

Materialprüfung, Mikrosystemtechnik, Qualitätssicherung

Reinraumtaugliche Werkstoffe

Test- und Klassifizierungsverfahren

U. Gommel

Inhalt Um die Industrie beim Aufbau von Fertigungsanlagen für kontaminationsempfindliche Mikrosysteme zu unterstützen, werden reinheitsgerechte Grund- und Aufbaumaterialien benötigt. Weltweit stehen keine Werkstofflisten zur Verfügung, so dass bei der Auswahl geeigneter Materialien rein auf optische und nicht wissenschaftlich abgesicherte Kriterien geachtet wird. Diesem Umstand wird mit einem standardisierten Prüfverfahren zur Beurteilung der Reinraumtauglichkeit von Werkstoffen entgegengewirkt.

Cleanroom suitable materials – Verification and classification methods

Abstract To support the industry in the construction of equipment for contamination sensitive micromechanical systems, there is a need for cleanroom-suitable materials. To date there are no lists of materials available worldwide. As a result, equipment manufacturers are forced to select cleanroom-suitable materials purely from a visual point of view which have not been scientifically proven. This gap shall be closed by standardized tests methods for evaluating the cleanroom suitability of materials.

1 Einleitung

Die Qualitätsansprüche an alle Produkte steigen ständig. Eine stetig wachsende Zahl von Branchen und deren Produkte benötigen daher eine reinheitsgerechte Fertigung. Bei der „reinen Fertigung“ ist es notwendig, alle produktrelevanten Kontaminationsfaktoren zu beherrschen. Vor allem in Bereichen wie der Halbleiterindustrie, der Lebensmittelindustrie oder der pharmazeutischen Industrie kommt der Vermeidung von partikulären Kontaminationen ein besonders hoher Stellenwert zu. Produktionsmittel, die in reinen Fertigungen zum Einsatz kommen, tragen oft wesentlich zur Kontamination der „reinen Fertigung“ bei.

Die Vorgänge, die zur Generierung von Partikelemissionsvorgängen an Produktionsmitteln führen, lassen sich auf Reibungs- und Schwingungsvorgänge zurückführen. Hervorzuheben ist: Reibungsvorgänge, die durch die Relativbewegung der Produktionsmitteloberflächen bewirkt werden, besitzen den weitaus höchsten Anteil. Für die Generierung von Partikeln auf technischen Oberflächen von Reibpartnern existiert

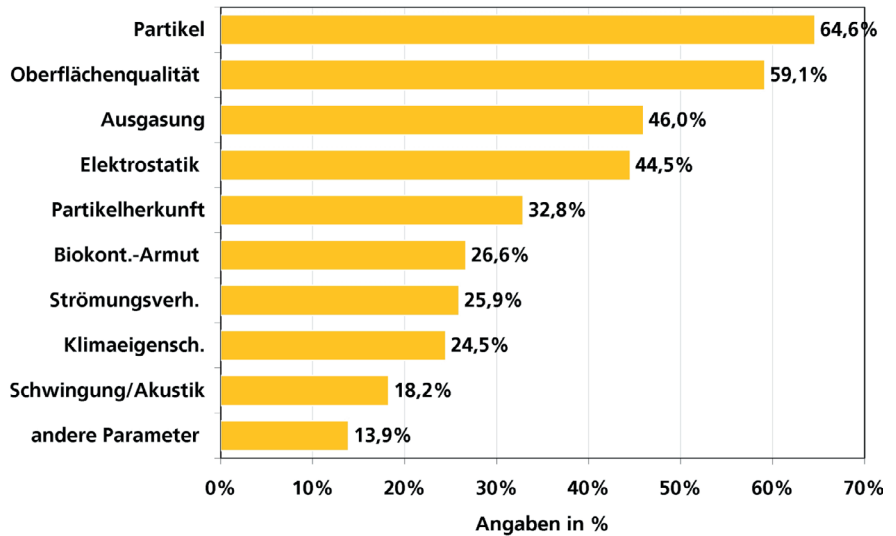


Bild 1. Priorisierung der Kontaminationsarten

derzeit noch keine wissenschaftlich fundierte Modellvorstellung, die es erlaubt, die Werkstoffauswahl für „reine Fertigungen“ schon im Vorfeld, bei der Produktionsmittelentwicklung zu treffen.

Auf dem Gebiet der Aufklärung von Zusammenhängen zwischen technischen Eigenschaften von Werkstoffpaarungen und der Generierung von Kontaminationen, insbesondere die der luftgetragenen Partikel an Produktionsmitteln, sind keine Forschungsarbeiten bekannt.

Um das Kontaminationsverhalten von Grundwerkstoffen oder Oberflächenbeschichtungen einzugruppiert, muss ein Verfahren zum Bestimmen der Reinraumtauglichkeit von Werkstoffpaarungen erarbeitet werden.

2 Priorisierung der Kontaminationsarten

Neben dem elektrostatischen Kontaminationsverhalten oder der Abgabe leicht flüchtiger organischer Stoffe kommt vor allem der Emission luftgetragener, mikroner beziehungsweise submikroner Partikel eine besondere Bedeutung zu. Bleibt die Partikelquelle „Mensch“ unberücksichtigt, hat letzterer Prozess den größten Einfluss auf die Verunreinigung des Produktes (mit rund 30 % bis 40 % Anteil an allen, im Reinraum auftretenden, unerwünschten Kontaminationen). Eine repräsentativ durchgeführte Umfrage mit rund 270 Firmen ergab, dass die partikelförmigen Kontaminationen den höchsten Stellenwert hinsichtlich des Forschungsbedarfs einnehmen: Zwei Drittel aller Forderungen an die Werkstoffe umfassen die Partikelarmut oder Partikelfreiheit. Mit der Partikelemission eng verknüpft, steht die Oberflächenqualität eingesetzter Werkstoffe (**Bild 1**). Von Produktionsmitteln emittierte Partikel entstehen aufgrund von Materialschwingungen oder Relativbewegungen von mindestens zwei aneinander reibenden Materialien. Bei diesen induzierten Reibpaarungen von Produktionsmittelkomponenten nehmen die Oberflächensysteme der Produktionsmittel entscheidenden Einfluss auf die Partikelgenerierung.

Dipl.-Phys. Udo Gommel
 Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik- und Automatisierung (IPA)
 Nobelstr. 12, D-70569 Stuttgart
 Tel. +49 (0)711 / 970-1633, Fax +49 (0)711 / 970-1006
 E-Mail: gommel@ipa.fraunhofer.de
 Internet: www.ipa.fraunhofer.de

3 Inhaltliche Zielsetzung

3.1 Entwickeln einer Prüfprozedur

Um das partikuläre Emissionsverhalten verschiedener Werkstoffpaarungen aufzuklären, wird eine standardisierte Prüfprozedur entwickelt. Bei der praktischen Umsetzung dient ein Werkstoffprüfstand zur kontaminationsfreien Untersuchung von Werkstoffen für den Reinraumeinsatz.

Die Entwicklung einer wissenschaftlich fundierten Prüfprozedur gewährleistet die:

- Reproduzierbarkeit,
- Vergleichbarkeit,
- Absicherung und
- Interpretation der Messergebnisse.

3.2 Bewertungs- und Klassifizierungsschema

Für das Auswerten und Klassifizieren der gewonnenen Messdaten müssen Bewertungsmechanismen erarbeitet und angewendet werden. Hierbei kann teilweise auf schon bestehende Richtlinien- und Standardwerke aus der Halbleiter- und Reinraumtechnik zurückgegriffen werden. Die Auswertelgorithmen für die Messdaten sollen eindeutig die Eignung der verschiedenen Werkstoffpaarungen für den Einsatz in reinen Bereichen aufzeigen.

3.3 Optimieren von Werkstoffpaarungen

Die Vorgehensweise wird aufgeteilt in die:

- Istzustandsanalyse (erste Ermittlung des Kontaminationszustands),
- Modifikation der Werkstoffpaarung (Optimierung des Tribosystems) und
- Verifikationsanalyse (erneute Ermittlung des Kontaminationszustands)

Das Teilen erlaubt eine systematische Weiterentwicklung der Werkstoffpaarungen an die reinheitsrelevanten Anforderungen. Mit dem Betrachten der luftgetragenen partikulären Kontamination können Aussagen über die Eignung der Werkstoffpaarungen für bestehende Luftreinheitsklassen getroffen werden, da in den international anerkannten Luftreinheitsstandards nur Bezug auf diese Kontaminationsart genommen wird. Dieser Umstand erhöht die nationale und internationale Akzeptanz der Prüfprozedur und deren Ergebnisse entscheidend.

4 Verfahrensentwicklung

Fast alle Bewegungsvorgänge an Produktionsanlagen führen zu Reibungsvorgängen zwischen zwei Werkstoffen. Die Reibung wiederum ist die häufigste Ursache für die Partikelentstehung. Um dies wissenschaftlich greifbar zu machen, müssen die Partikelemissionen messtechnisch erfasst und bewertet werden.

Erster Schritt hierbei ist das Identifizieren der Hauptemissionsquelle(n) an realen Bauteilen oder Komponenten. Um

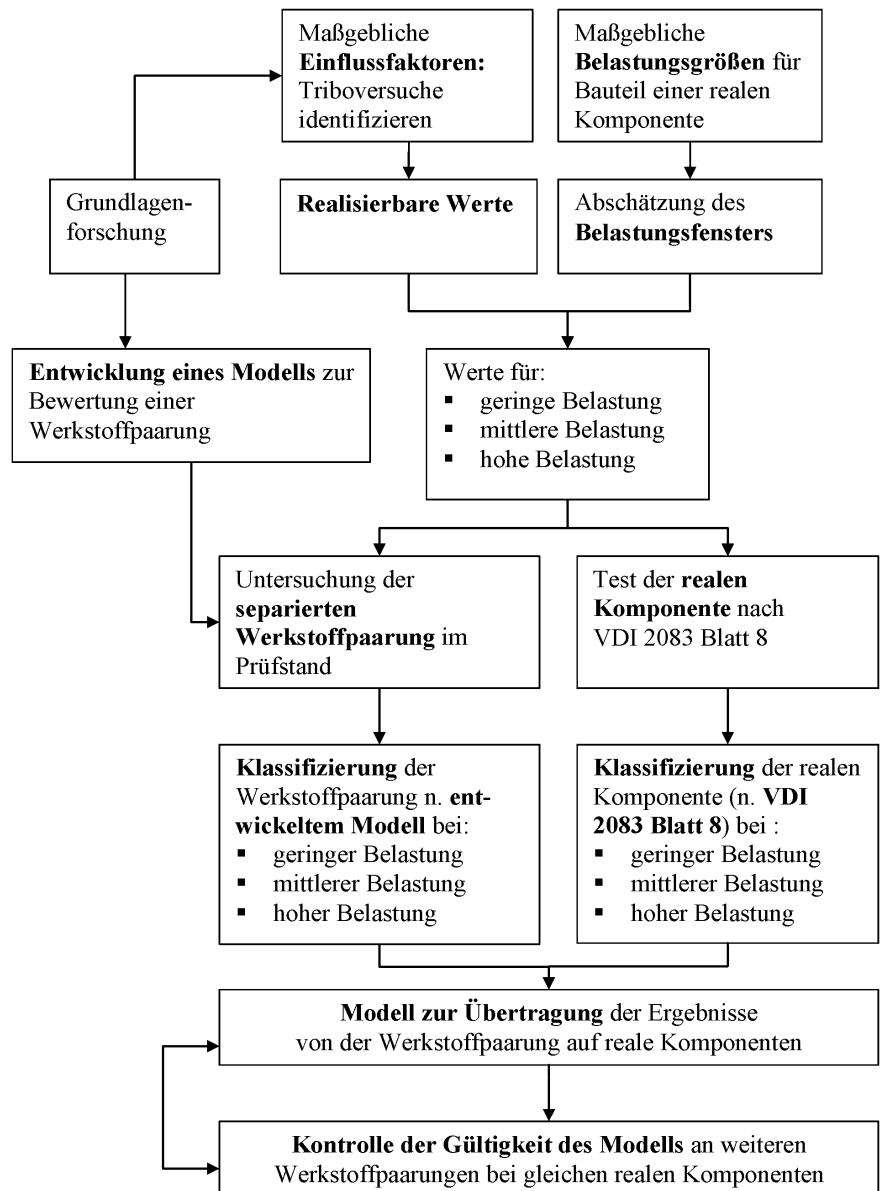


Bild 2. Verfahrensablauf und Korrelation der Klassifizierungsergebnisse zwischen realen Bauteilprüfungen und separierten Werkstoffprüfungen im Labor

möglichst wenige Fremdeinflüsse auf das Messergebnis der detektierten Hauptemissionsquellen zu erhalten, sollen möglichst viele Störeinflussquellen beseitigt werden. Das gelingt am Besten mit einem Herauslösen und Separieren der Reibpaarungsstelle aus dem realen Bauteil. Hierzu muss die Reibpaarungsstelle in einem Prüfstand unter standardisierten, reproduzierbaren Laborbedingungen nachgestellt werden (Bild 2).

Das Verfahren zur Beurteilung der Reinheitsgüte der untersuchten Werkstoffpaarungen soll zwei Aussagen liefern:

- In welchen Luftreinheitsklassen (in Anlehnung an internationale Regelwerke zur Beurteilung der Luftreinheit) können die „separierten“ Materialpaarungen eingesetzt werden, und
- inwiefern sind die Ergebnisse der Untersuchungen unter Laborbedingungen auf reale Bauteile/Komponenten übertragbar.

Reale Bauteile und Komponenten werden nach der etablierten Vorgehensweise der VDI 2083 Blatt 8 „Reinraumtauglichkeit von Betriebsmitteln“ auf deren Reinraumtauglichkeit untersucht. Diese Vorgehensweise ist auf die Bewertung von komplexen Bauteilen ausgelegt. Bei dem Versuch, einzelne Werkstoffpaarungen zu untersuchen, versagt dieses Verfahren.

Übertragen der Ergebnisse auf reale Bauteile

Nachdem die Reibpartner identifiziert und in ein Tribosystem im Laborprüfstand übertragen sind, werden die Auslastungen an typische Belastungsverhältnisse der realen Bauteile angeglichen.

Es finden Klassifizierungsmessungen und Auswertungen nach VDI 2083 Blatt 8 (reales Bauteil) sowie dem Klassifizierungsmodell für Werkstoffpaarungen bei dem Belastungskollektiv von drei repräsentativen Auslastungen statt.

Um die Übertragbarkeit der unterschiedlich gewonnenen Klassifizierungsergebnisse festzustellen, muss ein Modell entwickelt werden. Es kann jedoch erst in einem zweiten Schritt erstellt werden, wenn sich zuvor das Klassifizierungsmodell zur Bewertung der Reinraumtauglichkeit von Werkstoffpaarungen in Prüfständen etabliert hat.

Alle erzielten Messwerte und Aussagen sind mit geeigneten statistischen Verfahren zu bestätigen.

5 Konzipieren eines Werkstoffprüfstands

5.1 Reibungsvorgänge

Die Reibung zwischen zwei Körpern kann prinzipiell durch die drei nachfolgenden Verfahren realisiert werden (Bild 3 und Bild 4).

Beim „Kugel-Scheibe-Test“ wird eine Kugel gegen die Stirnfläche einer Scheibe gepresst. Die Kontaktstelle ist punktförmig, die Kugel ist fixiert.

Beim „Scheibe-Scheibe-Test“ wird eine drehbar gelagerte Scheibe seitlich an die Antriebsscheibe herangeführt und rollt auf dieser ab. Die Kontaktstelle ist linienförmig, beide Oberflächen sind an der Kontaktstelle gekrümmt.

Beim „Rolle-Scheibe-Test“ wird eine Rolle (zum Beispiel Edelstahl- oder PA6-Rolle) auf die Stirnseite einer Scheibe gepresst, die mit der zu untersuchenden Beschichtung versehen ist. Das Verfahren wird für die Untersuchung von Belägen oder Beschichtungen eingesetzt, auf denen im realen Fall eine

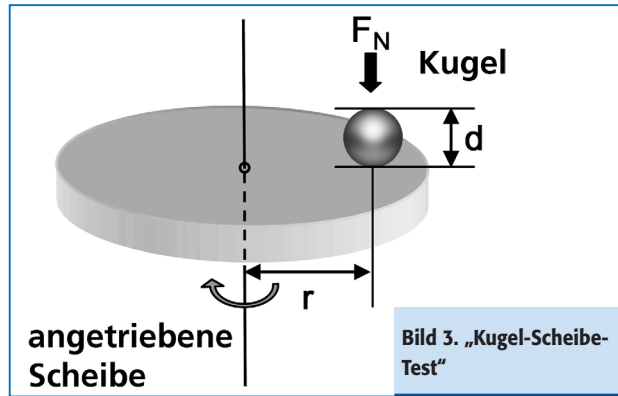


Bild 3. „Kugel-Scheibe-Test“

Rolle abläuft. Der „Rolle-Scheibe-Test“ wird zum Beispiel für die Prüfung eines Reinraumbodenbelags angewendet, auf welchem rollenbetriebene Wagen ablaufen.

5.2 Versuchsprinzip

Da der „Kugel-Scheibe-Test“ häufig in Literatur und Praxis zur Anwendung kommt, liegen hierzu umfangreiche Datensätze zur Korrelation mit der Partikelgenerierung vor. Ein weiterer Vorteil des Tests liegt darin, dass eine punktförmige Kontaktstelle zwischen den Werkstoffen vorliegt. Da somit eine hohe Standardisierbarkeit besteht, wird das „Kugel-Scheibe-Verfahren“ für die folgenden Betrachtungen herangezogen. Dabei rotiert eine Prüfscheibe mit der Frequenz f unter einer Kugel des Durchmessers d , die mit der Normalkraft F_N bei einem Radius r auf die Scheibe gepresst wird. An der Kontaktstelle von Kugel und Scheibe kommt es zu einem Materialabtrag, der von einer Partikelemission begleitet wird. Es bildet sich eine Verschleißspur aus. Die Charakteristika sowohl der Verschleißspur als auch der Kontaktstelle können in Abhängigkeit der erfassbaren Belastungsgrößen an realen Komponenten (Anpressfläche, Laufstrecke, Mehrfachbelastung von Teilstrecken) zur Auswertung und Feindifferenzierung herangezogen werden.

5.3 Identifizieren der maßgeblichen Parameter

Bei einem „Kugel-Scheibe-Test“ stellen die beteiligten Prüfkörper (Kugel, Scheibe) ein Verschleißsystem dar. Es kann durch einen Parametersatz beschrieben werden. Für die hier durchgeführten Versuche ergeben sich die maßgeblichen Pa-

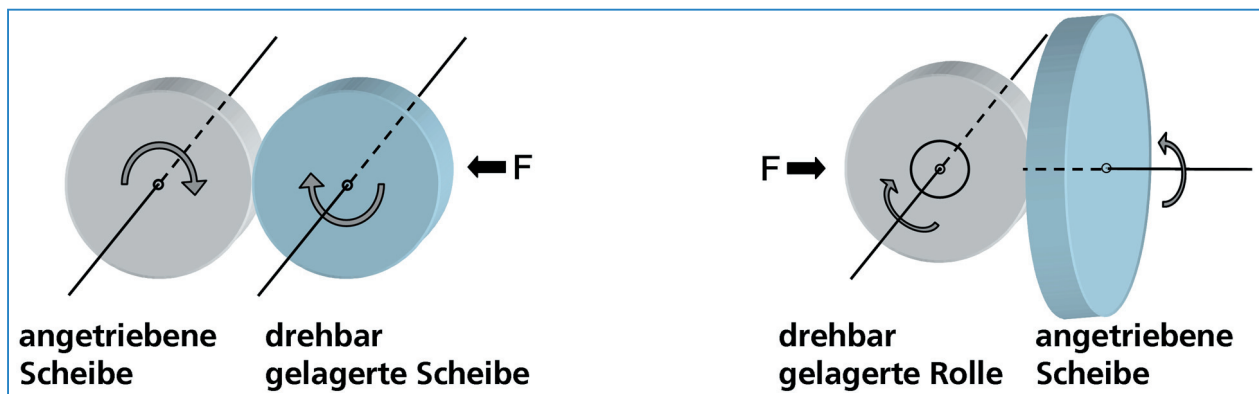


Bild 4. „Scheibe-Scheibe-Test“ (links) und „Rolle-Scheibe-Test“ (rechts)

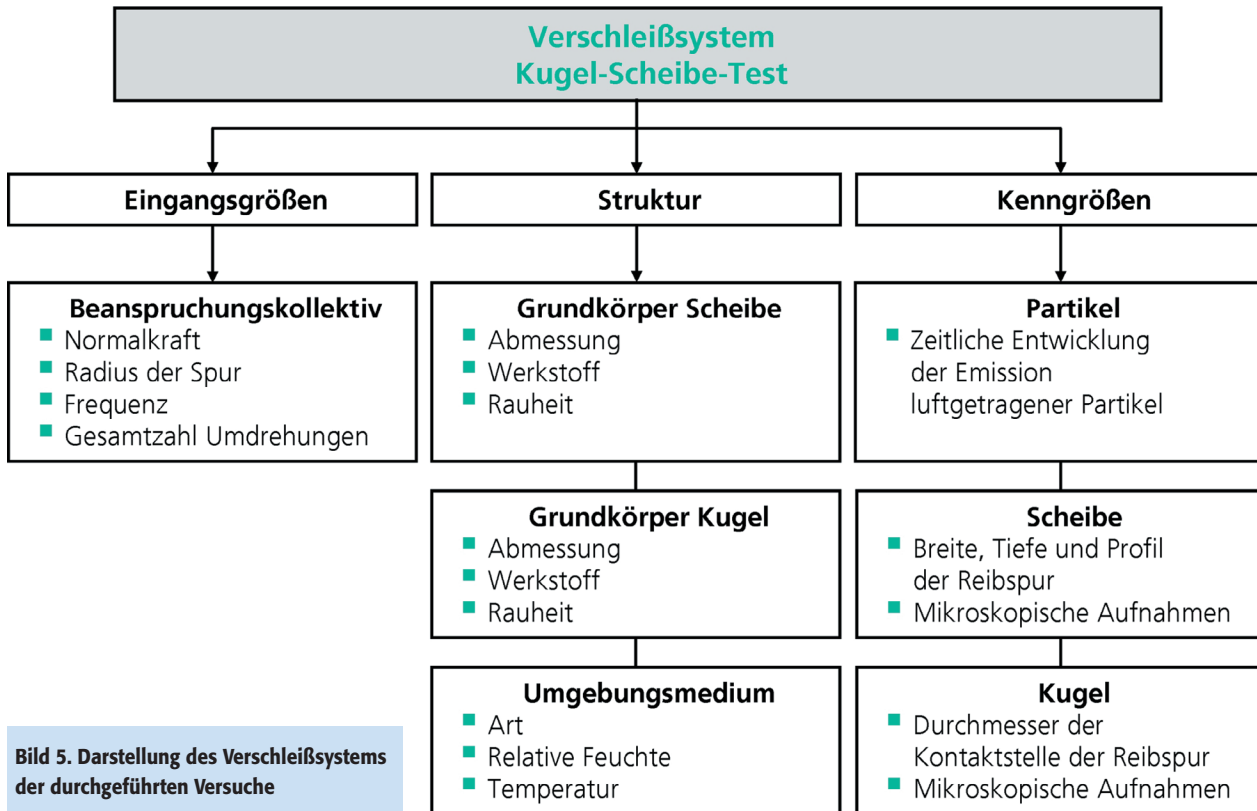


Bild 5. Darstellung des Verschleißsystems der durchgeführten Versuche

parameter des Verschleißsystems in Anlehnung an DIN 50320 (alt) wie in **Bild 5** gezeigt.

In der Literatur liegen keine Daten vor, deren Gegenstand die partikuläre Emission von Reibpaarungen oder die Verknüpfung von tribologischen Größen mit einer beobachteten Partikelemission sind. In DIN 50324 (alt) wird ein Ringversuch beschrieben, in dem mittels des „Kugel-Scheibe-Tests“ Edelstahl-Paarungen untersucht werden. Die dort verwendeten Eingangsgrößen dienen als Ansatzpunkt für Vorversuche.

In den Vorversuchen wurde die Abhängigkeit der untersuchten Kenngrößen (Partikelemission, tribologische Größen) von der Normalkraft untersucht und die zeitliche Entwicklung über einen längeren Zeitraum erfasst.

5.4 Umsetzen des Prüfstandkonzepts

Bild 6 zeigt die Konzeption eines Prüfstands nach dem „Kugel-Scheibe-Test“, bei welchem die Anforderungen an die Reinraum- und Reinheitstauglichkeit des Prüfstands selbst eingehalten werden müssen.

5.5 Integrieren der Partikeluntersuchungen mit der Bestimmung der Tribo-Kenngrößen

Parallel zur Untersuchung der Partikelemission werden tribologische Kenngrößen ermittelt. Für die Gegenüberstellung der Ergebnisse wird als Bezugsgrundlage die Partikelemission verwendet. Aus den Messwerten der einzelnen Partikelkanäle ($>0,2 \mu\text{m}$; $>0,3 \mu\text{m}$; $>0,5 \mu\text{m}$ und $>5,0 \mu\text{m}$) kann die Größe „Partikelvolumen“ abgeleitet werden.

Die tribologischen Kenngrößen werden einzeln und in zusammengesetzter Form (als abgeleitete Größen wie Spurvolumen) auf diese Größe bezogen. Damit kann der Zusammen-

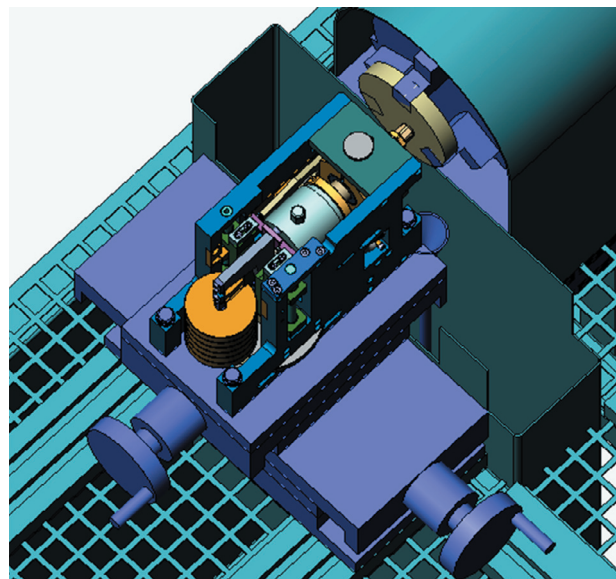


Bild 6. Konzeption eines reinraum- und reinheitstauglichen Werkstoffprüfstands

hang der tribologischen Kenngrößen und der Partikelemissionswerte beurteilt werden.

6 Klassifizierungsmodell für Werkstoffpaarungen

Entscheidendes Ziel ist es, die Entwicklung der Partikelemission während der tribologischen Belastung zu beobachten und zu charakterisieren.

Die verwendeten optischen Partikelzähler liefern die Partikelmesswerte in differentieller Darstellung, das bedeutet als Zählereignisse pro Messzeit- oder Messvolumenintervall.

In Vorversuchen ergab sich bei der graphischen Darstellung der Partikelmesswerte über die Anzahl der Umdrehungen ein sehr unstetiges Verhalten der Messwertentwicklung, so dass die Messwerte in dieser Form als Grundlage für eine Charakterisierung ungeeignet waren (**Bild 7**).

Während der ersten Umdrehung der Prüfkugel auf der Prüfscheibe, läuft die Kugel auf einer bislang unberührten Laufstrecke ab, so dass eine geringe Partikelemission stattfindet. Während der Folgeumdrehung läuft die Kugel auf einer bereits belasteten Laufstrecke ab, so dass erhöhte Partikelemissionen die Folge sind. Dieser Effekt setzt sich mit den Folgeumdrehungen jeweils fort und erklärt das beobachtete unstetige Verhalten der Emissionswerte über die Gesamtzeit. Dieser Sachverhalt führt dazu, dass die Voraussetzung für eine Auswertung mit der Student-t- und Poisson-Statistik – wie dies die VDI 2083 Blatt 8 fordert – nicht mehr erfüllt ist.

Generell ist ein tendenzieller Anstieg der Messwerte mit der Anzahl der Umdrehungen zu beobachten (siehe Bild 7). Sofern nun alle bis zu einer diskreten Umdrehungsanzahl generierten Partikel aufaddiert werden, entspricht dies einer integralen Darstellung der Partikelmesswerte. Die resultierenden Kurven zeigen in dieser Darstellung einen stetigen Verlauf (**Bild 8**).

Mit Hilfe der integralen Darstellung lassen sich Graphen erzeugen, die als Grundlage zur Charakterisierung der Partikelemission dienen.

Zur Erklärung der beobachteten Zunahme der Emissionswerte über die Zeit wird davon ausgegangen, dass während der ersten Umdrehung der Werkstoffpaarung bereits Partikel als Schleifmittel erzeugt werden. Während der Folgeumdrehung verursacht die Werkstoffpaarung (zusammen mit den vorher erzeugten Partikeln) noch schneller weitere Partikel, so dass ein Lawineneffekt stattfindet. Mathematisch wird versucht, den lawinenartigen Anstieg der Partikelemission mit einem exponentiellen Ansatz darzustellen:

$$y = a \cdot e^{(b \cdot x)}$$

Nach einer Näherung der kumulierten Partikelemissionsgraphen mittels nichtlinearer Regression, können die Kurven mathematisch exakt weiter betrachtet werden.

Die Parameter a und b beziehungsweise das Wertepaar (a/b) der Regressionskurven stellen einen Maßstab für die Emissionsrate dar und damit die Reinraumtauglichkeit der betrachteten Werkstoffpaarung.

Da die Zahl generierter Partikel direkt mit der Anzahl der Umdrehungen, nur aber in untergeordnetem Maß mit der verstrichenen Zeit zusammenhängt, wird als neue Laufvariable anstelle der Messzeit die Zahl der Umdrehungen herangezogen. Nach Umrechnen der Grenzwerte der maximal zulässigen Partikelzahlen für die einzelnen Luftreinheitsklassen nach DIN EN ISO 14644-1 in Abhängigkeit der Umdrehungszahlen, ergibt sich ein an die Problematik angepasstes Luftreinheitsklassendiagramm (**Bild 9**).

Differentielle Partikelemission

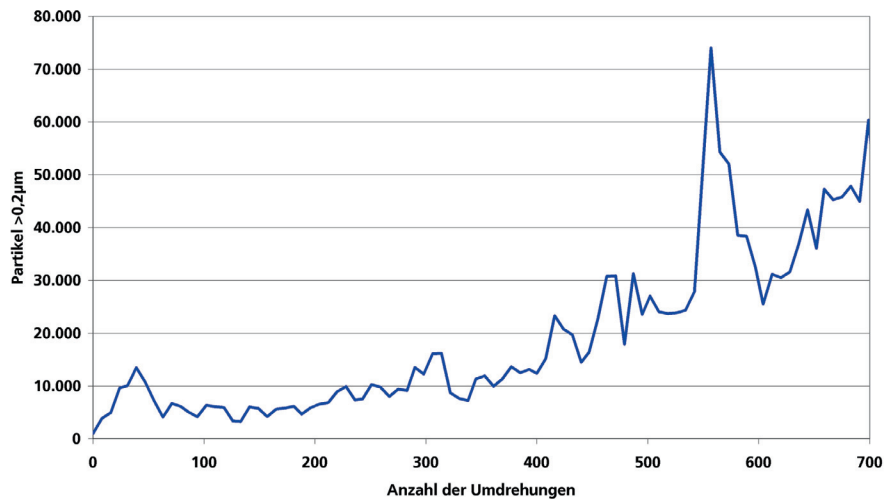


Bild 7. Differentielle Darstellung detektierter Partikelemissionen

4 unterschiedliche Belastungen

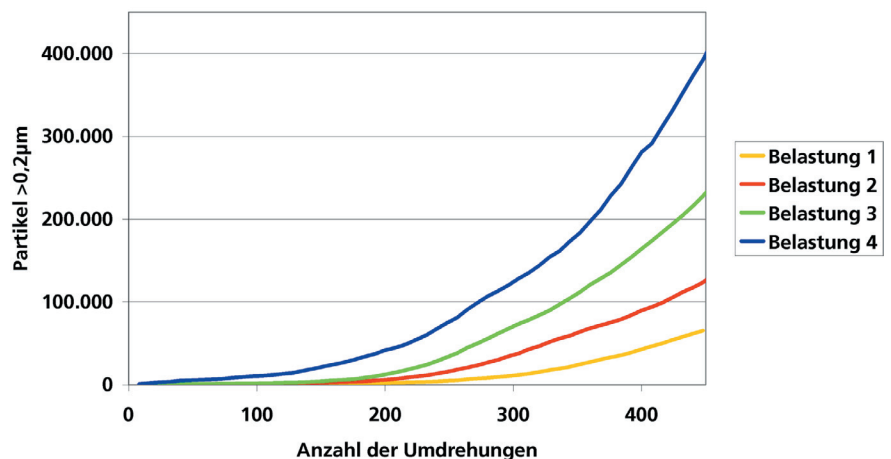


Bild 8. Integrale Darstellung detektierter Partikelemissionen in Abhängigkeit unterschiedlicher Prüfradien

Bei Abbildung der aufsummierten Partikelwerte mittels Regressionskurven schneiden diese immer die Grenzgeraden der Luftreinheitsklassen. Um zum einen das Wertepaar (a/b) der Regressionskurven auf einen einzelnen Parameter zu reduzieren, und des Weiteren eine eindeutige Aussage über die Reinraumtauglichkeit der betrachteten Werkstoffpaarung zu erhalten, ist die Festlegung auf eine feste Anzahl von Umdrehungen notwendig.

Da in dem dargestellten Beispiel die untersuchte Werkstoffpaarung bei der Referenzumdrehung von N = 500 zwischen den Grenzwertgeraden der Luftreinheitsklassen ISO-Class 5 und ISO-Class 6 liegen, kann diese Werkstoffpaarung gesichert in Reinräumen der ISO-Class 6 eingesetzt werden.

7 Vorteile des Klassifizierungsverfahrens

Im Folgenden sind die Vorteile des Klassifizierungsmodells zur Bewertung der Reinraumtauglichkeit von beliebigen Werkstoffpaarungen zusammengefasst:

- Vorbewertung der Reinraumtauglichkeit einer Werkstoffpaarung mittels tribologischer Voruntersuchungen;
- Korrelation mit Datenbanken der Tribologie;
- Werkstoffprüfung ohne aufwendigen Formenbau für die tatsächliche Produktionsanlage;
- prozessunabhängige Bewertungen der Reinraumtauglichkeit von Werkstoffpaarungen für den Einsatz in diskreten Luftreinheitsklassen sind möglich.
- Wegfall der Empirie bei der Werkstoffauswahl.

8 Ausblick

In der weiteren Forschung werden vor allem die Wechselwirkungsbeziehung zwischen Klassifizierungsergebnissen an realen Bauteilen – wie diese nach der VDI 2083 Blatt 8 klassifiziert wurden – und an „separierten“ Werkstoffpaarungen in Laborprüfständen erarbeitet.

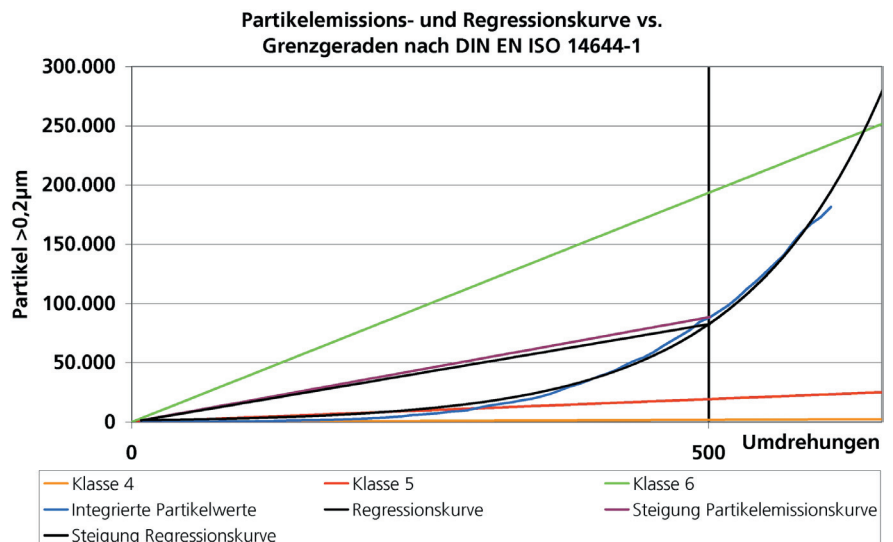


Bild 9. Angepasstes Luftreinheitsklassendiagramm mit integraler Darstellung eines detektierten Partikelemissionsvorgangs

Weiterführende Literatur

[1] Bader, U.; Schliesser, J.; Hägele, K.-D.: Planning and Realization of a Highly Intelligent and Flexible Transport System for the Material Distribution of Minienvironments. In: 42nd Annual Technical Meeting, Orlando 1996. Institute of Environmental Sciences, 1996. pp. 506–515

[2] Baechle, T.; Marvell, G.; Fosnight, W.; u.a.: Assessing the Capabilities of a Minienvironment to Meet Increasing Environmental Specifications. Microcontamination, May, 1992, pp. 25–29; p. 65

[3] Degenhart, E.; Schließer, J.; Litsche, H.; u.a.: Untersuchungen zur Einführung einer Automatisierung mit SMIF-Komponenten und lokalen Reinräumen. Ergebnisbericht: Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart, 1991

[4] Doche, C.: Wafer Confinement for Control of Contamination in Microelectronics. Solid State Technology, August 1990, pp. 1–5

[5] Granneman, E. H. A.: Trends in contamination control in IC production tools. Solid State Technology, July 1997, pp. 225–232

[6] Kaun, R.: Verfahren zur Konzeption automatischer reinraumtauglicher Fertigungsanlagen und -zellen. Berlin: Springer-Verlag 1997

[7] Ohmi, T.: Total Contamination Control for Semiconductor Manufacturing. Swiss Contamination Control 3 (1990) Nr. 4b. S. 15–25

[8] Schliesser, J.: Designing Methods to Obtain a Less Contaminated Air-Flow at the Product Level. 40th Annual Technical Meeting. Chicago, 1994, Institute of Environmental Sciences 1994. pp. 406–412

[9] VDI 2083 Blatt 1: Reinraumtechnik: Reinraumtechnik – Partikelreinheitsklassen der Luft. Düsseldorf: VDI-Gesellschaft Technische Gebäudeausrüstung, Juni 2003

[10] VDI 2083 Blatt 3: Reinraumtechnik: Meßtechnik in der Reinraumluft. Düsseldorf: VDI-Gesellschaft Technische Gebäudeausrüstung, Februar 1983

[11] Geissinger, J.: Grundlagen zur Entwicklung reinraumtauglicher Handhabungssysteme. Berlin: Springer-Verlag 1989 (IPA-IAO Forschung und Praxis Band 141). Zugleich Dissertation, Stuttgart, 1989

[12] Degenhart, E.: Strömungstechnische Ausrichtung reinraumtauglicher Fertigungseinrichtungen. Berlin: Springer-Verlag 1992 (IPA-IAO Forschung und Praxis Band 165). Zugleich Dissertation, Stuttgart, 1992

[13] Schließer, J.: Untersuchungen von Reinheitssystemen zur Herstellung von Halbleiterprodukten. Berlin: Springer-Verlag, 1998 (IPA-IAO Forschung und Praxis Band 281). Zugleich Dissertation, Stuttgart, 1998

[14] Klumpp, B.: Prüfverfahren zur Untersuchung der Partikelreinheit technischer Oberflächen. Berlin: Springer-Verlag 1993 (IPA-IAO Forschung und Praxis Band 182). Zugleich Dissertation, Stuttgart, 1989

[15] Schließer, J., Dorner, J.: Reinraumtechnik richtig angewendet – Ein wesentlicher Bestandteil „reiner“ Produktionssysteme. wt Werkstatttechnik 89 (1999), S. 73–76. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag

[16] Reinigung von Komponenten und Systemen der Reinstmedienversorgung. Verbundprojekt IPA-Stuttgart, 1993

[17] Top 10 Standards. Arbeitsunterlagen zum laufenden Verbundprojekt „Initiative Reinstmedien / Joint Media“, IPA, Stuttgart, 1997

[18] Anwendungen in der Praxis – Abnahme von Reinräumen nach der VDI-Richtlinie 2083 Blatt 3. Seminarunterlagen „Produzieren unter reinen Bedingungen“, Technische Akademie Esslingen, 1999

[19] Grundlagen der Aerosolmesstechnik. Seminar „Aerosolmesstechnik“. Universität Duisburg, Februar 1985

[20] Gommel, U.; Rapp, A.: Mit innovativen Werkstoffen und Schichtsystemen Wettbewerbsvorteile sichern. GIT ReinRaum-Technik 6 (2004) Nr. 1, S. 14–15

[21] Gommel, U.: Bedarfsanalyse der reinheitskritischen Industriebereiche nach reinraumtauglichen Werkstoffen. Auswertung des Fragebogens „Werkstoffe für Reinraum-Anwendungen“. Stuttgart, Fraunhofer IPA, Internetadresse: www.ipa-qualification.com/de/umfrage/pdf/Auswertung/auswertung.pdf, Stand: 12.01.2005