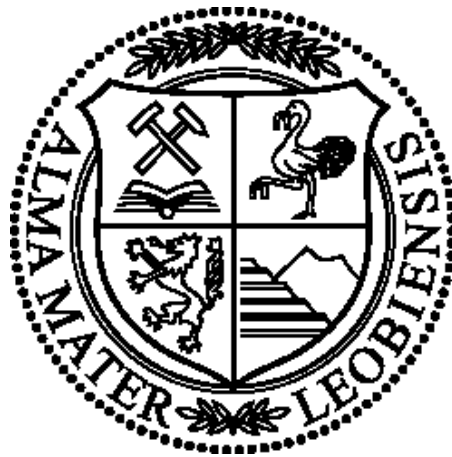


# Lehrstuhl für Umformtechnik

Department Product Engineering  
Montanuniversität Leoben



## DIPLOMARBEIT

### **Herstellung, Vergleich und Anwendungspotentiale von Verfahren zur Mikrostrukturierung von Oberflächen**

Gerhard Stix  
Studienrichtung Montanmaschinenwesen  
Leoben, November 2011

Betreuer: Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Bruno Buchmayr

## Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

## Affidavit

I declare in lieu of oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

17.11.2011

Datum

Gerhard Stix

Unterschrift

# Danksagung

Für Ihre Unterstützung bei meiner Diplomarbeit möchte ich folgende Personen, Institutionen und Firmen besonders dankend hervorheben:

Meinen Betreuer Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Bruno Buchmayr (Lehrstuhl für Umformtechnik) für die hilfreichen Anregungen und konstruktive Kritik bei der Erstellung der Arbeit und Herrn Stöckl (Lehrstuhl für Umformtechnik) für die Hilfestellung bei der Stereo- und Konfokalmikroskopie.

Herrn Ing. Lederhaas (Lehrstuhl für Metallurgie) für die Hilfestellung bei der Rasterelektronenmikroskopie.

Herrn Christian Ehrat (Firma Micrometal GmbH), Anton Buresch (Gerhard Rauch GmbH) und dem Lehrstuhl für Umformtechnik für die großzügige Bereitstellung von Mustern.

Ein ganz besonderer Dank gilt abschließend meinen Eltern, die mir stets das Erreichen meiner Ziele ermöglicht haben.

## **Kurzfassung**

Diese Arbeit gibt einen Überblick über etablierte und innovative Verfahren zur Erstellung von Mikro- und Nanostrukturen auf metallischen Oberflächen. Zu diesem Zweck werden die Parameter und Kennwerte der einzelnen Verfahren mittels eines Technologie Monitorings erläutert, aufgeschlüsselt und soweit es zwischen den unterschiedlichen Verfahren möglich ist, in einen Kontext zueinander gestellt und verglichen. Im Weiteren wird die Möglichkeit der Messung für mikrostrukturierte Oberflächen erörtert und Probenmuster von unterschiedlichen Anbietern mittels Rasterelektronenmikroskopie und Konfokalmikroskopie untersucht.

Das Ziel dieser Arbeit ist eine Übersicht über verschiedene Verfahren zur Strukturierung metallischer Oberflächen im Mikro- und Nanometerbereich zu geben, ihre idealen Prozess- und Anwendungsbereiche anzugeben und mittels Diagrammen zu untermauern.

Darüber hinaus vervollständigen Anwendungsbeispiele und Listen über Firmen, die diese Verfahren und Technologien anwenden und jener Firmen, die Maschinen zur Umsetzung anbieten, diese Arbeit.

Die Recherche zu dieser Arbeit wurde hauptsächlich mit der Datenbank Science Direct, den Büchern der Bibliothek der Montanuniversität Leoben, Internet und durch persönlichen Kontakt mit Firmen durchgeführt.

Schlüsselwörter: Mikrostruktur, Nanostruktur, strukturierte Oberfläche, Oberflächenstruktur

## **Abstract**

This paper gives an overview of established and innovative techniques for creating micro- and nanostructures on metal surfaces. For this purpose the parameters and characteristic values of particular procedures are explained by means of a technology monitoring. They are classified and compared as far possible between the different procedures, is put in a context to each other and is compared. In addition the measurement for micro- and nanostructured surfaces are discussed and sample pattern from different companies are studied by using scanning electron microscopy and confocal microscopy.

The aim of this paper is to give an overview on structuring metallic surfaces in the micro- and nanometer range, specify their ideal process and application fields and using charts and diagrams for comparison.

In addition examples and lists of companies who apply these procedures and technologies and those companies who offer machines to produce these structures complete this work.

The research to this work was carried out primarily using the data base Science Direct, the books of the library of the Montanuniversität Leoben, internet and by personal contact with companies.

Keywords: microstructure, nanostructure, structured surface, surface topology

# Inhaltsverzeichnis

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | Einleitung und Grundlagen .....                | 8  |
| 2     | Elektrochemische Verfahren.....                | 10 |
| 2.1   | Elektrochemisches Abtragen .....               | 10 |
| 2.2   | Gepulstes, elektrochemisches Abtragen .....    | 15 |
| 2.3   | Präzises elektrochemisches Abtragen.....       | 17 |
| 2.4   | Elektrochemisches Fräsen .....                 | 19 |
| 2.5   | Elektropolieren .....                          | 21 |
| 3     | Mechanische Verfahren .....                    | 25 |
| 3.1   | Mikrofräsen .....                              | 26 |
| 3.2   | Ultrapräzisionszerspanung.....                 | 28 |
| 4     | Chemische Verfahren.....                       | 31 |
| 4.1   | Photochemisches Ätzen.....                     | 31 |
| 4.2   | Sol-Gel-Verfahren .....                        | 33 |
| 5     | Thermische Verfahren.....                      | 38 |
| 5.1   | Funkenerodieren .....                          | 38 |
| 5.2   | Lasermikrobearbeitung.....                     | 42 |
| 5.2.1 | Excimerabtrag .....                            | 42 |
| 5.2.2 | Sublimationsabtrag.....                        | 43 |
| 6     | Kombination von Wirkmechanismen .....          | 47 |
| 6.1   | Lithographie, Galvanik, Abformung .....        | 47 |
| 6.1.1 | Röntgen-Lithographie, Galvanik, Abformung..... | 48 |
| 6.1.2 | UV-Lithographie, Galvanik, Abformung.....      | 50 |
| 6.1.3 | Laser-Lithographie, Galvanik, Abformung.....   | 50 |
| 6.2   | Electro Chemical Discharge Machining.....      | 50 |
| 7     | Innovationspotentiale .....                    | 53 |
| 7.1   | Direkte Laserinterferenzstrukturierung .....   | 53 |
| 7.2   | Sprengprägen .....                             | 54 |
| 7.3   | Riblet-Walzen.....                             | 55 |
| 7.4   | Mikro-Metallpulverspritzgießen.....            | 57 |
| 8     | Messbarkeit von Mikrostrukturen.....           | 59 |
| 8.1   | Tastschnittverfahren .....                     | 59 |
| 8.2   | Konfokalmikroskopie .....                      | 60 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 8.3  | Streulichtmesstechnik .....                                    | 61 |
| 9    | Analyse und Bewertung .....                                    | 63 |
| 9.1  | Elektrochemische Verfahren .....                               | 63 |
| 9.2  | Mechanische Verfahren .....                                    | 64 |
| 9.3  | Chemische Verfahren .....                                      | 64 |
| 9.4  | Thermische Verfahren .....                                     | 65 |
| 9.5  | Kombination von Wirkmechanismen .....                          | 66 |
| 9.6  | Gesamtbewertung .....  | 66 |
| 9.7  | Fazit .....  | 68 |
| 10   | Mikroskopische Untersuchungen .....                            | 69 |
| 10.1 | Elektropoliertes Blech aus rostfreiem Stahl .....              | 69 |
| 10.2 | Photochemisch geätztes Blech .....                             | 72 |
| 10.3 | Handgeschliffene Probe eines Blechs aus rostfreiem Stahl ..... | 75 |
| 10.4 | Bauteil mit präzisiertem elektrochemischen Abtrag .....        | 77 |
| 10.5 | Maschinengeschliffene Probe eines ST 52 .....                  | 80 |
| 10.6 | Geätzte Sol-Gel-Beschichtung .....                             | 83 |
| 10.7 | Fazit .....  | 86 |
|      | Abbildungsverzeichnis .....                                    | 87 |
|      | Tabellenverzeichnis .....                                      | 90 |
|      | Abkürzungsverzeichnis .....                                    | 91 |
|      | Quellenverzeichnis .....                                       | 93 |

# 1 Einleitung und Grundlagen

Durch unterschiedliche Einflüsse und spezifische technische Entwicklungen ist es in den letzten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts zu einem starken Interessensanstieg auf dem Gebiet der Mikro- und Nanotechnologie gekommen, der bis heute ungebrochen anhält. Ständig werden neue Verfahren und Technologien veröffentlicht oder zum Patent angemeldet. Zum einen liegen die Gründe für das Interesse darin, dass sich durch veränderte Oberflächen verbesserte Eigenschaften eines Bauteils (erhöhte Festigkeit, erhöhte Korrosionsbeständigkeit, selbstreinigend Wirkung, usw.) oder einer ganzen Baugruppe (z.B. niedrigerer  $c_w$ -Wert von Straßen- und Luftfahrzeugen) einstellen lassen und zum anderen ist durch die fortschreitende Miniaturisierung von Bauteilen eine Notwendigkeit entstanden, die Eigenschaften in Form von Geometrie und Oberfläche auch auf das kleine Bauteil projizieren zu können. Nicht nur die Möglichkeit des Einbringens dieser Strukturen ist in Hinblick auf das Ergebnis von Bedeutung, da Bearbeitungskosten und -zeit, Geometrie, Werkstoff und erzielbare Qualität im Vergleich zur geforderten Qualität die Auswahl eines Verfahrens für ein bestimmtes Bauteil beschränken. All diese Einflussfaktoren machen deutlich, dass es kein universelles Verfahren für jeden Werkstoff mit jeder Strukturgröße geben kann und es kann vorweggenommen werden, dass für einige Bearbeitungen zur Verbesserung des Ergebnisses Kombination von Wirkmechanismen notwendig sind, um den Anforderungen gerecht zu werden.

Unter Mikrostrukturen versteht man Strukturen, deren Größe sich im Bereich von 0,1 bis 1.000  $\mu\text{m}$  ( $1 \mu\text{m} = 10^{-3} \text{ mm}$ ) befinden, während Strukturgrößen unter 100 nm ( $1 \text{ nm} = 10^{-6} \text{ mm}$ ) der Nanotechnologie zuzuordnen sind. Anhand zweier folgender Beispiele aus der Natur lässt sich die Feinheit dieser Strukturen begreifen: Ein Menschenhaar hat eine Dicke von ca. 0,12 mm – das entspricht 120.000 nm – und Fliegen haben an ihren Beinen Nanometer kleine Haare, mit deren Hilfe sie an Decken und Wänden gehen können. Viele Anwendungsfälle für die Nanotechnologie kommen aus der Bionik und dazu zählt neben den Härchen des Fliegenbeines auch der selbstreinigende Effekt der Lotusblüte.



Abbildung 1.1: Detailaufnahme eines Fliegenbeines [1]

Es sind unzählige Verfahren zum Einbringen von Mikro- und Nanostrukturen in metallische Oberflächen bekannt, einige sind weit verbreitet, andere befinden sich noch in der



Erprobungsphase oder wurden nach der Erprobungsphase wegen mangelnden Erfolg eingestellt.

Diese Verfahren können – wie in dieser Arbeit auch vorgenommen – in chemische, elektrochemische, thermische und mechanische Verfahren unterteilt werden. All diese unterschiedlichen Verfahren beruhen auf unterschiedliche Wirkmechanismen und werden daher mit verschiedenen Parametern und Kennwerten beschrieben und wertmäßig erfasst.

Für einige Anwendungsfelder gibt es kein Verfahren, das dezidiert gewählt werden kann und für diese Bedingungen wurden verschiedene Mechanismen der unterschiedlichen Verfahren kombiniert, um das gewünschte Ergebnis zu erzielen.

In dieser Arbeit wird zur Bestimmung der Oberflächengüte der Oberflächenkennwerte arithmetische Mittenrauwert  $R_a$  verwendet.

Der arithmetische Mittenrauwert ist das arithmetische Mittel aus den absoluten Werten einer Messstrecke:

$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |y| dx$$

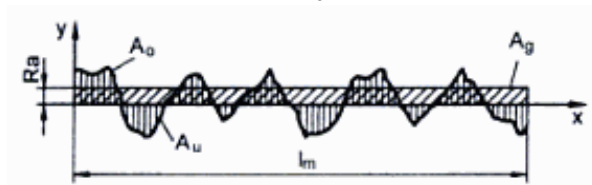


Abbildung 1.2: Darstellung des Mittenrauheitswerts [2]

Diese Kennwerte der Oberfläche sind nach DIN EN ISO 4287 genormt [3].

Zur Messung der Oberfläche werden in der industriellen Praxis meist Tastschnittverfahren, Konfokalmikroskopie und Streulichtmesstechnik eingesetzt. Auf diese Verfahren wird in Kapitel 8 näher eingegangen.

## 2 Elektrochemische Verfahren

Die wichtigsten und am besten elektrochemischen Verfahren lauten: elektrochemisches Abtragen, gepulster elektrochemischer Abtrag, präziser elektrochemischer Abtrag, elektrochemisches Fräsen und Elektropolieren. All diesen Verfahren liegt das Prinzip der anodischen Metallauflösung durch Elektrolyse zu Grunde.

1832 beschrieb der englische Naturforscher und Experimentalphysik Michael Faraday die anodische Auflösung als Wirkmechanismus der Elektrolyse und legte somit den Grundstein für die heutigen elektrochemischen Bearbeitungsverfahren und auf dieser Grundlage führte V. Gussev 1929 in der UdSSR erste elektrochemische Laborversuche durch. Die industrielle Nutzung begann in den 1960er Jahren und aufgrund der steigenden Forderung nach mehr Präzision, Effizienz und Bearbeitbarkeit von Superlegierungen und Refraktärmetallen<sup>1</sup> wurden ab den 1990er Jahren einige Weiterentwicklungen erforscht, getestet und mittlerweile schon im Serieneinsatz eingesetzt.

Mittels elektrochemischen Verfahren können allgemein alle elektrisch leitfähigen Werkstoffe bearbeitet werden, jedoch wird dieses Verfahren in der Praxis nur für schwer bearbeitbare Werkstoffe wie Titan- und Nickelbasislegierungen, hochlegierten Stählen und intermetallischen Werkstoffen – z.B. Titanaluminid – verwendet, weil die Bearbeitungszeit sehr hoch ist.

Weitere praktische Beispiele werden zu jedem Verfahren in dem jeweiligen Kapitel angeführt.

### 2.1 Elektrochemisches Abtragen [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]

Dem elektrochemischen Abtragen – kurz ECM für Electro Chemical Machining – liegt das Wirkungsprinzip der Elektrolyse zu Grunde. In Abbildung 2.1 ist der elektrolytische Vorgang dargestellt. An der Anode (abzutragender Werkstoff) wird der positive und zur Kathode (Werkzeug) wird der negative Pol gelegt und mittels einer meist äußeren Gleichstromspannungsquelle wird der Stromfluss bewirkt. Die große Besonderheit dieses Verfahrens liegt darin, dass der Werkstoffabtrag berührungslos abläuft.

Damit es zu dem benötigten Stromtransport zwischen dem abzutragenden Werkstoff (Anode) und Werkzeug (Kathode) kommen kann, fließt zwischen der Elektrode und dem Werkstück ein elektrisch leitfähiges Medium. Dadurch wird der Materialabtrag weggespült. Für die elektrochemische Bearbeitung wird eine Stromdichte  $i$  größer als  $10 \text{ A/cm}^2$  benötigt.

Das abgetragene Metall wird in Form von metallischen Ionen an der Anode abgegeben und diese metallischen Ionen gehen in die Elektrolytlösung über und bleiben entweder gelöst oder reagieren mit Bestandteilen des Elektrolyten zu Metallhydroxiden. Diese nichtlöslichen Metallhydroxide fallen aus und können mittels Trennverfahren – z.B. Zentrifuge oder Filterpresse – entfernt werden.

---

<sup>1</sup> Hochschmelzendes Metalle (z.B. Titan, Niob, Zirconium etc.) für Superlegierungen

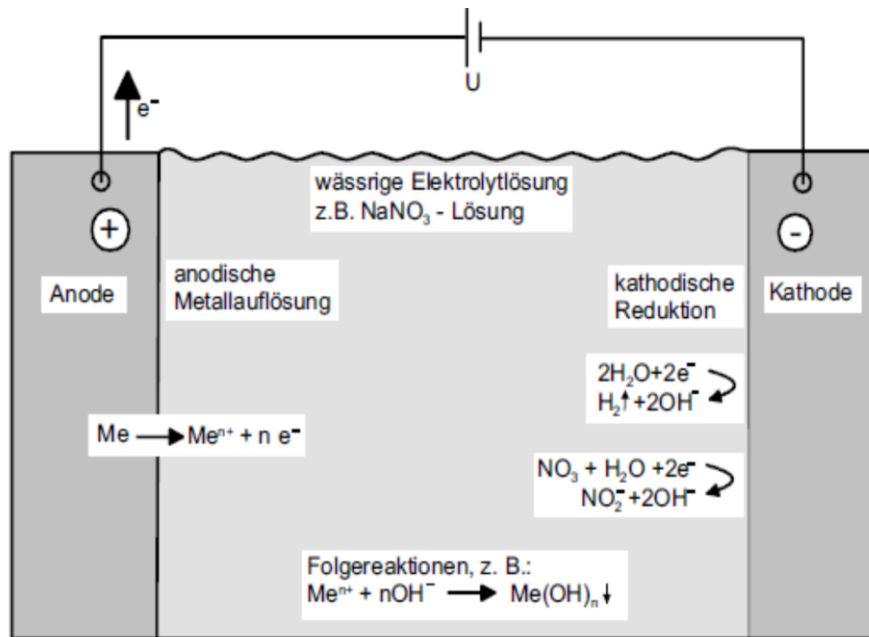
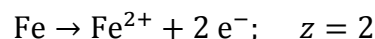


Abbildung 2.1: Schema der Elektrolyse [4]

Das Anlegen der Gleichstromspannungsquelle führt zu elektrochemischen Reaktionen an Anode und Kathode, wobei die Vorgänge an der Kathode in weiterer Folge nicht behandelt werden, da hier kein relevanter Materialabtrag folgt. Der Materialabtrag an der Anode lässt sich mathematisch durch das Faraday-Gesetz beschreiben:

$$m = \frac{M * I * t}{z * F}$$

Die abgetragene Masse  $m$  wird berechnet aus der Division von Molmasse  $M$  multipliziert mit elektrischer Stromstärke  $I$  und Bearbeitungszeit  $t$  durch das Produkt aus elektrochemischer Wertigkeit  $z$  und Faraday-Konstante  $F$ . Die elektrochemische Wertigkeit entspricht der Anzahl der abgegebenen Elektronen bei einer stattfindenden Reduktion, wie z.B.:



Die Abtraggeschwindigkeit  $v_A$  entspricht der Vorschubgeschwindigkeit  $v_f$  der Werkzeugelektrode und wird wie folgt als Division aus der abgetragenen Masse  $m$  durch die Dichte des Werkstoffes  $\rho$ , multipliziert mit Stromstärke und Bearbeitungszeit berechnet:

$$v_A = \frac{M}{\rho * z * F} * I * t$$

Nach dem Zusammenfassen des Bruches auf den Ausdruck des spezifischen Abtragsvolumens und der Vereinfachung des Produktes aus Stromstärke  $I$  und Bearbeitungszeit  $t$  zur Stromdichte  $i$  ergibt sich folgender Ausdruck für die Abtraggeschwindigkeit:

$$v_A = V_{sp} * i$$

Im Laufe dieses Verfahrens kann es zu Energieverlust und Passivität kommen. Während der Energieverlust durch unwirksame Prozesse entsteht, wird die Passivität durch eine unglückliche Elektrolyt-Anodenwerkstoffkombination bewirkt. Dabei bildet sich eine oxydische Deckschicht an der Anode.

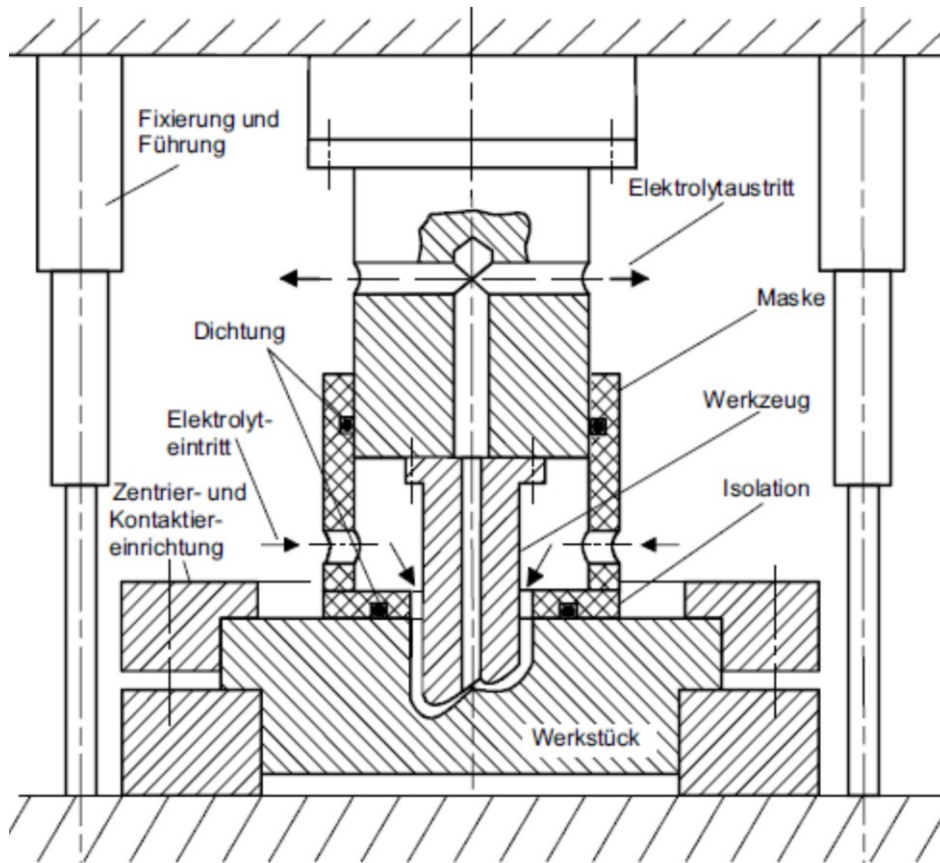


Abbildung 2.2: ECM Vorrichtung [4]

Für dieses Verfahren wird eine meist aufwändige Vorrichtung – Abbildung 2.2– benötigt. Sie dient dem Spannen, Ausrichten und Fixieren des Werkstücks und des Werkzeugs. Alle Teile der Vorrichtung, die während der Bearbeitung mit dem Elektrolyten in Kontakt kommen und nicht kathodisch gepolt sind, sind besonders korrosionsanfällig. Diese Teile werden daher aus Kupfer, Messing, Graphit, und rostfreien Stahl gefertigt. Titan wäre durchaus geeignet, ist aber in der Praxis zu teuer. Als Isolationsmaterial eignet sich auch glasfaserverstärkter Kunststoff.

Ein großes Problem dieses Verfahrens besteht darin, dass das Metall lokal unterschiedlich schnell in Lösung geht und dieser Prozess ist vor allem von der Stromdichteverteilung im Elektrolyten abhängig. Durch diese lokalen Unterschiede kommt es zu einer ungenaueren Abformung bzw. Abformfehler, da kein homogener Spalt entstehen kann. Als wichtigste Kennwerte beschreiben Schmelzpunkt, Wärmeleitfähigkeit und elektrische Leitfähigkeit dieses Verfahren.

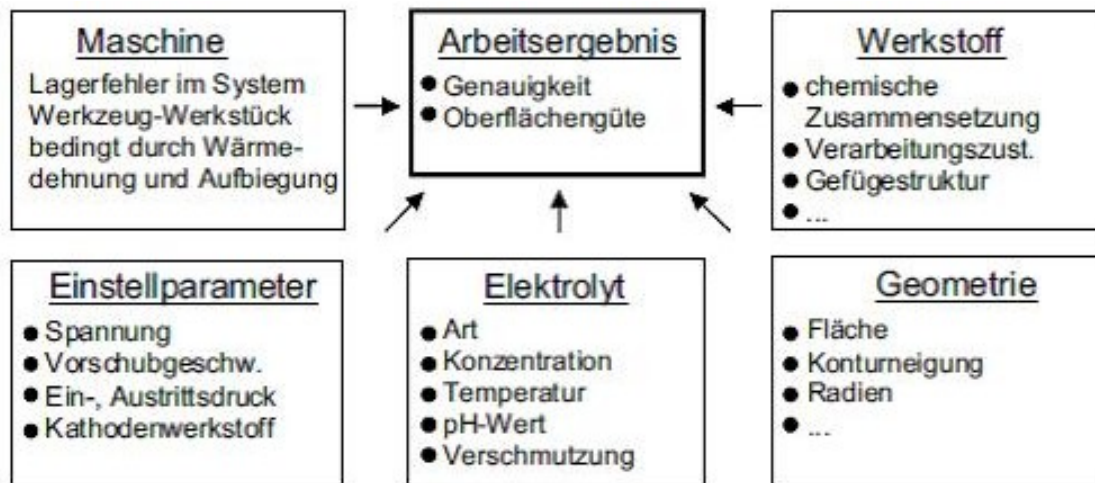


Abbildung 2.3: Parameter des ECM-Verfahrens [4]

In Abbildung 2.3 sind alle wichtigen Einflussparameter auf das Arbeitsergebnis übersichtlich zusammengefasst. Es ist am wichtigsten die elektrochemischen Abtragsvorgänge zu verstehen, um Formgenauigkeit und Oberflächengüte, sowie Bearbeitungszeit und Energiebedarf richtig abzuschätzen. Zum Beispiel sind die Einstellparameter Spannung, Vorschubgeschwindigkeit, Eintritts- und Austrittsdruck sowie Kathodenwerkstoff für die Reproduzierbarkeit einer erzeugten Kontur zuständig und die Einflussparameter der Maschine beeinflussen die Formgenauigkeit.

Besonders das Einstellen der Kontur der Werkzelektrode wiegt beim Abwiegen der Vor- und Nachteile schwer. Die Parameter müssen aufwendig in Vorversuchen ermittelt werden, damit eine ungleiche Spaltausbildung ausgeschlossen werden kann. Die Konturen werden bei der Berechnung nur ungenau erfasst und deswegen wird dieses Verfahren erst ab Serienfertigung empfohlen und vor allem dann, wenn kein anderes Verfahren zur Herstellung anwendbar ist.

Werkstoffe mit identischem chemischem Aufbau verhalten sich beim Einsatz unterschiedlicher Elektrolyte vollkommen unterschiedlich. Elektrolyte transportieren die Ladungsträger und die Wärme ab und rufen an den Elektroden chemische Reaktionen hervor. Darüber hinaus gelten folgende Anforderungen an den Elektrolyten:

- Preisgünstig
- Hohe chemische Stabilität
- Geringe Korrosionswirkung auf ECM-Apparat
- Physiologische Neutralität in Bezug auf das Bedienpersonal

Da die Elektrolytlösung in der Praxis vielen Bedingungen gerecht werden muss, kann keine dezidierte Empfehlung zur Auswahl der Elektrolytlösung für den einzelnen Anwendungsfall gemacht werden. Beim ECM-Verfahren kommen überwiegend Kochsalzlösung (NaCl) und Nitratlösung (NaNO<sub>3</sub>) als Elektrolytlösung oder starke Säuren wie zum Beispiel Salzsäure (HCl), Salpetersäure (HNO<sub>3</sub>) oder Schwefelsäure zum Einsatz. Der Unterschied besteht darin, dass Lösungen zur Bildung von Metallhydroxiden und der Einsatz von starken Säuren zu gelösten Abtrag führen.

Mittels ECM-Bearbeitung können alle harten und auch weichen metallischen Werkstoffe bearbeitet werden, jedoch wird es besonders bei harten, schwer zerspanenden Werkstoffen angewendet. Die Einschränkung besteht darin, dass das zu bearbeitende Material unbedingt

elektrisch leitend sein muss. Besonders häufig werden Stahl, Edelstahl, Aluminium und Buntmetalle bearbeitet. Ob ein Werkstoff mittels ECM bearbeitet werden kann, hängt von seinen elektrochemischen und nicht von seinen mechanischen Eigenschaften ab. Daher spielt auch die Härte des zu bearbeitenden Werkstoffes bei diesem Verfahren keine Rolle.

Vorteile:

- Bearbeiten von Werkstoffen beliebiger Härte (nichtmechanischer Abtrag)
- Keine negativen thermische und mechanische Beeinflussung der Bauteile und somit keine Veränderung im Werkstoffgefüge
- Härte, Zähigkeit und magnetische Eigenschaften werden nicht verändert
- Bearbeitung von Superlegierungen
- Präzise Bearbeitung
- Sehr hohe Reproduzierbarkeit der Oberflächenstrukturierung
- Es werden keine Spannungen eingebracht und es kommt zu keiner Randzonenbeeinflussung
- Wenn der elektrochemische Abtragprozess unter Kontrolle abläuft, kommt es zu keinem Abtrag an der Kathode (Werkzeug) – gute Eignung für Serienfertigung

Nachteile:

- Werkstoff muss elektrisch leitend sein
- Elektrisch leitendes Medium ist erforderlich
- Kontur der Werkzelektrode muss durch aufwendige Vorversuche ermittelt werden, da sie nur schwer zu berechnen ist – dadurch lohnt sich dieses Verfahren erst bei Serienfertigung
- Sehr hoher Aufwand zur Behandlung der Elektrolyte und die Metallhydroxide müssen als Sondermüll entsorgt werden
- Jedes neue Produkt und jedes neue Material benötigen eine umfassende Untersuchungen zu Prozessparameter und Elektrolyten
- Dieses Verfahren benötigt hohe elektrische Stromstärke, aber dafür relativ geringe Spannung (ca. 5-15 V)

Zu den bekanntesten Anbietern im deutschsprachigen Raum zählen EMAG AG (<http://www.emag.com/de.html>), ECM-Team GmbH (<http://www.ecm-team.de/>) und Pemtec GmbH (<http://www.pemtec.de/>).



Abbildung 2.4: Scherkopf eines Elektrorasierers [79]

Abbildung 2.4 als Beispiel für die Fertigung mit ECM den Scherkopf eines Elektrorasierers, wie sie zum Beispiel von Phillips mit diesem Verfahren gefertigt werden.

| Kennwert   | Zahlenwert [Einheit]       |
|--|----------------------------|
| Bearbeitungstemperatur [° C]                                 | 90                         |
| Gleichstromspannung [V]                                      | 20 – 30                    |
| Mindestleitfähigkeit der Elektrolyte [mS/cm]                 | 50 – 300                   |
| Vorschubgeschwindigkeit [mm/min]                             | 0,1 – 20                   |
| Werkstückeingewichte [kg]                                    | $20 \cdot 10^{-3}$ – 4.000 |
| Wirkstromdichte $i$ (Oberflächenabtrag) [A/cm <sup>2</sup> ] | 0,4 – 3                    |
| Wirkstromdichte (Senken) [A/cm <sup>2</sup> ]                | bis 10                     |

Tabelle 2.1: Kennwerte des ECM-Verfahrens

## 2.2 Gepulstes, elektrochemisches Abtragen [4, 11, 12, ]

Die gepulste elektrochemische Bearbeitung – kurz PECM für Pulsed Electro Chemical Machining – ist eine Weiterentwicklung des elektrochemischen Abtragens (ECM), die sich durch eine Reduzierung des Arbeitsspaltes –  $s < 100 \mu\text{m}$  – und kurzer Periodendauer – Millisekunden bis Makrosekunden – auszeichnet.

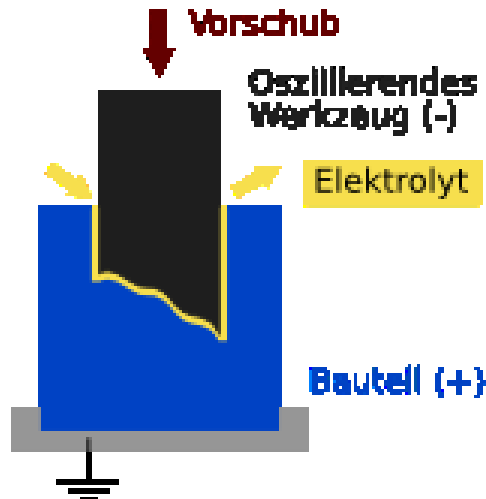


Abbildung 2.5: Darstellung des PECM-Verfahrens [11]

Der reduzierte Arbeitsspalt macht eine höhere Abbildungsgenauigkeit von feineren Strukturen mit höchster Präzision möglich. Die Arbeitszeit teilt sich in Einschalt- und Ausschaltzeit. Während der Einschaltzeit kann durch den geringeren Arbeitsspalt eine höhere Stromdichte als bei konventioneller EC-Bearbeitung angebracht werden und die Abschaltzeit kann sich das Elektrolyt durch Wärmeabfuhr, Entpolarisierung, Entfernung von Verunreinigungen und Abtrag, sowie Austausch des Elektrolyt wieder regenerieren. Durch die kurze Periodendauer von wenigen Millisekunden und Mikrosekunden kann ein Arbeiten ohne Kurzschluss oder Funkenüberschlag bei geringem Arbeitsspalt gewährleistet werden.

Die Oberflächenqualität lässt sich weiter verbessern, wenn die Einschaltzeit wesentlich kürzer als die Ausschaltzeit ist, da sich die Elektrolytlösung bei längerer Ausschaltzeit besser regenerieren kann.

Bei dieser Weiterentwicklung ist keine genauso hohe Elektrolytgeschwindigkeit notwendig, um die Wärme aus der Bearbeitungszone abzuleiten, da nach jeder Einschaltzeit eine Pause folgt, in der sich wie oben genannt, das Elektrolyt wieder regenerieren bzw. frisches Elektrolyt eingepumpt werden kann.

Die höhere Formgenauigkeit kann durch die Variation von gepulster Stromstärke  $i_p$ , Einschaltzeit  $t_{\text{ein}}$  und Ausschaltzeit  $t_{\text{aus}}$  erzielt werden, da bei konventioneller ECM-Bearbeitung nur der angelegte Strom verändert werden kann.

#### Wesentlicher Vorteil gegenüber ECM-Bearbeitung:

- Höhere Formgenauigkeit durch geringeren Arbeitsspalt
- Geringere Elektrolytgeschwindigkeit
- Variation von  $i_p$ ,  $t_{\text{ein}}$  und  $t_{\text{aus}}$  statt nur angelegter Strom bei ECM

#### Wesentliche Nachteile gegenüber ECM-Bearbeitung:

- Höhere Kosten für Generator mit gepulsten Strom
- Niedrigere Materialabtragsrate



| Kennwert                       | Zahlenwert |
|--------------------------------|------------|
| Arbeitsspalt [ $\mu\text{m}$ ] | <100       |
| Formgenauigkeit [mm]           | 0,02 – 0,1 |
| Vorschub [mm/min]              | meist 0,1  |

Tabelle 2.2: Kennwerte des PECM-Verfahrens

### 2.3 Präzises elektrochemisches Abtragen [4, 11, 12, 13, 14]

Eine weitere Abwandlung des ECM-Prozesses stellt die EC-Bearbeitung mit oszillierender Werkzelektrode – (kurz PEM für Precise Electrochemical Machining) – dar. Während die Elektrode bei ECM und PECM eine konstante Vorschubgeschwindigkeit hat, oszilliert die Werkzelektrode mit einer Frequenz zwischen 10 und 50 Hz in z-Richtung (Annahme: x-y-Ebene als Grundfläche). Die grundsätzliche Arbeitsfolge ist in Abbildung 2.6 zusammengefasst: im ersten Schritt wird ein frischer Elektrolyt in den Arbeitsspalt zugeführt, der dann geschlossen wird. Nach einem gesteuerten Stromimpuls entfernt sich die Werkzelektrode wieder vom Werkstück und der Elektrolyt mit allen Abtragprodukten wird aus dem Arbeitsspalt entfernt.

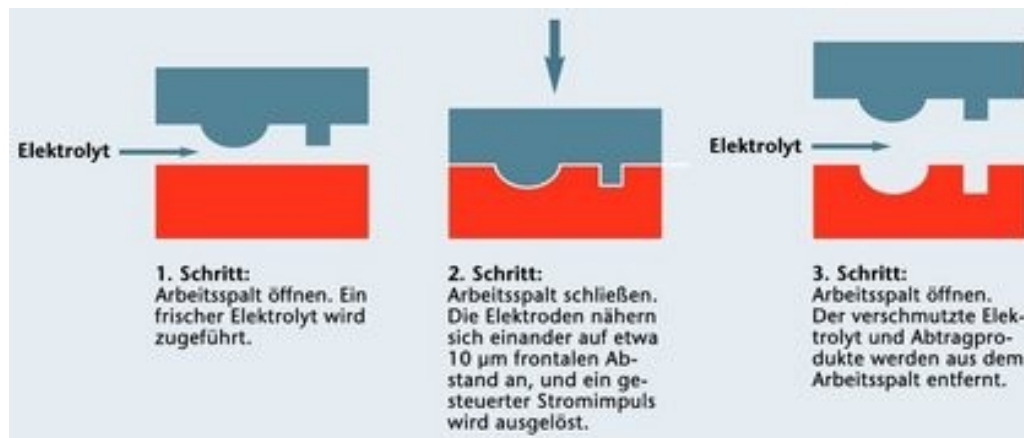


Abbildung 2.6: Schema des PEM-Verfahrens [2]

Der Arbeitsspalt kann für die Einstellzeit auf bis zu  $s < 10 \mu\text{m}$  und somit auf kleinere Werte als bei ECM und PECM verringert werden. Dies ermöglicht eine extrem hohe Formgenauigkeit bei komplexeren Strukturen. Während der Ausschaltzeit wird der Arbeitsspalt vergrößert, indem sich die Elektrode ein Stück vom Werkzeug entfernt. Dadurch wird eine vollständige und kontinuierliche Spülung der Bearbeitungsstelle gewährleistet. Das Verfahren beherrscht eine Form- und Abbildungsgenauigkeit von 0,02 mm.

Vorteile:

- Es wirken keine mechanischen Kräfte auf das Werkstück
- Die Prozesstemperatur liegen bei 20-50°C
- Härte des Werkstoffes spielt keine Rolle
- Prozessbedingt entsteht kein oder nur sehr geringer Elektrodenverschleiß
- Bearbeitung von mehreren Werkstücken gleichzeitig
- Hohe Oberflächengüte (bis  $R_a$  0,02  $\mu\text{m}$ )
- Hohe Abbildungsgenauigkeit (bis 0,02 mm)

Nachteile:

- Es sind aufwändige Elektroden und Aufspannvorrichtungen (Druck-/Spülkammer) für die Bearbeitung notwendig
- Jeder neue Werkstück- und Materialtyp benötigt neue Prozessparameter bzw. Aufspannvorrichtungen
- Know How wird benötigt, das durch Versuche und Erfahrung erst erarbeitet werden muss oder von Applikation Center geliefert werden kann
- Der Materialabtrag (Schlamm) wie auch der Elektrolyt ist fachmännisch zu entsorgen

Zu den bekanntesten Anbietern des deutschsprachigen Raums zählen Gebrüder Bräm GmbH (<http://www.precise-ecm.ch/>), Präzisionswerkzeugbau Gerhard Rauch GmbH (<http://www.gerhard-rauch.at/>) und PEMtec SNC (<http://www.pecmtec.de/>).



Abbildung 2.7: Turbinenschaufel mit PEM-Verfahren [80]

Abbildung 2.7 zeigt ein mit PEM-Verfahren hergestellte Turbinenschaufel zum Einsatz in handgetriebenen Druckluftwerkzeugen. Der arithmetische Mittenrauwert beträgt 0,2  $\mu\text{m}$ .

| <b>Kennwert</b>                           | <b>Zahlenwert</b>                    |
|---|--------------------------------------|
| Abbildungsgenauigkeit [mm]                | bis 0,02                             |
| Arbeitsspalt s [ $\mu\text{m}$ ]          | bis auf 10 während der Einschaltzeit |
| Mittenrauwert $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]     | 0.05                                 |
| Schwingungsamplituden A [ $\mu\text{m}$ ] | 100 – 400                            |
| Schwingungsfrequenz f [Hz]                | 50                                   |
| Vorschubgeschwindigkeit v [mm/min]        | 0,1 – 2                              |

Tabelle 2.3: Kennwerte des PEM-Verfahrens

## 2.4 Elektrochemisches Fräsen [15, 16]

Ein weiteres Verfahren, das auf die Technologie der ECM-Bearbeitung zurückgeht, ist das elektrochemische Fräsen mit ultrakurzen Spannungspulsen (kurz ECF).

Elektrochemisches Fräsen wurde von einem Forscherteam unter der Leitung von Gerhard Ertl am Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft entwickelt und im September 2000 erstmals veröffentlicht.

Dieses Verfahren eignet sich besonders zur Einbringung von Mikrostrukturen in harten und elektrisch leitfähigen Werkstoffen. Der Werkstoffabtrag findet wie bei allen anderen EC-Bearbeitungsvarianten nach dem gleichen Ablauf statt: das Werkstück wird in einen Elektrolyten getaucht und löst sich durch die angebrachte Spannung durch elektrochemische Reaktion auf.

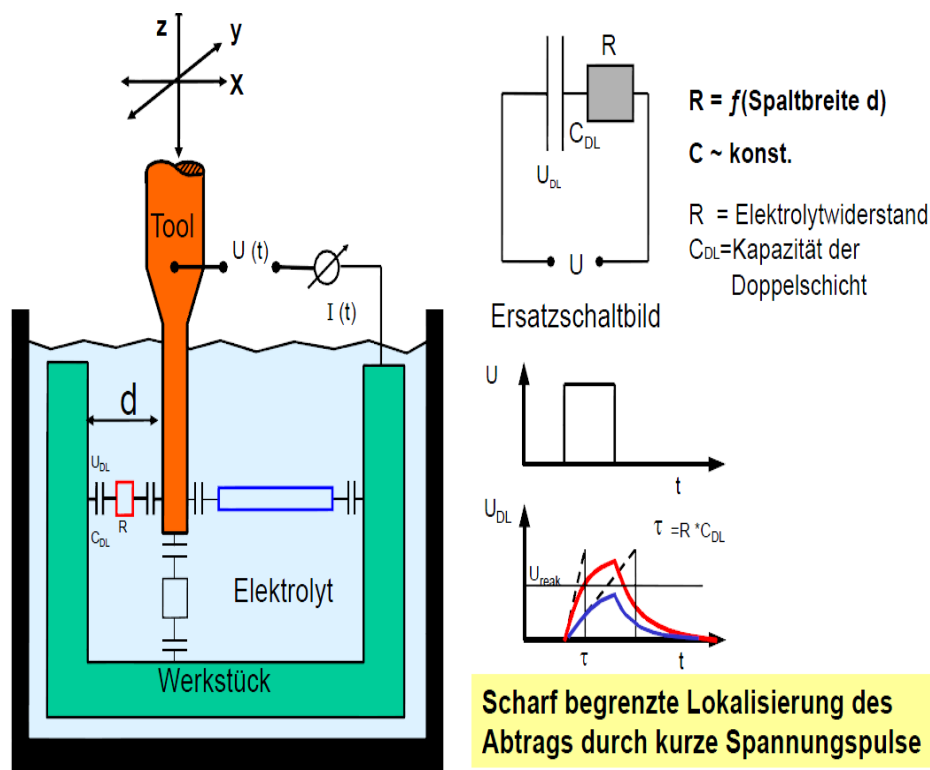


Abbildung 2.8: Darstellung des elektrochemischen FräSENS [15]

In der Literatur ist dieses Verfahren auch unter Bahn-EC-Bearbeitung bekannt, da die Bearbeitung entlang einer durch NC-Programm vorgegebenen Bahn erfolgt. Bei anderen EC-Bearbeitungsvarianten ist ein maximaler Arbeitsspalt von  $10 \mu\text{m}$  möglich, hier schafft das elektrochemische Fräsen eine neue Möglichkeit, indem der Arbeitsspalt auf unter  $10 \mu\text{m}$  gesenkt wird.

Dieses Verfahren zielt vor allem darauf ab, die Probleme der ECM-Bearbeitung (konturabhängige Abformfehler) und der gepulsten ECM-Bearbeitung (Spaltweite noch zu groß) auszugleichen. Die Verbesserung im Vergleich zum PECM besteht darin, dass mit ultrakurzen Spannungsimpulsen gearbeitet wird. Dadurch ist ein Arbeitsspalt möglich, der um das hundert- oder tausendfache kleiner ist als bei bisherigen elektrochemischen Verfahren.

Dieses Verfahren besitzt mit  $1 \mu\text{m/s}$  eine geringe Vorschubgeschwindigkeit. Um diesen Wert zu verbessern wird ECF häufig mit HSC-Fräsen (kurz für High Speed Cutting) kombiniert.

Mittels HSC-Fräsen werden gröbere Vorstrukturen erstellt, die dann durch ECF feinbearbeitet werden.

Ein großes Problem stellt die individuelle Elektrolytabstimmung auf den Werkstoff dar, beinahe jeder Werkstoff benötigt einen individuell angepassten Elektrolyten.

Ultrakurze Pulse im Nanosekundenbereich führen zu einer guten lokalen Metallauflösung im Mikrometerbereich.

Vorteile:

- Unter kalibrierten Bedingungen kein Werkzeugverschleiß
- Berührungsloses Verfahren – kein Einbringen von Spannungen etc. in die Randzone
- Kein Gratzen
- Werkzeuge mit  $d < 10 \mu\text{m}$  können verwendet werden

Nachteile:

- Geringe Vorschubgeschwindigkeit ( $1 \mu\text{m/s}$ ) und Vorschubrate  $5\text{-}60 \mu\text{m/min}$
- Nur lokaler Abtrag durch Spannungspuls möglich
- Fast jeder Werkstoff erfordert einen eigenen Elektrolyten
- Werkstoff muss elektrisch leitend sein
- Oberflächenqualität und Bearbeitbarkeit ist abhängig von der Zusammensetzung der Legierung und der Homogenität des Gefüges

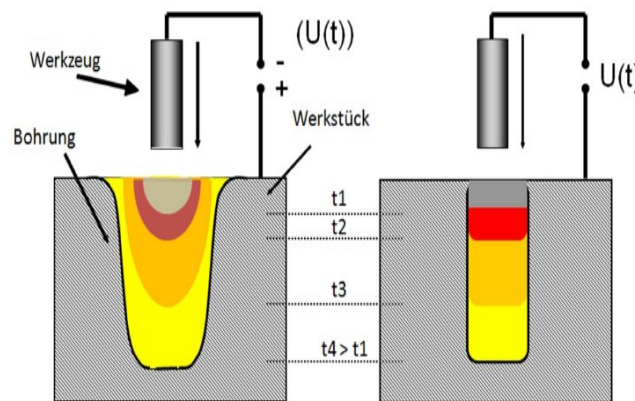


Abbildung 2.9: Gegenüberstellung von ECM/PECM und ECF [15]

| Konventionelle ECM/PECM   | ECF  |
|---|--|
| Lokale Abtraggeschwindigkeit ergibt sich aus der Stromdichteverteilung  | Direkte Steuerung der lokalen Abtraggeschwindigkeit  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Spaltweite ist eine Funktion der Zeit</li> <li>• Partielle Werkzeugisolation notwendig</li> <li>• Prozessenergiequelle stellt Strom für den Abtrag bereit</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Steuerbare Spaltweite</li> <li>• Keine Werkzeugisolation erforderlich</li> <li>• Prozessenergiequelle stellt Strom für die Umladung bereit</li> </ul> |

Tabelle 2.4: Gegenüberstellung von ECM/PECM und ECF [15]

In Tabelle 2.4 sind die Unterschiede zwischen den Verfahren der konventionellen ECM/PECM-Bearbeitung und dem elektrochemischen Fräsen dargestellt. Es lässt sich erkennen, dass der steuerbare Werkzeugspalt und die nicht erforderliche Werkzeugisolation entscheidende Weiterentwicklungen sind, die das Verfahren des elektrochemischen Fräsens präziser und kostengünstiger machen.

Mittels ECF können unter anderem Edelstahl, Werkzeugstahl, CrNi-Stähle, Reinmetalle wie Kupfer, Nickel, Gold oder Wolfram bearbeitet werden.

Der bekannteste Anbieter im deutschsprachigen Raum ist ECMTEC GmbH (<http://www.ecmtec.com/>).

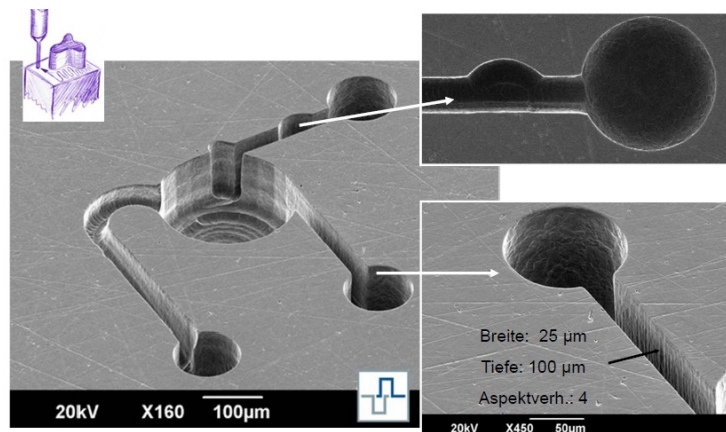


Abbildung 2.10: Beispiel für ECF-Bearbeitung aus Mikrofluidiktechnik [15]

Abbildung 2.10 zeigt das Beispiel der Erstellung von Mikrokanälen für die Mikrofluidik mittels ECF-Bearbeitung.

| Kennwert   | Zahlenwert |
|--|------------|
| Arbeitsspalt $s$ [ $\mu\text{m}$ ]                   | Maximal 10 |
| Bearbeitungsquerschnitt $A$ [ $\text{cm}^2$ ]        | $<1$       |
| Pulsweite $PW$ [s]                                   | $10^{-6}$  |
| Vorschubgeschwindigkeit [ $\mu\text{m}/\text{min}$ ] | 1          |
| Vorschubrate [ $\mu\text{m}/\text{min}$ ]            | 5 – 60     |
| Werkzeugdurchmesser [ $\mu\text{m}$ ]                | 2 – 500    |

Tabelle 2.5: Kennwerte des ECF-Verfahrens

## 2.5 Elektropolieren [17, 18, 71]

Die Metallbearbeitung mittels Elektropolieren ist ein weiteres Verfahren, das auf den Wirkmechanismus der Elektrolyse basiert. Im Gegensatz zu den meisten anderen elektrochemischen Verfahren kommt hier keine Formelektrode zum Einsatz, das Bauteil wird in den Elektrolyten getaucht, während der Elektrolyt von Strom durchflossen wird, wobei häufig Schwefelsäure oder Orthophosphorsäure als Elektrolyt eingesetzt werden. Der Materialabtrag entsteht durch abfließende Metallionen von der Oberfläche der Anode, bedingt durch einen geschlossenen Stromkreis. Als Strom wird Gleichstrom mit meist geringer

Spannung gespeist. Die durchschnittliche Bearbeitungsdauer liegt je nach Werkstoff und gewünschter Kontur zwischen 2 und 20 Minuten. Grundsätzlich gibt es zwei unterschiedliche Mechanismen bei diesem Verfahren: Einebnung im Mikro- und Feinentgratung im Makrobereich.

Elektropolieren eignet sich hervorragend zur Bearbeitung von Bauteilen, die nicht mehr mechanisch poliert werden können, wie z.B. leicht verbiegbare Bauteile mit komplexer Form. Im Zuge dieses Verfahrens bildet sich an der Phasengrenze zwischen Metall und Elektrolyt eine zeitlich beschränkte Deckschicht aus Oxiden und Salzen. Diese Schicht ist an Stellen der Profilerhöhung tiefer als an flachen Stellen und der Materialabtrag geschieht nur an diesen dünnen Stellen der Oxidschicht.

In Abbildung 2.11 ist anodischen Stromdichte über dem Potential für das Elektropolieren dargestellt. Der optimale Bereich für das Bearbeiten liegt auf der passiven Gerade zwischen den Punkten B und C, wobei aus wirtschaftlicher Sicht die Nähe zu Punkt B gesucht wird. Die weiteren Bereiche dieses Diagramms sind der aktive, materialabtragende Bereich von links bis B und der transpassive Bereich ab dem Punkt C nach rechts.

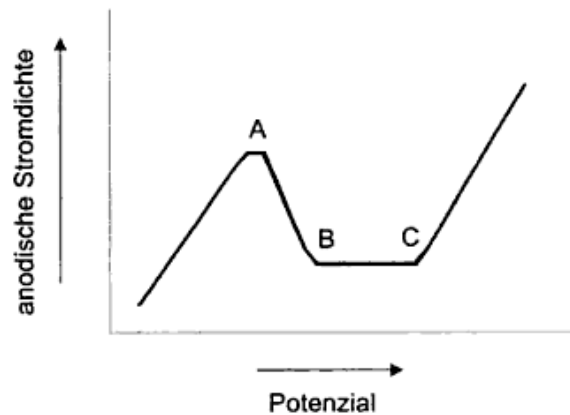


Abbildung 2.11: Anodische Stromdichte über Potential [18]

Der Aufbau einer Elektropolieranlage ist in Abbildung 2.12 dargestellt. Zur erfolgreichen elektrochemischen Bearbeitung werden mehrere Kathoden gleichzeitig (z.B. aus Blei, Kupfer und nichtrostenden Stahl) benutzt, während das Werkstück an einem Korb (z.B. aus Titan, Kupfer und Bronze) befestigt eingetaucht wird.

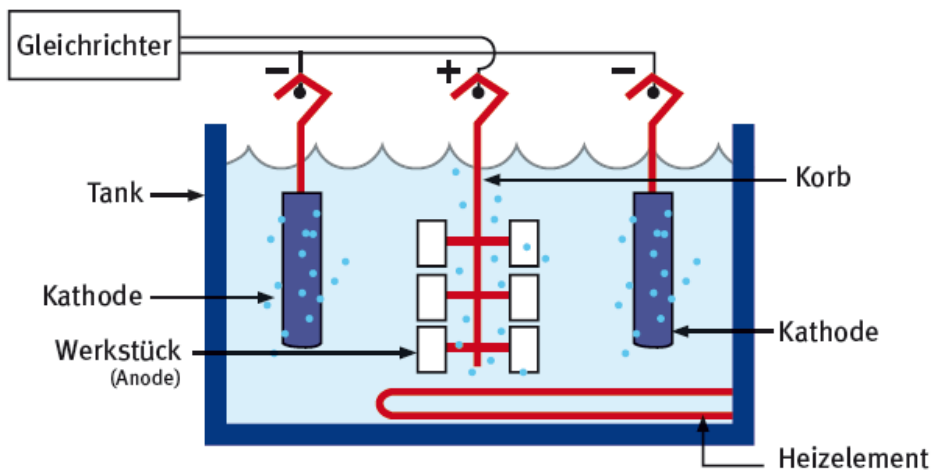


Abbildung 2.12: Darstellung des Elektropolierens [18]

In Abbildung 2.13 ist die Reduzierung der Oberflächenrauigkeit schematisch dargestellt. Mittels Elektropolieren sind Rauigkeitsreduzierungen von bis zu 50 % realisierbar. Wenn ein arithmetischer Mittenrauwert von bis zu 0,5 µm realisiert werden soll, reicht es, wenn die Struktur auf den doppelten Wert vorgeschliffen wird. Bei Strukturen unter 0,5 µm muss auf die Endrauigkeit vorgeschliffen werden. Der Minuspol bezeichnet das Werkzeug (Kathode) und der Pluspol stellt das Werkstück (Anode) dar.

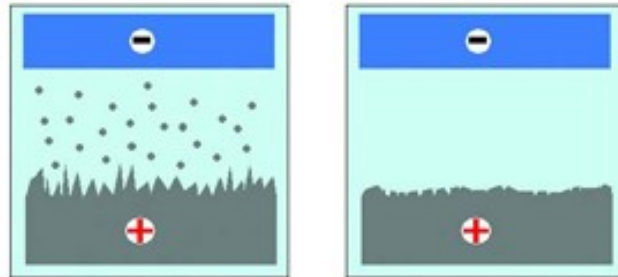


Abbildung 2.13: Ein Werkstück vor (links) und nach der Bearbeitung [18]

Der Arbeitsablauf gliedert sich in 3 große Abschnitte: Vorbehandlung, Elektropolieren und Nachbehandlung. In Abbildung 2.14 sind diese Verfahrensschritte ausführlich ausgeführt.

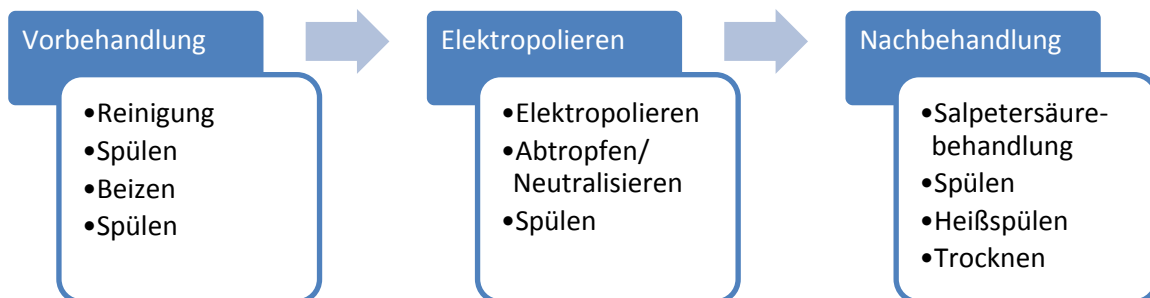


Abbildung 2.14: Verfahrensablauf des Elektropolierens

Zusammengefasst kann festgestellt werden, dass die Vorbehandlung zur Entfernung von Ölen und Fetten, sowie anderen Arten von Verschmutzungen benötigt wird. Im nächsten Schritt laufen die in diesem Kapitel benannten Prozesse ab, während im letzten Schritt die Rückstände des Elektrolyten und Reduktionsprodukte entfernt werden.

Vorteile:

- Verzugsfreies Verfahren
- Keine mechanische Beanspruchung
- Hohe Reproduzierbarkeit der Oberflächen
- Für großflächige Bearbeitung geeignet (z.B. 5500 x 2500 x 2000 mm bei Deutsche Derusit GmbH)

Nachteile:

- Schlamm lagert sich regelmäßig an der Kathode an
- Zur geringfügiger Abtrag

Zu den bekanntesten Anbietern im deutschsprachigen Raum gehören Henkel Beiz- und Elektropoliertechnik GmbH & Co. KG (<http://www.henkel-epol.com/>) und Deutsche Derusit GmbH (<http://www.derusit.de/>).



Abbildung 2.15: Elektropolierter Edelstahl [81]

Abbildung 2.15 zeigt den Anwendungsfall des Elektropolierens anhand eines elektropolierten Edelstahlwerkstücks.

| <b>Kennwert</b>                                | <b>Zahlenwert</b> |
|--|-------------------|
| Abtragrate [ $\mu\text{m}/\text{min}$ ]        | 1 – 3             |
| Bearbeitungszeit t [min]                       | 2 – 20            |
| Behandlungstemperatur T [ $^{\circ}\text{C}$ ] | 40 – 75           |
| Mittenrauwert [ $\mu\text{m}$ ]                | <0,2              |
| Spannung U [V]                                 | 45                |
| Stromdichte J [ $\text{A}/\text{cm}^2$ ]       | 0,05 – 0,6        |

Tabelle 2.6: Kennwerte Elektropolierens



### 3 Mechanische Verfahren

Die spanenden Fertigungsverfahren zur Erzeugung von Mikrostrukturen auf metallischen Oberflächen lassen sich in zwei Gebiete unterteilen: Ultrapräzisionszerspanung und Mikrozerspanung. Der Unterschied besteht darin, dass unter Mikrozerspanung spanende Fertigung von Strukturen im Mikrometerbereich mittels Mikroverfahren mit geometrisch bestimmter und unbestimmter Schneide (Mikrofräsen, -bohren, -drehen, -schleifen usw.) und unter Ultrapräzisionszerspanung Zerspanung großflächiger Bauteile mit Genauigkeit im Submikrometerbereich verstanden wird. Somit kann die Mikrozerspanung als Miniaturisierung der gut erforschten und bekannten konventionellen Zerspanungstechniken verstanden werden [19].

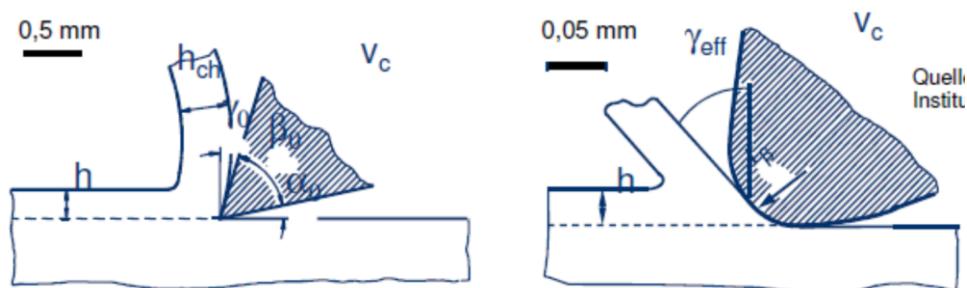


Abbildung 3.1: Unterschied zwischen Makro- (links) und Mikrozerspanung [ISF DORTMUND]

In Abbildung 3.1 ist der Unterschied zwischen Makro- und Mikrozerspanung ersichtlich. Bei der Makrozerspanung ist die Spannungshöhe  $h$  viel größer als der Schneidkantenradius  $r_\beta$  und somit kann die Schneide als ideal scharf angesehen werden. Im Unterschied dazu ist bei der Mikrozerspanung aufgrund von Hartphaseneinflüssen des Hartmetalls nur ein kleiner Unterschied zwischen Spannhöhe und Schneidkantenradius möglich, was in weiterer Folge zu einem negativen Spanwinkel  $\gamma$  und schwieriger Spanbildung führt.

#### Vorteile der Zerspanung gegenüber anderen Fertigungstechniken (z. B. Ätzen):

- Flexible Formgebung
- Hohe Bearbeitungsgeschwindigkeit

#### Nachteile der Zerspanung gegenüber anderen Fertigungstechniken (z. B. Ätzen):

- Gratbildung bei Abtrag
- Einbringung von Spannungen

| Mikrozerspanung  | Ultrapräzisionszerspanung   |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mikrofräsen</li> <li>• Mikrofräsen mit geometrisch optimierten Mikroschaft</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• UP-Zerspanung mit monokristallinen Diamant</li> <li>• Schallunterstützte UP-Zerspanung mit monokristallinen Diamant</li> </ul> |

Abbildung 3.2: Verwendete mechanische Verfahren

### 3.1 Mikrofräsen [5, 19, 20, 21, 22, 23, 24]

Mikrofräsen ist eine Miniaturisierung des konventionellen Fräsens, es gehört zu den Verfahren der Mikrozerspanung und ist allgemein als Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide definiert. Das spanabhebende Verfahren des Fräsens ermöglicht eine sehr hohe Geometrievielfalt und wurde daher zum Mikrofräsen weiterentwickelt [19].

Jedoch entstehen bei diesem Miniaturisierungsprozess unüberwindbare Grenzen, die bei der Anwendung so zu akzeptieren sind und mit diesem Verfahren auch nicht überwunden werden können. Eine Grenze der Miniaturisierung stellt die Werkzeugabdrängung bei kleiner werdendem Fräserdurchmesser dar, diese wird durch den kubischen Zusammenhang des Widerstandmoments vom Durchmesser bedingt. Darüber hinaus muss auf das Material im Miniaturisierungsprozess im Speziellen eingegangen werden, da hierbei Geometrie und Werkzeugverschleiß beeinflusst werden können. „Ploughing Process“ (dt. Pflügen) ist ein typischer Fehler, der bei fehlender Anpassung des Materials an den miniaturisierten Prozess auftritt, dabei wird der Span unter dem Werkzeug durchgedrückt und das Werkstück umgepflügt statt zerspannt [22].

Ein weiteres Problem des Mikrofräsens ist, dass die theoretisch erforderliche Spindeldrehzahl zum Erreichen der gewünschten Schnittgeschwindigkeiten nicht erreicht werden können, da man sonst einen automatischen Werkzeugwechsel nicht mehr realisieren kann [19].

Um die steigende Belastung des Fräserschaftes abzumildern, wurden Mikroschaftfräser mit optimierter Geometrie entwickelt. In Abbildung 3.3 ist ein Größenvergleich zwischen einer Stecknadel (links), Mikroschaftfräser (Mitte) und einem Mikroschaftfräser mit optimierter Geometrie dargestellt.



Abbildung 3.3: Mikroschaftfräser mit optimierter Geometrie im Größenvergleich [25]

Mit diesen geometrieoptimierten Mikroschaftfräsern gelingt eine Spannungsreduktion von bis zu 50 % gegenüber der konventionellen Schaftform. Den optischen Vergleich zwischen den konventionellen und geometrieoptimierten Schaft ist in Abbildung 3.3 ersichtlich. Die Geometrie wird mittels der in Abbildung 3.4 patentrechtlich geschützten Formel berechnet [25].

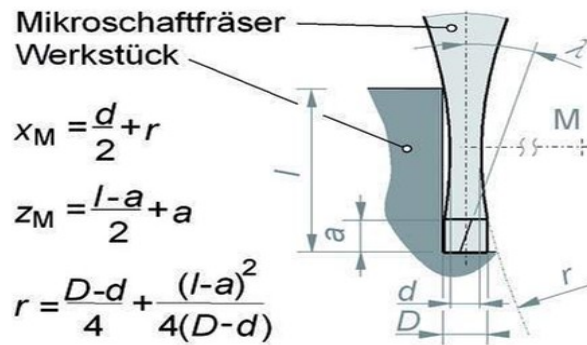


Abbildung 3.4: Formel zur Bestimmung des optimalen Schaftverlaufs [25]

| Kennwert                           | Zahlenwert  |
|------------------------------------|-------------|
| Aspektverhältnis                   | 2 – 10      |
| Effektive Werkzeugdurchmesser [mm] | 0,1 – 20    |
| Werkzeugdurchmesser                | 0,05 – 2 mm |

Tabelle 3.1: Kennwerte des geometrieoptimierten Mikroschafte

Neben der Spannungsreduzierung kann mittels dieses Schafts auch die Schnittgeschwindigkeit und die Zustellgeschwindigkeit erhöht werden und die Bearbeitungszeit kann um 85 % gesenkt werden [25].

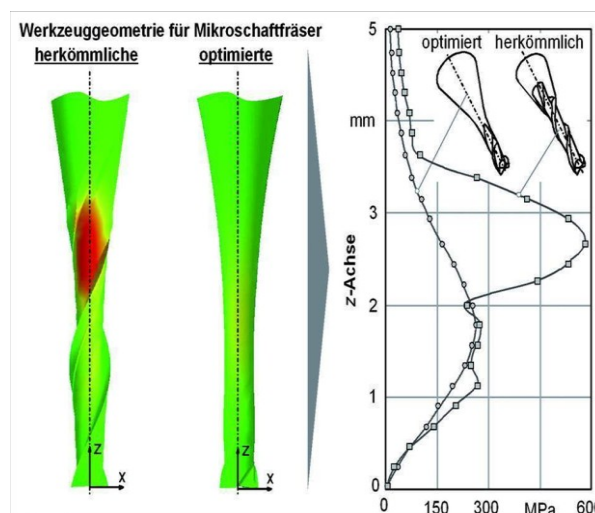


Abbildung 3.5: Gegenüberstellung konventionellen/geometrieoptimierten Schaft [25]

Laut Hersteller des Mikrofräsmaschinenherstellers Primacon können mit ihrer Maschine Primacon PMF 24 NGd Nickel, Messing, Kunststoffe, Edelstahl, Gold, Platin und viele weitere Werkstoffe bearbeitet werden.

Vorteile im Vergleich zu Senkerosion und Laser:

- Zeitersparnis, da keine Elektrode hergestellt werden muss (Senkerosion)
- Höhere Abtragraten, höhere Geometriefreiheit (Laser, Erodieren)
- Freiformflächen sind durch 5-Achsenmaschinen herstellbar

Nachteile im Vergleich zu Senkerosion und Laser:

- Werkzeugverschleiß (Laser, Erodieren)
- Gefahr des Werkzeugbruchs (Laser, Erodieren)

Zu den bekanntesten Anbietern von Mikrofräsanlagen im deutschsprachigen Raum gehören Primacon Maschinenbau GmbH (<http://www.primacon.com/>), Kugler GmbH (<http://www.kugler-precision.com/>) und Kern Micro- und Feinwerktechnik GmbH & Co. KG (<http://www.kern-microtechnik.com/>)

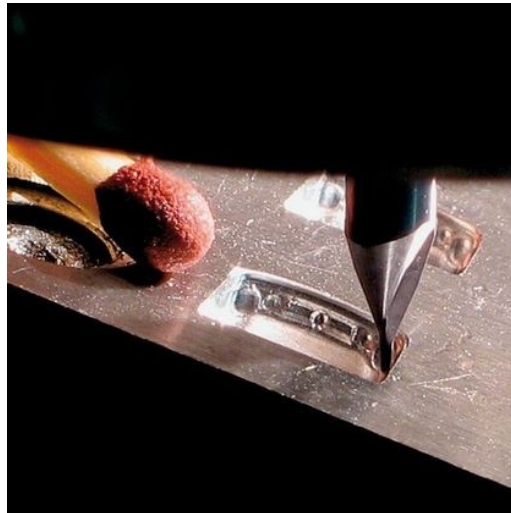


Abbildung 3.6: Fräsen eines Formeinsatzes [23]

In Abbildung 3.6 ist als Beispiel für das Mikrofräsen die Bearbeitung eines Formeinsatzes dargestellt. Der Streichholzkopf links im Bild dient zur Verdeutlichung der kleinen Struktur.

| <b>Kennwert</b>   | <b>Zahlenwert</b> |
|---|-------------------|
| Aspektverhältnis  | 5:1               |
| Maximale Spindeldrehzahl $n_{\max}$ [ $\text{min}^{-1}$ ] | 450.000           |
| Positioniergenauigkeit [ $\mu\text{m}$ ]                  | bis unter 0,1     |
| Standardspindeldrehzahl $n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]         | 60.000            |
| Strukturgröße [ $\mu\text{m}$ ]                           | <10               |
| Werkzeugdurchmesser $d$ [ $\mu\text{m}$ ]                 | >7                |
| Wiederholungsgenauigkeit [ $\mu\text{m}$ ]                | <0,2              |

Tabelle 3.2: Kennwerte des Mikrofräsens

### 3.2 Ultrapräzisionszerspanung [27, 28, 29, 30, 31, 32, 33]

Ultrapräzisionsbearbeitung wird allgemein auch als Diamantzerspanung bezeichnet, da als Schneidstoff monokristalliner Diamant eingesetzt wird. Dieser Schneidstoff besitzt die größte Härte aller Stoffe, dadurch verringert sich der Verschleiß und dieses Verfahren wird vorwiegend für Feinbearbeitung eingesetzt. Hierbei sind Bauteile mit optischen Oberflächen, mit arithmetischen Mittenrauwerten im Nanometerbereich möglich.

Für solche Ultrapräzisionsbearbeitungen sind Spezialmaschinen wie zum Beispiel vom Hersteller Kugler Precision GmbH notwendig. Als Beispiele sind die Bauarten Flycutter F1000-2X (Abbildung 3.7) zur Ultrapräzisionsfräsen und Trommeldrehmaschine TDM-1200 (Abbildung 3.8) zum Ultrapräzisionsfräsen genannt.



Abbildung 3.7: Flycutter F1000-2X [34]



Abbildung 3.8: Trommeldrehmaschine TDM-1200 [35]

Mit diesem Verfahren werden Nichteisenmetalle und Kunststoff verarbeitet. Da Eisen sehr hohe Kohlenstoffaffinität besitzt, scheidet Stahl aus. Häufig werden Aluminium, Kupfer und Messing bearbeitet.

Vorteile:

- komplexe Strukturen auf schwer zerspanbaren, sprödharten Werkstoffen
- neue Anwendungen für die Optikherstellung, z.B. asphärische Formwerkzeuge
- Geringer Werkzeugverschleiß
- Bessere Oberflächenqualitäten
- Kürzere Fertigungszyklen bei kleinen und mittleren Serien

Nachteile:

- Einschränkung des Werkstoffes durch Diamant (Kohlenstoffaffinität)
- Viele manuelle Aufgaben wie Rüsten und Messen

Des Weiteren besteht auch die Möglichkeit der „Fast-Tool“-Bearbeitung. Diese Verfahren stellen das Werkstück mittels aerostatischen und hydrostatischen Führungen zu. Damit lassen sich die Hauptprobleme der Wälzlagerung beheben: ungenaue Positionierung und Positionsrauschen. Die ungenaue Positionierung entsteht beim Übergang zwischen Haft- und Gleitreibung, während das Positionsrauschen durch die begrenzte Einstellbarkeit des Wälzlagers entsteht. Dieses Positionsrauschen führt zu einer abweichenden Oberflächenrauigkeit. Damit sind Mittenrauigkeitswerte von unter 10 nm und Formgenauigkeit unter 1  $\mu\text{m}$  erzielbar [33].

Trotz der vielen Vorteile dieses Verfahrens ist es für einen Großteil der metallischen Oberflächen nicht geeignet, das sich damit keine eisenhaltige Legierungen bearbeiten lassen. Um diesen Umstand zu überwinden, wurde Ultrapräzisionsbearbeitung mit ultraschallunterstützten Diamanten entwickelt. Durch diese Ultraschallunterstützung lassen sich auf eisenhaltige metallische Oberflächen die gleichen komplexen und hochpräzisen Strukturen erzeugen und der hohe Werkzeugverschleiß durch die Kohlenstoffaffinität des Eisens lässt sich vermeiden [27, 28, 30, 31, 32].

Zu den bekanntesten Anbietern im deutschsprachigen Raum gehören LT Ultra Precision Technology GmbH (<http://www.lt-ultra.com/>) und Kugler GmbH (<http://www.kugler-precision.com/>).

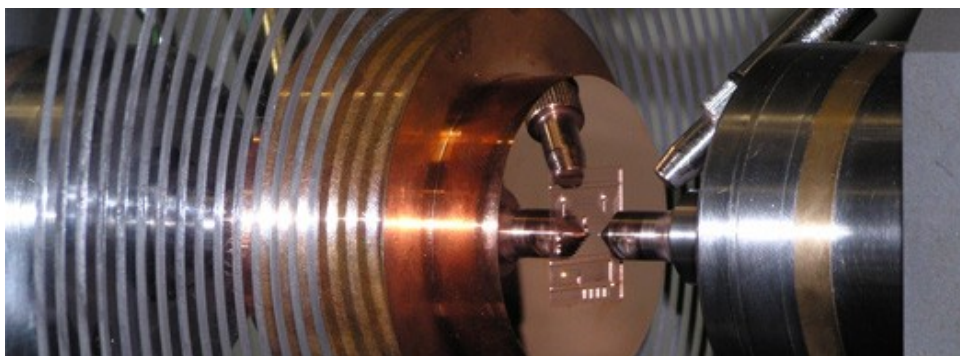


Abbildung 3.9: UP-Zerspanung zur metallischen Optik [82]

Abbildung 3.9 zeigt die Fertigung einer metallischen Optik als Beispiel für die Ultrapräzisionszerspanung.

| Kennwert                                    | Zahlenwert |
|---|------------|
| Formgenauigkeit [ $\mu\text{m}/\text{mm}$ ] | $<0,1/100$ |
| Maximale Bauteilgröße [ $\text{m}^2$ ]      | 1          |
| Mittenrauwert $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]       | $<10^{-3}$ |
| Strukturgröße [ $\mu\text{m}$ ]             | $<5$       |

Tabelle 3.3: Kennwerte der UP-Zerspanung [23.5, 24]

## 4 Chemische Verfahren

Die chemischen Verfahren zur Bearbeitung von metallischen Oberflächen sind in Form von Ätzen schon sehr gut und lange bekannt. In den letzten Jahren kamen durch steigende Anforderungen an immer kleinere Strukturen und niedrigere Rauigkeiten weitere Verfahren wie das weniger gut bekannte Sol-Gel-Verfahren hinzu. Der Materialabtrag des chemischen Ätzens unterscheidet sich vom Materialabtrag des physikalischen Ätzens dadurch, dass beim chemischen Ätzen ein chemischer Angriff und Auflösen des Materials eintritt, während beim physikalischen Ätzen der Materialabtrag durch den Impuls der auftreffenden Teilchen passiert.

### 4.1 Photochemisches Ätzen [36, 37, 38]

Das photochemische Ätzen erlangte durch die Entwicklung von photosensitiven Lacken im 20. Jahrhundert große Bedeutung in der industriellen Anwendung. Jedoch ist die Technologie des Ätzens bis ins 16. Jahrhundert zurückzuerfolgen. Damals stellte man in der Waffenschmiedearbeitskunst mit Hilfe von Essig und Salz erste Eisenätzradierungen her.

Der Ablauf dieses Prozesses stellt sich wie folgt dar: Zuerst muss die zu beätzende Oberfläche gründlich gereinigt und von allen fettigen und öligen Rückständen befreit werden. Danach wird eine Fotolackschicht aufgebracht und getrocknet, die im folgenden Prozessschritt belichtet wird. Diese belichteten Bereiche stellen die Maske des Bauteils dar. Alle nicht belichteten Bereiche werden entfernt und mittels Ätzung wird die gewünschte Kontur eingebracht. Nach der Ätzung wird die Maske entfernt und das verbliebene Bauteil gereinigt und von den Fotolackrückständen befreit.

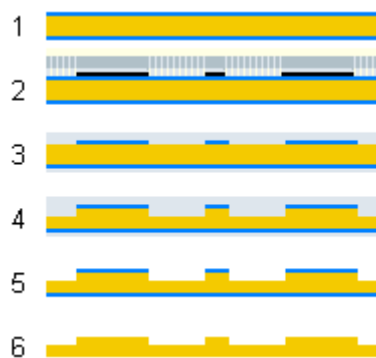


Abbildung 4.1: Photochemisches Ätzen [39]

In Abbildung 4.1 sind alle Prozessschritte der photochemischen Ätzung dargestellt. Zu Beginn (Schritt 1) wird das Bauteil (gelb) mit einem Fotolack (blau) überzogen und im nächsten Schritt (Schritt 2) wird mittels UV-Strahlung ein Muster in den Resist eingebracht. Das Ergebnis dieser ersten beiden Schritte ist in 3 erkennbar. Abschnitt 4 und 5 zeigen den Beginn und das Resultat der Ätzung des Metalls und im letzten Abschnitt ist das Bauteil wieder von den Resten des Fotolacks befreit.

Eine Weiterentwicklung des photochemischen Ätzens stellt der In-Line-Ätzprozess (Abbildung 4.2) der Firma Micrometal GmbH (<http://www.micrometal.de>) dar. Bei dieser Variante können Endlosprodukte (max. 800.000 mm) mit einer maximalen Breite von 330

mm und einer Dicke zwischen 0,025 und 0,350 mm (entspricht 25 bis 350  $\mu\text{m}$ ) hergestellt werden.

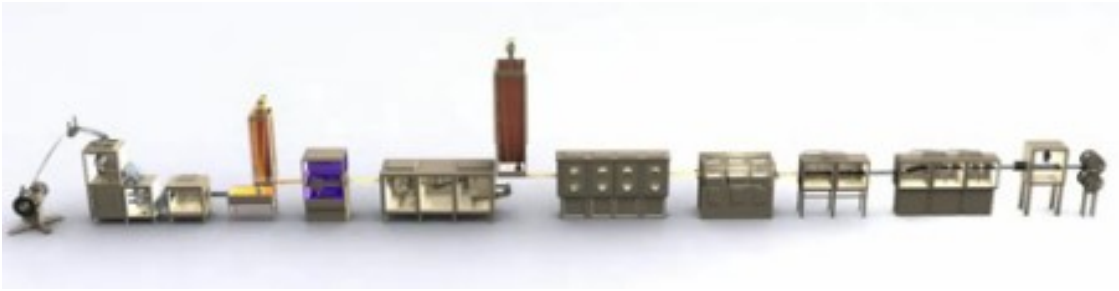


Abbildung 4.2: In-Line Ätzprozess [39]

#### Vorteile der Ätztechnik:

- Beim Ätzen wirkt keine Hitze auf das Material, das Gefüge bleibt unverändert
- Härte und Sprödigkeit des Werkstoffes spielen keine Rolle
- Das Ätzverfahren ermöglicht eine schnelle Herstellung von Prototypen, ohne Werkzeugkosten
- Im Ätzverfahren sind kleinste Auflagen sehr einfach und kostengünstig realisierbar

#### Nachteile der Ätztechnik:

- Relativ teure Einzelteilfertigung
- Masken sind zwingend notwendig
- Strukturen müssen mindestens so groß sein wie die Materialstärke

Mittels Ätztechnik können Stahl, Edelstahl, Eisen-Nickel-Legierungen, Aluminium und Aluminiumlegierungen und Kupfer und Kupferlegierungen bearbeitet werden. Bei Stahl gilt, dass Ätzungen mit einem Chromgehalt von unter 15 % und einem möglichst geringem Schwefelgehalt realisierbar sind.

Zu den bekanntesten Anbietern im deutschsprachigen Raum zählen Micrometal GmbH (<http://www.micrometal.de>), Ätztechnik Herz (<http://www.aetztechnik-herz.de/>) und Etchform GmbH (<http://www.etchform.de/>).

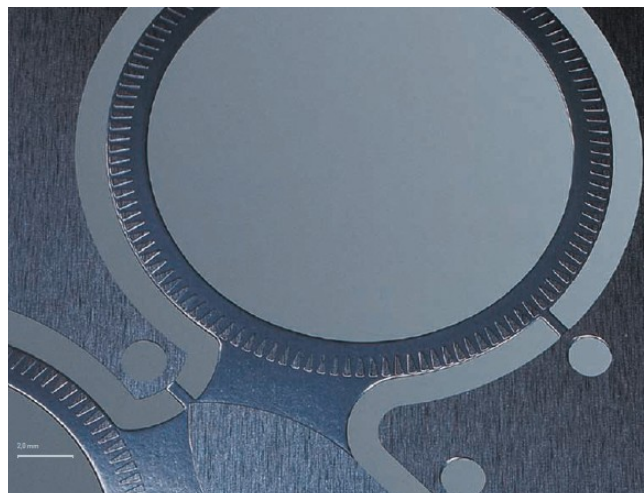


Abbildung 4.3: Beispiel einer photochemischen Ätzung [38]



In Abbildung 4.3 ist als Beispiel für die Anwendung der photochemischen Ätzung ein Bauteil der Firma Micrometal GmbH aus dem In-Line-Ätzprozess dargestellt.

| <b>Kennwert</b>                       | <b>Zahlenwert</b> |
|---------------------------------------|-------------------|
| Kleinste Schlitzbreite [mm]           | 0,018 bei d=0,025 |
| Kleinste Schlitzbreite [mm]           | 0,245 bei d=0,350 |
| Standardabmessungen des Bauteils [mm] | 550 x 550         |

Tabelle 4.1: Kennwerte des photochemischen Ätzens

## 4.2 Sol-Gel-Verfahren [40, 41, 42, 43, 44, 45, 46]

Dieses Verfahren zählt zu den nasschemischen Verfahren zur Erzeugung nichtmetallischer anorganischer Schichten. Aufgrund der erzielbaren Strukturen im Nanometerbereich zählt dieses Verfahren zur Nanotechnologie der Chemie. Wie in Abbildung 4.4 dargestellt, beruht dieses Verfahren auf ein flüssiges Ausgangsmaterial (Sol), das durch eine Sol-Gel-Transformation mit dreidimensionaler Vernetzung der Nanopartikel im Lösungsmittel.

Sole sind kolloide Dispersionen, d.h. Flüssigkeiten mit enthaltenen Nanopartikeln im Größenbereich von 1 bis 100 nm. Nach dem Auftragen dieser Sole wird das flüssige Sol durch Trocknung zu einem festen gelförmigen Film. Im nächsten Schritt erfolgt eine Wärmebehandlung unter Luft zwischen 300 und 800 °C, um das Lösungsmittel aus der Schicht zu bekommen. Dieser Schritt macht aus dem Gel einen amorphen, nanoporösen Film mit einer höheren Viskosität. Die Schicht beginnt zum Abschluss dieses Prozesses bei über 450 °C zu Sintern und es entsteht eine oxidkeramische Schicht. Das Sintern wird benötigt, um die Lösungsmittelreste aus der Schicht zu treiben. Bevor das Sol aufgetragen wird, ist eine gründliche Reinigung der Oberfläche erforderlich, da es sonst zu schlechter Benetzung und lokalen Defekten kommen kann.

Metalle werden mit Sol-Gel-Schichten überzogen um Korrosionsschutz und Abriebfestigkeit zu erzeugen, sowie um wasserabweisende und ölabweisende Oberflächen zu erzeugen.

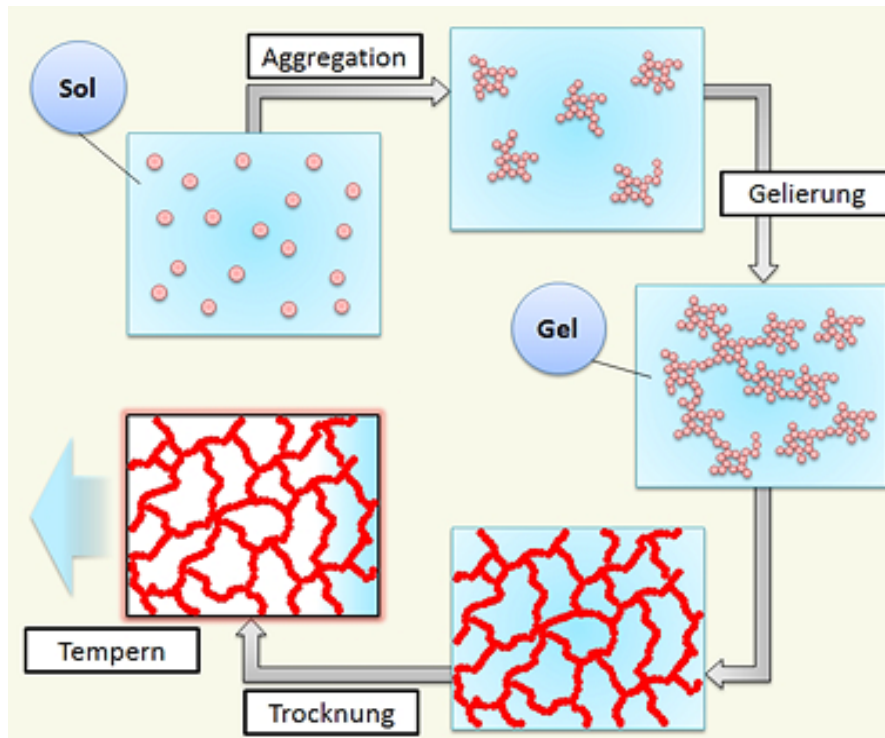


Abbildung 4.4: SOLGEL-Verfahren [40]

In Abbildung 4.5 sind die unterschiedlichen Möglichkeiten der Sol-Gel-Verarbeitung gezeigt, wobei hier nur der Weg über die Hydrolyse zum Sol und einer folgenden Beschichtung relevant ist.

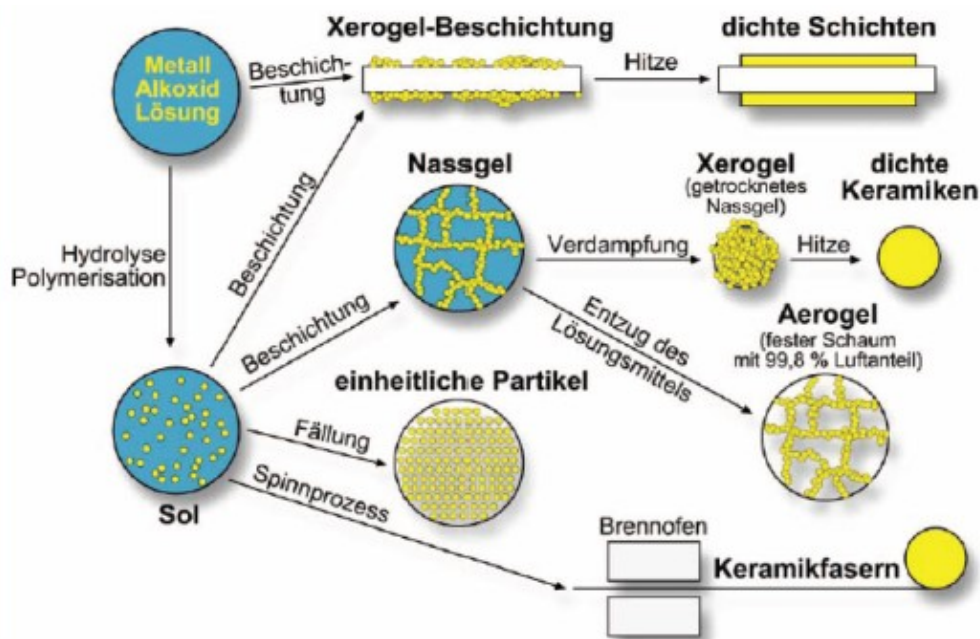
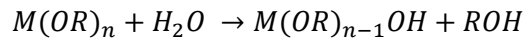


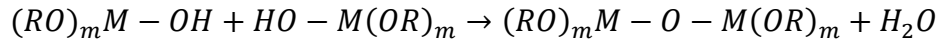
Abbildung 4.5: Verschiedene Möglichkeiten der Sol-Gel-Bearbeitung [47]

Als Ausgangsstoffe – in der Literatur Präkursoren genannt – werden Metallalkoholate von vierwertigen (z.B. Titan, Zirkon) oder dreiwertigen (z.B. Aluminium) Metallen mit Alkylgruppen wie Ethyl  $-C_2H_5$ , Propyl  $-C_3H_7$  und Butyl  $-C_4H_9$  verwendet.

Die grundlegenden Reaktionen dieses Prozesses sind Hydrolyse des Metallalkoholats und Kondensation. Bei der Hydrolyse werden Gruppen der Metallalkoholate mit Hilfe von Wasser abgespalten.



Über eine nachfolgende Kondensationsreaktion kommt es zu einer Verkettung der Monomere



Diese beiden Reaktionen werden so lange durchgeführt, bis sich der feste Gelfilm ausgebildet hat. Das gewünschte Resultat dieses Verfahrens ist eine meist transparente, glasartige Schicht, die durch hohe Härte und Kratzfestigkeit besticht. Darüber hinaus lassen sich mit Sol-Gel-Schichten die Temperaturbeständigkeit und der Korrosionsschutz eines Trägermaterials erhöhen.

Durch die hohen Temperaturen beim Sintern ist dieses Verfahren, wie es hier genannt wurde, für Kunststoffe ungeeignet. Als Werkstoffe eignen sich Metalle, Glas und Keramiken.

Zum Aufbringen dieser Schichten gibt es folgende Verfahren: Sprühen, Rakeln (Walzenbeschichtung), Schleuderbeschichtung und Tauchbeschichtung. Hauptsächlich finden in der Praxis jedoch nur die beiden letztgenannten Schleuder- und Tauchbeschichten. Für die Beschichtung von Metallbändern in Großserien wird das Walzenbeschichten verwendet.

Bei der Schleuderbeschichtung (spin coating) wird die Sol-Lösung durch schnelle Rotation verteilt. Dadurch eignet sich dieses Verfahren nicht nur für planare, sondern auch für konvexe Flächenformen. Ein Vorteil der Schleuderbeschichtung ist, dass für ein Experiment nur eine kleine Menge des Sols benötigt wird. Nachteilig ist, dass ein großer Teil der aufgeschleuderten Sol-Flüssigkeit verloren geht und sich dieses Aufbringungsverfahren nicht für die Anwendung teurer Beschichtungsmaterialien eignet.

Die Tauchbeschichtung (dip coating) funktioniert nach dem einfachen Prinzip des Eintauchens und Herausziehens mit konstanter Geschwindigkeit. Der große Nachteil dieses Verfahrens ist, dass ein sehr großes Solvolumen zur Verfügung gestellt werden muss, damit die Bauteile eingetaucht werden können.

Beim Walzenbeschichten (coil coating) können Metallbänder ein- oder beidseitig beschichtet werden. Die Bänder werden nach der Produktion abgerollt und mittels einer alkalischen Lösung von Öl- und Fettrückständen befreit. Die Schicht wird dann mittels einer kontinuierlichen Walzbewegung aufgebracht. Mit diesem Verfahren wird das Beschichtungsmaterial zu 100 Prozent genutzt, da keine Sprühverluste auftreten.

#### Vorteile:

- einfaches Verfahren
- die Oberflächeneigenschaften sind weitestgehend einstellbar
- verhältnismäßig schnell und günstig

#### Nachteile:

- relativ geringe Haftfestigkeit der Schicht
- geringe Haltbarkeit der Schicht
- relativ hohe Prozesstemperaturen erforderlich, daher nicht für alle Materialien (z.B. Einschränkung bei Kunststoffen) geeignet

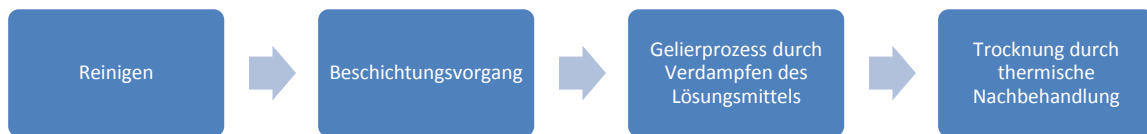


Abbildung 4.6: Prozessablauf Sol-Gel-Verfahren [45]

Mit dem Sol-Gel-Verfahren können sehr viele Werkstoffe wie z.B. Stahl, Edelstahl, Nichteisenmetalle, Aluminium und Kupfer beschichtet werden.

Eine der wichtigsten Eigenschaften, die mit diesem Verfahren eingestellt werden können, ist der Korrosionsschutz. Korrosion entsteht, wenn das Metall mit Luft in Gegenwart von Wasser zu Metalloxid reagiert. In Abbildung 4.7: Unterschied zw. Lack und Sol-Gel-Beschichtung [45] ist der Unterschied zwischen einer einfachen Lack- und einer Sol-Gel-Schicht dargestellt. Bei einer herkömmlichen Lackschicht kann das Wasser die Bindung zwischen Lack und Metall unterwandern. Wenn es zu einer Beschädigung der Oberfläche und einem damit verbundenen Lufteintritt kommt, bildet sich eine Oxidschicht.

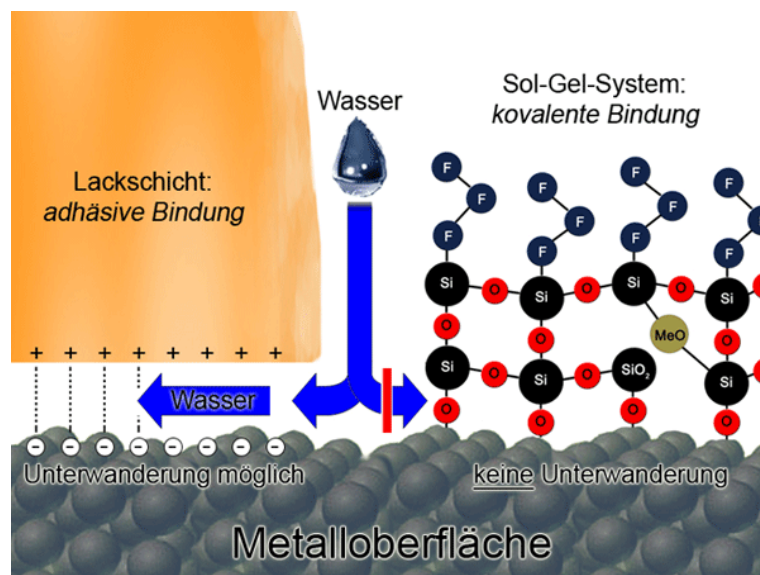


Abbildung 4.7: Unterschied zw. Lack und Sol-Gel-Beschichtung [45]

Hydrophobie, Oleophobie und eine erhöhte Abriebfestigkeit sind die weiteren Eigenschaften, die sich mit Hilfe dieses Verfahrens erzeugen lassen.

Durch Hydrophobie (wasserabweisend) und Oleophobie (ölabweisend) perlen Wasser und Öl von der Oberfläche ab und es entsteht der sogenannte „Easy-to-Clean“-Effekt (Abbildung 4.8). Die Oberfläche des beschichteten Materials lässt sich einfach von Verunreinigungen und auch Fingerabdrücken (entstehen durch Säure- und Fettfilm der Haut) entfernen. Dieser Effekt ist aus der Bionik als Lotus-Effekt bekannt.

Die Abriebfestigkeitserhöhung lässt sich durch das glasartige Netzwerk der Schicht erklären, die auch dazu führt, dass die Reibung minimiert wird.



Abbildung 4.8: Easy-to-Clean eines verzinkten Stahlblechs [46]



Abbildung 4.9: Sol-Gel-Korrosionsschutz anhand eines Kupferblechs [45]

In Abbildung 4.9 ist der Unterschied zwischen einem Sol-Gel-behandeltem und einem nicht behandeltem Kupferblech dargestellt. Das Blech links hält dem Korrosionsangriff dank der Beschichtung stand.

Zu den bekanntesten Anbietern im deutschsprachigen Raum gehören InterLotus Nanotechnologie GmbH (<http://www.interlotus.de/>) und Obeko GmbH (<http://www.obeko.de/>).

| <b>Kennwert</b>                    | <b>Zahlenwert</b> |
|------------------------------------|-------------------|
| Maximale Prozesstemperaturen [° C] | 300 – 800         |
| Partikelgröße [nm]                 | 1 – 100           |
| Schichtdicken [µm]                 | $10^{-3}$ – 4     |
| Sintertemperatur [° C]             | >450              |

Tabelle 4.2: Kennwerte des Sol-Gel-Verfahrens

## 5 Thermische Verfahren

Mit dem Gebiet der thermischen Verfahren wird meist ausschließlich das Bearbeiten mit Lasern assoziiert. Das Akronym für Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (dt. Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung) wurde 1957 geprägt vom amerikanischen Physiker und Erfinder des Lasers Gordon Gould.

Ein weniger bekanntes Verfahren der thermischen Bearbeitung beruht auf dem Prinzip der Funkenentladung und wird als Electrical Discharge Machining bezeichnet. Die erodierende Wirkung elektrischer Entladung ist der grundlegende Mechanismus dieses Verfahrens und wurde um 1770 erstmals vom amerikanisch-englischen Physiker und Chemiker Joseph Priestly beschrieben. B. R. und N. I. Lazarenko forschten weiter um die zerstörende Wirkung der elektrischen Entladung in ein kontrolliertes Verfahren zu transferieren.

### 5.1 Funkenerodieren [4, 48, 49, 50]

Dem Verfahren des Funkenerodierens (kurz EDM für Electrical Discharge Machining) liegt das Wirkprinzip der elektrischen Funkenentladung zwischen der Elektrode – dem Werkzeug – und einem elektrisch leitfähigen Werkstück zu Grunde. Das Funkenerodieren kann in drei Verfahren unterteilt werden: Bohr-, Draht- und Senkerodieren. Jedoch spielt nur das Senkerodieren zur Herstellung von Mikrostrukturen in metallischen Oberflächen eine Rolle.

Während dem Bearbeiten wird der Arbeitsspalt so lange verkleinert (bis zu 4  $\mu\text{m}$ ) bis ein Funke nach Überschreiten der Durchschlagfestigkeit von der Elektrode auf das zu bearbeitende Werkstück überspringt. In weiterer Folge kommt es zur Bildung eines energiereichen Plasmakanals (Entladekanal). Im Gegensatz zu den elektrochemischen Bearbeitungsverfahren (Kapitel 2) zählt das Funkenerodieren zu den thermischen, abtragenden Fertigungsverfahren und findet in einem elektrisch leitfähigen Medium, einem Dielektrikum statt.

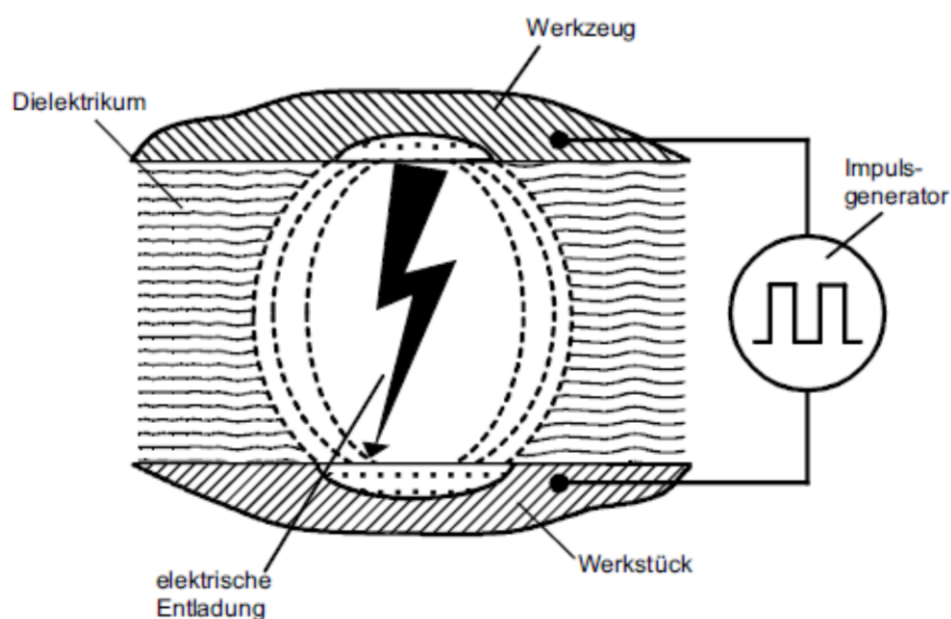


Abbildung 5.1: Darstellung des EDM-Verfahrens [4]

Die Wissenschaft hat die genauen Vorgänge des Materialabtrages nicht eindeutig erwiesen. Jedoch hat sich die „elektrothermische Theorie“ von Lazarenko und Zolotych [4] als Erklärung für den physikalischen Vorgang weitgehend durchgesetzt: der Werkstoffabtrag erfolgt durch Herausschleudern bzw. Verdampfen des schmelzflüssigen Metalls, nachdem die durch elektrische Funkenentladung erzeugte Wärme den Werkstoff im Bereich der Kanalfußplatte aufgeschmolzen hat.

Viele Hinweise deuten auf die thermische Wirkungsweise dieses Verfahrens hin. So entstehen Mikrorisse und häufig Zugeigenspannungen an der Oberfläche des bearbeiteten Werkstücks und im Querschliff sind eine „weiße Zone“ als Randschicht ersichtlich. Diese Merkmale sind eindeutige Hinweise auf die thermische Wirkungsweise.

Der ganze Vorgang gliedert sich wie in Abbildung 5.2 dargestellt in drei Phasen: Aufbau-, Entlade- und Abbauphase.

- **Aufbauphase:** Diese Phase wird auch Ionisationsphase genannt. Es wird die Durchschlagfestigkeit überschritten, in weiterer Folge der Plasmakanal und ein Stromfluss auf der Manteloberfläche gebildet. Ein Teil der Anode wird schon vor der Bildung des Plasmakanals durch Elektrodenbeschuss abgetragen, die Kathode bleibt unversehrt. Während dieser Phase kommt es zu starken Strom- und Spannungsschwankungen über der Zeit.
- **Entladephase:** Diese Phase wird auch als Umwandlungsphase charakterisiert. Der konstante Strom wirkt auf einem kleinen Querschnitt. Die elektrische Energie wird in thermische Energie umgewandelt und führt zum Schmelzen bzw. Verdampfen eines bestimmten Materialvolumens. Es bildet sich eine stetig größer werdende Gasphase.
- **Abbauphase:** Nach Abschaltung des Stromes bricht der Plasmakanal zusammen, die Gasblase platzt und das verdampfte bzw. flüssige Material wird herausgeschleudert.

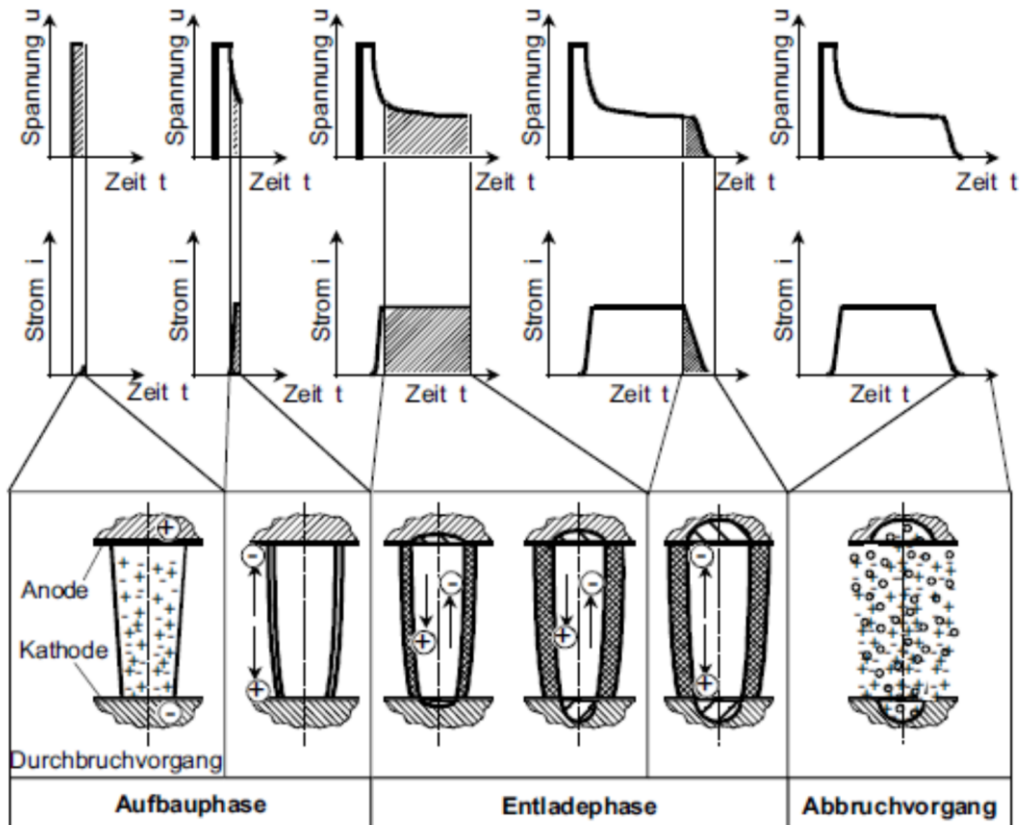


Abbildung 5.2: Phasen des EDM [4]

Als Elektrodenwerkstoffe können für dieses Verfahren Kupfer, Messing, Graphit, Kupferlegierungen oder auch Hartmetall benutzt werden.

Wichtig ist es, die entscheidenden Parameter dieses Verfahrens wie Arbeitsspalt, Spannung, Stromstärke oder Funkenfrequenz und –dauer richtig zu wählen, da es sehr anfällig für Entartungen ist. Die häufigsten Entartungen sind Leerlaufimpuls (Arbeitsspalt zu groß), Spätzündung, Fehlentladung (Arbeitsspalt zu klein) und Kurzschlussimpuls (Arbeitsspalt gleich Null).

Das Dielektrikum dient der Kühlung der Bearbeitungsstelle, Isolation zwischen Werkzeug- und Werkstückelektrode, Isolation des Arbeitsspalts, Einschnürung des Entladekanals und Entfernung der abgetragenen Partikel. Die Einschnürung des Entladekanals führt zu einer Erhöhung der Energiedichte.

Einige der wichtigsten Kenngrößen der EDM-Bearbeitung sind Entladedauern, Zündzeitverzögerung, Impulsdauer, Pausendauer und Periodendauer.

Das Verfahren der Electrical Discharge Machining wird vorwiegend im Werkzeug- und Formenbau zur Herstellung von Spritzguss- und Druckgussformen, sowie Schmiedegesenke verwendet.



Vorteile:

- Für schwer zerspanbare Werkstoffe geeignet und extrem harte Werkstoffe (Titan, Stahl, Hartmetall)
- Oberflächenstrukturen werden gratfrei hergestellt
- Oberflächenstrukturen mit unterschiedlichen Rauigkeiten möglich
- Mit Messmaschine und Elektrodenwechseln kann das Verfahren sehr gut automatisiert werden

Nachteile:

- Werkstoff muss elektrisch leitend sein
- Extrem hohe Fertigungskosten – im Bereich des Werkzeug- und Formenbau hat EDM die höchsten Fertigungskosten
- Durch die lange Bearbeitungszeit ist eine Klimatisierung des Arbeitsraumes notwendig, um konstante Bedingungen zu halten
- Vorschubgeschwindigkeit ähnlich langsam dem ECF: 1  $\mu\text{m/s}$

Bezüglich der erzielbaren Oberflächenrauigkeit sei angemerkt, dass hohe Spannung zu einem hohen Abtrag und einer hohen Rauheit führt. Feine Oberflächen können durch mehrere hinter einander folgende Arbeitsgänge erfolgen [48].

Die am besten bekannten Anbieter im deutschsprachigen Raum sind bes Funkenerosion GmbH (<http://www.bes-edm.de/>) und Dütsch Funkenerosion GmbH (<http://www.duetsch-funkenerosion.de/>).

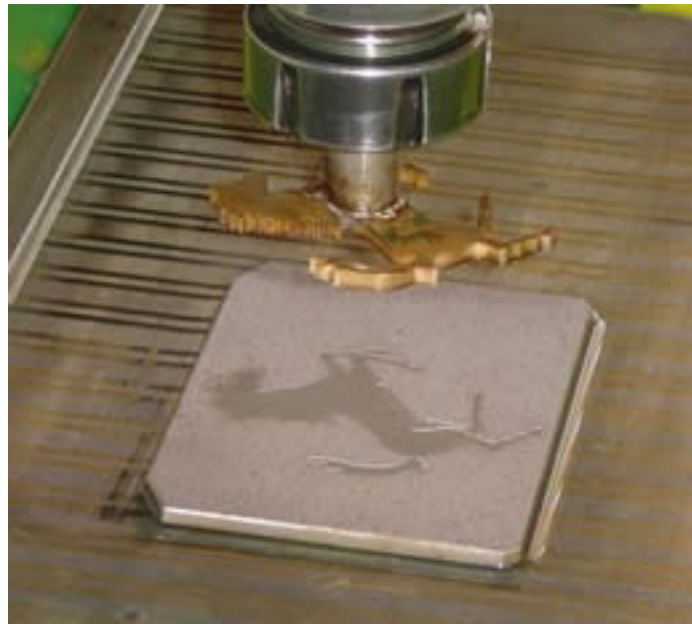


Abbildung 5.3: Beispiel für Senkerosion [83]

In Abbildung 5.3 ist das Einbringen eines Firmenlogos in Metall als Beispiel für Funkenerosion angeführt.

| <b>Kennwert</b>   | <b>Zahlenwert</b> |
|---|-------------------|
| Abtragrate bei Feinschichtqualität [mm <sup>3</sup> /min] | <5                |
| Abtragrate bei Vorbearbeitung [mm <sup>3</sup> /min]      | 400               |
| Arbeitsspalt [μm]   | bis 4             |
| Arithmetischer Mittenrauwert Feinschichten [μm]           | 0,5 – 0,8         |
| Arithmetischer Mittenrauwert Schichten [μm]               | 0,8 – 3           |
| Arithmetischer Mittenrauwert Schruppen [μm]               | >3                |
| Maximale Werkstückabmessung [mm]                          | 1700 x 1000 x 500 |
| Maximaler Konwinkel [°]                                   | 30                |
| Vorschubgeschwindigkeit [μm/s]                            | 1                 |

Tabelle 5.1: Kennwerte des EDM-Verfahrens

## 5.2 Lasermikrobearbeitung [4]

Im Allgemeinen wird der Materialabtrag durch Beschuss mit gepulster Laserstrahlung als Ablation bezeichnet. Durch diese Verfahren ist es möglich, sehr präzise dreidimensionale Oberflächenstrukturen herzustellen. Zur Herstellung von 3D-Strukturen werden zwei unterschiedliche Arten von Lasern verwendet: Excimer- und Festkörperlaser. Der Unterschied besteht darin, dass der Excimerlaser zu photochemischen und der Festkörperlaser zu thermischen Wechselwirkungen führt. In diesem Zusammenhang wird der Materialabtrag des Excimerlasers auch kalter Abtrag genannt. Im Zusammenhang mit Laserbearbeitung sind einige wichtige Kennwerte und Mechanismen vorab zu klären.

### 5.2.1 Excimerabtrag [4]

Der Excimer-Laser (Abk. von excited dimer) gehört der Gruppe der Gaslaser an, das heißt, es wird ein Gas als laseraktives Medium verwendet. Wie eingangs erwähnt, basiert der Materialabtrag durch die geringe Wellenlänge (im ultravioletten Bereich) bei diesem Verfahren auf photochemische Wechselwirkungen, durch die die metallischen Bindungen des zu bearbeitenden Werkstücks aufgebrochen werden und das gelöste Material mittels laseraktiven Gas aus der Bearbeitungszone herausgeschleudert wird.

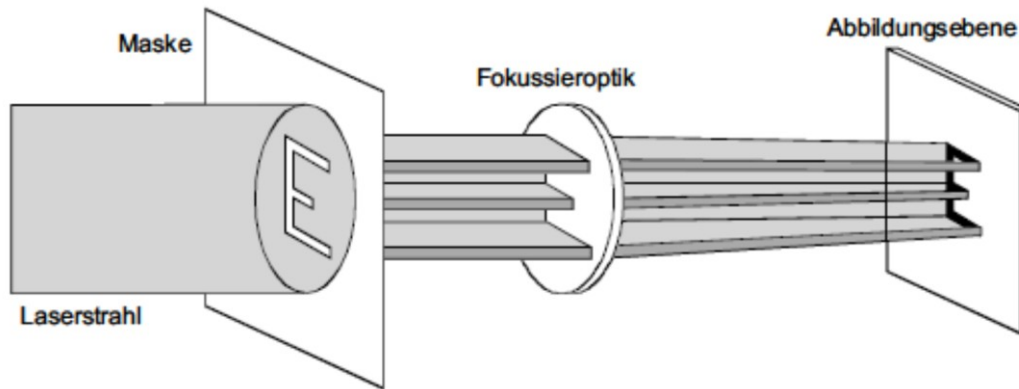


Abbildung 5.4: Aufbau des Excimer-Lasers [4]

In Abbildung 5.4 ist der Ablauf des Excimer-Laserns dargestellt. Der Strahl des Lasers trifft zuerst auf eine Maske, die die Form der abzubildenden Struktur beinhaltet. Mittels dieser Schablone wird das Muster vorgegeben. Zur Erzeugung feinerer Strukturen wird der Strahl durch eine optische Einheit geleitet und somit fokussiert.

#### Vorteile:

- Kaum thermische Beeinflussung
- Kaum Restmaterial an Bearbeitungsstelle

#### Nachteile:

- Geringer Abtrag und geringe Abtragstiefen, auch bei sehr hoher Pulswiederholungsrate
- Unflexibel, da Masken müssen für jede Struktur speziell angefertigt werden
- Hohe Reparaturkosten und Anfertigungskosten der Masken
- Hohe Anschaffungs- und Unterhaltungskosten des Lasers

Für die Excimer-laser gilt überdies folgende Einschränkung: Durch die kurze Wellenlänge (z.B. KrF  $\lambda$ : 248 nm) wird dieser Laser nur für spezielle Anwendungen, Belichtung von Lithographie, Galvanik und Abformungs-Fotolacken und weniger zur direkten Strukturierung von Oberflächen, eingesetzt.

### 5.2.2 Sublimationsabtrag [4, 51, 52]

Das Sublimationsverfahren ist das am häufigsten eingesetzte Lasermaterialabtragverfahren. Dabei wird ein paraboloidförmiger Materialabtrag durch gepulste, fokussierte Laserstrahlung erzeugt. Durch die hohen Pulsspitzenleistungen wird der Materialabtrag bei abtragen direkt sublimiert.

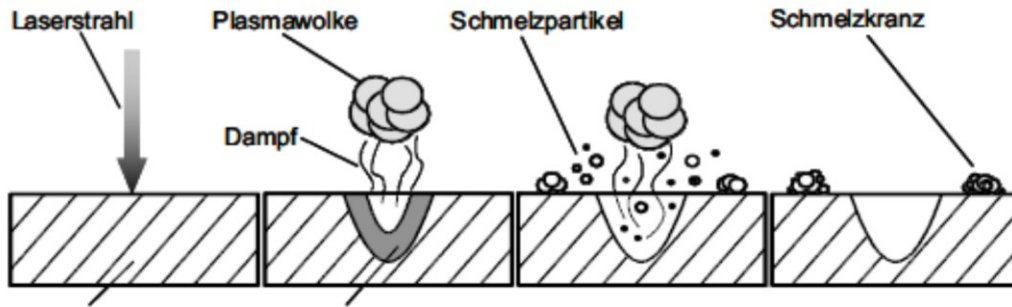


Abbildung 5.5: Darstellung des Sublimationsabtrages [4]

Der einzelne Materialabtrag sieht napfförmig aus und gleicht dem Negativ der Laserstrahlform. Durch Mehrfachpulsung bzw. mehreren Pulsen aufeinanderfolgend können sehr komplizierte geometrische Strukturen bzw. flächiger Abtrag realisiert werden.

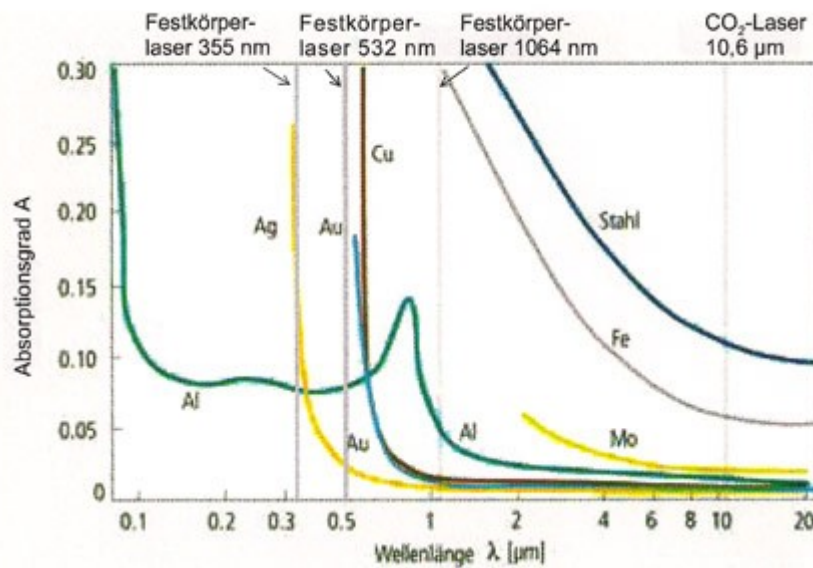


Abbildung 5.6: Absorptionsgrad über Wellenlänge [36]

Trifft ein Laserstrahl auf die Oberfläche eines Metalls, dann tritt er in Wechselwirkung mit dem sogenannten Elektronengas: ein bestimmter Teil des Laserlichts wird absorbiert und kann mit dem Material wechselwirken. Der Rest des Lichts wird reflektiert. Der Absorptionsgrad nimmt Werte zwischen 0 und 1 an.

Einige Materialien absorbieren Laserstrahlen besser, andere weniger gut (Abbildung 5.6).

Der Laserstrahl wird durch ein Linsensystem auf dem Werkstück fokussiert und in der randzonennahen Oberfläche kommt es zu einer Umsetzung der Laserstrahlenenergie in thermische Energie. Der Wirkungsgrad der Laserenergie wird direkt von den Absorptionseigenschaften des Materials bestimmt. Wenn die Strahlenintensität ausreichend hoch ist, kommt es zu einer direkten Umwandlung von fester Phase in gasförmige Phase und durch den entstehenden Gasdruck wird das Material aus der Bearbeitungszone geschleudert.

Der Absorptionsgrad ist wiederum abhängig von Material, Wellenlänge und Einfallswinkel des Laserlichts, sowie der Oberflächenbeschaffenheit des Materials. [4]

Durch Verringerung der Pulslänge und des Fokussdurchmessers bzw. durch Vergrößerung der Laserleistung kann Strahlenintensität vergrößert werden. Der Fokussdurchmesser hat Einfluss auf die erzielbare Struktur und kann nicht verändert werden, die Laserleistungserhöhung ist oftmals nicht so einfach, daher werden kurze Pulslängen (fs – ps Bereich) eingesetzt.

Kennwerte:

- Bearbeitungsgeschwindigkeit: bis 3 m/s
- Je nach Lasersystem bis zu 100.000 Einzellaserpulse pro Sekunde
- Minimale Strukturgrößen zwischen 5 und 10  $\mu\text{m}$

Sublimationsabtrag wird vor allem im Werkzeug- und Formenbau zur Erzeugung funktionaler Oberflächen (v.a. bei Gravieren von Formen von Kunststoffspritzguss, wo Mikroerodieren und Mikrofräsen an Grenzen stoßen) eingesetzt.

Die wichtigsten Prozessparameter lauten Laserstrahlintensität (z.B. für Eisen (Fe)  $> 3,4 \cdot 10^9 \text{ W/cm}^2$ ), Wellenlänge (Grundwellenlänge 1064 nm, durch Frequenzmodulation änderbar) und Pulslänge (bis 5 ns und länger).

In Bezug auf die Prozessparameter sind höhere Strahlenintensitäten anzustreben, da dadurch weniger Schmelzrückstände am Strukturrand (Abbildung 5.5) zurückbleiben bzw. fast gänzlich vermieden werden können. Die Pulslänge wird klein gewählt, um die großflächige Beeinflussung des zu bearbeitenden Werkstückes zu vermeiden und durch Frequenzmodulation können auch andere Werkstoffe wie Glas, Keramik und Polymere bearbeitet werden.

Darüber hinaus zeigen Untersuchungen, dass der Schmelzrückstand fast gänzlich vermieden werden kann, wenn eine Pulslänge im Fempto- oder Picosekundenbereich gewählt wird.

Eingesetzte Laser:

Lampen- und diodengepumpte Festkörperlaser wie z.B. Nd:YAG (Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Laser) haben den Vorteil, dass sie im Pulsmodus betrieben werden und damit die nötige Strahlenintensität mit einer Beugungsmaßzahl  $M^2$  von 1 zur Verfügung stellen können.

Die am besten bekannten Anbieter für Anlagen von Laserablationsanlagen für Sublimationsabtrag sind im deutschsprachigen Raum Trumpf Lasertechnik (<http://www.trumpf-laser.com/>), GF Agie Charmilles (<http://www.gfac.com/>) und Kugler GmbH (<http://www.kugler-precision.com/>).

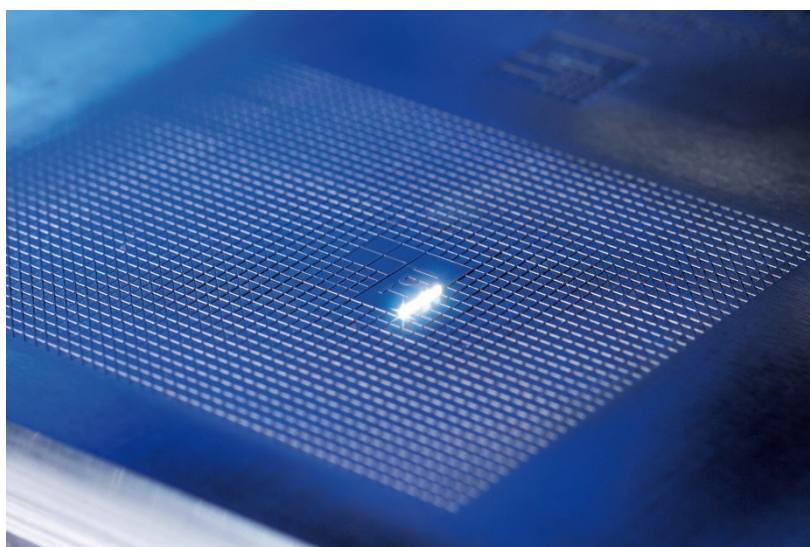


Abbildung 5.7: Mikrostrukturierung mittels Laser [84]

Abbildung 5.7 zeigt die Mikrostrukturierung einer metallischen Oberfläche mittels Sublimationsabtrag.

| <b>Kennwert</b>                                 | <b>Zahlenwert</b> |
|---|-------------------|
| Arithmetischer Mittenrauwert [ $\mu\text{m}$ ]  | 1                 |
| Bearbeitungsgeschwindigkeit [m/s]               | bis 3             |
| Beugungszahl                                    | 1                 |
| Einzellaserpulse pro Sekunde                    | bis 100.000       |
| Maximales Aspektverhältnis                      | 10                |
| Minimale Strukturgröße [ $\mu\text{m}$ ]        | 5 – 10            |
| Pulslänge [ $\mu\text{m}$ ]                     | $5 \cdot 10^{-3}$ |
| Strahlungsintensität [ $\text{W}/\text{cm}^2$ ] | $3,4 \cdot 10^9$  |

Tabelle 5.2: Kennwerte des Sublimationsabtrags

## 6 Kombination von Wirkmechanismen

In den Kapitel 2 bis 5 wurden die industriell verwendeten Verfahren genannt, mit denen Mikrostrukturen in bzw. in Sonderfällen (LiGA, Sol-Gel-Verfahren) auf metallischen Oberflächen erzeugt werden können. Die Anforderungen für bestimmte Anwendungsfälle von Bauteilen können nicht zur vollständigen Befriedigung von einem Mechanismus bedient werden. Aus diesem Grunde kombiniert man verschiedene Wirkmechanismen des Materialabtrags um ein eigenes Verfahren zu gestalten. Zwei bekannte Vertreter dieser Technologiekombinationen sind LiGA und ECDM. LiGA ist eine Abkürzung für die chronologischen Verfahrensschritte Lithographie, Galvanik und Abformung. ECDM steht für Electro Chemical Discharge Machining und ist eine Kombination aus ECM und EDM, um die jeweiligen Nachteile dieser Verfahren zu eliminieren.

### 6.1 Lithographie, Galvanik, Abformung [52, 53, 56, 57]

Die Kombination aus Lithografie, Galvanik und Abformung (kurz LiGA) wurde Ende der 1970er Jahren in Deutschland am damaligen Kernforschungsinstitut Karlsruhe (heute Karlsruher Institut für Technologie KIT) von einem Forschungsteam unter der Leitung von Erwin Willi Becker im Rahmen der Forschung am Trenndüsen zur Urananreicherung entwickelt. Die Arbeitsschritte müssen nicht immer bis zur Abformung aus Kunststoff fortgesetzt werden, da man für metallische Mikrostrukturen nur Lithographie und Galvanik benötigt.

Mit diesem Verfahren können Mikrostrukturen durch eine einmal hergestellte Primärstruktur durch Galvanik und Abformung sehr rasch vervielfältigt werden. Dadurch ergibt sich für dieses Verfahren eine sehr große Materialvielfalt wie z.B. Keramiken, Polymeren und Metallen. Grundsätzlich kann unter mehreren verschiedenen LiGA-Variationen unterschieden werden: Röntgen-, UV- und Laser-LiGA. Der Unterschied besteht darin, wie die Primärstruktur in dem Resist erzeugt wird: Röntgen-LiGA nutzt Röntgenstrahlung aus einem Synchrotron<sup>2</sup>, UV-LiGA ultraviolettes Licht und Laser-LiGA Laserstrahlung, um die Struktur in den Resist (meist Polymethylmethacrylat, kurz PMMA) einzubringen.

Diese Verfahren werden jedoch meist dazu genutzt, miniaturisierte Bauteile mit Mikrostrukturen herzustellen und sind nicht für großflächige Mikrostrukturierungen anwendbar. Die Kennwerte, die in Tabelle 6.2 aufgezählt werden, beziehen sich ausschließlich auf das häufiger verwendete Verfahren der Röntgen-LiGA. Der Hauptunterschied zwischen den unterschiedlichen Variationen besteht darin, dass mittels UV-LiGA wesentlich günstigere, aber auch viel ungenauere Strukturen hergestellt werden können. Als Werkstoffe können Gold, Silber, Platin, Nickel, hochfeste und unmagnetische Nickellegierungen verwendet werden.

Die Herstellung der Masken ist extrem teuer und in Tabelle 6.1 aufgelistet.

---

<sup>2</sup> Teilchenbeschleuniger

| <b>Maske</b>                          | <b>Kosten</b> |
|---------------------------------------|---------------|
| Berylliumträger für Röntgen-Maske [€] | 9000          |
| Titanträger für Röntgen-Maske [€]     | 6000          |
| UV-Maske [€]                          | 500           |

Tabelle 6.1: Kostenüberlick für LiGA-Masken [56]

Vorteile:

- Sehr hohes Aspektverhältnis, je nach Struktur bis zu 50-500 und Oberflächenqualität im Submikrobereich
- Strukturhöhen bis zu 3mm
- Große Metallpalette: Metalle, Kunststoffe und Keramiken

Nachteile:

- Zwingend: Direktbelichtung mit 1:1 Maske
- Herstellung von 1:1 Masken ist sehr teuer
- Erst ab sehr großen Stückzahlen wirtschaftlich

Ein bekannter Anbieter für Mikrozahnräder mittels LiGA-technologie ist Micromotion GmbH (<http://www.mikrogetriebe.de/>).

| <b>Kennwert</b>                                | <b>Zahlenwert</b> |
|--|-------------------|
| Arithmetischer Mittenrauwert [ $\mu\text{m}$ ] | 0,03              |
| Flankenwinkel [ $^\circ$ ]                     | fast 90           |
| Maximale Strukturhöhen [mm]                    | 3                 |
| Maximales Aspektverhältnis                     | 50 – 500          |
| Minimale Dimension [ $\mu\text{m}$ ]           | 0,2               |

Tabelle 6.2: Kennwerte LiGA

### 6.1.1 Röntgen-Lithographie, Galvanik, Abformung [53, 54, 56, 57]

In Abbildung 6.1 ist der Ablauf der Röntgenlithographie dargestellt. Im ersten Bearbeitungsschritt wird mittels Bestrahlung die Struktur mit Hilfe eines Absorbers und einer Maskenmembran in den Resist eingebracht (a). Das Ergebnis dieser Bearbeitung ist im nächsten Abschnitt von Abbildung 6.1 (b) ersichtlich. Nach der Erstellung des Positivresists aus Polymer wird die metallische Struktur durch Galvanik erzeugt. Mittels Abformung in Polymere können weitere Vorlagen für die Galvanik erzeugt werden. Ein großer Vorteil ist die kurze Wellenlänge von 0,2 bis 2 nm, dadurch sind jegliche Beugungseffekte vernachlässigbar. Beugungseffekte mindern die Qualität der erzeugbaren Struktur.



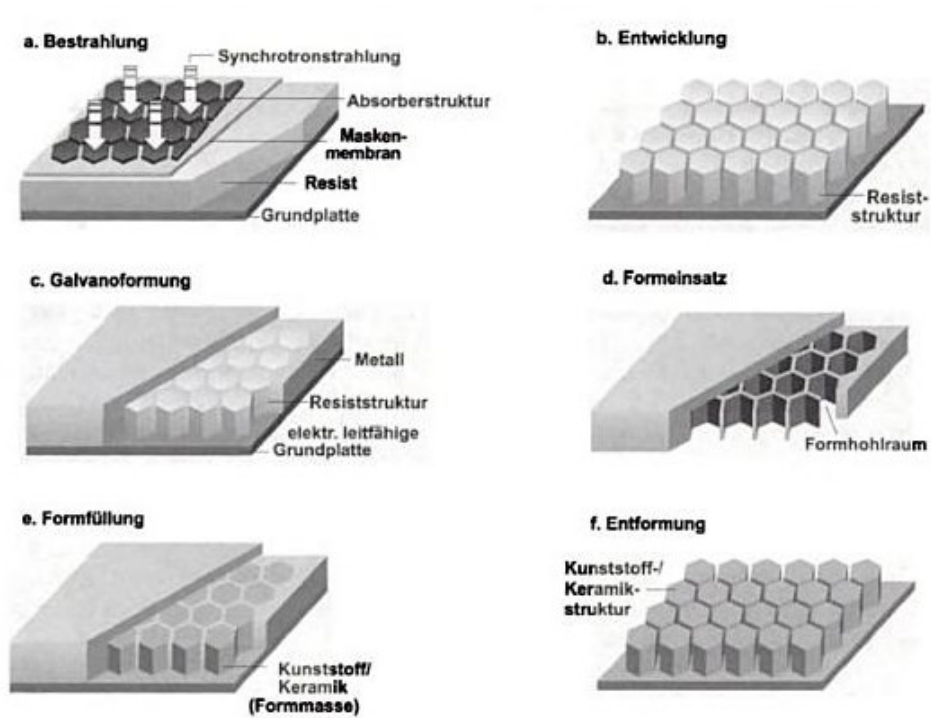


Abbildung 6.1: Schematische Darstellung des Verfahrens Röntgen-LiGA [53]

Die für Synchrotronstrahlung transparenten Arbeitsmasken der LiGA-Technologie bestehen zumeist aus Beryllium (500  $\mu\text{m}$  dick) oder aus Diamant (5-10  $\mu\text{m}$  dick) und tragen die etwa 5-40  $\mu\text{m}$  dicken Absorberschicht aus Gold.

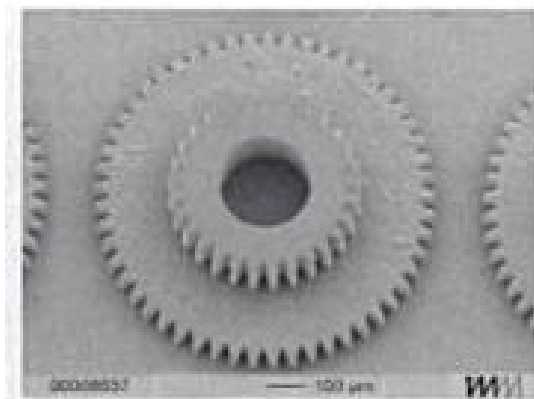


Abbildung 6.2: Stufenzahnrad eines Mikrogetriebes [53]

Mittels Röntgen-LiGA werden unter anderem Stufenzahnräder für Mikrogetriebe gefertigt (Abbildung 6.2).

Vorteile:

- Durch parallele Synchrotronstrahlung können Strukturen bis 1 mm Tiefe mit guter Flankentreue abgebildet werden
- Bis zu 3 mm Strukturhöhe möglich
- Sehr hohe Aspektverhältnis von 50 – 500
- Geringe Wellenlänge

Nachteile:

- Zwingende Direktbelichtung mit 1:1 Maske
- Maskenherstellung ist sehr teuer
- Wenig Strahlungsquellen verfügbar

### 6.1.2 UV-Lithographie, Galvanik, Abformung

UV-LiGA unterscheidet sich von Röntgen-LiGA dahingehend, dass Fotolack wie z.B. SU8 zur Herstellung der Primaärstruktur und statt Röntgenstrahlung ultraviolette Strahlung verwendet wird. Mit diesem Verfahren können deutlich günstigere metallische Mikrostrukturen als mit Röntgen-LiGA hergestellt werden, jedoch erschließt die Genauigkeit dieses Verfahrens nicht den sub- $\mu\text{m}$ -Bereich.

Der SU8 Fotolack wird durch Schleudern auf das Material aufgebracht und dann einer „Softbake“-Behandlung unterzogen. Softbake dient zur Verbesserung der Lackhaftung und Verhinderung von Blasenbildung.

Nachteilig bei diesem Verfahren ist neben der kleineren möglichen Aspektverhältnisse (maximal 10) im Vergleich zum Röntgen-LiGA auch das Einbringen von hohem Stress durch die „Softbake“-Behandlung

### 6.1.3 Laser-Lithographie, Galvanik, Abformung

Eine weitere Variation der Lithographie, Galvanik, Abformung stellt die Laser-LiGA dar. Bei diesem Verfahren wird die Primärstruktur mittels Laserablation (Excimer-Laser) in ein Polymer eingebracht. Die restlichen Verfahrensschritte folgen demselben Schema wie in Abbildung 6.1. Dieses Verfahren hat weder schnelle Prozesszeiten, noch hohe Präzision, jedoch können damit äußerst komplizierte Strukturen geschaffen werden, die sich mittels Röntgen- und UV-Strahlung nicht realisieren lassen.

## 6.2 Electro Chemical Discharge Machining [49]

Electro Chemical Discharge Machining (kurz ECDM) ist eine Kombination aus den schon behandelten Verfahren ECM (Kapitel 2.1) und EDM (Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Diese Kombination wurde eingeführt, um zwingend aufeinanderfolgende Bearbeitung mit ECM und EDM in einen Schritt zusammenzufassen und die Arbeitsfolge zu vereinfachen. Daher ist ECDM immer einer separaten aufeinanderfolgenden Bearbeitung mit ECM und EDM vorzuziehen. Der große Vorteil liegt darin, dass nur eine Elektrode, eine Flüssigkeit und ein Generator notwendig sind.

Wie in den jeweiligen ausgeführt, findet ECM in einer elektrolytischen Lösung und EDM in einem Dielektrikum statt und somit kommt dem Medium eine sehr große Bedeutung zu. Das Medium muss gleichzeitig für Funkenentladung und anodischer Metallauflösung geeignet sein. Ein solches Lösungsmittel wird von der Firma Basler Swisslube vertrieben und die Produktbezeichnung lautet P16-35. Es ist ein vollsynthetisches Konzentrat, das in einer 3 prozentigen Lösung mit deionisiertem Wasser genutzt wird.

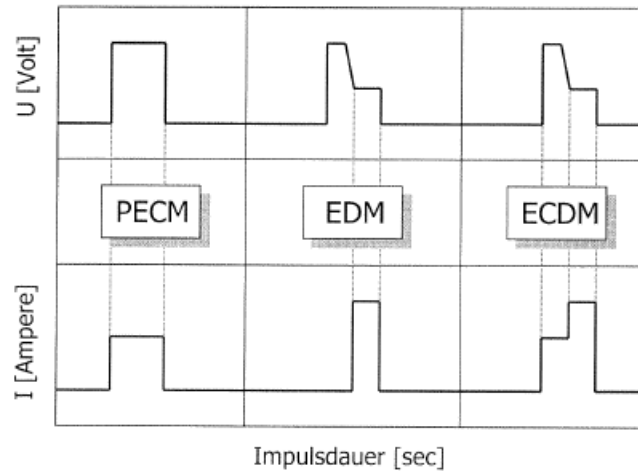


Abbildung 6.3: Vergleich PECM, EDM und ECDM [49]

In Abbildung 6.3 werden die Spannungs- und Stromverläufe von PECM, EDM und ECDM gegenübergestellt. Anstelle von ECM wird zum Vergleich PECM herangezogen, da EDM und ECDM aus thermischen Gründen gepulste Vorgänge sind und konventionelle ECM-Bearbeitung ungepulst durchgeführt wird. Anhand des Stromverlaufs ist die Zündverzögerung von EDM im Stromverlauf sichtbar. Wenn nun die Verläufe von PECM und EDM addiert werden, wird ersichtlich, dass ECM immer dann auftritt, wenn es im EDM zu einer Zündverzögerung kommt.

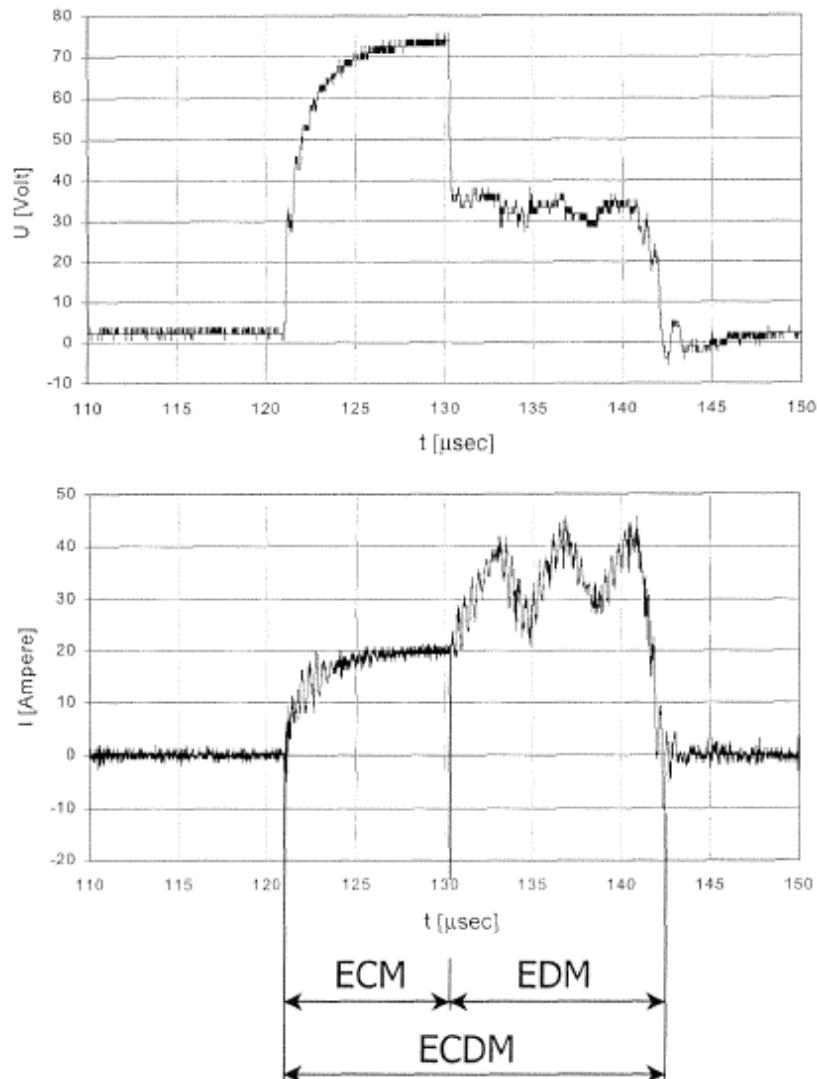


Abbildung 6.4: Reale Spannungs- und Stromverläufe ECDM [49]

In Abbildung 6.4 sind reale Spannungs- und Stromverläufe für die ECDM Bearbeitung dargestellt. Zum Ablauf dieses Prozesses muss eine Leerlaufspannung angelegt sein, damit an der metallischen Anode Metallionen abgebaut werden können. Nach einer gewissen Zündverzögerung, die hier der ECM-Bearbeitungszeit von ca. 10 Mikrosekunden entspricht, bricht die Leerlaufspannung von vormals 75 auf 30 Volt zusammen. In weiterer Folge bildet sich ein Plasmakanal und der weitere Ablauf dieses Vorganges entspricht der EDM-Bearbeitung (Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Der gesamte Vorgang des ECDM lässt sich somit in 3 Bereiche unterteilen: ECM-Auflösungsphase, EDM-Entladephase und Abbauphase.

Dieses Verfahren wird hauptsächlich zum Abrichten von Schleifscheiben verwendet. Bei diesem Vorgang wird ECM zum Schärfen und EDM zum Profilieren angewandt und durch die Verschmelzung der beiden Verfahren können Zeit und Ressourcen gespart werden.

Einer der bekanntesten Anbieter dieses Fertigungsverfahrens ist GFH GmbH (<http://www.gfh-mbh.de>), die es vor allem dazu nutzen, um kleine Bohrungen für die Einspritztechnik herzustellen.

## 7 Innovationspotentiale

In diesem Kapitel werden Verfahren erläutert, die noch nicht vollständig serienreif sind bzw. deren Entwicklung von etablierten Forschungseinrichtungen als vielversprechend für die Zukunft angesehen werden. Jedoch wurden einzelne Verfahren – wie z.B. structoGUSS – die nach deren Ankündigung und Entwicklung aus unterschiedlichen Gründen wieder von der Bildfläche verschwunden sind, nicht näher ausgeführt. Zu den Verfahren in diesem Kapitel 7 wurden nur dann nähere Kennwerte angegeben, wenn diese bereits durch Forschung bestätigt wurden.

### 7.1 Direkte Laserinterferenzstrukturierung [58, 59, 60]

Das Laserbearbeitungsverfahren DLIP – kurz für Direct Laser Interference Patterning (dt. direkte Laserinterferenzstrukturierung) – ist ein vom Fraunhoferinstitut IWS in Dresden entwickeltes Bearbeitungsverfahren zum Einbringen von Mikrostrukturen auf großen Flächen. Das Verfahren wurde erstmals auf der Lasermesse World of Photonics im Mai 2011 in München vorgestellt.

In Abbildung 7.1 ist das Prinzip der Laserinterferenzstrukturierung anhand zweier Laser dargestellt. Durch das Überlagern mindestens zweier Laserstrahlen wird ein Intensitätsmaximum erzeugt und es kann ein sehr kleiner Bereich, sehr genau bearbeitet werden. Als Laser werden für dieses Verfahren hauptsächlich gütegeschaltete Nd:YAG-Laser überlagert.

Mit diesem Verfahren wird das großflächige Mikrostrukturieren auf ebenen und gekrümmten Flächen angestrebt.

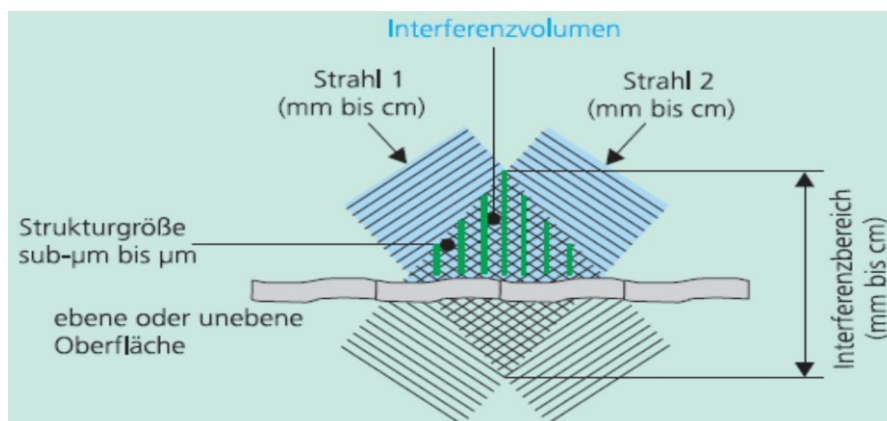


Abbildung 7.1: Interferenz zweier Laser [59]

Vorteil gegenüber konventioneller Lasermaterialbearbeitung:

- Schneller als Sublimationsabtragen (sequentiell)
- Flexibler als Excimerabtrag (Maskentechnik)

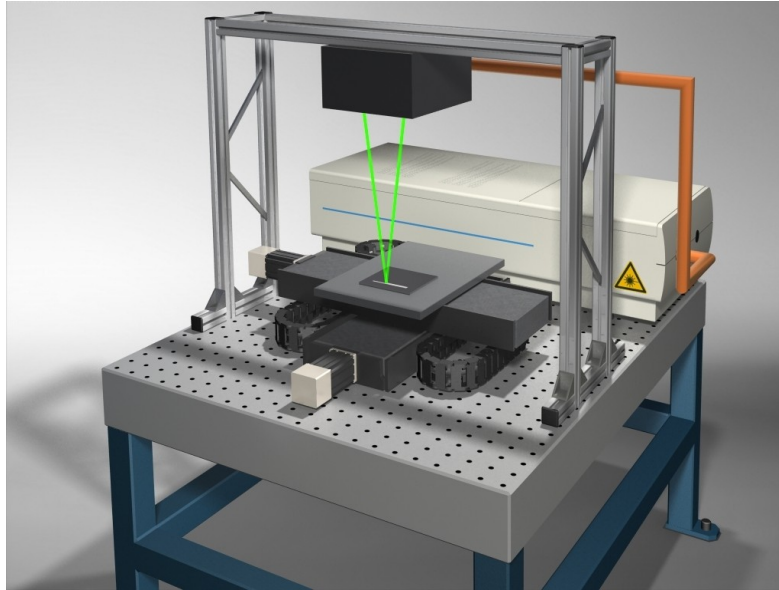


Abbildung 7.2: DLIP [58]

Die Hitze wird bei diesem Verfahren auf einem sehr kleinen Bereich lokal aufgebracht, wie jenes Beispiel aus der Forschung belegt: Auf einem Zehntel Haaresbreite Wolfram wird Material lokal mit fast 4000°C geschmolzen und direkt daneben (5 Tausendstel Millimeter) bleibt das Material praktisch unverändert. Das Verfahren (Abbildung 7.2) wird hauptsächlich über die Pulsenergie und Wellenlänge gesteuert und als Einsatzgebiet wird die Medizintechnik und Tribologie angedacht.

| <b>Kennwert</b>                                | <b>Zahlenwert</b>               |
|--|---------------------------------|
| Ausgangsleistung [W]                           | von 2 (266 nm) bis 25 (1064 nm) |
| Bearbeitbare Flächen [cm <sup>2</sup> ]        | <1                              |
| Bearbeitungsgeschwindigkeit [cm <sup>2</sup> ] | 1 bis 100                       |
| Pulsbreite [s]                                 | 10*10 <sup>-6</sup>             |
| Pulswiederholungsrate [Hz]                     | 10                              |
| Strukturgröße [µm]                             | 180*10 <sup>-3</sup> bis 20     |
| Wellenlänge [nm]                               | 1064, 532, 355 und 266          |

Tabelle 7.1: Kennwerte des DLIP-Verfahrens

## 7.2 Sprengprägen [61]

Die Entwicklung des Sprengprägens hat mehrere Beweggründe. Zum einen ist es das Ziel, umweltschädliche, aufwändige galvanische und ätztechnische Verfahren zur Erzielung von strukturierten Oberflächen zu ersetzen und zum anderen wird dieses Verfahren zum Kampf gegen Produktpiraterie – vorwiegend aus China – eingesetzt.

Der Ablauf dieses Verfahrens findet wie folgt statt: das einzuprägende Objekt (Abbildung 7.3) auf die Metalloberfläche gelegt, mit einer dünnen Sprengfolie bedeckt und gezündet. Die Struktur des Laubblattes wird durch den hohen Druck in die Metallplatte geprägt. Der große Nachteil dieses Verfahrens liegt darin, dass die Vorlage bei jeder Sprengung zerstört wird und eine neue Vorlage für jeden Sprengvorgang zur Verfügung gestellt werden muss.

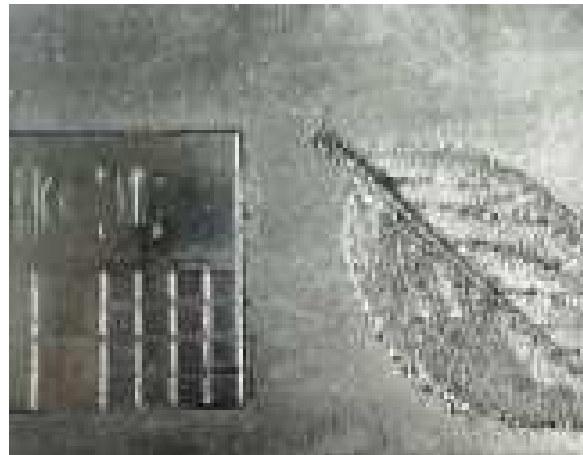


Abbildung 7.3: Sprengprägen – Laubblatt [86]

Die andere Anwendung ist das Einsprengen von Hologramm um Produktpiraterie und Technologiediebstahl zu verhindern. Dabei wird wie in Abbildung 7.4 dargestellt, anstelle des zu prägenden Objekts eine holografische Prägevorlage verwendet.

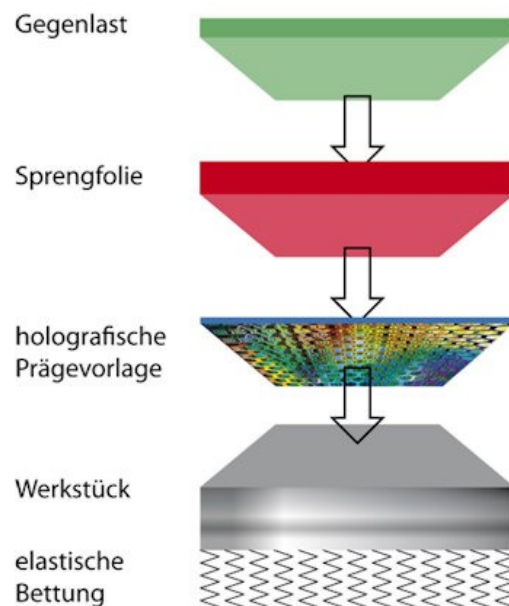


Abbildung 7.4: Hologramm durch Sprengprägen [87]

Sprengprägen ist besonders für kleine Flächen bis ca.  $0,25 \text{ m}^2$  geeignet.

### 7.3 Riblet-Walzen [64, 65, 73]

Der Paläontologe Ernst Reif wies in den 1980er Jahren den Riblet-Effekt nach, der es den Haifischen ermöglicht, den Reibungswiderstand an der Hautoberfläche zu verringern. Diese mikroskopisch kleine Rippenstruktur erstreckt sich über die gesamte Hautoberfläche des Hais und erzeugt viele kleinere Wasserwirbel, die die seitlich gerichteten Kräfte der turbulenten Strömung herabsetzen und somit den Reibungswiderstand verringern. Dieser Effekt ist nur beim schnellen Schwimmen nützlich.

Die Erzeugung von Riblet-Kunststofffolien, die auf die Metalloberfläche geklebt werden, ist schon lange möglich. Jedoch birgt diese Variante viele Nachteile: Kunststofffolien haben eine

geringere thermische und mechanische Beständigkeit (z.B. Einsatz in der Luftfahrt) und erhöhen das Bauteilgewicht. Dadurch wird daran geforscht, Riblet-Strukturen direkt in die Oberfläche einzubringen.

Diese Strukturen werden hauptsächlich für Verdichterschaufeln (gehärteter Stahl und Titan) und Flugzeugverkleidungen (Aluminium) hergestellt und da sich diese beiden Werkstoffe in der Bearbeitung sehr stark unterscheiden, wurden zwei unterschiedliche Verfahren entwickelt. Laut den Berechnungen des aerodynamischen Instituts sind für Flugzeugoberflächen Strukturen von 40 µm Höhe und 100 µm Abstand notwendig. Aufgrund der immensen Fläche der zu walzenden Flugzeugverkleidung wurde das sogenannte MicroWIND-Verfahren (Abbildung 7.5) entwickelt. Dabei kommt eine Drahtwalze zum Einsatz, die mit einem Stahldraht mit geringem Durchmesser Schulter an Schulter aufgerollt wird und dann als Walze fungiert.

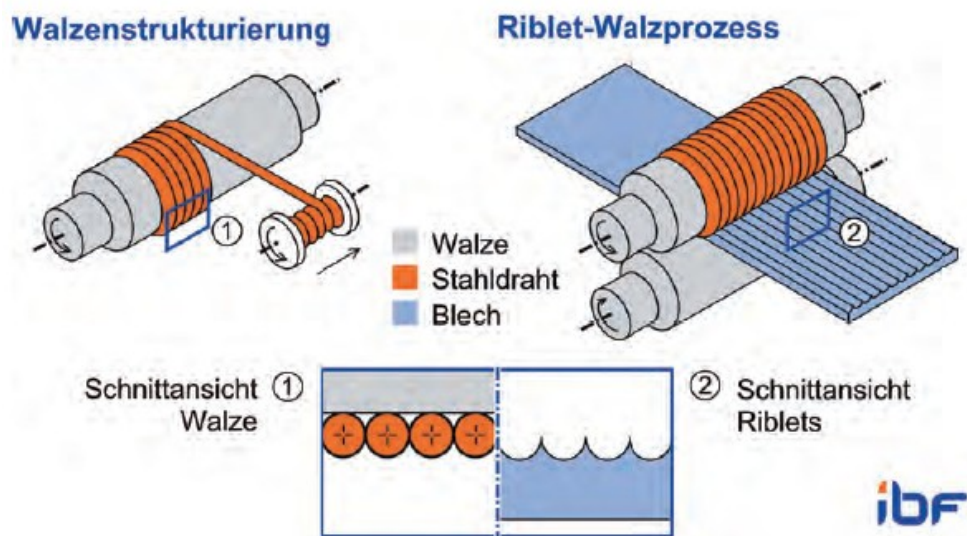


Abbildung 7.5: MicroWIND.Prozess [73]

Das Ergebnis der erreichbaren Strukturen ist in Abbildung 7.6 ersichtlich.

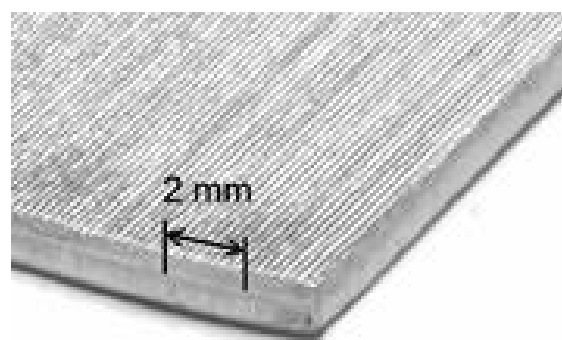


Abbildung 7.6: Riblet-Struktur [72]

Beim Walzen von Triebwerksschaufel (z.B. aus Ti6Al4V) wird durch das Einbringen von Kerben – die Riblet-Struktur entspricht vielen kleinen Kerben – die Dauerfestigkeit erniedrigt und das darf bei Sicherheitsbauteilen nicht passieren. Ein weiterer erschwerender Faktor ist die gekrümmte Geometrie der Schaufeln.

Die Lösung für dieses Problem bringt das Verfahren des inkrementellen Walzens, mit dem Druckeigenspannungen im Kerbgrund eingebracht werden. Die Walzen bekommen ihre



Struktur durch Zerspanung. Am Ende lässt sich eine Riblet-Struktur mit einer Höhe von 35  $\mu\text{m}$  und einem Abstand von 70  $\mu\text{m}$  Bahn für Bahn gewalzt realisieren.

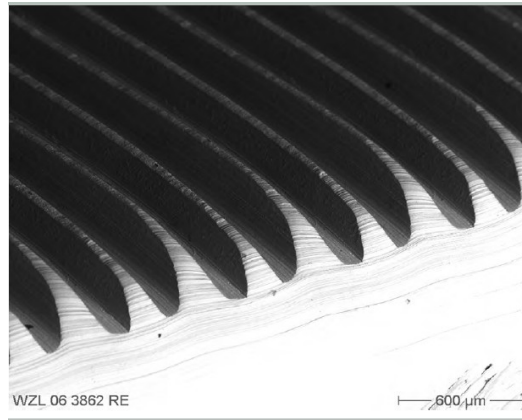


Abbildung 7.7: Verdichterschaufel mit Riblet-Struktur [73]

Auf diesem Gebiet gehört das Institut für biegsame Formgebung der RWTH Aachen (<http://www.ibf.rwth-aachen.de/>) zu den bekanntesten Forschungsinstitutionen.

#### 7.4 Mikro-Metallpulverspritzgießen [66, 67, 68, 69]

Das Verfahren des Mikro-Metallpulverspritzgießens (kurz  $\mu\text{MIM}$  für micro-metal injection moulding) wird am Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnologie und Angewandte Materialforschung IFAM erforscht und es wird versucht, dieses Verfahren für großflächige metallische Mikrostrukturen zu adaptieren.

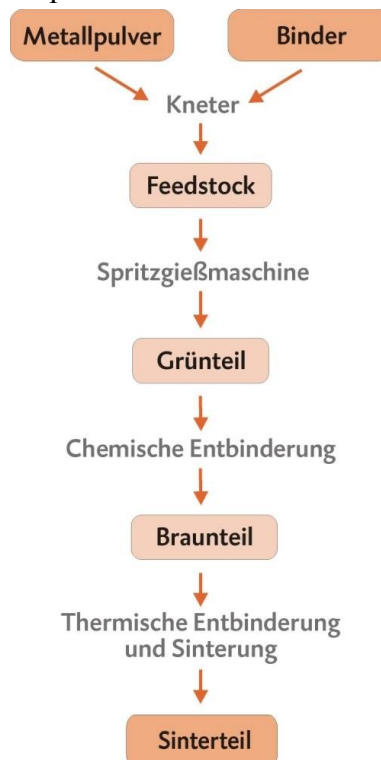


Abbildung 7.8: Prinzip des MIM-Verfahrens [67]

Im Grunde stellt dieses Verfahren (Abbildung 7.8) eine Miniaturisierung des gewöhnlichen MIM-Verfahrens dar. In diesem Fall wird sehr feines Pulver mit einer Partikelgröße um 5  $\mu\text{m}$

mit einem speziellen Binder vermischt und geknetet. Das Ergebnis dieses Mischvorgangs wird Feedstock genannt. Im nächsten Schritt wird dieser Feedstock in eine Spritzgießmaschine geschickt und es entsteht ein Grünteil, der mittels chemischen Entbinder und Sinterung zum Sinterteil wird. Der Formteil, in den der Feedstock eingespritzt wird, wird mittels Laserbearbeitung, Mikroerodieren, Mikrozerspanung oder LiGA hergestellt. Zum heutigen Tag können am Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnologie und Angewandte Materialforschung Strukturen mit 10 µm und einem Aspektverhältnis von 16 aus Edelstahl, Eisen, Hartmetall, Kupfer oder Wolfram-Kupfer realisiert werden.



Abbildung 7.9: Mikrozahnrad mit µMIM [85]

Das Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnologie IFAM (<http://www.ifam.fraunhofer.de/>) ist das bekannteste Forschungsinstitut auf diesem Gebiet.

## 8 Messbarkeit von Mikrostrukturen

Für die Herstellung von mikroskopisch kleinen Strukturen werden sehr viele Kosten und Mühen in Kauf genommen und es wird eine sichere und zuverlässige Qualitätskontrolle benötigt. Heute zählen Tastschnittverfahren, Konfokalmikroskopie und Streulichtmesstechnik zu den am häufigsten verwendeten Verfahren der Oberflächenmessung.

### 8.1 Tastschnittverfahren [70, 88]

Beim Tastschnittverfahren (Abbildung 8.1) wird die Oberfläche mit einem Taster – meist eine Diamantnadel – berührend abgefahren. Bei diesem Verfahren erfasst der Taster ausschließlich eine Linie entlang der Oberfläche.

Es lässt sich in folgende Unterverfahren unterteilen: Bezugsflächen- und Kufentastsysteme. Beim Bezugsflächentastsystem wird der Taster auf ein ideal geometrisches System ausgerichtet und der Taster erfasst jegliche Abweichung. Während beim Kufentastsystem ein oder zwei Kufen auf die Oberfläche ausgerichtet werden, die gemessen werden soll.

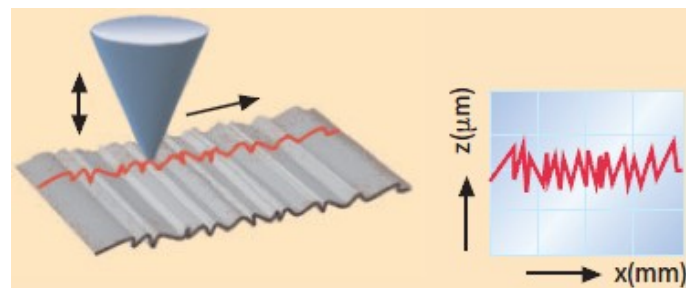


Abbildung 8.1: Tastschnittverfahren [70]

Dabei wird ein Profil ermittelt und mittels einiger Filter und Algorithmen werden Oberflächenkennwerte mit dem großen Anfangsbuchstaben R ausgegeben: arithmetischer Mittenrauwert  $R_a$ , gemittelte Rautiefe  $R_z$  usw.

Die standardisierte Diamantspitze hat einen Winkel von 60 oder 90° und einen Innenradius von 2, 5 oder 10 µm.

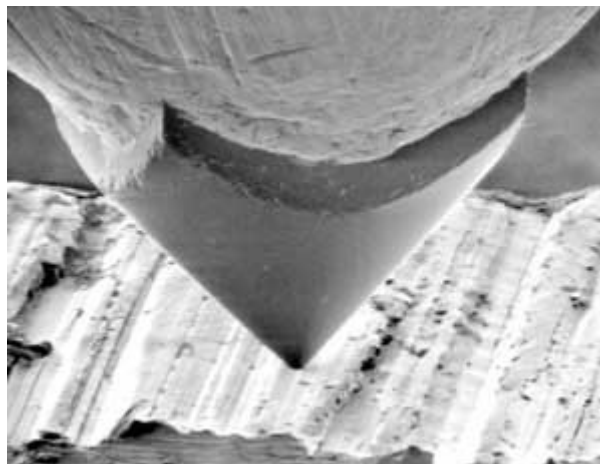


Abbildung 8.2: Aufnahme einer Tastspitze mittels Rasterelektronenmikroskop [74]

Der Vorteil dieses Verfahrens ist die Genauigkeit bei optimal kalibriertem System und die weltweite Vergleichbarkeit der Kennwerte. Der Nachteil liegt darin, dass dieses Verfahren sehr fehleranfällig ist, wenn es direkt in der Fertigung angewandt wird. Das liegt daran, weil es sehr stoßempfindlich ist. Ein weiterer Nachteil dieses System ist die Streuung der Werte bei strukturierten Oberflächen, deswegen wurde die Entwicklung von 3D-Messsystemen forciert.

## 8.2 Konfokalmikroskopie [70, 76, 89]

Die Konfokalmikroskopie stellt ein 3D-Messsystem dar. Es ist möglich eine Fläche von 0,04 bis 1 mm<sup>2</sup> auf einmal zu erfassen. Das zu messende Objekt wird dabei vertikal bewegt, damit alle Ebenen der Mikrostruktur aufgenommen werden können.

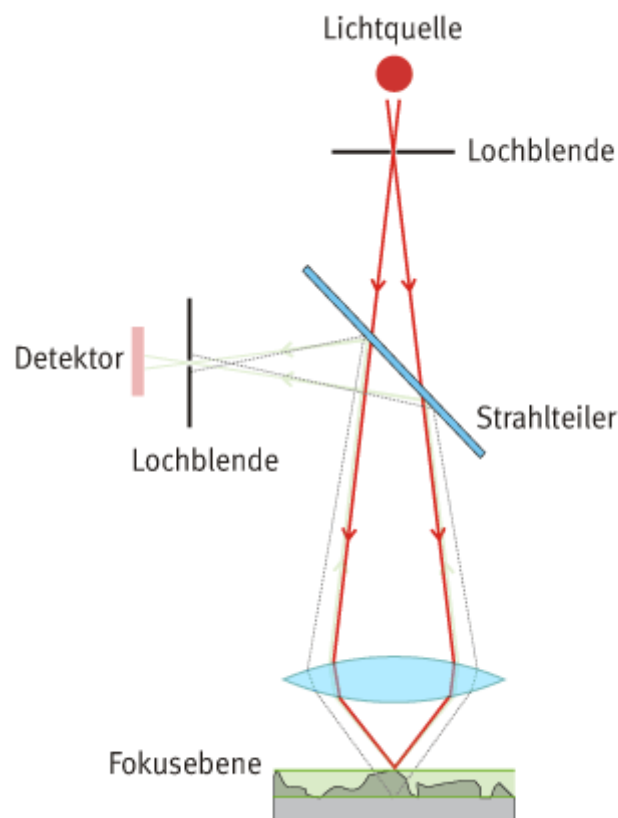


Abbildung 8.3: Prinzip der Konfokalmikroskopie [75]

In Abbildung 8.3 ist das Prinzip der Konfokalmikroskopie dargestellt. Das Licht (Laser) wird in die zu untersuchende Probe fokussiert. Das von der Probe ausgestrahlte Licht wird über das gleiche Objektiv, einen Strahlteiler und einer Lochblende zu einem Detektor geleitet. Das Konfokalmikroskop zählt zu den Lichtmikroskopen und die große Besonderheit daran ist, dass nicht das gesamte zu betrachtende Objekt beleuchtet wird, sondern zu jedem Zeitpunkt nur ein kleiner Teil des Objektes. Somit entsteht am Mikroskop kein vollständiges Bild des zu untersuchenden Objektes, sondern das Gesamtbild wird am Computer zusammengesetzt.

Mittels Konfokalmikroskopie lässt sich ein hoch genauer Verlauf der Oberflächenstruktur nachbilden, der dem realen sehr nahe kommt.

Die am meisten verwendeten Konfokalmikroskope sind konfokale Laser-Rastermikroskope. Bei diesen Mikroskopen wird mittels Laserstrahlung ein fluoreszierender Farbstoff

energetisch angeregt. In weiterer Folge lassen sich diese Geräte in Punkt- und Linienscanner unterteilen. Die Punktscanner rastern das zu untersuchende Objekt punktförmig ab, während Linienscanner eine ganze Bildzeile in einem Schritt erzeugen können. Dies führt zu einer höheren Geschwindigkeit.

Eine weitere Möglichkeit ist eine rotierende Nipkow-Scheibe, bei der die Lichtpunkte durch eine rotierende Scheibe mit spiralförmig angeordneten Lochblenden geschickt werden. Dabei ist eine Abbildung in Echtzeit möglich.

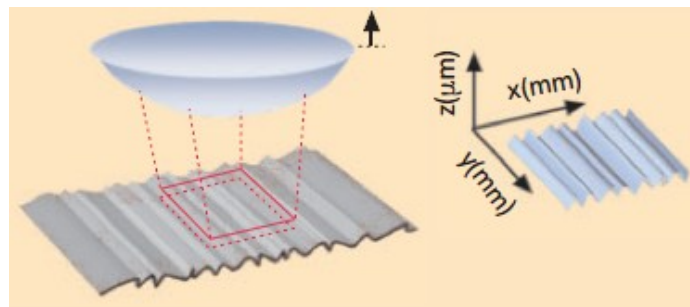


Abbildung 8.4: Konfokalmikroskopie [70]

Die Kennwerte dieses Verfahrens werden mit dem Anfangsbuchstaben S gekennzeichnet:  $S_a$ ,  $S_z$  usw. analog zu den Oberflächenkennwerten des Tastschnittverfahrens.

In der Fertigung wird dieses Verfahren selten eingesetzt, da es sehr teuer, zeitintensiv und anfällig für Störung infolge von Vibrationen ist.

### 8.3 Streulichtmesstechnik [70, 78]

Die Streulichttechnologie kann im Gegensatz zu Tastschnittverfahren und Konfokalmikroskopie auch die Profilwinkel erfassen. Es wird ein Messfleck mit einem Durchmesser zwischen 0,1 und 0,9 mm auf die zu messende Oberflächenstruktur geleuchtet und die Winkelverteilung des Lichts kann mit einer fotoempfindlichen Diodenzeile gemessen werden.

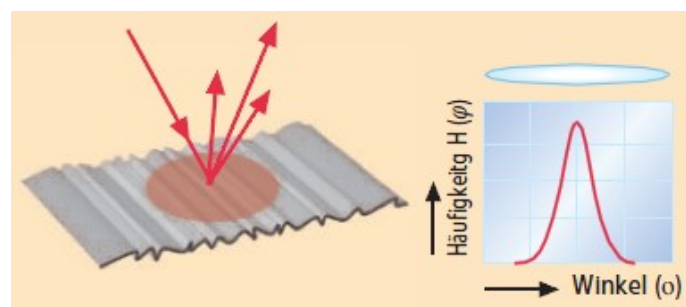


Abbildung 8.5: Streulichttechnologie [70]

Dieses Verfahren ist hochgenau und kann für viele spezielle Einsatzzwecke wie dem Messen der Rundheit, Rauheit und Welligkeit bei feingeschliffenen Stahlbändern im direkten Anschluss an die Bearbeitung eingesetzt werden.

In Abbildung 8.6 misst ein Sensor aus großer Entfernung die Finishqualität eines Kurbelwellenlagers.

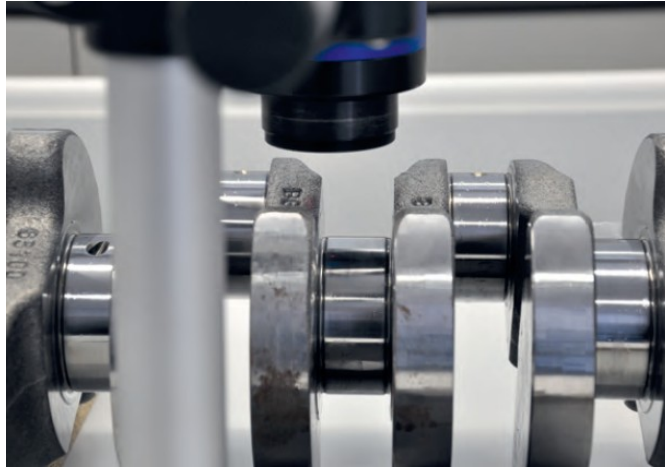


Abbildung 8.6: Sensor misst die Finishqualität eines Kurbelwellenlagers [78]

Die Vorteile dieses Verfahrens liegen darin, dass es unempfindlich gegen Abstandsänderungen ist und eine hohe Messgeschwindigkeit hat. Die Kenngrößen werden mit dem Anfangsbuchstaben A (für angle, dt. Winkel) charakterisiert.

## 9 Analyse und Bewertung

Dieses Kapitel dient dazu, einen zusammenfassenden Überblick über alle Verfahren und Kennwerte zu bekommen und in weiterer Folge eine Bewertung abgeben zu können. Zu diesem Zweck werden zuerst die Verfahren nach ihrem übergeordneten Kapitel zusammengefasst und die Aussagekraft der einzelnen Kennwerte für Anwendungsfälle analysiert. Abschließend werden die elektrochemischen, mechanischen, chemischen, thermischen Verfahren und die Kombination der Wirkmechanismen in Kapitel 9.6 gegenübergestellt.

### 9.1 Elektrochemische Verfahren

Wie in Kapitel 2 ausführlich erläutert, gliedern sich diese Verfahren in ECM, PECM, PEM, ECF und Elektropolieren.

| <b>Kennwert</b>                                | <b>ECM</b>  | <b>PECM</b> | <b>PEM</b>   | <b>ECF</b>  | <b>Elektropolieren</b> |
|--|-------------|-------------|--------------|-------------|------------------------|
| Abbildungsgenauigkeit [mm]                     | -           | 0,02 – 0,1  | bis 0,02     | -           | -                      |
| Arbeitsspalt [ $\mu\text{m}$ ]                 | >100        | <100        | >10          | >10         | -                      |
| Arithmetischer Mittenrauwert [ $\mu\text{m}$ ] | 0,05        | <0,05       | 0,02         | <0,2        | <0,2                   |
| Elektrodenbewegung                             | Konstant    | konstant    | Oszillierend | -           | -                      |
| Maximales Aspektverhältnis [-]                 | >10         | >10         | >10          | >10         | >10                    |
| Prozesstemperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]       | <90         | 20 – 50     | 20 – 50      | <70         | 40 – 75                |
| Spannung [V]                                   | 20 – 30     | <40         | <40          | <50         | 45                     |
| Stromrichtung [-]                              | Gleichstrom | Gleichstrom | Gleichstrom  | Gleichstrom | Gleichstrom            |
| Vorschubgeschwindigkeit [mm/min]               | <20         | 0,1         | 0,1 – 2      | <0,001      | 0,001 – 0,003          |
| Wirkstromdichte [ $\text{A}/\text{cm}^2$ ]     | <10         | <1          | <1           | <1          | 0,05 – 0,6             |

Tabelle 9.1: Zusammenfassung der elektrochemischen Verfahren

In Tabelle 9.1 sind die Kennwerte aus den Kapiteln 2.1 bis 2.5 übersichtlich zusammengefasst. Durch den direkten Vergleich dieser bekannten Werte können einige Besonderheiten erkannt werden. Mit diesen elektrochemischen Verfahren, die alle auf der Elektrolyse von Michael Faraday beruhen, können ausschließlich elektrisch leitfähige Werkstoffe bearbeitet werden. PECM (Pulsed ECM) und PEM (Precise ECM) stellen direkte Weiterentwicklungen von ECM dar und diese stetige Verbesserung des Verfahrens kann an einigen Kennwerten festgemacht werden. Ausgehend von einem Arbeitsspalt von mehr als 100  $\mu\text{m}$  wurde das Verfahren zu PEM mit einem minimalen Arbeitsspalt von maximal 10  $\mu\text{m}$  dank oszillierender Elektrode evolutioniert. Diese Verkleinerung des Arbeitsspalt führt zu

weiteren positiven Effekten, wie z.B. den sinkenden arithmetischen Mittenrauwerten und sinkender Prozesstemperatur infolge der immer kürzer werdenden Bearbeitungszeiten. Als negativer Effekt sinkt die Vorschubgeschwindigkeit um einen Faktor 10.

Damit eignet sich konventionelle ECM-Bearbeitung viel besser für Anwendungen mit großem Abtrag und geringeren Anforderungen an den arithmetischen Mittenrauwert.

## 9.2 Mechanische Verfahren

Die mechanischen Verfahren teilen sich in Mikrofräsen als Miniaturisierung des konventionellen Fräsens und Ultrapräzisionszerspanung mit oder ohne Ultraschallunterstützung. In nachfolgender Tabelle sind die Kennwerte gegenübergestellt.

| Kennwert                                       | Mikrofräsen | UP-Zerspanung |
|--|-------------|---------------|
| Arithmetischer Mittenrauwert [ $\mu\text{m}$ ] | 0,15        | 0,01 – 0,005  |
| Aspektverhältnis                               | 5           | >10           |
| Formgenauigkeit [ $\mu\text{m}/\text{mm}$ ]    | -           | 1/100         |
| Strukturgröße [ $\mu\text{m}$ ]                | <10         | <5            |
| Wiederholungsgenauigkeit [ $\mu\text{m}$ ]     | <0,1        | -             |

Tabelle 9.2: Zusammenfassung der mechanischen Verfahren

Wie in Kapitel 3.1 und 3.2 erläutert, stellt die Ultrapräzisionszerspanung ein verbessertes Verfahren im Vergleich zum miniaturisierten Fräsen dar. Mittels Diamantwerkzeugen werden Verschleiß und arithmetische Mittenrauigkeit verringert.

Mit mechanischen Verfahren sind nahezu alle Werkstoffe bearbeitbar. Bei Nutzung der UP-Zerspanung muss bei Bearbeitung von Eisenlegierungen darauf geachtet werden, dass ultraschallunterstützte UP-Zerspanung verwendet wird, da es ansonsten durch die Kohlenstoffaffinität des Diamanten zu einem starken Verschleiß des Werkzeuges kommt.

## 9.3 Chemische Verfahren

Unter dem Überbegriff chemische Verfahren werden photochemisches Ätzen und das Sol-Gel-Verfahren zusammengefasst. Ihre Kennwerte sind in Tabelle 9.3 dargestellt.



| <b>Kennwert</b>                                | <b>Photochemisches Ätzen</b> | <b>Sol-Gel-Verfahren</b> |
|--|------------------------------|--------------------------|
| Arithmetischer Mittenrauwert [ $\mu\text{m}$ ] | -                            | $<10^{-2}$               |
| Aspektverhältnis                               | bis 2,5                      | -                        |
| Max. Bauteilgröße                              | 0,350 x 330 x 800.000        | -                        |
| h x b x t (In-Line) [mm]                       |                              |                          |
| Partikelgröße [nm]                             | -                            | 1 – 100                  |
| Prozesstemperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]       | Raumtemperatur               | 300 – 800                |
| Schichtdicke [ $\mu\text{m}$ ]                 | -                            | $10^{-3}$ – 4            |
| Sintertemperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]        | -                            | $>450$                   |

Tabelle 9.3: Zusammenfassung der chemischen Verfahren

Mittels photochemischen Ätzen und Sol-Gel-Verfahren können nahezu alle Werkstoffe bearbeitet werden. Die Materialdicke von 25 bis 350  $\mu\text{m}$  ist beim In-Line-Ätzprozess ein limitierender Faktor, jedoch können mit diesem Prozess Endlosbänder mit bis zu 800 m Länge hergestellt werden.

## 9.4 Thermische Verfahren

Die thermischen Verfahren aus dem Kapitel 5 stellen eine weitere wichtige Gruppe von Verfahren dar. In nachfolgender Tabelle 9.4 sind die Kennwerte von EDM und Sublimationsabtrag angeführt. Excimerlaserbearbeitung wird hier nicht für eine direkte Gegenüberstellung angeführt, da dieser Laser hauptsächlich für Fotolithographie und medizinischen Anwendungen und selten für Materialabtrag an Metallen eingesetzt wird.

Da EDM und Sublimationsabtrag einem komplett konträren Bearbeitungsablauf folgen, kann in diesem Kapitel kein direkter Vergleich dieser beiden Verfahren durchgeführt werden, vielmehr wird auf die Stärken der beiden Verfahren eingegangen.

| <b>Kennwert</b>                                      | <b>EDM</b>        | <b>Sublimationsabtrag</b> |
|--|-------------------|---------------------------|
| Arbeitsspalt [ $\mu\text{m}$ ]                       | 4                 | -                         |
| Arithmetischer Mittenrauwert [ $\mu\text{m}$ ]       | 0,1               | 1                         |
| Bearbeitungsgeschwindigkeit [m/s]                    | -                 | 3                         |
| Einzellaserpulse pro Sekunde [-]                     | -                 | 100.000                   |
| Maximale Werkstückabmessung                          | 1700 x 1000 x 500 | -                         |
| h x b x t [mm]                                       |                   |                           |
| Maximales Aspektverhältnis                           | 100               | 10                        |
| Minimale Dimension [ $\mu\text{m}$ ]                 | 10                | 5                         |
| Pulslänge [nm]                                       | -                 | bis 5                     |
| Strahlungsintensität (Fe) [ $\text{W}/\text{cm}^2$ ] | -                 | $>3,4 \cdot 10^9$         |

Tabelle 9.4: Zusammenfassung der thermischen Verfahren

In Bezug auf Mittenrauigkeit und maximales Aspektverhältnis lassen sich mit EDM sehr viel bessere Ergebnisse als mit Sublimationsabtrag erzielen. Die großen Vorteile der

Laserbearbeitung liegen in der hohen Bearbeitungsgeschwindigkeit, dem besseren Bearbeiten von großen Flächen und vor allem dem großen Innovationspotential (siehe Kapitel 7.1).

## 9.5 Kombination von Wirkmechanismen

In diesem Unterkapitel wird Röntgen-Liga repräsentativ für die LiGA-Verfahren herangezogen, da dieses Verfahren am häufigsten verwendet wird und die besten Ergebnisse erzielt. Röntgen-LiGA und ECDM lassen sich hinsichtlich ihrer Kennwerte nicht seriös vergleichen, da sich diese Verfahren zu stark unterscheiden. Der einzig vergleichbare Kennwert ist der arithmetischen Mittenrauwert, der bei Röntgen-LiGA kleiner als bei ECDM ist.

| Kennwert                                       | Röntgen-LiGA | ECDM       |
|--|--------------|------------|
| Arithmetischer Mittenrauwert [ $\mu\text{m}$ ] | 0,03         | 0,05 – 0,1 |
| Flankenwinkel [ $^\circ$ ]                     | 90           | -          |
| Leerlaufspannung [V]                           | -            | 75         |
| Maximales Aspektverhältnis                     | 50 – 500     | -          |
| Maximale Strukturhöhe [mm]                     | 3            | -          |
| Minimale Dimension [ $\mu\text{m}$ ]           | 0,2          | -          |

Tabelle 9.5: Zusammenfassung von Kombinationen der Wirkmechanismen

## 9.6 Gesamtbewertung

Die Verfahren von Kapitel 9.1 bis 9.5 weisen im Detail betrachtet stark unterschiedliche Eigenschaften auf, jedoch lassen sich einzelne Kennwerte und Eigenschaften repräsentativ gegenüberstellen.

| Kennwert/<br>Eigenschaft                       | Elektro-<br>chemische<br>Verfahren | Mechanische<br>Verfahren | Chemische<br>Verfahren | Thermische<br>Verfahren                            | Kombination<br>von Wirk-<br>mechanismen |
|--|------------------------------------|--------------------------|------------------------|--|---|
| Arithmetischer Mittenrauwert [ $\mu\text{m}$ ] | >0,02                              | 0,01 – 0,15              | <10 <sup>-3</sup>      | 0,1 – 1  | 0,03 – 0,1                              |
| Bearbeitbare Werkstoffe                        | Elektr.<br>Leitfähig               | fast alle                | fast alle              | Elektr.<br>Leitfähige<br>(EDM), sonst<br>fast alle | Ni, Ni-Leg.,<br>Cu, Au (LiGA)           |
| Maximales Aspektverhältnis [-]                 | >10                                | >10                      | <2,5                   | 10 – 100   | 50 – 500                                |

Tabelle 9.6: Zusammenfassung aller Verfahren

Wie in Tabelle 9.6 ersichtlich ist, können diese unterschiedlichen Verfahren hinsichtlich ihrer arithmetischen Mittenrauwerte, maximales Aspektverhältnis und den bearbeitbaren Werkstoffen charakterisiert und verglichen werden. Diese Vergleichswerte stellen wichtige Entscheidungskriterien bei der Auswahl des Verfahrens dar, die bei allen Verfahren eindeutig angegeben werden können. Der arithmetischen Mittenrauwert gibt die erzielbare Oberflächenqualität, Aspektverhältnis das Verhältnis von Strukturhöhe zur -breite und die bearbeitbaren Werkstoffe das Werkstoffspektrum an.

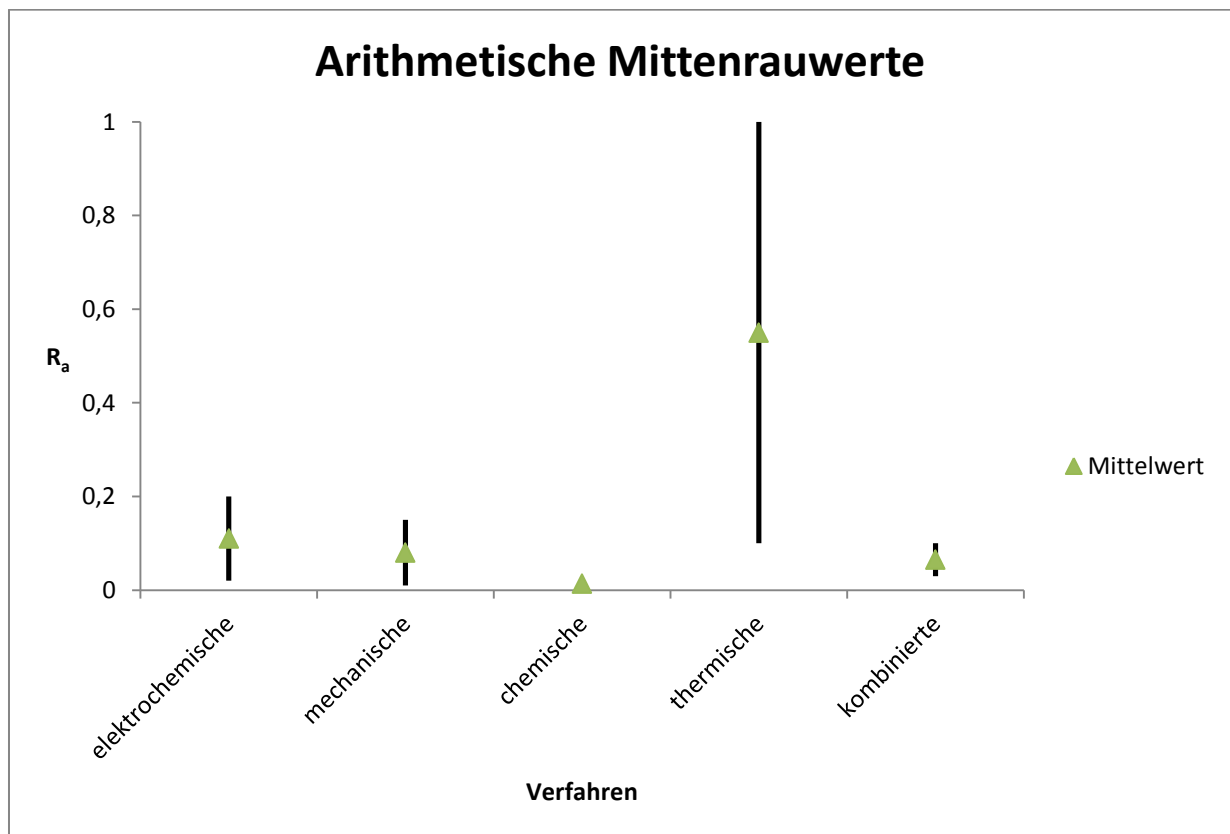


Abbildung 9.1: Arithmetische Mittenrauwerte der Verfahren

In Abbildung 9.1 ist der arithmetische Mittenrauwert der unterschiedlichen Verfahren mit Maximal-, Minimal- und Mittelwert dargestellt. Diese Werte wurden aus Tabelle 9.6 entnommen. Es wird ersichtlich, dass sich speziell mit chemischen Verfahren sehr niedrige Rauheitswerte einstellen lassen und die thermischen Verfahren in Form von Sublimationsabtrag sehr hohe Werte erreichen können. Dies lässt sich insbesondere darauf zurückführen, dass mittels Sublimationsabtrag nur gezielt jenes Material abgetragen wird, das entfernt werden muss. Dieses Verfahren wirkt sich nicht weiter auf die umgebende Bauteiloberfläche aus. Andere Verfahren – z.B. elektrochemische – bearbeiten die zur Verfügung stehende Bauteiloberfläche um die Struktur einzubringen.

In nachfolgender Tabelle 9.7 werden die genannten Verfahren mittels Harvey Balls bewertet. Für jedes Kriterium richtet sich die Bewertung nach dem besten Wert dieser Kategorie und wird mit 100 Prozent angenommen.

| Kennwert/<br>Eigenschaft                             | Elektro-<br>chemische<br>Verfahren | Mechanische<br>Verfahren | Chemische<br>Verfahren | Thermische<br>Verfahren | Kombination<br>von Wirk-<br>mechanismen |
|--|------------------------------------|--------------------------|------------------------|-------------------------|---|
| Arithmetischer<br>Mittenrauwert<br>[ $\mu\text{m}$ ] |                                    |                          |                        |                         |   |
| Bearbeitbare<br>Werkstoffe                           |                                    |                          |                        |                         |   |
| Maximales<br>Aspektverhältnis<br>[-]                 |                                    |                          |                        |                         |   |

Tabelle 9.7: Harvey Balls Bewertung

## 9.7 Fazit

Aus Tabelle 9.6, Tabelle 9.7, Abbildung 9.1 und den einzelnen Kapiteln der Verfahren können einige entscheidende Schlüsse für die Bearbeitung von metallischen Oberflächen gezogen werden. Es wird deutlich, dass mittels chemischer Beschichtung (Sol-Gel-Verfahren) von Metallen arithmetische Mittenrauwerte im niedrigen Nanometerbereich realisiert werden können. Diese nanometergroße Oberflächenstruktur ist auch für den selbstreinigenden Lotuseffekt verantwortlich.

Auch zeichnen sich mechanische und chemische Verfahren durch eine sehr große Materialvielfalt aus, wogegen elektrochemische und EDM von den thermischen Verfahren nur für fast alle elektrisch leitfähigen Materialien anwendbar ist.

Die größten Bauteile lassen sich in einem Schritt mittels Sublimationsabtrag ( $<1 \text{ m}^2$ ) und In-Line-Ätzprozess (bis 800 m Endlosrolle) verwirklichen, während man bei elektrochemischen Verfahren auf kleinere Bauteile im Quadratzentimeter-Bereich beschränkt ist. Jedoch ist man in Hinblick auf großflächige Mikrostrukturen auf metallischen Oberflächen auf die Innovationspotentiale (Kapitel 7) in Form von direkter Laserinterferenzstrukturierung (DLIP), Mikrometallspritzgießen ( $\mu\text{MIM}$ ) und Riblet-Walzen und ihrer weiteren Entwicklung angewiesen.

Wie aus den am Anfang dieses Kapitels genannten Quellen von Tabellen und der Abbildung hervorgeht, kann bei reiner Betrachtung einiger weniger Kennwerte (arithmetischer Mittenrauwert, bearbeitbare Werkstoff und maximales Aspektverhältnis) der Eindruck entstehen, dass sich die Kombination von Wirkmechanismen in Form von Röntgen-LiGA speziell für diese Aufgaben eignet, da sie die besten Einzelbewertungen bei jedem Kennwert bzw. jeder Eigenschaft erreicht. Wenn jedoch das gesamte Verfahren betrachtet wird, stellt sich dieses Verfahren für großflächige Mikrostrukturierung als nicht geeignet dar. Die Gründe dafür liegen bei dem aufwändigen Verfahren, den teuren Masken und der Einschränkung bei den zu bearbeitenden Werkstoffen.

## 10 Mikroskopische Untersuchungen

Zur mikroskopischen Untersuchung werden folgende Proben, die von unterschiedlichen Firmen und dem Lehrstuhl für Umformtechnik zur Verfügung gestellt wurden, herangezogen:

- Elektropoliertes Blech aus rostfreiem Stahl
- Photochemisch geätztes Blech
- Handgeschliffene Probe eines rostfreien Stahls (Schleifpapier 320)
- Bauteil mit präzisiertem elektrochemischen Abtrag
- Maschinengeschliffene Probe eines ST 52
- Geätzte Sol-Gel-Beschichtung

Zur Darstellung der Strukturen werden Stereo-, Konfokal- (Kapitel 8.2) und Rasterelektronenmikroskopie verwendet.

Bei Stereomikroskopie wird ein dreidimensionales Abbild der Probe während der Betrachtung erzeugt, da für beide Augen ein getrennter Strahlengang mit unterschiedlichen Winkeln bereitgestellt wird. Das Bild, das mittels Kamera am Mikroskop abgenommen werden kann, bleibt jedoch zweidimensional.

Mittels Rasterelektronenmikroskop wird ein Bild erzeugt, indem eine Probe mit einem Elektronenstrahl beschossen wird und die Wechselwirkung der Elektronen mit der Oberfläche aufgezeichnet wird.

### 10.1 Elektropoliertes Blech aus rostfreiem Stahl

In Abbildung 10.1 ist eine stereomikroskopische Aufnahme dieser Probe zu sehen. Diese Aufnahme dient vorwiegend dazu, einen Überblick über die Probe und der dargestellten Struktur zu bekommen.



Abbildung 10.1: Elektropoliertes Blech mit Stereomikroskopie

Die nachfolgende Konfokalmikroskopie ermöglicht die Darstellung und Bestimmung des Rauigkeitsprofils. Die rote Linie in Abbildung 10.2 dient zur Ermittlung des Rauigkeitsprofils (Abbildung 10.3).

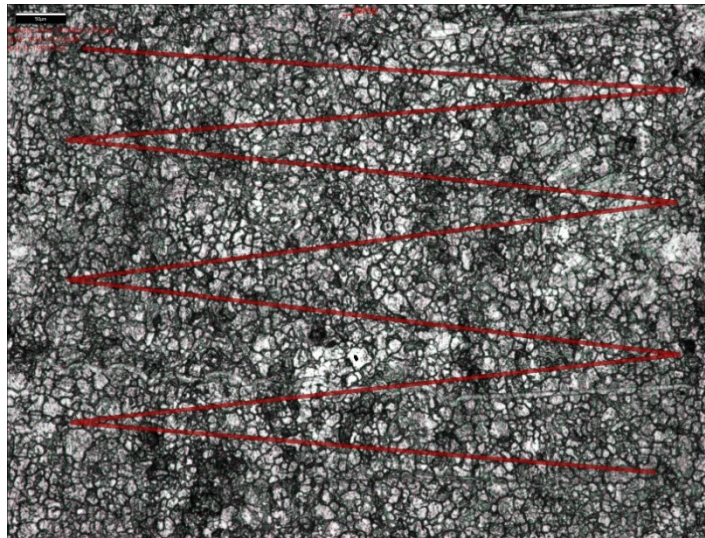


Abbildung 10.2: Elektropoliertes Blech mit Konfokalmikroskopie

Anhand dieses Profilverlaufs wird ein arithmetischer Mittenrauwert  $R_a$  von  $0,367 \mu\text{m}$  ermittelt.

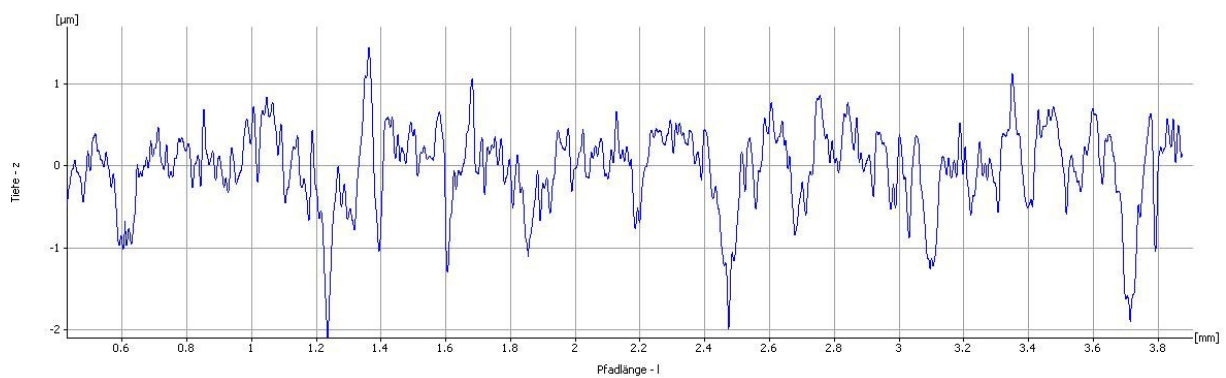


Abbildung 10.3: Rauigkeitsverlauf des elektropoliertes Blechs

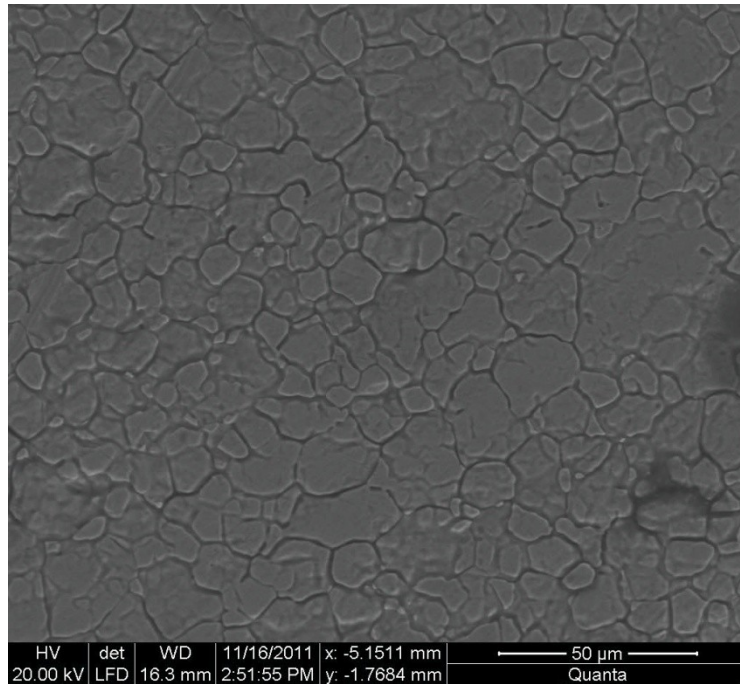


Abbildung 10.4: Elektropoliertes Blech mit 1600-facher Vergrößerung im REM

In Abbildung 10.4 und Abbildung 10.5 wird die Struktur der Probe mittels Rasterelektronenmikroskopie mit 400- und 1600-facher Vergrößerung dargestellt und die erzeugte Struktur ist vor allem in der Aufnahme mit 1600-facher Vergrößerung sehr gut erkennbar.

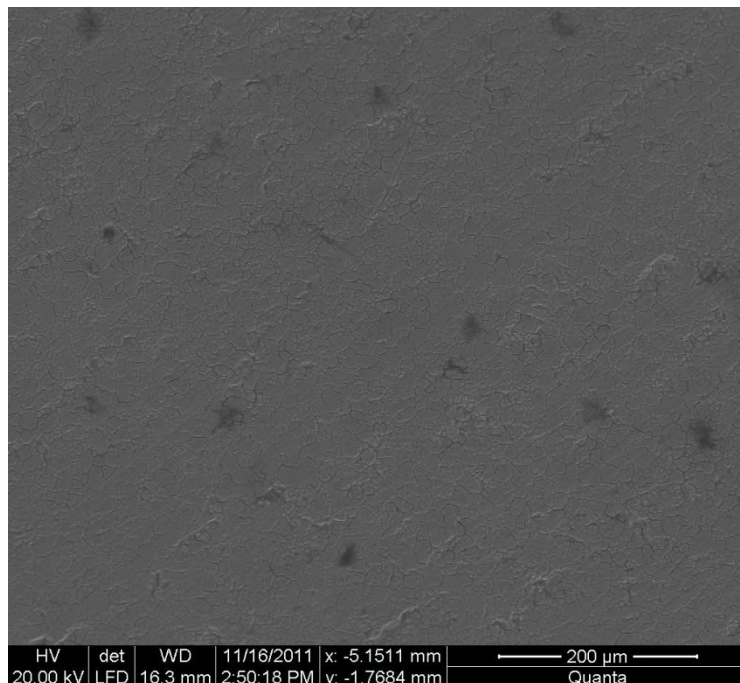


Abbildung 10.5: Elektropoliertes Blech mit 400-facher Vergrößerung im REM

## 10.2 Photochemisch geätztes Blech

In Abbildung 10.6 und Abbildung 10.7 ist die Blechprobe von Micrometal GmbH (<http://www.micrometal.de/>) in Stereo- und Konfokalmikroskopie abgebildet.

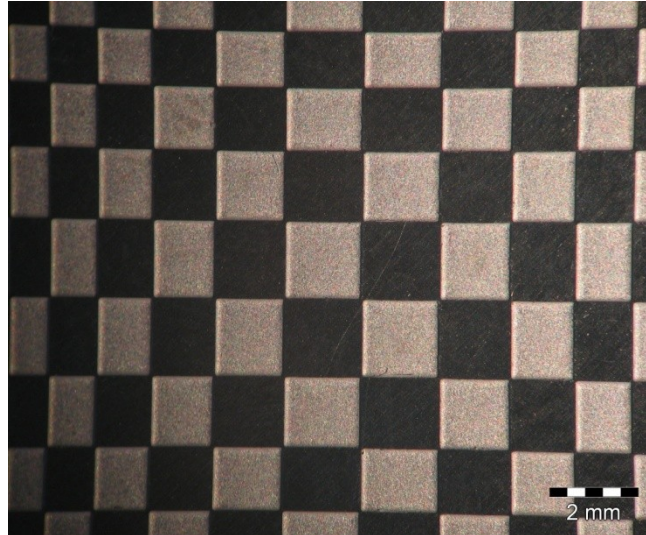


Abbildung 10.6: Photochemisch geätztes Blech mit Stereomikroskopie

Der Verlauf der roten Linie in Abbildung 10.7 dient zur Ermittlung des Rauigkeitsverlaufes, der in Abbildung 10.8 dargestellt ist.

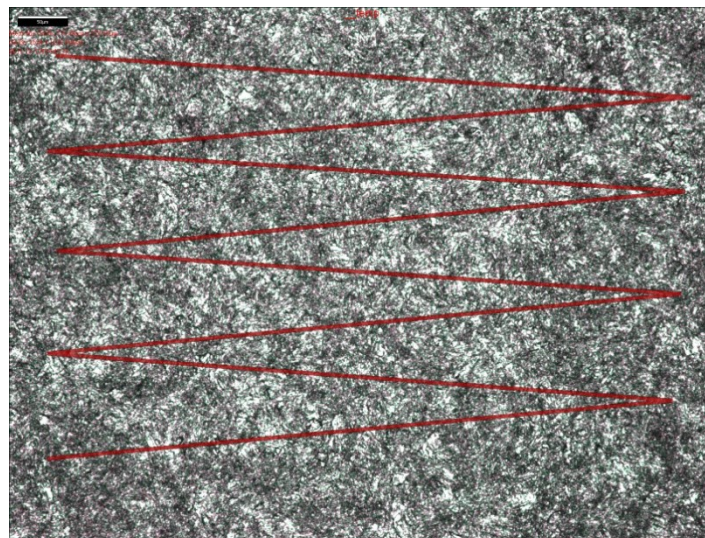


Abbildung 10.7: Photochemisch geätztes Blech mit Konfokalmikroskopie

Anhand dieses Profilverlaufs wird ein arithmetischer Mittenrauwert  $R_a$  von  $0,261 \mu\text{m}$  ermittelt.



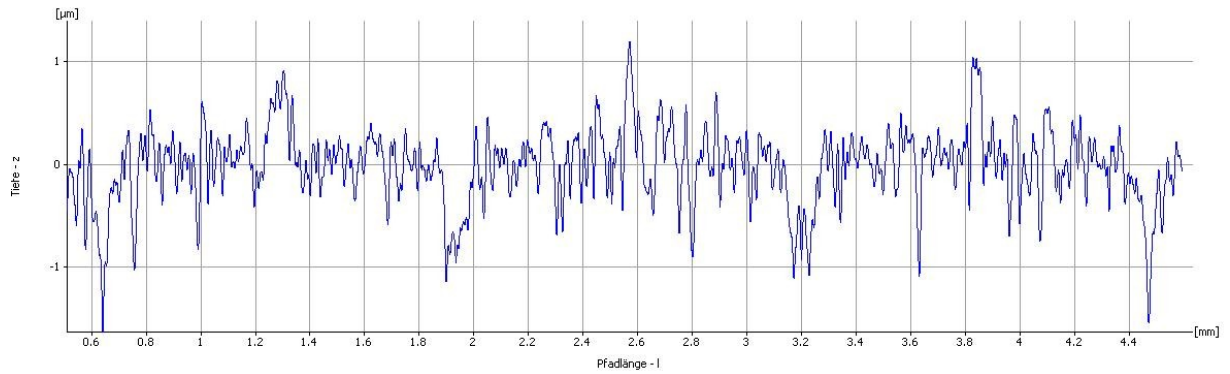


Abbildung 10.8: Rauigkeitsverlauf des photochemisch geätzten Blechs

In Abbildung 10.9 ist ein Ausschnitt dieser Probe dargestellt. Das große Quadrat im Zentrum der Abbildung ist der nicht bearbeitete Anteil des Blechs. Die vier hell umrandeten Bereiche stellen Teile der durch photochemische Ätzung abgetragenen Bereiche dar.

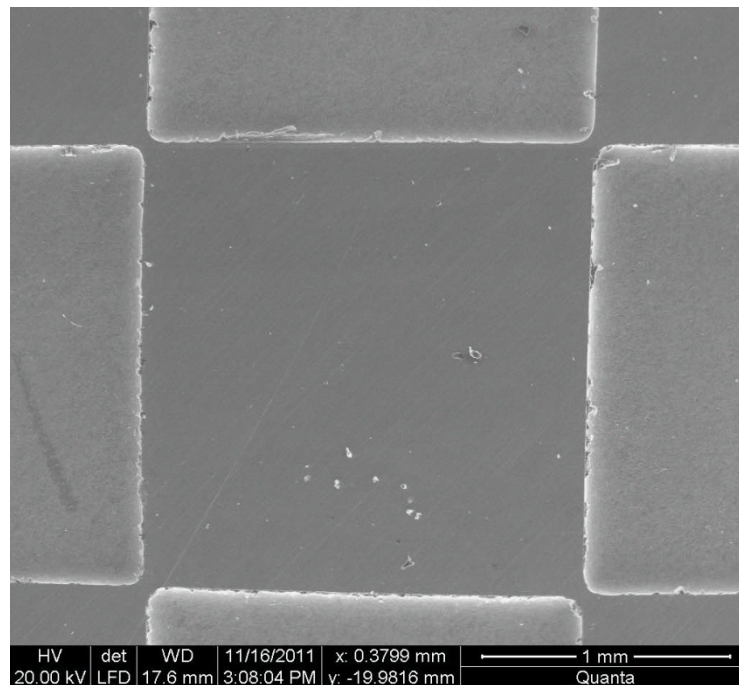


Abbildung 10.9: Ausschnitt von photochemisch geätztem Blech im REM

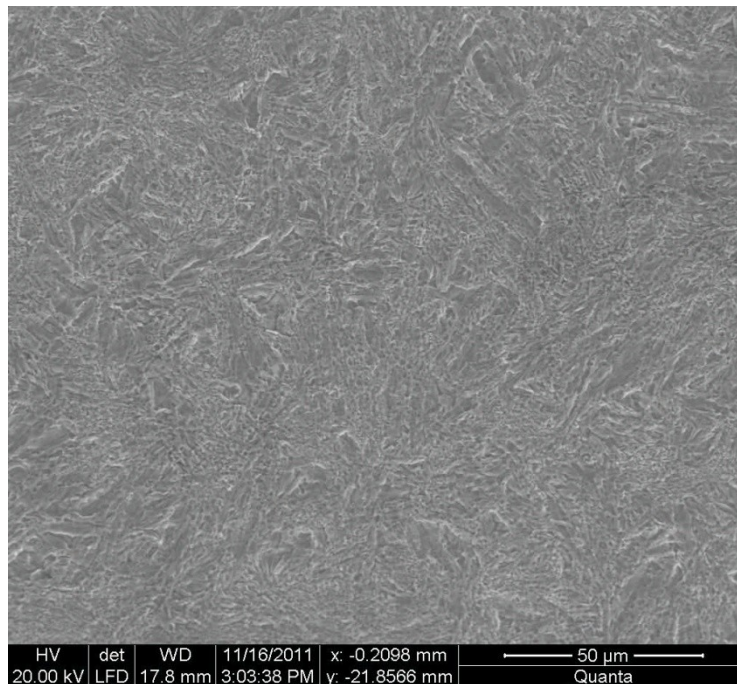


Abbildung 10.10: Detailaufnahme des geätzten Bereichs mit 1600-facher Vergrößerung im REM

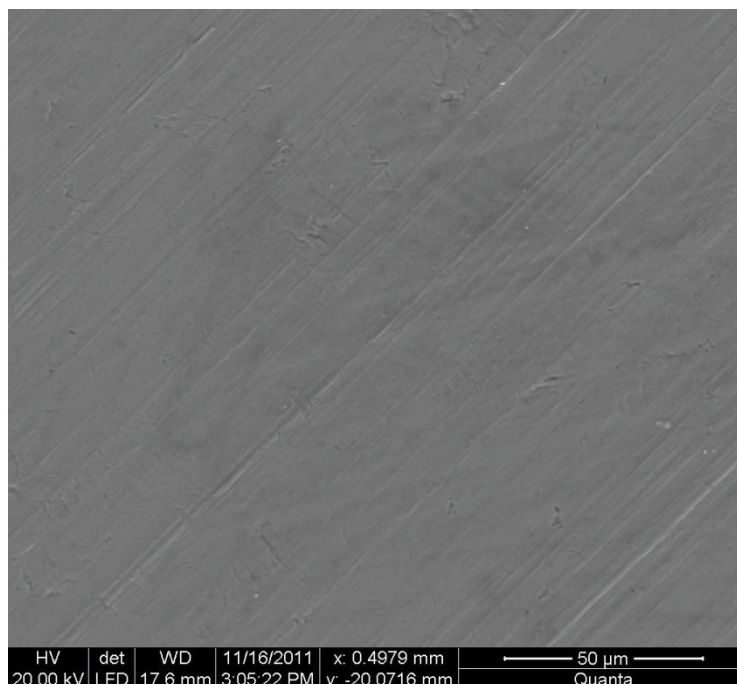


Abbildung 10.11: Detailaufnahme des nicht geätzten Bereichs mit 1600-facher Vergrößerung im REM

In Abbildung 10.10 und Abbildung 10.11 sind Detailaufnahmen aus dem geätzten und aus dem nicht geätzten Bereich dargestellt. Beide Aufnahmen wurden mit 1600-facher Vergrößerung aufgenommen. Anhand der zerklüfteten Oberfläche im geätzten Bereich lässt sich der Unterschied sehr deutlich erkennen.

### 10.3 Handgeschliffene Probe eines Blechs aus rostfreiem Stahl

Diese Probe aus rostfreiem Stahl wurde per Hand mit einem Schleifpapier mit der Körnung 320 geschliffen. In Abbildung 10.12 und Abbildung 10.13 ist die handgeschliffene Probe mittels Stereo- und Konfokalmikroskopie dargestellt.



Abbildung 10.12: Handgeschliffene Probe mit Stereomikroskopie

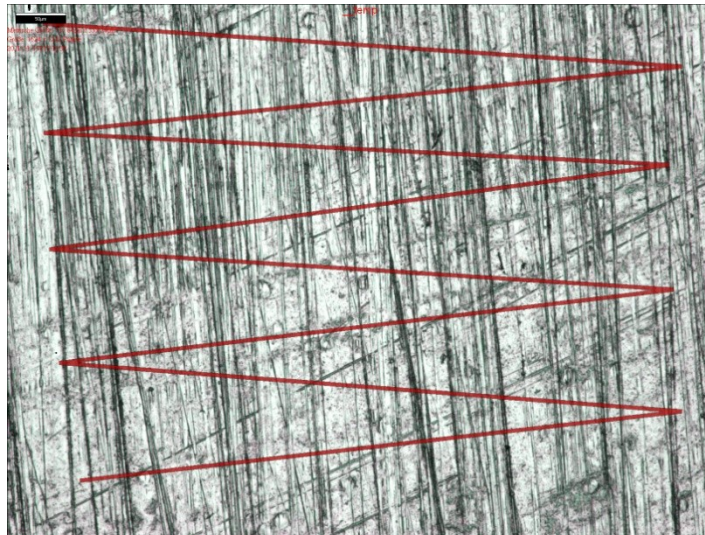


Abbildung 10.13: Handgeschliffene Probe mit Konfokalmikroskopie

Die rote Linie dient zur Ermittlung des Profilverlaufs (Abbildung 10.14) und für diese Probe kann mit diesem Verlauf ein arithmetischer Mittenrauwert von  $0,397 \mu\text{m}$  ermittelt werden.

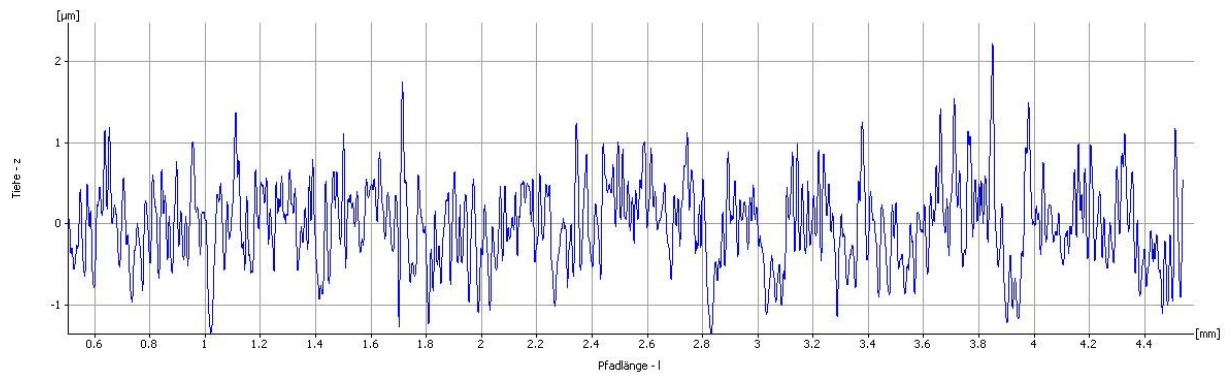


Abbildung 10.14: Rauigkeitsverlauf der handgeschliffenen Probe

In den folgenden Abbildungen ist die handgeschliffene Probe mit 400- und 1600-facher Vergrößerung im Rasterelektronenmikroskop dargestellt.

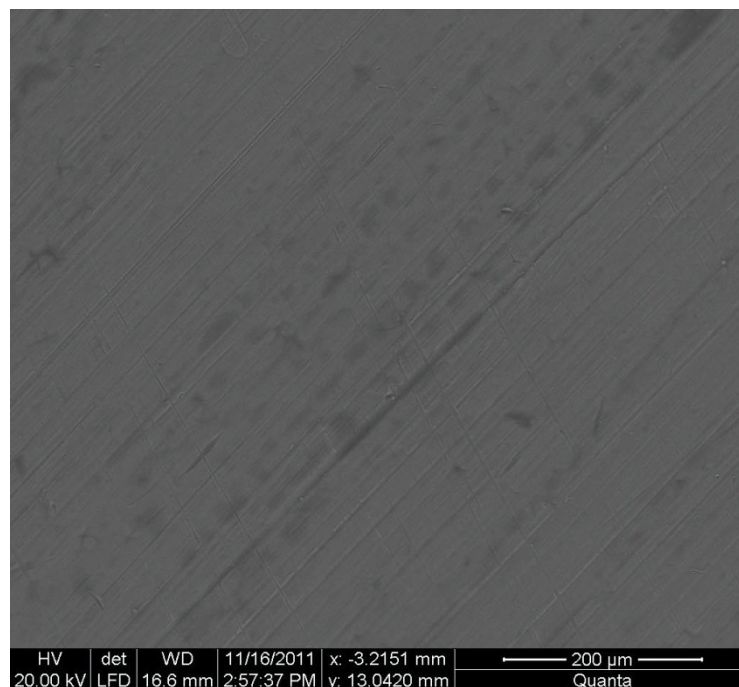


Abbildung 10.15: Handgeschliffene Probe mit Konfokalmikroskopie mit 400-facher Vergrößerung im REM

Es ist erkennbar, dass die viel feineren Diagonalrillen erst bei 1600-facher Vergrößerung sichtbar werden.

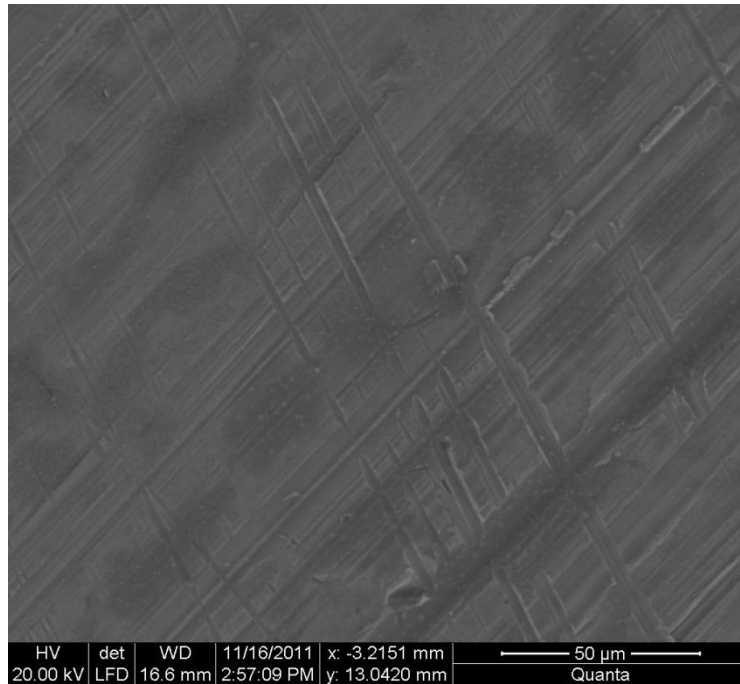


Abbildung 10.16: Handgeschliffene Probe mit Konfokalmikroskopie mit 1600-facher Vergrößerung im REM

### 10.4 Bauteil mit präzisiertem elektrochemischen Abtrag

In diesem Unterkapitel wird ein Bauteil der Firma Pemtec GmbH (<http://www.pemtec.de/>) mikroskopisch untersucht.



Abbildung 10.17: Gesamtaufnahme des PEM-Bauteils mit Stereomikroskopie

In Abbildung 10.17 und Abbildung 10.18 ist das PEM-Bauteil als Gesamt- und in einer Detailaufnahme mittels Stereomikroskopie dargestellt.

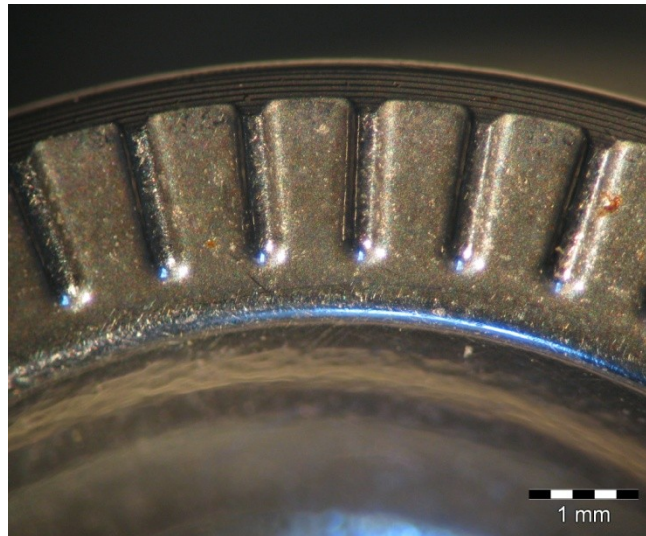


Abbildung 10.18: Detailaufnahme des PEM-Bauteils mit Stereomikroskopie

In den nachfolgenden Abbildungen sind Detailaufnahmen dieser Struktur mittels Konfokalmikroskopie in zwei- und dreidimensionaler Darstellung gezeigt. Die rote Linie in Abbildung 10.19 dient zur Ermittlung des Strukturverlaufs und der Strukturhöhe.

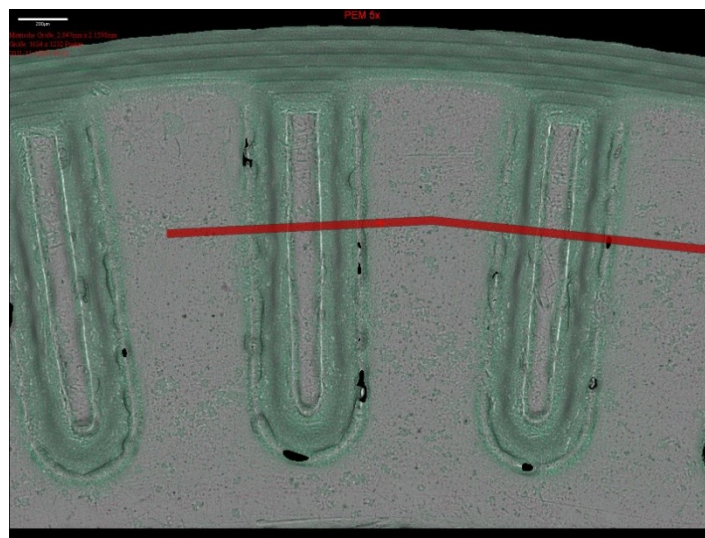


Abbildung 10.19: 2D-Aufnahme des PEM-Bauteils mit Konfokalmikroskopie

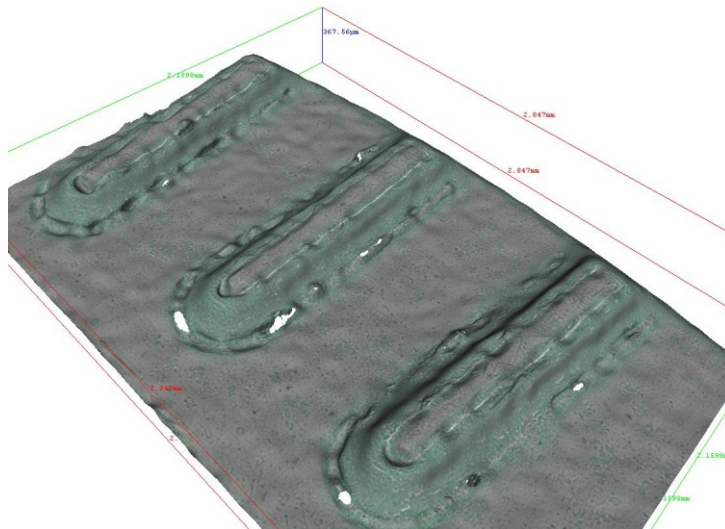


Abbildung 10.20: 3D-Aufnahme des PEM-Bauteils mit Konfokalmikroskopie

Der Profilverlauf dieses Bauteils ist in Abbildung 10.21 dargestellt und die Strukturhöhe kann mit ca.  $10\ \mu\text{m}$  angegeben werden.

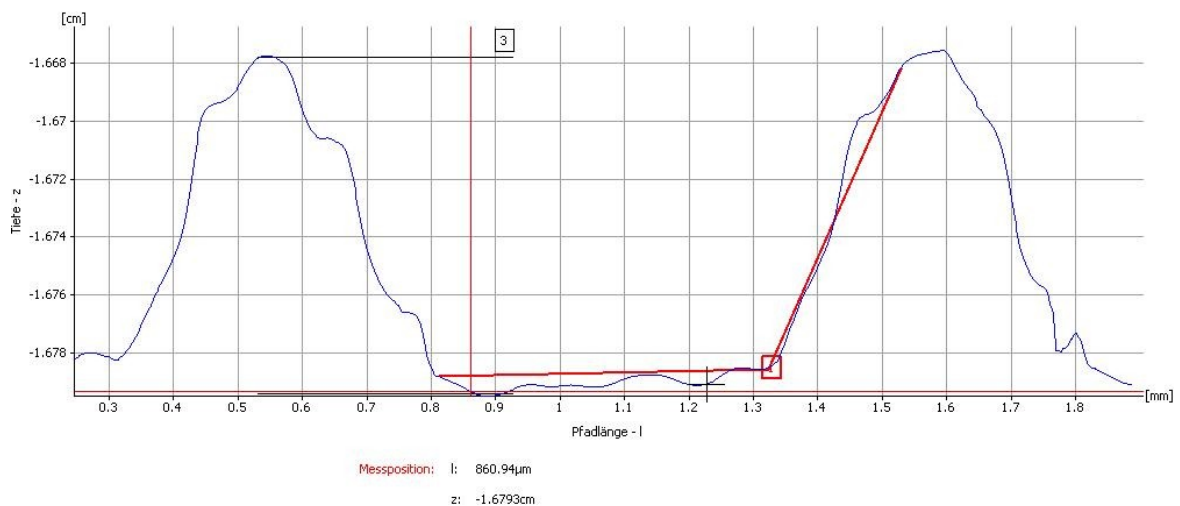


Abbildung 10.21: Profilverlauf des PEM-Bauteils

In den nachfolgenden Abbildungen sind Aufnahmen mit Rasterelektronenmikroskopie dargestellt. Während Abbildung 10.22 eine Detailaufnahme (25-fache Vergrößerung) des Bauteils zeigt, wird in Abbildung 10.23 mittels 600-facher Vergrößerung ein einzelner Steg dieser Struktur gezeigt. Der einzelne Steg wird durch die helle Umrandung ausgehend vom rechten oberen Eck begrenzt.

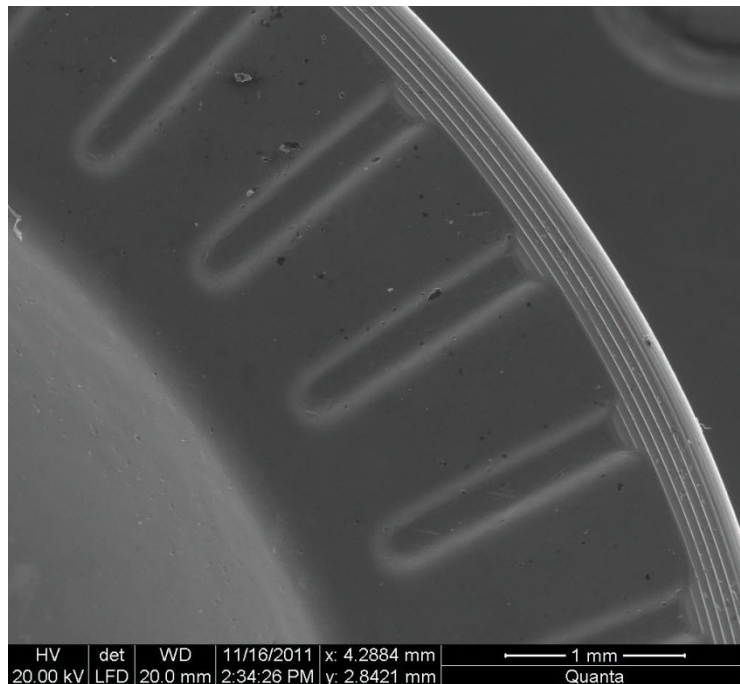


Abbildung 10.22: Detailaufnahme mit 25-facher Vergrößerung des PEM-Bauteils mit REM

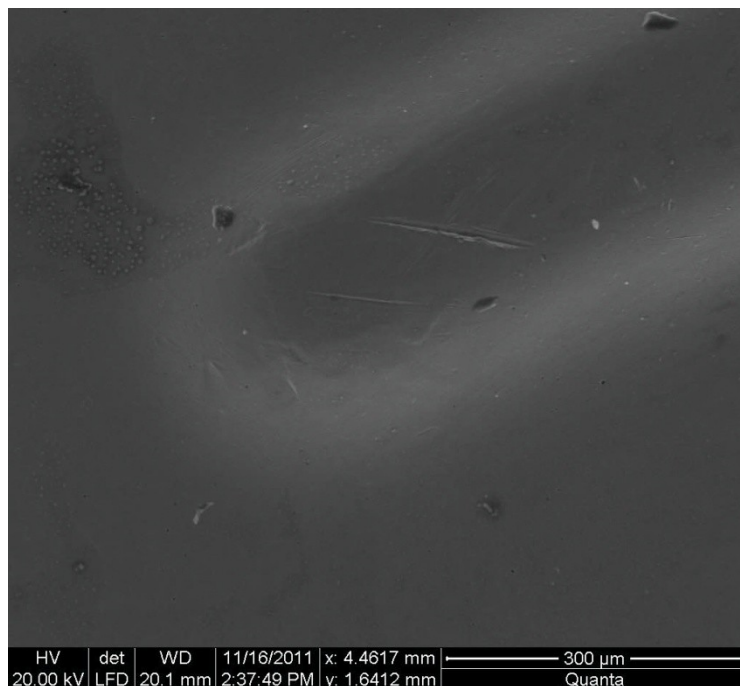


Abbildung 10.23: Detailaufnahme eines Einzelsteges des PEM-Bauteils mit 600-facher Vergrößerung mit REM

## 10.5 Maschinengeschliffene Probe eines ST 52

In diesem Unterkapitel wird die mikroskopische Untersuchung einer maschinengeschliffenen Probe aus ST 52 veranschaulicht.

Abbildung 10.24 zeigt eine stereomikroskopische Aufnahme der maschinengeschliffenen Probe. Die Verfärbung an der Schleifstelle (links) resultiert aus der Temperaturerhöhung während der Bearbeitung.



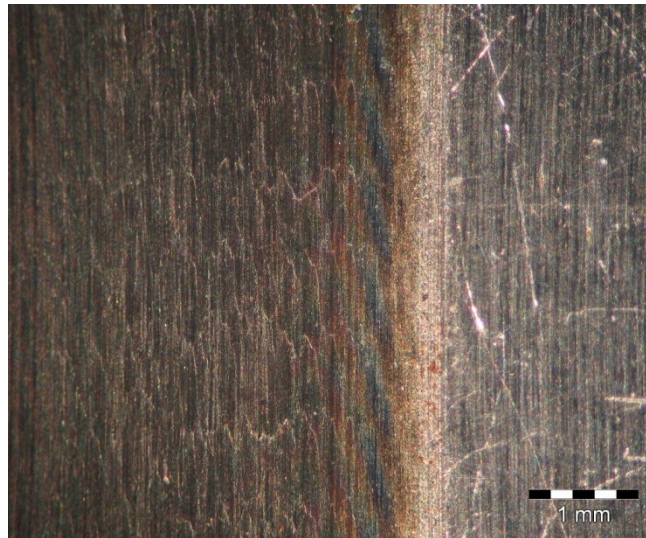


Abbildung 10.24: Maschinengeschliffene Probe mit Stereomikroskopie

Die nachfolgende Abbildung 10.25 zeigt die Aufnahme derselben Probe mit einem Konfokalmikroskop. Die rote Linie dient zur Charakterisierung des Oberflächenprofils (Abbildung 10.26) der Probe.

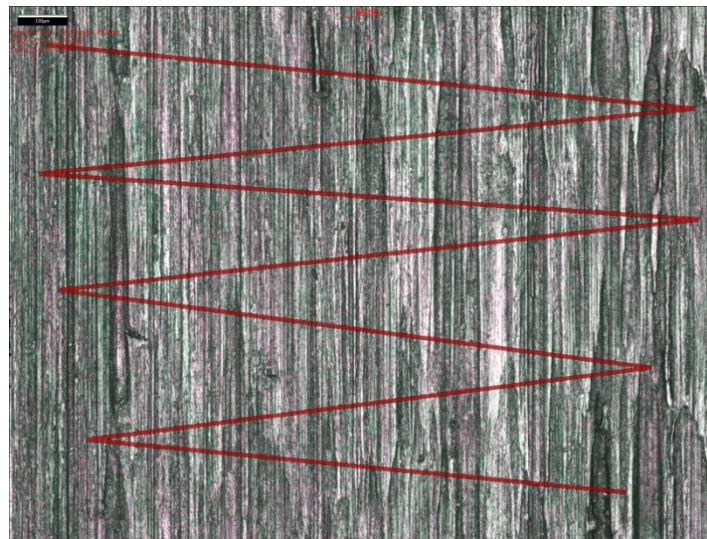


Abbildung 10.25: Maschinengeschliffene Probe mit Konfokalmikroskopie

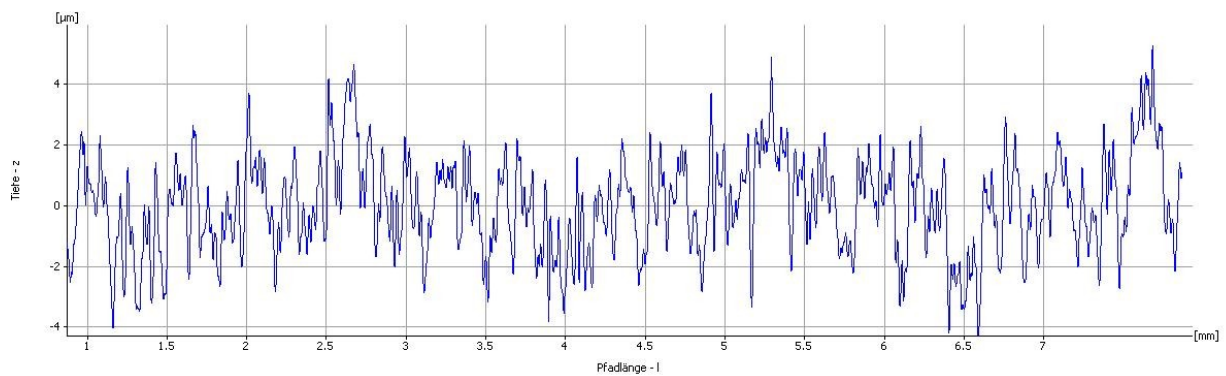


Abbildung 10.26: Rauigkeitsverlauf der maschinengeschliffenen Probe

Anhand der Rauigkeitsmessung mittels Konfokalmikroskopie kann ein arithmetischer Mittenrauwert  $R_a$  von  $1,276 \mu\text{m}$  angegeben werden.

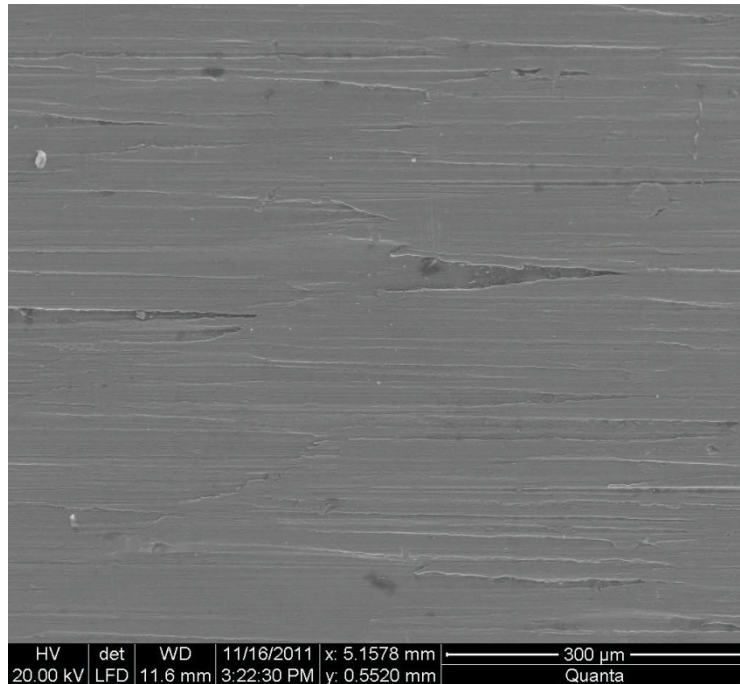


Abbildung 10.27: Maschinengeschliffene Probe mit 400-facher Vergrößerung mit REM

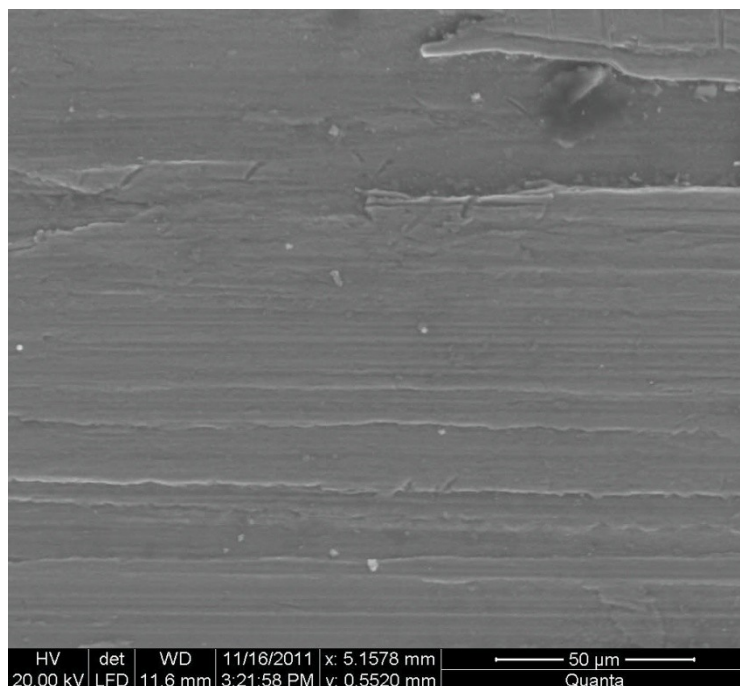


Abbildung 10.28: Maschinengeschliffene Probe mit 1600-facher Vergrößerung mit REM

Die Aufnahmen mit dem Rasterelektronenmikroskop (Abbildung 10.27 und Abbildung 10.28) mit 400- und 1600-facher Vergrößerung der Oberfläche zeigen die deutlich eingebrachte horizontale Struktur.

## 10.6 Geätzte Sol-Gel-Beschichtung

In diesem Unterkapitel wird die mikroskopische Untersuchung einer Blechprobe, die mit einer Sol-Gel-Schicht überzogen und anschließend angeätzt wurde, veranschaulicht. Mit dieser Anordnung von Prozessen lässt sich eine Struktur erzeugen, wie sie vor allem für Laminat-Bleche verwendet wird.

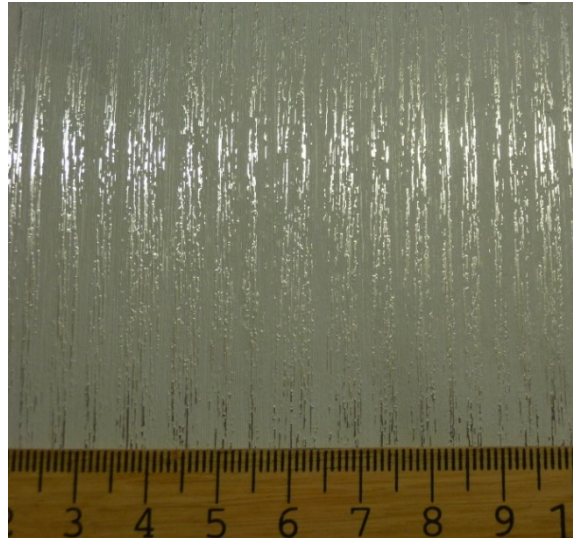


Abbildung 10.29: Geätzte Sol-Gel-Beschichtung mit Stereomikroskopie

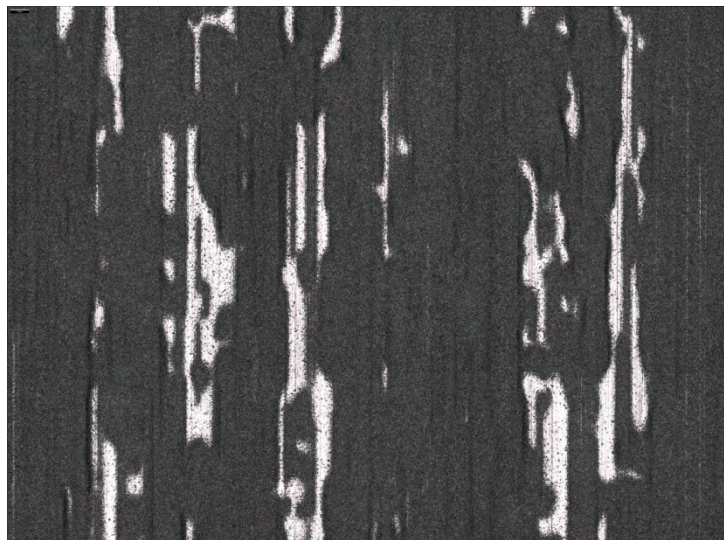


Abbildung 10.30: Geätzte Sol-Gel-Beschichtung mit Konfokalmikroskopie

In Abbildung 10.29 kann man die Laminatstruktur im Überblick anhand der Aufnahme mit dem Stereomikroskop erkennen, während man mit dem Konfokalmikroskop (Abbildung 10.30) eine viel detailliertere Aufnahme und den Profilverlauf (Abbildung 10.31) der Probe erhält.

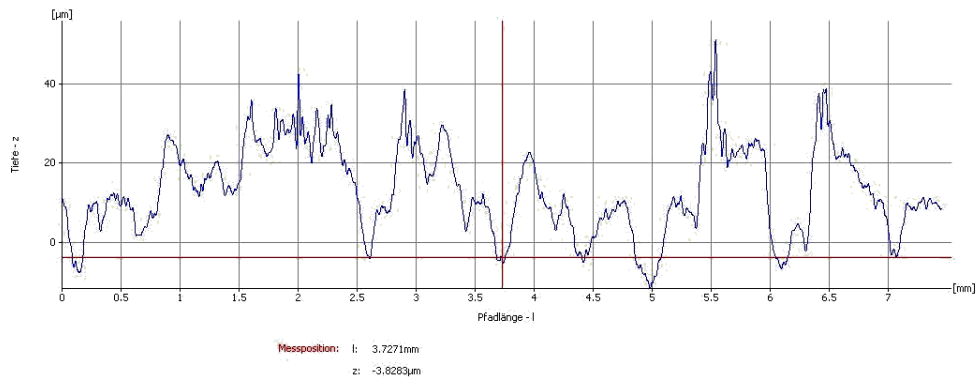


Abbildung 10.31: Rauigkeitsverlauf der geätzten Sol-Gel-Beschichtung

Mittels Rasterelektronenmikroskop erhält man die nachfolgenden Abbildungen mit 400- und 1600-facher Vergrößerung.

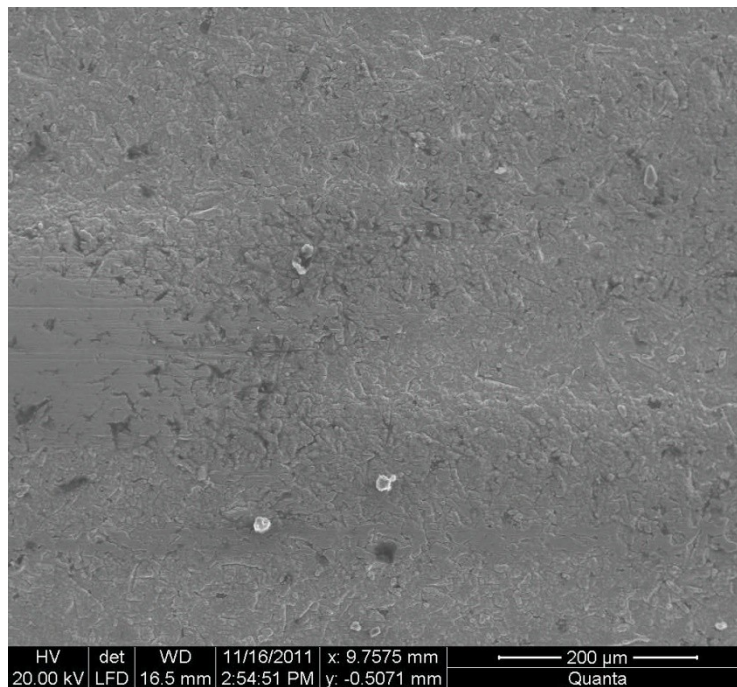


Abbildung 10.32: Geätzte Sol-Gel-Beschichtung mit 400-facher Vergrößerung mit REM

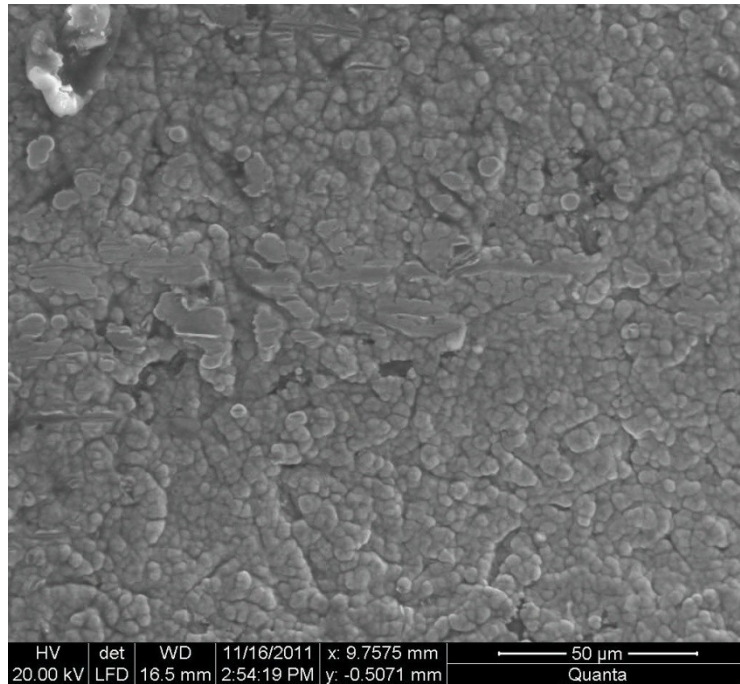


Abbildung 10.33: Geätzte Sol-Gel-Beschichtung mit 1600-facher Vergrößerung mit REM

Mit 1600-facher Vergrößerung wird ein sehr detailliertes Abbild der mikrostrukturierten Oberfläche dargestellt, während mit 400-facher Vergrößerung nur schwer die Orientierung der Struktur erahnt werden kann. Die horizontale Orientierung (helle Streifen) der Struktur lässt sich sehr viel besser in Abbildung 10.34 mit 50-facher Vergrößerung unter dem Rastelektronenmikroskop erkennen.

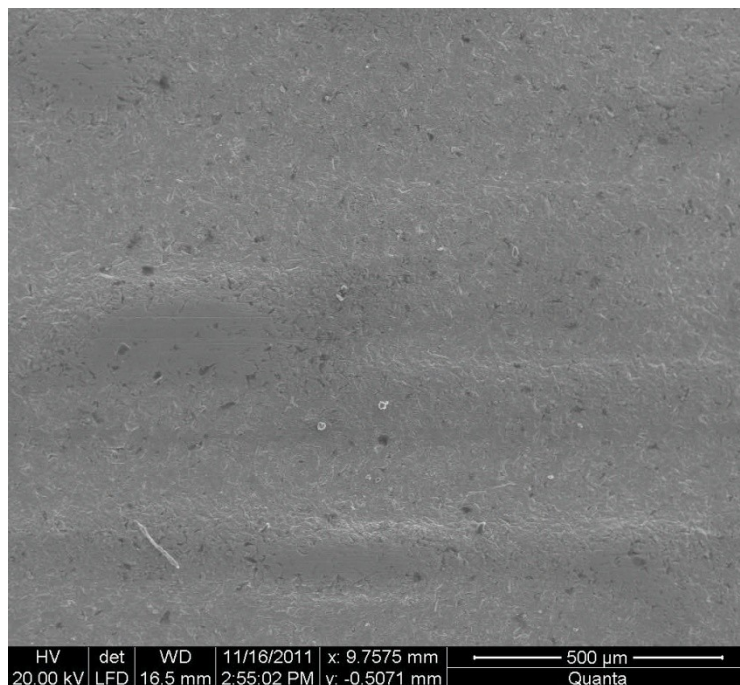


Abbildung 10.34: Geätzte Sol-Gel-Beschichtung mit 50-facher Vergrößerung mit REM

## 10.7 Fazit

Die unterschiedlichen mikroskopischen Aufnahmen sind unerlässlich um die Oberflächenstrukturen der Proben zu bestimmen und zu untersuchen.

Scheint auf den ersten Blick eine stereomikroskopische Aufnahme aus heutiger technischer Sicht veraltet, lässt sich mit dieser Technik jedoch eine wichtige Aufnahme der gesamten Probe erstellen, wie in Abbildung 10.17 anhand des PEM-Bauteils ersichtlich ist.

Um den genauen Profilverlauf der Oberfläche und dreidimensionale Aufnahmen der Strukturen zu bekommen, bedient man sich der Konfokalmikroskopie, mit der in weiterer Folge auch die Bestimmung der Oberflächenkennwerte ( $R_a$ ,  $R_z$  usw.) durchgeführt werden kann.

Mittels Rasterelektronenmikroskop können detaillierte Aufnahmen mit immenser Vergrößerung durchgeführt werden, die mit Stereo- und Konfokalmikroskopie nicht durchgeführt werden können.

## Abbildungsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 1.1: Detailaufnahme eines Fliegensbeines [1] .....                                   | 8  |
| Abbildung 1.2: Darstellung des Mittenrauwerths [2].....  | 9  |
| Abbildung 2.1: Schema der Elektrolyse [4] .....  | 11 |
| Abbildung 2.2: ECM Vorrichtung [4].....  | 12 |
| Abbildung 2.3: Parameter des ECM-Verfahrens [4].....   | 13 |
| Abbildung 2.4: Scherkopf eines Elektrorasierers [79] .....                                     | 15 |
| Abbildung 2.5: Darstellung des PECM-Verfahrens [11] .....                                      | 16 |
| Abbildung 2.6: Schema des PEM-Verfahrens [2].....  | 17 |
| Abbildung 2.7: Turbinenschaufel mit PEM-Verfahren [80].....                                    | 18 |
| Abbildung 2.8: Darstellung des elektrochemischen Fräsens [15].....                             | 19 |
| Abbildung 2.9: Gegenüberstellung von ECM/PECM und ECF [15].....                                | 20 |
| Abbildung 2.10: Beispiel für ECF-Bearbeitung aus Mikrofluidtechnik [15] .....                  | 21 |
| Abbildung 2.11: Anodische Stromdichte über Potential [18] .....                                | 22 |
| Abbildung 2.12: Darstellung des Elektropolierens [18].....                                     | 22 |
| Abbildung 2.13: Ein Werkstück vor (links) und nach der Bearbeitung [18] .....                  | 23 |
| Abbildung 2.14: Verfahrensablauf des Elektropolierens .....                                    | 23 |
| Abbildung 2.15: Elektropolierter Edelstahl [81].....   | 24 |
| Abbildung 3.1: Unterschied zwischen Makro- (links) und Mikrozerspanung [ISF<br>DORTMUND] ..... | 25 |
| Abbildung 3.2: Verwendete mechanische Verfahren.....   | 25 |
| Abbildung 3.3: Mikroschaftfräser mit optimierter Geometrie im Größenvergleich [25] .....       | 26 |
| Abbildung 3.4: Formel zur Bestimmung des optimalen Schaftverlaufs [25].....                    | 27 |
| Abbildung 3.5: Gegenüberstellung konventionellen/geometrieoptimierten Schaft [25] .....        | 27 |
| Abbildung 3.6: Fräsen eines Formeinsatzes [23] .....   | 28 |
| Abbildung 3.7: Flycutter F1000-2X [34] .....   | 29 |
| Abbildung 3.8: Trommeldrehmaschine TDM-1200 [35].....  | 29 |
| Abbildung 3.9: UP-Zerspanung zur metallischen Optik [82] .....                                 | 30 |
| Abbildung 4.1: Photochemisches Ätzen [39].....   | 31 |
| Abbildung 4.2: In-Line Ätzprozess [39] .....   | 32 |
| Abbildung 4.3: Beispiel einer photochemischen Ätzung [38] .....                                | 32 |
| Abbildung 4.4: SOLGEL-Verfahren [40] .....   | 34 |
| Abbildung 4.5: Verschiedene Möglichkeiten der Sol-Gel-Bearbeitung [47].....                    | 34 |
| Abbildung 4.6: Prozessablauf Sol-Gel-Verfahren [45].....                                       | 36 |
| Abbildung 4.7: Unterschied zw. Lack und Sol-Gel-Beschichtung [45].....                         | 36 |
| Abbildung 4.8: Easy-to-Clean eines verzinkten Stahlblechs [46].....                            | 37 |
| Abbildung 4.9: Sol-Gel-Korrosionsschutz anhand eines Kupferblechs [45].....                    | 37 |
| Abbildung 5.1: Darstellung des EDM-Verfahrens [4] .....  | 38 |
| Abbildung 5.2: Phasen des EDM [4] .....  | 40 |
| Abbildung 5.3: Beispiel für Senkerosion [83] .....   | 41 |
| Abbildung 5.4: Aufbau des Excimer-Lasers [4] .....   | 43 |
| Abbildung 5.5: Darstellung des Sublimationsabtrages [4].....                                   | 44 |
| Abbildung 5.6: Absorbtiionsgrad über Wellenlänge [36].....                                     | 44 |

|   |    |
|---|----|
| Abbildung 5.7: Mikrostrukturierung mittels Laser [84].....  | 45 |
| Abbildung 6.1: Schematische Darstellung des Verfahrens Röntgen-LiGA [53].....                               | 49 |
| Abbildung 6.2: Stufenzahnrad eines Mikrogetriebes [53] .....  | 49 |
| Abbildung 6.3: Vergleich PECM, EDM und ECDM [49].....   | 51 |
| Abbildung 6.4: Reale Spannungs- und Stromverläufe ECDM [49].....  | 52 |
| Abbildung 7.1: Interferenz zweier Laser [59].....   | 53 |
| Abbildung 7.2: DLIP [58].....   | 54 |
| Abbildung 7.3: Sprengprägen – Laubblatt [86] .....  | 55 |
| Abbildung 7.4: Hologramm durch Sprengprägen .....   | 55 |
| Abbildung 7.5: MicroWIND.Prozess [73] .....   | 56 |
| Abbildung 7.6: Riblet-Struktur [72].....  | 56 |
| Abbildung 7.7: Verdichterschaufel mit Riblet-Struktur.....  | 57 |
| Abbildung 7.8: Prinzip des MIM-Verfahrens [67].....   | 57 |
| Abbildung 7.9: Mikro Zahnrad mit $\mu$ MIM [85] .....   | 58 |
| Abbildung 8.1: Tastschnittverfahren [70] .....  | 59 |
| Abbildung 8.2: Aufnahme einer Tastspitze mittels Rasterelektronenmikroskop [74].....                        | 59 |
| Abbildung 8.3: Prinzip der Konfokalmikroskopie [75] .....   | 60 |
| Abbildung 8.4: Konfokalmikroskopie [70].....  | 61 |
| Abbildung 8.5: Streulichttechnologie [70].....  | 61 |
| Abbildung 8.6: Sensor misst die Finishqualität eines Kurbelwellenlagers [78] .....                          | 62 |
| Abbildung 9.1: Arithmetische Mittenrauwerte der Verfahren .....   | 67 |
| Abbildung 10.1: Elektropoliertes Blech mit Stereomikroskopie .....  | 69 |
| Abbildung 10.2: Elektropoliertes Blech mit Konfokalmikroskopie .....  | 70 |
| Abbildung 10.3: Rauigkeitsverlauf des elektropoliertes Blechs .....   | 70 |
| Abbildung 10.4: Elektropoliertes Blech mit 1600-facher Vergrößerung im REM.....                             | 71 |
| Abbildung 10.5: Elektropoliertes Blech mit 400-facher Vergrößerung im REM.....                              | 71 |
| Abbildung 10.6: Photochemisch geätztes Blech mit Stereomikroskopie.....                                     | 72 |
| Abbildung 10.7: Photochemisch geätztes Blech mit Konfokalmikroskopie.....                                   | 72 |
| Abbildung 10.8: Rauigkeitsverlauf des photochemisch geätzten Blechs .....                                   | 73 |
| Abbildung 10.9: Ausschnitt von photochemisch geätztem Blech im REM.....                                     | 73 |
| Abbildung 10.10: Detailaufnahme des geätzten Bereichs mit 1600-facher Vergrößerung im<br>REM .....          | 74 |
| Abbildung 10.11: Detailaufnahme des nicht geätzten Bereichs mit 1600-facher Vergrößerung<br>im REM.....     | 74 |
| Abbildung 10.12: Handgeschliffene Probe mit Stereomikroskopie.....  | 75 |
| Abbildung 10.13: Handgeschliffene Probe mit Konfokalmikroskopie.....  | 75 |
| Abbildung 10.14: Rauigkeitsverlauf der handgeschliffenen Probe .....  | 76 |
| Abbildung 10.15: Handgeschliffene Probe mit Konfokalmikroskopie mit 400-facher<br>Vergrößerung im REM.....  | 76 |
| Abbildung 10.16: Handgeschliffene Probe mit Konfokalmikroskopie mit 1600-facher<br>Vergrößerung im REM..... | 77 |
| Abbildung 10.17: Gesamtaufnahme des PEM-Bauteils mit Stereomikroskopie .....                                | 77 |
| Abbildung 10.18: Detailaufnahme des PEM-Bauteils mit Stereomikroskopie.....                                 | 78 |
| Abbildung 10.19: 2D-Aufnahme des PEM-Bauteils mit Konfokalmikroskopie .....                                 | 78 |



|   |    |
|---|----|
| Abbildung 10.20: 3D-Aufnahme des PEM-Bauteils mit Konfokalmikroskopie .....                                       | 79 |
| Abbildung 10.21: Profilverlauf des PEM-Bauteils .....   | 79 |
| Abbildung 10.22: Detailaufnahme mit 25-facher Vergrößerung des PEM-Bauteils mit REM80                             |    |
| Abbildung 10.23: Detailaufnahme eines Einzelsteiges des PEM-Bauteils mit 600-facher<br>Vergrößerung mit REM ..... | 80 |
| Abbildung 10.24: Maschinengeschliffene Probe mit Stereomikroskopie.....   | 81 |
| Abbildung 10.25: Maschinengeschliffene Probe mit Konfokalmikroskopie.....   | 81 |
| Abbildung 10.26: Rauigkeitsverlauf der maschinengeschliffenen Probe .....   | 81 |
| Abbildung 10.27: Maschinengeschliffene Probe mit 400-facher Vergrößerung mit REM.....                             | 82 |
| Abbildung 10.28: Maschinengeschliffene Probe mit 1600-facher Vergrößerung mit REM...                              | 82 |
| Abbildung 10.29: Geätzte Sol-Gel-Beschichtung mit Stereomikroskopie .....   | 83 |
| Abbildung 10.30: Geätzte Sol-Gel-Beschichtung mit Konfokalmikroskopie .....                                       | 83 |
| Abbildung 10.31: Rauigkeitsverlauf der geätzten Sol-Gel-Beschichtung .....  | 84 |
| Abbildung 10.32: Geätzte Sol-Gel-Beschichtung mit 400-facher Vergrößerung mit REM....                             | 84 |
| Abbildung 10.33: Geätzte Sol-Gel-Beschichtung mit 1600-facher Vergrößerung mit REM..                              | 85 |
| Abbildung 10.34: Geätzte Sol-Gel-Beschichtung mit 50-facher Vergrößerung mit REM.....                             | 85 |

## Tabellenverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Tabelle 2.1: Kennwerte des ECM-Verfahrens .....                         | 15 |
| Tabelle 2.2: Kennwerte des PECM-Verfahrens .....                        | 17 |
| Tabelle 2.3: Kennwerte des PEM-Verfahrens.....                          | 18 |
| Tabelle 2.4: Gegenüberstellung von ECM/PECM und ECF [15].....           | 20 |
| Tabelle 2.5: Kennwerte des ECF-Verfahrens.....                          | 21 |
| Tabelle 2.6: Kennwerte Elektropolierens .....                           | 24 |
| Tabelle 3.1: Kennwerte des geometrieoptimierten Mikroschafts .....      | 27 |
| Tabelle 3.2: Kennwerte des Mikrofräsens.....                            | 28 |
| Tabelle 3.3: Kennwerte der UP-Zerspanung [23.5, 24] .....               | 30 |
| Tabelle 4.1: Kennwerte des photochemischen Ätzens .....                 | 33 |
| Tabelle 4.2: Kennwerte des Sol-Gel-Verfahrens .....                     | 37 |
| Tabelle 5.1: Kennwerte des EDM-Verfahrens .....                         | 42 |
| Tabelle 5.2: Kennwerte des Sublimationsabtrags .....                    | 46 |
| Tabelle 6.1: Kostenüberlick für LiGA-Masken [56].....                   | 48 |
| Tabelle 6.2: Kennwerte LiGA .....                                       | 48 |
| Tabelle 7.1: Kennwerte des DLIP-Verfahrens .....                        | 54 |
| Tabelle 9.1: Zusammenfassung der elektrochemischen Verfahren.....       | 63 |
| Tabelle 9.2: Zusammenfassung der mechanischen Verfahren .....           | 64 |
| Tabelle 9.3: Zusammenfassung der chemischen Verfahren.....              | 65 |
| Tabelle 9.4: Zusammenfassung der thermischen Verfahren .....            | 65 |
| Tabelle 9.5: Zusammenfassung von Kombinationen der Wirkmechanismen..... | 66 |
| Tabelle 9.6: Zusammenfassung aller Verfahren.....                       | 66 |
| Tabelle 9.7: Harvey Balls Bewertung .....                               | 68 |

## Abkürzungsverzeichnis

| Größe            | Einheit                | Bezeichnung                               |
|------------------|------------------------|---|
| $\mu\text{MIM}$  | -                      | Mikro Metal Injection Moulding            |
| A                | $\mu\text{m}$          | Schwingungsamplitude                      |
| A                | $\text{cm}^2$          | Bearbeitungsquerschnitt                   |
| $c_w$            | -                      | Luftwiderstandsbeiwert                    |
| D                | mm                     | Werkzeughdurchmesser                      |
| ECDM             | -                      | Electro Chemical Discharge Machining      |
| ECF              | -                      | Electrochemisches Fräsen                  |
| ECM              | -                      | Electro Chemical Machining                |
| EDM              | -                      | Electrical Discharge Machining            |
| F                | C/mol bzw. As/mol      | Faraday-Konstante                         |
| f                | Hz                     | Frequenz                                  |
| H                | mm                     | Spannungshöhe                             |
| HCl              | -                      | Salzsäure                                 |
| $\text{HNO}_3$   | -                      | Salpetersäure                             |
| HSC              | -                      | High Speed Cutting                        |
| I                | A                      | Elektrische Stromstärke                   |
| $i_p$            | A                      | Gepulster Strom                           |
| J                | $\text{A}/\text{cm}^2$ | Elektrische Stromdichte                   |
| KrF              | -                      | Krypton fluoride                          |
| LiGA             | -                      | Lithographie, Galvanik, Abformung         |
| M                | g                      | Materialabtrag                            |
| M                | g/mol                  | Molmasse                                  |
| $M^2$            | -                      | Beugungsmaßzahl                           |
| N                | 1/min                  | Standardspindeldrehzahl                   |
| NaCl             | -                      | Kochsalzlösung                            |
| $\text{NaNO}_3$  | -                      | Nitratlösung                              |
| Nd:YAG           | -                      | Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat |
| $n_{\text{max}}$ | 1/min                  | Maximale Spindeldrehzahl                  |
| PECM             | -                      | Pulsed Electro Chemical Machining         |
| PEM              | -                      | Precise Electrochemical Machining         |
| PW               | s                      | Pulsweite                                 |
| $R_a$            | $\mu\text{m}$          | Arithmetischer Mittenrauwert              |
| $r_\beta$        | mm                     | Schneidkantenradius                       |
| REM              | -                      | Rasterelektronenmikroskop                 |
| S                | mm                     | Arbeitsspalt                              |
| T                | s                      | Bearbeitungszeit                          |
| T                | $^\circ\text{C}$       | Bearbeitungs- bzw. Prozesstemperatur      |
| $t_{\text{aus}}$ | s                      | Ausschaltzeit                             |
| $t_{\text{ein}}$ | s                      | Einschaltzeit                             |
| U                | V                      | Elektrische Spannung                      |

---

|               |          |                             |
|---------------|----------|-----------------------------|
| UP-Zerspanung | -        | Ultrapräzisionszerspanung   |
| UV            | -        | Ultraviolett                |
| $v_a$         | mm/s     | Abtraggeschwindigkeit       |
| $v_f$         | mm/s     | Vorschubgeschwindigkeit     |
| $V_{sp}$      | $m^3/kg$ | Spezifisches Volumen        |
| $z$           | -        | Elektrochemische Wertigkeit |
| $\gamma$      | $^\circ$ | Spanwinkel                  |
| $\rho$        | $kg/m^3$ | Dichte                      |

---

## Quellenverzeichnis

- [1] Berliner Mikroskopische Gesellschaft e.V.: Fliegenbein. Aufnahme von Klaas Koch.  
<http://www.berliner-mikroskopische-gesellschaft.de/html/mikrofotos.html>
- [2] Köhler, G.; Künne, B.: Maschinenteile 1. Vieweg+Teubner Verlag. Auflage: 10. 2007
- [3] Volk, R.: Rauheitsmessung: Theorie und Praxis. Beuth Verlag. Auflage: 1. 2005
- [4] Klocke, F.; König, W.: Fertigungsverfahren 3: Abtragen, Generieren, Lasermaterialbearbeitung (VDI-Buch). Springer Verlag; Auflage 4., neu bearbeitet Auflage (9. Oktober 2006)
- [5] Fritz, A. H.; Schulze, G. (Hrsg): Fertigungstechnik. Springer Verlag. 2008
- [6] Adam, P.: Fertigungsverfahren von Turboflugtriebwerken. Brinkhäuser Verlag; Auflage 1 (30. September 1998)
- [7] Maschinenfabrik Köppern ECM
- [8] Antonoglu, G.; Klink, A.; Klocke, F.; Lunig, D.; Thomaidis, D.; Obrig, H.: EDM/ECM (ab 1950). – In: Eversheim, W.; Pfeifer, T.; Weck, M.: 100 Jahre Produktionstechnik. 361 – 380.
- [9] LeistritzTurbomaschinenTechnik GmbH – Electrochemical Machining  
[http://www.leistritz.com/turbomachines/de/00\\_pdf/ecm\\_download.pdf](http://www.leistritz.com/turbomachines/de/00_pdf/ecm_download.pdf), 20.08.2011
- [10] <http://www.electrochemicalmachining.com/ecm/pros-and-cons>
- [11] Lehrstuhl für Werkstoffkunde und Werkstoffmechanik: Herstellung/Nachbearbeitung von Gasturbinenbauteilen durch präzises elektrochemisches Bearbeiten. Technische Universität München.  
[http://www.lrz.de/~t7621cd/webserver/webdata/Forschung/projekte\\_html/pecm.html](http://www.lrz.de/~t7621cd/webserver/webdata/Forschung/projekte_html/pecm.html)
- [12] Moser, S.: Mikrostrukturierung von Metallen durch elektrochemischen Abtrag mit gepulstem Strom (PECM). Dissertation. Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf. 2004
- [13] Gäckle, M.: Präzisionsbearbeitung – Elektrochemisches Abtragen PEM hat das Potential für die Serienfertigung.  
<http://www.maschinenmarkt.vogel.de/themenkanale/produktion/zerspanungstechnik/articles/124644/index2.html>
- [14] Bräm, M.: Precise ECM: Elektrochemisches Abtragverfahren revolutioniert Fertigung. Fachartikel Technica 03/2008
- [15] Gmelin, T.: Elektrochemisches Fräsen: eine neuartige Mikrobearbeitungstechnologie. Mai 2011. ECMTEC. <http://cim-wismar.de/07%20-%20ECMTEC.pdf>
- [16] Kuttkat, B.: Elektrochemisches Fräsen hält Einzug in die Fertigung. Maschinenmarkt Vogel. <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/index.cfm?pid=1487&pk=148255>
- [17] Euro Inox (Hrsg): Elektropolieren nichtrostender Stähle. [http://www.euro-inox.org/pdf/map/Electropolishing\\_DE.pdf](http://www.euro-inox.org/pdf/map/Electropolishing_DE.pdf)
- [18] Hoffmann, H.; Spindler, J.: Verfahren der Oberflächentechnik: Grundlagen – Vorbehandlung – Beschichtung – Oberflächenreaktionen – Prüfungen. Carl Hanser Verlag. Auflage: 1. 2004
- [19] Hesselbach, J.; Raatz, A.; Wrege, J. u.a.: mikroPro: Untersuchungen zum internationalen Stand der Mikroproduktionstechnik.
- [20] Huber, E.: Mikrobearbeitung schwierig zerspanbarer Werkstoffe mit sehr hoher Präzision. Vortrag Fachhochschule Jena. 2008

- [21] Mikro- u. Feinwerktechnik GMM VDE/VDI-Gesellschaft Mikroelektronik (Hrsg); VDE Verband d. Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (Hrsg); VDI/VDE Innovation + Technik GmbH (VDI/VDE-IT) (Hrsg): Mikrosystemtechnik Kongress 2005 – 10. bis 12. Oktober 2005 in Freiburg. VDE Verlag. Auflage: 1. 2005
- [22] Kahnis, P.; Köhler, W.: Lilliput-Tools brauchen eigene Lösungen (Fachartikel). Industrieanzeigen. 12/2003. Seite 40.
- [23] Biermann, D.; Kahnis, P.: Mikrofräsen filigraner Strukturen in Formeinsätzen. <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/themenkanaele/produktion/zerspanungstechnik/articles/247079/index.html>
- [24] Uhlmann, E.; Röhner, M.: <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/themenkanaele/mmmaintainer/institutionenveranstaltungen/forschung/articles/62481/>. 08.07.2011
- [25] Schauer, K.: Mikroschafffräser für anspruchsvolle Bearbeitungsaufgaben. <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/index.cfm?pid=1487&pk=141408>. 08.07.2011
- [26] Aurich, J. C.; Walk, M.; Engmann, J.; Schueler, G. M.: Strukturgrößen unter 10 µm wirtschaftlich zerspanen. <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/themenkanaele/produktion/zerspanungstechnik/articles/270571/index4.html>. 08.07.2011
- [27] Montage hybrider Mikrosysteme: Handhabungs- und Fügetechniken für Klein- und Mittelserienfertigung. Springer Verlag. Auflage: 1. 2005
- [28] Deutsches Kupferinstitut (Hrsg): Richtwerte für die spanende Bearbeitung von Kupfer und Kupferlegierungen. [http://www.kupferinstitut.de/front\\_frame/pdf/i018.pdf](http://www.kupferinstitut.de/front_frame/pdf/i018.pdf). 08.07.2011
- [29] Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik IPT (Hrsg): Diamantzerspanung. [http://www.ipt.fraunhofer.de/Images/09\\_Diamantzerspanung\\_tcm361-56451.pdf](http://www.ipt.fraunhofer.de/Images/09_Diamantzerspanung_tcm361-56451.pdf). 08.07.2011
- [30] Klocke, F.; Pfeifer, T.; Schuh, G.; Weck, M.; Brecher, C.: TOOLS – Informationen der aachener Produktionstechniker. WZL Aachen. 01/2004. [http://www.wzl.rwth-aachen.de/www\\_files/04\\_01.pdf](http://www.wzl.rwth-aachen.de/www_files/04_01.pdf)
- [31] Botzelmann, T.: Ultrapräzisionsbearbeitung. <http://www.imat.hsg-imit.de/kompetenzen-arbeitsgebiete/konstruktion-und-werkzeugbau/ultrapraezisionsbearbeitung/>. 08.07.2011
- [32] Institut für Wissenschaftliche Veröffentlichungen in Zusammenarbeit mit ALPHA Informationsgesellschaft mbH (Hrsg): im Blickpunkt – Deutschlands Elite-Institute: Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPK.HESELHAUS, M.; Ultrapräzisionsbearbeitung von Stahl mit schwingungsunterstützten Diamanten. Seite 54 [http://www.institut-wv.de/fileadmin/iwv\\_files/pdf/96-048\\_ipt\\_fraunhof\\_72dpi.pdf](http://www.institut-wv.de/fileadmin/iwv_files/pdf/96-048_ipt_fraunhof_72dpi.pdf). 15.07.2011
- [33] Institut für Wissenschaftliche Veröffentlichungen in Zusammenarbeit mit ALPHA Informationsgesellschaft mbH (Hrsg): im Blickpunkt – Deutschlands Elite-Institute: Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPK.MERZ, M.; Fast-Tool-Servo-Systeme für Freiformoptiken. Seite 56 [http://www.institut-wv.de/fileadmin/iwv\\_files/pdf/96-048\\_ipt\\_fraunhof\\_72dpi.pdf](http://www.institut-wv.de/fileadmin/iwv_files/pdf/96-048_ipt_fraunhof_72dpi.pdf). 15.07.2011
- [34] Kugler Precision: <http://www.kugler-precision.com/index.php?page=99&modaction=detail&modid=190>. 15.07.2011

- [35] Kugler Precision: <http://www.kugler-precision.com/index.php?page=40&modaction=detail&modid=161>. 15.07.2011
- [36] ätzen.de – Das Branchenportal: Photochemisches Ätzen. <http://www.aetzen.de/text/leiterplatten-aetzen-platinen-aetzen.html>. 28.07.2011
- [37] Etchform BV: Ätzen. <http://www.etchform.de/917-%C3%84tzen>. 01.08.2011
- [38] Micrometal: Unendlich präzise. Firmen-Broschüre. <http://www.micrometal.de/text/1/de/home.html>. 10.08.2011
- [39] Thomas Hey'1 Eisenbahnmodelltechnik TH EMT: Modellbau: Teile anfertigen. <http://www.themt.de/mt-0170-etch-49.html>. 10.08.2011
- [40] Obeko GmbH: <http://www.obeko.de/media/SolGel/SolGel.png>. 12.08.2011
- [41] IWT: <http://diogenes.iwt.uni-bremen.de/wt/wb/solgel/verfahren.php>. 15.08.2011
- [42] InterLotus Nanotechnologie GmbH: <http://www.interlotus.de/3-metall/metall.html>. 17.08.2011
- [43] Hochschule Hof: <http://www.hof-university.de/index.php?id=1823>. 17.08.2011
- [44] Kraus, J.-M.: Sol-Gel-Schichten für Metalloberflächen. <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/themenkanale/produktion/oberflaechentechnik/beschichten/articles/105659/>. 21.08.2011
- [45] InterLotus Nanotechnologie GmbH : Anorganische-organofunktionelle Oberflächenveredelung. <http://www.interlotus.de/3-metall/metall.html>. 17.08.2011
- [46] Raab, C.; Simko, M.; Fiedeler, U.; Nentwich, M.; Gazso, A.: Herstellungsverfahren von Nanopartikeln und Nanomaterialien. ÖAW ITA. Nano trust dossiers Nov. 2008
- [47] [http://fonds.vci.de/ccfolien/fo liens/fo lien\\_123521/HTML\\_SS/Folien\\_123521-Dateien/slide0025\\_image083.jpg](http://fonds.vci.de/ccfolien/fo liens/fo lien_123521/HTML_SS/Folien_123521-Dateien/slide0025_image083.jpg). 29.07.2011
- [48] G. W. P. AG: EDM-Verfahren. <http://www.gwp-ag.de/de/leistungen/prototypenbau/drahterodieren/index.html>. 21.08.2011
- [49] Schöpf, M.: Electro Chemical Discharge Machining (ECDM): Neue Möglichkeiten zum Abrichten metallgebundener Schleifscheiben. Diplomarbeit. TU Wien. 2001
- [50] Tschätsch, H.; Dietrich, J.: Praxis der Zerspantechnik: Verfahren, Werkzeuge, Berechnung. Vieweg+Teubner Verlag. Auflage:9. 2008
- [51] Wintermantel, E.; Ha, S.-W.: Medizintechnik: Life Science Engineering: Life Science Engineering. Interdisziplinarität, Biokompatibilität, Technologien, Implantate, Diagnostik, Werkstoffe, Zertifizierung, Business. Springer Verlag. Auflage: 5. 2009
- [52] LaserRock e.K. Inh. Gerhard Rock: <http://www.laserrock.de/technische-information-zur-lasermarkierung/wodurch-entsteht-die-laserbeschriftung>. 21.08.2011
- [53] Völklein, F.; Zetterer, T.: Praxiswissen Mikrosystemtechnik: Grundlagen-Technologien- Anwendungen. Vieweg+Teubner Verlag. Auflage: 2. 2006
- [54] Kasper, M.: Mikrosystementwurf: Entwurf und Simulationen von Mikrosystemen. Springer Berlin Heidelberg. Auflage: 1. 1999.
- [55] Drescher, R.: MEMS – Herstellung, Bauformen, Realisierung. <http://sus.ziti.uni-heidelberg.de/Lehre/Seminar03/07.pdf>. Seminar MEMS. 2003. Uni Heidelberg. 21.08.2011
- [56] Zengerle, R.: LIGA-Verfahren. [http://www.imtek.de/anwendungen/content/upload/vorlesung/2005/mst\\_09\\_liga.pdf](http://www.imtek.de/anwendungen/content/upload/vorlesung/2005/mst_09_liga.pdf). 17.08.2011

- [57] Kirsch, U.; Degen, R.: Wirtschaftliche Herstellung von Mikrozahnrädern durch galvanische Abformung. [http://www.mikrogetriebe.de/pdf/publications/op\\_2008-02\\_p9-11.pdf](http://www.mikrogetriebe.de/pdf/publications/op_2008-02_p9-11.pdf). 17.08.2011
- [58] Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik: Direkte Laserinterferenzstrukturierung. <http://www.iws.fraunhofer.de/presse/2011/pr1108.html>. 21.08.2011
- [59] Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik: Direkte Laserinterferenzstrukturierung: [http://www.iws.fraunhofer.de/labore/22\\_laserinterferenz\\_01.php](http://www.iws.fraunhofer.de/labore/22_laserinterferenz_01.php). 21.08.2011
- [60] Quitter, D.: Reibungsverlust und Verschleiß von Materialien verringern. [http://www.konstruktionspraxis.vogel.de/index.cfm?pid=49\\_98&pk=287711&print=true&printtype=article#](http://www.konstruktionspraxis.vogel.de/index.cfm?pid=49_98&pk=287711&print=true&printtype=article#). 23.08.2011
- [61] ICT Fraunhofer: Kunststoffbauteile mit Hologrammen durch Sprengprägen: [http://www.ict.fraunhofer.de/kernko/PE/Spritzgiessen\\_und\\_Extrusion/Kunststoffbauteile\\_mit\\_Hologrammen\\_durch\\_Sprengpraegen/index.jsp](http://www.ict.fraunhofer.de/kernko/PE/Spritzgiessen_und_Extrusion/Kunststoffbauteile_mit_Hologrammen_durch_Sprengpraegen/index.jsp). 21.08.2011
- [62] Quitter, D.: Sprengprägen verhindert Technologieklau. Konstruktionspraxis Vogel. 7/2009. <http://www.konstruktionspraxis.vogel.de/themen/werkstoffe/metalle/articles/214724/>. 23.08.2011
- [63] Industrieanzeiger (Hrsg): Sprengprägen: Strukturen und Kopierschutz in Stahl. Ausgabe 25/2008. <http://www.industrieanzeiger.de/themen/-/article/12503/11568317/>. 23.08.2011
- [64] Nachtigall, W.: Bionik – Lernen von der Natur. Beck Verlag. Auflage: 1. 2008
- [65] Feldhaus, B.; Hirt, G.; Klocke, F., Thome, M.: Umformtechniker walzen metallische Haifischhaut. Untersuchung neuer Methoden zur Herstellung strömungsoptimierter Metalloberflächen, in: RWTH Themen (2008), 1, ISSN 0179-079X, S. 62-65
- [66] Rezwan, K.; Imgrund, P.: Biomaterial-Technologie. <http://www.ifam.fraunhofer.de/index.php?seite=/2801/mikrofertigung/mikrospritzguss/>. 02.09.2011
- [67] TiJet Medizintechnik GmbH: [http://www.tijet.de/?Das\\_Verfahren\\_-\\_MIM](http://www.tijet.de/?Das_Verfahren_-_MIM). 02.09.2011
- [68] Schorisch AG: MIM – Metal Injection Moulding. <http://www.schorisch.de/de/aktuelle-news/metal-injection-moulding>. 02.09.2011
- [69] Busse, M.: Pulverbasierte Mikrofertigungstechnologien. [http://www.ifam.fraunhofer.de/2801/fachinfo/spektrum/Produktblatt-2801-DE-Biomaterialtechnologie-pulverbasierte\\_Mikrofertigungstechnologien.pdf](http://www.ifam.fraunhofer.de/2801/fachinfo/spektrum/Produktblatt-2801-DE-Biomaterialtechnologie-pulverbasierte_Mikrofertigungstechnologien.pdf). 03.09.2011
- [70] Brodmann, R.; Hercke, T.: Kenngrößen der Mikrostruktur definiert. QZ Jahrgang 53. 2008. [http://www.vda-qmc.de/fileadmin/redakteur/presse/Kenngroessen\\_der\\_Mikrostruktur\\_definiert.pdf](http://www.vda-qmc.de/fileadmin/redakteur/presse/Kenngroessen_der_Mikrostruktur_definiert.pdf). 03.09.2011
- [71] Gietzelt, T.: Einsatz des Elektropolierens in der Mikrosystemtechnik. <http://www.metano.de/doc/kupfer.pdf>. 04.09.2011
- [72] Institut für biegsame Formgebung der RWTH Aachen: Riblet-Walzen. <http://www.ibf.rwth-aachen.de/index.php?id=560>, 28.09.2011
- [73] Feldhaus, B.; Hirt, G.; Klocke, F.; Thome, M.: Umformtechniker walzen metallische Haifischhaut. RWTH Themen. 1/2008. [http://www.rwth-aachen.de/global/show\\_document.asp?id=aaaaaaaaabfhu](http://www.rwth-aachen.de/global/show_document.asp?id=aaaaaaaaabfhu). 04.09.2011



- [74] Physikalisch-Technische Bundesanstalt PTB:  
[http://www.ptb.de/cms/uploads/RTEmagicC\\_web-tastspitze\\_09.jpg.jpg](http://www.ptb.de/cms/uploads/RTEmagicC_web-tastspitze_09.jpg.jpg). 01.11.2011
- [75] Konfokalmikroskopie: [http://www.konfokalmikroskop.de/Images/messprinzip\\_eines\\_konfokalmikroskops.gif](http://www.konfokalmikroskop.de/Images/messprinzip_eines_konfokalmikroskops.gif). 01.11.2011
- [76] FRT GmbH: Oberflächen zerstörungsfrei und hochauflösend messen: Konfokalmikroskopie. <http://www.konfokalmikroskop.de/>. 01.11.2011
- [77] Opto Surf GmbH: <http://www.optosurf.de/images/stories/Grafiken/Streulichtaufbau.png>. 01.11.2011
- [78] Opto Surf GmbH: Oberflächenmessung in der Fertigung. [http://www.optosurf.de/images/stories/Datenblaetter/Datenblatt\\_OS\\_500\\_3\\_10.pdf](http://www.optosurf.de/images/stories/Datenblaetter/Datenblatt_OS_500_3_10.pdf). 01.11.2011
- [79] Scherkopf eines Elektrorasierers: <http://www.aktuelle-wochenschau.de/2006/images/woche17b/abb2.jpg>. 01.11.2011
- [80] Turbinenschaufel: [http://www.pemtec.de/portals/pemtec/story\\_images/produkte/produkte\\_turbinenrad2.jpg](http://www.pemtec.de/portals/pemtec/story_images/produkte/produkte_turbinenrad2.jpg). 01.11.2011
- [81] Elektropolierter Edelstahl: <http://www.inox-color.com/img/elektropolieren-anwendungen.jpg>. 01.11.2011
- [82] UP-Zerspanung zur metallischen Optik: <http://www.ipk.fraunhofer.de/images/stories/geschaeftsfelder/ps/mpt/up-zerspanung.jpg>. 01.11.2011
- [83] Beispiel für Senkerosion: <http://www.rhyn.ch/images/tmp/Firmenbilder/senkerodierennah.JPG>. 01.11.2011
- [84] Mikrostrukturierung mittels Laser: [http://www.ipt.rwth-aachen.de/fhg/Images/Laserstrukturieren\\_tcm234-134953.jpg](http://www.ipt.rwth-aachen.de/fhg/Images/Laserstrukturieren_tcm234-134953.jpg). 01.11.2011
- [85] Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM: <http://www.ifam.fraunhofer.de/index.php?seite=/2801/mikrofertigung/mikrospritzguss/&lang=de-> 15.10.2011
- [86] Fraunhofer-Institut für chemische Technologie ICT: <http://dz-fokus.fhg.de/images/photos/fopr/spre2.jpg>. 15.10.2011
- [87] Hologramme durch Sprengprägen: [http://www.ict.fraunhofer.de/kernko/PE/Spritzgiessen\\_und\\_Extrusion/Kunststoffbauteile\\_mit\\_Hologrammen\\_durch\\_Sprengpraegen/index.jsp](http://www.ict.fraunhofer.de/kernko/PE/Spritzgiessen_und_Extrusion/Kunststoffbauteile_mit_Hologrammen_durch_Sprengpraegen/index.jsp). 15.11.2011
- [88] Sauer, B.; Steinhilper, W. (Hrsg): Konstruktionselemente des Maschinenbaus 1: Grundlagen der Berechnung und Gestaltung von Maschinenelementen. Springer Verlag. Auflage: 7. 2008
- [89] Gevatter, H.-J.; Grünhaupt, U. (Hrsg.): Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion. Springer Verlag. Auflage: 2. 2006