

## Branche

IFR ehrt Mitgestalterin für die  
Zukunft der Robotik Seite 09

## Fertigung + Produktion

In sauerstofffreier Atmosphäre  
produzieren Seite 32

## Schweißen + Schneiden

Hightech-Bauteile präzise  
und effizient schweißen Seite 50

Oberflächentechnik

## Verschleiß mindern durch hochfeste Beschichtungen

**CDVS**  
TECHNOLOGY  
GROUP

Besuchen Sie uns auf der  
EuroBrake, Spain  
03.-05.06.2025, Stand E02

# Nichtrostenden Stahl oberflächenschonend schleifen

Bei der Anwendung von nichtrostenden Stählen ist die Oberfläche entscheidend. Dabei sind neben der finalen Oberflächenbearbeitung auch die vorhergehenden Bearbeitungsschritte relevant, um eine möglichst hohe Korrosionsbeständigkeit und ein reduziertes Anhaftungsverhalten von Partikeln und anderen Medien zu erzielen.

Für Edelstahloberflächen bestehen hohe Anforderungen insbesondere an deren Korrosionsbeständigkeit, aber auch an das optische Erscheinungsbild und den Widerstand gegen mechanische Beschädigung. Ein weiteres Qualitätskriterium stellen die chemischen und im Speziellen auch die physikalischen Eigenschaften der Oberflächen dar. So sollen die Oberflächen möglichst wenig verschmutzen beziehungsweise leicht zu reinigen sein. Die Bindungskräfte zwischen der Oberfläche und den sie umgebenden Medien spielen hier, aber auch beispielsweise beim Kleben oder im Kontakt mit Fremdstoffen sowie bei der Förderung und Lagerung von Pulvern, Flüssigkeiten und/oder Pasten eine wichtige Rolle. Die Qualitätsbeurteilung der Oberfläche erfolgt in der Regel über das optische Er-

scheinungsbild, teilweise auch in Verbindung mit der angewandten Körnung des Schleifkorns bei der Oberflächenbearbeitung oder über die taktil erfasste Rauigkeit der Edelstahloberflächen. Meist wird hierzu der Ra-Wert zur Beurteilung herangezogen. Schon bei der elementaren Eigenschaft der nichtrostenden Stähle – der Korrosionsbeständigkeit – zeigt sich, dass dieses Qualitätskriterium hier nicht ausreicht. Ein Einfluss zwischen der Rauigkeit der Oberfläche und der Korrosionsbeständigkeit von nichtrostendem Stahl ist zwar grundsätzlich gegeben (*Bild 1* und *Bild 2*), dieser wird allerdings von weiteren Einflüssen überlagert. Solche Einflüsse stellen beispielsweise geometrische Defekte in der Oberfläche, wie Spalten oder Materialüberlagerungen, dar. Solche Defekte sind bei geschliffenen Oberflächen häufig zu be-

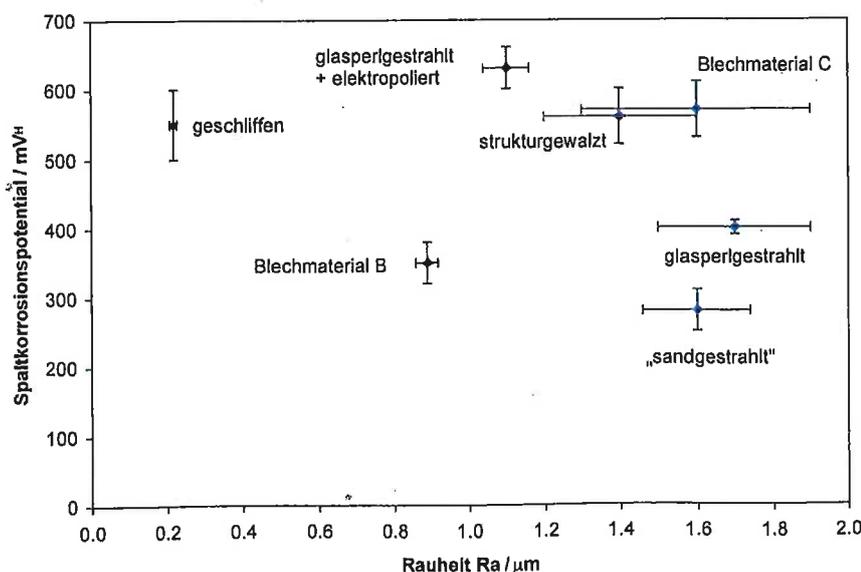
obachten (*Bild 3*) und werden durch den Ra-Wert der Oberfläche nicht ausreichend repräsentativ erfasst.

## Der Einfluss des oberflächennahen Gefüges

Ein weiterer, oft unterschätzter Einfluss auf die Oberflächeneigenschaften ist durch den Zustand des oberflächennahen Gefüges gegeben [5, 6]. Das vorliegende Gefüge direkt unterhalb der Oberfläche beeinflusst die Entstehung und die Stabilität der Passivschicht und somit auch die Korrosionsbeständigkeit erheblich [3]. Zudem werden durch die oberflächennahe Gefügestruktur die physikalischen Eigenschaften – zum Beispiel Bindungskräfte respektive die Oberflächenenergie – wesentlich beeinflusst.

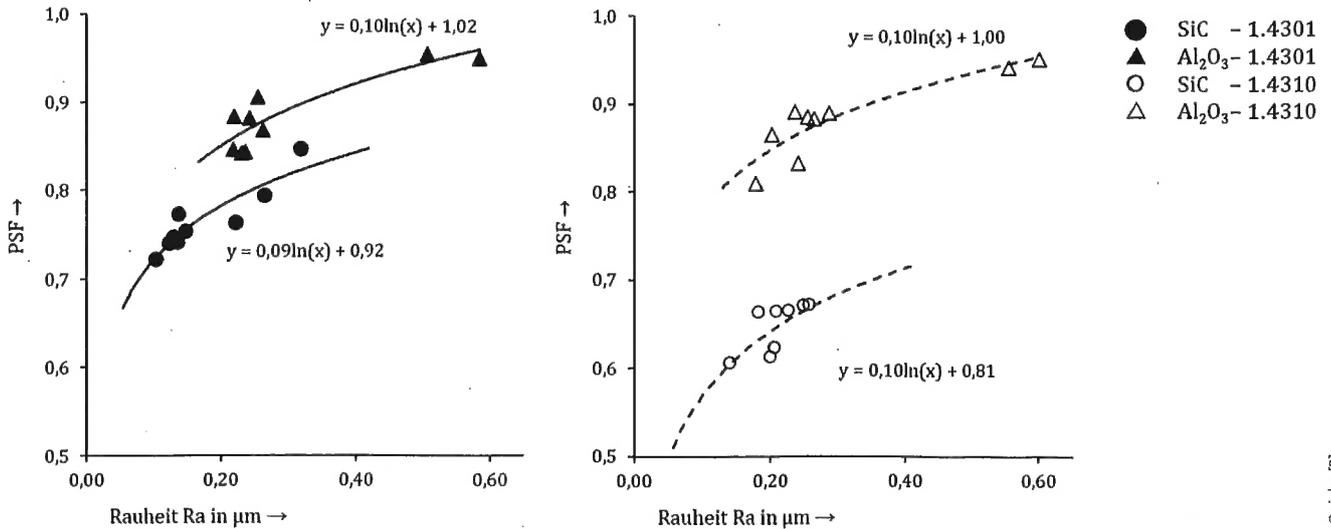
Bei der mechanischen Endbearbeitung wie Kaltumformung, spanender Bearbeitung und mechanischen Poliervorgängen an Edelstahloberflächen wird der oberflächennahe Gefügebereich erheblich verändert. Hohe Spannungen und Verschiebungen unmittelbar unter der Oberfläche führen zu einer gestörten Zone im Metallgitter mit einer erhöhten Zahl an Gitterfehlern, einer ungleichmäßigen Spannungsverteilung sowie zu einer sehr dünnen, oberen Schicht, der sogenannten Beilby-Schicht mit teilweise aufgelöster, genauer formuliert amorphisierter Struktur und eingepresstem Fremdmaterial. In dem gesamten Störungsfeld „Bearbeitete Schicht“ und „Beilby-Schicht“ (*Bild 4*) liegen deutlich mehr Gitterfehler und Gitterinhomogenitäten vor als im Grundmaterial.

Aufgrund der großen Dickenunterschiede wird dieses Störungsfeld aus verändertem Gitter zusammen mit der extrem dünnen Beilby-Schicht nachfolgend ganzheitlich betrachtet. Die Dicke dieses Störungsfeldes



**Bild 1** > Spaltkorrosionspotenziale gegen Oberflächenrauheitswert Ra von nichtrostenden Stahlproben 1.4301 mit unterschiedlicher Oberfläche (Fehlerbalken stellen die Standardabweichung dar) [1].

© siehe [1]



**Bild 2** > Errechneter PSF (pitting susceptibility factor) nach Klapper et al. über die taktile gemessene Oberflächenrauheit Ra für industriell geschliffene Oberflächenausführungen mit errechneter logarithmischer Trendlinie (links: Werkstoff 1.4301/AISI304, rechts: Werkstoff 1.4310/AISI310) [2].

kann je nach der angewandten Oberflächenbearbeitung stark variieren. Während sich die Beilby-Schicht relativ leicht durch Elektropolieren komplett beseitigen lässt, erscheint dies bei der „Bearbeiteten Schicht“ (Bild 4) kaum möglich, weil dieser gestörte Gitterbereich hierfür meist zu dick ist. Der gestörte Gitterbereich kann auch nicht durch eine Nachbehandlung wieder in einen gleichgewichtsnahen Zustand gebracht werden, da sich die hierzu notwendigen Glühtemperaturen bei Fertigteilen nicht ohne erhebliche Nachteile realisieren lassen. Das Ziel bei der finalen Gestaltung einer Edelstahloberfläche sollte daher darin bestehen, dass die Dicke und der Schädigungsgrad in dieser gestörten Zone möglichst gering sind. Das ist durch eine schonende Oberflächenbearbeitung,

etwa durch ein feines Schleifen mit geringeren Kräften und feinem Schleifkorn, möglich.

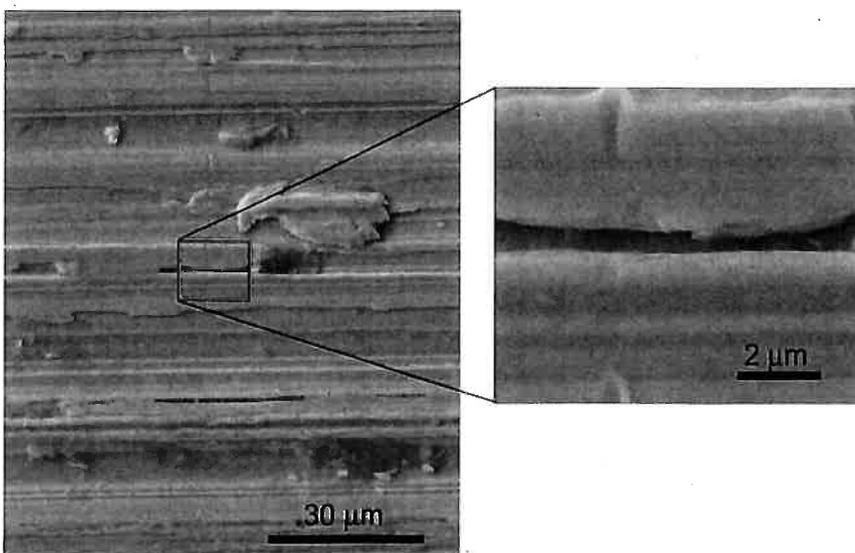
### Der Hebel der Anpresskraft beim Schleifprozess

Wie beispielsweise allein durch die Anpresskraft beim Schleifprozess die Oberfläche topografie verändert wird, zeigen die Untersuchungen von Burkert, Klapper und Lehmann (Bild 5). Neben den erheblichen Topografieunterschieden, die durch den unterschiedlichen Anpressdruck ausgelöst werden, haben elektrochemische Rauschmessungen gezeigt, dass die Wahrscheinlichkeit für die Entstehung von Lochfraß an Proben etwa um die Hälfte niedriger ist, wenn sie mit normalem statt hohem

Schleifdruck geschliffen wurden. Insgesamt verbleiben nach dem Schleifen zahlreiche Oberflächendefekte wie Spalten oder Materialüberlappungen (Bild 3), die sich negativ auf die Korrosionsbeständigkeit auswirken. Außerdem wird das Gefüge beim Schleifen unterhalb der Zerspannungszone insbesondere bei dem hohen Anpressdruck sehr stark verändert und mit Fehlern respektive Versetzungen angereichert. Das dabei entstehende Störungsfeld nimmt ebenfalls Einfluss auf die Korrosionsbeständigkeit.

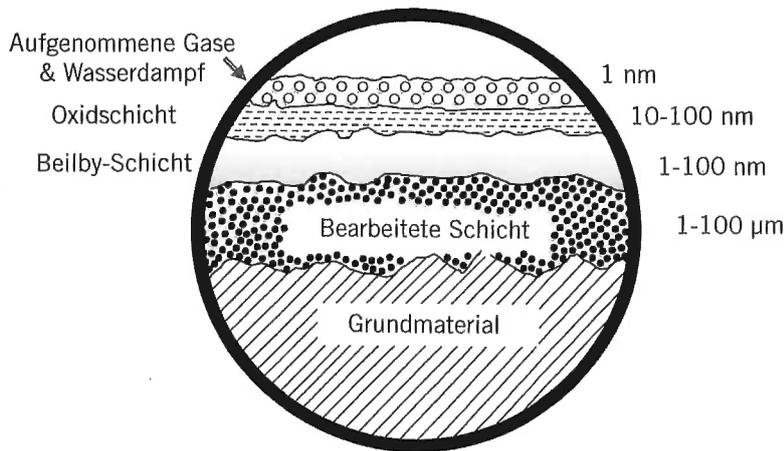
Wie und wo dieses Störungsfeld im Gefüge unterhalb der Zerspannungszone entsteht, hängt von der Art der Oberflächenbearbeitung und den gewählten Bearbeitungsparametern ab. Bei der Spanbildung gibt es immer eine Verformungszone (elastisch und plastisch) unterhalb der Oberfläche, was letztendlich zu den gestörten Gefügebereichen führt. Wie tief und ausgeprägt diese Zone ist, hängt von den Zerspannungsbedingungen, aber auch von den mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs, insbesondere von dessen Festigkeit und Duktilität, ab [5].

Geschliffene Oberflächen sind im Korrosionsverhalten den vom Stahlhersteller angelieferten, gewalzten und geglühten Oberflächen daher oft unterlegen. Bei der Halbzeugherstellung wird durch eine Abschlussglühung das Gefüge rekristallisiert. Das oberflächennahe Gefüge ist so nicht mehr im Ungleichgewicht. Selbst bei einem finalen dekorativen Schliff von Stahlblechen sind die Schleifparameter optimal eingestellt und mit den Bedingungen in der Endbearbeitung an geometrisch oft schwierigen Fertigteilen meist nicht vergleichbar. Bezüglich der Korrosionsbestän-



**Bild 3** > REM-Aufnahme einer geschliffenen Oberfläche des Werkstoffs 1.4301 / 304 mit Darstellung eines Mikrospalts [2].

© siehe [2]



**Bild 4** > Schichtaufbau an einer bearbeiteten Metalloberfläche [4].

digkeit lassen sich negative geometrische Einflüsse der geschliffenen Oberfläche durch Elektropolieren und/oder entsprechende Passivierungsverfahren wieder abmildern – die Gefügeveränderung unterhalb der Oberfläche und deren Einfluss auf die physikalischen Eigenschaften bleiben dabei allerdings erhalten.

**Optimized-Grind-Finishing-Verfahren**

Eine besondere Herausforderung stellen hier Komponenten im Behälter- und Apparatebau dar, die aufgrund einer kompakten Baugröße in Verbindung mit weiteren spezifischen Anforderungen in der Regel händisch geschliffen werden, da die Innenflächen oft nur schwer zugänglich sind. Gleichzeitig werden oft sehr hohe Anforderungen hinsichtlich Reinigbarkeit und Korrosionsbeständigkeit der entsprechenden Komponenten gestellt, sodass akuter Verbesserungsbedarf besteht. Hier setzt die Oberflächenoptimierung im Bereich der Behälter- und Fassherstellung an. Bei der Firma Bolz Intec wird die Innenbearbeitung an Fässern und Behältern mit einem neuen Fertigungsverfahren, dem OGF (Optimized Grind Finishing)-Verfahren durchgeführt. Anstatt eines intensiven Schleifabtrags wird mit kleineren Anpresskräften und feineren Schleifmitteln über einen längeren Zeitraum gearbeitet. So wird das Gefüge unterhalb der Oberfläche weniger tief und weniger intensiv verändert. Eine Nachbearbeitung durch Elektropolieren wird auch im Rahmen des OGF-Verfahrens vorgenommen, wobei schon ein geringerer elektrochemischer Abtrag zu guten Ergebnissen führt. Für die Betrachtung der Eigenschaften einer Oberfläche, die aus einer Interaktion mit der Umgebung resultiert – man spricht hier von Systemeigenschaften –, ist es entscheidend, wie der Werkstoff an der Oberfläche und in den oberflächennahen Berei-

chen aufgebaut ist und welche chemischen sowie physikalischen Eigenschaften daraus resultieren. Systemeigenschaften wie die Korrosionsbeständigkeit, die Anhaftung von Fremdstoffen oder das Reinigungsverhalten sind sehr wichtig für alle Bauteile, die in sensiblen Anwendungsgebieten eingesetzt werden. So bleiben beispielsweise feinste Partikel an den Wänden von Transportbehältern haften, wenn die wirkenden Bindungsmechanismen – etwa Van-der-Waals-Kräfte – größer sind als die Gewichtskraft, die auf die Partikel aufgrund von deren Masse einwirkt.

**Van-der-Waals-Kräfte**

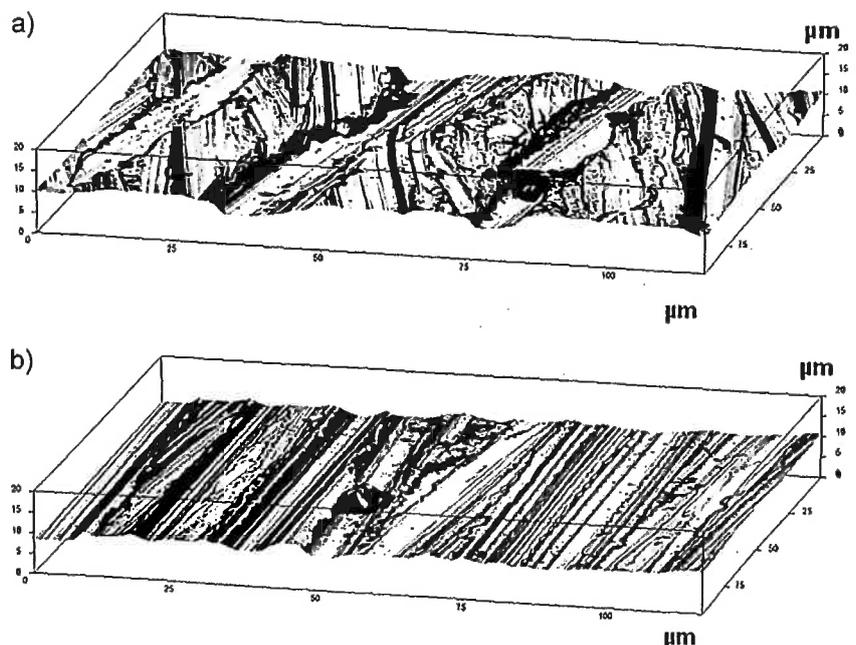
Unter Van-der-Waals-Kräften sind schwächere Anziehungskräfte zwischen Atomen und/oder Molekülen zu verstehen,

die spontan beziehungsweise temporär Dipole entwickeln. Die Van-der-Waals-Kräfte entstehen aus schwachen nicht-kovalenten Wechselwirkungen, die im Gegensatz zu den stärkeren metallischen, ionischen oder kovalenten Bindungen nicht auf einem dauerhaften Austausch von Elektronen aufbauen, sondern auf Anziehungskräften zwischen zwei induzierten Dipolen basieren. Ein Grund hierfür ist möglicherweise eine unsymmetrische Verteilung von negativen Ladungsträgern in den Atomen. Dabei liegt ein Dipol spontan beziehungsweise temporär vor und der andere wird induziert.

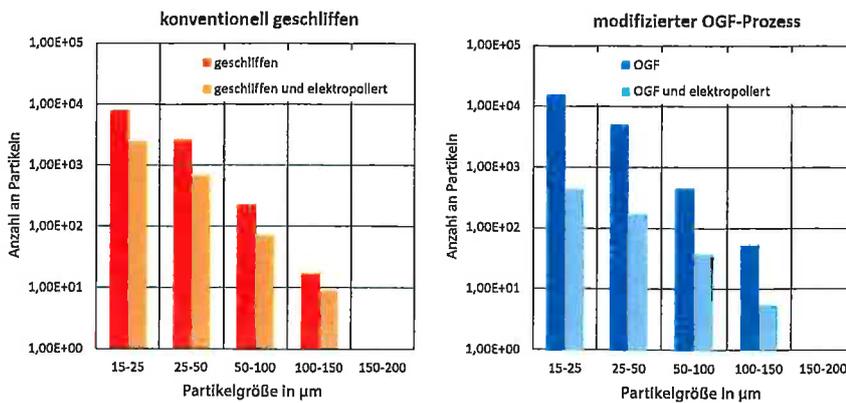
Durch die ungleiche Ladungsverteilung ziehen sich dann die entgegengesetzt geladenen Bereiche der Stoffe an und es entstehen Haftkräfte. Der Schluss liegt nahe, dass diese Kräfte durch den Ordnungszustand im Gitter zumindest über sehr kleine Distanzen beeinflusst werden. Je mehr Unordnung in der Gitterstruktur herrscht, umso leichter entstehen Dipole, die wiederum für die Van-der-Waals-Kräfte verantwortlich sind.

**Einfluss des OGF-Verfahrens auf die Partikelhaftung**

Eine erste Einschätzung zum Einfluss des OGF-Verfahrens auf die Partikelanhaftung lieferten Restschmutzanalysen. Ein vergleichender Versuch in Anlehnung an die Normen VDA19.1 (März 2015) sowie ISO 16232 (Dezember 2018) wies nach, dass durch die Bearbeitung nach dieser Me-



**Bild 5** > Oberflächentopografie von Edelstahl nach mechanischem Schleifen mit hohem Schleifdruck a) und normalem Schleifdruck b) [6].



**Bild 6** > Anzahl der an der Oberfläche haftenden Partikel in Abhängigkeit von der Partikelgröße für konventionell mechanisch bearbeitete Oberflächen und Oberflächen, die im automatisierten Gleitschleifverfahren (OGF) bearbeitet wurden – jeweils mit und ohne anschließendem Elektropolieren der Bauteiloberfläche.

thode die Anhaftung von Restmaterial deutlich reduziert wird (Bild 6). Die Auswertung bezieht sich auf die Anwendung des OGF-Verfahrens durch das Unternehmen Bolz Intec, das einen neuen Weg zur Verbesserung seiner Produkte suchte. Das Elektropolieren führt sowohl an der konventionell mechanisch bearbeiteten als auch bei der OGF-bearbeiteten Oberfläche zu einer Reduzierung der anhaftenden Partikel. Ein direkter Vergleich der finalen elektropolierten Oberflächen zeigt jedoch, dass die OGF-bearbeitete Oberfläche insbesondere bei den kleineren Partikelgrößen deutlich weniger anhaftende Partikel aufweist. So liegt für die Partikelgröße 15 bis 25 µm der Durchschnitt bei 2.442 bis 440 Partikeln (Reduzierung um etwa 82 %) und für die Partikelgröße 25 bis 50 µm bei 693 bis 172 Partikeln (Reduzierung um etwa 75 %).

Dass derartige Effekte im praktischen Einsatz auftreten, lässt sich durch erste Erfahrungen bei den Anwendern belegen. So zeigten Beobachtungen unter anderem eine verbesserte Fließgeschwindigkeit und weniger Anhaftung bei viskosen Medikamentenformulierungen, was zu einer 30%igen Reduktion der Reinigungszeit führte. Ebenso ließen sich beim Transport und Handling von Farbpigmenten und sonstigen Pulvern Verbesserungen erzielen und beispielsweise die Kontaminationsgefahr und Materialverluste reduzieren.

Die Anwendung dieses Verfahrens bedeutet auch, dass sich durch die Anpassung der Oberflächenbearbeitung das Anhaftungsverhalten an der Oberfläche und somit die Interaktion einer Edelstahloberfläche mit einem Medium beziehungsweise Produkt gezielt beeinflussen lassen. Für die industrielle Anwendung eröffnet das die Möglichkeit, in der Verfahrenstechnik neben dem Reinigungsverhalten beispielsweise die Fließgeschwindigkeit von Pro-

dukten in Abfüllanlagen zu justieren. Dies setzt allerdings voraus, dass genügend Informationen zu dem Produkt vorliegen und die Bauteiloberfläche ideal auf die Anwendung adaptiert wird.

**Fazit**

Bei der Beurteilung der Qualität einer Oberfläche sollte immer auch der Zustand des oberflächennahen Gefüges in Betracht gezogen werden. Die bei der mechanischen Bearbeitung insbesondere beim Schleifen von Oberflächen entstehende gestörte Zone wird durch eine schonendere Vorgehensweise schwächer und lässt sich dann durch Elektropolieren leichter, sicherer und im Idealfall vollständig entfernen. Der „negative Fußabdruck“ der mechanischen Bearbeitung wird so reduziert, da die Einstellung einer verbesserten Oberfläche bereits durch die Reduzierung der aus der mechanischen Bearbeitung resultierenden Oberflächenbelastung vorbereitet wird. Es entsteht eine mikrotopografisch fein eingeebnete und spaltenfreie Oberfläche, unterhalb derer weniger Gitterstörungen vorliegen, was insbesondere ihre physikalischen und chemischen Eigenschaften verändert. Systemeigenschaften, die aus der Interaktion zwischen dem Werkstoff und dem jeweiligen Medium resultieren – etwa die Korrosionsbeständigkeit und die Haftkräfte beim Kontakt mit weiteren Stoffen –, lassen sich so verbessern. //

**Literaturhinweise**

[1] Faller, M.; Gümpel, P.: Einfluss einer mechanischen Bearbeitung auf das Korrosionsverhalten von nichtrostenden Stählen. Tagungsband 3-Länder-Korrosionstagung, Wien, 2008

[2] Hörtnagl, A.: Systembetrachtung der Korrosionsbeständigkeit an geschliffenen Oberflächen von metastabilen Austeniten. Ilmenau, 2022

[3] Turnbull, A. et al.: Sensivity of stress corrosion cracking of stainless steels to surface machining and grinding procedure. In: Corrosion Science 53 (2011), pp. 3398-3415

[4] Singh, D.; Baier, R.: Contact Angle and Wettability Correlations for Bioadhesion to Reference Polymers, Metals, Ceramics and Tissues. In: K. L. Mittal: Advances in Contact Angle, Wettability and Adhesion. Scrivener Publishing LLC, 2018

[5] Hörtnagl, A.: Oberflächenbearbeitung und Oberflächenausführungen von nichtrostenden Stählen. In: Gümpel, P. et al.: Rostfreie Stähle. 6. Auflage, Renningen, 2025

[6] Burkert, A.; Klapper, H. S.; Lehmann, J.: Novel strategies for assessing the pitting corrosion resistance of stainless steels surfaces. In: Materials and Corrosion, 64 (2012), pp 675-682

© Bolz Intec GmbH

**Autoren | Kontakt**

**Prof. Dr.-Ing. Dr. hc Paul Gümpel**, selbstständiger Werkstoffberater, Werkstoffberatung GbR, Bodman-Ludwigshafen, paulguempel@gmail.com

**Prof. Dr.-Ing. Arnulf Hörtnagl**, Dozent für Werkstofftechnik und Wasserstoffsicherheit, Technische Hochschule Würzburg-Schweinfurt (THWS), Ignaz-Schön-Straße 11, 97421 Schweinfurt, arnulf.hoertnagl@thws.de www.thws.de

**Dipl. oec. Cornelius Mauch**, Geschäftsführer, Bolz Intec GmbH, Stephanusstraße 4, 88260 Argenbühl-Eisenharz, cm@bolz-intec.com www.bolz-intec.com



**Korrosionsbeständigkeit**

Stefan Lenzer: Umweltschonende Vorbehandlung für höchste Korrosionsbeständigkeit. <https://sn.pub/4n1thw>