

Je glatter desto sauberer?

Wie gut lassen sich Werkstoffoberflächen reinigen? Korreliert die Reinigbarkeit glatter Materialoberflächen mit deren Oberflächenrauheit?

Markus Keller, Guido Kreck, Alina Waldner, Gabriela Baum • Fraunhofer IPA, Abteilung Reinst- und Mikroproduktion, Stuttgart
Johann Schäffer • Uhlmann Pac-Systeme GmbH & Co. KG, Laupheim

Korrespondenz: Fraunhofer IPA, Abteilung Reinst- und Mikroproduktion, Nobelstr. 12, 70469 Stuttgart;
e-mail: markus.keller@ipa.fraunhofer.de

Zusammenfassung

Die Sauberkeit von Werkstoffoberflächen in kontaminationskritischen Anwendungen muss jederzeit gewährleistet sein. Durch regelmäßige Reinigungs- und Dekontaminationsverfahren wird die erforderliche Oberflächenreinheit in den von verschiedenen Branchen definierten Qualitäten gehalten. Dabei werden verschiedenste Kontaminationsquellen betrachtet, wie organische und anorganische Partikel, filmische Kontaminationen, Proteine und Mikroorganismen. Meist wird empirisch eine gute Reinigbarkeit einer Oberfläche mit deren Oberflächenrauheit gleichgesetzt: „Je glatter, desto besser ist die Reinigbarkeit“, so die landläufige Meinung. Aber stimmt das für prinzipiell glatte Materialoberflächen? In dem folgenden Bericht wird die Reinigbarkeit von achtzehn verschiedenen Materialoberflächen mittels zwei verschiedener Versuche ermittelt und miteinander verglichen. Von jeder Materialoberfläche werden die Rauheitswerte R_a und R_z mittels Tastschnittverfahren und S_a und S_z mittels Rasterkraftmikroskopie bestimmt. Mögliche Zusammenhänge der einzelnen ermittelten Werte werden aufgezeigt. Eine direkte Korrelation der Reinigbarkeit zur ermittelten Oberflächenrauheit der untersuchten glatten Materialoberflächen ließ sich dabei nicht feststellen.

1. Einleitung

Die Reinigbarkeit der eingesetzten Werkstoffoberflächen für pharmazeutische Verpackungsanlagen ist von besonderer Bedeutung um die Einhaltung der geforderten Reinheitsspezifikationen, die sich beispielsweise aus der Reinigungsvalidierung ergeben, gewährleisten zu können. Tragen sich bei der Produktion Partikel oder gar Mikroorganismen von der Oberfläche an die Produkte ab, kann das verheerende Folgen haben. Maschineneinhausungen, Fußböden, Wände, Transportbehälter, Beschichtungen, ... die Liste der relevanten abzureinigenden Oberflächen ließe sich beliebig fortsetzen. Zur Untersuchung der Reinigbarkeit

sollen Versuche aufgezeigt werden, welche eine überschlägige prinzipielle Quantifizierung eines Reinigungserfolgs ermöglichen. Die Ergebnisse der Untersuchungen werden in Anlehnung an die ISO/FDIS 14644-9: Reinräume und zugehörige Reinraumbereiche – Teil 9: Klassifizierung der partikulären Oberflächenreinheit dargestellt [1]. Je glatter, desto besser ist eine Oberfläche reinigbar, so die Vermutung. Dies gilt sicher für komplett unterschiedliche Oberflächenrauheitsklassen, wie Gussflächen, nach spanender Bearbeitung oder poliert. Die bekannten Rauheitskennwerte R_a und R_z werden nach dem Tastschnittverfahren ermittelt [2, 3]. Dabei wird über die Abtastung einer Linie ein zweidi-

mensionaler Rauheitskennwert ermittelt. Aufgrund der Tatsache, dass bearbeitete Oberflächen meist eine Vorzugsrichtung aufzeigen, müssen diese Werte in Abhängigkeit dieser Vorzugsrichtung gesehen werden. Neuerdings können dreidimensionale Rauheitswerte auch über einer Fläche ermittelt werden, sodass die Vorzugsrichtung in den ermittelten Werten S_a und S_z damit inbegriffen ist [4]. Sind Riefen oder Rillen in der Materialoberfläche noch deutlich sicht- und spürbar, wurde historisch dessen Oberflächengüte als „geschruppt“ mit einem R_a zwischen 6,3 und 25 μm bezeichnet. Sind sichtbare Riefen mit blosem Finger nur noch schwach spürbar, galt die Oberflächengüte als „geschlichtet“ mit ei-

nem R_a zwischen 1,6 und 6,3. Bei „feingeschliffenen“ Oberflächen mit einem R_a unter $1,6\ \mu\text{m}$ sind die noch schwach sichtbaren Riefen nicht mehr tastbar. Diese Definitionen sind entnommen aus der zurückgezogenen DIN 3141. Gilt die Aussage „je glatter desto besser reinigbar“ für die hier untersuchten visuell glatten Oberflächen mit einem R_a von $< 5\ \mu\text{m}$? In der Vergangenheit haben sehr wenige Richtlinien einen Rauheitswert $R_a = 0,8\ \mu\text{m}$ für produktberührende Oberflächen beschreiben [5–7]. Meist wird nur eine glatte, porenfreie und gut reinigbare Oberfläche gefordert. Jedoch wird seit längerem an der Korrelation kleiner Rauheitswerte R_a zur Reinigbarkeit gezweifelt. Ist diese Aussage zutreffend?

2. Material und Methoden

Die Reinigbarkeit der untersuchten Oberflächen wurde durch zwei verschiedene Methoden quantifiziert. Die erste Methode zeigt die partikuläre Abreinigbarkeit der Oberfläche. Die zweite Methode zeigt die Reinigbarkeit filmischer Kontaminationen in den Poren und Riefen durch Fluoreszenz. Zusätzlich wurden die verschiedenen Rauheitskennwerte der einzelnen Materialoberflächen ermittelt.

2.1 Materialoberflächen

Als Materialoberflächen wurden plane Platten mit der Abmessung $300\ \text{mm} \times 300\ \text{mm}$ mit einer Materialdicke von 10 mm verwendet. Bei den untersuchten Materialien handelt es sich a) um gefrästes Aluminium, welches teils eloxiert, beschichtet oder chemisch vernickelt wurde mit Rauheiten zwischen $R_a = 0,6$ und $R_a = 4,5$; b) und Edelstahl mit Rauheiten zwischen $R_a = 0,2$ und $R_a = 0,8$; c) um Kunststoffoberflächen mit verschiedener Färbung und Rauheiten zwischen $R_a = 0,7$ und $R_a = 1,0$ und d) um eine gegossene Elastomeroberfläche. In Abb. 1 sind die verschiedenen untersuchten Materialoberflächen abgebildet.

2.2 Partikuläre Reinigbarkeit

Bei dieser Methode werden anorganische Partikel mit einer definierten Partikelanzahl und -Größenverteilung homogen auf die Prüfoberflächen aufgebracht. Der Ausgangszustand wird ermittelt. Nach einer erfolgten automatisierten Wischreinigung wird der Endzustand messtechnisch erfasst. Basierend auf den Messergebnissen wird der relative Reinigungserfolg ermittelt. Zur Testflächenmarkierung sowie zur Kontamination der Prüfoberflächen wird eine Sedimentationskammer verwendet. Die Kammern sowie alle zu prüfenden Oberflächen werden zunächst mit einem Isopropanol-DI-Wasser-Gemisch getränkten Reiraumtuch gereinigt, um die Partikelfreiheit zu garantieren. Für die gezielte partikuläre Kontamination der zu prüfenden Materialoberflächen werden zehn Sedimentationskammern auf die Materialprobe gestellt. In diese wird die Partikelsuspension bestehend aus 200 ml Isopropanol und 0,05 g Teststaub nach ISO 12103-1 [8] einpipettiert. Ziel ist es, als Ausgangskontamination die ISO-SCP-Klasse 8 nach ISO/FDIS 14644-9 knapp zu überschreiten (SCP steht hierbei für surface cleanliness by particle concentration). Diese For-

derung führt zu einer definierten einheitlichen Ausgangskontamination aller zu untersuchender Materialoberflächen, was für vergleichende Messungen zwingend notwendig ist. Zur Messung von Partikeln $> 5\ \mu\text{m}$ auf Oberflächen wird das Messgerät PartSens (PMT Partikel-Messtechnik GmbH, Heimsheim) verwendet. Durch die Beleuchtung der Oberfläche mit Streiflicht heben sich alle Partikel ab einem sphärischen Äquivalentdurchmesser von $5\ \mu\text{m}$ von der Oberfläche als ein heller Leuchtfleck ab und werden durch eine Kamera detektiert und erfasst. Ermittelt wird die Anzahl der Partikel mit einem sphärischen Äquivalentdurchmesser gleich oder größer als $5\ \mu\text{m}$, $15\ \mu\text{m}$, $25\ \mu\text{m}$ und $50\ \mu\text{m}$. Um zu unterscheiden ob eine detektierte Struktur noch zur Oberfläche gehört oder durch einen Partikel verursacht wird, muss ein ausreichender Kontrast zwischen Oberfläche und Partikeln hergestellt werden. Zuerst wird die Ausgangsverunreinigung der Testoberflächen bestimmt. Danach werden die Sedimentationskammern abgenommen, um die Testflächen abzureinigen. Die standardisierte Reinigung erfolgt mittels einem linearem Wischsimulator [9]. Ein Aluminiumquader mit einem Standard-

gewicht von 1 kg wird auf der Testoberfläche mit einem Anpressdruck von $p = 1,65\ \text{kN/m}^2$ und einer Geschwindigkeit $v = 1\ \text{m/s}$ parallel zur Längsachse einmalig verschoben. Dieser Quader ist dabei mit einem mit Reinstwasser befeuchteten Cellulose-Polyestertuch bespannt.

Nach der Abreinigung werden die Testflächen erneut vermessen um die Rest-Partikelkonzentration nach erfolgter Reinigung zu bestimmen. Jede Testfläche wird vor und nach Abreinigung zehnmal vermessen. Jede gemessene Partikelkonzentration



Abb. 1: Bilder der untersuchten Materialoberflächen: 1 bis 3: Edelstahl; 4 bis 13 Aluminium; 14 bis 15 PET-P in weiß, 16: Elastomer SBR 67 und 17 bis 18 PET-P in schwarz (Quelle alle: Fraunhofer IPA).

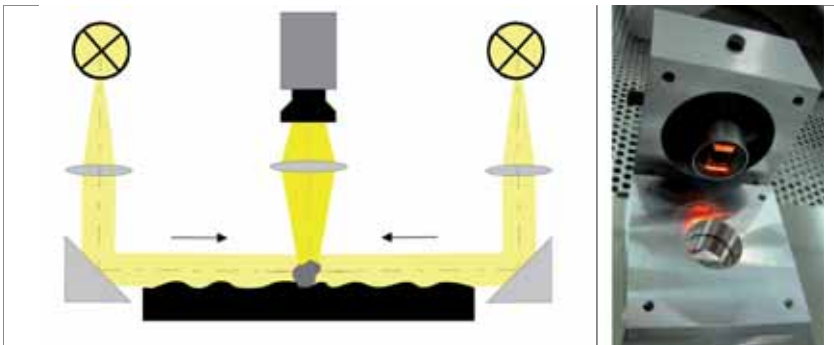


Abb. 2: links: Darstellung der Messtechnik des Oberflächeninspektionsgerätes (PartSens®) rechts: Sedimentationskammer auf Testoberfläche mit Messkopfhalterung und Messkopf.

zentration bestehend aus Partikeln mit einem sphärischen Äquivalentdurchmesser von $\geq 5 \mu\text{m}$ wird nach ISO/FDIS 14644-9 auf 1 m^2 umgerechnet und einer ISO-SPC-Klasse zugeordnet. Die jeweils ermittelte ISO-SPC-Klasse vor Abreinigung abzüglich der ISO-SPC-Klasse nach Abreinigung ergibt den relativen Reinigungserfolg, ausgedrückt als Δ ISO-SPC-Klasse. Der Durchschnitt aller ermittelten Δ ISO-SPC-Klassen pro Materialoberfläche wird zusammen mit der zugehörigen Standardabweichung (SD) im Ergebnisteil angegeben. In einer vorausgehenden Publikation über die Reinigungserfolge der untersuchten Materialoberflächen wurde der Durchschnitt der Partikelgrößenklassen $\geq 5 \mu\text{m}$, $\geq 15 \mu\text{m}$, $\geq 25 \mu\text{m}$ und $\geq 50 \mu\text{m}$ als Klassifizierungswert verwendet [10]. Dies stellte sich in der Praxis aufgrund der jeweils akkumulierten Messergebnisse und der damit einhergehenden Überrepräsentierung großer Partikel in der ermittelten Klassifizierungszahl als nicht praktikabel dar. Die exemplarische Grafik in Abb. 3 zeigt die ISO-SPC-Klassen 5 bis 8 ebenso wie die Einordnung der Prüfoberfläche vor und nach der Reinigung. Die gepunkteten Linien stellen die ermittelte Standardabweichung (SD) aus den Einzelmessungen dar. Der grüne Pfeil symbolisiert den durchschnittlichen relativen Reinigungserfolg als Δ ISO-SPC-Klasse. Die orangefarbenen Pfeile symbolisieren die relativen minimalen und maximalen durchschnittlichen

Reinigungserfolge unter Berücksichtigung der Standardabweichung.

2.3 Reinigbarkeit filmischer Kontaminationen: Riboflavin-Test

Um eine Aussage über die Reinigbarkeit filmischer Kontaminationen einer Oberfläche zu erlangen, wird der Riboflavin-Test nach VDA durchgeführt [11]. Dabei wird eine fluoreszierende Prüfverunreinigung bestehend aus 0,2 g Riboflavin, 1000 ml Reinstwasser und 5 g Hydroxyethylcellulose auf die Prüfoberflächen aufgebracht. Nach dem Verdunsten des Wassers als Trägermedium (eine

eingetrocknete Prüfverunreinigung stellt im Gegensatz zur nassen Prüfverunreinigung eine hartnäckigere Kontamination dar) wurde die Abreinigung wie beim vorherigen Versuch in Kapitel 2.2 durchgeführt. Nach der Abreinigung wurden die Oberflächen unter UV-Belichtung (366 nm) inspiziert. Die Verwendung eines fluoreszierenden Pigments ermöglicht eine klare visuelle Darstellung schlecht zu reinigender Flächen, insbesondere von Vertiefungen, Dellen, Kanten und Rissen. Als erweiterter Schwachstellentest wurde eine stark vereinfachte Bewertungsmatrix eingeführt, welche eine prinzipielle Quantifizierung ermöglicht.

– (0) Keine signifikante Verbesserung der Oberflächenreinheit.

O (1) Signifikante Verbesserung der Oberflächenreinheit; es sind jedoch noch deutliche Reste der fluoreszierenden Prüfverunreinigung sichtbar.

+ (2) Signifikante Verbesserung der Oberflächenreinheit; es sind jedoch noch Spuren der fluoreszierenden Prüfverunreinigung sichtbar.

++ (3) Vollständige Abreinigbarkeit; keinerlei sichtbare Spuren der fluoreszierenden Prüfverunreinigung.

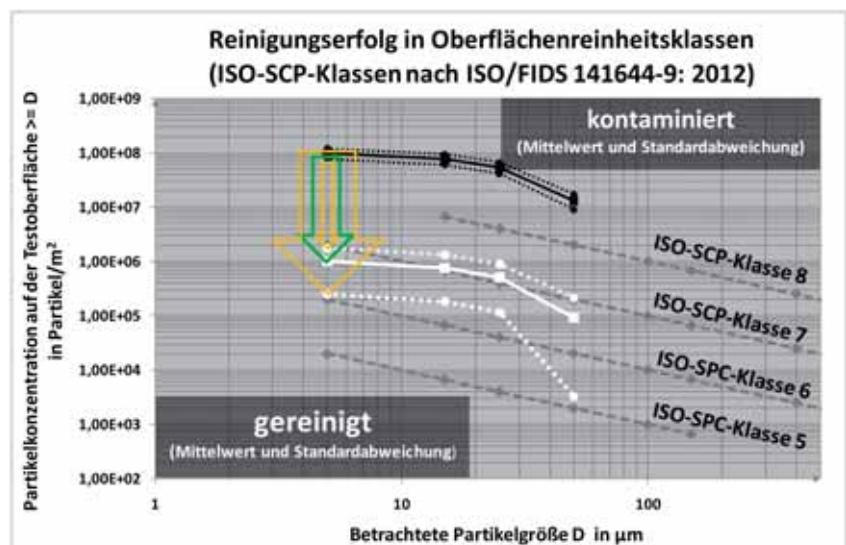


Abb. 3: Grafische Darstellung des relativen Reinigungserfolgs und der zugrunde liegenden ISO-SCP-Klassifizierung für eine Edelstahlfläche 1.4301, gebürstet mit einem R_a längs = $0,2 \mu\text{m}$ und einem R_a quer = $0,3 \mu\text{m}$.

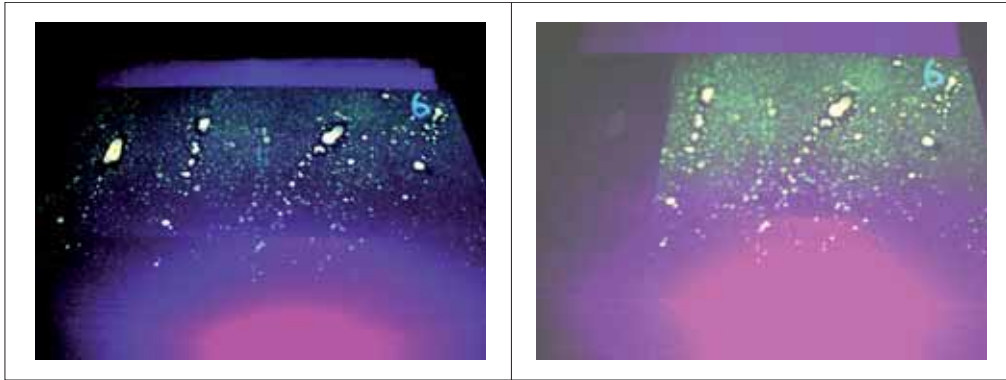


Abb. 4: Fluoreszierende Prüfkontamination, welche auf eine Testoberfläche aus gefrästem und eloxiertem Aluminium mit einem $R_a = 3,1 \mu\text{m}$ (Oberfläche 6 in Abb. 1) aufgebracht und mittels UV-Beleuchtung sichtbar gemacht wurde. Links: vor Abreinigung. Rechts: nach Abreinigung der linken Oberflächenhälfte.

schnittgerät (Homel-Etamic GmbH, Villingen-Schwenningen) längs und quer zur Schleifrichtung ermittelt [2, 3], [12]. Der jeweils schlechtere R_a und R_z -Wert wird dabei in die Ergebnistabelle übernommen, da bei einer nicht vorgegebenen Reinigungsrichtung dieser für eine eventuelle Aussage über die Reinigbarkeit relevant ist.

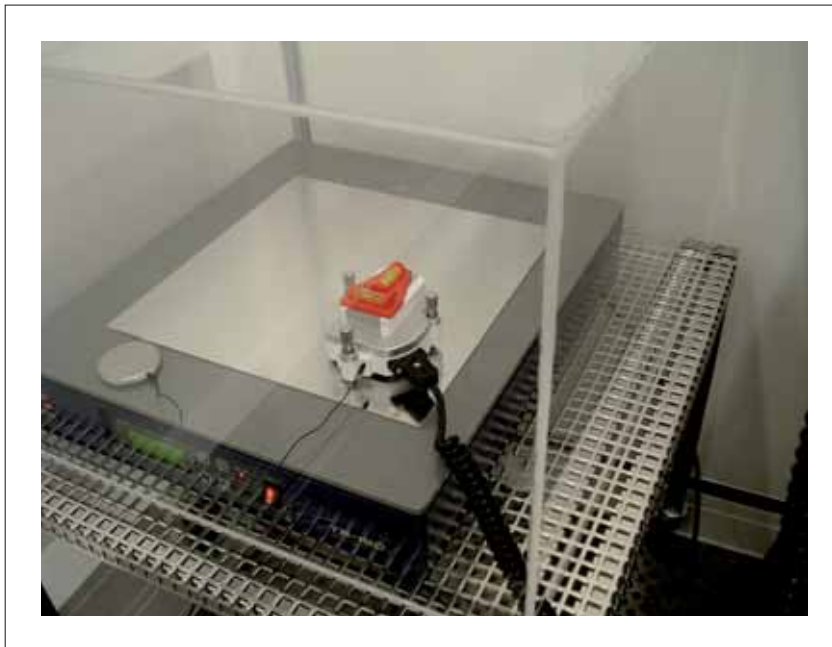


Abb. 5: Versuchsaufbau zur Bestimmung der flächenhaften Oberflächenrauheit mit dem Rasterkraftmikroskop (AFM). Die erdende Verbindung zum AFM-Messkopf ist deutlich zu sehen.

2.5 Messung der flächenhaften Rauheitswerte S_a und S_z

Die Bestimmung der flächenhaften arithmetischen Oberflächenrauheit S_a und der flächenhaften gemittelten Rautiefe S_z werden mit einem Rasterkraftmikroskop (AFM) durchgeführt (mobileS, Nanosurf AG, Liesetal, Schweiz). Das Prüfobjekt wird in den Reinraum mit der ISO-Klasse 1 [13] eingeschleust. Dazu wird er zuerst mit ionisierter Reinstluft abgeblasen und anschließend mit 100 % Isopropanol abgereinigt. Anschließend wird das Prüfobjekt auf den aktiven schwingungsisolierenden Tisch gelegt und mit einer Haube vom Primärluftstrom des laminaren Reinraums ISO 1 abgeschottet. Es wurde eine leitende Verbindung zwischen Tischoberfläche dem Messkopf des AFM hergestellt, um eine

In Abb. 4 ist die fluoreszierende Prüfverunreinigung vor und nach Abreinigung einer gefrästen und eloxierten Oberfläche aus Aluminium AlMg 4,5 Mn deutlich zu sehen. Somit wurde hier ein relativer Reinigungserfolg von 1 ermittelt.

2.4 Messung der linienhaften Rauheitswerte R_a und R_z

Die Bestimmung der linienhaften arithmetischen Oberflächenrauheit R_a und linienhaften gemittelten Rautiefe R_z werden mit einem Tast-

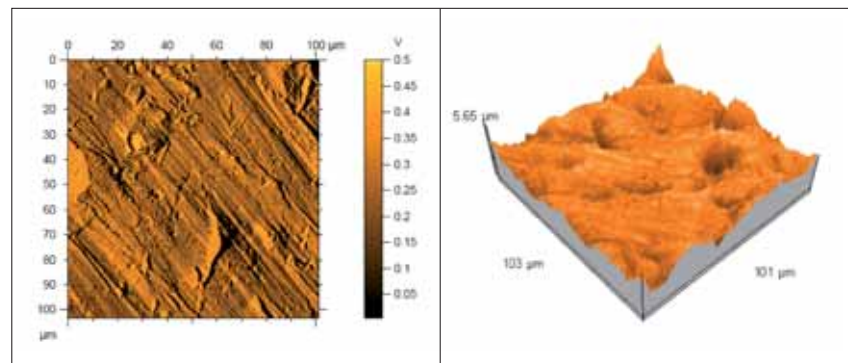


Abb. 6: Amplitudenbild und daraus resultierende topographische 3-D-Darstellung einer Edelstahl oberfläche 1.4301 gebürstet und gestrahlt, mit einem $R_a = 0,8 \mu\text{m}$ (Oberfläche 3 in Abb. 1).

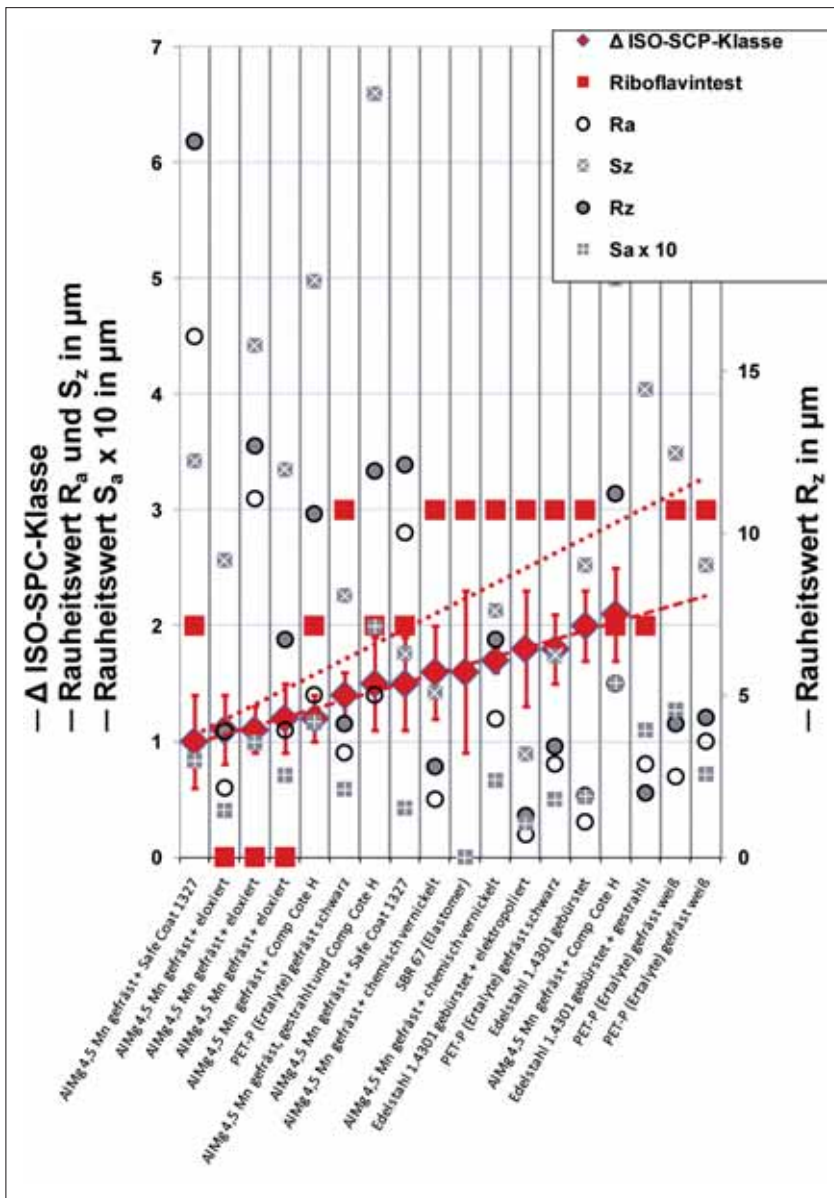


Abb. 7: Graphische Zusammenfassung aller Messergebnisse.

eventuelle Aufladung der AFM-Messspitze zu vermeiden. Der Messkopf des AFM scannt eine Messfenstergröße von $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$. Die Messung wird zweimal vorgenommen. Zuerst wird die Struktur der Oberfläche zweidimensional dargestellt. Anschließend werden die einzelnen Höhenprofile aus dem Bild extrahiert und in einem dreidimensionalen Bild dargestellt. Der jeweils durchschnittliche S_a und S_z -Wert wird dabei in die Ergebnistabelle übernommen.

3. Ergebnisse

Die Ergebnisse der einzelnen Untersuchungen werden in Abb. 7 vergleichend dargestellt. Die partikuläre Reinigbarkeit wird dabei in Δ ISO-SCP-Klassen durch rote Rauten mit den zugehörigen Standardabweichungen aufsteigend sortiert dargestellt. Die Reinigbarkeit filmischer Kontaminationen durch den Riboflavintest wird durch rote Quadrate symbolisiert. Die zugehörigen Ausgleichsgeraden sind ebenfalls in rot integriert, dabei wer-

den die Δ ISO-SCP-Klassen gestrichelt und der Riboflavintest gepunktet gezeichnet. Für die die linienhaften Rauheitswerte R_a und R_z werden durch Kreise symbolisiert. Zu beachten ist dabei, dass der R_z -Wert den Werten der rechten y-Koordinate zugeordnet ist. Die linienhaften S_a und S_z -Werte sind durch Quadrate mit einem integrierten Kreuz symbolisiert. Hierbei ist zu beachten, dass der S_a -Wert im Diagramm aufgrund der Darstellbarkeit dem Zehnfachen des eigentlichen S_a -Werts entspricht. Eine lineare Regression zwischen den Δ ISO-SCP-Klassen und dem Reinigungserfolg des Riboflavintests ergab ein zugehöriges Bestimmtheitsmaß (R^2) von 0,42. Die der Grafik zugrunde liegenden zahlenmäßigen Messwerte sind in Abb. 8 aufgestellt. Konnten einzelne Parameter aufgrund der Materialoberfläche nicht vermessen werden, wurden diese als nicht messbar (n.m.) eingetragen. In Abb. 9 sind die arithmetischen Oberflächenrauheiten R_a und S_a und gemittelten Rautiefen R_z und S_z in Korrelation zueinander dargestellt. Die ermittelten Werte wurden untereinander mit Hilfe einer linearen Regression und des zugehörigen Bestimmtheitsmaß (R^2) verglichen. Das Bestimmtheitsmaß beschreibt den Grad des linearen Zusammenhangs zweier Wertesätze. Er kann einen Wert von 0 bis 1 annehmen, wobei 1 der vollständige lineare Zusammenhang ist. Um ein möglichen Zusammenhang zwischen den ermittelten Rauheitsparameter R_a und S_a zur partikulären Abreinigbarkeit zu erkennen, wurden in Abb. 10 die beiden Rauheiten R_a und S_a zum partikulären Reinigungserfolg korreliert. Aufgrund der guten Korrelationen zwischen den Rauheitsparametern R_a zu R_z und S_a zu S_z untereinander mit jeweils $R^2 = 0,87$ wird auf eine zusätzliche Korrelation des relativen Reinigungserfolgs zu R_z und S_z verzichtet.

4. Diskussion

Bei den beiden weißen PET-P-Kunststoffen konnte aufgrund mangelnden Kontrasts während der Messung

Material	ISO-SCP-Klasse			Rauheitswerte in μm			
	Δ ISO-SCP-Klasse	SD der Δ ISO-SCP-Klasse	Riboflavintest	R_a	R_z	S_a	S_z
AlMg 4,5 Mn geätzt + Safe Coat 1327	1,0	0,4	2	4,5	22,1	0,3	3,4
AlMg 4,5 Mn geätzt + eloxiert	1,1	0,3	0	0,6	3,9	0,1	2,6
AlMg 4,5 Mn geätzt + eloxiert	1,1	0,2	0	3,1	12,7	0,4	4,4
AlMg 4,5 Mn geätzt + eloxiert	1,2	0,3	0	1,1	6,7	0,3	3,4
AlMg 4,5 Mn geätzt + Comp Cote H	1,2	0,2	2	1,4	10,6	0,4	5,0
PET-P (Ertalyte) geätzt schwarz	1,4	0,2	3	0,9	4,1	0,2	2,3
AlMg 4,5 Mn geätzt, gestrahlt und Comp Cote H	1,5	0,4	2	1,4	11,9	0,7	6,6
AlMg 4,5 Mn geätzt + Safe Coat 1327	1,5	0,4	2	2,8	12,1	0,2	1,8
SBR 67 (Elastomer)	1,6	0,7	3	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.
AlMg 4,5 Mn geätzt + chemisch vernickelt	1,6	0,4	3	0,5	2,8	0,1	1,4
AlMg 4,5 Mn geätzt + chemisch vernickelt	1,7	0,1	3	1,2	6,7	0,2	2,1
Edelstahl 1.4301 gebürstet + elektroliert	1,8	0,5	3	0,2	1,3	0,1	0,9
PET-P (Ertalyte) geätzt schwarz	1,8	0,3	3	0,8	3,4	0,2	1,7
Edelstahl 1.4301 gebürstet	2,0	0,3	3	0,3	1,9	0,2	2,5
AlMg 4,5 Mn geätzt + Comp Cote H	2,1	0,4	2	1,5	11,2	0,5	5,0
Edelstahl 1.4301 gebürstet + gestrahlt	n.m.	n.m.	2	0,8	2,0	0,4	4,0
PET-P (Ertalyte) geätzt weiß	n.m.	n.m.	3	0,7	4,1	0,5	3,5
PET-P (Ertalyte) geätzt weiß	n.m.	n.m.	3	1,0	4,3	0,3	2,5

Abb. 8: Tabellarische Zusammenfassung aller Messergebnisse.

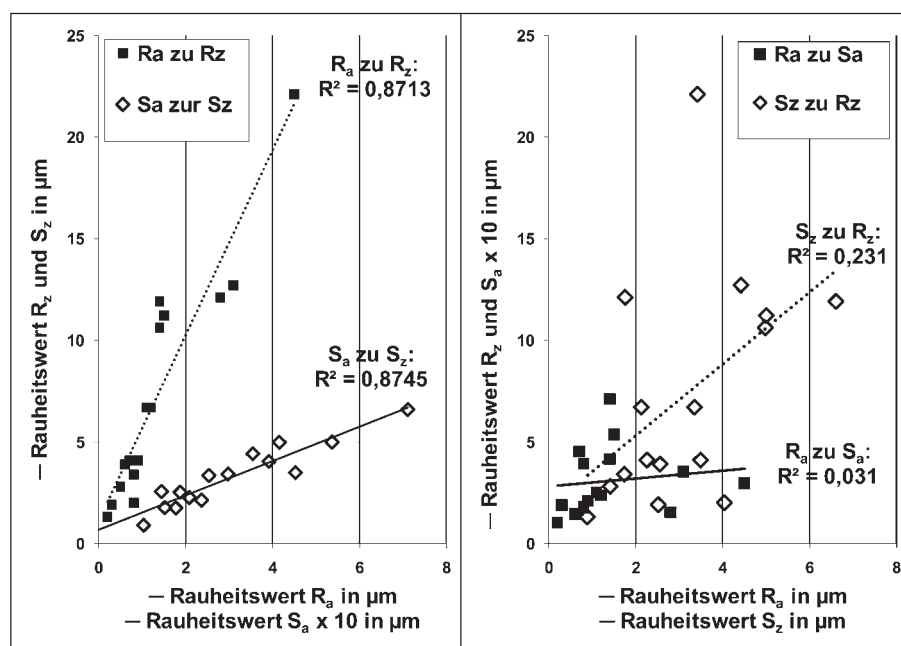


Abb. 9: Grafische Korrelationen zwischen den ermittelten arithmetischen Oberflächenrauheiten R_a und S_a und gemittelten Rautiefen R_z und S_z der verschiedenen Materialoberflächen.

keine partikuläre Abreinigbarkeit bestimmt werden. Beim Elastomer konnte aufgrund seiner Materialeigenschaft keine Rauheitswerte bestimmt werden. Die partikuläre Reinigbarkeit zeigt eine erkennbare geringe Korrelation zur Abreinigbarkeit filmischer Kontaminationen mit dem Riboflavintest. Wäre es möglich, die Ergebnisse des Riboflavintests feiner zu quantifizieren, könnte möglicherweise auch eine bessere Korrelation erreicht werden. Einige Materialoberflächen zeigen eine sehr gute filmische, aber eine weniger gute partikuläre Abreinigbarkeit. Dies kann durch die Tatsache erklärt werden, dass Haftkräfte auf derselben Materialoberfläche von anorganischen Partikeln sich anders verhalten können wie Haftkräfte filmischer Kontaminationen. Haftkräfte sind immer ein Resultat von Materialpaarungen, sodass neben der geometrischen Oberflächenbeschaffenheit, ausgedrückt durch die verschiedenen Rauheitswerte, weitere Parameter der Materialpaarung relevant sind. Diese sind beispielsweise die Oberflächenspannung, hydrophobe oder hydrophile Eigenschaften, vorherrschende Luftfeuchtigkeit, elektrostatische Eigenschaften (besonders bei nichtleitenden Kunststoffen). Es kann somit nicht direkt eine Aussage von der festgestellten Abreinigbarkeit anorganischer Partikel zur Abreinigbarkeit organisch-filmischer Kontaminationen getroffen werden. Bei der Betrachtung der den Materialoberflächen zugrunde liegenden Rauheitswerte in der grafischen Darstellung fällt deutlich auf, dass keine signifikante Korrelation zu den in den Versuchen ermittelten partikulären relativen Reinigungsfolgen

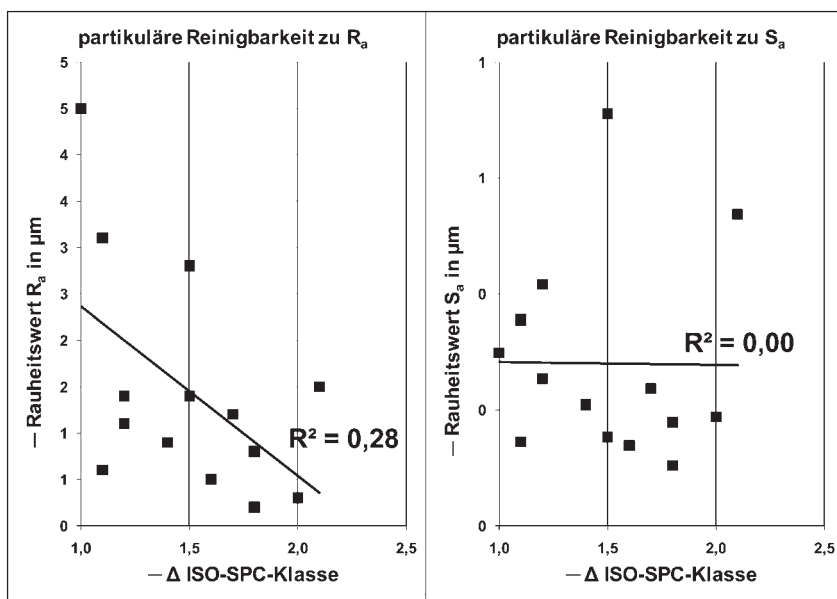


Abb. 10: Grafische Korrelation der linienhaften arithmetischen Oberflächenrauheiten R_a und der flächenhaften arithmetischen Oberflächenrauheiten S_a zum relativen Reinigungserfolg in Δ ISO-SPC-Klassen der verschiedenen Materialoberflächen.

gen für anorganische Partikel erkennbar ist. Dies legt als Schlussfolgerung nahe, dass in dieser Untersuchung für hinreichend glatte Oberflächen mit einem R_a -Wert unter $5\mu\text{m}$ kein direkter Zusammenhang zwischen der ermittelten Rauheit der Materialoberfläche und der ermittelten partikulären Reinigbarkeit gegeben ist. Es ist deutlich erkennbar, dass die linienhaften und flächenhaften Rauheitswerte jeweils untereinander mit einem $R^2 > 0,87$ gut korrelieren. Hingegen ist zwischen den arithmetischen Oberflächenrauheiten und den gemittelten Rautiefen keine signifikante Korrelation erkennbar.

5. Schlussfolgerung

Aufgrund der Messwerte zeigt sich, dass die ermittelten Oberflächenrauheitswerte visuell glatt erscheinender Materialoberflächen wenig Aussagekraft auf die Abreinigbarkeit der jeweils untersuchten Materialoberfläche haben. Vielmehr scheinen die verschiedenen Materialien, Oberflächenmodifikationen und Beschichtungen für den Reinigungserfolg eine Rolle zu spielen. Die Ermittlung der ver-

schiedenen Rauheitsparameter bei prinzipiell „glatten“ Oberflächen scheint somit keinen signifikanten Anhaltspunkt für die Beurteilung der Abreinigbarkeit der jeweiligen Oberfläche zu liefern. Ob diese Aussage nur für die hier untersuchten Materialoberflächen und Reinigbarkeiten gilt oder prinzipiell verallgemeinert werden kann, muss dringend durch weitere Messreihen ermittelt werden. Bei der Auswahl gut reinigbarer Oberflächen sollte ein definierter und ausreichend kleiner Rauheitswert eingehalten werden. Ob dieser allerdings unter den teils normativ geforderten $0,8\mu\text{m}$ sein muss [5–7], konnte durch diese Messreihe nicht belegt werden. Durch die Bestimmung eines flächenhaften Rauheitswerts und entsprechender visueller Darstellung kann eine Materialoberfläche in ihrer Topographie erwartungsgemäß besser charakterisiert werden im Vergleich zur Bestimmung eines linienhaften Rauheitswerts. Bei einer rein zahlenmäßigen Ermittlung arithmetischer Oberflächenrauheiten und gemittelter Rautiefen erlangt man durch beide Verfahren, sei es die linienhafte oder flächenhafte Bestimmung, vergleichbare Ergebnisse.

6. Danksagung

Unser besonderer Dank gilt Dr. Markus Weth und Yvonne Holzapfel für die fruchtbaren wissenschaftlichen Diskussionen und Nina Frei für die Unterstützung bei der Erstellung dieser Publikation.

Fachliteratur

- [1] ISO/FDIS 14644-9. Cleanrooms and associated controlled environments – Part 9. Classification of surface cleanliness by particle concentration. Berlin: Beuth Verlag, 2010.
- [2] ISO 3274. Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Nominal characteristics of contact (stylus) instruments. Berlin: Beuth Verlag, 1998.
- [3] ISO 4287. Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Terms, definitions and surface texture parameters. Berlin: Beuth Verlag, 2010.
- [4] ISO 25178. Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Areal – Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters. Berlin: Beuth Verlag, 2012.
- [5] EHEDG Doc 8. Gestaltungskriterien für Hygienegerechte Maschinen, Apparate und Komponenten. Frankfurt: European Hygienic Engineering and Design Group, 2004.
- [6] EHEDG Doc. 10. Gestaltungskriterien für hygienegerechte Maschinen, Apparate und Komponenten. Frankfurt: European Hygienic Engineering and Design Group, 2004.
- [7] DIN EN 1672-2. Nahrungsmittelmaschinen – Allgemeine Gestaltungsleitsätze – Teil 2: Hygieneanforderungen. Berlin: Beuth Verlag, 2009.
- [8] ISO 12103-1. Road vehicles – Test dust for filter evaluation – Part 1: Arizona test dust. Berlin: Beuth Verlag, 1997.
- [9] Keller, Markus und Waldner, Alina. Wie gut lässt sich eine Oberfläche reinigen? Der Lebensmittelbrief. 2011, Bd. 22, 9/10, S. 53-58.
- [10] Keller, Markus und Gommel, Udo. Forschung Reinraumbodensysteme: Partikel, VOC-Emissionen, chemische/biologische Beständigkeit und Reinigbarkeit. TechnoPharm. 2012, Bd. 2, 1, S. 30-41.
- [11] VDMA Merkblatt. Riboflavintest für keimarme oder sterile Verfahrenstechniken. Frankfurt: VDMA Fachverband Verfahrenstechnische Maschinen und Apparate, 2007.
- [12] ISO 4288. Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Rules and procedures for the assessment of surface texture. Berlin: Beuth Verlag, 1998.
- [13] ISO 14644-1. Cleanrooms and associated controlled environments – Part 1: Classification of air cleanliness. Geneva: International Organization for Standardization, 1999.

