,0
(4)	Reines Wasser	von 2,3 bis 7,4

In Anlehnung an Nestler, Zeidler und Wang [3, 78, 92] sowie die Patente zum elektrolytischen Plasmapolieren [72, 90, 93] wird der Elektrolyt wie folgt hergestellt: Zu Beginn wird das Elektrolytbecken mit 200 l destilliertem Wasser befüllt. Anschließend wird das Wasser auf circa 80 °C erwärmt und schrittweise rund 15 kg Ammoniumsulfat ($(NH_4)_2SO_4$) beigefügt. Das entspricht einer 7 Gew.–%-Lösung. Des Weiteren werden circa 1,2 l einer 25 %-igen Schwefelsäure (H_2SO_4) hinzugefügt, um eine pH-Wertreduzierung auf circa 3 zu erreichen, da laut Nestler [3] damit ein stabileres Plasma gewährleistet wird. Nachdem alle Komponenten in Lösung sind, werden sowohl der lineare Temperaturkoeffizient, die elektrische Leitfähigkeit als auch der pH-Wert der Lösung bestimmt. Der hergestellte Elektrolyt hat einen linearen Temperaturkoeffizienten α von circa 1,69 %/°C, eine elektrische Leitfähigkeit im Bereich von 100 mS cm^{-1} bis 120 mS cm^{-1} und einen pH-Wert von 3 bei einer Elektrolyttemperatur von 80 °C bis 85 °C.

4.2 Charakterisierung der Oberflächenrauheit

Zur Charakterisierung der arithmetischen Oberflächenrauheit *Sa* wird das beschriebene berührungslose konfokale Laser-Scanning-Mikroskop LEXT OLS 4000 von Olympus (Tokyo, Japan) verwendet (Abschnitt 2.1.3.2). Bei allen Messungen kommt aufgrund der Rohrkrümmung das

Weitwinkelobjektiv LMPLFLN50X/0.5 mit einer 50ig-fachen Vergrößerung, einem Arbeitsabstand von 10,6 mm und einer numerischen Apertur von 0,5 zum Einsatz. Das Standardobjektiv weist einen Arbeitsabstand von 0,1 mm bei einer 50ig-fachen Vergrößerung auf. Aufgrund der Rohrkrümmung ist dieser Arbeitsabstand deutlich zu gering, was zu einer Beschädigung des Objektivs führen würde. Die Scanfläche beim genutzten Weitwinkelobjektiv beträgt 258 µm × 250 µm. Es muss berücksichtigt werden, dass es bei den optischen Messverfahren (DIN EN ISO 25178-1:2016-12), anders als bei den taktilen Messverfahren, keine Empfehlung zu der zu wählenden Grenzwellenlänge λc und damit keine Festlegung der Filterlänge abhängig von Periodenlänge bzw. abhängig von den zu erwartenden Rauheiten gibt. Vielmehr wird sich an der Norm DIN EN ISO 4288:1998-04 für taktile Messverfahren orientiert. Die Grenzwellenlänge λc bei der kleinsten Messstrecke von 400 µm beträgt 80 µm. Kleinere Messstrecken sind in der Norm für taktile Messerverfahren nicht aufgeführt. Da die Messstrecke beim CLSM mit 258 µm deutlich geringer ist, wird bei den zu erwartenden arithmetischen Oberflächenrauheiten *Sa* im zwei bis vierstelligen nm-Bereich eine Grenzwellenlänge λc von 25 µm gewählt.

4.3 Probenvorbereitung, Nachbereitung und Versuchsdurchführung

Sowohl für die verschiedenen Versuche als auch für die Parameterstudie werden ausschließlich Edelstahlproben verwendet. Neben dem Edelstahl 1.4301 kommt auch 1.4404 zum Einsatz. Beide Edelstähle unterscheiden sich marginal in der chemischen Zusammensetzung. Vaňa z. B. verwendete den Edelstahl 1.4310, Wang 1.4301 und Nestler einen Cobalt-Chrom-Edelstahl [3, 77, 78]. Der Elektrolyt aus Abschnitt 4.1 wird allgemein für Edelstahl verwendet. Dabei wird beim EPP-Verfahren nicht zwischen den einzelnen Edelstahlsorten unterschieden, da sich die chemische Zusammensetzung der Werkstoffe bis auf einige Elemente im einstelligen Prozentbereich nur marginal unterscheidet. In Abhängigkeit von der Herstellungsmethode (siehe 2.14) werden bei den metallischen Werkstücken unterschiedliche Oberflächengüten und somit auch unterschiedliche Ausgangsoberflächenrauheiten erreicht. Welchen Einfluss diese auf die erreichbaren Oberflächenrauheiten elektrolytisch plasmapolierter Werkstücke haben, wird im Verlauf erklärt.

Im folgenden Abschnitt wird die Durchführung der einzelnen Experimente näher erläutert. Folgende Versuche wurden durchgeführt:

(i) Vorversuch zum Vergleich elektropolierter und elektrolytisch plasmapolierter Proben,

(ii) Nachweis über die generelle Funktionsfähigkeit des entwickelten Polierkopfes,

(iii) Einfluss der Bearbeitungsgeschwindigkeit v_b auf die Oberflächenrauheit,

(iv) Einfluss der Spaltbreite h_{gap} des Polierkopfes auf die Oberflächenrauheit,

(v) Einfluss der effektiven Polierdauer t_{ept} auf die Oberflächenrauheit.

Im Vorversuch (i) werden zum Vergleich der beiden elektrolytisch oberflächenabtragenden Fertigungsverfahren (Elektropolieren und elektrolytisches Plasmapolieren) Edelstahlproben aus 1.4301 mit den Abmaßen 50 mm × 50 mm × 2 mm poliert. Ziel des Vorversuches ist der Vergleich erreichbarer Rauheiten elektro- und plasmapolierter Oberflächen. Weiterhin dienen die Rauheitswerte der polierten Außenoberflächen als Referenz und somit als Vergleichsgröße zu experimentellen Ergebnissen zum Innenrohrpolieren. Die elektropolierten metallischen Werkstücke werden von der METANO Velten Metalltechnik GmbH (Velten, Deutschland) und die plasmapolierten von der Plasotec GmbH bearbeitet. Bei beiden Verfahren werden die Standardelektrolyte sowie für den Werkstoff typische Prozessparameter gewählt (siehe Kapitel 2.4.1 und 2.4.2). Beim Elektropolieren besteht der Elektrolyt aus circa 45 % Phosphorsäure, 35 % Schwefelsäure und 20 % Wasser. Dabei wird in einem Temperaturbereich von 40 °C bis 60 °C und einer elektrischen Potentialdifferenz von 6 V bis 15 V poliert. Beim EPP-Verfahren wird eine 6 Gew.–% Ammoniumsulfatlösung verwendet. Die metallischen Werkstücke werden bei einer Elektrotemperatur von 85 °C und mit einer elektrischen Potentialdifferenz von circa 300 V plasmapoliert. Die Proben werden den Fertigungsabläufen (siehe Kapitel 2.16 und 2.23) entsprechend vorbehandelt und nach dem Poliervorgang gereinigt. Die maximale effektive Polierdauer t_{ept} beträgt 1500 s. Jede einzelne Probe wird anschließend mittels des CLSM charakterisiert, indem jeweils sechs Punkte gemessen und die arithmetischen Oberflächenrauheiten *Sa* errechnet und grafisch dargestellt werden.

Im darauffolgenden Versuch (ii) soll der Nachweis für die Funktionsfähigkeit des entwickelten Polierkopfes erbracht werden. Es sollen Edelstahlstreifen aus 1.4404 mit einer Breite von circa 5 mm und einer Länge von circa 300 mm dem elektrolytischen Plasmapolierfertigungsablauf unterzogen werden (siehe Abbildung 4.1). Die Streifen (c) werden in ein 250 mm langes Kunststoffrohr (d) eingeführt und mit Schellen (a) sowohl am oberen als auch dem unteren Ende des Rohres befestigt und anschließend elektrisch kontaktiert. Um den Prozess des Plasmapolierens beobachten und qualitativ beurteilen zu können, wird in diesem Versuch Edelstahlstreifen ein transparentes Kunststoffrohr verwendet.

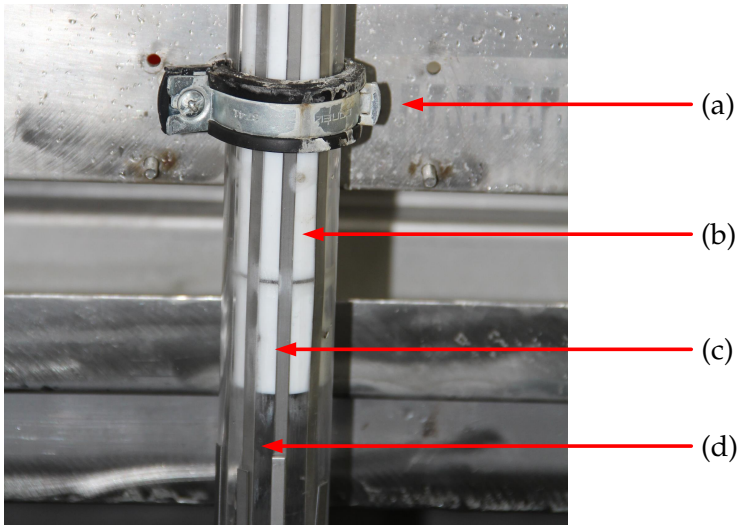


Abbildung 4.1: Edelstahlstreifen (c) und Polierkopf (b) im transparenten Rohr (d) an einer Schelle (a) befestigt.

Nach dem Polierprozess werden die Streifen mit Wasser gereinigt. Im Anschluss wird der Spalt des Polierkopfes h_{gap} (b) von 1 mm bis 10 mm in 1 mm-Schritten und der Volumenstrom von $1\,\mathrm{l\,min^{-1}}$ bis $5\,\mathrm{l\,min^{-1}}$ in $1\,\mathrm{l\,min^{-1}}$-Schritten geändert. Ein stabiler Elektrolytschirm (in Abbildung 3.5) stellt sich bei einer Spaltbreite von 1 mm und einem Volumenstrom von $5\,\mathrm{l\,min^{-1}}$ ein. Über die vertikale Achse wird nach Zünden des Plasmas bei einer elektrischen Potentialdifferenz U von 300 V und einer Elektrolyttemperatur von 85 °C das Rohr 5 mm vertikal mit einer Achsen- bzw. Bearbeitungsgeschwindigkeit v_b von $1\,\mathrm{mm\,s^{-1}}$ verfahren, um eine ausreichend große Fläche zur Oberflächencharakterisierung zu gewährleisten. Nach jedem Poliervorgang wird ein Edelstahlstreifen aus dem Rohr entfernt und die restlichen Streifen nochmals poliert. Dieser Vorgang wird insgesamt fünf Mal durchgeführt. Anschließend werden auf jedem Edelstahlstreifen, in Analogie zu Versuch (i), sechs Messpunkte aufgenommen und die Oberflächenrauheit Sa grafisch dargestellt und ausgewertet.

Alle weiteren Experimente werden in austenitischen Edelstahlrohren 1.4404 mit einer Länge von 500 mm, einem Außendurchmesser von 42,3 mm und einer Wandstärke von 2,0 mm von der Firma Dockweiler GmbH (Neustadt-Glewe, Deutschland) durchgeführt. Diese Rohre kommen unter anderem in der Medizintechnik und Lebensmittelindustrie zum Einsatz und werden aus kaltgewalztem Blech gebogen und mittels Wolfram-Inertgasschweißen (WIG) ohne Zusatzwerkstoff mit Argonschutzgas gefertigt. Die resultierende Naht wird im Anschluss über ein Pilgerschrittverfahren geglättet und weist eine Breite von circa 4,0 mm auf. Die arithmetische Ausgangslinienrauheit Ra_{max} wird von der Dockweiler GmbH angegeben und variiert je nach Charge von 0,40 µm bis 0,95 µm für die Rohrinnen- und von 0,24 µm bis 0,53 µm

für die Rohraußenoberfläche. Zum Nachweis der durchschnittlichen arithmetischen Rauheiten wird aus jedem Rohr vor Beginn der Experimente ein circa 1,5 cm bis 5 cm breites Teilstück mit einem Trennschleifer herausgetrennt, um die Ausgangsrauheit sowohl der Rohrinnen- als auch der Nahtoberfläche zu charakterisieren. Danach wird das Rohr mit Wasser gespült und anschließend mit Druckluft getrocknet. Nach Abschluss der Versuche werden die Rohre aus der Anlage entnommen, zur Entfernung der Elektrolytrückstände mit Leitungswasser gespült und anschließend mit Druckluft getrocknet. Im Anschluss werden mit einem Trennschleifer über die gesamte Rohrlänge zwei Streifen von circa 1,5 cm Breite herausgetrennt, entgratet und in maximal 11 cm große Abschnitte unterteilt. Diese schließen sowohl die Rohrinnen- als auch die Nahtoberfläche ein. Danach werden die Messbereiche mit Ethanol gereinigt, markiert und die durchschnittliche arithmetische Oberflächenrauheit Sa in Abhängigkeit der jeweiligen Prozessparameter bestimmt.

Falls nicht anders angegeben, werden für alle folgenden Versuche (iii) bis (v) die verwendeten 500 mm langen Edelstahlrohre aus 1.4404 in 30 mm-Polierabschnitte aufgeteilt. Zwischen jedem dieser Abschnitte werden 10 mm frei gelassen, um bei der Oberflächencharakterisierung die bearbeiteten Bereiche leichter voneinander unterscheiden zu können.

In Versuch (iii) wird der Einfluss der Bearbeitungsgeschwindigkeit v_b auf die Oberflächenrauheit untersucht. Im Versuch (ii) bildet der entwickelte Polierkopf bei einer Spaltbreite von 1,0 mm und einem Volumenstrom von 5 l min^{-1} bei einer Elektrolyttemperatur von 85 °C einen geschlossenen Elektrolytschirm außerhalb des Rohres aus (siehe Abbildung 3.5). Nach dem Zünden des Plasmas werden die Edelstahlstreifen elektrolytisch plasmapoliert. Beim gewählten Volumenstrom ist gewährleistet, dass während des elektrolytischen Polierens die gesamte Rohrinnenoberfläche benetzt wird. Im Versuch (iii) überquert der Polierkopf den zu polierenden Bereich von 30 mm 10-mal. Die Bearbeitungsgeschwindigkeit v_b wird bei elektrischen Potentialdifferenzen U von 260 V, 280 V und 300 V schrittweise von 0,3 mm s^{-1}, 1,0 mm s^{-1} bis auf 5,0 mm s^{-1} erhöht. Um eine Tendenz der Oberflächenrauheiten ableiten zu können, sind drei elektrische Potentialdifferenzen ausreichend, sodass beim Versuch (iii) die elektrische Potentialdifferenz von 320 V nicht betrachtet wird. Jeder unpolierte und polierte Abschnitt wird durch drei arithmetische Oberflächenrauheiten Sa charakterisiert. Der Versuch wird im Anschluss einmal wiederholt. Die sechs arithmetischen Oberflächenrauheiten werden gemittelt, ausgewertet und grafisch dargestellt.

Nachdem in Versuch (iii) der Einfluss der Bearbeitungsgeschwindigkeit im Mittelpunkt der Betrachtung steht, wird in Versuch (iv) weiterführend der Einfluss der variabel einstellbaren Spaltbreite des Polierkopfes h_{gap} auf die Prozessstabilität und damit auf die Oberflächenrauheit untersucht. Als Spaltbreiten werden zuvor 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm und 10 mm

festgelegt. Gleichzeitig wird für jede Polierspaltbreite die elektrische Potentialdifferenz von 260 V bis 320 V in 20 V-Schritten geändert. Der Volumenstrom beträgt $(5{,}0 \pm 0{,}1)\,\mathrm{l\,min^{-1}}$, als Elektrolyttemperatur wird $(85 \pm 2)\,°\mathrm{C}$ gewählt. Der Polierkopf wird 10-mal über den zu polierenden Bereich von 30 mm mit einer Bearbeitungsgeschwindigkeit von $1{,}0\,\mathrm{mm\,s^{-1}}$ geführt. Im Anschluss wird das Rohr gereinigt und zerlegt, um die durchschnittliche arithmetische Oberflächenrauheit *Sa* bestimmen zu können (Abschnitt 4.2). Zur Absicherung der Messwerte wird das Experiment einmal wiederholt. Zum Abschluss werden sowohl die unpolierten als auch die polierten Flächen mit sechs arithmetischen Oberflächenrauheiten *Sa* charakterisiert. Zum besseren Verständnis des Plasmapolierprozesses werden auch die zugehörigen durchschnittlichen Ströme ausgewertet. Bei bekannter polierter Rohrinnenoberfläche sind über die Ströme Rückschlüsse auf die Stromdichte j möglich. Die Stromdichte ist einer der charakteristischen Parameter für die Stabilität des elektrolytischen Plasmapolierprozesses.

Im folgenden Versuch (v) stehen die Anzahl der Polierdurchgänge sowie die Bearbeitungsgeschwindigkeit im Fokus der Betrachtung. In den beiden Versuchen (iii) und (iv) wird gezeigt, dass langsame Bearbeitungsgeschwindigkeiten v_b und hohe elektrische Potentialdifferenzen U für eine konstante Anzahl an Polierdurchgängen n_{v_b}, unabhängig von der Spaltbreite h_{gap} des Polierkopfes, zu geringeren durchschnittlichen arithmetischen Oberflächenrauheiten führen. Der Versuch (v) basiert auf der Hypothese, dass die beiden Faktoren, Bearbeitungsgeschwindigkeit v_b und Anzahl an Polierdurchgängen n_{v_b}, einen Einfluss auf die arithmetische Oberflächenrauheit haben; der jedoch für das Polierergebnis entscheidende Parameter ist die effektive Polierdauer, die sich nach Gleichung 4.3 ergibt. Dies bedeutet, dass geringe Bearbeitungsgeschwindigkeiten in Verbindung mit einer geringen Anzahl an Polierdurchgängen zum gleichen Ergebnis führen wie eine schnelle Bearbeitungsgeschwindigkeit mit einer hohen Anzahl an Polierdurchgängen. Dabei ist zu beachten, dass die Gleichung 4.3 nur für Bearbeitungsgeschwindigkeiten > 0 gilt.

$$t_{ept} = \frac{n_{v_b} \cdot h_{gap}}{v_b} \tag{4.3}$$

Der Versuch (v) wird zur besseren Übersicht in zwei Abschnitte aufgeteilt. Im ersten Abschnitt wird das Rohr in 14 Polierabschnitte unterteilt, wobei zur besseren Identifikation der polierten Bereiche zwischen jedem Abschnitt 10 mm frei gelassen werden. Da geschweißte Rohre verwendet werden, wird sowohl die Rohrinnenfläche als auch die Schweißnaht charakterisiert und ausgemessen. In den Versuchen (iii) und (iv) wird die Schweißnaht bewusst nicht ausgewertet, da diese Versuche dazu dienen, ein stabiles Prozessfenster für das EPP-Verfahren zu identifizieren. Als effektive Polierdauer werden die folgenden Zeiten festgelegt: 30 s, 60 s, 90 s, 120 s, 150 s, 180 s, 240 s, 300 s, 360 s, 480 s, 600 s, 900 s, 1200 s und 1500 s. Die Bearbeitungsge-

schwindigkeit v_b beträgt 0 mm s^{-1}, d. h. das Rohr wird nicht in vertikaler Richtung verfahren, somit liegt ein stationärer Prozess vor. Daher wird der Bereich im Rohr mit einer Polierspaltbreite von 1,0 mm über die gesamte Zeit elektrolytisch plasmapoliert. Der Volumenstrom beträgt $(5{,}0 \pm 0{,}1)$ l min^{-1} und die Elektrolyttemperatur T_E (85 ± 2) °C. Um einen möglichen Einfluss auf die Oberflächengüte nachzuweisen, wurden die elektrischen Potentialdifferenzen U von 260 V und 320 V gewählt. Zur statistischen Sicherheit wird der Versuch dreifach durchgeführt. Die durchschnittliche arithmetische Ausgangsrauheit Sa_0 wird jeweils an 15 Messpunkten bestimmt und anschließend gemittelt. Analog dazu wird jeder polierte Bereich mit sechs Messpunkten charakterisiert und über gleiche effektive Polierdauern gemittelt. Somit ergibt sich die durchschnittliche arithmetische Oberflächenausgangsrauheit Sa_0 aus 45 und die durchschnittliche arithmetische Oberflächenrauheit Sa aus 18 Messwerten.

Im zweiten Abschnitt wird systematisch untersucht, welchen Einfluss die effektive Polierdauer t_{ept}, die sich aus der Bearbeitungsgeschwindigkeit v_b, der Anzahl der Polierdurchgänge n_{v_b} (Anzahl wie oft das Rohr in vertikaler Richtung verfahren wird) und der gewählten Polierspaltbreite von 1,0 mm ergibt, auf die durchschnittliche arithmetische Oberflächenrauheit Sa_{v_b} hat. Da im Versuch (iii) geringe Bearbeitungsgeschwindigkeiten auch geringe durchschnittliche arithmetische Oberflächenrauheiten liefern, wird im Versuch besonderes Augenmerk darauf gelegt und die Bearbeitungsgeschwindigkeiten wie folgt gewählt: 0,3 mm s^{-1}, 0,6 mm s^{-1}, 1,2 mm s^{-1}, 2,4 mm s^{-1} und 4,8 mm s^{-1}. Es wird angenommen, dass die Spaltbreite des Polierkopfes mindestens der Höhe der polierten Rohrinnenfläche entspricht. Die Bearbeitungsgeschwindigkeiten und die Anzahl der Polierdurchgänge werden so gewählt, dass identische effektive Polierdauern entstehen. Damit ergibt sich die folgende Tabelle:

Tabelle 4.2: Anzahl an Polierdurchgängen n_{v_b} für unterschiedliche Bearbeitungsgeschwindigkeiten v_b und die daraus resultierenden effektiven Polierdauern t_{ept}.

$n_{0,3}$	1	2	3	4	5	6	8	10	12	14
$n_{0,6}$	2	4	6	8	10	12	16	20	24	28
$n_{1,2}$	4	8	12	16	20	24	32	40	48	56
$n_{2,4}$	8	16	24	32	40	48	64	80	96	112
$n_{4,8}$	16	32	48	64	80	96	128	160	192	224
t_{ept}s	3,33	6,67	10,00	13,33	16,67	20,00	26,67	33,33	40,00	46,67

Diese Versuchsreihe wird zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse, wie im ersten Abschnitt, für die elektrischen Potentialdifferenzen 260 V und 320 V durchgeführt. Dabei wird sowohl die Rohrinnenoberfläche als auch die Naht hinsichtlich der durchschnittlichen arithmetischen Oberflächenrauheiten charakterisiert und ausgewertet. Gleichzeitig wird, wie in

Versuch (iii), die durchschnittliche arithmetische Stromstärke während der Poliervorgänge ausgewertet und gemittelt, um mögliche Schwankungen in den Oberflächengüten erklären und ein besseres Verständnis über den Prozess des elektrolytischen Plasmapolierens erlangen zu können.

5 Auswertung und Diskussion

Wie in Abschnitt 3.4 beschrieben, wurde für den Prozess des Plasmapolierens von Rohrinnenoberflächen ein Polierkopf entwickelt. Durch den Einsatz dieses Polierkopfes in der Prototypenanlage (siehe Abschnitt 3.2) konnte erstmals eine metallische Rohrinnenoberfläche elektrolytisch plasmapoliert werden. Es werden nachfolgend die Ergebnisse der in Abschnitt 4.3 aufgezählten Versuche vorgestellt und mit Literaturwerten hinsichtlich der erreichbaren Oberflächengüte *Sa* verglichen.

5.1 Vergleich elektrolytischer Fertigungsverfahren

Im Versuch (i) fand ein Vergleich elektropolierter und elektrolytisch plasmapolierter Proben statt (Abschnitt 4.3). In Abbildung 5.1 sind die erreichbaren arithmetischen Oberflächenrauheiten *Sa* der bearbeiteten Oberflächen aufgezeigt.

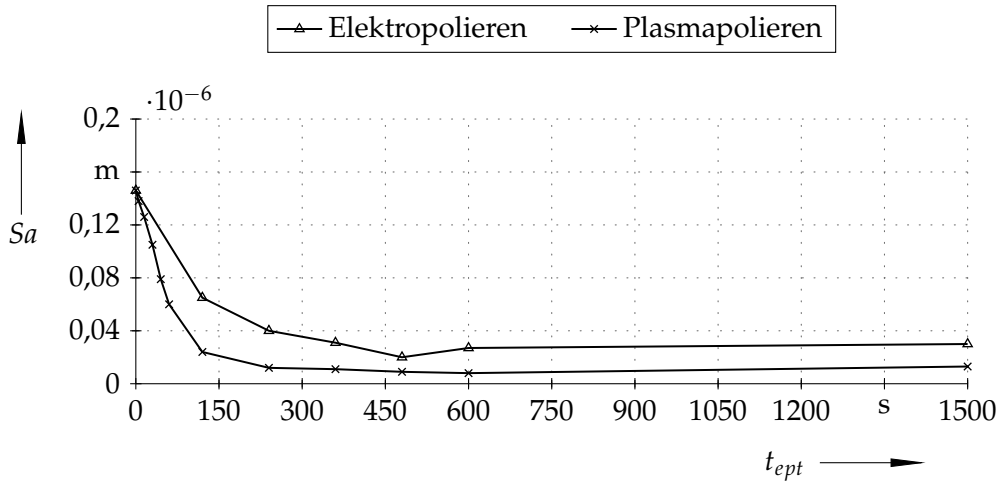


Abbildung 5.1: Durchschnittliche arithmetische Oberflächenrauheiten *Sa* über die effektive Polierdauer t_{ept} für elektropolierte und elektrolytisch plasmapolierte Proben.

Durch das elektrolytische Plasmapolieren wurden im Vergleich zum Elektropolieren geringere durchschnittliche Oberflächenrauheiten bei gleichen effektiven Polierdauern erreicht (Abbildung 5.1). Beginnend bei einer Ausgangsoberflächenrauheit von $(0{,}146 \pm 0{,}012)\,\mu m$ wurde beim Plasmapolieren nach einer Bearbeitungszeit von 120 s eine Oberflächenrauheit von $(0{,}024 \pm 0{,}001)\,\mu m$ erreicht. Beim Elektropolieren betrug die Oberflächenrauheit nach der gleichen Bearbeitungszeit $(0{,}065 \pm 0{,}004)\,\mu m$ und war somit um den Faktor drei größer als beim elektrolytischen Plasmapolieren. Bei beiden Verfahren wurden die geringsten Rauheiten nach einer effektiven Polierdauer von 480 s mit $(0{,}020 \pm 0{,}001)\,\mu m$ beim Elektropolieren bzw. 600 s mit 0,008 µm beim Plasmapolieren erreicht. Erwartungsgemäß nahm hingegen bei größeren Polierdauern die durchschnittliche arithmetische Oberflächenrauheit prozessbedingt kontinuierlich zu. Dieser Effekt liegt darin begründet, dass bei zu langer effektiver Polierdauer in den glatten Oberflächen neue Fehlstellen verursacht wurden. Diese Fehlstellen wiederum waren Angriffspunkte für das Plasma oder die beim Elektropolieren ablaufenden elektrochemischen Prozesse. Somit kam es zu einem weiteren Materialabtrag auf der Probenoberfläche. Dieser Prozess setzte beim elektrolytischen Plasmapolieren deutlich später ein als beim Elektropolieren. Durch den Versuch (i) konnte gezeigt werden, dass durch den elektrolytischen Plasmapolierprozess geringere arithmetische Oberflächenrauheiten erreicht werden können.

5.2 Nachweis der Funktionsfähigkeit des Polierkopfes

Es wurden Edelstahlstreifen in einem transparenten Rohr befestigt, in die Prototypenanlage eingespannt, elektrisch kontaktiert und poliert. In Tabelle 5.1 sind die ermittelten durchschnittlichen arithmetischen Oberflächenrauheiten Sa_n für die fünf Polierdurchgänge dargestellt.

Tabelle 5.1: Ermittelte Oberflächenrauheit Sa_n mit Standardabweichung für fünf Polierdurchgänge ($n = 5$) mit einer elektrischen Potentialdifferenz von 300 V.

n	0	1	2	3	4	5
Sa_n / µm	0,138	0,107	0,062	0,059	0,043	0,044
σ_{Sa_n} / µm	0,032	0,012	0,009	0,006	0,014	0,009

Vor dem Poliervorgang wurde der Polierkopf in das transparente Kunststoffrohr gefahren und anschließend ein Volumenstrom von $5\,l\,min^{-1}$ eingestellt. Es bildete sich ein konstanter Flüssigkeitsspiegel von ca. 10 mm über dem Spalt des Polierkopfes aus. Damit wurde sichergestellt, dass sowohl über als auch unter dem Spalt genügend Elektrolyt vorhanden war, um ein

elektrolytisches Plasma beim Zuschalten der elektrischen Potentialdifferenz zu erzeugen. Die Streifen wiesen eine Ausgangsoberflächenrauheit von $(0{,}138 \pm 0{,}032)$ µm auf. Dies entsprach annähernd der Oberflächenrauheit der Edelstahlplättchen 1.4301 mit $(0{,}146 \pm 0{,}012)$ µm aus Abschnitt 5.1, wodurch eine Vergleichbarkeit der ermittelten Oberflächenrauheiten möglich war. Bereits nach zwei Polierdurchgängen wurde die Rauheit nahezu halbiert und betrug $(0{,}062 \pm 0{,}009)$ µm. Mit zunehmender Anzahl an Polierdurchgängen änderte sich Sa_n nur gering und erreichte ein Minimum von $(0{,}043 \pm 0{,}014)$ µm bei vier Polierdurchgängen. Ein Vergleich mit den *Sa*-Werten aus dem Abschnitt 5.1 zeigt, dass eine Oberflächenrauheit von 0,107 µm, die nach einem Polierdurchgang erreicht wurde, einer effektiven Polierdauer t_{ept} von ca. 30 s entspricht. In Abbildung 5.2 sind die ermittelten Oberflächenrauheiten *Sa* für die elektrolytisch plasmapolierten Edelstahlstreifen dargestellt.

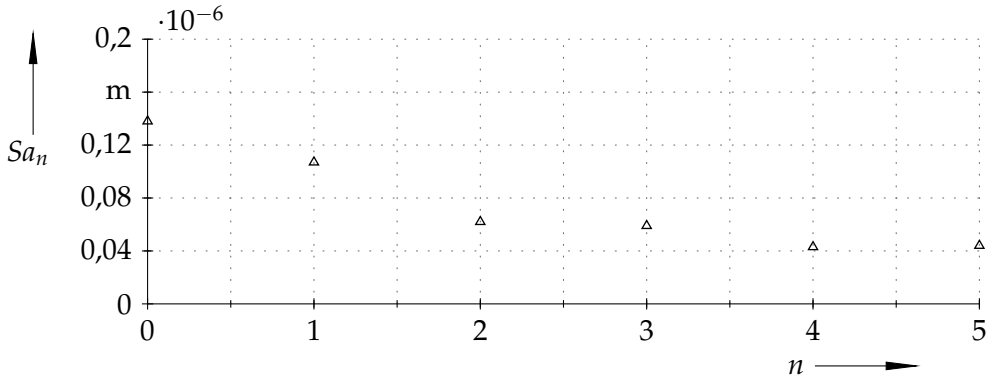


Abbildung 5.2: Sa_n in Abhängigkeit der Anzahl der Polierdurchgänge n der elektrolytisch plasmapolierten Edelstahlstreifen.

Generell konnte nachgewiesen werden, dass durch den entwickelten Polierkopf ein Plasma im Rohr erzeugt werden kann, das die Rauheit der Edelstahlstreifen reduziert. Es zeigte sich, dass die Anzahl der Polierdurchgänge n einen maßgeblichen Einfluss auf die erreichbaren Oberflächengüten hat. Je öfter über die Streifen poliert wird, desto geringer wird die arithmetische Oberflächenrauheit.

5.3 Einfluss der Bearbeitungsgeschwindigkeit v_b auf *Sa*

Im Versuch (iii) wurde der Einfluss der Bearbeitungsgeschwindigkeit v_b auf die resultierende durchschnittliche arithmetische Oberflächenrauheit *Sa* untersucht. Die Bearbeitungsgeschwindigkeit v_b wurde in drei Schritten von 0,3 mm, 1,0 mm bis auf 5,0 mm erhöht bei elektrischen Potentialdifferenzen U von 260 V, 280 V und 300 V. Die durchschnittlichen arithmetischen

Oberflächenrauheiten *Sa* mit den entsprechenden Standardabweichungen sind in Tabelle 5.2 zusammengefasst.

Tabelle 5.2: Durchschnittliche arithmetische Oberflächenrauheiten *Sa* in Abhängigkeit von der elektrischen Potentialdifferenz *U* für unterschiedliche Bearbeitungsgeschwindigkeiten v_b des Polierkopfes.

v_b / mm s^{-1}	U / V	260	280	300
5,0	Sa / µm	$0{,}281 \pm 0{,}067$	$0{,}319 \pm 0{,}075$	$0{,}277 \pm 0{,}047$
1,0	Sa / µm	$0{,}266 \pm 0{,}031$	$0{,}310 \pm 0{,}010$	$0{,}235 \pm 0{,}041$
0,3	Sa / µm	$0{,}135 \pm 0{,}028$	$0{,}153 \pm 0{,}035$	$0{,}093 \pm 0{,}029$

Abbildung 5.3 zeigt den grafischen Verlauf von *Sa* über *U* für die verschiedenen Bearbeitungsgeschwindigkeiten v_b mit einer Ausgangsrauheit Sa_0 von 0,75 µm.

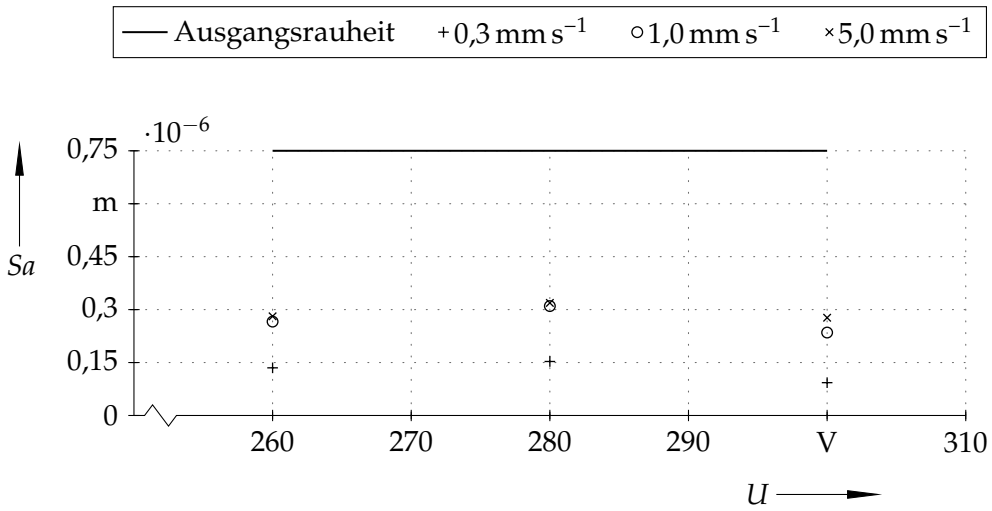


Abbildung 5.3: Durchschnittliche arithmetische Oberflächenrauheite *Sa* über die elektrische Potentialdifferenz *U* für Bearbeitungsgeschwindigkeiten v_b von 0,3 mm s^{-1}, 1,0 mm s^{-1} und 5,0 mm s^{-1}.

Durch kleine Bearbeitungsgeschwindigkeiten konnten geringere durchschnittliche arithmetische Oberflächenrauheiten erreicht werden (Abbildung 5.3). Bei einer elektrischen Potentialdifferenz von 280 V erreichte *Sa* bei 5,0 mm s^{-1} einen Wert von $(0{,}319 \pm 0{,}075)$ µm. Eine deutliche Reduzierung der Bearbeitungsgeschwindigkeit auf 1,0 mm s^{-1} bewirkte keine Verbesserung in der Oberflächenrauheit mit $(0{,}310 \pm 0{,}010)$ µm. Erst ab einer Bearbeitungsgeschwindigkeit von 0,3 mm s^{-1} wurde *Sa* mit $(0{,}135 \pm 0{,}028)$ µm deutlich reduziert. Dieser Einfluss zeigte sich bei allen gewählten Potentialdifferenzen. Dies liegt darin begründet, dass das Plasma

während des elektrolytischen Plasmapolierprozesses länger wirken konnte, um Material von der Oberfläche abzutragen. Dementsprechend war es sinnvoll, Bearbeitungsgeschwindigkeiten im Bereich von 0,3 mm s^{-1} bis 1,0 mm s^{-1} zu wählen. Des Weiteren ist deutlich zu erkennen, dass mit zunehmender elektrischer Potentialdifferenz die Oberflächenrauheit Sa bei gleicher Bearbeitungsgeschwindigkeit nahezu konstant blieb. Während die Oberflächenrauheit bei 260 V und 280 V ca. (0,275 $\pm$ 0,025) µm betrug, lag diese bei 300 V bei ca. 0,120 µm. Die geringste durchschnittliche arithmetische Oberflächenrauheit von (0,110 $\pm$ 0,020) µm wurde bei einer Bearbeitungsgeschwindigkeit von 0,3 mm s^{-1} und einer elektrischen Potentialdifferenz von 300 V ermittelt.

5.4 Einfluss der Spaltbreite h_{gap} des Polierkopfes auf Sa

Der Versuch (iv) wurde wie in Abschnitt 4.3 beschrieben durchgeführt. Die gemessenen durchschnittlichen arithmetischen Oberflächenrauheiten sowie die durchschnittliche elektrische Stromstärke während des Polierprozesses mit den zugehörigen Standardabweichungen sind in Tabelle 5.3 aufgeführt. Der Strom wurde während des gesamten Polierprozesses im Sekundentakt aufgenommen und anschließend gemittelt (Abschnitt 3.2). Über den Strom und die aktiv elektrolytisch plasmapolierte Rohrinnenoberfläche konnte die Polierstromdichte j ermittelt werden.

Tabelle 5.3: Durchschnittliche arithmetische Oberflächenrauheiten Sa und die Stromstärke I in Abhängigkeit von der elektrischen Potentialdifferenz U für Spaltbreiten h_{gap} von 2 mm bis 10 mm bei einer Bearbeitungsgeschwindigkeit $v_b = 1\,\mathrm{mm\,s^{-1}}$ und Ausgangsoberflächenrauheit $Sa_0 = 0{,}75$ µm.

h_{gap}/mm	U/V	260	280	300	320
2	Sa/µm	0,129 $\pm$ 0,063	0,057 $\pm$ 0,006	0,076 $\pm$ 0,015	0,120 $\pm$ 0,041
4	Sa/µm	0,159 $\pm$ 0,087	0,129 $\pm$ 0,047	0,060 $\pm$ 0,013	0,065 $\pm$ 0,002
6	Sa/µm	0,049 $\pm$ 0,006	0,068 $\pm$ 0,002	0,070 $\pm$ 0,001	0,072 $\pm$ 0,008
8	Sa/µm	0,180 $\pm$ 0,080	0,102 $\pm$ 0,003	0,095 $\pm$ 0,013	0,090 $\pm$ 0,002
10	Sa/µm	0,057 $\pm$ 0,006	0,060 $\pm$ 0,006	0,063 $\pm$ 0,001	0,066 $\pm$ 0,005
2	I/A	14,1 $\pm$ 14,1	8,2 $\pm$ 6,2	6,9 $\pm$ 2,9	5,7 $\pm$ 1,4
4	I/A	14,1 $\pm$ 15,7	10,8 $\pm$ 11,0	7,5 $\pm$ 3,0	6,9 $\pm$ 1,9
6	I/A	4,7 $\pm$ 1,2	6,3 $\pm$ 1,9	5,3 $\pm$ 1,3	5,3 $\pm$ 1,1
8	I/A	6,4 $\pm$ 7,2	4,7 $\pm$ 3,7	6,1 $\pm$ 4,0	5,7 $\pm$ 1,6
10	I/A	5,5 $\pm$ 1,4	6,5 $\pm$ 1,4	5,5 $\pm$ 1,0	5,1 $\pm$ 1,2

Der grafische Verlauf der durchschnittlichen arithmetischen Oberflächenrauheit *Sa* über die elektrische Potentialdifferenz *U* für die verschiedenen Spaltbreiten des Polierkopfes ist in Abbildung 5.4 dargestellt. Die durchschnittliche arithmetische Ausgangsoberflächenrauheit Sa_0 betrug 0,75 µm.

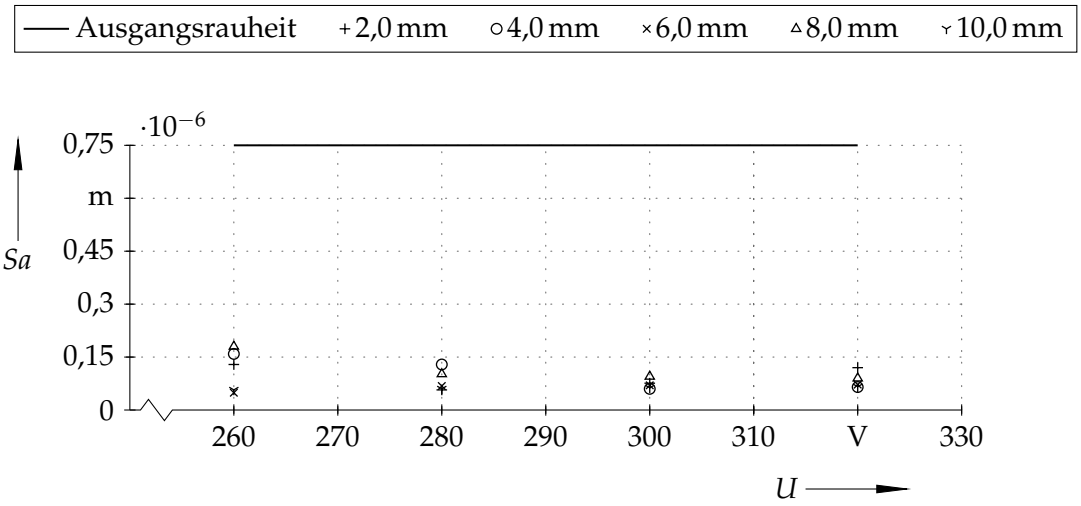


Abbildung 5.4: Durchschnittliche arithmetische Oberflächenrauheit *Sa* über der elektrischen Potentialdifferenz *U* für unterschiedliche Spaltbreiten des Polierkopfes h_{gap} mit einer durchschnittlichen arithmetischen Ausgangsoberflächenrauheit Sa_0 von 0,75 µm.

Beginnend mit einer durchschnittlichen arithmetischen Ausgangsoberflächenrauheit von 0,75 µm ist zu erkennen, dass, in Abhängigkeit vom gewählten Spalt des Polierkopfes h_{gap} und der elektrischen Potentialdifferenz *U*, durchschnittliche arithmetische Oberflächenrauheiten *Sa* im Bereich von 0,049 µm bis 0,180 µm erreicht werden können. Bei einer Spaltbreite von 8 mm nahm die Oberflächenrauheit mit zunehmender Potentialdifferenz von 0,180 µm bei 260 V bis auf 0,090 µm bei 320 V ab. Wurde die Spaltbreite h_{gap} weiter auf 10 mm erhöht, zeigte sich der Trend in der Oberflächenrauheit nicht mehr und unabhängig von der elektrischen Potentialdifferenz konnten Rauheiten von circa 0,060 µm erreicht werden. Dies zeigt, dass die Spaltbreite des Polierkopfes keinen signifikanten Einfluss auf die durchschnittlichen arithmetischen Oberflächenrauheiten hat. Vielmehr lagen die Messwerte der Oberflächenrauheit in einem Bereich von 0,060 µm bis 0,095 µm.

Des Weiteren wurde in dem Versuch (iii) ersichtlich, dass ab Spaltbreiten größer als 2 mm und einem Volumenstrom von 5 l min^{-1} kein konstanter Elektrolytschirm am Polierkopf mehr ausbildet wird. Das bedeutet, dass nicht die gesamte Rohrinnenoberfläche elektrolytisch plasmapoliert wird, da es während des Prozesses zu einem Abriss des Elektrolytschirms kommen

kann. Um diesen Sachverhalt ausschließen zu können, wurden alle folgenden Versuche bei einer Spaltbreite des Polierkopfes von 1 mm durchgeführt.

In Abbildung 5.5 sind die gemessenen und gemittelten Polierströme I in Abhängigkeit von der ausgewählten Potentialdifferenz U dargestellt. Zur besseren Übersichtlichkeit wurden die Standardabweichungen der ermittelten durchschnittlichen arithmetischen Ströme nicht eingezeichnet. Diese können jedoch der Tabelle 5.3 entnommen werden.

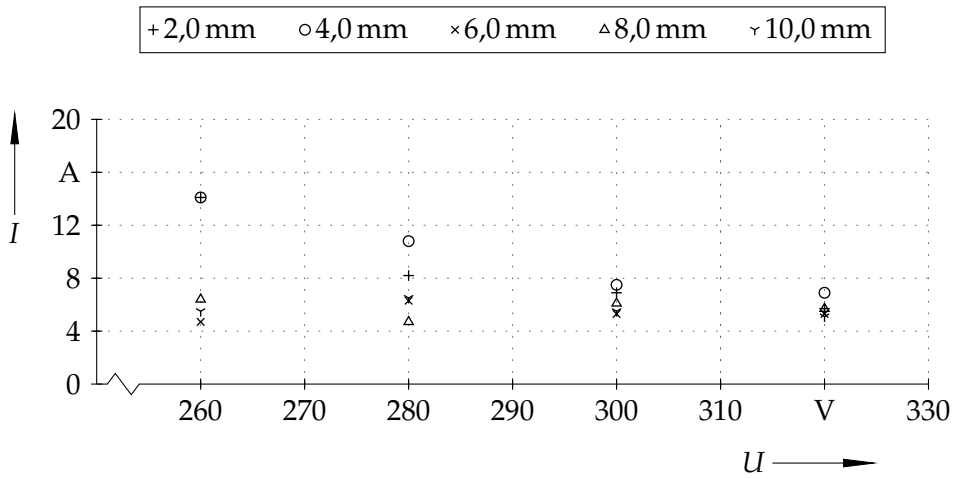


Abbildung 5.5: Durchschnittliche elektrische Stromstärke I über der elektrischen Potentialdifferenz U von 260 V, 280 V, 300 V und 320 V für unterschiedliche Spaltbreiten des Polierkopfes h_{gap} von 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm und 10 mm.

Die Werte der durchschnittlichen elektrischen Stromstärke I lagen in einem Bereich von $(4{,}7 \pm 3{,}7)$ A bis $(14{,}1 \pm 15{,}7)$ A. Dabei war die Standardabweichung stellenweise sehr groß, was auf einen instabilen Plasmapolierprozess hindeutet. Während eines solchen instabilen Prozesses war das beim Polieren übliche Zischen nicht hörbar. Mit zunehmender Potentialdifferenz nahm die Standardabweichung der mittleren Ströme ab und erreichte Werte im Bereich von $(5{,}1 \pm 1{,}2)$ A bis $(7{,}5 \pm 3{,}0)$ A, was einen stabileren Polierprozess vermuten lässt. Dieser Sachverhalt impliziert, dass die Oberflächenrauheit der polierten Rohrinnenoberflächen starke Schwankungen aufweisen kann, da es, wie die Werte der ermittelten Stromstärken andeuten, während des elektrolytischen Plasmapolierens zu elektrischen Kurzschlüssen kommen kann.

5.5 Einfluss der effektiven Polierdauer t_{ept} auf Sa

Im ersten Abschnitt von Versuch (v) wurden alle Parameter wie in der Versuchsdurchführung beschrieben eingestellt. Als effektive Polierdauern wurden die folgenden Zeiten gewählt: 30 s, 60 s, 90 s, 120 s, 150 s, 180 s, 240 s, 300 s, 360 s, 480 s, 600 s, 900 s, 1200 s und 1500 s. Aufgrund der Bearbeitungsgeschwindigkeit von 0 mm s^{-1} ist der Versuch als stationär anzusehen. In Tabelle 5.4 sind die ermittelten durchschnittlichen arithmetischen Oberflächenrauheiten sowohl der Rohrinnenoberflächen als auch der Naht mit den zugehörigen Standardabweichungen dargestellt. Die Rohre wurden bei elektrischen Potentialdifferenzen von 260 V und 320 V elektrolytisch plasmapoliert.

Tabelle 5.4: Sa_{ept} der Rohrinnenoberfläche und der Naht für die elektrischen Potentialdifferenzen 260 V und 320 V. Die Bearbeitungsgeschwindigkeit betrug 0 mm s^{-1}, d. h. das Rohr wurde nicht verfahren, sondern es wurde auf der Stelle poliert.

	260 V		320 V	
t_{ept} / s	Sa_{ept} (Innenoberfläche)	Sa_{ept} (Naht)	Sa_{ept} (Innenoberfläche)	Sa_{ept} (Naht)
0	0,399 ± 0,065	0,286 ± 0,105	0,797 ± 0,107	0,843 ± 0,434
30	0,157 ± 0,070	0,236 ± 0,105	0,195 ± 0,061	0,200 ± 0,047
60	0,069 ± 0,025	0,195 ± 0,061	0,092 ± 0,013	0,113 ± 0,024
90	0,053 ± 0,008	0,165 ± 0,083	0,069 ± 0,011	0,097 ± 0,009
120	0,053 ± 0,014	0,164 ± 0,085	0,067 ± 0,023	0,084 ± 0,022
150	0,050 ± 0,013	0,147 ± 0,095	0,063 ± 0,026	0,075 ± 0,010
180	0,041 ± 0,009	0,135 ± 0,056	0,061 ± 0,021	0,074 ± 0,010
240	0,038 ± 0,012	0,104 ± 0,049	0,057 ± 0,015	0,061 ± 0,005
300	0,043 ± 0,014	0,125 ± 0,070	0,041 ± 0,009	0,063 ± 0,009
360	0,051 ± 0,014	0,145 ± 0,100	0,035 ± 0,005	0,063 ± 0,007
480	0,039 ± 0,007	0,092 ± 0,045	0,031 ± 0,002	0,067 ± 0,008
600	0,035 ± 0,010	0,076 ± 0,009	0,027 ± 0,003	0,069 ± 0,006
900	0,041 ± 0,008	0,065 ± 0,010	0,026 ± 0,004	0,072 ± 0,012
1200	0,041 ± 0,006	0,062 ± 0,013	0,029 ± 0,006	0,066 ± 0,007
1500	0,039 ± 0,007	0,059 ± 0,008	0,034 ± 0,002	0,068 ± 0,009

Es sind deutliche Unterschiede bei den Rauheiten der Ausgangsoberfläche der verwendeten Rohre erkennbar, was in unterschiedlichen Chargen an Rohren begründet liegt. Bereits nach einer Polierdauer von 30 s waren die Werte der Rauheiten der Rohrinnenoberfläche mit 0,157 µm für 260 V und 0,195 µm für 320 V einander ähnlich. Es zeigt sich somit, dass bereits in den

ersten Sekunden ein starker Abtrag der Rauheitsspitzen stattfand und dass die Schwankungen in den Ausgangsrauheiten vernachlässigt werden können. Werden die erreichbaren Rauheiten mit den in Abschnitt 5.1 durchgeführten Polierversuchen an Edelstahlplättchen aus 1.4301 verglichen, so zeigt sich, dass dort nach einer Polierdauer von 30 s eine Oberflächenrauheit von 0,105 µm erreicht wurde. Die Abweichungen liegen zum einen darin begründet, dass ein anderes Ausgangsmaterial poliert wurde und zum anderen in der deutlich geringeren Oberflächenausgangsrauheit von ca. 0,150 µm.

Der grafische Verlauf von Sa_{ept} (Rohrinnenoberfläche) und Sa_{ept} (Naht) für eine Potentialdifferenz von 260 V ist in Abbildung 5.6 zu sehen.

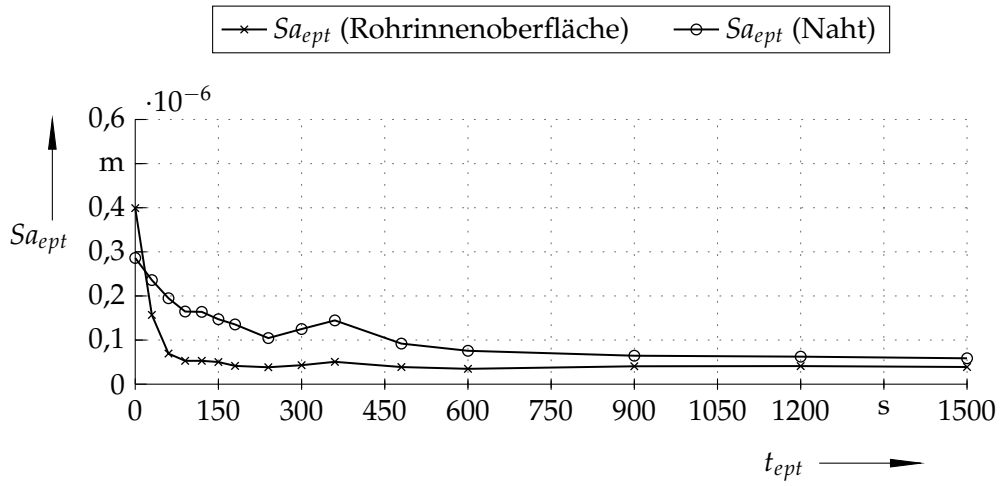


Abbildung 5.6: Durchschnittliche arithmetische Oberflächenrauheit Sa_{ept} der Rohrinnenoberfläche und der Naht über die effektive Polierdauer t_{ept} für eine elektrische Potentialdifferenz von 260 V.

Die Rauheitswerte der polierten Rohrinnenoberflächen wiesen bei einer elektrischen Potentialdifferenz von 260 V den für das elektrolytische Plasmapolieren charakteristischen Verlauf auf (Vergleich dazu Abbildung 5.1). Bereits nach einer effektiven Polierdauer von 90 s wurden durchschnittliche arithmetische Oberflächenrauheiten von (0,053 $\pm$ 0,008) µm bei einer Oberflächenausgangsrauheit von (0,399 $\pm$ 0,065) µm erreicht. Es fand eine Reduzierung um den Faktor acht statt. Bei der Naht hingegen fand bei 480 s zwar eine Reduzierung der Oberflächenrauheit statt, jedoch lediglich um den Faktor zwei. Das lag zum einen an der bereits geringeren Rauheit der Ausgangsoberfläche von (0,286 $\pm$ 0,105) µm und zum anderen an der durch das Schweißen hervorgerufenen Gefügeveränderung [94]. Ab einer effektiven Polierdauer von 600 s änderten sich die Werte der Oberflächenrauheiten der Naht und der Rohrinnenoberflächen nur noch marginal. Ein Vergleich mit den erreichten durchschnittlichen arithmetischen

Oberflächenrauheiten der Abbildung 5.1 impliziert, dass der Prozess des Innenrohrpolierens weiter verbessert werden kann, da eine minimale Rauheit von $(0{,}035 \pm 0{,}010)$ µm bei 260 V und $(0{,}026 \pm 0{,}004)$ µm bei 320 V noch deutlich von 0,008 µm (siehe Versuch (i)) entfernt war. In Abbildung 5.7 sind die ermittelten durchschnittlichen Oberflächenrauheiten für die elektrische Potentialdifferenz von 320 V dargestellt.

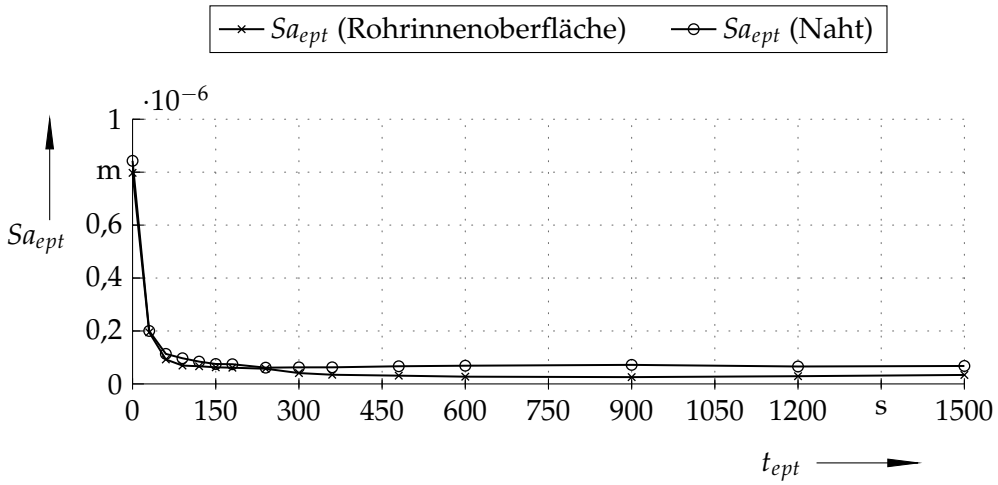


Abbildung 5.7: Durchschnittliche arithmetische Oberflächenrauheit Sa_{ept} der Rohrinnenoberfläche und der Naht über die effektive Polierdauer t_{ept} für eine elektrische Potentialdifferenz von 320 V.

Ein Vergleich der durchschnittlichen Rauheiten der Rohrinnenoberflächen zeigt bei beiden elektrischen Potentialdifferenzen (260 V und 320 V) keine erkennbaren Unterschiede mit Ausnahme der Naht bei einer elektrischen Potentialdifferenz von 260 V. Dies kann auf den geringeren Energieeintrag und den damit einhergehenden geringeren Materialabtrag zurückgeführt werden. Nach einer effektiven Polierdauer von 600 s lagen die Werte der durchschnittlichen Rauheiten der Rohrinnenoberflächen und der Naht nahe beieinander. In den beiden Abschnitten 5.3 und 5.4 konnte durch die Versuche gezeigt werden, dass die Spaltbreite des Polierkopfes h_{gap} keinen erkennbaren Einfluss auf die durchschnittliche arithmetische Oberflächenrauheit hatte. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass kleine Bearbeitungsgeschwindigkeiten v_b in Kombination mit hohen elektrischen Potentialdifferenzen U bei Spaltbreiten $\leq$ 2,0 mm zu geringeren durchschnittlichen arithmetischen Oberflächenrauheiten führten. Auf dieser Grundlage wurde im folgenden Abschnitt der Einfluss der effektiven Polierdauer t_{ept} auf die erreichbaren durchschnittlichen Oberflächenrauheiten untersucht. Neben der effektiven Polierdauer wurde auch die elektrische Potentialdifferenz zwischen 260 V und 320 V variiert. Es bleibt zu klären, ob ein höherer Energieeintrag einen deutlicheren Einfluss auf die Oberflächengüte hätte. In Tabelle 5.5 sind die durchschnittlichen arithmetischen Oberflä-

chenrauheiten Sa_{v_b} sowie die durchschnittlichen Prozessströme I_{v_b} in Abhängigkeit von der gewählten Bearbeitungsgeschwindigkeit v_b und der Anzahl der Polierdurchgänge n_{v_b} über die effektive Polierdauer t_{ept} bei einer elektrischen Potentialdifferenz von 260 V zusammengefasst. Die Rauheit der Ausgangsoberflächen Sa_0 beträgt (0,484 ± 0,047) µm.

Tabelle 5.5: Sa_{v_b} von Rohrinnenoberflächen und elektrische Stromstärke I_{v_b} für unterschiedliche Bearbeitungsgeschwindigkeiten v_b und Anzahl n_{v_b} der Polierdurchgänge bei einer elektrischen Potentialdifferenz U von 260 V.

t_{ept} / s	3,33	6,67	10,00	13,33	16,67	20,00	26,67	33,33	40,00	46,67
$Sa_{0,3}$ / µm	0,196	0,149	0,055	0,048	0,042	0,040	0,043	0,0034	0,029	0,031
$\sigma_{Sa_{0,3}}$ / µm	0,103	0,088	0,016	0,015	0,013	0,013	0,024	0,010	0,006	0,006
$I_{0,3}$ / A	5,34	5,61	5,25	6,12	5,31	5,17	5,32	5,94	6,34	6,03
$\sigma_{I_{0,3}}$ / A	1,52	1,87	2,30	2,74	1,20	1,03	1,16	1,59	2,06	1,59
$n_{0.3}$	1	2	3	4	5	6	8	10	12	14
$Sa_{0,6}$ / µm	0,130	0,079	0,069	0,086	0,087	0,066	0,051	0,034	0,030	0,029
$\sigma_{Sa_{0,6}}$ / µm	0,025	0,018	0,014	0,014	0,020	0,010	0,015	0,011	0,004	0,007
$I_{0,6}$ / A	5,79	6,35	8,63	7,83	7,43	6,69	6,23	6,29	6,51	6,92
$\sigma_{I_{0,6}}$ / A	2,85	2,50	3,14	2,57	2,23	2,07	1,58	1,66	1,73	1,43
$n_{0.6}$	2	4	6	8	10	12	16	20	24	28
$Sa_{1,2}$ / µm	0,300	0,084	0,055	0,049	0,044	0,042	0,032	0,026	0,027	0,028
$\sigma_{Sa_{1,2}}$ / µm	0,122	0,037	0,023	0,012	0,008	0,011	0,008	0,003	0,004	0,003
$I_{1,2}$ / A	9,73	7,66	7,02	6,42	6,35	6,10	6,34	6,46	6,59	6,05
$\sigma_{I_{1,2}}$ / A	11,11	3,81	2,30	1,62	2,35	1,24	1,40	2,87	1,89	1,22
$n_{1.2}$	4	8	12	16	20	24	32	40	48	56
$Sa_{2,4}$ / µm	0,478	0,155	0,117	0,086	0,068	0,055	0,048	0,042	0,043	0,055
$\sigma_{Sa_{2,4}}$ / µm	0,158	0,073	0,069	0,040	0,036	0,025	0,014	0,008	0,015	0,018
$I_{2,4}$ / A	18,76	11,53	16,39	14,64	11,12	13,78	13,19	13,88	11,93	11,10
$\sigma_{I_{2,4}}$ / A	15,85	10,40	14,26	13,25	10,96	12,61	12,23	11,02	11,87	10,87
$n_{2.4}$	8	16	24	32	40	48	64	80	96	112
$Sa_{4,8}$ / µm	0,489	0,184	0,070	0,038	0,033	0,028	0,028	0,027	0,025	0,029
$\sigma_{Sa_{4,8}}$ / µm	0,254	0,174	0,023	0,008	0,004	0,003	0,005	0,002	0,003	0,002
$I_{4,8}$ / A	18,43	13,60	11,69	7,68	6,72	6,20	5,97	5,98	5,87	6,35
$\sigma_{I_{4,8}}$ / A	12,19	10,46	9,94	3,00	2,83	1,28	1,11	1,91	1,20	3,81
$n_{4.8}$	16	32	48	64	80	96	128	160	192	224
Sa_{ept} / µm	0,319	0,130	0,073	0,062	0,055	0,046	0,040	0,033	0,031	0,034
$\sigma_{Sa_{ept}}$ / µm	0,208	0,102	0,042	0,029	0,028	0,019	0,017	0,010	0,010	0,012
I_{ept} / A	11,55	9,54	9,92	8,59	7,36	7,66	7,49	7,79	7,51	7,32
$\sigma_{I_{ept}}$ / A	11,54	8,19	9,24	7,27	5,80	6,79	6,49	6,27	6,16	5,81

Es ist ersichtlich, dass, unabhängig von der Bearbeitungsgeschwindigkeit mit zunehmender Anzahl der Polierdurchgänge geringere durchschnittliche Oberflächenrauheiten erreicht wurden. Der grafische Verlauf der Werte der durchschnittlichen arithmetischen Oberflächenrauheit Sa_{v_b} über der Anzahl der Polierdurchgänge n_{v_b} für die verschiedenen Bearbeitungsgeschwindigkeiten v_b ist in Abbildung 5.8 dargestellt und veranschaulicht die abgeleitete Grundbeziehung zwischen n_{v_b}, v_b und h_{gap} (Gleichung 4.3).

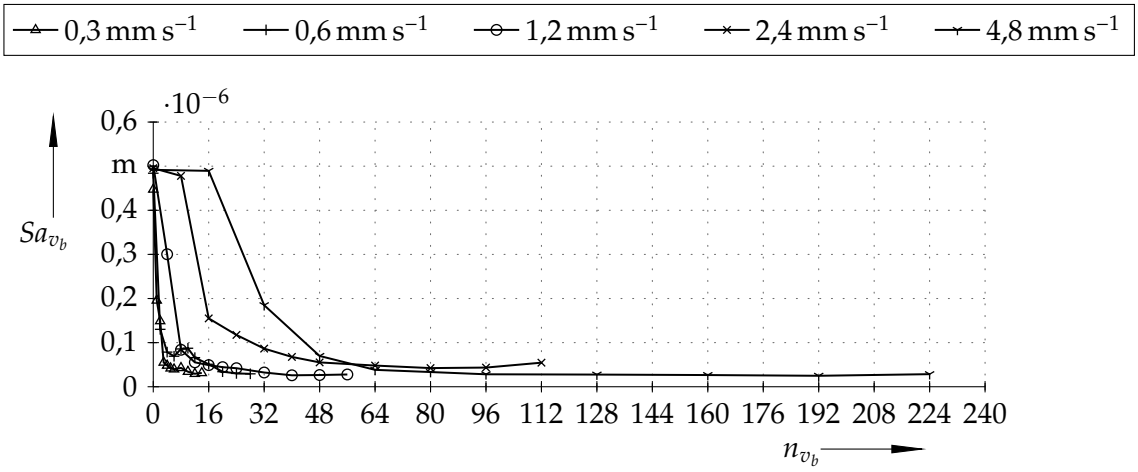


Abbildung 5.8: Sa_{v_b} der Rohrinnenoberfläche über die Polierstrecken n_{v_b} für verschiedene Bearbeitungsgeschwindigkeiten v_b ($U = 260\,\mathrm{V}$).

Aus der grafischen Darstellung (Abbildung 5.8) ist ersichtlich, dass, ausgehend von einer durchschnittlichen Ausgangsrauheit Sa_{ept} von $(0{,}484 \pm 0{,}047)\,\mu\mathrm{m}$, durchschnittliche arithmetische Oberflächenrauheiten Sa_{v_b} im Bereich von $(0{,}028 \pm 0{,}003)\,\mu\mathrm{m}$ bis $(0{,}055 \pm 0{,}018)\,\mu\mathrm{m}$ erreicht wurden. Des Weiteren ist zu erkennen, dass das Erreichen gleicher durchschnittlicher Oberflächenrauheiten für unterschiedliche Bearbeitungsgeschwindigkeiten nur über eine Anpassung der Anzahl der Polierdurchgänge möglich ist. So betrug die durchschnittliche arithmetische Oberflächenrauheit $Sa_{1,2}$ bei 32 Polierdurchgängen $(0{,}032 \pm 0{,}008)\,\mu\mathrm{m}$. Eine annähernd identische durchschnittliche arithmetische Oberflächenrauheit von $(0{,}033 \pm 0{,}004)\,\mu\mathrm{m}$ wurde bei einer Bearbeitungsgeschwindigkeit von $4{,}8\,\mathrm{mm\,s^{-1}}$ erst nach circa 80 Polierdurchgängen erreicht. Dabei war bei Bearbeitungsgeschwindigkeiten größer als $2{,}4\,\mathrm{mm\,s^{-1}}$ jener Effekt ersichtlich, dass nach acht Poliervorgängen bei $2{,}4\,\mathrm{mm\,s^{-1}}$ und nach 16 Poliervorgängen bei $4{,}8\,\mathrm{mm\,s^{-1}}$ (entsprechend einer effektiven Polierdauer t_{ept} von 3,3 s) keine Verbesserung der durchschnittlichen arithmetischen Oberflächenrauheit Sa_{v_b} eintrat. Bei den Proben, die mit $4{,}8\,\mathrm{mm\,s^{-1}}$ poliert wurden, betrugen die Werte der durchschnittlichen Ausgangsoberflächenrauheit $Sa_{4,8}$ ca. 0,492 µm und es wurde nach einer effektiven Polierdauer von 3,3 s eine durchschnittliche arithmetische Oberflächenrauheit von 0,489 µm erreicht. Die Ergebnisse deu-

ten darauf hin, dass für den Plasmapolierprozess bei großen Bearbeitungsgeschwindigkeiten längere Prozesszeiten nötig sind, um die Profilspitzen von der Oberfläche abzutragen. Im Durchschnitt wurde, unabhängig von der Bearbeitungsgeschwindigkeit, eine arithmetische Oberflächenrauheit Sa_{ept} von $(0{,}034 \pm 0{,}012)$ µm nach einer effektiven Polierdauer von 46,67 s erreicht. In Abbildung 5.9 sind die einzelnen durchschnittlichen arithmetischen Oberflächenrauheiten Sa_{v_b} für die verschiedenen Bearbeitungsgeschwindigkeiten v_b über die effektive Polierdauer t_{ept} grafisch dargestellt.

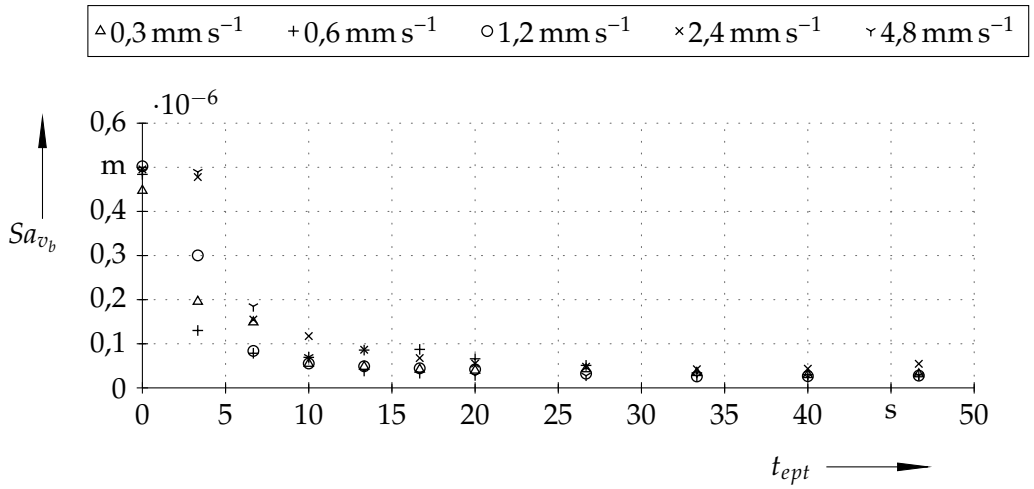


Abbildung 5.9: Sa_{v_b} der Rohrinnenoberfläche über die effektive Polierdauer t_{ept} für verschiedene Bearbeitungsgeschwindigkeiten v_b ($U = 260$ V).

Wie Abbildung 5.8 kann auch der Abbildung 5.9 eine klare Abhängigkeit der durchschnittlichen Oberflächenrauheit Sa_{v_b} von der effektiven Polierdauer t_{ept} entnommen werden. Nach einer effektiven Polierdauer von 3,33 s und bei Bearbeitungsgeschwindigkeiten von 2,4 mm s^{-1} und 4,8 mm s^{-1} wiesen die Werte der Rohrinnenoberflächen eine nahezu unveränderte Rauheit von ca. 0,5 µm auf. Bei geringen effektiven Polierdauern und großen Bearbeitungsgeschwindigkeiten konnte das elektrolytische Plasma nicht lange genug wirken, um die Rauheitsspitzen von der Oberfläche zu entfernen, was die Rauheitswerte erklärt. Ab einer effektiven Polierdauer von circa 20 s hatte die Bearbeitungsgeschwindigkeit keinen erkennbaren Einfluss mehr auf Sa_{v_b}. Im Durchschnitt wurde nach 20 s effektiver Polierdauer eine arithmetische Oberflächenrauheit von $(0{,}046 \pm 0{,}019)$ µm erreicht. Nach der mehr als doppelten effektiven Polierdauer von 46,67 s betrug Sa_{ept} ca. $(0{,}034 \pm 0{,}012)$ µm. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass Sa_{v_b} über alle durchschnittlichen arithmetischen Oberflächenrauheiten gemittelt werden kann. Dieser Sachverhalt wird anhand der durchschnittlichen arithmetischen Oberflächenrauheit Sa_{ept} bezogen auf die effektive Polierdauer in Abbildung 5.10 dargestellt.

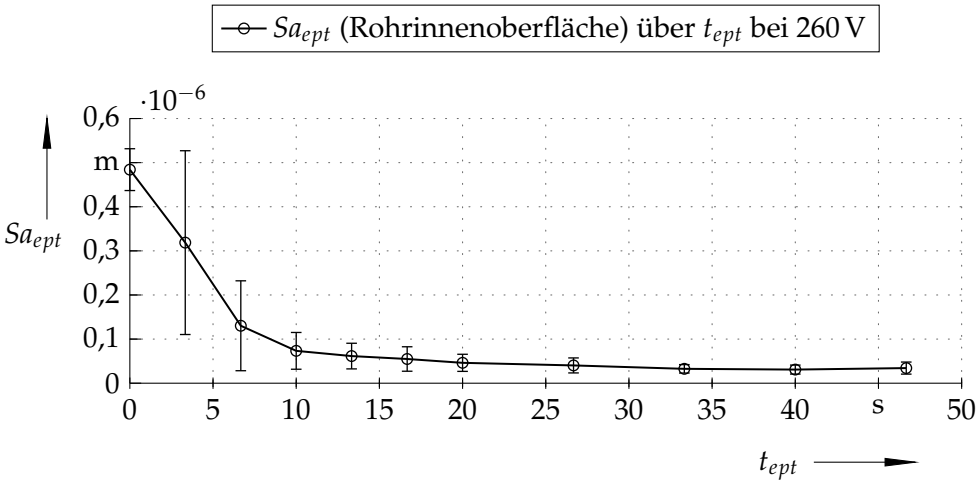


Abbildung 5.10: Sa_{ept} der Rohrinnenoberfläche über die effektive Polierdauer t_{ept} bei einer elektrischen Potentialdifferenz von 260 V.

Neben den Rohr- wurden auch die Nahtinnenflächen ausgewertet und die Ergebnisse in Tabelle 5.6 für die durchschnittlichen arithmetischen Oberflächenrauheiten Sa_{v_b} dargestellt. Die Rauheit der Ausgangsoberfläche Sa_0 betrug $(0{,}191 \pm 0{,}049)$ µm.

Tabelle 5.6: Sa_{v_b} der Naht für unterschiedliche Bearbeitungsgeschwindigkeiten v_b und Anzahl n_{v_b} der Polierdurchgänge bei einer elektrischen Potentialdifferenz U von 260 V.

t_{ept}/s	3,33	6,67	10,00	13,33	16,67	20,00	26,67	33,33	40,00	46,67
$Sa_{0,3}$/µm	0,263	0,245	0,281	0,262	0,197	0,141	0,85	0,075	0,080	0,076
$\sigma_{Sa_{0,3}}$/µm	0,016	0,039	0,050	0,088	0,034	0,032	0,015	0,007	0,006	0,006
$Sa_{0,6}$/µm	0,069	0,065	0,062	0,073	0,071	0,067	0,069	0,074	0,075	0,080
$\sigma_{Sa_{0,6}}$/µm	0,009	0,011	0,009	0,009	0,011	0,010	0,010	0,020	0,026	0,027
$Sa_{1,2}$/µm	0,100	0,070	0,073	0,073	0,074	0,066	0,065	0,073	0,069	0,076
$\sigma_{Sa_{1,2}}$/µm	0,031	0,016	0,012	0,014	0,022	0,016	0,017	0,018	0,015	0,018
$Sa_{2,4}$/µm	0,197	0,078	0,079	0,061	0,067	0,063	0,063	0,078	0,065	0,053
$\sigma_{Sa_{2,4}}$/µm	0,015	0,010	0,007	0,010	0,012	0,004	0,005	0,016	0,007	0,003
$Sa_{4,8}$/µm	0,190	0,182	0,192	0,140	0,111	0,077	0,066	0,063	0,058	0,059
$\sigma_{Sa_{4,8}}$/µm	0,025	0,012	0,011	0,023	0,017	0,008	0,009	0,006	0,012	0,006
Sa_{ept}/µm	0,155	0,127	0,132	0,119	0,101	0,082	0,070	0,072	0,070	0,072
$\sigma_{Sa_{ept}}$/µm	0,086	0,081	0,091	0,083	0,052	0,033	0,015	0,016	0,018	0,020

In Abbildung 5.11 ist der grafische Verlauf der Werte der durchschnittlichen arithmetischen Oberflächenrauheit Sa_{v_b} über die effektive Polierdauer t_{ept} für verschiedene Bearbeitungsgeschwindigkeiten v_b von 0,3 mm s^{-1} bis 4,8 mm s^{-1} bei einer elektrischen Potentialdifferenz U von 260 V dargestellt.

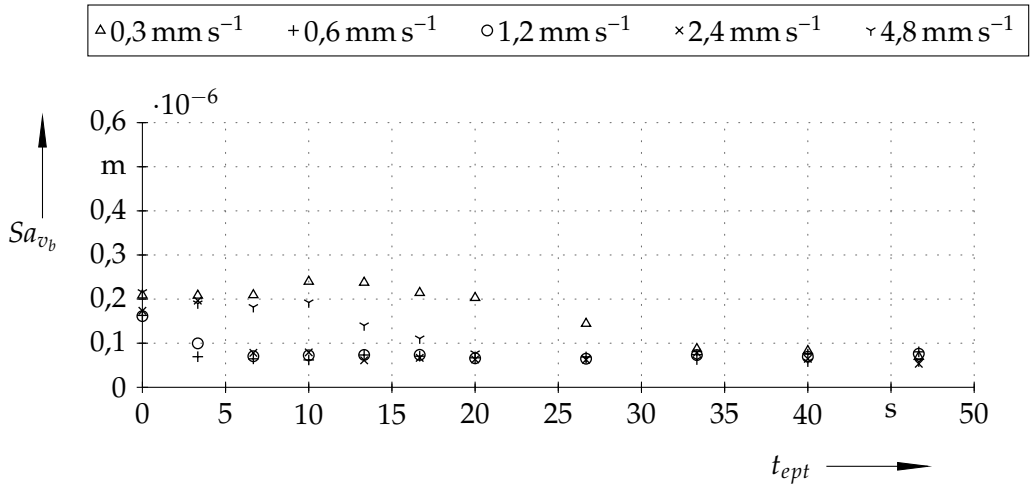


Abbildung 5.11: Durchschnittliche arithmetische Oberflächenrauheit Sa_{v_b} der Naht über der effektiven Polierdauer t_{ept} für verschiedene Bearbeitungsgeschwindigkeiten v_b von 0,3 mm s^{-1} bis 4,8 mm s^{-1} bei einer elektrischen Potentialdifferenz U von 260 V.

Aus Abbildung 5.11 ist klar ersichtlich, dass die Naht bereits zu Beginn eine deutlich geringere durchschnittliche Oberflächenrauheit Sa_0 von $(0{,}191 \pm 0{,}049)$ µm aufwies. Ab einer effektiven Polierdauer von 33,33 s erreichte die durchschnittliche Oberflächenrauheit einen Wert von $(0{,}070 \pm 0{,}015)$ µm, der mit zunehmender effektiver Polierdauer konstant blieb. Bei geringeren effektiven Polierdauern wiesen die Werte der durchschnittlichen Oberflächenrauheit bei Bearbeitungsgeschwindigkeiten von 0,3 mm s^{-1} und 4,8 mm s^{-1} deutliche Schwankungen gegenüber 0,6 mm s^{-1} bis 2,4 mm s^{-1} auf. Dies könnte unter anderem an Fehlstellen in der geschweißten Rohrnaht bzw. an deutlich größeren durchschnittlichen Ausgangsoberflächenrauheiten Sa_0 liegen. Zur besseren Interpretation wurde Sa_{v_b} über alle durchschnittlichen Oberflächenrauheiten gemittelt und Sa_{ept} über die effektive Polierdauer t_{ept} aufgetragen (Abbildung 5.12), da wie bei den Rohrinnenoberflächen davon ausgegangen werden kann, dass die Bearbeitungsgeschwindigkeit v_b bei einer konstanten effektiven Polierdauer t_{ept} keinen maßgeblichen Einfluss auf die Oberflächengüte und damit auf die durchschnittlichen arithmetischen Rauheiten Sa_{v_b} hat.

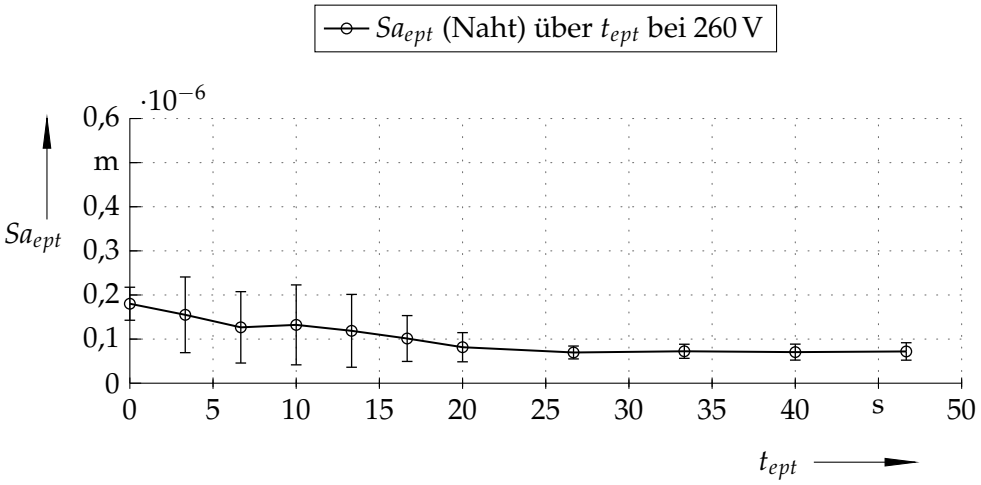


Abbildung 5.12: Mittlere Oberflächenrauheit Sa_{ept} der Naht über der effektiven Polierdauer t_{ept} ($U = 260\,\mathrm{V}$).

Zur abschließenden Auswertung werden die Werte von Sa_{ept}, sowohl der Rohrinnenoberfläche als auch der Naht, über t_{ept} mit den zugehörigen Polierströmen I_{ept} in Abbildung 5.13 dargestellt.

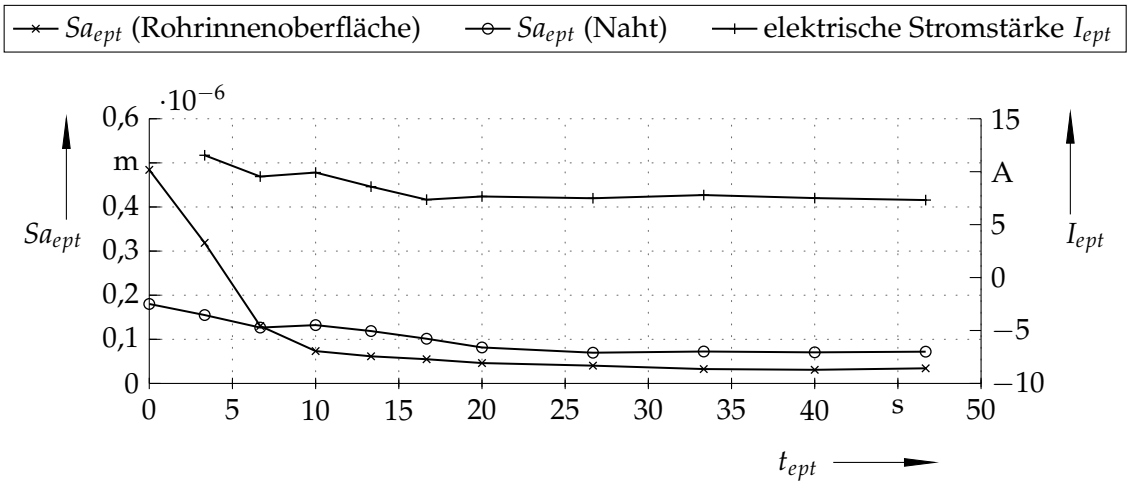


Abbildung 5.13: Mittlere Oberflächenrauheit Sa_{ept} der Rohrinnenoberfläche und der Naht sowie die durchschnittliche elektrische Stromstärke I über der effektiven Polierdauer t_{ept} ($U = 260\,\mathrm{V}$).

Dabei wird ersichtlich, dass ab einer effektiven Polierdauer von circa 20 s optimale Oberflächengüten hinsichtlich der erreichbaren Rauheiten sowohl bei der Rohrinnenoberfläche als auch bei der Naht erreicht wurden. Um den Einfluss der Polierspannung U auf die durchschnittliche

Oberflächenrauheit Sa_{v_b} zu untersuchen, wurde die Versuchsreihe bei einer Potentialdifferenz von 320 V wiederholt und analog zu 260 V ausgewertet, siehe folgende Tabelle.

Tabelle 5.7: Sa_{v_b} von Rohrinnenoberflächen und elektrische Stromstärke I_{v_b} für unterschiedliche Bearbeitungsgeschwindigkeiten v_b und Anzahl n_{v_b} der Polierdurchgänge bei einer elektrischen Potentialdifferenz U von 320 V.

t_{ept} / s	3,33	6,67	10,00	13,33	16,67	20,00	26,67	33,33	40,00	46,67
$Sa_{0,3}$ / µm	0,302	0,174	0,119	0,055	0,037	0,038	0,034	0,032	0,034	0,038
$\sigma_{Sa_{0,3}}$ / µm	0,166	0,147	0,109	0,027	0,010	0,010	0,008	0,007	0,011	0,007
$I_{0,3}$ / A	8,24	8,12	6,38	5,75	5,52	5,06	5,09	5,76	5,22	5,14
$\sigma_{I_{0,3}}$ / A	2,57	4,01	1,24	1,01	1,01	0,81	0,86	1,47	0,84	1,02
$n_{0.3}$	1	2	3	4	5	6	8	10	12	14
$Sa_{0,6}$ / µm	0,314	0,078	0,042	0,032	0,035	0,035	0,027	0,027	0,029	0,030
$\sigma_{Sa_{0,6}}$ / µm	0,108	0,021	0,008	0,004	0,008	0,007	0,002	0,001	0,003	0,002
$I_{0,6}$ / A	10,10	7,33	6,79	6,15	5,88	5,60	5,91	4,85	5,32	5,13
$\sigma_{I_{0,6}}$ / A	10,84	2,87	3,24	2,82	1,59	1,32	1,34	0,93	1,13	0,96
$n_{0.6}$	2	4	6	8	10	12	16	20	24	28
$Sa_{1,2}$ / µm	0,389	0,151	0,078	0,048	0,038	0,033	0,029	0,027	0,031	0,027
$\sigma_{Sa_{1,2}}$ / µm	0,018	0,067	0,060	0,032	0,016	0,009	0,004	0,004	0,005	0,001
$I_{1,2}$ / A	8,37	7,70	6,52	6,27	6,22	5,96	5,73	5,12	5,23	5,51
$\sigma_{I_{1,2}}$ / A	4,05	4,46	2,00	1,10	1,32	1,79	1,12	1,12	1,54	1,30
$n_{1.2}$	4	8	12	16	20	24	32	40	48	56
$Sa_{2,4}$ / µm	0,348	0,134	0,070	0,055	0,061	0,057	0,031	0,035	0,037	0,040
$\sigma_{Sa_{2,4}}$ / µm	0,112	0,044	0,023	0,018	0,040	0,035	0,008	0,011	0,010	0,006
$I_{2,4}$ / A	5,94	5,97	5,29	4,89	4,67	4,54	3,86	3,85	3,92	3,94
$\sigma_{I_{2,4}}$ / A	1,72	3,41	1,77	1,53	1,47	1,52	1,09	1,11	0,85	0,80
$n_{2.4}$	8	16	24	32	40	48	64	80	96	112
$Sa_{4,8}$ / µm	0,356	0,142	0,080	0,050	0,040	0,036	0,029	0,030	0,030	0,034
$\sigma_{Sa_{4,8}}$ / µm	0,115	0,078	0,049	0,014	0,010	0,010	0,004	0,005	0,004	0,004
$I_{4,8}$ / A	6,19	5,38	5,06	4,72	4,56	4,51	4,63	4,71	5,59	5,04
$\sigma_{I_{4,8}}$ / A	1,75	1,52	1,35	1,15	1,01	0,96	0,96	1,10	1,90	1,29
$n_{4.8}$	16	32	48	64	80	96	128	160	192	224
Sa_{ept} / µm	0,342	0,136	0,078	0,048	0,042	0,040	0,030	0,030	0,032	0,034
$\sigma_{Sa_{ept}}$ / µm	0,116	0,087	0,064	0,023	0,022	0,019	0,006	0,007	0,008	0,007
I_{ept} / A	7,85	7,05	6,02	5,54	5,40	5,11	5,00	4,77	5,03	4,94
$\sigma_{I_{ept}}$ / A	5,66	3,98	2,23	1,79	1,47	1,45	1,32	1,26	1,45	1,22

Die Werte der durchschnittlichen Ausgangsrauheiten Sa_0 betragen $(0{,}719 \pm 0{,}075)$ µm. Die durchschnittlichen arithmetischen Oberflächenrauheiten Sa_{v_b} sowie die durchschnittlichen Prozessstromstärken I_{v_b} sind in Abhängigkeit von der gewählten Bearbeitungsgeschwindig-

keit v_b und der Anzahl der Polierdurchgänge n_{v_b} über der effektiven Polierdauer t_{ept} bei einer elektrischen Potentialdifferenz von 320 V sind in Tabelle 5.7 zusammengefasst. Die Ergebnisse zeigen, dass mit zunehmender Anzahl der Polierdurchgänge, unabhängig von der Bearbeitungsgeschwindigkeit, geringere mittlere arithmetische Oberflächenrauheiten erreicht wurden. Dies bestätigen auch die Ergebnisse aus Abschnitt 5.3, die zeigen, dass kleinere Bearbeitungsgeschwindigkeiten bei gleichbleibender Anzahl an Polierdurchgängen zu geringeren Oberflächenrauheiten führen. Abbildung 5.14 zeigt die Werte der durchschnittlichen Oberflächenrauheit *Sa* in Abhängigkeit von der Anzahl der Plasmapolierdurchgänge n_{v_b} für die verschiedenen Bearbeitungsgeschwindigkeiten v_b.

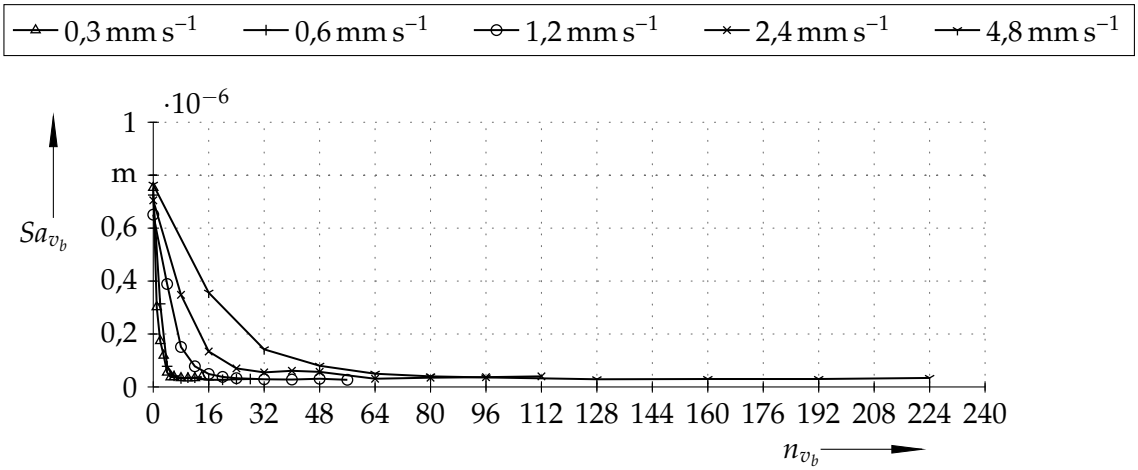


Abbildung 5.14: Mittlere arithmetische Oberflächenrauheit Sa_{v_b} der Rohrinnenoberfläche über den Polierstrecken n_{v_b} für verschiedene Bearbeitungsgeschwindigkeiten v_b ($U = 320\,\mathrm{V}$).

Aus Tabelle 5.7 und Abbildung 5.14 lässt sich schließen, dass die mittlere arithmetische Oberflächenrauheit Sa_{v_b} für Rohrinnenflächen nach einer bestimmten Anzahl n_{v_b} an Polierdurchgängen und in Abhängigkeit von der gewählten Bearbeitungsgeschwindigkeit v_b Werte von 0,030 µm bis 0,040 µm erreicht. Das bedeutet, dass mit optimierten Polierparametern bessere Oberflächenrauheiten erzielt werden können. Weiterhin ist ersichtlich, dass vergleichbare Oberflächenrauheiten Sa_{v_b} entweder durch eine hohe Bearbeitungsgeschwindigkeit kombiniert mit einer großen Anzahl an Polierdurchgängen oder mit einer niedrigen Bearbeitungsgeschwindigkeit und einer geringeren Anzahl an Polierdurchgängen erreicht werden können. Beispielsweise wurde bei einer Bearbeitungsgeschwindigkeit von $0{,}3\,\mathrm{mm\,s^{-1}}$ und vier Polierdurchgängen eine mittlere arithmetische Oberflächenrauheit $Sa_{0.3}$ von 0,055 µm erreicht. Bei einer Bearbeitungsgeschwindigkeit von $4{,}8\,\mathrm{mm\,s^{-1}}$ wurde eine mittlere Oberflächenrauheit $Sa_{4.8}$ von 0,050 µm erst nach 64 Polierdurchgängen erreicht. Die effektive Polierdauer t_{ept}

betrug bei beiden Beispielen 13,3 s. Die Ergebnisse implizieren, dass der entscheidende Parameter für optimale arithmetische Oberflächenrauheiten *Sa* die effektive Polierdauer t_{ept} ist. Wird Sa_{v_b} über der effektiven Polierdauer t_{ept} dargestellt, so ergibt sich der Verlauf aus Abbildung 5.15.

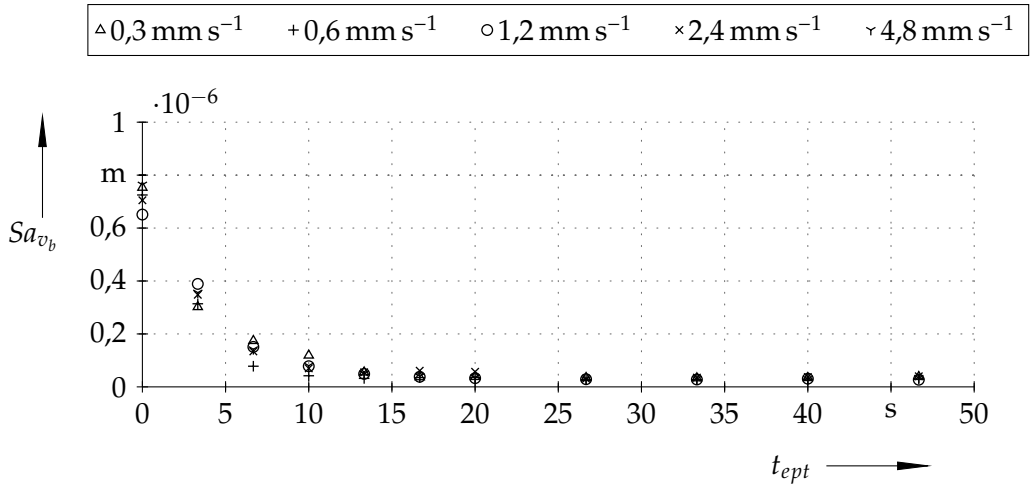


Abbildung 5.15: Mittlere arithmetische Oberflächenrauheit Sa_{v_b} der Rohrinnenoberfläche über t_{ept} für verschiedene Bearbeitungsgeschwindigkeiten v_b ($U = 320\,\mathrm{V}$).

Um die Hypothese zu beweisen, dass die effektive Polierdauer t_{ept} der ausschlaggebende Parameter für die erreichbare Oberflächengüte ist, wurde die mittlere arithmetische Oberflächenrauheit Sa_{ept} über t_{ept} aufgetragen (siehe Abbildung 5.16) und ausgewertet.

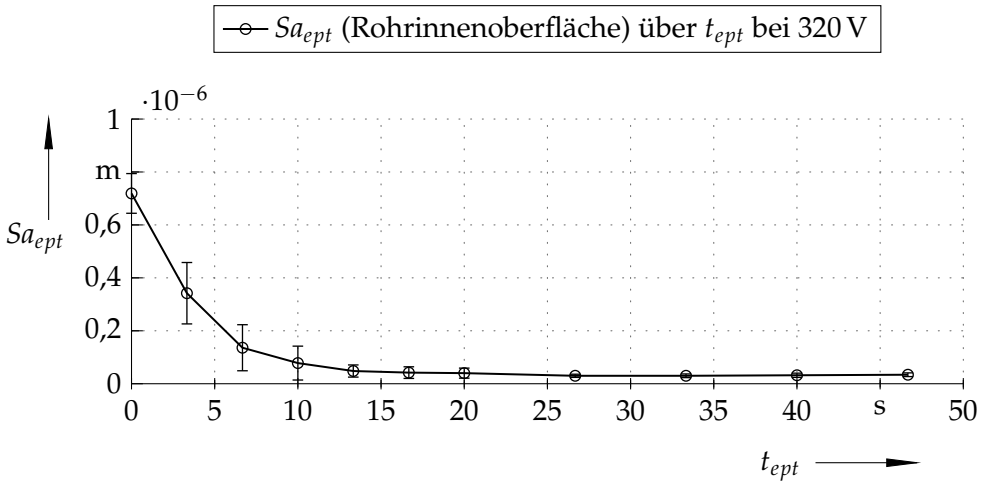
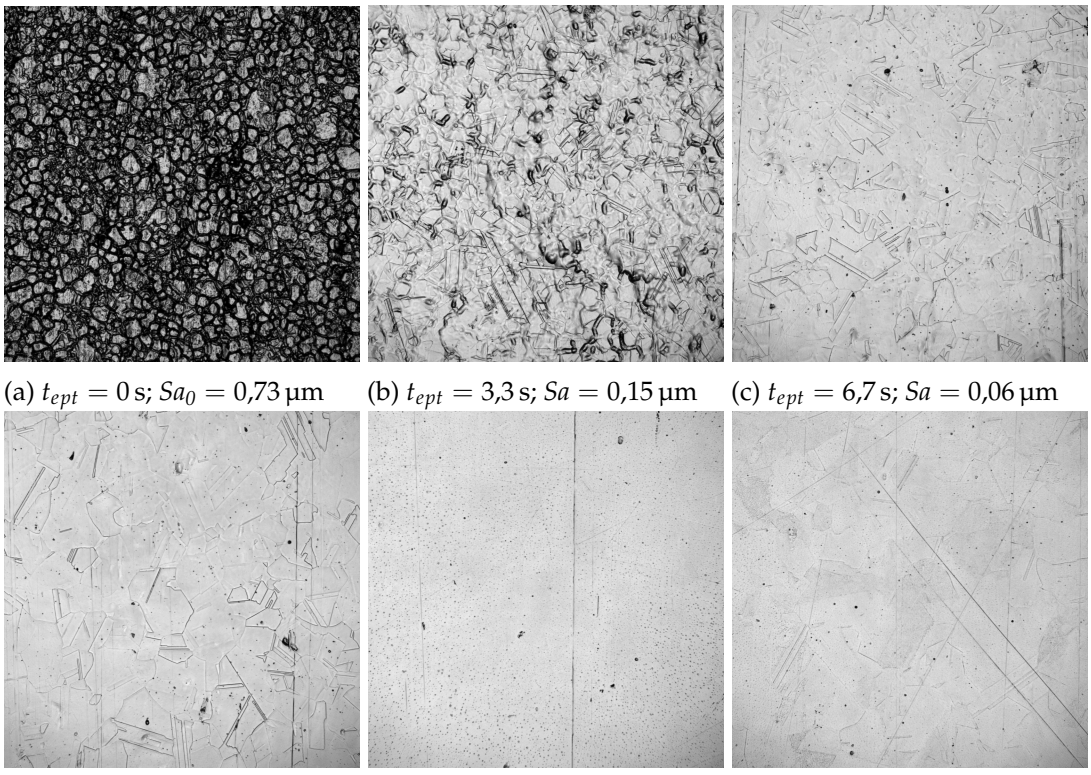


Abbildung 5.16: Mittlere arithmetische Oberflächenrauheit Sa_{ept} der Rohrinnenoberfläche über t_{ept} ($U = 320\,\mathrm{V}$).

Ausgehend von einer mittleren arithmetischen Ausgangsrauheit Sa_0 von $(0{,}719 \pm 0{,}075)\,\mu m$ nahm die mittlere arithmetische Oberflächenrauheit mit zunehmender effektiver Polierdauer ab, bis die Rohrinnenoberflächen nach einer effektiven Polierdauer von ca. 25 s Rauheitswerte von 0,030 µm bis 0,035 µm erreichten (Abbildung 5.16). Dieser grafische Verlauf ist typisch für den Plasmapolierprozess, da Plasmaentladungen an den Rauheitsspitzen entlang des gesamten Oberflächenprofils stattfanden (siehe Abschnitt 2.4.2.6). Dabei wurden die Spitzen entfernt, was besonders in den ersten Sekunden des Polierprozesses einen großen Einfluss auf die Oberflächenrauheit hatte. Je glatter die Probenoberfläche war, desto weniger Rauheitsspitzen konnten entfernt werden. Das heißt, dass mit zunehmender effektiver Polierdauer der Materialabtrag immer geringer und somit eine konstante Oberflächenrauheit erreicht wurde. In Abbildung 5.17 ist eine Auswahl von CLSM-Aufnahmen der Ausgangsoberfläche (a) sowie der plasmapolierten Rohrinnenflächen mit einer Polierdauer von 3,3 s (b), 6,7 s (c), 10 s (d), 16,7 s (e) und 40 s (f) dargestellt.



(a) $t_{ept} = 0\,s$; $Sa_0 = 0{,}73\,\mu m$ (b) $t_{ept} = 3{,}3\,s$; $Sa = 0{,}15\,\mu m$ (c) $t_{ept} = 6{,}7\,s$; $Sa = 0{,}06\,\mu m$

(d) $t_{ept} = 10{,}0\,s$; $Sa = 0{,}04\,\mu m$ (e) $t_{ept} = 16{,}7\,s$; $Sa = 0{,}03\,\mu m$ (f) $t_{ept} = 40{,}0\,s$; $Sa = 0{,}03\,\mu m$

Abbildung 5.17: CLSM-Aufnahmen (Weitwinkelobjektiv LMPLFLN50X/0.5 mit einer 50igfachen Vergrößerung) von elektrolytisch plasmapolierten Rohrinnenoberflächen bei einer elektrischen Potentialdifferenz von 320 V für verschiedene effektive Polierdauern t_{ept} mit einer Scanfläche von 258 µm × 250 µm.

Bei der Ausgangsoberfläche eines unbehandelten Rohres (Abbildung 5.17 (a)) ist eine unregelmäßig strukturierte Oberfläche zu sehen. Die Ausgangsoberflächenrauheit Sa_0 betrug 0,73 µm. Bereits nach einer effektiven Polierdauer von 3,3 s wird eine deutliche Reduzierung der Oberflächenrauheit ersichtlich (siehe Abbildung 5.17 (b)). Es sind nur noch geringe Oberflächenstrukturen zu erkennen. Die arithmetische Oberflächenrauheit betrug 0,15 µm und wurde somit um den Faktor fünf reduziert. In Abbildung 5.17 (c) und (d) sind nur noch marginale Strukturen auf der Oberfläche ersichtlich. Ab einer effektiven Polierdauer von 16,7 s war die plasmapolierte Oberfläche als glatt zu bezeichnen und hatte eine arithmetische Oberflächenrauheit Sa von 0,03 µm. Die Änderung der Oberflächenrauheiten mit steigender effektiver Polierdauer ist auch in den CLSM-Aufnahmen zu sehen. Neben den Rohrinnenflächen wurden auch die entsprechenden arithmetischen Oberflächenrauheiten Sa_{v_b} der Schweißnaht untersucht.

Tabelle 5.8: Durchschnittliche arithmetische Oberflächenrauheiten Sa_{v_b} von der Naht der Rohrinnenoberflächen für unterschiedliche Bearbeitungsgeschwindigkeiten v_b und Anzahl n_{v_b} der Polierdurchgänge bei einer elektrischen Potentialdifferenz U von 320 V.

t_{ept} / s	3,33	6,67	10,00	13,33	16,67	20,00	26,67	33,33	40,00	46,67
$Sa_{0,3}$ / µm	0,200	0,143	0,146	0,115	0,119	0,124	0,103	0,102	0,092	0,099
$\sigma_{Sa_{0,3}}$ / µm	0,044	0,021	0,011	0,012	0,008	0,022	0,009	0,019	0,007	0,020
$Sa_{0,6}$ / µm	0,189	0,151	0,172	0,169	0,115	0,107	0,120	0,113	0,104	0,119
$\sigma_{Sa_{0,6}}$ / µm	0,029	0,019	0,046	0,019	0,032	0,022	0,007	0,015	0,024	0,019
$Sa_{1,2}$ / µm	0,154	0,107	0,116	0,096	0,096	0,099	0,088	0,083	0,085	0,089
$\sigma_{Sa_{1,2}}$ / µm	0,032	0,013	0,023	0,010	0,014	0,012	0,006	0,005	0,010	0,006
$Sa_{2,4}$ / µm	0,147	0,130	0,139	0,137	0,122	0,118	0,101	0,101	0,090	0,097
$\sigma_{Sa_{2,4}}$ / µm	0,029	0,019	0,017	0,020	0,023	0,022	0,018	0,016	0,014	0,016
$Sa_{4,8}$ / µm	0,144	0,118	0,122	0,115	0,104	0,095	0,080	0,082	0,077	0,074
$\sigma_{Sa_{4,8}}$ / µm	0,051	0,045	0,045	0,032	0,024	0,009	0,010	0,011	0,009	0,008
Sa_{ept} / µm	0,163	0,127	0,136	0,124	0,110	0,107	0,096	0,095	0,088	0,094
$\sigma_{Sa_{ept}}$ / µm	0,043	0,030	0,036	0,031	0,023	0,021	0,017	0,018	0,016	0,020

Die Rauheit der Ausgangsoberflächen der Naht beträgt (0,282 $\pm$ 0,039) µm und war deutlich geringer als die Ausgangsrauheit der Rohrinnenfläche mit (0,719 $\pm$ 0,075) µm. In Tabelle 5.8 werden die Werte der durchschnittlichen arithmetischen Oberflächenrauheiten Sa_{v_b} der Naht über der effektiven Polierdauer t_{ept} zusammengefasst (Abbildung 5.18).

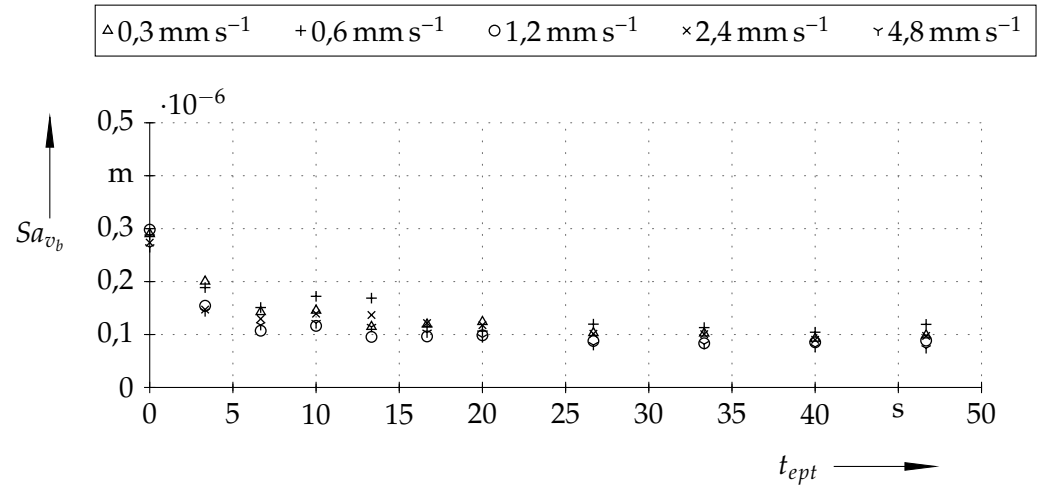


Abbildung 5.18: Durchschnittliche arithmetische Oberflächenrauheiten Sa_{v_b} der Naht über der effektiven Polierdauer t_{ept} für verschiedene Bearbeitungsgeschwindigkeiten v_b bei einer elektrischen Potentialdifferenz von 320 V.

Abbildung 5.19 zeigt den grafischen Verlauf der Mittelwerte Sa_{ept} aller durchschnittlichen arithmetischen Oberflächenrauheiten Sa_{v_b}, aufgetragen über der effektiven Polierdauer t_{ept}.

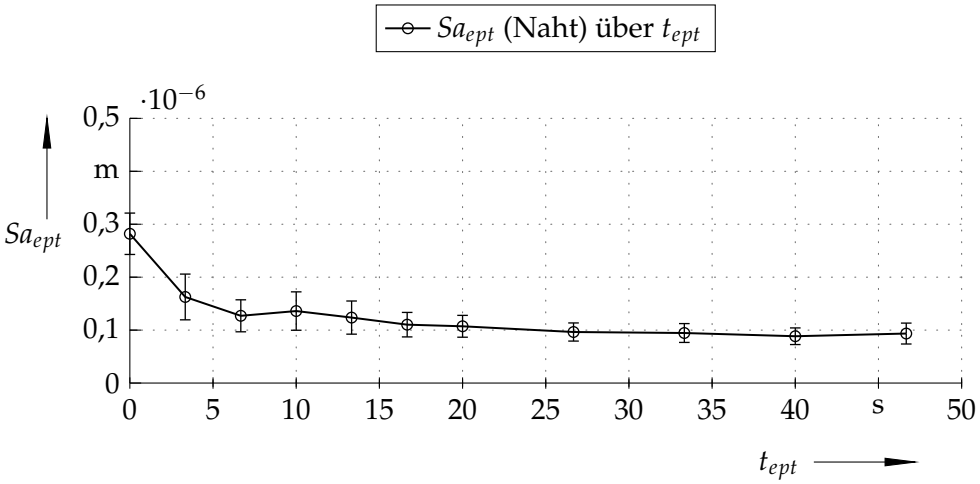


Abbildung 5.19: Durchschnittliche arithmetische Oberflächenrauheiten Sa_{ept} der Naht über die effektive Polierdauer t_{ept} bei einer elektrischen Potentialdifferenz von 320 V.

Es zeigt sich, dass die durchschnittliche arithmetische Oberflächenrauheit Sa_{ept} bereits nach einer effektiven Polierdauer von 26,67 s einen Wert von $(0{,}096 \pm 0{,}017)$ µm erreichte. Mit zunehmender effektiver Polierzeit änderte sich dieser Wert nur unwesentlich im einstelligen nm-Bereich. Somit wurde sowohl bei der Rohrinnenfläche als auch bei der Naht eine konstante

durchschnittliche Oberflächenrauheit Sa_{ept} nach 26,67 s erreicht, wobei sich die erreichbaren Rauheitsbereiche unterscheiden (Abbildung 5.20).

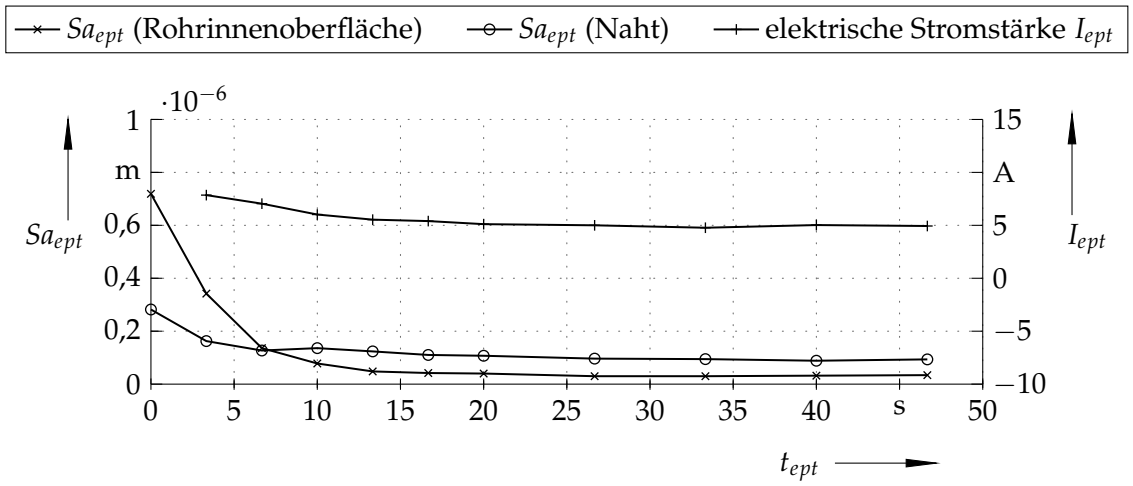
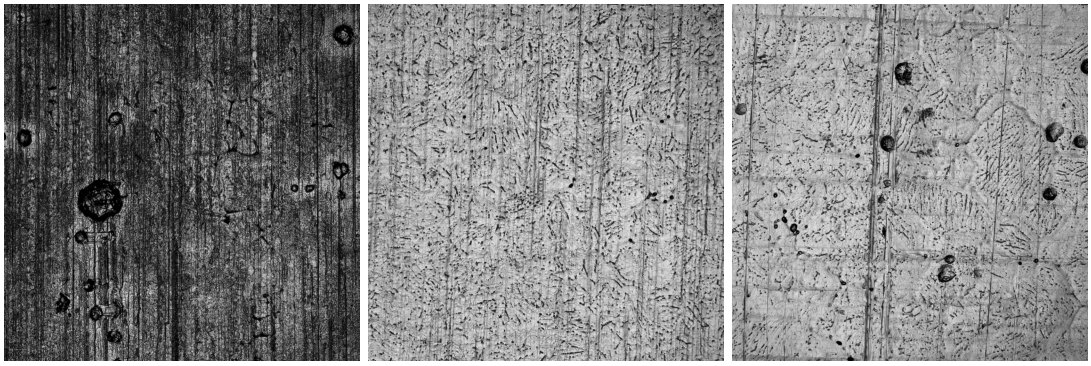


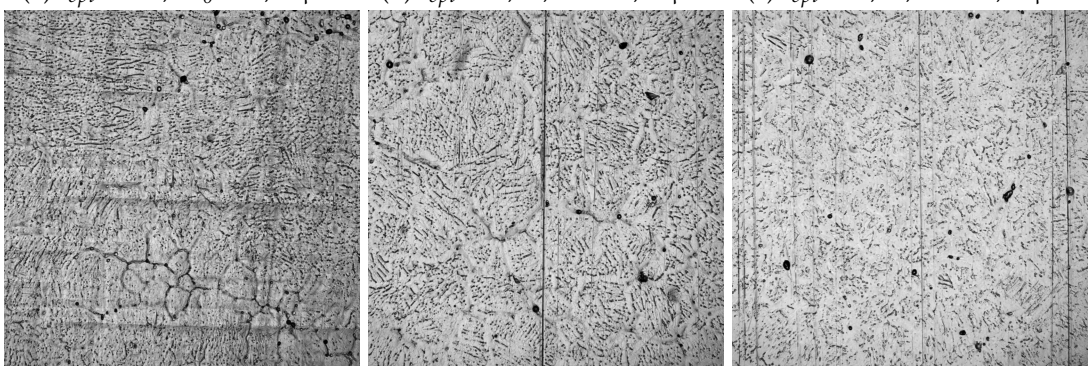
Abbildung 5.20: Durchschnittliche arithmetische Oberflächenrauheiten Sa_{ept} der Rohrinnenoberfläche und der Naht über der effektiven Polierdauer t_{ept} bei einer elektrischen Potentialdifferenz von 320 V.

Grundlegend zeigt sich, dass der Prozess des elektrolytischen Plasmapolierens bei einer elektrischen Potentialdifferenz von 320 V stabiler ablief als bei 260 V und durch höheren Energieeintrag geringere Oberflächenrauheiten erreichbar sind. Ein Vergleich mit den in Abschnitt 5.1 ermittelten Oberflächenrauheiten zeigt, dass Rauheiten von 0,008 µm erreicht werden können. Die durchschnittlich erreichbaren mittleren Oberflächenrauheiten sind nicht nur vom Material, der Ausgangsoberflächenrauheit Sa_0 und den Plasmapolierprozessparametern abhängig, sondern auch von der Materialzusammensetzung, die beispielsweise durch das Schweißen verursacht wurde. Beim WIG wird die Metallstruktur durch den Eintrag der Wärmeenergie modifiziert, was typischerweise eine erhebliche Rekristallisation in der Schmelzzone bewirkt. Daher wird die Mikrostruktur gröber und die Fusionszonen weisen eine dendritische Struktur auf [95, 96], was zu einem inhomogeneren Polieren und somit zu größeren durchschnittlichen arithmetischen Oberflächenrauheiten der Naht führt. Daher sollte besonders in Bereichen, in denen gleichmäßige Oberflächenrauheiten wichtig sind, darauf geachtet werden, nahtfreie Rohre zu verwenden.

In Anlehnung an Abbildung 5.17 sind in Abbildung 5.21 eine Auswahl an CLSM-Aufnahmen einer Ausgangsoberfläche sowie plasmapolierter Rohrnähte bei einer elektrischen Potentialdifferenz von 320 V dargestellt.



(a) $t_{ept} = 0\,\text{s}$; $Sa_0 = 0{,}35\,\mu\text{m}$ (b) $t_{ept} = 3{,}3\,\text{s}$; $Sa = 0{,}17\,\mu\text{m}$ (c) $t_{ept} = 6{,}7\,\text{s}$; $Sa = 0{,}12\,\mu\text{m}$



(d) $t_{ept} = 10{,}0\,\text{s}$; $Sa = 0{,}13\,\mu\text{m}$ (e) $t_{ept} = 16{,}7\,\text{s}$; $Sa = 0{,}12\,\mu\text{m}$ (f) $t_{ept} = 40{,}0\,\text{s}$; $Sa = 0{,}08\,\mu\text{m}$

Abbildung 5.21: CLSM-Aufnahmen (Weitwinkelobjektiv LMPLFLN50X/0.5 mit einer 50igfachen Vergrößerung) von Nahtoberflächen bei einer elektrischen Potentialdifferenz 320 V für verschiedene effektive Polierdauern t_{ept} von 3,3 s, 6,7 s, 10 s, 16,7 s und 40 s mit einer Scanfläche von 258 µm × 250 µm.

Bereits bei der unbehandelten Ausgangsoberfläche der Naht (Abbildung 5.21 (a)) wird eine deutlich glattere aber immer noch raue Oberfläche ersichtlich, anders als bei der Ausgangsoberfläche des Rohres (Abbildung 5.17 (a)). Die unbehandelte Ausgangsoberflächenrauheit Sa_0 des Rohres betrug 0,73 µm. Die Naht wies lediglich eine Ausgangsoberflächenrauheit Sa_0 von 0,35 µm auf, was auf das in Abschnitt 4.3 erwähnte Pilgerschrittverfahren zur Glättung der Naht zurückführen ist. Nach einer effektiven Polierdauer von 3,3 s wurde die arithmetische Oberflächenrauheit bereits auf 0,17 µm halbiert. Bei effektiven Polierdauern zwischen 6,7 s und 16,7 s änderte sich der Wert der arithmetischen Oberflächenrauheit nur noch unwesentlich und lag bei ca. 0,12 µm. Ein Vergleich mit den in Abbildung 5.7 ermittelten Rauheiten der Rohrinnenoberflächen zeigt, dass bei gleicher elektrischer Potentialdifferenz von 320 V, trotz einer geringeren Ausgangsoberflächenrauheit von 0,35 µm bei einer effektiven Polierdauer von 46,67 s, lediglich eine minimale Oberflächenrauheit von 0,074 µm erreicht werden konnte. Tabelle 5.4 ist zu entnehmen, dass beim nicht bewegten Rohr und einer größeren Ausgangso-

berflächenrauheit Sa_0 von 0,84 µm die minimale Oberflächenrauheit 0,061 µm betrug, bei einer effektiven Polierdauer von 240 s. Die Ursache für die Schwankungen der erreichten Oberflächengüten liegt in den deutlich längeren effektiven Polierdauern, die letztendlich nochmals zu einer Verringerung der Oberflächenrauheit führten. Beim Polierversuch im Rohr, das nicht verfahren wurde, wurden annähernd identische Oberflächenrauheitswerte von ca. 0,075 µm nach einer effektiven Polierdauer von 150 s erreicht. Ein Vergleich der effektiven Polierdauern legt nahe, dass beim elektrolytischen Plasmapolieren die effektive Polierbreite mindestens der Spaltbreite des Polierkopfes entspricht. Aufgrund der unterschiedlichen effektiven Polierdauern bei annähernd gleichen Oberflächenrauheiten ist die effektive Polierbreite jedoch größer. Somit wird die Oberfläche während des Polierens länger bearbeitet.

5.6 Fazit

Die Ergebnisse der durchgeführten Versuche zeigen, dass ein elektrolytisches Bearbeiten von Rohrinnenflächen mit entsprechender Anlagentechnik möglich ist. Für den Prozess ist ein Polierkopf notwendig, der das Plasma innerhalb des Rohres zünden kann. Während des Polierprozesses gibt es eine Vielzahl an Prozessparametern, die einen Einfluss auf die erzielbare Rauheit der Rohrinnenoberflächen haben. Unter den Kenngrößen des Polierkopfes hat sich die Spaltbreite der Elekrolytaustrittsöffnung als der für das Prozessergebnis entscheidende Parameter erwiesen. In den Versuchen hatte sich bis zu einer Spaltbreite von 2 mm und einem entsprechenden Volumenstrom von $5\,\mathrm{l\,min^{-1}}$ ein Elektrolytschirm ausgebildet, der für eine gleichmäßige Elektrolytbenetzung der Rohrinnenwand sorgt. Die Werte der erreichten Oberflächenrauheiten wiesen in Abhängigkeit von der gewählten Spaltbreite des Polierkopfes, besonders bei elektrischen Potentialdifferenzen ab 300 V, keine erkennbaren Schwankungen auf. Vielmehr befanden sie sich nach der Bearbeitung in einem Bereich von 0,060 µm bis 0,095 µm. Ausgehend von einer Ausgangsoberflächenrauheit von 0,75 µm konnte eine Reduzierung der Rauheit um bis zu 92 % erreicht werden. Auch bei den durchschnittlichen elektrischen Stromwerten zeigte sich die gleiche Tendenz wie bei den Oberflächenrauheiten. Besonders bei größeren elektrischen Potentialdifferenzen waren die Werte für die Standardabweichungen der ermittelten durchschnittlichen Stromwerte deutlich geringer, was auf einen stabileren Bearbeitungsprozess hindeutet.

Der wichtigste Prozessparameter ist die effektive Polierdauer t_{ept}, die sich aus der Anzahl der Polierdurchgänge n_{v_b}, der Spaltbreite des Polierkopfes h_{gap} und der Bearbeitungsgeschwindigkeit v_b ergibt (siehe Gleichung 4.3). Es ist davon auszugehen, dass die Spaltbreite des Polierkopfes mindestens der Höhe der polierten Rohrinnenoberfläche entspricht. Experimente

im nicht bewegten Rohr (stationärer Versuch (v)) haben gezeigt, dass bei einer Spaltbreite des Polierkopfes von 1 mm die Höhe der polierten Rohrinnenoberfläche deutlich größer als 1 mm ist und somit eine erheblich größere Rohrinnenfläche elektrolytisch plasmapoliert wurde. Da jedoch von einem Minimum ausgegangen wurde, sind die Messergebnisse dennoch korrekt dargestellt. Ein Vergleich mit der erreichten Oberflächenrauheit von Blechen aus Edelstahl 1.4301 zeigt einen identischen quantitativen Verlauf. Des Weiteren wurde nach einer effektiven Polierdauer von 600 s in den Rohrinnenoberflächen eine Rauheit von $(0{,}035 \pm 0{,}010)$ µm bei einer effektiven Potentialdifferenz von 260 V und $(0{,}026 \pm 0{,}004)$ µm bei 320 V erreicht. Bei den Blechen aus Edelstahl lag das Rauheitsminimum bei 0,008 µm. In Abhängigkeit von der gewählten elektrischen Potentialdifferenz unterschieden sich die Werte der Oberflächenrauheiten der Bleche und der Rohrinnenoberflächen um den Faktor drei bis vier. Diese Schwankungen lassen sich zum einen auf die unterschiedlichen Edelstahlsorten und zum anderen auf die Herstellungsmethode der jeweiligen Materialien zurückführen.

Die Versuche wurden im zweiten Teil des Versuchs (v) (dynamisch) auf einer Fläche von 30 mm durchgeführt. Dabei ergaben sich in Abhängigkeit von den gewählten Bearbeitungsgeschwindigkeiten von 0,3 mm s^{-1}, 0,6 mm s^{-1}, 1,2 mm s^{-1}, 2,4 mm s^{-1} und 4,8 mm s^{-1} und den in Tabelle 4.2 zugehörigen Polierdurchgängen effektive Polierdauern von 3,33 s, 6,67 s, 10,00 s, 13,33 s, 16,67 s, 20,00 s, 26,67 s, 33,33 s, 40,00 s und 46,67 s. In Analogie zu den vorhergehenden Versuchen wurden erneut effektive Potentialdifferenzen von 260 V und 320 V gewählt. Es zeigt sich, dass die durchschnittliche arithmetische Oberflächenrauheit der Rohrinnenfläche sowohl bei einer elektrischen Potentialdifferenz von 260 V als auch bei 320 V nach einer effektiven Polierdauer von 26,67 s als konstant angesehen werden konnte. Die geschweißte Naht hingegen wies aufgrund von Rekristallisierungen in der Schmelzzone [94] schlechtere Oberflächenrauheitswerte bei beiden elektrischen Potentialen auf. Bei einer elektrischen Potentialdifferenz von 320 V wiesen sowohl die Rauheiten auf der Rohrinnenfläche als auch die Naht geringere Schwankungen auf als bei 260 V. Um konstante Oberflächenrauheiten zu gewährleisten, war es notwendig, entweder eine geringere Bearbeitungsgeschwindigkeit in Verbindung mit einer kleineren Anzahl an Polierdurchgängen oder eine größere Bearbeitungsgeschwindigkeit mit einer größeren Anzahl an Durchgängen zu wählen. Aufgrund der besseren Prozessstabilität sollte daher beim elektrolytischen Plasmapolieren eine elektrische Potentialdifferenz von 320 V verwendet werden.

Ein Vergleich mit Wang [78] zeigt, dass auch hier das Ausgangsmaterial, die Prozessparameter und die gewählte Elektrolytzusammensetzung einen Einfluss auf die erreichbaren Rauheiten hatten. Bei dem von Wang verwendeten Edelstahl 1.4306 wurden in Abhängigkeit von der Elektrolyttemperatur und einer effektiven Polierdauer von maximal 1800 s minimale Rauheiten *Ra* von ca. 0,070 µm erreicht. Nestler [3] hingegen erreichte bei einer Nickel-Silber-Legierung

mit einer effektiven Polierdauer von 120 s eine minimale Rauheit *Ra* von ca. 0,015 µm. Es ist ersichtlich, dass kein direkter Vergleich der Rauheiten möglich ist, da aufgrund der unterschiedlichen Kombinationen von Ausgangsmaterialien und Prozessparametern stets verschiedene Rauheiten erreicht werden. Es lassen sich jedoch Tendenzen ableiten, sodass, z. B. beim Prozess des elektrolytischen Plasmapolierens, neben Edelstahlrohren auch Kupfer- oder Messingrohre verwendet und deren Innenoberflächen angepasst werden könnten. Der hier dargelegte Prozess des elektrolytischen Plasmapolierens ist eine geeignete Methode für die Bearbeitung von Rohrinnenoberflächen und je nach Prozessparameter auch für die Verarbeitung weiterer anspruchsvoller metallischer Werkstückoberflächen geeignet.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Bei den oberflächenabtragenden Fertigungsverfahren haben sich vor allem die elektrolytischen Verfahren auf Grund ihrer Vorteile im Bereich der Freiformoberflächenbearbeitung von metallischen Werkstücktopologien etabliert. Zur Optimierung der erreichbaren Oberflächenrauheiten werden die elektrolytischen Fertigungsverfahren kontinuierlich weiterentwickelt und immer neue Einsatzgebiete durch die Erweiterung der Materialvielfalt erschlossen. Bevorzugt eingesetzt werden diese Verfahren, wenn metallische Werkstückoberflächen poliert und somit die Rauheit reduziert werden soll.

Die vorliegende Arbeit soll dabei einen Beitrag zur Prozesserweiterung des Plasmapolierens als Teil der elektrolytisch oberflächenabtragenden Fertigungsverfahren liefern. Das elektrolytische Plasmapolieren kann neben dem Elektropolieren als Stand der Technik für metallische Freiformoberflächen angesehen werden und findet industrielle Anwendung. Neben verschiedenen Edelstahlsorten können auch Messing, Kupfer, Kobalt-Chrom, Wolfram, Molybdän, Titan sowie zugehörige Legierungen elektrolytisch plasmapoliert werden. Eine Weiterentwicklung des Prozesses stellt dabei das elektrolytische Plasmapolieren von Rohrinnenoberflächen dar, da diese prozessbedingt nicht wie Freiformoberflächen bearbeitet werden können. Wird ein Rohr wie eine Freiformoberfläche behandelt, so wird nur die Außen- nicht aber die Innenfläche poliert. Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieser Arbeit eigens für die Prozesserweiterung eine Prototypenanlage zum elektrolytischen Plasmapolieren von Rohrinnenoberflächen entwickelt. Weiterführend wurde ein geeignetes Werkzeug in Form des sogenannten Polierkopfes entwickelt, um das für den Prozess notwendige Plasma an der Rohrinnenoberfläche zu erzeugen. Auf diese Weise wurde ein Materialabtrag ermöglicht und damit die Rauheit reduziert. Es sollte der Nachweis erbracht werden, dass auch Rohrinnenoberflächen mit dem elektrolytischen Plasmapolierprozess bearbeitet werden können. Durch die Auswertung der polierten Oberflächen konnte gezeigt werden, dass die durchschnittliche arithmetische Oberflächenrauheit Sa reduziert werden konnte. Es war erstmals möglich, Rohrinnenoberflächen mit dem elektrolytischen Plasmapolierprozess zu bearbeiten. Durch Variation der anlagenspezifischen Prozessparameter wurden weitere Experimente durchgeführt, um die erreichbaren durchschnittlichen Oberflächenrauheiten zu minimieren und so ein Optimum der Oberflächengüte zu erreichen.

Aus den durchgeführten Untersuchungen zum elektrolytischen Plasmapolieren von Rohrinnenflächen wurden folgende Erkenntnisse gewonnen:

(1) Mit der Prototypenanlage und dem Polierkopf können Rohrinnenoberflächen elektrolytisch plasmapoliert werden.

(2) Eine Erhöhung der Spaltbreite des Polierkopfes über 2 mm hat keinen maßgeblichen Einfluss auf die arithmetischen Rauheiten von elektrolytisch plasmapolierten Rohrinnenoberflächen.

(3) Die effektive Polierdauer ist der entscheidende Parameter, der einen deutlichen Einfluss auf den EPP-Prozess und somit auf die durchschnittlichen Oberflächenrauheiten der bearbeiteten Rohrinnenflächen hat.

(4) Die gewählte elektrische Potentialdifferenz hat gerade bei langen effektiven Polierdauern keinen maßgeblichen Einfluss auf die Oberflächenrauheit. Für eine bessere Prozessstabilität sollte jedoch eine möglichst hohe elektrische Potentialdifferenz gewählt werden.

Neben den durchgeführten Experimenten sollten noch weitere Prozessparameter, wie z. B. die Temperatur oder die elektrische Leitfähigkeit des Elektrolyten, und die damit verbundenen Auswirkungen auf die erreichbaren Rauheiten der polierten Rohrinnenoberflächen untersucht werden. Wang [78] z. B. hat gezeigt, dass beim Plasmapolieren von metallischen Freiformflächen die Elektrolyttemperatur nur einen sehr geringen Einfluss auf die Rauheit hat. Weiterhin hat er nachgewiesen, dass mit zunehmender elektrischer Leitfähigkeit und dem damit erhöhtem Materialabtrag geringere Oberflächenrauheiten erreicht werden können. Es ist unklar, welchen Einfluss der dauerhafte Volumenstrom auf das erzeugte Plasma hat. Es kann davon ausgegangen werden, dass es zu Störungen im Materialabtragsprozess kommt, welche Auswirkungen auf die erreichbaren Oberflächenrauheiten haben.

Mit der derzeitigen Anlagenkonfiguration ist es möglich, gerade Rohre mit einer Länge von 0,5 m zu polieren. Um in der Industrie übliche Rohrlängen von 6 m zu polieren, muss eine konstruktive Überarbeitung der Prototypenanlage erfolgen. Weiterhin sollte berücksichtigt werden, dass mehr als zwei Rohrinnenflächen gleichzeitig bearbeitet werden können, um eine Kosteneffektivität gewährleisten zu können. Bei Rohrdurchmessern von ca. 40 mm, wie sie in den Versuchen verwendet wurden, hat sich gezeigt, dass die Standzeit des Polierkopfes, abhängig von der effektiven Polierdauer, begrenzt ist und dass der Isolator in regelmäßigen Abständen gewechselt werden muss, um gleichbleibende Oberflächenrauheiten zu gewährleisten. Um weiterführende Geometrien wie kleinere bzw. größere Rohrdurchmesser oder Rohrbiegungen zu polieren, muss der bestehende starre Polierkopf weiterentwickelt und konstruktiv überarbeitet werden.

Literaturverzeichnis

[1] U. Bobe und G. Wildbrett: „Anforderungen an Werkstoffe und Werkstoffoberflächen bezüglich Reinigbarkeit und Beständigkeit“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 78 (11) (2006), S. 1615–1622. DOI: https://doi.org/10.1002/cite.200600095.

[2] A.M. Awad, E.A. Ghazy, S.A. Abo El-Enin und M.G. Mahmoud: „Electropolishing of AISI-304 stainless steel for protection against SRB biofilm“. In: *Surface and Coatings Technology* 206 (14) (2012), S. 3165–3172. DOI: https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.11.046.

[3] K. Nestler, F. Böttger-Hiller, W. Adamitzki, G. Glowa, H. Zeidler und A. Schubert: „Plasma Electrolytic Polishing - An Overview of Applied Technologies and Current Challenges to Extend the Polishable Material Range“. In: *Procedia CIRP* 42 (2016). 18th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM XVIII), S. 503–507. DOI: https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.240.

[4] DIN EN 1672-2:2009-07: *Nahrungsmittelmaschinen - Allgemeine Gestaltungsleitsätze - Teil 2: Hygieneanforderungen*. Norm. Juli 2009. URL: https://www.beuth.de/de/norm/din-en-1672-2/116824498.

[5] DIN 11866:2016-11: *Komponenten aus nichtrostendem Stahl für aseptische Anwendungen in der chemischen und pharmazeutischen Industrie - Rohre*. Norm. Nov. 2016. URL: https://www.beuth.de/de/norm/din-11866/257419480.

[6] DIN 4760:1982-06: *Gestaltabweichungen; Begriffe, Ordnungssystem*. Norm. Juni 1982. URL: https://www.beuth.de/de/norm/din-4760/962490.

[7] DIN EN ISO 4287:2010-07: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit*. Norm. Juli 2010. URL: https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-4287/129356592.

[8] DIN EN ISO 11562:1998-09: *Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Meßtechnische Eigenschaften von phasenkorrekten Filtern (ISO 11562:1996)*. Norm (Dokument zurückgezogen). Sep. 1998. URL: https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-11562/8541720.

[9] DIN EN ISO 16610-21:2013-06: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Filterung - Teil 21: Lineare Profilfilter: Gauß-Filter (ISO 16610-21:2011)*. Norm. Juni 2013. URL: https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-16610-21/186371717.

[10] J. Seewig, C. Wiehr und S. Gröger: „Charakterisierung technischer Bauteiloberflächen". In: *Metrologie in der Mikro- und Nanotechnik (2011). Messprinzipien – Messgeräte – Anwendungen* (2012). 4. Fachtagung, Erlangen, 25. und 26. Oktober 2011. URL: http://ak-rauheit.de/files/VDI_Mikro_Nano.pdf.

[11] R. Volk: *Rauheitsmessung: Theorie und Praxis*. Beuth Verlag, 2018. URL: https://www.beuth.de/de/publikation/rauheitsmessung/270685236.

[12] E. Macherauch und H.W. Zoch: *Praktikum in Werkstoffkunde: 91 ausführliche Versuche aus wichtigen Gebieten der Werkstofftechnik*. Springer-Verlag, 2014. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-658-05038-2.

[13] DIN EN ISO 25178-1:2016-12: *Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 1: Angabe von Oberflächenbeschaffenheit*. Norm. Dez. 2016. URL: https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-25178-1/235458551.

[14] T. Kusnezowa: „Möglichkeiten und Herausforderungen bei der taktilen 2D Rauheitsmessung auf Konturen". Dissertation. Technischen Universität Kaiserslautern, 2016. URL: https://kluedo.ub.uni-kl.de/frontdoor/deliver/index/docId/4634/file/Dissertation_Kusnezowa_Tatjana.pdf.

[15] C.P. Keferstein und M. Marxer: *Fertigungsmesstechnik - Praxisorientierte Grundlagen, moderne Messverfahren*. Springer-Verlag, 2015. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-8348-2583-4.

[16] DIN EN ISO 3274:1998-04: *Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Nenneigenschaften von Tastschnittgeräten (ISO 3274:1996)*. Norm. Apr. 1998. URL: https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-3274/3361735.

[17] DIN EN ISO 4288:1998-04: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit*. Norm. Apr. 1998. URL: https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-4288/3361754.

[18] G. Binnig, C. F. Quate und Ch. Gerber: „Atomic Force Microscope". In: *Phys. Rev. Lett.* 56 (9 1986), S. 930–933. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.56.930.

[19] D.J. Whitehouse: *Handbook of surface metrology*. CRC Press, 1994. ISBN: 978-0-750-30039-1.

[20] D. Sarid: *Scanning force microscopy: with applications to electric, magnetic, and atomic forces*. Bd. 5. Oxford University Press on Demand, 1994. ISBN: 978-0-195-09204-2.

[21] M. von Ardenne: „Improvements in electron microscopes“. Schutzrecht GB511204A. 1937. URL: https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=GB000000511204A.

[22] M. von Ardenne: „Das Elektronen-Rastermikroskop. Theoretische Grundlagen“. In: *Zeitschrift für Physik* 109 (9) (1938), S. 553–572. DOI: https://doi.org/10.1007/BF01341584.

[23] E. Hornbogen und B. Skrotski: *Mikro- und Nanoskopie der Werkstoffe*. Springer-Verlag, 2009. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-89946-4.

[24] P. Davidovits und M.D. Egger: „Scanning Laser Microscope“. In: *Nature* 223 (5208) (1969), S. 831–831. DOI: https://doi.org/10.1038/223831a0.

[25] P. Davidovits und M.D. Egger: „Scanning Laser Microscope for Biological Investigations“. In: *Appl. Opt.* 10 (7) (1971), S. 1615–1619. DOI: https://doi.org/10.1364/AO.10.001615.

[26] B.R. Masters: *Confocal microscopy and multiphoton excitation microscopy: the genesis of live cell imaging*. Bd. 161. SPIE press Bellingham, WA, 2006, S. 230. ISBN: 978-0-819-46118-6.

[27] W. König und F. Klocke: *Fertigungsverfahren 1: Drehen, Fräsen, Bohren*. Springer-Verlag, 2008. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-35834-3.

[28] W. König und F. Klocke: *Fertigungsverfahren 2: Schleifen, Honen, Läppen*. Springer-Verlag, 2005. DOI: https://doi.org/10.1007/3-540-27699-8.

[29] W. König und F. Klocke: *Fertigungsverfahren 3: Abtragen, Generieren, Lasermaterialbearbeitung*. Springer-Verlag, 2007. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-48954-2.

[30] W. König und F. Klocke: *Fertigungsverfahren 4: Umformen*. Springer-Verlag, 2006. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-39533-1.

[31] DIN 8580:2003-09: *Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung*. Norm. Sep. 2003. URL: https://www.beuth.de/de/norm/din-8580/65031153.

[32] DIN 8589-0:2003-09: *Fertigungsverfahren Spanen - Teil 0: Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*. Norm. Sep. 2003. URL: https://www.beuth.de/de/norm/din-8589-0/65030235.

[33] VDI 3401:2009-01 (zurückgezogen): *Blatt 1 Elektrochemisches Abtragen - Formabtragen*. VDI-Richtlinie. Jan. 2009. URL: https://www.beuth.de/de/technische-regel-entwurf/vdi-3401-blatt-1/113388738.

[34] DIN 4768:1990-05: *Ermittlung der Rauheitskenngrößen Ra, Rz, Rmax mit elektrischen Tastschnittgeräten; Begriffe, Meßbedingungen*. Norm (Dokument zurückgezogen). Mai 1990. URL: https://www.beuth.de/de/norm/din-4768/1552484.

[35] DIN 8592:2003-09: *Fertigungsverfahren Reinigen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe*. Norm. Sep. 2003. URL: https://www.beuth.de/de/norm/din-8592/65031066.

[36] DIN 8588:2013-08: *Fertigungsverfahren Zerteilen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe*. Norm. Aug. 2013. URL: https://www.beuth.de/de/norm/din-8588/189903940.

[37] DIN 8591:2003-09: *Fertigungsverfahren Zerlegen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe*. Norm. Sep. 2003. URL: https://www.beuth.de/de/norm/din-8591/65031037.

[38] DIN 8590:2003-09: *Fertigungsverfahren Abtragen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe*. Norm. Sep. 2003. URL: https://www.beuth.de/de/norm/din-8590/65031017.

[39] J. Kumstel: „Polieren von SLM-Bauteilen mit kontinuierlicher Laserstrahlung“. In: *Neue Entwicklungen in der Additiven Fertigung*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015, S. 143–157. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-662-48473-9_10.

[40] E. Willenborg: „Polieren von Werkzeugstählen mit Laserstrahlung“. Dissertation. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2016. ISBN: 978-3-8322-4896-3.

[41] R. Ostholt, E. Willenborg und K. Wissenbach: „Laser polishing of freeform surfaces“. In: *Proceedings of the 5th International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing*. 2009, S. 397–402. URL: http://ilt.fraunhofer.de/eng/ilt/pdf/eng/jb08/s87.pdf.

[42] R. Ostholt: „Laserpolieren metallischer Freiformflächen“. Dissertation. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2011. ISBN: 978-3-844-00696-4.

[43] A. Gasser, W. Meiners, A. Weisheit, E. Willenborg, J. Stollenwerk und K. Wissenbach: „Maßgeschneiderte Oberflächen und Bauteile“. In: *Laser Technik Journal* 7 (4) (2010), S. 47–53. DOI: https://doi.org/10.1002/latj.201090061.

[44] A. Richmann, E. Willenborg und K. Wissenbach: „Polieren optischer Präzisionsoberflächen mit Laserstrahlung“. In: *DGaO Proceedings*. 2010, S. 2. URL: http://www.dgao-proceedings.de/download/111/111_a3.pdf.

[45] T. Berglund und A. Meyer: *Handbuch der metallographischen Schleif-, Polier- und Ätzverfahren*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1940. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-47370-8.

[46] Spitalsky: „Verfahren, den Oberflächen von Metallen und galvanischen Metallniederschlägen ein glänzend poliertes Aussehen zu geben“. Schutzrecht DE225873A. 1909. URL: https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE000000225873A.

[47] H. Figour und P.A. Jacquet: „Perfectionnements aux traitements électrolytiques des métaux“. Schutzrecht FR707526. 1932. URL: https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=FR000000707526A.

[48] P.A. Jacquet: „Electrolytic method for obtaining bright copper surfaces“. In: *Nature* 135 (3426) (1935), S. 1076. DOI: https://doi.org/10.1038/1351076c0.

[49] P.A. Jacquet: „Electrolytic and chemical polishing“. In: *Metallurgical Reviews* 1 (1) (1956), S. 157–238. DOI: https://doi.org/10.1179/mtlr.1956.1.1.157.

[50] W. Gillwald: „Bad und Verfahren zum anodischen Glänzen von Metallen und Metallegierungen“. Schutzrecht DE000001771141A. 1968. URL: https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE000001771141A.

[51] D. Landolt: „Fundamental aspects of electropolishing“. In: *Electrochimica Acta* 32 (1) (1987), S. 1–11. DOI: https://doi.org/10.1016/0013-4686(87)87001-9.

[52] Carmen Gerlach: „Räumliche und zeitliche Instabilitäten in einem technischen Prozess: Elektropolieren von Messing“. Diss. Universität Bremen, 2002. URL: https://elib.suub.uni-bremen.de/diss/docs/E-Diss427_Gerlach_2002.pdf.

[53] M. Buhlert: *Elektropolieren und Elektrostrukturieren von Edelstahl, Messing und Aluminium: Untersuchung des transpassiven Abtragprozesses einschließlich unerwünschter Nebeneffekte*. Fortschritt-Berichte VDI. Reihe 2, Fertigungstechnik. VDI-Verlag, 2000. ISBN: 978-3-183-55302-0.

[54] M. Buhlert: „Zur Dynamik des elektrochemischen Metallabtrags“. Dissertation. Universität Bremen, 2005. URL: http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:46-diss000102611.

[55] M. Buhlert: *Elektropolieren: elektrolytisches Glänzen, Glätten und Entgraten von Edelstahl, Stahl, Messing, Kupfer, Aluminium und Titan; mit 4 Tabellen*. Leuze, 2009. ISBN: 978-3-874-80249-9.

[56] DIN EN 3769:1997-05: *Luft- und Raumfahrt - Elektrolytisches Polieren von korrosionsbeständigen Stählen und hochwarmfesten Legierungen; Deutsche Fassung EN 3769:1997*. Norm. Mai 1997. URL: https://www.beuth.de/de/norm/din-en-3769/2972047.

[57] DIN 65230:1988-12: *Luft- und Raumfahrt - Anodisches Polieren von martensitaushärtenden nichtrostenden Stählen; Kenn-Nummer 2600*. Norm. Dez. 1988. URL: https://www.beuth.de/de/norm/din-65230/1406323.

[58] A.M. Awad, N.A. Abdel Ghany und T.M. Dahy: „Removal of tarnishing and roughness of copper surface by electropolishing treatment“. In: *Applied Surface Science* 256 (13) (2010), S. 4370–4375. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.02.033.

[59] T.R. Münninghoff: „Mechanismen der anodischen Auflösung von Metallen und Legierungen bei extrem hohen Stromdichten“. Dissertation. Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, 2012. URL: https://docserv.uni-duesseldorf.de/servlets/DerivateServlet/Derivate-23110/Promotion%20TRM%C3%BCnninghoff_PDFA.pdf.

[60] H. Kaesche: *Die Korrosion der Metalle*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-18428-4.

[61] M. Datta und D. Landolt: „Stoichiometry of anodic nickel dissolution in NaCl and NaClO3 under active and transpassive conditions“. In: *Corrosion Science* 13 (3) (1973), S. 187–197. DOI: https://doi.org/10.1016/0010-938X(73)90014-0.

[62] M.M. Lohrengel: „Thin anodic oxide layers on aluminium and other valve metals: high field regime“. In: *Materials Science and Engineering: R: Reports* 11 (6) (1993), S. 243–294. DOI: https://doi.org/10.1016/0927-796X(93)90005-N.

[63] C. H. Hamann und W. Vielstich: *Elektrochemie*. Wiley/VCH Verlag, Weinheim, 2005. ISBN: 978-3-527-31068-5.

[64] *Nichtrostende Stähle, Eigenschaften–Verarbeitung–Anwendung–Normen; 2*. Aufl. Düsseldorf: Verlag Stahleisen, 1989. ISBN: 978-3-5140-0333-0.

[65] S. Kißling: „Chemische und elektrochemische Methoden zur Oberflächenbearbeitung von galvanogeformten Nickel-Mikrostrukturen“. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2010. DOI: https://doi.org/10.5445/KSP/1000019375.

[66] M. Datta und D. Landolt: „Fundamental aspects and applications of electrochemical microfabrication“. In: *Electrochimica Acta* 45 (15) (2000), S. 2535–2558. DOI: https://doi.org/10.1016/S0013-4686(00)00350-9.

[67] D. Vaňa, S. Podhorský, M. Hurajt und V. Hanzen: „Surface properties of the stainless steel X10 CrNi 18/10 after application of plasma polishing in electrolyte“. In: *International Journal of Modern Engineering Research* 3 (2) (2013), S. 788–792. ISSN: 2249-6645. URL: http://www.ijmer.com/papers/Vol3_Issue2/BG32788792.pdf.

[68] Kurt Maier: *Analyse oberflächennaher Bereiche 35 Entwicklung und Anwendung einer neuen Absolutmethode zur Abtragung dünner Schichten durch Elektropolieren*. 1978.

[69] H.H. Kellogg: „Anode effect in aqueous electrolysis“. In: *Journal of the electrochemical society* 97 (4) (1950), S. 133–142. DOI: https://doi.org/10.1149/1.2777980.

[70] V.N. Duradzhi, I.V. Bryantsev und A.K. Tokarov: „Investigation of erosion of the anode under the action of an electrolytic plasma on it“. In: *Elektronnaya Obrabotka Materialov* 5 (1979), S. 15–19.

[71] H. Hoyer, E. Kirsche, J. Pampel, K. Rabending und E. Roessner: „Verfahren zum Hochglänzen stromleitender Werkstücke im anodischen Elektrolytplasma“. Schutzrecht DD000000238074A1. 1985. URL: https://depatisnet.dpma.de.

[72] K. Lingath, A. Parshuta und H. Zeidler: „Verfahren zum Plasmapolieren von Gegenständen aus Metall und Metalllegierungen“. Schutzrecht DE000010207632B4. 2002. URL: https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE000010207632B4.

[73] A.L. Yerokhin, X. Nie, A. Leyland, A. Matthews und S.J. Dowey: „Plasma electrolysis for surface engineering“. In: *Surface and Coatings Technology* 122 (2) (1999), S. 73–93. DOI: https://doi.org/10.1016/S0257-8972(99)00441-7.

[74] P. Gupta, G. Tenhundfeld, E.O. Daigle und D. Ryabkov: „Electrolytic plasma technology: Science and engineering — An overview“. In: *Surface and Coatings Technology* 201 (21) (2007), S. 8746–8760. DOI: https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.11.023.

[75] O.V. Kalenchukova, P.K. Nagula und Tretinnikov D.L.: „About changes in the chemical composition of the electrolyte in the process of electrolytic-plasma treatment of materials“. In: *Journal of International Scientific Publications: Materials, Methods & Technologies* 9 (), S. 404–413. ISSN: 1314-7269. URL: https://www.scientific-publications.net/get/1000015/1433083233386178.pdf.

[76] P. Gupta, G. Tenhundfeld, E.O. Daigle und P.J. Schilling: „Synthesis and characterization of hard metal coatings by electro-plasma technology“. In: *Surface and Coatings Technology* 200 (5) (2005), S. 1587–1594. DOI: https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.08.030.

[77] D. Vaňa, S. Podhorský, R. Suba und M. Hurajt: „The change of surface properties on tested smooth stainless steel surfaces after plasma polishing“. In: *International Journal of Engineering Science Invention* 2 (6) (2013), S. 7–11. ISSN: 2319-6734. URL: http://www.ijesi.org/papers/Vol%202(6)/Version-1/B026107011.pdf.

[78] J. Wang, L.C. Suo, L.L. Guan und Y.L. Fu: „Optimization of Processing Parameters for Electrolysis and Plasma Polishing“. In: *Advanced Materials and Process Technology*. Bd. 217. Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications, 2012, S. 1368–1371. DOI: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.217-219.1368.

[79] J. Wang, L.C. Suo, L.L. Guan und Y.L. Fu: „Analytical study on mechanism of electrolysis and plasma polishing“. In: *Advanced Manufacturing Technology, ICMSE 2012*. Bd. 472. Advanced Materials Research. Trans Tech Publications, 2012, S. 350–353. DOI: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.472-475.350.

[80] J. Wang, L.C. Suo, Y.L. Fu und Guan L.L.: „Study on material removal rate of electrolysis and plasma polishing“. In: *2012 IEEE International Conference on Information and Automation*. 2012, S. 917–922. DOI: https://doi.org/10.1109/ICInfA.2012.6246913.

[81] I. Danilov, M. Hackert-Oschätzchen, I. Schaarschmidt, M. Zinecker und A. Schubert: „Transient Simulation of the Removal Process in Plasma Electrolytic Polishing of Stainless Steel“. In: *Proceedings of the COMSOL Conference*. 2018. URL: https://www.comsol.com/paper/download/573171/danilov_paper.pdf.

[82] I. Danilov, M. Hackert-Oschätzchen, M. Zinecker, G. Meichsner, J. Edelmann und A. Schubert: „Process Understanding of Plasma Electrolytic Polishing through Multiphysics Simulation and Inline Metrology“. In: *Micromachines* 10 (3) (2019), S. 22. DOI: https://doi.org/10.3390/mi10030214.

[83] O.V. Mihal, O.V. Moroz, R.I. Starovoytov, S.V. Lytovchenko, B.A. Mazilin und L.O. Iliushyn: „Dynamics of the plasma electrolytic polishing process of austenitic steel AISI 304 in a solution of ammonium sulfate“. In: *Physics of Radiation Effects and Radiation Materials Science* (5) (2018), S. 126–131. ISSN: 1562-6016.

[84] C. Schmidt und L. Dietrich: *Chemie für Biologen*. Springer-Verlag, 2014. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-55424-7.

[85] U. Stroth: *Plasmaphysik: Phänomene, Grundlagen, Anwendungen*. Springer-Verlag, 2011. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-8348-8326-1.

[86] N. dung Tien: „Untersuchung anodischer elektrischer Entladungsvorgänge in Elektrolytlösungen an Eisenwerkstoffen.“ Diss. Technische Universität Chemnitz, 1984, S. 127. URL: https://katalog.bibliothek.tu-chemnitz.de/Record/0002627100.

[87] F. Holzer: „Oxidation von organischen Verbindungen unter Nutzung von porösen und unporösen Feststoffen im nichtthermischen Plasma“. Dissertation. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 2003. DOI: https://doi.org/10.25673/3387.

[88] M. Cornelsen, C. Deutsch und H. Seitz: „Electrolytic Plasma Polishing of Pipe Inner Surfaces“. In: *Metals* 8 (1) (2018). DOI: https://doi.org/10.3390/met8010012.

[89] M. Cornelsen, C. Deutsch und H. Seitz: „Influence of the Velocity and the Number of Polishing Passages on the Roughness of Electrolytic Plasma Polished Pipe Inner Surfaces“. In: *Metals* 8 (5) (2018). DOI: https://doi.org/10.3390/met8050330.

[90] T. Weise, C. Kluchert, M. Cornelsen, H. Seitz und V. Klopsch: „Polierkopf und Verfahren zum Plasmapolieren einer Innenfläche eines Werkstücks“. Schutzrecht DE102016100558A1. 2016. URL: https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE102016100558A1&xxxfull=1.

[91] *Leitfähigkeit - Ein Leitfaden für die Leitfähigkeitsmessung (Theorie und Praxisanwendungen)*. Mettler-Toledo GmbH, 2016.

[92] H. Zeidler, F. Boettger-Hiller, J. Edelmann und A. Schubert: „Surface Finish Machining of Medical Parts Using Plasma Electrolytic Polishing“. In: *Procedia CIRP* 49 (2016). The Second CIRP Conference on Biomanufacturing, S. 83–87. DOI: https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.07.038.

[93] C. Kluchert, K. Lingath und T. Weise: „Anlage zum selektiven Plasmapolieren und / oder reinigen der elektrisch leitenden Oberflächen von Bauteilen“. Schutzrecht WO002015192818A1. 2014. URL: https://depatisnet.dpma.de.

[94] K.-J. Matthes und W. Schneider: *Schweißtechnik - Schweißen von metallischen Konstruktionswerkstoffen*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2012. DOI: https://doi.org/10.3139/9783446428324.

[95] O.A. Ojo, N.L. Richards und M.C. Chaturvedi: „Microstructural study of weld fusion zone of TIG welded IN 738LC nickel-based superalloy“. In: *Scripta Materialia* 51 (7) (2004), S. 683–688. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2004.06.013.

[96] Q. Zhu, Y.c. Lei, X.-z. Chen, W.-j. Ren, X. Ju und Y.-m. Ye: „Microstructure and mechanical properties in TIG welding of CLAM steel“. In: *Fusion Engineering and Design* 86 (4) (2011), S. 407–411. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2011.03.070.

Eidesstattliche Versicherung

Ich versichere eidesstattlich durch eigenhändige Unterschrift, dass ich die Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen entnommen sind, habe ich als solche kenntlich gemacht.

Rostock, den ....

(Matthias Cornelsen)

LEBENSLAUF

MATTHIAS CORNELSEN
Karl-Marx Str. 75
18057 Rostock
matthias.soeren.cornelsen@gmail.com

Geboren am: 03. August 1980 in Stralsund

AUSBILDUNG UND WISSENSCHAFTLICHER WERDEGANG

1997–2000	**Gymnasium**, Berufliche Schule Technik und Handwerk der Hansestadt Stralsund, Fachrichtung Elektrotechnik
06/2000	Abschluss: Allgemeine Hochschulreife
10/2001 – 09/2008	**Studium** der Physik an der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald **Vertiefung**: Experimentelle Physik/Weiche Materie **Diplomarbeit**: Herstellung und Charakterisierung von Mono- und Multi-Schichten aus Polyelektrolyten Abschluss: Diplom-Physiker
04/2009 – 12/2019	**Wissenschaftlicher Mitarbeiter** am Lehrstuhl für Mikrofluidik der Universität Rostock **Forschungsschwerpunkte**: Additive Fertigungsverfahren Plasmapolieren metallischer Werkstoffe

Rostock, 15. Dezember 2020

Eigene Veröffentlichungen

[A1] M. Cornelsen, C. Deutsch und H. Seitz: „Electrolytic Plasma Polishing of Pipe Inner Surfaces“. In: *Metals* 8 (1) (2018). DOI: https://doi.org/10.3390/met8010012.

[A2] M. Cornelsen, C. Deutsch und H. Seitz: „Influence of the Velocity and the Number of Polishing Passages on the Roughness of Electrolytic Plasma Polished Pipe Inner Surfaces“. In: *Metals* 8 (5) (2018). DOI: https://doi.org/10.3390/met8050330.

[A3] E. Burian, F. Probst, B. Palla, C. Riedel, M.M. Saller, M. Cornelsen, F. König, M. Schieker und S. Otto: „Effect of hypoxia on the proliferation of porcine bone marrow-derived mesenchymal stem cells and adipose-derived mesenchymal stem cells in 2- and 3-dimensional culture“. In: *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery* 45 (3) (2017), S. 414–419. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jcms.2016.12.014.

[A4] M. Cornelsen, F.A. Probst, C. Schwarz, E. Burian, M. Tröltzsch, S. OTTO, M. M. Saller, M. Schieker und H. Seitz: „Mechanical and biological effects of infiltration with biopolymers on 3D printed tricalciumphosphate scaffolds“. In: *Dental Materials Journal* 36 (5) (2017), S. 553–559. DOI: https://doi.org/10.4012/dmj.2016-306.

[A5] C. Bergemann, M. Cornelsen, A. Quade, T. Laube, M. Schnabelrauch, H. Rebl, V. Weißmann, H. Seitz und B. Nebe: „Continuous cellularization of calcium phosphate hybrid scaffolds induced by plasma polymer activation“. In: *Materials Science and Engineering: C* 59 (2016), S. 514–523. DOI: https://doi.org/10.1016/j.msec.2015.10.048.

[A6] T. Weise, C. Kluchert, M. Cornelsen, H. Seitz und V. Klopsch: „Polierkopf und Verfahren zum Plasmapolieren einer Innenfläche eines Werkstücks“. Schutzrecht DE102016100558A1. 2016. URL: https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE102016100558A1.

[A7] T. Weise, C. Kluchert, M. Cornelsen, H. Seitz und V. Klopsch: „Polierkopf und Verfahren zum Plasmapolieren einer Innenfläche eines Werkstücks“. Gebrauchsmusterschutz DE202016100150U1. 2016. URL: https://depatisnet.dpma.de.

[A8] M. Berger, F. Probst, C. Schwarz, M. Cornelsen, H. Seitz, M. Ehrenfeld und S. Otto: „A concept for scaffold-based tissue engineering in alveolar cleft osteoplasty“. In: *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery* 43 (6) (2015), S. 830–836. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jcms.2015.04.023.

[A9] M. Cornelsen, S. Petersen, K. Dietsch, A. Rudolph, K. Schmitz, K. Sternberg und H. Seitz: „Infiltration of 3D printed tricalciumphosphate scaffolds with biodegradable polymers and biomolecules for local drug delivery“. In: *Biomedical Engineering / Biomedizinische Technik* (2013). DOI: https://doi.org/10.1515/bmt-2013-4090.

[A10] F. Probst, S. Otto, M. Cornelsen, R. Fliefel, E. Burian, M. Seitz, M. Berger, M. Ehrenfeld und M. Schieker: „Custom-made vitalized scaffolds for bone tissue reconstruction in craniomaxillofacial surgery“. In: *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery* 42 (10) (2013), S. 1375. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijom.2013.07.733.

[A11] J. Wieding, A. Fritsche, P. Heinl, C. Körner, M. Cornelsen, H. Seitz, W. Mittelmeier und R. Bader: „Biomechanical Behavior of Bone Scaffolds Made of Additive Manufactured Tricalciumphosphate and Titanium Alloy under Different Loading Conditions“. In: *Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials* 11 (3) (2013), S. 159–166. DOI: https://doi.org/10.5301/JABFM.2013.10832.

[A12] B. Nebe, M. Cornelsen, A. Quade, V. Weissmann, F. Kunz, S. Ofe, K. Schroeder, B. Finke, H. Seitz und C. Bergemann: „Osteoblast Behavior In Vitro in Porous Calcium Phosphate Composite Scaffolds, Surface Activated with a Cell Adhesive Plasma Polymer Layer“. In: *THERMEC 2011*. Bd. 706. Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd, 2012, S. 566–571. DOI: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.706-709.566.

[A13] A. Jonitz, J. Wieding, K. Lochner, M. Cornelsen, H. Seitz, D. Hansmann und R. Bader: „Migration Capacity and Viability of Human Primary Osteoblasts in Synthetic Three-dimensional Bone Scaffolds Made of Tricalciumphosphate“. In: *Materials* 4 (7) (2011), S. 1249–1259. DOI: 10.3390/ma4071249.

[A14] M. Cornelsen, C.A. Helm und S. Block: „Destabilization of Polyelectrolyte Multilayers Formed at Different Temperatures and Ion Concentrations“. In: *Macromolecules* 43 (9) (2010), S. 4300–4309. DOI: https://doi.org/10.1021/ma9027883.

Konferenzbeiträge & Poster

[B1] M. Cornelsen, C. Deutsch, T. Weise und H. Seitz: „Veredelung der Oberflächengüte von Edelstahlrohrinnenflächen mittels Plasmapolieren“. In: Anwendertage Plasmaoberflächentechnologie, Greifswald. 2015.

[B2] M. Cornelsen, T. Weise, F. Lawrenz, C.A. Helm und H. Seitz: „Veredelung von nichtrostenden Stahloberflächen mittels Plasmapolieren“. In: 20. Workshop des Anwenderkreises Atmosphärendruckplasma, Weimar. 2014.

[B3] M. Cornelsen, T. Weise, F. Lawrenz, C.A. Helm und H. Seitz: „Veredelung von nichtrostenden Stahloberflächen mittels Plasmapolieren“. In: *9. ThGOT Thementage Grenz- und Oberflächentechnik und 9. Thüringer Biomaterial-Kolliquium*. Hrsg. von INNOVENT e.V. 2013, S. 155–159.

[B4] C. Bergemann, M. Cornelsen, A. Quade, B. Finke, V. Weismann, S. Ofe, K. Schroeder, H. Seitz und J.B. Nebe: „Activation of calcium phosphate scaffolds with a plasma polymer layer induces enhanced cell acceptance“. In: *7. ThGOT Thementage Grenz- und Oberflächentechnik*. Hrsg. von INNOVENT e.V. 2011, S. 249–254.

[B5] M. Cornelsen und H. Seitz: „Additive Manufacturing with Selective Electron Beam Melting“. In: Materials' Days, Functional Materials, Rostock. 2011.

[B6] C. Bergemann, J. Wetzel, E.-D. Klinkenberg, V. Weißmann, S. Ofe, S. Spath, M. Cornelsen, H. Seitz, R. Lange, P. Elter, U. Beck, T. Lindner, R. Bader und J.B. Nebe: „Development of a three dimensional in vitro model system for nondestructive investigation of osteoblast cell growth in scaffolds“. In: EMRS Fall Meeting. 2009.