

# Elektropolieren

Elektrolytisches Glänzen, Glätten und Entgraten von  
Edelstahl, Stahl, Messing, Kupfer, Aluminium, Magnesium und Titan

Dr.-Ing. Dr. rer. nat. Magnus Buhler

2. Auflage mit 113 Abbildungen  
und 4 Tabellen



Fachverlag für

■ Oberflächentechnik –  
Galvanotechnik

■ Produktion von Leiter-  
platten und Systemen

In einem Satz gesagt,  
erscheint es (das chemische Gleichgewicht)  
als allgemeiner Ausdruck  
für das Ende jeder chemischen Reaktion.  
van't Hoff

## Vorwort zur 2. Auflage

2009 erschien die erste Auflage dieses Buches [Buhl, 2009a]. Inzwischen ist sie vergriffen. 2015 habe ich mit der englischen Transkription „Electropolishing – Electrolytic brightening, smoothing and deburring of stainless steel, steel, brass, copper, aluminium, titanium and magnesium“ eine um neuere Erkenntnisse ergänzte Version des Buches verfasst [Buhl, 2015]. Darin habe ich ein paar Aspekte zum Elektropolieren von Magnesium ergänzt. Der Bitte des Leuze Verlags, eine neue Ausgabe meines Buches zu schaffen, bin ich gern nachgekommen. Neuere Erkenntnisse habe ich der Literatur entnommen und – wie in der englischsprachigen Fassung – ein paar Hinweise zum Elektropolieren von Magnesium mit aufgenommen.

Auch wenn sich mein Arbeitsschwerpunkt inzwischen deutlich verlagert hat, komme ich immer wieder gern auf Fragen des Elektropolierens zurück, haben sie doch den Beginn meiner eigenen wissenschaftlichen Arbeit entscheidend geprägt.

Den Leserinnen und Lesern hoffe ich, durch einige Umgliederungen und Umformulierungen, ein optimiertes Fachbuch an die Hand zu geben. Ich würde mich freuen, wenn es dazu beiträgt, dies überaus nützliche Fertigungsverfahren an der einen oder anderen Stelle zum Einsatz zu bringen. Es ermöglicht die Herstellung nanoskopisch und mikroskopisch glatter Oberflächen von Metallen beziehungsweise Legierungen für vielfältige technologische aber auch dekorative Anwendungen von Implantaten über medizinische Apparate und Instrumente sowie Vakuumapparaturen bis hin zu Lampen und Fahrradständern.

Die vorgestellten Versuchsergebnisse können dabei nur Hinweise und Ausgangspunkt für eigene Anpassungen der Abtragparameter an den jeweiligen Anwendungsfall sein. Dazu wünsche ich den Fachkräften, die selber das Verfahren anwenden oder ausprobieren wollen, Freude an und mit dem Buch sowie dem Fertigungsverfahren Elektropolieren.

Bremen, im Januar 2017  
Magnus Buhlert

## 2 Zum Fertigungsverfahren

### 2.1 Einordnung des Fertigungsverfahrens

In der Fertigungstechnik hat sich die Einordnung der Fertigungsverfahren anhand der Wirkpaarungen und Wirkmechanismen als vorteilhaft erwiesen. Standardmäßig werden die Verfahren nach DIN 8580 und 8590 eingeordnet.

Beim Elektropolieren wird die Oberfläche von metallischen Werkstücken elektrochemisch abgetragen. Dabei werden Metallionen vom Werkstück abgetrennt. Entsprechend gehört das Elektropolieren beziehungsweise elektrochemische Glänzen respektive Glätten zu den trennenden Fertigungsverfahren (*Abb. 1*).

Da das Material beim Elektropolieren durch elektrochemisches Abtragen vom Werkstück abgetrennt wird, wird das Verfahren in die Gruppe der Abtragenden Fertigungsverfahren eingeordnet. Da der Abtrag elektrochemisch mit äußerer Stromquelle erfolgt ist das Verfahren der entsprechenden Untergruppe zuzuordnen. Da lediglich die Oberfläche des Werkstückes abgetragen wird und es Ziel des Elektropolierens ist die Oberflächengüte

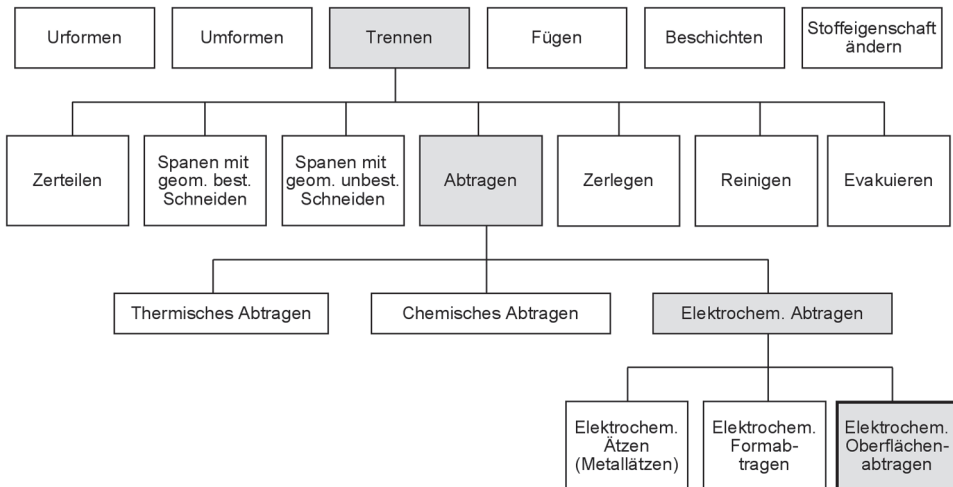


Abb. 1: Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8590

auf die eine oder andere Weise zu verbessern wird das Verfahren dem elektrochemischen Oberflächenabtragen zugeordnet.

Dass eine Einordnung der elektrochemischen Abtragverfahren anhand anlagen- beziehungsweise fertigungsverfahrenstechnischer Gesichtspunkte erfolgen kann, zeigte der Entwurf der VDI-Richtlinie 3401 (Abb. 2).

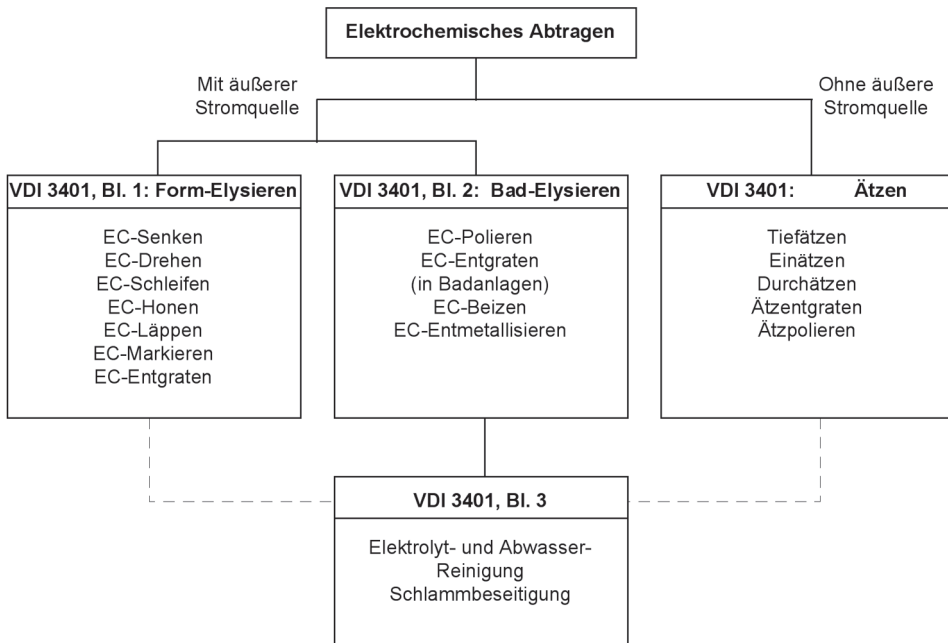


Abb. 2: Einordnung der elektrochemischen Abtragverfahren nach einem Entwurf der VDI-Richtlinie 3401

In einem Entwurf der VDI-Richtlinie 3401 erfolgt die Unterteilung der elektrochemischen Abtragverfahren anhand der Frage, ob eine äußere Stromquelle nötig ist oder nicht. Die Verfahren, die wie das Elektropolieren oder elektrochemische Polieren (EC-Polieren) einer Fremdstromquelle bedürfen, werden ihrerseits weiter unterteilt. Kriterium ist hier, ob ein formgebendes, spanendes Abtragverfahren elektrochemisch unterstützt wird wie beispielsweise das Läppen beim elektrochemischen Läppen (EC-Läppen) oder ob der Abtrag in einem Elektrolytbad erfolgt, sprich ob die Fertigung eher den Verfahren der Galvanotechnik entspricht. Hier wird also nicht wie in der DIN-Norm entsprechend dem Ziel der Fertigung, Formgebung oder Oberflächenabtrag, sondern entsprechend der verschiedenen Anlagencharakteristika unterschieden.

Die Unterteilung der Verfahren mit äußerer Stromquelle in solche bei denen der Abtrag der Oberfläche das Ziel ist und solche bei denen die Formgebung angestrebt wird, wirft

allerdings die Frage auf, warum die Verfahren, die ohne äußere Stromquelle auskommen nicht auch hinsichtlich der Zielsetzungen der Fertigung unterschieden werden.

## 2.2 Elektrochemische Reaktionen

### 2.2.1 Anodenreaktionen

In diesem Abschnitt werden die beim anodischen Glätzen beziehungsweise Glätten ablaufenden elektrochemischen Gesamtreaktionen wiedergegeben. Die Wertigkeit, mit der die Metalle beim Abtragen in Lösung gehen ist unter anderem für die Bestimmung des Wirkungsgrades der Abtragreaktionen von Bedeutung. Zunächst sind in diesem Abschnitt die Gesamtreaktionen für die beim Elektropolieren auftretenden Abtragreaktionen wiedergegeben. Anschließend wird die Bildung von Sauerstoff an der Anode beim transpassiven Elektropolieren diskutiert.

#### 2.2.1.1 Klassische Vorstellung zur Metallauflösung

Bevor allerdings auf die konkreten Gesamtreaktionen eingegangen wird, soll an dieser Stelle zunächst die klassische Vorstellung des Vorgangs der Metallauflösung wiedergegeben werden. Ob diese allerdings auch für hochkonzentrierte Elektrolyte zutrifft, wie sie beim Elektropolieren eingesetzt werden, kann nicht gesagt werden. Es darf aber begründet vermutet werden, dass in diesen Fällen die Reaktionen weit komplizierter sind. Inwieweit

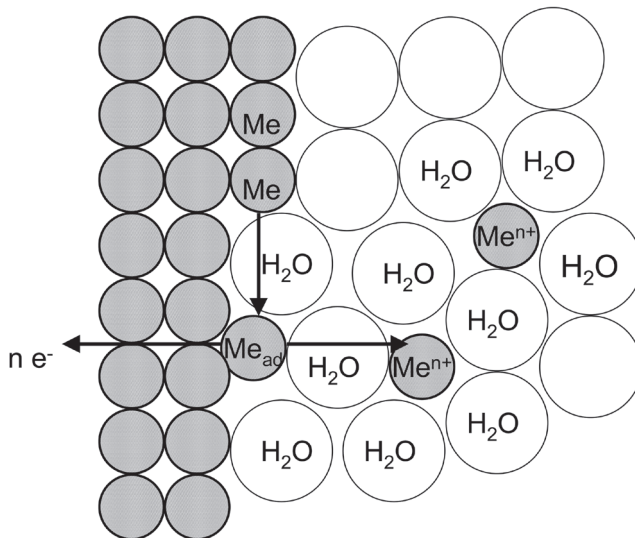


Abb. 3: Auflösung von Metallen mit Ad-Atom als Zwischenschritt beim Übergang vom Gitteratom zum hydratisierten Ion

sich dies auf hochkonzentrierte Polierbäder übertragen lässt, ist auch heute noch eine offene Frage. Solange allerdings Theorien für hochkonzentrierte Elektrolyte und die darin ablaufenden Reaktionen fehlen, hilft die Vorstellung zum Verständnis der Vorgänge.

Nach *Kaesche* [KAE, 1979] vollzieht sich im anodischen Teil der elektrolytischen Halbzelle die Metallauflösung in mehreren Teilschritten (*Abb. 3*). Im ersten Schritt werden an die Metalloberfläche grenzende Gitteratome in adsorbierte Atome umgewandelt. Diese sind im Gegensatz zu den im Gitter gebundenen Atomen auf der Oberfläche seitlich beweglich.



Danach folgt der Durchtritt durch die Doppelschicht. Dabei werden Valenzelektronen abgegeben. Entsprechend erfolgt der Durchtritt als Ion.



Bei Metallen, die in mehreren Oxidationsstufen vorkommen, geschieht die Abgabe der Valenzelektronen meistens in mehreren Schritten. So wird beispielsweise Kupfer zuerst zu  $\text{Cu}^{+}$  und anschließend zu  $\text{Cu}^{2+}$  oxidiert [HAM, 1985].

In einem weiteren Schritt werden die Metallionen (durch Migration und Diffusion und bei größerer Entfernung von der Oberfläche auch durch Konvektion) in das Lösungsinere transportiert. In wässrigen Lösungen werden Metallionen dabei hydratisiert, das heißt sie werden dabei vollständig von Wassermolekülen umgeben.



### 2.2.1.2 Edelmetall und Stahl

Üblich ist das elektrochemische Glänzen, Glätten und Entgraten von Edelmetall in Gemischen aus Mineralsäuren. Gebräuchlich sind Elektrolyte auf Basis von Phosphor- und Schwefelsäure. Beim elektrochemischen Abtrag von Edelmetall in derartigen Elektrolyten gehen die Eisen- und Chromionen dreiwertig in Lösung. Zweiwertig gehen Nickelionen in Lösung [Buhl, 2000]. Die Reaktionsgleichungen lauten:



Wie Untersuchungen deutlich gezeigt haben, kann Stahl im Prinzip in denselben Elektrolyten wie Edelmetall elektrolytisch werden [BUHL, 2003k; BUHL, 2003l; BUHL, 2004a; BUHL, 2004h]. Bei der Auflösung von Stahl laufen, so kann begründet angenommen werden, dieselben Reaktionen ab, wie bei der Auflösung von Edelmetall. Die oben aufgeführten Legierungselemente gehen dabei mit derselben Wertigkeit in Lösung.

### 2.2.1.3 Messing und Kupfer

Beim Elektrolytieren von Kupfer und Messing in Elektrolyten aus Phosphorsäure, Wasser und Alkoholen geht Kupfer zweiwertig in Lösung. Die Reaktion kann und wird dabei in

## 3 Einfluss verschiedener Parameter beim Elektropolieren

### 3.1 Darstellung des Fertigungsablaufs

Bevor die verschiedenen Einflüsse diverser Einstellparameter erläutert werden, scheint es sinnvoll einen Überblick über den Fertigungsablauf des Elektropolierens zu geben. *Abbildung 29* zeigt den Ablauf des Elektropolierens beziehungsweise elektrolytischen Glänzens respektive Glättens.

Da es sich beim Elektropolieren um ein elektrochemisches Abtragverfahren handelt, ist es erforderlich, dass die gesamte Oberfläche, die bearbeitet werden soll, elektrisch leitend ist. Daher sind die metallischen Werkstücke vor Beginn des eigentlichen Elektropolierens zu entfetten und von Schmutz zu befreien. Dies kann wie in der Galvanotechnik üblich durch Waschen in wässrigen Seifenlösungen, Laugen und/oder in Lösungsmitteln wie Isopropanol (2-Propanol) oder Azeton erfolgen. Bei der Auswahl ist zu beachten, dass die aus Umweltsicht mildesten Mittel eingesetzt werden sollten, die das gewünschte Ergebnis erbringen. In der Regel ist ein Spülen im Anschluss an diesen Fertigungsschritt nicht erforderlich. Allerdings kann ein Trocknen im Anschluss angezeigt sein, damit erforderlichenfalls mechanisches Bearbeiten ohne Eintrag der genutzten Mittel möglich ist und damit falls dieser Schritt ausgelassen wird nicht mehr als verträglich Flüssigkeit in die Beizlösungen oder – falls auch dies nicht nötig ist – in die Elektropolierlösung eingetragen wird.

Ist die Oberfläche nicht zum direkten Elektropolieren geeignet, kann ein Beizen oder ein andersartiges elektrochemisches Abtragen (Ätzen, elektrolytisches Ätzen) genutzt werden, um störende Oberflächenschichten abzutragen. Dabei sollte das Beizen nur so lange erfolgen, wie erforderlich, um die Beizbäder nicht unnötig zu verbrauchen und das Werkstück nicht unnötig aufzurauen. Es können die aus der Galvanotechnik bekannten Beizverfahren eingesetzt werden [BUHL, 2004h], siehe auch *Kapitel 3.2.2.2*. Vorteilhafter Weise werden dabei Lösungen eingesetzt, die ähnliche Chemikalien enthalten wie der eigentliche Elektropolierelektrolyt. Eingesetzt werden chemische und/oder elektrochemische Beizverfahren.

Ist ein Eintrag von Chemikalien in das Polierbad zu vermeiden, so ist ein anschließendes Spülen (gegebenenfalls eine Kaskadenspülung) und Trocknen angezeigt. In etlichen Fällen kann auf das Beizen in einem separaten Elektrolyten verzichtet werden. Ist dennoch ein Beizen gefordert und kann nicht direkt elektropoliert werden, dann kann oftmals im

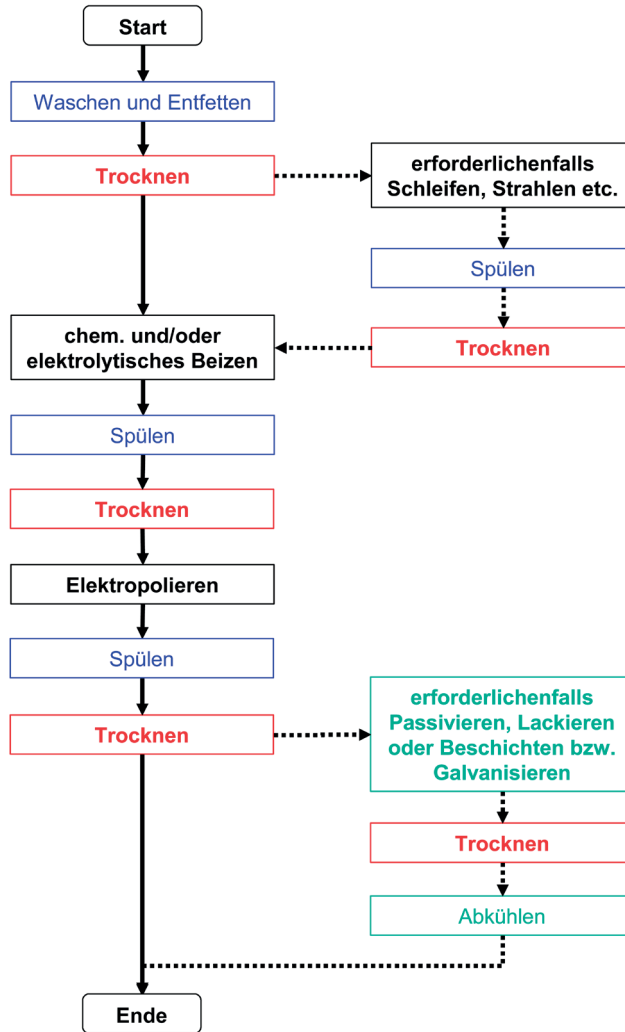


Abb. 29: Möglicher Ablauf des Elektropolierens von Metallen

Elektropolierelektrolyten elektrolytisch gebeizt werden. Dies geschieht indem Strom beziehungsweise Spannung so gewählt werden, dass das Metall aktiv anodisch abgetragen wird. Das heißt: Es wird eine Stromdichte gewählt, die einen aktiven Abtrag des Metalls ermöglicht. Dann kann auf das Überheben verzichtet werden und es kann kein Elektrolytübertrag stattfinden. Ein derartiges Vorgehen ist beispielsweise beim Elektropolieren von Stahl möglich [BUHL, 2004h] und wird in *Kapitel 6.3* erläutert.

Ist die Oberfläche vor dem Elektropolieren zu rau und/oder verzundert oder dergleichen, so kann unter Umständen Beizen allein nicht ausreichen. Dann ist ein mechanisches Be-



arbeiten angezeigt. Dies ist ebenso erforderlich, wenn die Oberflächen einer Materialcharge ungleichmäßig oder vergleichbare Proben für Optimierungsuntersuchungen herzustellen sind beziehungsweise vergleichbare Werkstückoberflächen erzeugt werden müssen. Bei der mechanischen Bearbeitung ist darauf zu achten, dass Schleifmittel und dergleichen nicht eingearbeitet werden oder erforderlichenfalls anschließend von der Oberfläche entfernt werden. Gegebenenfalls müssen die Proben getrocknet werden. Es kann aber auch ein einfaches Ablaufen lassen des Mediums ausreichen mit dem gespült wird.

Ist das Werkstück ausreichend vorbehandelt, so kann es in den Elektropolier-elektrolyten eingetaucht werden (außer es ist dort schon, weil es dort gebeizt wurde). Das Einsetzen erfolgt in den allermeisten Fällen stromlos. Nur wenn das Metall aufgrund einer entsprechenden Wirkpaarung sonst einem Ätzangriff ausgesetzt wäre, wird in der Regel unter Strom eingesetzt.

Die Stromdichte wird dabei entweder gleich auf die gewünschte Höhe eingestellt oder es wird eine höherer beziehungsweise tieferer Stromdichte gewählt, die dann schlussendlich zur gewünschten Höhe hin geregelt wird. In den allermeisten Fällen werden die Werkstücke mit konstantem Gleichstrom (galvanostatisch) abgetragen. Bekannt sind aber auch Elektropolierverfahren mit gepulsten Strömen oder mit Unterbrechungen des elektrochemischen Glänzens beziehungsweise Glättens. *Abbildung 30* zeigt den Blick in eine elektrochemische Zelle zum Elektropolieren. Deutlich ist Gasbildung zu erkennen.

Beim Bearbeiten ist insbesondere auf das Einhalten der gewünschten Elektrolyttemperatur zu achten. Kühlen oder Erwärmen können nötig sein. Nur wenige Verfahren arbeiten bei Raumtemperatur. Durch den Stromfluss entsteht in jedem Fall Wärme im Elektrolyten, die



Abb. 30: Blick in ein Elektrolytbad für das Elektropolieren von Edelstahl. Die Schaumbildung beruht auf der Bildung von Sauerstoff am Werkstück (Anode) und Wasserstoff an der Kathode

bei Verfahren, die deutlich über Raumtemperatur arbeiten, mit zur Elektrolyterwärmung genutzt werden kann. Das Abtragen sollte nur so lange durchgeführt werden, wie es erforderlich ist, um das gewünschte Fertigungsergebnis mit der geforderten Sicherheit zu erzielen.

Wird der Polierelektrolyt länger eingesetzt, so ist darauf zu achten, dass seine Zusammensetzung sich im vorher anhand von gewünschten Fertigungsergebnissen festgelegten Rahmen bewegt. Dabei sind Ein- und Austrag von Elektrolyt sowie Verdampfungsverluste erforderlichenfalls in geeigneter Weise auszugleichen. Auch reichern sich Metallionen im Elektrolyten an, so dass ein Teilaustausch von Elektrolyt nötig sein kann.

Im Anschluss an den Poliervorgang schließt sich ein Spülvorgang an. Häufig bieten sich hier Kaskadenspülungen an, da sie einen geringen Wasserverbrauch aufweisen. Genutzte Spülwässer können, wenn von der Chemie her möglich, zum Ergänzen von Elektrolytverlusten verwendet werden. Das abschließende Spülen erfolgt zumeist mit vollentsalztem beziehungsweise deionisiertem Wasser. Dies hilft zu vermeiden, dass Ionen auf dem metallischen Werkstück verbleiben, die die Korrosion des elektropolieren Bauteils begünstigen würden. Bei einigen Polierelektrolyten ist darauf zu achten, dass sie nach dem Elektropolieren nicht zu lange auf dem Werkstück verbleiben, da sie im stromlosen Zustand weiter reagieren und unter Umständen das Fertigungsergebnis zunichtemachen. Dies geschieht beispielsweise bei Einsatz einiger Aluminiumelektrolyte, siehe hierzu *Kapitel 6.5.1*.

Beim anschließenden Trocknen sollte tunlichst vermieden werden, dass Trockenflecken entstehen.

Ist das Elektropolieren nicht das finale Oberflächenbehandlungsverfahren, so können sich andere Verfahren anschließen. Einerseits wird Elektropolieren genutzt, um metallische Werkstücke für ein anschließendes Galvanisieren vorzubereiten. Andererseits entspricht bei einigen Metallen die Korrosionsbeständigkeit nicht den an die Oberflächen für bestimmte Einsatzfälle gestellten Anforderungen. Dann kann die elektrolytisch geglänzte Oberfläche durch anschließendes Beschichten vor Korrosion geschützt werden [BUHL, 2004e; BUHL, 2004f; BUHL, 2004h]. Hierfür bieten sich zum Beispiel transparente Pulverlacke an. Sind diese eingefärbt, so kann das Spektrum der dekorativen Farben erweitert werden, siehe *Kapitel 2.8* und *6.3.2*.

## **3.2 Übersicht über Einflussparameter beim Elektropolieren**

### **3.2.1 Einteilung der verschiedenen Einflussparameter**

Die vielfältigen Einflussparameter beim Elektropolieren und beim Elektrostrukturieren können grob in anlagen-, elektrolyt- sowie werkstückseitige Parameter unterteilt werden (*Abb. 31*). Wobei sie hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf das elektrolytische Glätten, Glänzen beziehungsweise Entgraten verschieden (stark) wirken können und je nach gewünschtem Fertigungsergebnis optimiert werden müssen. Die verschiedenen Einflussparameter sind verantwortlich für das sich einstellende Anodenpotenzial, das Bilden von