

VDE SPEC

**DIGITAL
TWIN**



Methode zur Erstellung digitaler Zwillinge von Prozessenergiequellen für das elektrochemische Präzisionsabtragen

VDE SPEC 90028 V1.0 (de)

VDE

© WrightStudio / stock.adobe.com

Vorwort

Veröffentlichungsdatum dieser VDE SPEC: 07.02.2024.

Zur vorliegenden VDE SPEC wurde kein Entwurf veröffentlicht.

Dieses Dokument ist entstanden aus einem DIN-Connect-Projekt „Standardisierung einer Methode zur ressourceneffizienten Erstellung digitaler Zwillinge von Prozessenergiequellen für das elektrochemische Präzisionsabtragen – digiZepPro.

Diese VDE SPEC wurde nach dem VDE SPEC-Verfahren erarbeitet. Die Erarbeitung von VDE SPEC 90028 V1.0 (de) erfolgte in einer Projektgruppe und nicht zwingend unter Einbeziehung aller interessierten Kreise.

Diese VDE SPEC ist **nicht** Bestandteil des VDE-Vorschriftenwerks oder des Deutschen Normenwerks. Diese VDE SPEC ist insbesondere auch **keine** Technische Regel im Sinne von § 49 EnWG.

Verfasser dieser VDE SPEC sind:

- Dr. Sören Griessbach, GS-Pro GmbH
- Prof. Dr. Matthias Hackert-Oschätzchen, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
- Dr. Gunnar Meichsner, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
- Annegret Jungblut, Pro-Com A. Jungblut GmbH
- Guido Jungblut, Pro-Com A. Jungblut GmbH
- Dr. Alois Köppl, Procter & Gamble Service GmbH
- Dipl.-Ing. Stephan Wengerek, Robert Bosch GmbH

Rückmeldungen können Sie bitte an folgende E-Mail-Adresse senden: spec@vde.com

An dieser Stelle herzlichen Dank an die Experten für ihre wertvollen Beiträge und Anregungen:

Annegret Jungblut, Pro-Com A. Jungblut GmbH

Trotz großer Anstrengungen zur Sicherstellung der Korrektheit, Verlässlichkeit und Präzision technischer und nicht-technischer Beschreibungen kann die VDE SPEC-Projektgruppe weder eine explizite noch eine implizite Gewährleistung für die Korrektheit des Dokuments übernehmen. Die Anwendung dieses Dokuments geschieht in dem Bewusstsein, dass die VDE SPEC-Projektgruppe für Schäden oder Verluste jeglicher Art nicht haftbar gemacht werden kann. Die Anwendung der vorliegenden VDE SPEC entbindet den Nutzer nicht von der Verantwortung für eigenes Handeln und geschieht damit auf eigene Gefahr.

Im Zuge der Herstellung und/oder Einführung von Produkten in den Europäischen Binnenmarkt muss der Hersteller eine Risikoanalyse durchführen, um zunächst festzustellen, welche Risiken das Produkt möglicherweise mit sich bringt. Nach Durchführung der Risikoanalyse bewertet er diese Risiken und ergreift gegebenenfalls geeignete Maßnahmen, um die Risiken wirksam zu eliminieren oder zu minimieren (Risikobewertung). Die vorliegende VDE SPEC entbindet den Nutzer nicht von dieser Verantwortung.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. VDE ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Zusammenfassung

Für die Digitalisierung von Produktionsprozessen stellen etwa Simulations-, Analyse-, Produktions- und Entwicklungsprozesse mit digitalen Zwillingen eine wesentliche Basis dar, um Effizienz und Qualität von Herstellungsprozessen zu verbessern. Eine wesentliche Herausforderung besteht aktuell in der Erstellung der digitalen Zwillinge, speziell für Produktionsprozesse, da hier die Einflüsse des Werkzeugmaschinensystems und dessen Peripherie auf den Produktionsprozess, die Beschreibung der funktionalen Zusammenhänge und die Ableitung der funktionalen Zusammenhänge in Daten und Algorithmen ermittelt werden müssen. Die VDE SPEC beschreibt eine Methode zur ressourceneffizienten Erstellung digitaler Zwillinge von Prozessenergiequellen für das elektrochemische Präzisionsabtragen.

Diese VDE SPEC legt Anforderungen und Randbedingungen zur ressourceneffizienten Erstellung digitaler Zwillinge von Prozessenergiequellen für das elektrochemische Präzisionsabtragen fest und definiert den experimentellen Aufbau und die Prozesseingangsgrößen. Die notwendigen Arbeitsschritte für die Abtragexperimente und die Ermittlung von funktionalen Zusammenhängen, Daten und Algorithmen zur Darstellung der Zusammenhänge werden beschrieben.

Executive Summary

For the digitization of production processes, simulation, analysis, production and development processes with digital twins represent an essential basis for improving the efficiency and quality of manufacturing processes. A major challenge currently lies in the creation of digital twins, especially for production processes, since here the influences of the machine tool system and its periphery on the production process, the description of the functional relationships and the transfer of the functional relationships into data and algorithms must be determined. The VDE SPEC describes a method for the resource-efficient creation of digital twins of process energy sources for precision electrochemical machining.

This VDE SPEC specifies requirements and boundary conditions for the resource-efficient creation of digital twins of process energy sources for precision electrochemical machining and defines the experimental setup and process input variables. The necessary steps for the removal experiments and the determination of functional correlations, data and algorithms for the representation of the correlations are described.

Inhalt

1	Anwendungsbereich	1
2	Normative Verweisungen	1
3	Begriffe	1
4	Symbole und Abkürzungen	3
5	Kurzbeschreibung	5
6	Anforderungen	6
6.1	EC-Fertigungseinrichtung	6
6.1.1	Allgemeines	6
6.1.2	Prozessstrom und Generatorstufe	6
6.2	Abtragvorrichtung	6
6.3	Messwertaufnehmer	7
7	Probekörper und Kathode	8
7.1	Form und Abmaße	8
7.2	Anzahl	9
7.3	Probekörperwerkstoff	9
7.4	Vorbehandlung der Probekörper	9
7.5	Kathodenwerkstoff	9
8	Abtragexperimente	10
8.1	Allgemeines	10
8.2	Festlegung der Prozesseingangsgrößen	10
8.3	Anschluss Messwertaufnehmer	11
8.4	Durchführung des Abtragexperiments	11
8.5	Messwertaufnahme	12
8.6	Beendigung des Abtragexperiments	12
9	Auswertung und Angabe der Ergebnisse	12
9.1	Zuordnung der Daten der Messwertaufnahme	12
9.2	Aufbereitung des Prozessstroms	12
9.3	Aufbereitung der Daten der Messwertaufnahme	12
9.4	Ermittlung der mittleren maximalen Stromstärke des Strompulses	13
9.5	Ermittlung der Stromkorrelationsfunktionen	13
9.6	Ermittlung der ladungsbezogenen Strompulsbreite	15
9.7	Ermittlung der Strompulsbreitenkorrelationsfunktionen	16
9.8	Ableitung digitaler Zwillinge von Prozessenergiequellen für das elektrochemische Präzisionsabtragen	18
Anhang A (normativ) Empfohlene Prozesseingangsgrößen		19
Anhang B (normativ) Empfohlene Prozessgrößenerfassung		20
Literaturhinweise		21

Bilder

Bild 1 – Prinzipskizze der Elektrodenanordnung eines Abtragexperiments	5
Bild 2 – Schematische Darstellung der Abtragsvorrichtung	7
Bild 3 – Abmaße der Probekörper	9
Bild 4 – Abmaße der Kathode	9
Bild 5 – Schematische Darstellung der Messpunkte während eines Abtragexperiments	12
Bild 6 – Ermittlung des Verschiebungswerts t_{ver} eines Strompulses	13
Bild 7 – Ermittlung der mittleren maximalen Stromstärke I_{mmax} eines Strompulses im Bereich t_{G1} bis t_{G2}	13
Bild 8 – Möglicher Verlauf der mittleren maximalen Stromstärke in Abhängigkeit des mittleren Prozessstroms für verschiedene Strompulsbreiten und Generatorstufen	14
Bild 9 – Ermittlung der ladungsbezogenen Strompulsbreite $t_{\text{p-l}}$ eines Strompulses	15
Bild 10 – Möglicher Verlauf der ladungsbezogenen Strompulsbreite $t_{\text{p-l}}$ in Abhängigkeit der mittleren maximalen Stromstärke I_{mmax} für verschiedene Strompulsbreiten und Generatorstufen	16
Bild 11 – Möglicher Verlauf der Abweichung der ladungsbezogenen Strompulsbreite $\Delta t_{\text{p-l}}$ in Abhängigkeit der mittleren maximalen Stromstärke I_{mmax} für verschiedene Strompulsbreiten und Generatorstufen	17

Tabellen

Tabelle 1 – Prozesseingangsgrößen, typische Wertebereiche und Toleranzen	6
Tabelle 2 – Messwertaufnehmer, empfohlene Eigenschaften für den Stromstärkebereich 10 A bis 400 A	8
Tabelle 3 – Werte der Abtragfunktion des Werkstückwerkstoffes 1.4301 [2]	11
Tabelle 4 – Experimentiermatrix für verschiedene Strompulsbreiten	11
Tabelle 5 – Übersichtsdarstellung der Funktionswerte der Stromkorrelationsfunktion $I_{\text{mmax}} = f(I_{\text{mProz}})$ in Abhängigkeit der Strompulsbreite und der Generatorstufe	14
Tabelle 6 – Übersichtsdarstellung der funktionalen Zusammenhänge der Stromkorrelationsfunktion $I_{\text{mmax}} = f(I_{\text{mProz}})$ in Abhängigkeit der Generatorstufe	15
Tabelle 7 – Übersichtsdarstellung der funktionalen Zusammenhänge der Strompulsbreitenkorrelationsfunktion $t_{\text{p-l}} = f(I_{\text{mmax}})$ in Abhängigkeit der mittleren maximalen Stromstärke I_{mmax} für Strompulsbreiten und Generatorstufen	16
Tabelle 8 – Übersichtsdarstellung der funktionalen Zusammenhänge der Strompulsbreitenkorrelationsfunktion $\Delta t_{\text{p-l}} = f(I_{\text{mmax}})$ in Abhängigkeit der mittleren maximalen Stromstärke für Genetorstufen	17
Tabelle 9 – Empfohlene Prozesseingangsgrößen für Tabelle 1 (6.1.1)	19
Tabelle 10 – Übersicht der notwendigen Prozessgrößen für die Datenerfassung im Messpunkt (mit beispielhaften Werten)	20
Tabelle 11 – Übersicht der notwendigen Prozessgrößen für die Ermittlung der Korrelationsfunktionen (mit beispielhaften Werten)	20

1 Anwendungsbereich

Diese VDE SPEC legt Anforderungen und Randbedingungen zur ressourceneffizienten Erstellung digitaler Zwillinge von Prozessenergiequellen für das elektrochemische Präzisionsabtragen fest und definiert den experimentellen Aufbau und die Prozesseingangsgrößen. Die notwendigen Arbeitsschritte für die Abtragexperimente und die Ermittlung von funktionalen Zusammenhängen, Daten und Algorithmen zur Darstellung der Zusammenhänge werden beschrieben.

Diese VDE SPEC soll ausschließlich für das elektrochemische Präzisionsabtragen mit gepulstem Strom und oszillierendem Arbeitsabstand gelten.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

DIN 8580, *Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung*

DIN 8590, *Fertigungsverfahren Abtragen – Einordnung, Unterteilung, Begriffe*

DIN SPEC 91399, *Methode zur Bestimmung von Prozesseingangsgrößen für das elektrochemische Präzisionsabtragen – Anforderungen, Kriterien, Festlegungen*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach DIN 8580, DIN 8590 und die folgenden Begriffe.

ISO und IEC stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

- ISO Online Browsing Plattform: verfügbar unter <https://www.iso.org/obp>
- IEC Electropedia: verfügbar unter <http://www.electropedia.org>

DIN und DKE stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

- DIN-TERMinologieportal: verfügbar unter <https://www.din.de/go/din-term>
- DKE-IEV: verfügbar unter <http://www.dke.de/DKE-IEV>

3.1

Abtragsfunktionen

abgeleitete mathematische Funktion zur Beschreibung des werkstoffspezifischen Abtrags sowie der Zustandsänderung im Arbeitsabstand

[Quelle: DIN SPEC 91399]

3.2

Arbeitsabstand

Distanz zwischen Kathode und Anode

[Quelle: DIN SPEC 91399]

3.3

Arbeitsspalt

Volumen, das durch die Anodenfläche und die Kathodenfläche sowie den Abstand zwischen diesen Flächen aufgespannt wird

[Quelle: DIN SPEC 91399]

3.4 **elektrochemisches Präzisionsabtragen** **EC-Präzisionsabtragen**

elektrochemisches Abtragen mit gepulstem Gleichstrom und oszillierender Kathode oder oszillierender Anode

Anmerkung 1 zum Begriff: Kathode bezeichnet das Werkzeug.

Anmerkung 2 zum Begriff: Anode bezeichnet das Werkstück.

[Quelle: DIN SPEC 91399]

3.5 **ladungsbezogene Strompulsbreite**

rechnerische Größe, die aus der elektrischen Ladung und der mittleren maximalen elektrischen Stromstärke eines realen Strompulses resultiert

3.6 **mittlere maximale elektrische Stromstärke**

arithmetischer Mittelwert des High-Pegels des Strompulses

3.7 **Prozesseingangsgröße**

maschinenseitige Einstellgröße, wie beispielsweise Bearbeitungsspannung U_q , Senkgeschwindigkeit v_s , Strompulsfrequenz f_p und Strompulsbreite t_p

[Quelle: DIN SPEC 91399]

Prozessstromverlauf

von der Fertigungseinrichtung ausgegebene Stromstärkewerte als Funktion der Prozessdauer ohne Abbildung der Strompulse

3.8 **Prozessdauer**

Zeit vom Start bis zum Ende eines Abtragprozesses

3.9 **Senkweg**

während des Bearbeitungsprozesses durch die Relativbewegung zwischen Kathode und Anode zurückgelegter Weg

[Quelle: DIN SPEC 91399]

3.10 **Senkgeschwindigkeit**

Geschwindigkeit der Relativbewegung zwischen Kathode und Anode während des Bearbeitungsprozesses

Anmerkung 1 zum Begriff: Es wurde nicht der Begriff Vorschubgeschwindigkeit benutzt, da dieser Begriff in der Zerspannung verwendet wird.

[Quelle: DIN SPEC 91399]

3.11 **Zustandsänderung im Arbeitsabstand**

Leitfähigkeitsänderung im Arbeitsabstand infolge des Wirkens von Elektrolytspülung und der prozessbedingten Änderungen der Elektrolyttemperatur sowie der Konzentration von Abtrag- und Reaktionsprodukten

[Quelle: DIN SPEC 91399]

4 Symbole und Abkürzungen

Symbol	Bedeutung	Einheit
A_a	Abtragfläche	cm ²
$A_{\text{KOF-1}}$	Abtragwirksame Kathodenoberfläche zum Zeitpunkt 1	cm ²
$A_{\text{KOF-2}}$	Abtragwirksame Kathodenoberfläche zum Zeitpunkt 2	cm ²
f_p	Strompulsfrequenz	Hz
f_z	Oszillationsfrequenz	Hz
I	Stromstärke	A
I_{mmax}	mittlere maximale elektrische Stromstärke des Strompulses	A
I_{mProz}	arithmetischer Mittelwert des Prozessstroms der EC-Fertigungseinrichtung	A
I_{Proz}	Prozessstrom der durch die EC-Fertigungseinrichtung ausgegeben wird	A
I_0	Schnittpunkt der Linearisierung I_{mmax} mit Y-Achse	A
I_{Ver}	Verschiebungswert des Stroms zum Nullpunktabgleich	A
I_1	Stromstärke zum Zeitpunkt 1	A
I_2	Stromstärke zum Zeitpunkt 2	A
J	elektrische Stromdichte	A/cm ²
J_m	mittlere elektrische Stromdichte	A/cm ²
m	Index der Generatorstufennummer	
n	Index der Strompulsbreite	
p_{el}	Elektrolytdruck	bar
Q	elektrische Ladung	C
r_B	Radius der Spülbohrung	mm
s_0	Anfangsarbeitsabstand	mm
t_p	Strompulsbreite	ms
t_{Proz}	Prozessdauer	s
t_{p-1}	ladungsbezogene Strompulsbreite	ms
t_{pn}	n-te Strompulsbreite	ms
t_{p1}	erste Strompulsbreite	ms
t_{G1}	Zeitpunkt nach Erreichen des Einschaltens des Strompulses	ms
t_{G2}	Zeitpunkt des Abschaltens des Strompulses	ms
t_{Q1}	untere Grenze des Strompulsverlaufes	ms
t_{Q2}	obere Grenze des Strompulsverlaufes	ms
t_1	Zeitpunkt 1	s
t_2	Zeitpunkt 2	s
U_q	Bearbeitungsspannung	V
\dot{V}	Volumenstrom	l/min
V_m	Anstieg der $v_a - J$ Kennlinie	cm ³ /C
V_{m-PDC}	Anstieg der $v_f - J$ Kennlinie	cm ³ /C

Symbol	Bedeutung	Einheit
v_{a-PDC}	Bearbeitungsgeschwindigkeit des EC-Präzisionsabtragens	mm/min
v_f	Senkgeschwindigkeit	mm/min
v_0	Schnittpunkt der Linearisierung v_a mit Y-Achse	mm/min
v_{0-PDC}	Schnittpunkt der Linearisierung v_f mit Y-Achse	mm/min
w	Massenanteil Salz	
Z	Schwingbreite der Oszillation	mm
z	Senkweg der Z-Achse	mm
z_1	Senkweg zum Zeitpunkt 1	mm
z_2	Senkweg zum Zeitpunkt 2	mm
Δt_{p-1}	Abweichung der ladungsbezogene Strompulsbreite von der Strompulsbreite	ms
α	Kegelwinkel der Kathode	°
σ_{el}	Elektrolytleitfähigkeit	mS/cm
ϑ_{el}	Elektrolyttemperatur	°C

Abkürzung	Bedeutung
EC	Elektrochemisch
GS	Generatorstufe
UVMM	Umrechnungsverhältnis entsprechend des gewählten Messbereichs des Messwertaufnehmers
NaNO_3	Natriumnitrat
PDC	Pulsed direct current
pH	Potential des Wasserstoffs

5 Kurzbeschreibung

Zur Erstellung digitaler Zwillinge von Prozessenergiequellen für das elektrochemische Präzisionsabtragen wird der für den Abtragprozess von der Fertigungseinrichtung zur Verfügung gestellte elektrische Prozessstrom durch einen externen Messaufnehmer messtechnisch erfasst. Im Abtragexperiment wird eine zylindrische Probe durch eine kegelförmige Kathode abgetragen (siehe Bild 1). Durch die Kegelform der Kathode erhöht sich der Prozessstrom während des Abtragexperiments kontinuierlich. Zur Ermittlung eines Stromstärkebereichs wird die Stromstärke bezogen auf den Senkweg ausgewertet. Darüber hinaus erfolgt die Ermittlung der geflossenen elektrischen Ladung und der ladungsbezogenen Strompulsbreite. Anschließend erfolgt der Vergleich zwischen messtechnisch erfasster Stromstärke und dem ausgegebenen Prozessstromverlauf der Fertigungseinrichtung sowie der Vergleich zwischen ladungsbezogener Strompulsbreite und der an der Fertigungseinrichtung eingestellten Strompulsbreite. Auf Basis dessen erfolgt die Ableitung der funktionalen Zusammenhänge in mathematische Funktionen, die zur Erstellung digitaler Zwillinge der Prozessenergiequellen verwendet werden können.

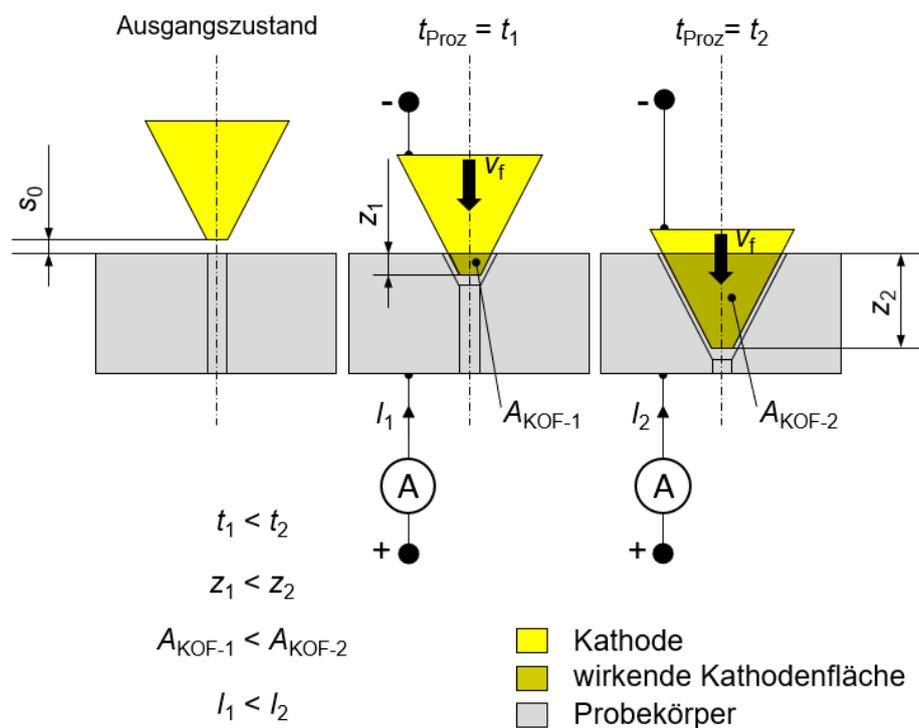


Bild 1 – Prinzipskizze der Elektrodenanordnung eines Abtragexperiments

6 Anforderungen

6.1 EC-Fertigungseinrichtung

6.1.1 Allgemeines

Fertigungseinrichtung für das EC-Präzisionsabtragen mit der Spezifikation:

- Gepulster Gleichstrom; mit einstellbarer Strompulsbreite und Strompulsfrequenz;
- Oszillierende Kathode; die Relativbewegung der Kathode ist mit einer Oszillationsbewegung überlagert, mit einer konstanten Schwingbreite Z und einer Oszillationsfrequenz f_z ; die Oszillationsfrequenz sollte gleich der Strompulsfrequenz sein

Typische Wertebereiche und Toleranzen von Prozesseingangsgrößen werden in Tabelle 1 dargestellt. Empfohlene Prozesseingangsgrößen sind in Anhang A dargestellt.

Tabelle 1 – Prozesseingangsgrößen, typische Wertebereiche und Toleranzen

Benennung	Symbol	Typischer Wertebereich	empfohlene maximale Abweichung im Prozess
Bearbeitungsspannung	U_q	5 V bis 20 V	$\pm 0,1$ V
Strompulsbreite	t_p	1 ms bis 5 ms	$\pm 0,1$ ms
Strompulsfrequenz	f_p	10 Hz bis 60 Hz	$\pm 0,5$ Hz
Oszillationsfrequenz	f_z	10 Hz bis 60 Hz	$\pm 0,5$ Hz
Schwingbreite der Oszillation	Z	0,1 mm bis 0,5 mm	$\pm 0,01$ mm
Senkweg der Z-Achse	z	≤ 150 mm	$\pm 0,01$ mm
Senkgeschwindigkeit	v_t	0,007 mm/min bis 1 mm/min	$\pm 0,002$ mm/min
Elektrolytart		NaNO_3	
Massenanteil Salz	w	1 % bis 20 %	$\pm 0,01$ %
Elektrolytleitfähigkeit	σ_{el}	10 mS/cm bis 170 mS/cm	± 1 %
Elektrolyttemperatur	ϑ_{el}	18 °C bis 30 °C	$\pm 0,1$ K
Elektrolytdruck	p_{el}	< 5 bar	$\pm 0,1$ bar
pH-Wert		6 bis 8	$\pm 0,5$
Volumenstrom pro 1 cm ² bearbeitete Fläche	\dot{V}/A_a	(1,5 l/min bis 3,0 l/min) / cm ²	($\pm 0,2$ l/min) / cm ²

6.1.2 Prozessstrom und Generatorstufe

Die EC-Fertigungseinrichtung muss den Prozessstrom als Funktion $I_{\text{Proz}} = f(t_{\text{Proz}})$ mit einer Toleranz von ± 1 A erfassen, anzeigen und ausgeben können. Eine Ausgabe einzelner Strompulse ist nicht notwendig. Der Prozessstrom kann der Mittelwert der maximalen Stromstärke fortlaufender Strompulse über eine Zeitschrittweite sein. Die Zeitschrittweite sollte nicht mehr als 0,5 s betragen. Die Datenausgabe muss einen Zeitstempel beinhalten, welcher die Uhrzeit der Datenerhebung mit Stunde, Minute und Sekunde angibt.

Für den Fall, dass die Prozessenergiequelle der EC-Fertigungseinrichtung je nach Höhe des Prozessstroms verschiedene Generatorstufen zuschaltet, sollte die EC-Fertigungseinrichtung die verwendete Generatorstufe anzeigen und ausgeben können.

6.2 Abtragsvorrichtung

Bild 2 zeigt die schematische Darstellung einer Abtragsvorrichtung, welche die in Abschnitt 5 beschriebene Elektrodenanordnung beinhaltet. Die Abtragsvorrichtung besteht aus den drei Hauptkomponenten Kathodenspannsystem, Probekörperspannsystem und Spülkammer und gewährleistet die Ausrichtung der Stirnflächen von Kathode und Probekörper so, dass beide Stirnflächen konzentrisch mit einer Toleranz von $\pm 0,01$ mm sowie parallel mit einer Toleranz $\pm 0,01$ mm zueinander positioniert werden. Dabei gilt:

- Das Kathodenspannsystem dient der Fixierung und Positionierung der Kathode und stellt die elektrische Kontaktierung für das kathodenseitige Potenzial zur Verfügung.
- Das Probekörperspannsystem dient der Fixierung und Positionierung des Probekörpers und stellt die Kontaktierung für das anodenseitige Potenzial zur Verfügung. Zur Erzeugung einer erzwungenen Spülung durch den Probekörper stellt das Probekörperspannsystem den Elektrolyten zur Verfügung. Der Probekörper verfügt hierzu über eine Spülbohrung.
- Das Kathoden- und das Probekörperspannsystem werden durch eine elektrisch isolierende Spülkammer verbunden, sodass eine Potentialtrennung vorliegt. Die Spülkammer verfügt über zwei Elektrolytauslässe. In der Spülkammer können Elektrolytdrücke bis 10 bar erreicht werden. Die Spülkammer kann mit der Kathode fest verbunden sein. Durch die Relativbewegung zwischen Kathode und Anode erfolgt eine kontinuierliche Verschiebung der Spülkammer auf den Spannsystemen. Zur Verringerung von Leckagen sind Dichtungen zu verwenden.

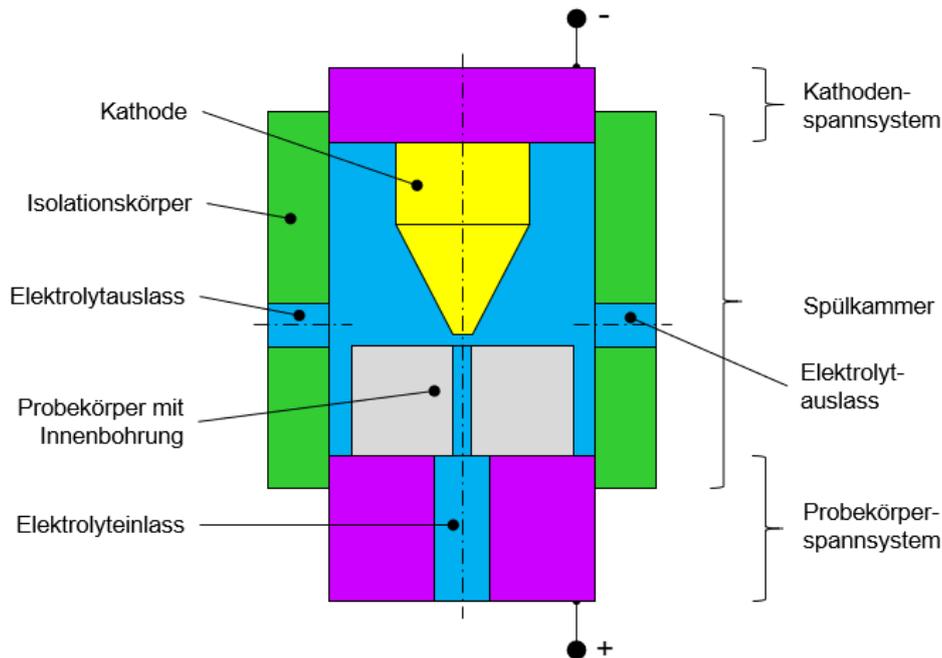


Bild 2 – Schematische Darstellung der Abtragsvorrichtung

6.3 Messwertaufnehmer

Der Messwertaufnehmer sollte über einen Messumformer und über ein Betrachtungs- und Aufzeichnungsgerät verfügen. Hierzu kann eine Stromzange und ein Speicheroszilloskop verwendet werden.

Spezifikationen des Messwertaufnehmers für die messtechnische Erfassung des Strompulsverlaufs sind folgende:

- Abdecken des zu messenden Stromstärkebereichs für gepulsten Gleichstrom
- Erfassen des zu messenden Wertebereichs für Strompulsbreiten; typische Wertebereiche 1 ms bis 5 ms (vergleiche Tabelle 1)
- Einstellbare Uhrzeit zur Synchronisation mit der EC-Fertigungseinrichtung
- Speichern erfasster Strompulse

Empfohlene Eigenschaften von Messwertaufnehmern sind beispielhaft in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2 – Messwertaufnehmer, empfohlene Eigenschaften für den Stromstärkebereich 10 A bis 400 A

Benennung	empfohlene Eigenschaften
Stromart	Gepulster Gleichstrom
Stromstärkebereich	10 A bis 400 A
Empfindlichkeit für 0,5 A > I ≤ 150 A	10 mV/A
Empfindlichkeit für 150 A > I ≤ 400 A	1 mV/A
DC-Nullausgleich	automatisch
Bandbreite für gepulster Gleichstrom	30 kHz
Anstiegsdauer (von 10 auf 90 %)	≤ 11 µs
Abfalldauer (von 90 auf 10 %)	≤ 11 µs
Verzögerungsdauer bei 10 %	≤ 10 µs
Eigenunsicherheiten für 0,5 A > I ≤ 150 A	≤ ±1,5% des Lesewerts
Eigenunsicherheiten für 150 A > I ≤ 400 A	≤ ± 2,5% des Lesewerts
Samplerate	Mindestens 5 MS/s für Strompulsbreite von 1 ms; Aufzeichnungslänge von 10.000 Punkten;

7 Probekörper und Kathode

7.1 Form und Abmaße

Beispielhaft sind Form, Abmaße und Toleranzen der Probekörper sowie der Kathode zum Erreichen eines Stromstärkebereichs von 10 A bis 300 A bei einer mittleren Stromdichte von 60 A/cm² in Bild 3 und Bild 4 dargestellt. Die Abmaße können angepasst werden. Es ist zu beachten, dass die Kegeloberfläche der Kathode den zu erreichenden Stromstärkebereich und den Anstieg der Stromstärke je Senkweg beeinflusst. Zudem ist die Höhe der Probekörper an den zu erreichenden Senkweg anzupassen. Die Probekörper haben eine Spülbohrung in der Mitte. Der Spülbohrungsdurchmesser beträgt mindestens 2 mm.

Überschlagsmäßig kann der erfassbare Stromstärkebereich durch die eingesenkte Mantelfläche des Kathodenkegels in Abhängigkeit der Senktiefe nach Gleichung (1) ermittelt werden.

$$I(z, \alpha, J_m) = \left((z \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)) + 2 \cdot r_B \right) \cdot \pi \cdot \sqrt{(z \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right))^2 + z^2} \cdot J_m \quad (1)$$

wobei

- z Senkweg der Z-Achse,
- α Kegelwinkel der Kathode,
- r_B Radius der Spülbohrung,
- J_m mittlere elektrische Stromdichte.

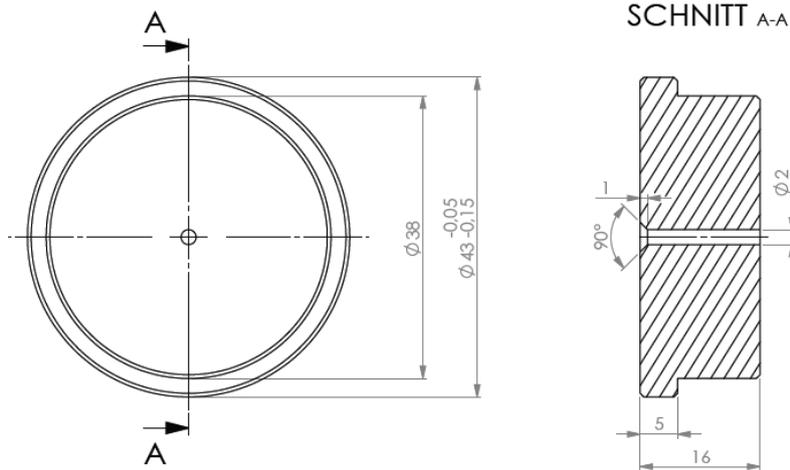


Bild 3 – Abmaße der Probekörper

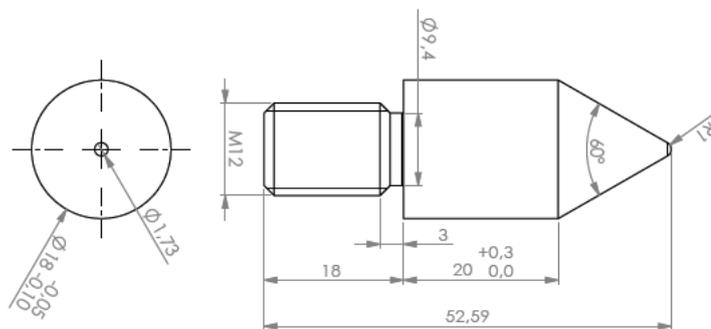


Bild 4 – Abmaße der Kathode

7.2 Anzahl

Zur Ermittlung des Stromstärkebereichs für eine gewählte Strompulsbreite ist in den meisten Fällen ein Probekörper ausreichend. Der Probekörper wird durch ein einzelnes Abtragexperiment bearbeitet. Während des Abtragexperiments erfolgt die Datenerhebung. Der Probekörper kann auch durch aufeinanderfolgende Abtragexperimente bearbeitet werden. Für jede weitere zu untersuchende Strompulsbreite ist jeweils ein neuer Probekörper zu verwenden.

Für die Abtragexperimente ist eine Kathode notwendig. Im Fall eines Kurzschlusses im Abtragexperiment ist ein Austausch der Kathode und des Probekörpers nicht zwingend notwendig.

7.3 Probekörperwerkstoff

Als Probekörperwerkstoff sollte der rostfreie austenitische Stahl 1.4301 verwendet werden, da die VDE SPEC für diesen Werkstoff die materialspezifischen Abtragfunktionen bei der Auslegung der Abtragexperimente berücksichtigt.

Als Probekörperwerkstoff kann der gleiche Probekörperwerkstoff, welcher in der späteren Produktion eingesetzt wird, verwendet werden, insofern die Abtragfunktionen nach DIN SPEC91399 des Werkstoffes bekannt sind.

7.4 Vorbehandlung der Probekörper

Vor dem Abtragexperiment sind die Probekörper zu entfetten, zu reinigen und zu trocknen. Es ist Gratfreiheit am Probekörper sicherzustellen.

7.5 Kathodenwerkstoff

Als Kathodenwerkstoff kann der rostfrei austenitische Stahl 1.4301 verwendet werden.

Als Kathodenwerkstoff kann der gleiche Kathodenwerkstoff, welcher in der späteren Produktion eingesetzt wird, verwendet werden.

8 Abtragexperimente

8.1 Allgemeines

Das Abtragexperiment dient zur Datenerhebung während eines Abtrags. Ein Abtrag ist durch eine wirkende Senkgeschwindigkeit und durch einen zu erreichenden Senkweg gekennzeichnet. Während des Abtrags sollen mindestens 10 Strompulse mit unterschiedlicher Stromstärke messtechnisch erfasst werden. Die Wertebereiche der Prozesseingangsgrößen richten sich nach Tabelle 1.

Für die Abtragexperimente werden die Bearbeitungsspannung, die Strompulsfrequenz, der Senkweg und die wirkende mittlere Stromdichte auf je einen Wert festgelegt. Es wird empfohlen, eine Bearbeitungsspannung von 10 V, eine Strompulsfrequenz von 50 Hz, einen Senkweg von 14,5 mm und eine mittlere Stromdichte von 60 A/cm² zu verwenden.

Die Festlegung der Strompulsbreite erfolgt anhand des Wertebereichs der EC-Fertigungseinrichtung. Es wird empfohlen, mindestens zwei ganzzahlige Strompulsbreiten auszuwählen. Für jede Strompulsbreite ist ein Abtragexperiment nach 8.2 zu planen und nach 8.4 durchzuführen. Hierzu ist ein neuer Probekörper zu verwenden.

Die Festlegung der Senkgeschwindigkeit erfolgt durch Berechnung nach 8.2.

8.2 Festlegung der Prozesseingangsgrößen

Die Festlegung der Prozesseingangsgrößen erfolgt in Anlehnung an die DIN SPEC 91399. Die Berechnung der Senkgeschwindigkeit v_f erfolgt unter Berücksichtigung des Kegelwinkels α der Kathoden nach Gleichung (2)

$$v_f = \frac{v_{a-PDC}}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (2)$$

wobei

- v_f Senkgeschwindigkeit,
- v_{a-PDC} Bearbeitungsgeschwindigkeit des EC-Präzisionsabtrags,
- α Kegelwinkel der Kathode.

Sind die Abtragfunktionen des Werkstückwerkstoffes in der gewählten Kombination mit dem Elektrolyten und dem Kathodenwerkstoff für das EC-Abtragen mit kontinuierlichem Gleichstrom bekannt, erfolgt die Berechnung der Senkgeschwindigkeit v_f für das EC-Präzisionsabtragen anhand Gleichung (3) [1, 2]¹

$$v_{a-PDC} = (V_m \cdot J_m + v_0) \cdot t_p \cdot f_p \quad (3)$$

wobei

- V_m Anstieg der $v_a - J$ Kennlinie,
- J_m mittlere elektrische Stromdichte,
- v_0 Schnittpunkt der Linearisierung v_a mit Y-Achse,
- t_p Strompulsbreite,
- f_p Strompulsfrequenz.

Liegt eine Abtragfunktion für das EC-Präzisionsabtragen mit festgelegter Strompulsfrequenz und Strompulsbreite nach Gleichung (4) vor, so ist die Ermittlung der Senkgeschwindigkeit nach Gleichung 4 durchzuführen [1, 2].

¹ Ziffern in eckigen Klammern beziehen sich auf die Literaturhinweise.

$$v_{a-PDC} = V_{m-PDC} \cdot J_m + v_{0-PDC} \quad (4)$$

wobei

V_{m-PDC} Anstieg der $v_f - J$ Kennlinie

J_m mittlere elektrische Stromdichte

v_{0-PDC} Schnittpunkt der Linearisierung v_f mit Y-Achse

Sollte als Probekörperwerkstoff und als Kathodenwerkstoff der rostfreie austenitische Stahl 1.4301 verwendet werden, können zur Berechnung der Senkgeschwindigkeit für das EC-Präzisionsabtragen anhand Gleichung (3) die Werte aus Tabelle 3 verwendet werden:

Tabelle 3 – Werte der Abtragfunktion des Werkstückwerkstoffes 1.4301 [2]

Größen	J_m	V_m	v_0
Einheit	$\frac{A}{cm^2}$	$\frac{mm}{min} / \frac{A}{cm^2}$	$\frac{mm}{min}$
Abtragbereich 1	9 – 55	0,0106	-0,063
Abtragbereich 2	55 - 107	0,0116	-0,032

Aus den berechneten Prozessgrößen ergibt sich eine Experimentiermatrix nach Tabelle 4.

Tabelle 4 – Experimentiermatrix für verschiedene Strompulsbreiten

Größen	Einheit	Experiment 1	Experiment 2	...	Experiment n	Gegebene Größen
t_p	ms	t_{p1}	t_{p2}	...	t_{pn}	$V_m, v_0, f_p, J_m, U_q, \alpha$
v_f	$\frac{mm}{min}$	v_{f1}	v_{f2}	...	v_{fn}	

8.3 Anschluss Messwertaufnehmer

Vor der Durchführung des Abtragexperiments ist der Anschluss des Messwertaufnehmers hinsichtlich stromrichtiger Messung und Stromrichtung anhand der Herstellerangaben durchzuführen. Darüber hinaus ist für eine spätere Zuordnung eine zeitliche Synchronisation des Aufzeichnungsgeräts des Messwertaufnehmers mit der EC-Fertigungseinrichtung sicherzustellen. Die Uhrzeit des Aufzeichnungsgeräts ist hierzu an die Uhrzeit der EC-Fertigungseinrichtung anzupassen.

8.4 Durchführung des Abtragexperiments

Unter Verwendung der festgelegten Prozesseingangsgrößen erfolgt der Start des Abtragexperiments. Während des Abtragexperiments erfolgt die Messwertaufnahme an festgelegten Messpunkten nach 8.5.

Der Spüldruck kann während des Abtragexperiments angepasst werden.

Zur Reduzierung der Abtragzeit kann bei Strompulsbreiten kleiner 4 ms der Abtrag zwischen den Messpunkten mit höherer Strompulsbreite und Senkgeschwindigkeit erfolgen. Es wird empfohlen, unter Verwendung der Kathodengeometrie nach Bild 4 und des Probenwerkstoffes 1.4301 eine Strompulsbreite von 4 ms und eine Senkgeschwindigkeit von 0,266 mm/min zu nutzen. Es ist sicherzustellen, dass vor Erreichen des nächsten Messpunkts die festgelegten Prozesseingangsgrößen wieder eingestellt werden. Die Einstellung soll mindestens 200 μ m vor Erreichen des festgelegten Senkwegs erfolgen.

Das Abtragexperiment ist abgeschlossen, wenn die Kegelfläche der Kathode komplett eingesenkt wurde und dadurch der Prozessstrom nicht mehr ansteigt.

Sollte ein erforderlicher maximaler Prozessstrom nicht erreicht worden sein, empfiehlt es sich die Bearbeitungsspannung zu vergrößern oder das Abtragexperiment mit einer Kathode mit größerer Oberfläche zu wiederholen.

8.5 Messwertaufnahme

Während des Abtragexperiments nimmt die Prozessstromstärke infolge des Einsenkens der Kegelkathode zu. An festgelegten Messpunkten erfolgt die messtechnische Erfassung des Pulsstroms. Die Messpunkte können festgelegte Senkwege oder festgelegte Prozessstromstärken sein. (siehe Bild 5)

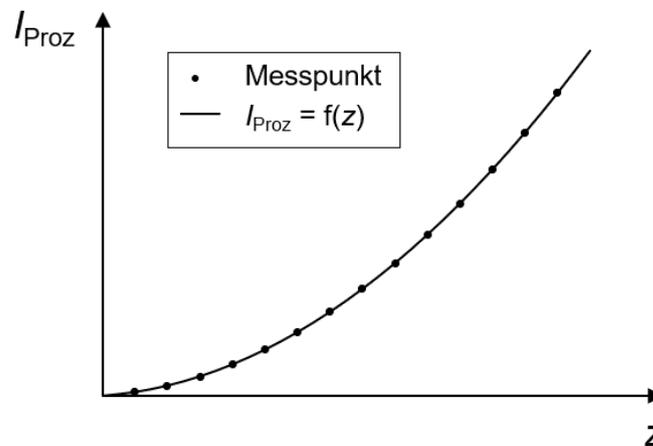


Bild 5 – Schematische Darstellung der Messpunkte während eines Abtragexperiments

Beim Erreichen eines Messpunkts ist der Pulsstromverlauf mindestens eines Strompulses aufzunehmen und zu speichern. Es wird empfohlen, eine visuelle Abbildung (z. B. ein Bildschirmfoto) und eine digitale Aufzeichnung des Pulsstromverlaufs zu speichern.

Darüber hinaus sind für diesen Messpunkt der Senkweg z , die Uhrzeit, die Prozesszeit t_{Proz} , der Prozessstrom I_{Proz} und die aktuelle Generatorstufe der Fertigungseinrichtung zu dokumentieren. Zur Dokumentation der Prozessgrößen wird die in Anhang B gezeigte Tabelle 10 empfohlen.

8.6 Beendigung des Abtragexperiments

Nach Beendigung des Abtragexperiments ist der Prozessstromverlauf der EC-Fertigungseinrichtung zu speichern. Es wird empfohlen, eine visuelle Abbildung (zum Beispiel ein Bildschirmfoto) und eine digitale Aufzeichnung des Prozessstromverlaufs zu speichern.

9 Auswertung und Angabe der Ergebnisse

9.1 Zuordnung der Daten der Messwertaufnahme

Zunächst erfolgt die Zuordnung der Daten der Messwertaufnahme zu den Daten des Abtragexperiments. Hierzu werden die Daten der Messwertaufnahme zum jeweiligen Messpunkt zugeordnet. Es wird empfohlen die Zuordnung anhand der Uhrzeit durchzuführen. Hierzu sind anhand der Dokumentation nach 8.5 die Daten der Messwertaufnahme dem entsprechenden Messpunkt zuzuordnen.

9.2 Aufbereitung des Prozessstroms

Zwischen der Aufnahme der Daten der Messwertaufnahme und der Daten der EC-Fertigungseinrichtung nach 8.5 kann es zu einer Zeitdifferenz kommen. Die Zeitdifferenz kann ca. 5 s bis 10 s betragen. Um diese Zeitdifferenz für den Datenvergleich zu berücksichtigen, wird empfohlen, den Prozessstrom der EC-Fertigungseinrichtung als arithmetischen Mittelwert $I_{m\text{Proz}}$ für jeden Messpunkt zu ermitteln. Hierzu ist der arithmetische Mittelwert des Prozessstroms ohne Einbeziehung der Strompulsphasen vom Erreichen des festgelegten Senkwegs bis zum Erreichen des Senkwegs nach Ablauf der Zeitdifferenz anhand des Prozessstromverlaufs $I_{\text{Proz}} = f(t_{\text{Proz}})$ zu kalkulieren.

9.3 Aufbereitung der Daten der Messwertaufnahme

Für die Daten der Messwertaufnahme nach 8.5 ist ein Nullpunktgleich für jeden Messpunkt durchzuführen. Für einen Nullpunktgleich ist der Verschiebungswert I_{Ver} zu ermitteln (siehe Bild 6). Der Verschiebungswert I_{Ver} ergibt sich aus der Differenz des arithmetischen Mittels der Stromstärkewerte vor Beginn der Einschaltzeit des Strompulses und nach Beendigung der Abschaltzeit des Strompulses

mit dem Wert Null. Anschließend ist der Verschiebungswert I_{Ver} für den Nullpunktgleich des Messpunktes anzuwenden.

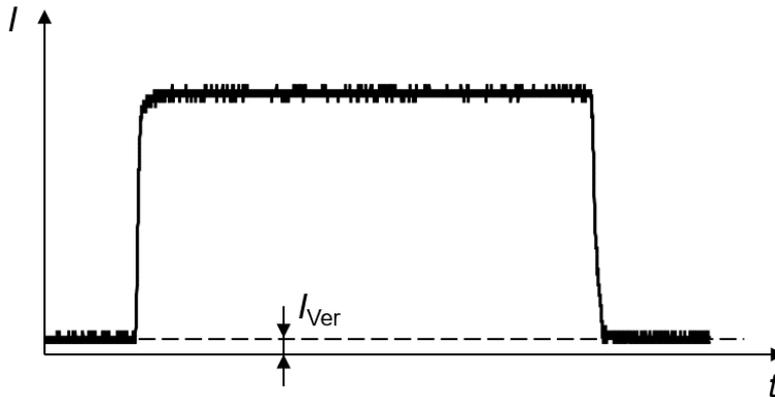


Bild 6 – Ermittlung des Verschiebungswerts I_{Ver} eines Strompulses

Je nach Wahl des Messbereichs des Messwertaufnehmers kann es erforderlich sein, ein Umrechnungsverhältnis auf die Daten der Messaufnahme anzuwenden. Anhand der Bedienungsanleitung des Messwertaufnehmers ist das entsprechende Umrechnungsverhältnis zum gewählten Messbereich auszuwählen und auf die Daten anzuwenden.

9.4 Ermittlung der mittleren maximalen Stromstärke des Strompulses

Anhand der aufbereiteten Daten nach 9.3 erfolgt die Ermittlung der mittleren maximalen Stromstärke I_{mmax} des Strompulses für jeden Messpunkt. Auf Basis des Strompulsverlaufs wird der arithmetische Mittelwert der Stromwerte vom Zeitpunkt nach Erreichen des Einschaltens des Strompulses t_{G1} und bis zum Zeitpunkt des Abschaltens des Strompulses t_{G2} berechnet (siehe Bild 7).

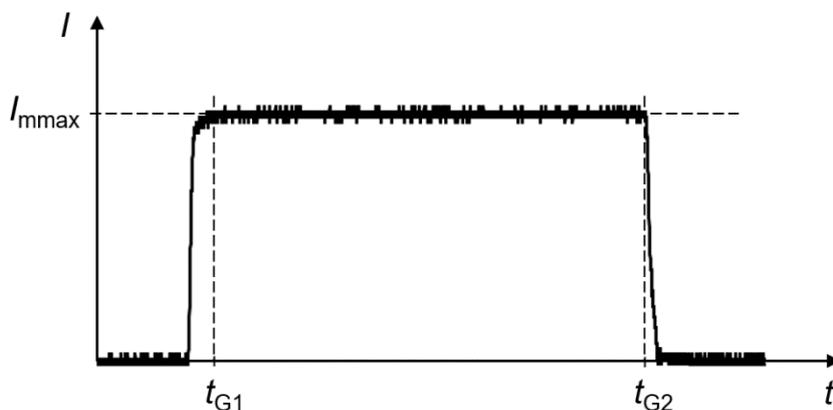


Bild 7 – Ermittlung der mittleren maximalen Stromstärke I_{mmax} eines Strompulses im Bereich t_{G1} bis t_{G2}

Zur Dokumentation der Prozessgrößen wird die in Anhang B gezeigte Tabelle 11 empfohlen.

9.5 Ermittlung der Stromkorrelationsfunktionen

Zur Ermittlung der Stromkorrelationsfunktionen erfolgt der Vergleich des im Messpunkt ermittelten mittleren Prozessstroms I_{mProz} aus 9.2 mit der messtechnisch ermittelten mittleren maximalen Stromstärke I_{mmax} aus 9.4.

Hierzu werden die messtechnisch ermittelten mittleren maximalen Stromstärken in Abhängigkeit der ermittelten mittleren Prozessströme für die eingestellten Strompulsbreiten und die verwendeten Generatorstufen dargestellt (siehe Bild 8).

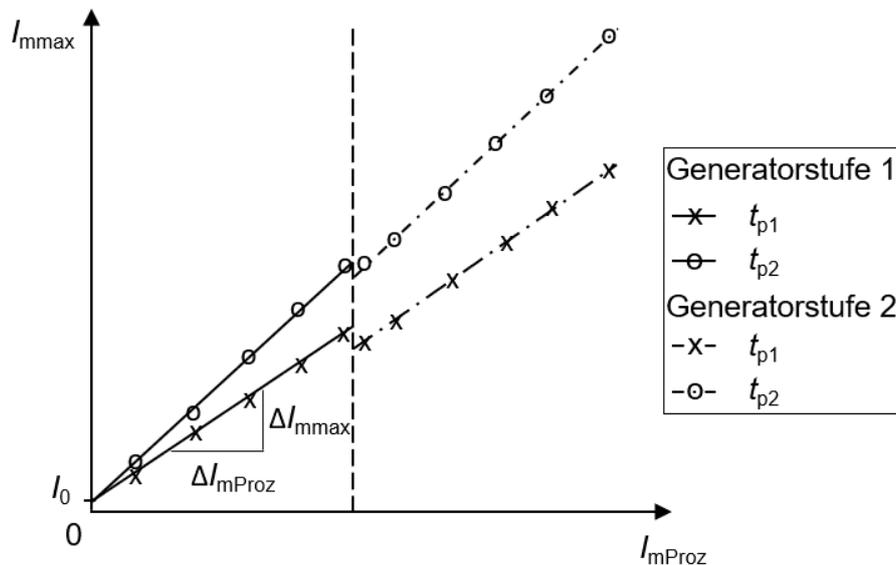


Bild 8 – Möglicher Verlauf der mittleren maximalen Stromstärke in Abhängigkeit des mittleren Prozessstroms für verschiedene Strompulsbreiten und Generatorstufen

Für jede eingestellte Strompulsbreite und deren vorherrschende Generatorstufe erfolgt die Ermittlung des funktionalen Zusammenhangs. Es wird empfohlen, eine lineare Funktion nach Gleichung (5) zu verwenden. Die ermittelten Funktionswerte sollten nach Tabelle 5 dokumentiert werden.

$$I_{mmax} = \frac{\Delta I_{mmax}}{\Delta I_{mProz}} \cdot I_{mProz} + I_0 \quad (5)$$

wobei

- I_{mmax} mittleren maximalen Stromstärke des Strompulses
- I_{mProz} mittlerer Prozessstrom der EC-Fertigungseinrichtung
- I_0 Schnittpunkt der Linearisierung I_{mmax} mit Y-Achse

Tabelle 5 – Übersichtsdarstellung der Funktionswerte der Stromkorrelationsfunktion $I_{mmax} = f(I_{mProz})$ in Abhängigkeit der Strompulsbreite und der Generatorstufe

Größen	Generatorstufe	$\Delta I_{mmax} / \Delta I_{mProz}$	I_0
Einheit	-	A/A	A
t_{p1}	GS 1	$(\Delta I_{mmax} / \Delta I_{mProz})_{1-1}$	$I_{0,1-1}$

	GS m	$(\Delta I_{mmax} / \Delta I_{mProz})_{n-1}$	$I_{0,1-m}$
...
t_{pn}	GS 1	$(\Delta I_{mmax} / \Delta I_{mProz})_{1-n}$	$I_{0,n-1}$

	GS m	$(\Delta I_{mmax} / \Delta I_{mProz})_{n-m}$	$I_{0,n-m}$

Ist anhand Bild 8 erkennbar, dass die Funktionsverläufe für alle bzw. für eine Vielzahl der Strompulsbreiten nahezu identisch sind, so wird empfohlen für diese Strompulsbreiten eine gemeinsame Stromkorrelationsfunktion zu ermitteln. Hierzu ist für jede Generatorstufe der funktionale Zusammenhang nach Gleichung (5) für die entsprechenden Strompulsbreiten zu ermitteln. Die ermittelten funktionalen Zusammenhänge sollten nach Tabelle 6 dokumentiert werden.

Tabelle 6 – Übersichtsdarstellung der funktionalen Zusammenhänge der Stromkorrelationsfunktion $I_{mmax} = f(I_{mProz})$ in Abhängigkeit der Generatorstufe

Generatorstufe	Funktion
GS 1	$I_{mmax-1} = f(I_{mProz})_1$
...	...
GS m	$I_{mmax-m} = f(I_{mProz})_m$

9.6 Ermittlung der ladungsbezogenen Strompulsbreite

Zur Charakterisierung des Einflusses des Prozessstroms auf die Strompulsbreite der Strompulse wird die ladungsbezogene Strompulsbreite t_{p-l} ermittelt (siehe Bild 9).

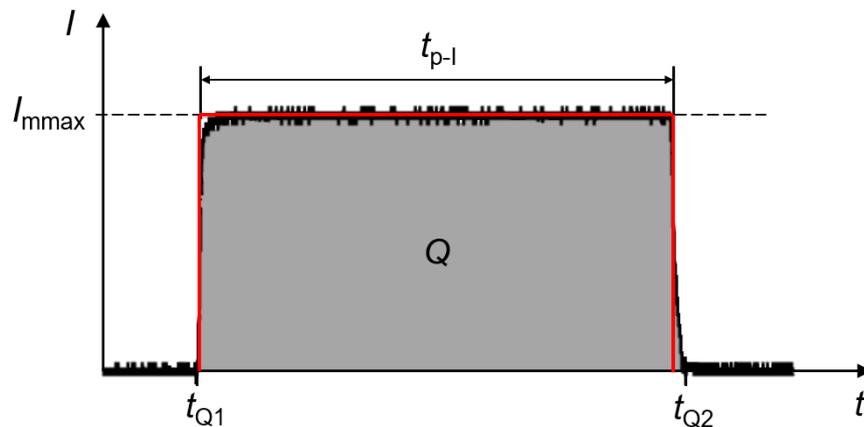


Bild 9 – Ermittlung der ladungsbezogenen Strompulsbreite t_{p-l} eines Strompulses

Hierzu ist zunächst die elektrische Ladung Q des Strompulsverlaufes im betrachteten Messpunkt nach Gleichung (6) zu ermitteln.

$$Q = \int_{t_{Q1}}^{t_{Q2}} I(t) dt \quad (6)$$

wobei

Q geflossene elektrische Ladungsmenge

t_{Q1} untere Grenze des Strompulsverlaufes

t_{Q2} obere Grenze des Strompulsverlaufes

$I(t)$ Strompulsverlauf

Anschließend ist die ladungsbezogene Strompulsbreite t_{p-l} nach Gleichung (7) im betrachteten Messpunkt zu berechnen.

$$t_{p-l} = \frac{Q}{I_{mmax}} \quad (7)$$

wobei

t_{p-l} ladungsbezogene Strompulsbreite

Q geflossene Ladungsmenge

I_{mmax} mittlere maximale Stromstärke des Strompulses

Zur Dokumentation der ladungsbezogenen Strompulsbreite wird die in Anhang B gezeigte Tabelle 11 empfohlen.

9.7 Ermittlung der Strompulsbreitenkorrelationsfunktionen

Zur Ermittlung der Strompulsbreitenkorrelationsfunktionen erfolgt zunächst die Charakterisierung des Einflusses der mittleren maximalen Stromstärke aus 9.4 auf die ladungsbezogene Strompulsbreite t_{p-1} aus 9.6. Hierzu werden die ladungsbezogenen Strompulsbreiten in Abhängigkeit der mittleren maximalen Stromstärke des Strompulses für eingestellte Strompulsbreiten und vorherrschende Generatorstufen dargestellt (siehe Bild 10).

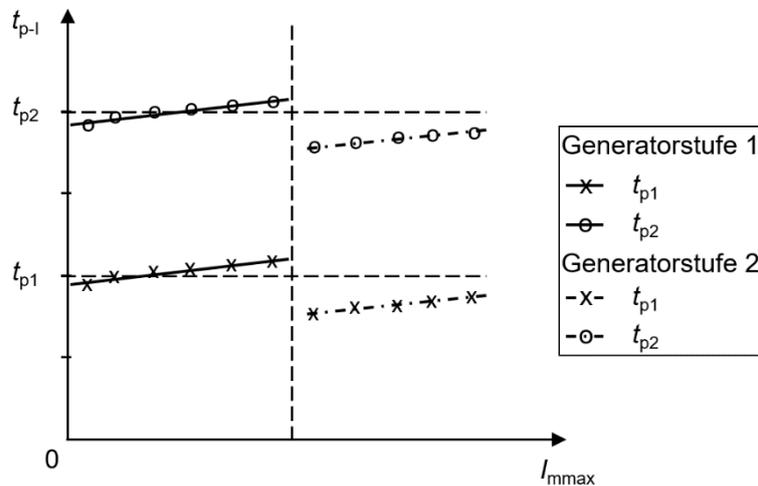


Bild 10 – Möglicher Verlauf der ladungsbezogenen Strompulsbreite t_{p-1} in Abhängigkeit der mittleren maximalen Stromstärke I_{mmax} für verschiedene Strompulsbreiten und Generatorstufen

Es wird empfohlen, für jede eingestellte Strompulsbreite und deren verwendete Generatorstufe die funktionalen Zusammenhänge zu ermitteln und nach Tabelle 7 zu dokumentieren.

Tabelle 7 – Übersichtsdarstellung der funktionalen Zusammenhänge der Strompulsbreitenkorrelationsfunktion $t_{p-1} = f(I_{mmax})$ in Abhängigkeit der mittleren maximalen Stromstärke I_{mmax} für Strompulsbreiten und Generatorstufen

Größen	Generatorstufe	Funktion
t_{p1}	GS 1	$t_{p-1-1-1} = f(I_{mmax})_{1-1}$

	GS m	$t_{p-1-1-m} = f(I_{mmax})_{1-m}$
...
t_{pn}	GS 1	$t_{p-1-n-1} = f(I_{mmax})_{n-1}$

	GS m	$t_{p-1-n-m} = f(I_{mmax})_{n-m}$

Zur Ermittlung der Strompulsbreitenkorrelationsfunktionen erfolgt die Ermittlung der Abweichung der ladungsbezogenen Strompulsbreiten t_{p-1} mit der jeweilige eingestellte Strompulsbreite t_p durch Subtraktion nach Gleichung (8)

$$\Delta t_{p-1} = t_{p-1} - t_p \quad (8)$$

wobei

Δt_{p-1} Abweichung der ladungsbezogenen Strompulsbreite von der Strompulsbreite,

t_{p-1} ladungsbezogene Strompulsbreite,

t_p Strompulsbreite.

Anschließend werden die ermittelten Abweichungen Δt_{p-1} in Abhängigkeit von der mittleren maximalen Stromstärke I_{mmax} grafisch dargestellt (siehe Bild 11).

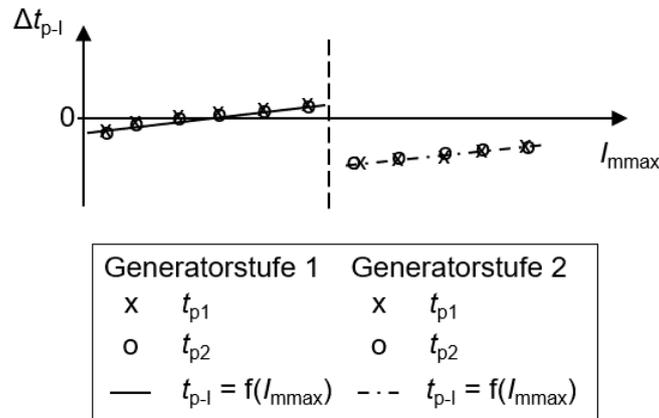


Bild 11 – Möglicher Verlauf der Abweichung der ladungsbezogenen Strompulsbreite Δt_{p-1} in Abhängigkeit der mittleren maximalen Stromstärke I_{mmax} für verschiedene Strompulsbreiten und Generatorstufen

In Bild 11 zeigt sich, ob der Funktionsverlauf für alle Strompulsbreiten identisch ist. Es wird empfohlen für jede Generatorstufe den funktionalen Zusammenhang nach Gleichung (9) zu ermitteln. Die ermittelten funktionalen Zusammenhänge sollen nach Tabelle 8 dokumentiert werden.

$$\Delta t_{p-1} = f(I_{mmax}) \quad (9)$$

wobei

Δt_{p-1} Abweichung der ladungsbezogenen Strompulsbreite von der Strompulsbreite

I_{mmax} mittlere maximale Stromstärke des Strompulses

Tabelle 8 – Übersichtsdarstellung der funktionalen Zusammenhänge der Strompulsbreitenkorrelationsfunktion $\Delta t_{p-1} = f(I_{mmax})$ in Abhängigkeit der mittleren maximalen Stromstärke für Generatorstufen

Generatorstufe	Funktion
GS 1	$\Delta t_{p-1-1} = f(I_{mmax})_1$
...	...
GS m	$\Delta t_{p-1-m} = f(I_{mmax})_m$

Durch Einsetzen der Gleichung (9) in Gleichung (8) kann die Strompulsbreitenkorrelationsfunktion in Abhängigkeit der mittleren maximalen Stromstärke I_{mmax} und der Strompulsbreite t_p für die jeweilige vorherrschende Generatorstufe nach Gleichung (10) beschrieben werden.

$$t_{p-1} = \Delta t_{p-1}(I_{mmax}) + t_p \quad (10)$$

wobei

t_{p-1} ladungsbezogene Strompulsbreite

Δt_{p-1} Abweichung der ladungsbezogenen Strompulsbreite von der Strompulsbreite

I_{mmax} mittleren maximalen Stromstärke des Strompulses

t_p Strompulsbreite

9.8 Ableitung digitaler Zwillinge von Prozessenergiequellen für das elektrochemische Präzisionsabtragen

Die Korrelationsfunktionen nach 9.5 und 9.7 sollen bei der Ableitung digitaler Zwillinge von Prozessenergiequellen für das elektrochemische Präzisionsabtragen so berücksichtigt werden, dass reale Einstellgrößen der EC-Fertigungseinrichtung als Eingangsgrößen für einen prozessnahen digitalen Zwilling verwendet werden können, sowie, dass Einstellgrößen der EC-Fertigungseinrichtung unter Verwendung des digitalen Zwillings mit einer hinreichenden Genauigkeit ermittelt werden können. Hierzu sind die entsprechenden Korrelationsfunktionen nach 9.5 und 9.7 in den digitalen Zwilling zu implementieren.

Darüber hinaus können mit Hilfe der Korrelationsfunktionen nach 9.5 und 9.7 aus Prozessstromverläufen der EC-Fertigungseinrichtung die Prozessgrößen mittlere maximale elektrische Stromstärke des Strompulses I_{max} und ladungsbezogene Strompulsbreite t_{p-1} ermittelt werden, wodurch eine wesentlich genauere Beschreibung des Abtragprozesses erfolgen kann. Diese Prozessgrößen sind eine wesentliche Voraussetzung für eine genauere Bestimmung von Prozesseingangsgrößen für das elektrochemische Präzisionsabtragen nach DIN SPEC 91399.

Anhang A (normativ) Empfohlene Prozesseingangsgrößen

Tabelle 9 – Empfohlene Prozesseingangsgrößen für Tabelle 1 (6.1.1)

Benennung	Symbol	Wertebereich
Bearbeitungsspannung	U_q	10 V
Strompulsfrequenz	f_p	50 Hz
Oszillationsfrequenz	f_z	50 Hz
Schwingbreite der Oszillation	Z	0,2 mm
Anfangsarbeitsabstand	s_0	50 μm
Senkweg der Z-Achse	z	$\leq 14,5 \text{ mm}$
Elektrolytart		NaNO_3
Massenanteil Salz	w	8 %
Elektrolytleitfähigkeit	σ_{el}	67 mS/cm
Elektrolyttemperatur	ϑ_{el}	19,7 °C
Elektrolytdruck	p_{el}	3 bar bis 8 bar
pH-Wert		7,9
Volumenstrom	\dot{V}	1,5 l/min

Anhang B (normativ) Empfohlene Prozessgrößenerfassung

Tabelle 10 – Übersicht der notwendigen Prozessgrößen für die Datenerfassung im Messpunkt
(mit beispielhaften Werten)

Messpunkt	v_f [mm/min]	U_q [V]	f_p [Hz]	t_p [ms]	Uhrzeit	t_{Proz} [s]	z [mm]	I_{Proz} [A]	GS	UVMM [mV/A]
MP01	0,315	13,3	50	4,0	12:37	300	-1,5	126	2	10
...

Tabelle 11 – Übersicht der notwendigen Prozessgrößen für die Ermittlung der Korrelationsfunktionen (mit beispielhaften Werten)

Messpunkt	t_p [ms]	t_{Proz} [s]	z [mm]	I_{Proz} [A]	GS	I_{mProz} [A]	I_{mmax} [A]	t_{p-l} [ms]	Δt_{p-l} [ms]
MP01	4,0	300	-1,5	126	2	126,6	119,8	3,802	-0,198
...

Literaturhinweise

- [1] G. Meichsner, M. Hackert-Oschätzchen, M. Krönert, J. Edelmann, A. Schubert, M. Putz: Fast Determination of the Material Removal Characteristics in Pulsed Electrochemical Machining, In: Procedia CIRP, 7th HPC 2016 – CIRP Conference on High Performance Cutting, Volume 46, 2016, S. 123-126, DOI:10.1016/j.procir.2016.03.175
- [2] G. Meichsner: Entwicklung und Realisierung einer Methode zur Bestimmung von Prozesseingangsgrößen für das elektrochemische Präzisionsabtragen (Dissertation), In: Schubert, A. (Hrsg.): Scripts Precision and Microproduction Engineering, Band 12. Verlag Wissenschaftliche Scripten, 2018, ISBN 978-3-95735-087-9

VDE Verband der Elektrotechnik
Elektronik Informationstechnik e.V.

Merianstraße 28
63069 Offenbach am Main
Tel. +49 69 6308-0
service@vde.com
www.vde.com

VDE