

Leitfaden

Technische Sauberkeit in der Elektrotechnik

Schmutz ist Materie am falschen Ort

2. erweiterte Auflage





Technische Sauberkeit in der Elektrotechnik

Herausgeber:

ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik-
und Elektronikindustrie e.V.

Fachverband PCB and Electronic Systems

Fachverband Electronic Components and Systems

Lyoner Straße 9

60528 Frankfurt am Main

Telefon: +49 69 6302-437

Fax: +49 69 6302-317

E-Mail: pcb-es@zvei.org

www.zvei.org

Verantwortlich:

Peter Trunz

Fachverband PCB and Electronic Systems

Unter Mitarbeit von:

Peter Fischer, BaTiLoy GmbH

Jennifer Kordel, BaTiLoy GmbH

Thomas Zeike, Continental AG

Ralf Kuballa, Hella GmbH & Co. KG a.A.

Dr. Petrik Lange, Hella GmbH & Co. KG a.A.

Dr. Oliver Fastje, Kolb Cleaning Technology GmbH

Christian Smits, Kolb Cleaning Technology GmbH

Christian Daum, Kostal Kontakt Systeme GmbH

Frank Petri, Kostal Kontakt Systeme GmbH

Dr. Marc Nikolussi, Robert Bosch GmbH

Jürgen Frey, TDK Electronics AG

Volker Seipel, TE Connectivity Germany GmbH

Andreas Zitz, TE Connectivity Germany GmbH

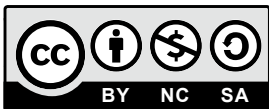
Harald Hundt, Vacuumschmelze GmbH & Co.KG

Dr. Helmut Schweigart, Zestron

Christian Sonnleitner, Zollner Elektronik AG

Michael Zimmerer, Zollner Elektronik AG

Oktober 2018, 2. erweiterte Auflage



Dieses Material steht unter der Creative-Commons-
Lizenz Namensnennung – nicht-kommerziell –
Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 Deutschland.



Inhalt

	Vorwort	6
1	Einleitung	7
2	Technische Sauberkeit	8
	2.1 Was ist Technische Sauberkeit?	8
	2.2 Historie – Normung der Technischen Sauberkeit	8
	2.3 Technische Sauberkeit in der Elektroindustrie	9
	2.4 Geltungsbereich dieses Leitfadens	9
3	Technische Sauberkeit als Herausforderung für den Lieferanten	11
	3.1 Verunreinigungen	11
	3.1.1 Definition von Partikel	11
	3.1.2 Definition von Fasern	12
	3.2 Prüfprozedur zur Bestimmung der Technischen Sauberkeit	13
	3.2.1 Grundlagen	13
	3.2.2 Abklärungsbogen	14
	3.2.3 Anlagentechnik	15
	3.2.4 Parameter für das Extraktionsverfahren ‚Spritzen‘	16
	3.2.5 Der Abspritzprozess	16
	3.2.6 Vorbereitung der Membrane für die messtechnische Analyse	16
	3.3 Messtechnische Analyse	17
	3.4 Bewertung der Ergebnisse von Sauberkeitsanalysen	18
	3.4.1 Einführung	18
	3.4.2 Bezug der Partikelanzahl auf die Bauteiloberfläche	18
	3.4.3 Vorgehensweise bei Verletzung von Eingriffsgrenzen	20
	3.5 Erweiterte Risikobetrachtung	20
	3.5.1 Beispiel	21
	3.6 Bauteilsauberkeit: Datenmanagement und Visualisierung	22
4	Stand der Technik: Technische Sauberkeit in der Elektronikindustrie	29
	4.1 Process-Flow (pro Cluster)	29
	4.1.1 Cluster Elektronikfertigung	29
	4.1.2 Cluster passive Bauelemente	30
	4.1.3 Cluster elektromechanische Bauelemente	31
	4.1.4 Cluster Leiterplatte	32
	4.2 Ist-Situation der Technischen Sauberkeit in der Elektronikindustrie	32
	4.2.1 Elektronikfertigung	33
	4.2.2 Elektronische Bauelemente	34
	4.2.3 Elektromechanische Bauelemente	37
	4.2.4 Metallgehäuse	41
	4.2.5 Verpackungen	41
	4.2.6 Leiterplatten	42
	4.3 Ermittlung der möglichen Herkunft von Partikeln in der Produktion	44
	4.3.1 Entstehung von Partikeln	44
	4.3.2 Cluster Elektronikfertigung	44
	4.3.3 Cluster passive Bauelemente	45
	4.3.4 Cluster elektromechanische Bauelemente	48
	4.3.5 Cluster Leiterplatte	50

4.4	Sauberkeitsgerechte Konstruktion und Prozessauswahl	54
4.5	Umgebungssauberkeit und Visualisierung	57
4.6	Tipps zur Reinigung	61
4.6.1	Waschen	61
4.6.2	Bürsten	62
4.6.3	Saugen	62
4.6.4	Abblasen	62
4.6.5	Reduktion von Verschleppung, sauberkeitsgerechte Arbeitsplatzgestaltung	63
4.6.6	Adhäsionsverfahren	63
4.7	Anforderungen an Verpackung und Logistik	64
5	Warum lösen metallische Partikel in Baugruppen so selten Kurzschlüsse aus?	65
5.1	Kontaktwahrscheinlichkeit	66
5.1.1	Einleitung, Theorie	66
5.1.2	Versuche zur Kontaktwahrscheinlichkeit	68
5.1.3	Ergebnisse	70
5.2	Waschextraktion vs reale Mobilität	71
5.3	Partikelsenken	71
5.4	Auswirkung von Kurzschlüssen an ICs	72
5.5	Tool zur Abschätzung des Kurzschlussrisikos	72
5.5.1	Einleitung	72
5.5.2	Modellannahmen	73
5.5.3	Berechnungsmethode	74
5.5.4	Orientierungsfaktor	74
5.5.5	Kritische Fläche	75
5.5.6	Anzahl Partikel pro Größenklasse	76
5.5.7	Gewichtungsfaktoren	76
5.6	Beispielhafte Anwendung des Risikotools	78
5.6.1	Beispielhafte Anwendung des Risikotools für Ausfallrate	78
5.6.2	Beispielhafte Anwendung des Risikotools bei Designänderung	79
5.6.3	Beispielhafte Anwendung des Risikotools zur Risikoabschätzung bei Spezifikationsverletzung	80
6	Zusammenfassung	81
7	Ausblick	82
8	Verwandte Themen	84
8.1	Ionische Kontamination	84
8.1.1	Filmische Verunreinigung	86
8.1.2	Biologische Filme	86
8.1.3	Chemische Filme	86
8.2	Whisker	86
9	Weiterführende Literatur	88
10	Beteiligte Firmen	89
11	Appendix	91

Unter Bauteilsauberkeit wird das Fehlen von Partikeln auf Bauteilen verstanden, die den weiteren Fertigungsprozess bzw. die korrekte Funktion des Bauteils bzw. der Baugruppe beeinträchtigen oder verhindern können.

Auf Basis nationaler und internationaler Normen zum Thema Bauteilsauberkeit sind viele unterschiedliche Unternehmensnormen abgeleitet und entwickelt worden. Dies hat u. a. dazu geführt, dass sich diese unterschiedlichen Anforderungen entlang der Wertschöpfungskette potenzieren und daraus nicht realisierbare Anforderungen generiert werden.

Die Wege und Methoden, die in VDA-Band 19 (VDA 19) Teil 1 und 2 aufgenommen wurden, sind dabei so allgemein gehalten, dass sie auf das komplette Spektrum von Automobilteilen anwendbar sind. Die Lösung konkreter Sauberkeitsprüf- oder Produktionsfragen ist somit immer Aufgabe von bauteil- bzw. produktspezifischen Spezialisten.

Hier setzt dieser ZVEI-Leitfaden an. Sowohl die Sauberkeitsprüfung nach VDA 19 Teil 1 als auch Fragestellungen zur Planung und Optimierung von sauberkeitsrelevanten Fertigungsbereichen nach VDA 19 Teil 2 werden hier aus Sicht der Fertigung von elektrischen, elektronischen und elektromechanischen Bauelementen sowie Leiterplatten und elektronischen Baugruppen beleuchtet und konkretisiert. Durch die Abstimmung und Festlegung der Sauberkeitsprüfprozedur speziell auf und für die Teile und Komponenten der Elektronikproduktion wird in diesem Leitfaden die bisher ungenügende Vergleichbarkeit von Analyseergebnissen deutlich erhöht. Darüber hinaus wird ein Ansatz empfohlen, wie die Ergebnisse solcher Sauberkeitsanalysen statistisch einzuordnen und zu verstehen sind. Zusätzlich bekommt der Anwender zielgerichtete Informationen über die eingesetzten Fertigungsschritte und deren Verschmutzungsrisiken. Die Anwendung dieses Leitfadens beschränkt sich dabei nicht nur auf die Messung oder Optimierung der Technischen Sauberkeit im eigenen Betrieb, son-

dern bietet eine abgestimmte Diskussionsgrundlage für Gespräche im Kunden-Lieferanten-Verhältnis. Da die in diesem Leitfaden untersuchten Bauteile zum Teil stark unterschiedliche Partikelwerte aufwiesen, wird hier auf eine Festlegung von generellen Grenzwerten – kommend von der Funktionalität – verzichtet.

Vorwort zur zweiten erweiterten und überarbeiteten Auflage:

Der Leitfaden Bauteilsauberkeit wurde in seiner 1. Fassung im Jahr 2013 veröffentlicht. Mittlerweile hat sich der Wissensstand im Bereich der Technischen Sauberkeit deutlich erweitert. Zudem wurde auch der VDA 19 Teil 1 überarbeitet. Dieser Entwicklung wird nun in der 2. Fassung des Leitfadens Bauteilsauberkeit sowie einer eigenen Onlineplattform unter <https://bauteilsauberkeit.zvei.org> Rechnung getragen. Neben einigen Anpassungen, um weiterhin konform zum VDA 19 zu sein, wurden einige Kapitel inhaltlich ergänzt. So wurden z. B. die Erfahrungswerte für Komponenten aktualisiert und erweitert sowie ein Abklärungsbogen für die Sauberkeitsanalyse vorgeschlagen (siehe: <https://bauteilsauberkeit.zvei.org>).

Zudem wurden neue Inhalte ergänzt. So wird z. B. ein Berechnungstool vorgestellt (siehe: <https://bauteilsauberkeit.zvei.org>), welchem ein wissenschaftlicher Ansatz zur Betrachtung des Risikos für den elektrischen Kurzschluss – verursacht durch leitfähige Partikel – zugrunde liegt. Darüber hinaus wurden Themengebiete wie Umgebungssauberkeit, Datenmanagement, sauberkeitsgerechtes Design sowie einige Betrachtungen zu Whiskern, filmischen, ionischen und biologischen Kontaminationen aufgegriffen.

Es sei an dieser Stelle allen Unternehmen, die an diesem Leitfaden aktiv mitgewirkt haben, herzlich gedankt. Wenngleich der Leitfaden nicht verbindlich ist, so hat sich sein Nutzen für praktische Anwendungsfälle in den vergangenen fünf Jahren bereits gezeigt.

1 Einleitung

Was ist ein sauberes Bauteil? Wie bestimme ich den Grad der Sauberkeit eines Bauteils? Ab wann ist ein Bauteil zu stark verschmutzt? Fragen, die in mechanischen Fertigungen schon länger relevant sind, haben durch kleiner werdende Bauteile und entsprechend steigende Bauteildichten auch die Elektronikfertigung erreicht. Hier können z. B. metallische Partikel zu Kurzschlüssen führen und nicht-metallische Partikel können ein korrektes Bestücken von Leiterplatten verhindern.

Um diese Schwierigkeiten zu vermeiden, wurden ursprünglich zwischen Lieferant und Kunde Vereinbarungen getroffen wie: ‚Die Bauteile müssen sauber angeliefert werden‘, wobei die Frage nach dem Grad der Sauberkeit nicht näher spezifiziert wurde. Heute existieren zunehmend detaillierte Spezifikationen zu diesem Thema.

Mit VDA 19 Teil 1 existiert eine Richtlinie zur Definition von ‚Bedingungen zur Anwendung und Dokumentation von Methoden zur Bestimmung von Bauteilverunreinigungen mit Partikeln‘. Hier wird die Grundlage gelegt, um Sauberkeitsprüfungen in Darstellung und Ausführung vergleichbar, z. B. zwischen Lieferant und Kunde, zu gestalten. Der Band VDA 19 Teil 2 unterstützt zusätzlich bei der Suche und Bewertung von Partikelquellen entlang der Fertigungskette.

Wann ein Bauteil als sauber genug zu bezeichnen ist, lässt sich nur applikations-spezifisch begründen. Nur auf dieser Basis können maximale Partikelgrößen und Partikelmaterialien festgelegt werden, die definieren, ab wann eine Funktionsstörung der zu fertigenden Baugruppe zu erwarten und andererseits wie eine unterbrechungsfreie Fertigung zu gewährleisten ist. Die festzulegenden Partikelgrenzwerte bedeuten, dass diese damit ausgegrenzten Partikel am Ende der Fertigungskette auf den Bauteilen nicht vorhanden sein dürfen. Also muss eine Entscheidung getroffen werden, ob

- entstehende Partikel toleriert werden können
- der Prozess in Richtung Partikelvermeidung optimiert werden muss
- die Partikel direkt am Entstehungsort zu beseitigen sind
- am Ende der Fertigungsstrecke alle unerwünschten Partikel gezielt zu entfernen sind.

Welche Entscheidung hier auch getroffen wird, eine Schwierigkeit bleibt bestehen: Störende Partikel werden nicht gezielt produziert, sie sind ein (manchmal unerwünschtes) Nebenprodukt und können durch eine (herkömmliche) statistische Prozessregelung weder gesteuert noch verhindert werden.

2 Technische Sauberkeit

2.1 Was ist technische Sauberkeit?

Technische Sauberkeit ist ein Begriff, der durch partikelbedingte Ausfälle von Systemen in der Automobilindustrie geprägt wurde. Im Gegensatz zur optischen Sauberkeit, bei der es um dekorative Aspekte oder die optische Anmutung geht, bspw. in der Fahrzeuglackierung, bezieht sich die Technische Sauberkeit stets auf die Funktion von Bauteilen, Baugruppen und Systemen.

In der Automobilindustrie sind Partikelverunreinigungen häufig mobil und können im Betrieb von einem zunächst unkritischen Ort an eine partikelsensitive Stelle gelangen und dort zu einer Funktionsbeeinträchtigung führen. So kann bspw. ein Partikel auf der Linse einer Kamera zur Verkehrsschilderkennung zu einer Fehlfunktion führen. Ein anderes Beispiel ist ein leitfähiger Partikel aus einem Aluminiumdeckel einer elektronischen Steuerung, der dann zu einem Kurzschluss auf einer Leiterplatte und damit zu einem Funktionsfehler führen kann. Aus diesem Grund gelten Sauberkeitsforderungen in der Automobilindustrie häufig für komplette Systeme, wobei das partikelempfindlichste Bauteil (das schwächste Glied der Kette) oft die Sauberkeit und deren zulässige Grenzwerte für das ganze System und aller darin verbauten Bauteile bestimmt. Projiziert auf Bauteile bedeutet Technische Sauberkeit die Festlegung, Einhaltung und Überprüfung der Grenzwerte z. B. nach Gewicht des Restschmutzes, Anzahl, Art und Größe von partikulären Verunreinigungen. Gleichzeitig werden in der Automobilindustrie Fehler nur noch im ppm-Bereich toleriert. Es existieren bereits Spezifikationen und ständig werden neue Vereinbarungen getroffen. Diese sind oft spezifisch auf das Unternehmen oder das Bauteil und dessen Funktion zugeschnitten. Der Geltungsbereich ist beschränkt, d. h. meist firmenintern und/oder für den Lieferanten gültig.

Auch wenn der Begriff Technische Sauberkeit durch die Automobilindustrie geprägt wurde, finden die Vorgehensweisen zur Sauberkeitsprüfung nach VDA 19 (Extraktion mit einer Flüssigkeit, Filtration der Partikel auf eine Analysemembrane und anschließende Analyse der abgeschiedenen Partikel) inzwischen auch in weiteren Branchen wie der Medizintechnik, der optischen Industrie, der Hydraulik oder im Maschinenbau vermehrt Anwendung. Weil es eine absolute Sauberkeit oder Reinheit nicht gibt, muss man in Anbetracht von Ort und Zweck auf das praktisch Mögliche und wirtschaftlich Sinnvolle eingehen.

2.2 Historie – Normung der Technischen Sauberkeit

Aufgrund der Entwicklung von komplexeren Systemen mit Einsatz in engeren Einbau-räumen in der Automobilindustrie war es bereits zu Beginn der 1990er-Jahre vermehrt zu Schädigungen durch Verunreinigungen gekommen. Beispielsweise Antiblockiersysteme im Allgemeinen oder Direkteinspritzsysteme in Dieselfahrzeugen waren hier besonders empfindlich.

Um auf diese potenziellen Schäden zu reagieren, wurden bereits vereinzelt Vereinbarungen bezüglich Technischer Sauberkeit zwischen Kunden und Lieferanten getroffen.

Daraufhin entstand in der Automobilindustrie der Bedarf nach einer allgemeinen Standardisierung der Technischen Sauberkeit von Bauteilen. So kam es zur Bildung des Industrieverbands Technische Sauberkeit TecSa im Sommer 2001. Aus diesem Gremium wurde im Jahre 2004 die Richtlinie VDA 19 ‚Prüfung der Technischen Sauberkeit – Partikelverunreinigung funktionsrelevanter Automobilteile‘ veröffentlicht, die im Jahr 2015 als VDA 19 Teil 1 revidiert wurde. Darin wird empfohlen, wie bei Sauberkeitsprüfungen an Produkten für die Automobilindustrie vorzugehen ist.

Das internationale Gegenstück zu VDA 19 ist die Norm ISO 16232, welche im Jahr 2007 erschienen ist.

Im Jahr 2010 wurde der Leitfaden VDA 19 Teil 2, 'Technische Sauberkeit in der Montage' veröffentlicht. Das Regelwerk befasst sich mit der sauberkeitsrelevanten Ausrichtung der Montageproduktion.

2.3 Technische Sauberkeit in der Elektroindustrie

In der Industrie wird neben spezifischen Hausnormen vermehrt die allgemeingültige Richtlinie VDA 19 angewendet.

Diese empfiehlt die Art der Durchführung sowie die Darstellung von Bauteilsauberkeitsanalysen. Damit wird eine quantitative Vergleichbarkeit des Sauberkeitszustands von Bauteilen ermöglicht. Hingegen legt VDA 19 keine Grenzwerte für die Bauteilsauberkeit fest. Diese sind in Abhängigkeit der Bauteilfunktion, Herstellbarkeit und Überprüfbarkeit zu definieren.

Der ZVEI-Arbeitskreis Bauteilsauberkeit hat sich zum Ziel gesetzt, ergänzend zu VDA 19 und ISO 16232, diesen Leitfaden zu erarbeiten, der offene Fragestellungen praxisbezogen behandelt und Lösungen vorschlägt.

Ähnlich wie in der Festlegung von Maßtoleranzen ist neben der Bauteilfunktion auch die Herstellbarkeit zu berücksichtigen. Fertigungsprozesse, Fertigungsumgebung und Endverpackung beeinflussen die Bauteilsauberkeit. Eine Abstimmung über Einhaltung der Grenzwerte, zwischen Produktentwicklung und Fertigung bzw. Kunde und Lieferant, ist häufig erforderlich. Insbesondere dann, wenn Grenzwerte überschritten werden, was aber nicht zwingend zu einer Funktionsstörung führen muss. Hier ist eine tiefgreifende Abwägung zwischen Aufwand zur Einhaltung der Grenzwerte und möglichem Risiko erforder-

lich. Damit ist sichergestellt, dass keine überzogenen Sauberkeitsanforderungen generiert und festgeschrieben werden.

Mögliche Funktionsstörungen durch Partikel

Die Grenzwertfestlegung für Bauteilsauberkeit soll die Bauteilfunktion sicherstellen und ist bereits in der Entwicklungsphase des Bauteils zu treffen. Folgende mögliche Funktionsstörungen sind zu berücksichtigen:

- elektrischer Kurzschluss
- Verkürzung der Luft- und Kriechstrecken
- elektrische Isolation bei Kontakten
- Beeinträchtigung von optischen Systemen wie Kameras
- verminderte Benetzbarkeit/Lötbarkeit
- mechanische Blockade
- erhöhte oder reduzierte Reibung
- erhöhte oder reduzierte Kraft
- Undichtigkeit
- ...

Sind die verbleibenden Partikelverunreinigungen – auch Restschmutz genannt – in einem technischen System so gering, dass es zu keinen kurzfristigen oder langfristigen Funktionseinschränkungen und System-schädigungen kommt, so gilt das System im Sinne der Technischen Sauberkeit als hinreichend sauber.

2.4 Geltungsbereich dieses Leitfadens

Der Geltungsbereich dieses Leitfadens erstreckt sich auf die Fertigung von elektrischen, elektronischen sowie elektromechanischen Bauelementen, Leiterplatten und elektronischen Baugruppen, die gemäß dem Stand der Technik mit den üblichen Produktionstechniken hergestellt werden, und den daraus resultierenden Grad der Technischen Sauberkeit, der produkt- und prozessbedingt zu erwarten ist.

Der Leitfaden soll ein Dokument zur Orientierung sein, welches das technisch Mögliche darstellt und als Basis für Vereinbarungen zwischen Kunden und Lieferanten dienen soll. Der Leitfaden stellt ausdrücklich keine Spezifikation oder Norm dar.

Aussagen zur Fertigung von Elektromotoren, Batterien, Kabelbäumen und Relais sind nicht Bestandteil dieses Leitfadens.

Dieser Leitfaden richtet sein Hauptaugenmerk auf die Bauteilsauberkeit in Bezug auf lose und leicht anhaftende Partikel (Give-off Partikel). Filmische, ionische und biologische Kontaminationen finden Erwähnung. Die Reinheit von funktionellen Flüssigkeiten und/oder Gasen wird nicht behandelt.

Anhand von Praxisbeispielen konkretisiert der Leitfaden den VDA 19, gibt Hinweise für das Auftreten von Partikeln in Abhängigkeit von Prozessen und Materialien, zeigt beispielhaft deren Auswirkung auf die Funktion und Zuverlässigkeit und beschreibt geeignete Gegenmaßnahmen.

3 Technische Sauberkeit als Herausforderung für den Lieferanten

Angaben zur Bauteilsauberkeit wurden früher meist allgemein in Zeichnungen beschrieben und uneinheitlich überprüft, etwa:

Teile frei von Verunreinigungen wie z. B. Flitter, Trennmitteln, Fett, Öl, Staub, Silikon ...

Mit dem Erscheinen von VDA 19 / ISO 16232 wurde eine einheitliche, firmenübergreifende Vorgehensweise zur Erfassung, Analyse und Dokumentation der Bauteilsauberkeit festgelegt.

Zuvor übliche allgemeine, attributive Festlegungen, überprüft mittels einer visuellen Inspektion, wurden ersetzt z. B. durch Partikel-Größenklassen mit maximalen Partikelanzahlen, deren Überprüfung nur durch eine Laboranalyse möglich ist.

Die Verfahren zur Bestimmung der Bauteilsauberkeit nach VDA 19 sind standardisiert, reproduzierbar und auch objektiver als die zuvor praktizierten Methoden. Folgende Aspekte sollten bei einer Anwendung dennoch Beachtung finden:

- Das Aufkommen von Partikeln selbst aus demselben Fertigungslos kann stark schwanken.
- Die Entdeckung von Partikeln ist u. a. von der Art und Qualität der Analyse abhängig.
- Die Prüfung ist aufwendig, es bedarf eines Labors.
- Messmittelfähigkeitsanalysen (MSA) sind für den Gesamtprozess der Prüfung der Technischen Sauberkeit nicht möglich.
- Fertigungsbegleitende Kontrollen mit regulierenden Maßnahmen sind nur zeitverzögert möglich.

In der Praxis werden Sauberkeitsanalysen nach VDA 19 bei Fertigungsfreigaben, Requalifikationen, fertigungsbegleitend oder bei Verdachtsmomenten eingesetzt.

Eine zusätzliche Herausforderung für den Zulieferer stellt die Limitierung der nichtmetallischen Partikel dar (z. B. Staub, Fusseln, Abrieb usw.). Werden diese als funktionskritisch eingestuft und limitiert, so müssen bei der Grenzfestlegung auch die Fertigungsumgebung, die Eignung zur Nachreinigung sowie die Verpackung (zur Erhaltung der Sauberkeit) und Logistik bedacht werden. Detaillierte Angaben dazu sind in VDA 19 Teil 2 beschrieben. Die notwendigen kontrollierten Produktionsbedingungen (Sauberkeitsbereichsstufen) bedürfen eines erhöhten Aufwands. Darum sollten solche Grenzwerte nur dann festgelegt werden, wenn es funktionell erforderlich ist.

3.1 Verunreinigungen

3.1.1 Definition von Partikel

Gemäß VDA 19 Teil 1 sind Partikel feste Körper aus Metall, Kunststoff, Mineralien, Gummi oder Salzen. Pastöse Anteile gelten nicht als Partikel.

Als Sprachregelung für diesen Leitfaden gelten für metallische und nichtmetallische Partikel die nachfolgenden Begrifflichkeiten.

3.1.1.1 Metallische Partikel

Als metallische Partikel gelten Partikel, die sich im Wesentlichen durch eine metallisch glänzende, reflektierende Oberfläche auszeichnen. Die Detektion metallischer Partikel kann durch Kombination der Aufnahmen mit normalem und polarisiertem Licht erfolgen. In der Praxis ist ein entsprechend ausgestattetes Lichtmikroskop für die Metallidentifizierung ausreichend.

Die Identifizierung von metallischen Partikeln mithilfe des Lichtmikroskops birgt folgende potenzielle Fehlermöglichkeiten:

- Sehr kleine metallische Partikel oder gesintertes Metall können nicht als metallische Partikel erkannt werden.
- Stark oxidierte metallische Partikel können nicht als metallische Partikel erkannt werden.
- Reflektierende Nichtmetalle, wie z. B. Glas, können wegen ihres Reflexionsverhaltens fälschlicherweise als metallische Partikel eingestuft werden.

Da eine Unterscheidung in elektrisch leitfähig oder nicht im Rahmen der Technischen Sauberkeitsanalyse im Produktionsprozess zu aufwendig oder gar nicht möglich wäre, beschränkt man sich bei der Analyse auf das Auffinden von metallischen Partikeln bzw. metallisch glänzenden Partikeln.

Es muss darauf hingewiesen werden, dass eine Unterscheidung von metallischen und nichtmetallischen Partikeln durch den metallischen Glanz keine sichere Unterscheidung hinsichtlich der elektrischen Leitfähigkeit ermöglicht.

Generell wird die Annahme getroffen, dass metallisch glänzende Partikel metallisch und auch leitfähig sind.

Als Abhilfemaßnahme wird folgendes Vorgehen empfohlen: Für die größten als metallisch und die größten als nichtmetallisch detektierten Partikel sollte eine manuelle Nachprüfung durch den Operator unter dem Lichtmikroskop erfolgen. Gegebenenfalls müssen diese Partikel nach der manuellen Nachprüfung dann neu zugeordnet werden.

Detailliertere und aussagekräftigere Ergebnisse können mit Systemen wie z. B. EDX, Raman- oder Plasmaspektroskopie ermittelt werden. Dies ist jedoch mit höherem Aufwand verbunden.

3.1.1.2 Nichtmetallische Partikel

Als nichtmetallische Partikel gelten Partikel, die sich im Wesentlichen nicht durch eine metallisch glänzende bzw. reflektierende Oberfläche auszeichnen. Nichtmetallische Partikel beinhalten keine Fasern.

3.1.2 Definition von Fasern

In jeder Produktions- oder auch Laborumgebung, in der sich Personen aufhalten, ist mit allgegenwärtigen Textilfasern aus der Kleidung zu rechnen, die sich auch in Bauteilsauberkeitsanalysen wiederfinden. Als Fasern gelten nichtmetallische Partikel, die in der Regel in den Prüfberichten zwar erwähnt aber nicht berücksichtigt werden und gemäß VDA 19 Teil 1 folgende geometrische Randbedingungen erfüllen:

- Gestreckte Länge / maximaler Inkreis > 20 und
- Breite gemessen über maximalen Inkreis $\leq 50 \mu\text{m}$

Vereinfacht ausgedrückt heißt das:

- Das Längen- zu Breitenverhältnis ist 1:20 und
- die Breite einer Faser ist $\leq 50 \mu\text{m}$

Anmerkungen zur Definition:

- Der theoretische Ansatz ist bei den üblicherweise verwendeten zweidimensionalen optischen Messsystemen nur mit einer gewissen Unschärfe umsetzbar.
- Gegenüber früheren Definitionen muss mit einer Verschiebung der Anzahl an nichtmetallischen Partikeln und Fasern gerechnet werden.
- Auf Basis der aktuellen Definition wäre ein menschliches Haar mit einer Dicke von ca. 60–80 μm keine Faser mehr, sondern ein nichtmetallischer Partikel.
- Im Gegensatz dazu würde eine Glas- oder Kohlefaser mit einer Dicke von 40 μm nicht als Partikel, sondern als Faser klassifiziert werden, obwohl durchaus ein Schädigungspotenzial vorliegen kann.

Bei der Bestimmung von Fasern können folgende potenzielle Fehler auftreten:

- Fasern, die eine starke Krümmung aufweisen, können nicht erkannt werden.
- Partikel können fälschlicherweise als Fasern erkannt werden, wenn Breite und Höhe im Verhältnis zur Länge sehr klein sind (z. B. Kunststoffgrat).
- Fasern, die senkrecht (in z-Richtung) zur Membrane orientiert sind, können falsch oder nicht ausgewertet werden.
- Fasern können optisch ‚zerhackt‘ werden und nicht als eine Faser erfasst werden.

3.2 Prüfprozedur zur Bestimmung der technischen Sauberkeit

3.2.1 Grundlagen

Die Technische Sauberkeit von Bauteilen beschreibt den Zustand der Partikelverunreinigung auf den relevanten Oberflächen der Prüfobjekte.

Die Sauberkeitsprüfung sollte möglichst alle Partikel vollständig ermitteln und messtechnisch erfassen.

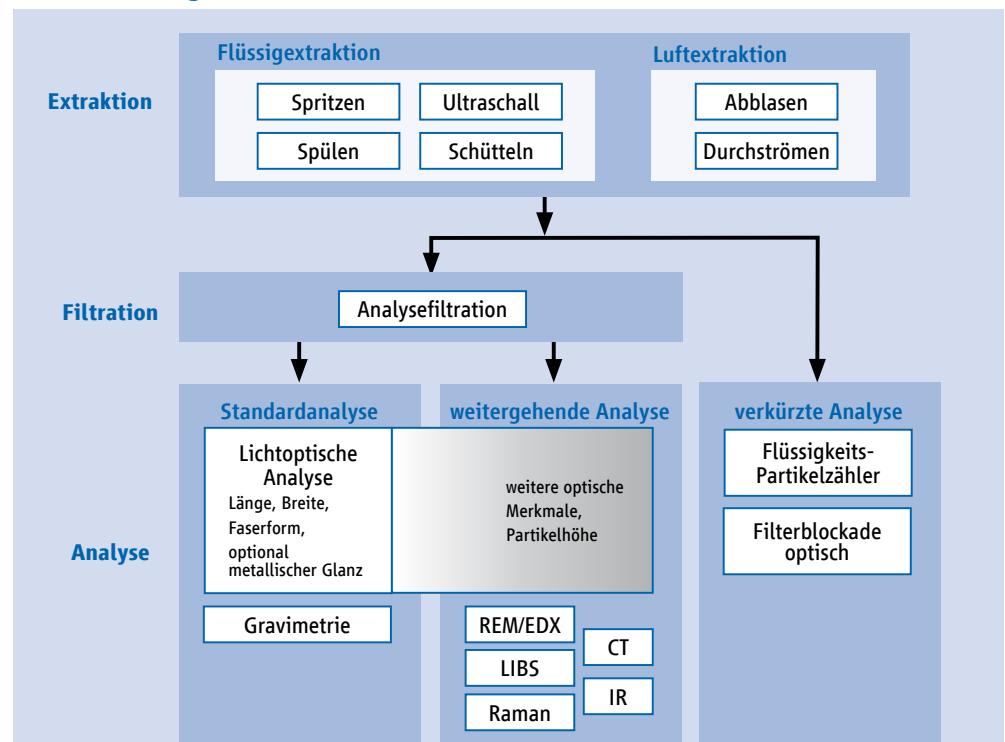
Der Band VDA 19 beschreibt hierfür die Bedingungen zur Anwendung von Methoden für die Bestimmung der Partikelverunreinigung und deren Dokumentation. In der Richtlinie VDA 19 werden verschiedene Extraktions- und Analyseverfahren beschrieben.

Für das Extrahieren der Partikel, die sich auf elektrischen, elektronischen und elektro-mechanischen Bauelementen sowie auf Leiterplatten und elektronischen Baugruppen (im folgenden ‚Bauteile‘ genannt) befinden, gibt es folgende Verfahren:

- Spritzen
- Ultraschall
- Spülen
- Schütteln
- Luftextraktion

Nach Meinung des ZVEI-AK Bauteilsauberkeit hat sich das Verfahren ‚Spritzen‘ nach VDA 19 als vielseitig einsetzbare Extraktionsmethode bewährt. Hierbei werden die Bauteile mit einer Flüssigkeit abgespritzt. Die abgelösten Partikel werden durch eine nachfolgende Filtration der Flüssigkeit abgeschieden und stehen zur Auswertung bereit.

Abb. 1: Prüfungsverfahren nach VDA 19 Teil 1



Um die Bauteilsauberkeit richtig zu beurteilen, muss das Extraktionsverfahren ‚Spritzen‘ qualifiziert werden. Dies erfolgt durch eine mehrmalige Wiederholung des Abspritzprozesses mit Auswertung. Hierbei muss die abgelöste Partikelfracht stetig abnehmen. Spätestens die sechste Analyse muss eine Partikelanzahl ≤ 10 Prozent der Summe der bisherigen Analysen (alle relevanten Partikel kumuliert) aufweisen. Dies wird als Abklingkurve (AKK) bezeichnet. Die AKK ist Voraussetzung für Serienanalysen und muss einmalig pro Bauteiltyp erfolgen.

Die Sauberkeit und damit die Eignung der Extraktionsanlage wird ohne Bauteile ermittelt. Hierbei erfolgt ein Spritzprozess mit gleichen Parametern wie bei einer Analyse mit Bauteilen. Die Partikelmenge, die dabei gefunden wird, dient der Freigabe der Anlage für den nächsten Test und wird als Blindwert bezeichnet.

In Anlehnung an VDA 19 wird nachfolgend in Kapitel 3.2.4 beschrieben, wie das Extraktionsverfahren ‚Spritzen‘ für die Trennung der Partikel von den Bauteilen und das Sammeln der Partikel auf einer Filtermembrane zur nachfolgenden messtechnischen Auswertung angewandt werden kann.

Partikel, die durch das Extraktionsverfahren von den Bauteilen nicht gelöst werden, sind als ‚fest anhaftend‘ einzustufen und werden im Sinne der Bauteilsauberkeit nicht berücksichtigt.

3.2.2 Abklärungsbogen

Der Abklärungsbogen beinhaltet alle prüfspezifischen Parameter einer Analyse. Er ist nicht nur für die Durchführung einer Analyse notwendig, z. B. in einem Analyselabor, sondern auch für die interne Betrachtung von verschiedenen Analysen, sowie die Freigabe beim Kunden mit den Prüfparametern aus der Anforderungsspezifikation.

Wie soll sonst sichergestellt werden, dass Messungen, die miteinander verglichen werden, unter denselben Voraussetzungen, z. B. mit dem gleichen Filtertypen und der gleichen Maschenweite, analysiert wurden?

Es ist immer sinnvoll, einen Abklärungsbogen zu erstellen, in dem jene Parameter vorgegeben werden, die eine Vergleichbarkeit von Analysen gewährleisten.

Hierzu müssen alle Möglichkeiten zur Durchführung einer Analyse (siehe auch Abb. 1) angegeben werden.

Im Rahmen der Überarbeitung des Leitfadens wurden beispielhafte Vorlagen für einen Abklärungsbogen „Umgebungssauberkeit“ und „Bauteilsauberkeit“ integriert (siehe auch Appendix). Nicht jeder, der eine Analyse benötigt, besitzt das Fachwissen, einen Abklärungsbogen vollumfänglich auszufüllen.

Deshalb wurden die Abklärungsbogen in zwei Abschnitte unterteilt:

Im ersten Abschnitt gibt es die folgenden Punkte, die vom Anforderer ausgefüllt werden sollten:

- Informationen zum Prüfling
- Entnahmebedingungen
- Sauberkeitsanforderungen
- usw.

Der zweite Abschnitt sollte vom Fachpersonal ausgefüllt werden:

- Angaben zur Partikelzählung
- Filtrierungsart und Filterart
- Darstellung der Ergebnisse
- Umgang mit der Verpackung
- usw.

Durch einen Abklärungsbogen wird zum einen der interne Umgang von Analysen, die miteinander verglichen werden sollen, deutlich vereinfacht. Zum anderen wird auch der Beauftragungsablauf simplifiziert, da Rückfragen vom Analyselabor hinsichtlich nicht eindeutiger bzw. fehlender Parameter minimiert werden.

Abb. 2: Beispiele von Extraktionsanlagen



3.2.3 Anlagentechnik

Für den Aufbau einer Anlage zum Abspritzen der Bauteile sind nachstehende Kriterien zu berücksichtigen:

Bauteilaufnahme

Behälter oder Trichter mit direktem Ablauf zur Filtermembrane. Gegebenenfalls kann in dem Behälter ein geeignetes Sieb als Bauteilaufnahme verwendet werden. Bei der Extraktion der Partikel von mehreren Bauteilen gleichzeitig müssen diese nebeneinander, nicht aufeinander, angeordnet sein. Die Erzeugung von neuen Partikeln während der Extraktion sollte ausgeschlossen sein.

Spritzeinrichtung

Für das manuelle Abspritzen der Bauteile – mit stabilem Volumenstrom – eignet sich ein Spritzwerkzeug (Lanze) mit einer Runddüse von z. B. 4 mm Durchmesser, das leicht per Hand bewegt werden kann.

Membranaufnahme

Eine Entnahme und Bestückung der Membrane aus der Anlage, evtl. unter Zuhilfenahme einer Pinzette, sollte unkompliziert möglich sein. Zur Sicherstellung, dass keine Flüssigkeit zwischen Behälter und Membrane zurückbleibt und somit Partikel nicht erfasst werden könnten, ist ein Absaugen der Prüflüssigkeit aus dem Behälter der Bauteilaufnahme (ggf. mittels Unterdruck) hilfreich.

Anzahl der Bauteile pro Prüfung

Für eine statistische Aussage bzgl. Bauteilsauberkeit ist eine ausreichende Oberfläche der Prüflinge nötig. Daher wird empfohlen, die Anzahl der Bauteile pro Prüfung so zu wählen, dass der Hochrechnungsfaktor auf die Bezugsfläche von 1000 cm² möglichst klein gehalten werden kann. Allerdings sollten aus praktischen Gründen nicht mehr als 50 Bauteile verwendet werden (siehe Kapitel 3.4.2).

3.2.4 Parameter für das Extraktionsverfahren ‚Spritzen‘

1. Extraktionsverfahren:	‚Spritzen‘ nach VDA 19
2. Prüfflüssigkeit ¹⁾ :	Lösemittelreiniger auf Basis entaromatisierter aliphatischer oder alicyclischer Kohlenwasserstoffe mit einem Terpenegehalt < 30 Prozent z. B.: Haku 1025-921, De-SOLV-IT 1000, G60
3. Volumenstrom:	1000 ml/min ± 200 ml/min
4. Spritzdüse:	Lanze mit 4 mm Runddüse
5. Filtertyp (Membrane):	Porengröße 5 µm, Membrandurchmesser ca. 47 mm Material z. B. Cellulosenitrat, Siebgewebe aus PET
6. Spritzmenge:	Ergebnis aus der Abklingkurve (Richtwert 2–6 l)
7. Nachspülmenge ²⁾ :	Richtwert ≥ 2000 ml
8. Anzahl der Bauteile:	1 bis 50 Stück bzw. möglichst ≥ 200 cm ² Oberfläche

3.2.5 Der Abspritzprozess

Beim Abspritzen der Bauteile muss die zu prüfende Oberfläche aller Bauteile erreicht werden. Dazu führt man die Spritzeinrichtung (Lanze) in einem Abstand von ca. 1 cm bis 10 cm über die gesamten Oberflächen aller Bauteile, bis die Spritzmenge erreicht ist. Die Prüflinge sind während der Extraktion so zu behandeln, dass keine zusätzlichen Partikel (z. B. durch gegenseitigen Abrieb) entstehen können.

Abb. 3: Bauteilaufnahme beim manuellen Spritzen



Anschließend werden die Bauteile entnommen, und die leere Bauteilaufnahme mit Behälter wird als Bestandteil der Extraktion nachgespült.

3.2.6 Vorbereitung der Membrane für die messtechnische Analyse

Die Membrane muss nach dem Extraktionsprozess getrocknet werden. Dies kann bei Raumtemperatur oder in einem Ofen erfolgen. Der Ofen sollte zur Vermeidung zusätzlicher Kontamination bzw. Verlust von Partikeln auf der Membrane ohne Umluft betrieben werden. Das Trocknen der Membrane bei Raumtemperatur kann zum Schutz vor Kontamination in einem Exsikkator erfolgen (Richtwert ca. 12–24 h). Die Verwendung von Petrischalen erleichtert hierbei den Umgang mit den feuchten Membranen.

Dieser Vorgang ist in einer Umgebung durchzuführen, die das Ergebnis nicht entscheidend negativ beeinflusst.

¹⁾ Die Verträglichkeit der Reiniger mit den Bauteilen, Baugruppen sollte mindestens einmalig im Versuch überprüft werden.

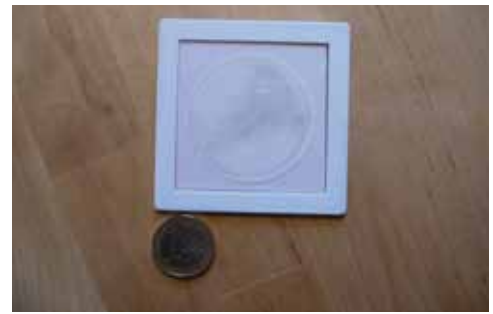
²⁾ Die Nachspülmenge wird bei der Abklingmessung **nicht** bestimmt, sondern richtet sich nach der eingesetzten Extraktionskammer.

Abb. 4: Beispiele für unterschiedliche Trocknungsmöglichkeiten der Membranen



Die getrocknete Membrane kann in einem handelsüblichen Diarahmen (60 x 60 mm) gesichert werden. Die messtechnische Auswertung der Membrane kann im eingebauten Zustand in diesem Diarahmen erfolgen.

Abb. 5: Diarahmen mit Membrane



Hinweise:

Die Qualifizierungsuntersuchung (Abklingkurve, AKK) und Blindwertermittlung muss nach VDA 19 Teil 1 erfolgen.

Für den ersten Versuch einer AKK-Ermittlung kann als Orientierungswert für die Spritzmenge 1 Liter pro Extraktionsvorgang verwendet werden.

Sollte das Abklingverhalten und Abklingkriterium nicht erreicht werden, muss der Prozess mit einer anderen Parametrierung und neuen Bauteilen nochmals erfolgen.

Bauteile nach einer Analyse können ggf. nach einem Trocknungsprozess der Fertigung wieder zugeführt werden.

3.3 Messtechnische Analyse

Die Auswertung der Partikel auf der Membrane erfolgt in der Regel lichtmikroskopisch. Hierbei wird die Membrane automatisch abgescannt und die einzelnen Partikel mittels Mikroskop und Kamera bzgl. Form und Abmessung erfasst. Danach erfolgt mittels Software eine Einsortierung in die lt. VDA 19 vorgegebenen Größenklassen. Zusätzlich wird gemäß Kapitel 3.1.1 zwischen metallischen und nichtmetallischen Partikel unterschieden. Fasern (siehe 3.1.2) werden bei der Auswertung meistens nicht berücksichtigt.

Eine zu stark verschmutzte Membrane führt durch überlappende Partikel zu einem hohen Fehlerrisiko bei der Auswertung. Eine risikominimierende Maßnahme wäre dann die Reduktion der Anzahl an Prüflingen pro Analyse oder die Verwendung von Filterkaskaden.

Neben stark verschmutzten Membranen gibt es weitere Parameter wie beispielsweise:

- Filter (Porengröße, Material, Gewebestruktur)
- Filter-Handling (Position unter Messsystem, Transport)
- Mikroskope
- Bildverarbeitung (Software)
- Analyseverfahren (Kreuzpolarisation, EDX, Raman-Spektroskopie)
- Belichtungssysteme (Auflicht, Hell-/Dunkelfeld, Durchlicht),

die unterschiedliche Messergebnisse in Richtung der Anzahl an Partikeln liefern können.

3.4 Bewertung der Ergebnisse von Sauberkeitsanalysen

3.4.1 Einführung

Partikel auf Bauteilen werden nicht absichtlich und nicht mit definierten Methoden erzeugt, sondern fallen quasi als Abfallprodukte mit an. Deshalb ist der Prozess der Partikelerzeugung weder stabil noch prozessfähig, und so haben Partikel im Vergleich zu einem gezielt hergestellten Merkmal eine größere Streuung. Eine Reinigung der Bauteile reduziert zwar mehr oder weniger effektiv die Anzahl der Partikel, die Streuung verändert sich jedoch nicht wesentlich.

Auch der VDA 19 Teil 1 beschreibt Sauberkeitsgrenzen nicht als Toleranzgrenzen, sondern als Eingriffsgrenzen. Wenn ein Grenzwert überschritten ist, tritt nicht zwangsläufig ein Fehler im System auf, sondern es steigt nur die Wahrscheinlichkeit dafür. Nur wenn ein kritischer Partikel zum richtigen Zeitpunkt in der richtigen Lage an einer sensiblen Position im System liegt, könnte ein Fehler auftreten.

Ziel der Sauberkeitsanalyse ist es nicht, zufällige Fehler zu finden, die aus der großen Streuung der Sauberkeitswerte stammen, sondern es sollen systematische Fehler gefunden werden, wie z. B. verschlissene Werkzeuge, Fehler im Reinigungsprozess, falsche Lagerbedingungen und falsche Prozessparameter.

Anzahl und Abmessungen von Partikeln lassen sich nur schwer oder gar nicht in der Projektierungsphase vorhersagen. Vielmehr hängen Anzahl und Abmessung von Partikeln von vielen Prozess- und Umweltparametern ab, die nur schwer zu greifen sind. Die Partikelmessung an vorhandenen Bauteilen (ggf. Mustern) oder die Ableitung von vergleichbaren Bauteilen (Familienbildung) ist daher die sicherste Methode, um eine Aussage über Partikelbelastung in einer (zukünftigen) Serienproduktion treffen zu können.

Bei der Messung von Partikeln gibt es unterschiedliche Vorgehensweisen, wobei zwei Varianten besonders häufig angewandt werden:

- a) Bestimmung der Anzahl von Partikeln pro Partikelklasse
- b) Bestimmung der maximalen Partikellänge
Je nach Vorgaben, Spezifikationen oder Forderungen werden diese Varianten ausgewählt.

3.4.2 Bezug der Partikelanzahl auf die Bauteiloberfläche

In der Praxis wird zumeist die in VDA 19 Teil 1 erwähnte Option gewählt, die Anzahl der gemessenen Partikel auf eine Bauteiloberfläche von 1000 cm² zu beziehen. Dies ist sinnvoll, um unterschiedlich große Bauteile bezüglich ihrer Partikelfracht besser miteinander vergleichen zu können. Wenn beim Extraktionsverfahren weniger Bauteile abgespritzt werden, als nötig wären, um 1000 cm² zu erreichen, müssen die ermittelten Partikelmengen pro Klasse auf 1000 cm² hochgerechnet werden.

Grundsätzlich sollte immer versucht werden, bei einer Messung der Technischen Sauberkeit eine möglichst große Bauteiloberfläche zu erreichen (mindestens 200 cm², besser 1000 cm²). Bei einem sehr kleinen Chipbauteil, z. B. EIA0603, muss dennoch mit einem Faktor von 300 und mehr hochgerechnet werden, wenn nicht mehrere 10000 Teile für eine Sauberkeitsanalyse verwendet werden sollen. Die Verwendung einer solch hohen Anzahl an Bauteilen ist wirtschaftlich nicht sinnvoll.

Durch das Hochrechnen kann es zu einer sehr hohen Anzahl von Partikeln in einer bestimmten Partikelklasse kommen, obwohl beispielsweise in der praktischen Prüfung nur einmalig ein einzelner Partikel in dieser Klasse gefunden wurde. Auch der zulässige Blindwert (10-%-Regel nach VDA 19 Teil 1) kann in solchen Fällen meist nicht eingehalten werden, weil die kleinen Bauteile zu wenig Partikel mitbringen. Der Anteil der Partikel, die aus dem Analyseequipment ohne Produkte stammten steigt überproportional, je kleiner die Gesamtfläche der zu untersuchenden Bauteile ist.

Im Folgenden wird eine Methode vorgeschlagen, wie der Einfluss des Blindwerts auf das Messergebnis bei der Hochrechnung reduziert werden kann. Dabei wird nach der Messung zunächst der (theoretische) Blindwert herausgerechnet, das Messergebnis auf 1000 cm² hochgerechnet und schließlich der Blindwert wieder zum Messergebnis hinzugezählt. Der Blindwert wird dabei mit x Prozent der Gesamtverschmutzung angesetzt.

Diese Vorgehensweise lässt sich in folgender Hochrechnungsformel ausdrücken:

$$N = n \times (1000+B) / (A+B)$$

N = Anzahl der Partikel auf 1000 cm²







Bauteiloberfläche hochgerechnet

n = Anzahl der Partikel auf allen gemessenen Bauteilen

A = Oberfläche der gemessenen Bauteile in cm²

B = Blindwertäquivalent in cm² (entspricht x % von 1000 cm²)

Tab. 1: Einfluss des Blindwerts auf das Messergebnis bei verschiedenen Bauteiloberflächen (Beispiele zu einem Blindwertanteil von 2,2 %)

Oberfläche der gemessenen Bauteile in cm ²	1000	500	200	29	10	1
Blindwertäquivalent in cm ² (entspricht 2,2 % von 1000 cm ²)	22	22	22	22	22	22
Blindwertanteil in %	2,2 %	4,2 %	10 %	43,1 %	68,8 %	95,7 %
Grafische Darstellung des Blindwertanteils (hellblau)						
<p>Beispiel (vgl. blau markierte Spalte in der Tabelle): Bei einer Sauberkeitsprüfung von 50 Bauteilen mit einer gesamten Oberfläche von 29 cm² wurde ein metallischer Partikel der Klasse H (200–400µm) gefunden. Bei einer „normalen“ Hochrechnung auf 1000 cm² (Multiplikation mit 1000/29) ergibt sich ein Wert von 35 Partikeln in der Klasse I auf 1000 cm². Bei der Hochrechnung nach der obigen Formel ergibt sich ein Wert von 20 metallischen Partikeln auf 1000 cm².</p>						

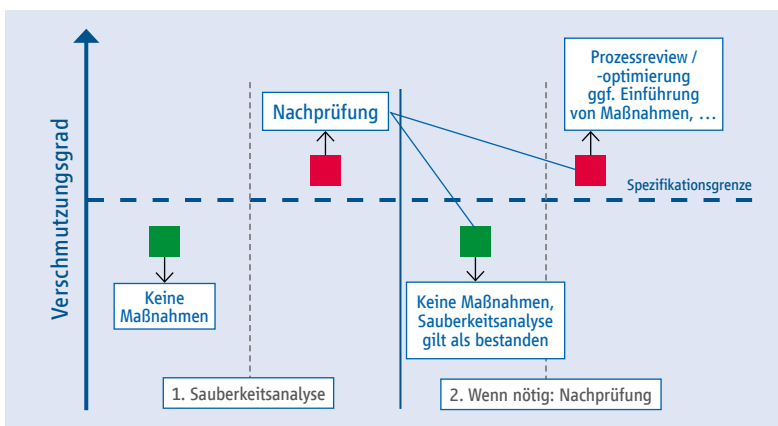
3.4.3 Vorgehensweise bei Verletzung von Eingriffsgrenzen

Aufgrund der großen Streuung des Partikelauftretens ist eine einzige Analyse nur begrenzt aussagekräftig. Um zwischen systematischen und zufälligen Abweichungen unterscheiden zu können, müssen mehrere Sauberkeitsanalysen durchgeführt werden.

Ein Vorschlag zur Vorgehensweise ist: Wird eine Partikelmenge in einer Klasse überschritten, ist eine weitere Analyse durchzuführen.

Für den Fall, dass aufgrund einer sehr großen Bauteiloberfläche nur ein Teil analysiert worden ist, müssen bei einem erneuten Test mindestens drei Teile pro Analyse überprüft werden, damit die Sicherheit der Aussage der erneuten Analyse erhöht wird.

Abb. 6: Beispielhafte Prozedur bei einer Spezifikationsüberschreitung



Liegen die Sauberkeitswerte dieser zusätzlichen Analyse innerhalb der vereinbarten Werte, ist von einem zufälligen Ereignis auszugehen, und die gesamte Sauberkeitsprüfung gilt als bestanden.

Liegt aber ein Wert dieser zusätzlichen Analyse wieder über den vereinbarten Werten, liegt möglicherweise eine systematische Abweichung vor. Dann können sich verschiedene Folgemaßnahmen ableiten:

- Review und Optimierung des Fertigungsprozesses sowie weitere Nachprüfungen. Dafür ist es hilfreich, die gefundenen Partikel einer Materialuntersuchung zu unterziehen, damit gezielt nach den Ursachen ihres Auftretens gesucht werden kann.
- Nachreinigung
- Im Einzelfall Sonderfreigabe nach entsprechender Risikobetrachtung
- Erhöhung der statistischen Sicherheit durch weitere Bauteilprüfungen aus demselben Produktionslos
- ...

3.5 Erweiterte Risikobetrachtung

Zur genaueren Abschätzung des Sauberkeitsrisikos kann folgende Vorgehensweise angewandt werden, bei der bereits mit den Daten einer einzigen Sauberkeitsanalyse die Auftretenswahrscheinlichkeit von Partikeln oberhalb einer bestimmten Größe abgeleitet werden kann.

1. Ermittlung von Rohdaten durch Partikelmessungen nach VDA 19 Teil 1 bzw. nach Kapitel 'Definition einer geeigneten Prüfprozedur inkl. Parameter' in diesem Leitfaden an einer oder mehrerer Anzahl von Analysen. Mit steigender Anzahl der Analysen steigt auch dementsprechend die Genauigkeit der Abschätzung. Die Daten sollen die wahren Größen der relevanten Partikel enthalten. Die Anzahl der relevanten Partikel sollte eine statistische Auswertung erlauben.
2. Erfahrungsgemäß bilden Größe und Anzahl der Partikel eine Funktion, ähnlich einer Exponentialverteilung. Eine geeignete Transformation der Daten durch Einsatz geeigneter Programme zu einer Normalverteilung ist für eine statistische Betrachtung erforderlich.
3. Unter Berücksichtigung der zur Analyse herangezogenen Prüfmuster ist auch eine Aussage zur Auftretenswahrscheinlichkeit von Partikeln oberhalb einer bestimmten Größe möglich, auch wenn dieser bei der Analyse selbst nicht aufgetreten ist.

3.5.1 Beispiel

Bei diesem Beispiel wurden in Summe 428 Partikel ($\geq 200 \mu\text{m}$) auf 1510 Kontakten extrahiert und auf ihre Größe analysiert.

- Das entspricht hochgerechnet 283443 Partikel ($\geq 200 \mu\text{m}$) auf 1 Mio. Kontakte.
- Davon sind statistisch gesehen 404,25 ppm bzw. 114 Partikel $\geq 900 \mu\text{m}$.

Bei der Annahme einer gleichmäßigen Partikelverteilung, d. h. max. ein Partikel auf einem Kontakt, kommen auf 1 Mio. Kontakte 114 Kontakte mit einem metallischen Partikel $\geq 900 \mu\text{m}$ bzw. die Fehlerrate beträgt 114 ppm.

Abb. 7: Partikelgrößenverteilung

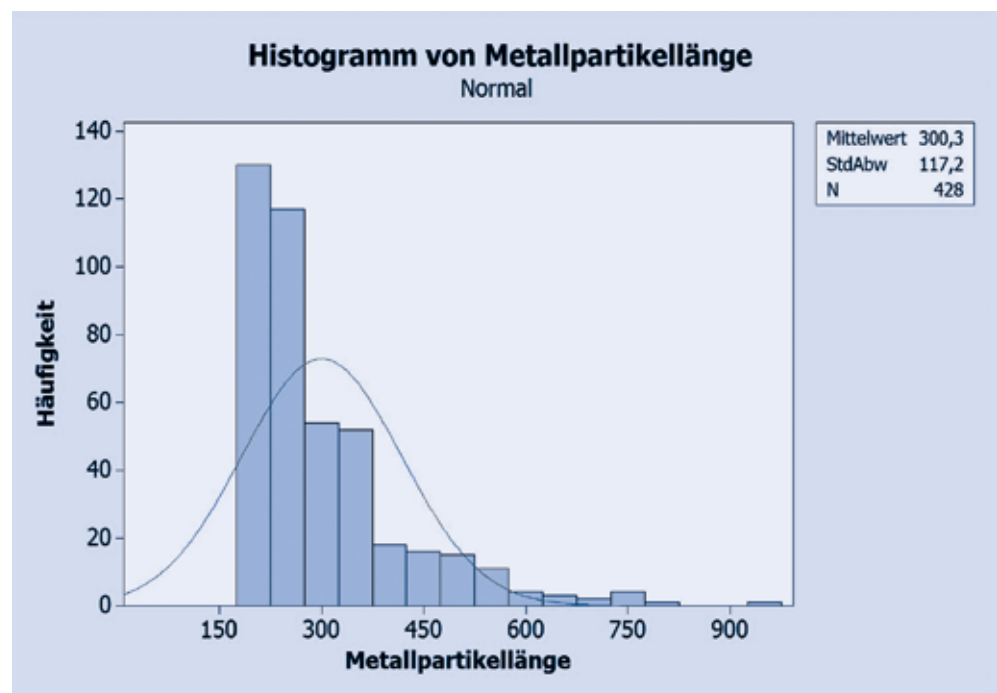
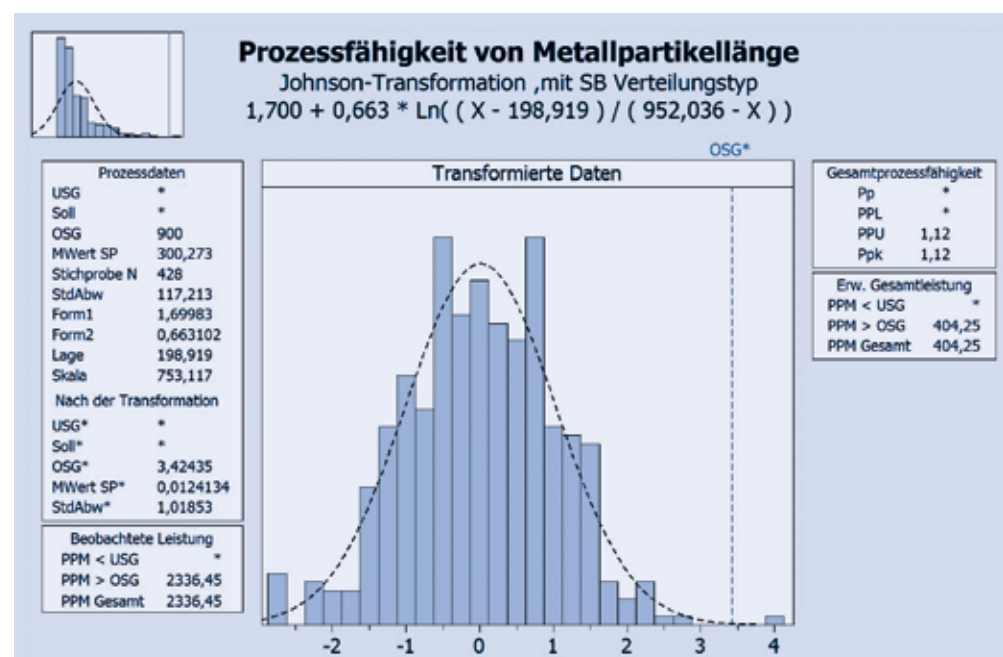


Abb. 8: Ableitung der Prozessfähigkeit



3.6 Bauteilsauberkeit: Datenmanagement und Visualisierung

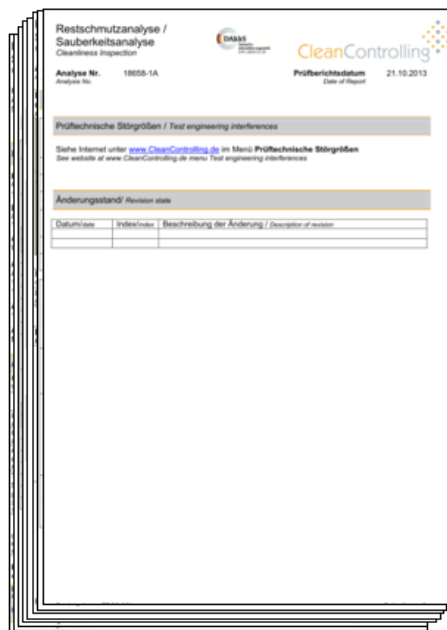
Abb. 9: Ablauf von Bauteilsauberkeitsanalysen



Entscheidend für die Durchführung von Bauteilsauberkeitsanalysen ist die Festlegung aller Prüf- und Auswerteparameter. Durch den Abklärungsbogen oder eine firmenspezifische

Spezifikation wird vorgegeben, unter welchen Bedingungen (Regulierung der Analysewerte/ Parameter) das Labor die jeweilige Analyse durchführen soll.

Abb. 10: Umfang Analysebericht



Zudem ist nur mit einer definierten Durchführung, also gleichen Rahmenbedingungen, eine Vergleichbarkeit mit anderen Analysen gegeben (siehe auch Kapitel 3.2.2).

Informationen, die vom Analyzelabor geliefert werden müssen:

- Analysebericht nach z. B. VDA 19 Teil 1 inkl. Blindwertausgabe
- Prüfvorschrift inkl. Abklingmessung

Optional:

- Video zur Durchführung der Abklingmessung
- Filter

Erklärung des OSW (OberflächenSaubereitsWert):

Bei der Umgebungssauberkeit gibt es durch Verwendung des Illig-Werts die Möglichkeit, Fertigungsbereiche zu vergleichen und eingeleitete Maßnahmen zu bewerten: Bringt zum Beispiel eine neue Lüftungsanlage den gewünschten Effekt?

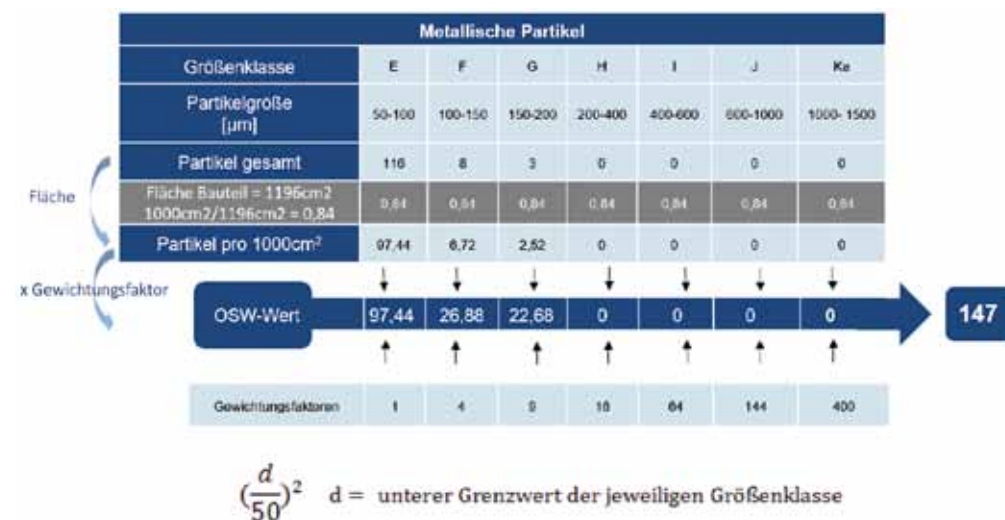
Diese Notwendigkeit der Nachweisführung besteht nicht nur bei der Umgebungssauberkeit, sondern besonders auch bei den Produkten: Bringt zum Beispiel ein zusätzlicher Reinigungsprozess den gewünschten Effekt?

Dies kann mithilfe des OSWs erfolgen, der eine Abwandlung des Illig-Werts ist. Dahinter verbirgt sich die gewichtete Partikelsumme. Wie auch beim Illig-Wert wird mit dem OSW-Wert die Analyse der relevanten Partikelart mit einem einzelnen Zahlenwert dargestellt.

Abb. 11: Herleitung Illig-Wert (Normierungsfaktor; siehe VDA 19 Teil 2)



Abb. 12: Herleitung OSW-Wert



Der OSW unterscheidet sich vom Illig-Wert nur durch die fehlende Normierung mit der Zeit.

Dazu wird die Fläche je Prüfling in einer Analyse aufsummiert und anschließend die Anzahl der Partikel je Größenklasse und Partikelart auf 1000 cm² normiert. Wie auch beim Illig-Wert, werden beim OSW dieselben Gewichtungsfaktoren verwendet. Diese ermitteln sich aus dem unteren Grenzwert d der Größenklasse, dividiert durch 50 und zum Quadrat. Mit diesen Gewichtungsfaktoren wird dann die Anzahl der Partikel der jeweiligen Größenklasse pro 1000 cm² multipliziert, um anschließend einen OSW pro Größenklasse zu erhalten. Die einzelnen OSWs je Klasse werden miteinander aufsummiert, um den OSW für die komplette Analyse zu erhalten.

Zu beachten ist, dass der OSW, wie auch der Illig-Wert, immer im Zusammenhang mit den größten Partikeln grafisch betrachtet werden sollte, damit eine umfassende Aussage zum Effekt der Maßnahme gemacht werden kann.

Insbesondere bei einem hohen OSW gehen einzelne „Ausreißer“ unter.

Der OSW eignet sich zum Vergleich beispielsweise von Maßnahmen wie gereinigt/nicht gereinigt. Die maximalen Partikellängen, die üblicherweise in den Spezifikationen vorgegeben werden, geben einen Eindruck, in welchem Umfang Ausreißerregelung und Eskalationsstrategie beschrieben werden sollten.

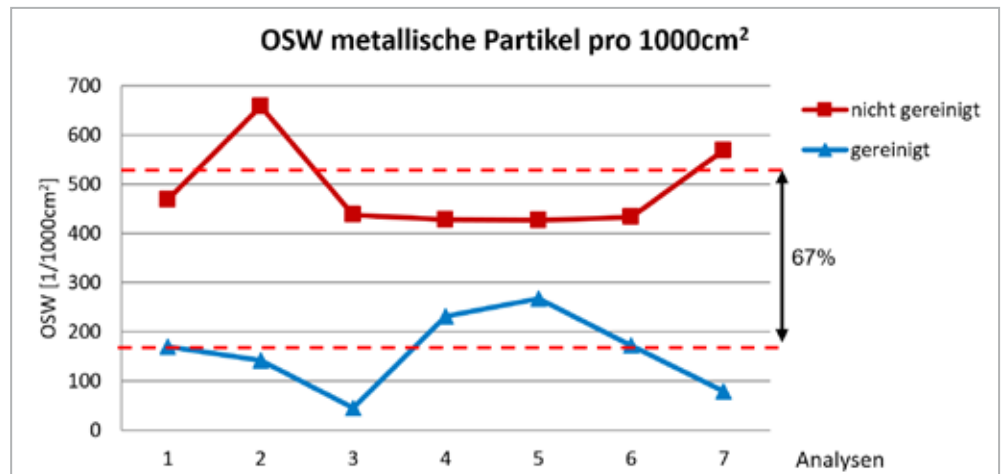
Um einen schnellen Überblick über das Resultat einer Maßnahme zu bekommen, ist es empfehlenswert, dies mithilfe einer Datenbank und Diagrammen zu visualisieren.

Die Aussagekraft der Bewertung einer Maßnahme steht im direkten Zusammenhang zur Anzahl der repräsentativen Analysen. Falls ein Analysewert nach einer Maßnahme (z. B. Reinigung) schlechter ist als zuvor, liegt dies meist an der großen Standardabweichung (siehe VDA 19 Teil 1 Kap. 10.1).

Abb. 13: Auswertung am Beispiel einer 7-poligen HV-Steckerleiste

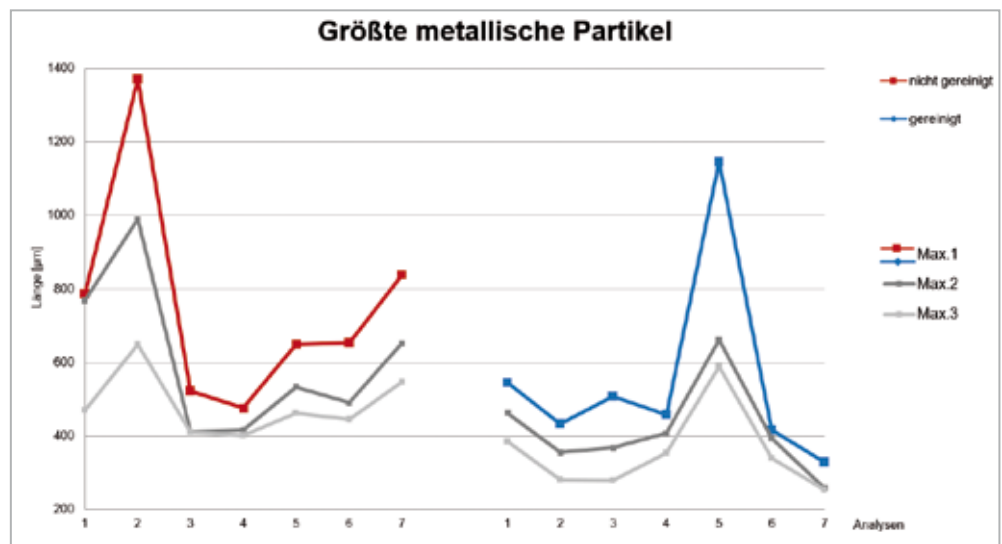


Abb. 14: Darstellung Reinigungseffekt mittels des OSW



Reinigungseffekt: 67 %

Abb. 15: Größenvergleich der drei größten Partikel



Aufbau einer Datenbank:

Die Übertragung der Analyseberichte in eine Datenbank kann händisch oder automatisiert erfolgen.

Bevor eine Datenbank erstellt wird, ist der Umfang der Datenbank zu definieren. Erfahrungsgemäß erweitert sich das Informationsspektrum im Laufe der Zeit; die Übernahme aller Werte aus einer Analyse würde die Datenbank jedoch sehr stark vergrößern.

Die Analysen werden auf Basis von individuellen Sauberkeitsspezifikationen durchgeführt. In den meisten Fällen werden nur anwendungsspezifische Informationen mit der Analyse ausgegeben. Daher empfiehlt es sich zu klären (z. B. Abklärungsbogen), welche Parameter im Allgemeinen gespeichert werden sollen.

Damit zukünftig die Daten auch anderweitig verwendbar sind, bietet sich eine digitale Ablage der jeweiligen Parameter aus den Analysen in einer Datenbank an.

Je nach Anforderungen an die Datenbank müssen bestimmte Parameter aus den Analysen in der Datenbank vorhanden sein. Zu bevorzugen ist eine Software, über die die Auswertungen zur Technischen Sauberkeit durchgeführt werden können.

Eine Alternative ist eine Excel-Datenbank, die mit geringem Aufwand und geringen Programmierkenntnissen erstellt werden kann.

Abb. 16: Aufbauebenen einer Datenbank

	Option A	Option B	Option C	Option D
	Um einfache Auswertungen über die größten Partikel in Länge und Breite durch zu führen, werden folgende Daten aus den Analysen benötigt:	Wird ein Vergleich des Verschmutzungsgrades verschiedener Analysen mittels OSW (MCV, TCV und FCV) gefordert und ggf. Restschmutzmasse, müssen folgende Daten zusätzlich in die Datenbank integriert werden:	Erweiterung um ein separates Datenblatt "Direkter Vergleich von Testeinheiten"	Erweiterung der Datenbank um „Abgleich zu Kundennummern“
Produkt-Nr.	x			
Berechnung	x			
Bemerkungen	x			
Bezugsnummern für die Durchführung der Analyse	x			
Mindestens die drei größten Partikel (je Partikelart) in Länge und Breite	x			
Anzahl der Partikel in der jeweiligen Größenklasse und Partikelart des Prozesses		x		
Restschmutzmasse des Prozesses		x		
Anzahl der benötigten Prüflinge je Analyse		x		
Quadratmeterfläche je Prüfling		x		
Rechenoperationen, die aus den Partikelanzahlen je Klasse einen OSW-Wert und ggf. die Restschmutzmasse berechnen (pro Analyse, pro 1000cm ² oder je Bauteil)		x		
Maßnahmenbeschreibung, z. B. Reinigungsart, sowie die Prozess- und Materialzuordnungen			x	
Auswahlfelder zum Markieren von Analysen für Vergleiche			x	
Zusätzliches Datenblatt, um die Selektion zu vergleichen			x	
Tabellierung von Test-Normen der Kunden/Lieferanten in die Datenbank				x

Abb. 17: Option A: Auswertung über die größten Partikel in Länge und Breite:

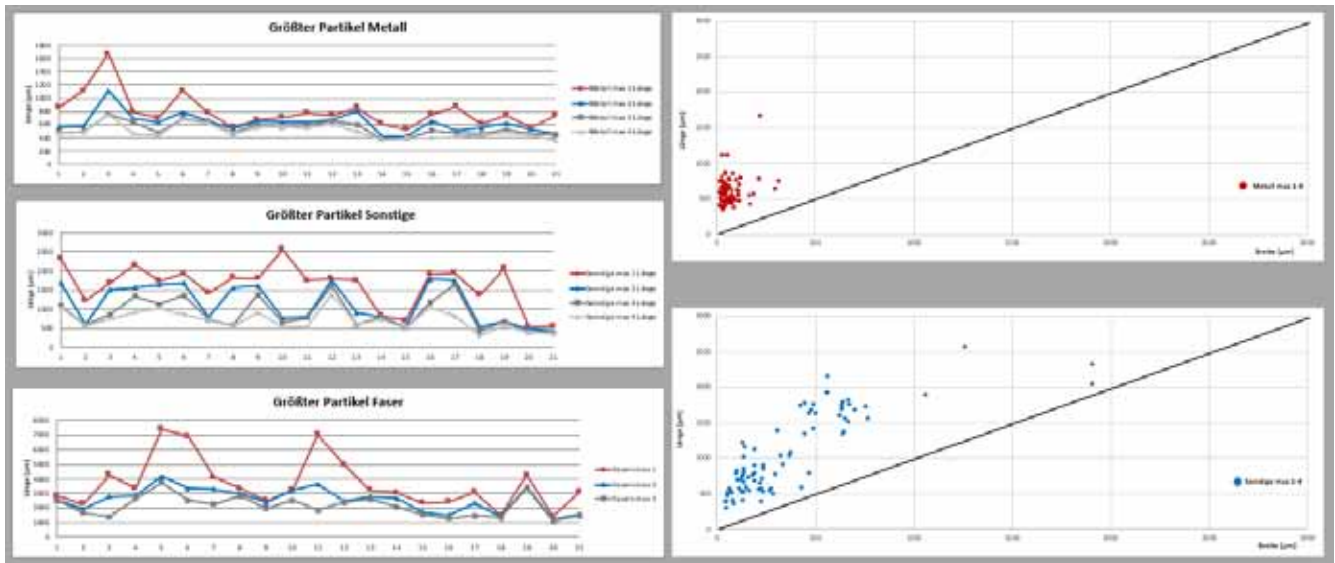


Abb. 18: Option B: Erweiterung um den Verschmutzungsgrad: OSW

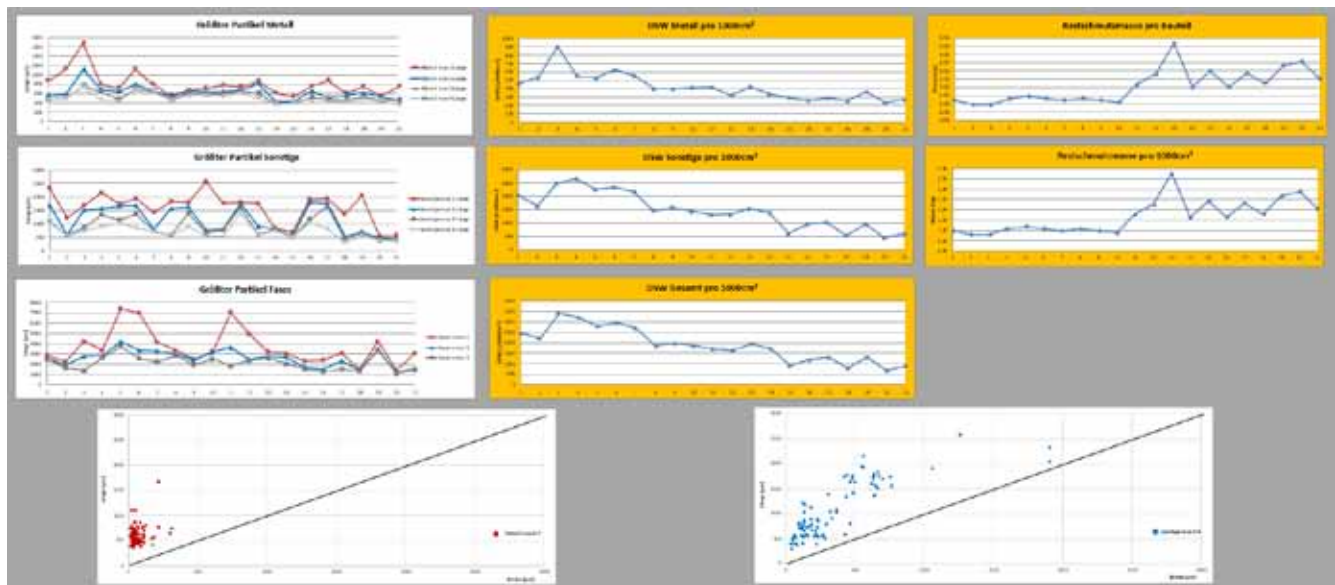


Abb. 19: Option C: Erweiterung um ein separates Datenblatt „Direkter Vergleich von Testreihen“



Option D: Erweiterung der Datenbank „Abgleich zu Kundennormen“
 Abb. 20: Beispiel: LK3223 (TecSa-Norm KOSTAL Kontakt Systeme GmbH)

2 Zielwerte KOSTAL

Die aufgeführten Zielwerte stellen die Sauberkeitsspezifikation für die Kernprozesse von KOSTAL (ohne Optimierungsmaßnahmen) dar.

Kernprozess	Rechenwertklasse 1000µm ²		
	Größenkreis (µm)	Zielwert Mittel (µm)	Zielwert Streuige (µm)
Stanzprozess mit vorverarbeiteter Bauteile	4,8	2000	2900
Stanzprozess mit unvorverarbeiteter Bauteile und anschließendem Galvanisierprozess	4,8	800	800
Drehprozess mit anschließendem Galvanisierprozess	3,8	500	400
Spektroskopieren (ohne Metallanleger)	7,8	400	800
Montageprozess von Metall und Kunststoffteilen	3,8	1050	2000

Ausreißerregelung

Die Partikelwerte darf einen Zielwert unter folgenden Bedingungen zulässig überschreiten:

- Bei Auswertung für die Zielwertvorgabe erfolgt grundsätzlich auf Basis einer Rechenwertüberprüfung von mindestens fünf Partikeln.
- Innerhalb der Zielwertvorgabe gibt es keine Partikelanzahlbegrenzung.
- folgende Partikel dürfen in den Überwachungsklassen vorhanden sein:
 - Überwachungsklasse A → zwei Partikel (von 5 Prüfungen)
 - Überwachungsklasse B → ein Partikel (von 5 Prüfungen)

oder

- Überwachungsklasse A → drei Partikel (von 5 Prüfungen)
- Überwachungsklasse B → zwei Partikel (von 5 Prüfungen)

Zielwert (µm)	Überwachungsklasse A (µm)	Überwachungsklasse B (µm)
500	200	400
200	100	200
400	150	300
100	50	100
300	100	200
100	50	100
200	100	200
1000	200	400
2000	400	800
3000	600	1200

Kernprozess	Drehprozess mit anschließendem Galvanisierprozess
Anforderung vorlag	Nein
Überwachungsklasse	A
Zielwert Mittel (µm)	500
Zielwert Streuige (µm)	400
Rechenwert (µm)	3,3

Anforderung	Überwachungsklasse A (µm)		Überwachungsklasse B (µm)	
	Zielwert Mittel	Zielwert Streuige	Zielwert Mittel	Zielwert Streuige
100	50	100	20	40
200	100	200	40	80
300	150	300	60	120
400	200	400	80	160
500	250	500	100	200
600	300	600	120	240
800	400	800	160	320
1000	500	1000	200	400
1500	750	1500	300	600
2000	1000	2000	400	800
3000	1500	3000	600	1200
4000	2000	4000	800	1600
5000	2500	5000	1000	2000
6000	3000	6000	1200	2400
8000	4000	8000	1600	3200
10000	5000	10000	2000	4000

„Abgleich zu Kundennormen“

Werknormen zur Technischen Sauberkeit basieren auf Rechenoperationen, daher ist es möglich, diese in die Datenbank zu integrieren. Analysen können automatisiert mit den Vorgaben der Norm abgeglichen werden: z. B. die Partikelart/-en, die Bestandteil der Anforderung ist/sind, die Anzahl der Partikel je Größenklasse, Ausreißerregelung, Eskalationsstrategie usw.

Zusammenfassung:

Die Integration eines OSWs ermöglicht es, Aussagen zu den Verschmutzungsgraden direkt an den Produkten treffen zu können und gegebenenfalls mit anderen Testreihen zu vergleichen. Es empfiehlt sich, dies im Zusammenhang mit den „Größten Partikeln“ zu betrachten.

Nachdem die zu betrachtende(n) Partikelart/-en festgelegt wurde/-n, ist eine Datenbank bei retrospektiven/prospektiven Aussagen unerlässlich. Um eine möglichst präzise Aussage zu treffen, werden möglichst viele reprä-

sentative Analysen herangezogen. Der Datenumfang je Analyse ist beträchtlich, daher kann mithilfe einer Datenbank unter Betrachtung der drei „Größten Partikel“ / Analyse (je Partikelart) und dem jeweils zugehörigen OSW der Überblick leicht geschaffen werden. Dies ist umso wichtiger, wenn der Status quo mit z. B. zwei unterschiedlichen Reinigungsverfahren verglichen werden soll. Hierbei wird empfohlen, dass je Testreihe mindestens fünf Analysen herangezogen werden.

Auf „Knopfdruck“ lassen sich dann Maßnahmen oder Sauberkeitsniveaus bewerten und bei Bedarf mit Kundennormen abgleichen.

4 Stand der Technik: Technische Sauberkeit in der Elektronikindustrie

4.1 Process-Flow (pro Cluster)

4.1.1 Cluster Elektronikfertigung

Tab. 2: Process-Flow Cluster Elektronikfertigung

Process-Flow					Prozessschritte
1-seitig SMT	1-seitig SMT+THT	2-seitig SMT	2-seitig SMT +THT(automatisch)	2-seitig SMT +THT(manuell)	
X	X	X	X	X	Wareneingang
X	X	X	X	X	Kennzeichnung der Leiterplatten
X	X	X	X	X	Pastenauftrag (Schablonendruck, Dispensen, Jet) ¹⁾
(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	SPI
	[X]	[X]	[X]	[X]	Dispensen (SMT-Kleber)
X	X	X	X	X	SMD Bestückung
X	X	X	X	X	Löten (Reflow/Vapour-Phase) ¹⁾
(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	Inspektion (MOI/AOI/AXI) ²⁾
[X]	[X]	[X]	[X]	[X]	Rework
			X		THT Bestückung (automatisch)
		X		X	Pastenauftrag (Schablonendruck, Dispensen, Jet) ¹⁾
		(X)		(X)	SPI
		[X]	[X]	[X]	Dispensen (SMT-Kleber)
		X	X	X	SMD Bestückung
			[X]		Kleber aushärten
		X		X	Löten (Reflow/Vapour-Phase) ¹⁾
		(X)	(X)	(X)	Inspektion (MOI/AOI/AXI) ²⁾
		[X]		[X]	Rework
	X			X	THT Bestückung (manuell)
	X		X	X	THT Löten (Wellenlöten, Selektivlöten, Stempelöten)
	(X)		(X)	(X)	Inspektion (MOI/AOI) ²⁾
	[X]		[X]	[X]	Rework
[X]	[X]	[X]	[X]	[X]	Einpressverfahren
(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	ICT
[X]	[X]	[X]	[X]	[X]	Nutzentrennen (Hand, Rollmesser, Stanzen, Fräsen, Laser) ¹⁾
[X]	[X]	[X]	[X]	[X]	Reinigen
[X]	[X]	[X]	[X]	[X]	Lackieren (Tauchen, Sprühen, Schwenken)
(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	Endtest
[X]	[X]	[X]	[X]	[X]	Endmontage
X	X	X	X	X	Verpacken

Die Tabelle zeigt beispielhaft fünf der typisch möglichen Prozessabläufe bei der Leiterplattenbestückung.

() anforderungsspezifische Mess- und Prüfschritte

[] produktspezifische Prozessschritte

¹⁾ in einem Prozessschritt nur ein Verfahren möglich

²⁾ in einem Prozessschritt mehrere Verfahren möglich

Prozess reduziert Partikelanzahl

Prozess ist wesentliche Quelle für nichtmetallische Partikel

Prozess ist wesentliche Quelle für metallische Partikel

4.1.2 Cluster passive Bauelemente (beispielhaft für Induktivitäten und Aluminium- Elektrolytkondensatoren)

Tab. 3: Induktivitäten

1	Material bereitstellen
2	Kontakte an Kern montieren
3	Kern bewickeln
	Spulenkörper bewickeln
	Luftspule wickeln
	Kernbeschichtung selektiv entfernen
4	Drahtenden abisolieren
5	Drahtenden verzinnen
6	Drahtenden biegen
7	Wickel in Gehäuse montieren
	Luftspule auf Kern montieren
	Spulenkörper auf Kern montieren
8	Drahtenden an Kontakte andrallen
	Drahtenden in Laschen einklemmen
9	Drahtenden und Kontakte verbinden (löten, schweißen)
10	Bauteil reinigen
11	Wickel kleben, vergießen oder imprägnieren
	Bauteil umspritzen oder umpressen
	Bauteil lackieren
12	2. Kernteil montieren und kleben
13	Drahtenden auf Endlänge abschneiden
14	Endprüfung
15	Kennzeichnen
16	Verpacken

Prozess reduziert Partikelanzahl

Prozess ist wesentliche Quelle für nichtmetallische Partikel

Prozess ist wesentliche Quelle für metallische Partikel

Tab. 4: Aluminium-Elektrolytkondensatoren

1.	Wareneingang
2.	Fertigungsvorbereitung
	Folie schneiden
3.	Papier schneiden
	Material bereitstellen
4.	Heften und Wickeln
	Anschlussdrähte mit Folie verbinden (Heften)
5.	Folie und Papier aufwickeln und mit Klebeband verschließen (Wickeln)
	Montieren
6.	Wickel mit Elektrolyt tränken
	Stopfen auf Anschlussdrähte aufschieben
	Stopfen mit Wickel in Becher montieren und verschließen
7.	Bedruckten Schlauch aufschieben und schrumpfen
	Nachformieren und messen
8.	Ausheilen der Oxidbeschädigungen der Anodenfolie, entstanden durch die vorgelagerten Verarbeitungsprozesse
	Ausmessen der Kondensatoren nach den elektrischen Kennwerten
	Bedrucken (für Kondensatoren ohne Schlauchumhüllung)
9.	Kondensatoren konfektionieren
	Gurten
10.	Beschneiden
	Abwinkeln
11.	Verpolschutz
	SMD
12.	Endprüfung
13.	Verpacken

Prozess ist wesentliche Quelle für metallische Partikel

Prozess ist wesentliche Quelle für nichtmetallische Partikel

4.1.3 Cluster elektromechanische Bauelemente

Die Elektromechanik ist ein sehr vielfältiges Gebiet in der Technik. Im Bereich der Elektronikindustrie, speziell der Leiterplatten-Baugruppe, sollen hier stellvertretend die elektrischen Steckverbinder als elektromechanisches Bauelement untersucht werden.

Tab. 5a, b: Process-Flow Stanz-Kontaktfertigung/Kunststofffertigung (Gehäuse)

Process-Flow Einzelteile	
Reihenfolge	Stanz-Kontaktfertigung
1	Wareneingang
2	Rohmaterial als Band- oder Drahtware auf Coil an Stanzmaschine
3	Kontakte stanzen und als Band mit Papierzwischenlage auf Spulen oder Paletten wickeln
4	Blanke Kontakte werden galvanisch beschichtet und wieder mit Papierzwischenlage auf Spulen oder Paletten gewickelt. Kontakte aus vorbeschichtetem Material benötigen diesen Prozessschritt nicht
5	Verpackung in den verschiedensten Umverpackungen (z. B. Gitterbox, Karton, PE-Beutel).
6	Lager

Process-Flow Einzelteile	
Reihenfolge	Kunststofffertigung (z. B. Gehäuse)
1	Wareneingang
2	Rohmaterial in Form von Kunststoffgranulat an Spritzgussmaschine bereitstellen
3	Geschmolzenen Kunststoff in Spritzgussformen einspritzen und abkühlen
4	Kunststoff-Gehäuse aus den Spritzgussformen auswerfen/entnehmen
5	Schüttgut/Lageverpackung in verschiedensten Umverpackungen (zum Teil mit PE-Beuteln ausgeschlagen) verpacken
6	Lager

Tab. 6: Process-Flow Gehäusebestückung

Process-Flow Fertigteil	
Reihenfolge	Gehäusebestückung
1	Kontakte am Band und Gehäuse in Umverpackungen an die Bestückungsanlage
2	Gehäuse gerichtet in die Anlage einführen
3	Kontakte am Band zum Vereinzeln in die Schneidestation einführen
4	Vereinzelte Kontakte mit Setzfinger in das Kunststoffgehäuse einschieben
5	Kontakte ggf. abwinkeln (falls erforderlich)
6	Fertige Steckverbinder, geschichtet mit Papierzwischenlagen in Karton/ Kunststoffboxen mit Trays & PE-Beutel verpacken
7	Versand

4.1.4 Cluster Leiterplatte

Tab. 7: Process-Flow Cluster Leiterplatte

Process Flow			
Reihenfolge	Starre Leiterplatte	Flexible Leiterplatte	Reihenfolge
1	Wareneingang	Wareneingang	1
2	Multilayer Innenlagenfertigung		
3	Bohren	Bohren/Stanzen	2
4	Durchmetallisierung	[Durchmetallisierung]	3
5	Leiterbilddruck	Leiterbild	4
6	Galvanisieren		
7	Ätzen	Ätzen	5
8	AOI	Optische Kontrolle	6
9	Lötstopplack	Deckfolie Heften/Laminieren	7
		Tempern	8
		Reinigung	9
10	Endoberfläche	Endoberfläche	10
11	[Kerbitzen]	Nutzen trennen	11
12	Fräsen	Stanzen/Vereinzeln	12
13	Spülen		
14	E-Test	E-Test	13
		Versteifung Heften/Laminieren	14
		Tempern	15
15	Endkontrolle	Endkontrolle	16
		[Reinigung]	17
16	Verpacken/Versand (KLT)	Verpacken/Versand (Blister, KLT)	18

[] produktspezifischer Prozessschritt

Prozess reduziert Partikelanzahl

Prozess ist wesentliche Quelle für metallische als auch nichtmetallische Partikel

4.2 Ist-Situation der Technischen Sauberkeit in der Elektronikindustrie

Verschiedene elektronische und elektromechanische Bauteile, Leiterplatten und Baugruppen wurden nach ähnlichem Aufbau und vergleichbaren Herstellungsprozessen in Familien zusammengefasst. Zur Darstellung der Partikelmenge je Größenklasse wurden für jeden Bauteiltyp mehrere Analysen durchgeführt.

Die Werte in den Tabellen zeigen erreichbare Sauberkeitslevel ohne spezielle Reinigungs-

prozesse (falls nicht anders angegeben). Die meisten Werte sind mindestens an einigen, jedoch teilweise an 20 oder mehr Sauberkeitsanalysen ermittelt.

Die Werte sind als Erfahrungswerte („Stand der Technik“ bei den beteiligten Unternehmen) zu bewerten.

In der tabellarischen Darstellung bezieht sich die Partikelmenge auf eine Oberfläche von 1000 cm². Es ist die Anzahl metallischer Partikel und die Anzahl aller Partikel (ohne Fasern) angegeben.

Die in den Tabellen angegebenen Erfahrungswerte sind weder als Grenzwert noch als typische Werte zu verstehen. Fixe Grenzwerte sind für die Bauteilsauberkeit nicht anwendbar, sondern als Eingriffsgrenzen zu verstehen, und typische Werte sind oft deutlich niedriger als die Tabellenwerte. Diese Werte werden nur in seltenen Fällen oder bei spezifischen Bauteilen überschritten, in der Regel aber unterschritten.

Ergänzung zu den Tabellen: Die Tabellen stellen Erfahrungswerte dar. Grenzwerte für Bauteile können aufgrund der Kombination von sehr verschiedenen Bauteilkomplexitäten nicht aus den Tabellen entnommen werden, sondern müssen individuell bauteil-/baugruppenspezifisch ermittelt bzw. vereinbart werden.

Hinweise:

- Die bisherige Klasse K (>1000 µm) wird nur teilweise auf die nach VDA 19 Teil 1, Ausgabe 2015 überarbeiteten Klassen K (1000–1500 µm), L (1500–2000 µm), M (2000–3000 µm) und N (>3000 µm) erweitert, weil ein Teil der vorliegenden Daten nach „alter“ VDA-19-Systematik ausgewertet worden ist.
- Üblicherweise sinkt die Anzahl der Partikel bei steigender Partikelgröße. In den Tabellen, die sich aus realen Messungen ergeben haben, sind sporadisch Abweichungen von dieser Regel enthalten. Dies könnte damit zusammenhängen, dass durch bestimmte Prozesse die Herstellung einer Partikelgröße begünstigt wird.

4.2.1 Elektronikfertigung

Tab. 8: Erfahrungswerte Cluster Elektronikfertigung aus der Praxis

Erfahrungswerte von Partikeln pro Partikelklasse auf bestückten Leiterplatten ² je 1000 cm ² Oberfläche			
Partikelgröße [µm]	Größenklassen	Alle Partikel	Metallische Partikel ¹⁾
$50 \leq x < 100$	E	14500	1000
$100 \leq x < 150$	F	2500	250
$150 \leq x < 200$	G	800	90
$200 \leq x < 400$	H	600	110
$400 \leq x < 600$	I	70	17
$600 \leq x < 1000$	J	20	13
$1000 \leq x$	K	6	2

¹⁾ Bei Steckern mit Metallgehäuse oder Kühlkörpern können wesentlich mehr metallische Partikel vorhanden sein

²⁾ Ohne jeglichen Reinigungsprozess

4.2.2 Elektronische Bauelemente

4.2.2.1 Induktivitäten

Tab. 9: Erfahrungswerte Induktivitäten aus der Praxis

Erfahrungswerte von Partikeln pro Partikelklasse auf Induktivitäten je 1000 cm ² Oberfläche			
Partikelgröße [µm]	Größenklassen	Alle Partikel	Metallische Partikel
$50 \leq x < 100$	E	3500 ³⁾	450 ¹⁾²⁾
$100 \leq x < 150$	F	700 ³⁾	150 ¹⁾²⁾
$150 \leq x < 200$	G	250 ³⁾	60 ¹⁾²⁾
$200 \leq x < 400$	H	160 ³⁾	30 ¹⁾
$400 \leq x < 600$	I	20 ³⁾	10 ¹⁾
$600 \leq x < 1000$	J	8 ³⁾	0,00 ¹⁾
$1000 \leq x$	K	3 ³⁾	0,00

¹⁾ Bei Bauteilen mit Leadframe oder Metallgehäuse sind mehr metallische Partikel als in der Tabelle angegeben zu erwarten

²⁾ Bei Bauteilen mit mehr als 10 offenen Pinenden sind mehr metallische Partikel als in der Tabelle angegeben zu erwarten

³⁾ Bei umspritzten Bauteilen sind mehr nichtmetallische Partikel als in der Tabelle angegeben zu erwarten

4.2.2.2 Kondensatoren

Tab. 10: Erfahrungswerte Aluminium-Elektrolytkondensatoren aus der Praxis

Erfahrungswerte von Partikeln pro Partikelklasse auf Aluminium-Elektrolytkondensatoren je 1000 cm ² Oberfläche			
Partikelgröße [µm]	Größenklassen	Alle Partikel	Metallische Partikel
$50 \leq x < 100$	E	7500	2500
$100 \leq x < 150$	F	1500	550
$150 \leq x < 200$	G	360	200
$200 \leq x < 400$	H	240	150
$400 \leq x < 600$	I	45	30
$600 \leq x < 1000$	J	6	5
$1000 \leq x$	K	0,00	0,00

Tab. 11: Erfahrungswerte Tantal-Kondensatoren aus der Praxis

Erfahrungswerte von Partikeln pro Partikelklasse auf Tantal-Kondensatoren je 1000 cm ² Oberfläche			
Partikelgröße [µm]	Größenklassen	Alle Partikel	Metallische Partikel
$50 \leq x < 100$	E	1600	150
$100 \leq x < 150$	F	500	60
$150 \leq x < 200$	G	30	60
$200 \leq x < 400$	H	80	20
$400 \leq x < 600$	I	0,00	0,00
$600 \leq x < 1000$	J	0,00	0,00
$1000 \leq x < 1500$	K	0,00	0,00
$1500 \leq x < 2000$	L	0,00	0,00
$2000 \leq x < 3000$	M	0,00	0,00
$3000 \leq x$	N	0,00	0,00

4.2.2.3 Chip-Bauelemente

Tab. 12: Erfahrungswerte Chip-Bauelemente aus der Praxis

Erfahrungswerte von Partikeln pro Partikelklasse auf Widerständen, MLCCs, Varistoren, NTCs, PTCs je 1000 cm ² Oberfläche			
Partikelgröße [µm]	Größenklassen	Alle Partikel	Metallische Partikel
$50 \leq x < 100$	E	3000	400
$100 \leq x < 150$	F	1200	140
$150 \leq x < 200$	G	300	30
$200 \leq x < 400$	H	120	5
$400 \leq x < 600$	I	30	0,00
$600 \leq x < 1000$	J	5	0,00
$1000 \leq x < 1500$	K	0,00	0,00
$1500 \leq x < 2000$	L	0,00	0,00
$2000 \leq x < 3000$	M	0,00	0,00
$3000 \leq x$	N	0,00	0,00

4.2.2.4 Shunt-Widerstände

Tab. 13: Erfahrungswerte Shunts aus der Praxis

Erfahrungswerte von Partikeln pro Partikelklasse auf Shunts je 1000 cm ² Oberfläche			
Partikelgröße [µm]	Größenklassen	Alle Partikel	Metallische Partikel
$50 \leq x < 100$	E	1300	600
$100 \leq x < 150$	F	200	150
$150 \leq x < 200$	G	60	50
$200 \leq x < 400$	H	60	30
$400 \leq x < 600$	I	20	10
$600 \leq x < 1000$	J	30	0,00
$1000 \leq x < 1500$	K	10	0,00
$1500 \leq x < 2000$	L	0,00	0,00
$2000 \leq x < 3000$	M	0,00	0,00
$3000 \leq x$	N	0,00	0,00

4.2.2.4 Quarze

Tab. 14: Erfahrungswerte Quarze aus der Praxis

Erfahrungswerte von Partikeln pro Partikelklasse auf Quarzen je 1000 cm ² Oberfläche			
Partikelgröße [µm]	Größenklassen	Alle Partikel	Metallische Partikel
$50 \leq x < 100$	E	2800	400
$100 \leq x < 150$	F	600	90
$150 \leq x < 200$	G	250	20
$200 \leq x < 400$	H	230	5
$400 \leq x < 600$	I	10	0,00
$600 \leq x < 1000$	J	5	0,00
$1000 \leq x < 1500$	K	5	0,00
$1500 \leq x < 2000$	L	0,00	0,00
$2000 \leq x < 3000$	M	0,00	0,00
$3000 \leq x$	N	0,00	0,00

4.2.2.6 Halbleiter

Tab. 15: Erfahrungswerte Halbleiter aus der Praxis

Erfahrungswerte von Partikeln pro Partikelklasse auf Halbleitern je 1000 cm ² Oberfläche			
Partikelgröße [µm]	Größenklassen	Alle Partikel	Metallische Partikel
$50 \leq x < 100$	E	8000	100
$100 \leq x < 150$	F	1600	20
$150 \leq x < 200$	G	600	0,00
$200 \leq x < 400$	H	320	0,00
$400 \leq x < 600$	I	0,00	0,00
$600 \leq x < 1000$	J	0,00	0,00
$1000 \leq x < 1500$	K	0,00	0,00
$1500 \leq x < 2000$	L	0,00	0,00
$2000 \leq x < 3000$	M	0,00	0,00
$3000 \leq x$	N	0,00	0,00

4.2.3 Elektromechanische Bauelemente

4.2.3.1 Gestanzte Metallkomponenten mit vorveredelter Bandware

Tab. 16: Erfahrungswerte gestanzte Metallkomponenten mit vorveredelter Bandware aus der Praxis

Erfahrungswerte von Partikeln pro Partikelklasse auf gestanzten Metallkomponenten mit vorveredelter Bandware je 1000 cm ² Oberfläche			
Partikelgröße [µm]	Größenklassen	Alle Partikel	Metallische Partikel
$100 \leq x < 150$	F	3000	2000
$150 \leq x < 200$	G	1200	900
$200 \leq x < 400$	H	1000	850
$400 \leq x < 600$	I	160	150
$600 \leq x < 1000$	J	80	75
$1000 \leq x < 1500$	K	20	13
$1500 \leq x < 2000$	L	3	3
$2000 \leq x < 3000$	M	1	1
$3000 \leq x$	N	0,02	0,00

4.2.3.2 Gestanzte Metallkomponenten mit unveredelter Bandware und anschließendem Galvanikprozess

Tab. 17: Erfahrungswerte gestanzte Metallkomponenten mit unveredelter Bandware und anschließendem Galvanikprozess aus der Praxis

Erfahrungswerte von Partikeln pro Partikelklasse auf gestanzten Metallkomponenten mit unveredelter Bandware und anschließendem Galvanikprozess je 1000 cm ² Oberfläche			
Partikelgröße [µm]	Größenklassen	Alle Partikel	Metallische Partikel
$100 \leq x < 150$	F	9000	3000
$150 \leq x < 200$	G	3000	1000
$200 \leq x < 400$	H	1500	500
$400 \leq x < 600$	I	160	12
$600 \leq x < 1000$	J	20	4
$1000 \leq x < 1500$	K	30	0,04
$1500 \leq x < 2000$	L	0,52	0,20
$2000 \leq x < 3000$	M	0,76	0,00
$3000 \leq x$	N	0,03	0,00

4.2.3.3 Gedrehte Metallstifte mit anschließendem Galvanikprozess

Tab. 18: Erfahrungswerte gedrehte Metallstifte mit anschließendem Galvanikprozess aus der Praxis

Erfahrungswerte von Partikeln pro Partikelklasse auf gedrehten Metallstiften mit anschließendem Galvanikprozess je 1000 cm ² Oberfläche			
Partikelgröße [µm]	Größenklassen	Alle Partikel	Metallische Partikel
$50 \leq x < 100$	E	3900	3300
$100 \leq x < 150$	F	360	310
$150 \leq x < 200$	G	45	37
$200 \leq x < 400$	H	43	31
$400 \leq x < 600$	I	7	7
$600 \leq x < 1000$	J	0,00	0,00
$1000 \leq x$	K	0,00	0,00

4.2.3.4 Reine Kunststoffteile

Tab. 19: Erfahrungswerte reine Kunststoffteile aus der Praxis

Erfahrungswerte von Partikeln pro Partikelklasse auf reinen Kunststoffteilen je 1000 cm ² Oberfläche			
Partikelgröße [µm]	Größenklassen	Alle Partikel	Metallische Partikel
100 ≤ x < 150	F	900	120
150 ≤ x < 200	G	300	20
200 ≤ x < 400	H	200	10
400 ≤ x < 600	I	20	0,78
600 ≤ x < 1000	J	10	0,00
1000 ≤ x < 1500	K	2	0,00
1500 ≤ x < 2000	L	2	0,00
2000 ≤ x < 3000	M	2	0,00
3000 ≤ x	N	0,06	0,00

4.2.3.5 Gefügte Steckerleisten

Tab. 20: Erfahrungswerte gefügter Steckerleisten aus der Praxis

Erfahrungswerte von Partikeln pro Partikelklasse auf gefügten Steckerleisten je 1000 cm ² Oberfläche			
Partikelgröße [µm]	Größenklassen	Alle Partikel	Metallische Partikel
100 ≤ x < 150	F	650	300
150 ≤ x < 200	G	200	80
200 ≤ x < 400	H	190	40
400 ≤ x < 600	I	30	4
600 ≤ x < 1000	J	12	1
1000 ≤ x < 1500	K	4	0,35
1500 ≤ x < 2000	L	1	0,05
2000 ≤ x < 3000	M	1	0,03
3000 ≤ x	N	0,02	0,00

4.2.3.6 Hochvolt-Steckverbinder

Tab. 21: Erfahrungswerte Hochvolt-Steckverbinder (typisch geschirmt) aus der Praxis

Erfahrungswerte von Partikeln pro Partikelklasse auf Hochvolt-Steckverbindern (typisch geschirmt) je 1000 cm ² Oberfläche			
Partikelgröße [µm]	Größenklassen	Alle Partikel	Metallische Partikel
$100 \leq x < 150$	F	4000	2000
$150 \leq x < 200$	G	1500	700
$200 \leq x < 400$	H	1200	500
$400 \leq x < 600$	I	150	100
$600 \leq x < 1000$	J	70	40
$1000 \leq x < 1500$	K	20	8
$1500 \leq x < 2000$	L	7	2
$2000 \leq x < 3000$	M	4	1
$3000 \leq x$	N	3	0,00

4.2.3.7 Nichtmetallische Einzelteile

Tab. 22: Erfahrungswerte Montageprozess von nichtmetallischen Einzelteilen aus der Praxis

Erfahrungswerte von Partikeln pro Partikelklasse auf Montagegruppen aus nichtmetallischen Einzelteilen je 1000 cm ² Oberfläche			
Partikelgröße [µm]	Größenklassen	Alle Partikel	Metallische Partikel
$100 \leq x < 150$	F	2800	30
$150 \leq x < 200$	G	1000	0,10
$200 \leq x < 400$	H	900	0,06
$400 \leq x < 600$	I	80	0,06
$600 \leq x < 1000$	J	30	0,00
$1000 \leq x < 1500$	K	15	0,00
$1500 \leq x < 2000$	L	0,00	0,00
$2000 \leq x < 3000$	M	7	0,00
$3000 \leq x$	N	0,00	0,00

4.2.4 Metallgehäuse

4.2.4.1 Aludruckgussgehäuse

Tab. 23: Erfahrungswerte Aludruckgussgehäuse aus der Praxis

Erfahrungswerte von Partikeln pro Partikelklasse auf Aludruckgussgehäusen je 1000 cm ² Oberfläche			
Partikelgröße [µm]	Größenklassen	Alle Partikel	Metallische Partikel
$100 \leq x < 150$	F	1100	700
$150 \leq x < 200$	G	310	230
$200 \leq x < 400$	H	230	200
$400 \leq x < 600$	I	50	47
$600 \leq x < 1000$	J	30	28
$1000 \leq x < 1500$	K	10	10
$1500 \leq x < 2000$	L	4	4
$2000 \leq x < 3000$	M	3	3
$3000 \leq x$	N	1	1

4.2.5 Verpackungen

4.2.5.1 Tiefziehtrays (neu)

Tab. 24: Erfahrungswerte Tiefziehtrays (neu) aus der Praxis

Erfahrungswerte von Partikeln pro Partikelklasse auf Tiefziehtrays (neu) je 1000 cm ² Oberfläche			
Partikelgröße [µm]	Größenklassen	Alle Partikel	Metallische Partikel
$100 \leq x < 150$	F	600	20
$150 \leq x < 200$	G	200	3
$200 \leq x < 400$	H	150	2
$400 \leq x < 600$	I	20	0,15
$600 \leq x < 1000$	J	10	0,00
$1000 \leq x < 1500$	K	6	0,00
$1500 \leq x < 2000$	L	2	0,00
$2000 \leq x < 3000$	M	0,00	0,00
$3000 \leq x$	N	0,00	0,00

4.2.6 Leiterplatten

In dem Cluster Leiterplatte (unbestückt) wird zwischen der starren Leiterplatte und der flexiblen Leiterplatte unterschieden.

Abb. 21: Flexible Leiterplatte



Abb. 22: Starre Leiterplatte



Die flexible Leiterplatte kann teilweise durch gestanzte Metall- und/oder Kunststoffversteifungen verstärkt werden. Dadurch kann sich die theoretische Menge an Metall- und Kunststoffpartikeln erhöhen. Bei starren Leiterplatten mit Sonderapplikationen, wie bspw. Kupfer- oder Aluminium-Heatsinks, Tiefenfräsungen, Kavitäten etc. kann sich die theoretische Menge an Metall- und Kunststoffpartikeln erhöhen.

Die flexible Leiterplatte wie auch die starre Leiterplatte wird normalerweise zu 100 Prozent einer elektrischen Kontrolle unterzogen. Das Risiko eines elektrischen Funktionsausfalls durch leitende Partikel kann somit minimiert werden.

Tab. 25: Erfahrungswerte flexible Leiterplatten ohne Reinigungsschritt aus der Praxis

Erfahrungswerte ¹⁾ von Partikeln pro Partikelklasse auf flexiblen Leiterplatten ohne Reinigungsschritt je 1000 cm ² Oberfläche			
Partikelgröße [µm]	Größenklassen	Alle Partikel	Metallische Partikel
50 ≤ x < 100	E	3000 ²⁾	400 ³⁾
100 ≤ x < 150	F	400 ²⁾	40 ³⁾
150 ≤ x < 200	G	50 ²⁾	10 ³⁾
200 ≤ x < 400	H	40 ²⁾	10 ³⁾
400 ≤ x < 600	I	4 ²⁾	4 ³⁾
600 ≤ x < 1000	J	0,00 ²⁾	0,00 ³⁾
1000 ≤ x	K	0,00 ²⁾	0,00 ³⁾

¹⁾ Die angegebenen Werte sind Mittelwerte verschiedenster Leiterplattenausführungen inkl. verschiedener metallischer und nichtmetallischer Versteifungen

²⁾ Bei Leiterplatten mit Kunststoffversteifungen sind mehr nichtmetallische Partikel als in der Tabelle angegeben zu erwarten

³⁾ Bei Leiterplatten mit gestanzten Metallversteifungen sind mehr metallische Partikel als in der Tabelle angegeben zu erwarten

Tab. 26: Erfahrungswerte unbestückte, flexible Leiterplatten mit Reinigungsschritt aus der Praxis

Erfahrungswerte ¹⁾ von Partikeln pro Partikelklasse auf unbestückten, flexiblen Leiterplatten mit Reinigungsschritt je 1000 cm ² Oberfläche			
Partikelgröße [µm]	Größenklassen	Alle Partikel	Metallische Partikel
50 ≤ x < 100	E	700 ²⁾	300 ³⁾
100 ≤ x < 150	F	200 ²⁾	50 ³⁾
150 ≤ x < 200	G	40 ²⁾	10 ³⁾
200 ≤ x < 400	H	20 ²⁾	10 ³⁾
400 ≤ x < 600	I	0,00 ²⁾	0,00 ³⁾
600 ≤ x < 1000	J	0,00 ²⁾	0,00 ³⁾
1000 ≤ x	K	0,00 ²⁾	0,00 ³⁾

¹⁾ Die angegebenen Werte sind Mittelwerte verschiedenster Leiterplattenausführungen inkl. verschiedener metallischer und nichtmetallischer Versteifungen

²⁾ Bei Leiterplatten mit Kunststoffversteifungen sind mehr nichtmetallische Partikel als in der Tabelle angegeben zu erwarten

³⁾ Bei Leiterplatten mit gestanzten Metallversteifungen sind mehr metallische Partikel als in der Tabelle angegeben zu erwarten

Tab. 27: Erfahrungswerte unbestückte, starre Leiterplatten aus der Praxis

Erfahrungswerte von Partikeln pro Partikelklasse auf unbestückten, starren Leiterplatten je 1000 cm ² Oberfläche			
Partikelgröße [µm]	Größenklassen	Alle Partikel	Metallische Partikel
100 ≤ x < 150	F	140	30
150 ≤ x < 200	G	50	15
200 ≤ x < 400	H	20	5
400 ≤ x < 600	I	6	3
600 ≤ x < 1000	J	2	0,00
1000 ≤ x < 1500	K	0,00	0,00
1500 ≤ x < 2000	L	0,00	0,00
2000 ≤ x < 3000	M	0,00	0,00
3000 ≤ x	N	0,00	0,00

4.3 Ermittlung der möglichen Herkunft von Partikeln in der Produktion

Analysiert man die Bauteilsauberkeit eines Teiles, erhält man die Anzahl und Größenverteilung der extrahierten Partikel. Meistens hat man auch noch eine Aussage über die Anzahl und Größenverteilung von metallisch glänzenden Partikeln. Über die Herkunft der Partikel hat man zunächst keine Aussage.

Um eine Minimierung der Partikelfracht zu erreichen, ist jedoch die Kenntnis über die Partikelquellen und deren Einflussgrößen erforderlich. Mit dieser Thematik setzt sich VDA 19 Teil 2 auseinander.

4.3.1 Entstehung von Partikeln

Grundsätzlich müssen Partikel wie folgt unterschieden werden:

- Unspezifische Partikel, die in der Fertigung vorhanden sind (Schmutz, Staub, Hautpartikel, Mineralien/Salze, Ruß, ...)
- Partikel, die von Bestandteilen der Produkte stammen
 - vom Produkt selbst
 - von Nachbarprodukten

Dabei sind Partikel, die vom Produkt stammen, entweder an den Zukaufmaterialien mitgeschleppt worden oder durch Prozessschritte entstanden.

Grundsätzlich ist in Fertigungseinrichtungen Staub vorhanden. Üblicherweise bilden sich ca. 6 mg Staub pro Quadratmeter und Tag. Dieser entsteht z. B. aus Hautschuppen vom Menschen, der alleine durchschnittlich etwa 1–2 g täglich an abgestorbenen Hautzellen verliert.

Im Weiteren sind vertreten:

- Fasern, Fusseln
(von Kleidung, Stoffen, Papier, Kartons, ...)
- Pflanzenteilchen wie Pollen und Blütenpartikel
- Lebende und tote Bakterien
- Schimmelpilze
- Überreste (tote Körper, Häutungsreste, Kot) von sonstigen Kleinstlebewesen
- Gesteinskörnchen
(Straßenabrieb, Sandverwehungen, ...)
- Feinstaub (Ruß von Verbrennungsmotoren, Heizungen, Industrieabgasen, Bränden)

Der Anteil an Milben und ähnlichen Tieren im Industriestaub ist sicher viel geringer, dafür gibt es zusätzlich in Produktionen noch verstärkt Abrieb von rotierenden Anlagen, wie Motoren (Kohle), Riemen (Gummi), Bremsen (Asbest) sowie Dämpfe (heiBes Öl) und Stäube (Schleifen).

Die Entstehung von metallischen Partikeln ist selten ein kontrollierter und damit steuerbarer Prozess. Meistens entstehen Partikel zufällig und unterliegen nur wenigen Gesetzmäßigkeiten. Grundsätzlich ist die Vermeidung von Partikeln dem nachträglichen Entfernen vorzuziehen.

Vorgeschaltet werden sollte die Identifikation der Partikel. Dies kann z. B. mit REM/EDX erfolgen. In der Praxis hat sich auch die Lichtmikroskopie zur Identifikation von Form und Farbe etabliert.

4.3.2 Cluster Elektronikfertigung

Für die Funktionsfähigkeit von elektronischen Bauteilen sind in erster Linie elektrisch leitfähige Partikel als funktionskritisch einzustufen. Da aber auch in immer mehr Fällen Bauteile in komplette Systeme integriert werden, können auch nichtmetallische Partikel zu Ausfällen, wie z. B. Gehäuseundichtigkeiten, Kontaktproblemen etc. führen.

Mögliche Quellen für metallische Partikel:

- Verschleppung aus vorhergehenden Prozessen (Leiterplatte, Bauteile, Gehäuse)
- Verschleppung von Lotpaste beim Auftrag (verschmutzte Schablonenunterseite, Spritzer beim ‚Jetten‘) → freie Zinnperlen
- Lotspritzer beim Aufschmelzprozess → freie Zinnperlen
- Lotrückstände beim THT-Löten
- Rückstände beim Reparaturlöten → freie Zinnperlen
- Spanbildung beim Einpressen von Bauteilen (Kontakten, Steckern, Schirmblechen usw.)
- Spanbildung beim Kontaktieren von Testsystemen (Nadelbettadapter, Flying Prober, Steckverbindungen usw.)
- Spanbildung bei der Montage von Systemen (Grate an Spritzgussteilen, Schraubverbindungen)
- usw.

Mögliche Quellen für nichtmetallische Partikel:

- Verschmutzte Fertigungsanlagen
- Rückstände vom Leiterplattenmaterial beim Nutzentrennen (Bruchstücke von Glasfasern, Frässtaub)
- Schmauchspuren beim Lasernutzentrennen
- Spanbildung bei der Montage von Systemen (Kunststoffspäne usw.)
- Verpackungsmaterial (Kartonagen, Styropor)
- usw.

4.3.3 Cluster passive Bauelemente

Metallische Partikel

Die meisten Bauteile haben Leiter oder Anschlusssteile, welche typischerweise aus Kupfer oder Kupferlegierungen bestehen. Aufgrund der Lötbarkeit sind oft Beschichtungen aus Zinn oder Zinnlegierungen mit teilweiser Unternickelung üblich.

Sobald Drähte wie z. B. bei Wickelgütern (induktiven Bauteilen) Verwendung finden, sind Kupferpartikel stark vertreten. Jeder Draht, der geschnitten wird, hat eine Schneid-

kante, die einen Bereich, der gerade ist (Glattschnitt), und eine Bruchfläche besitzt. Hier bilden sich häufig Grate, die mehr oder weniger fest an den Drahtenden anhaften.

Abb. 23: Seitenschneider-Schnitt am Kupferdraht D = 2,25 mm, Gratbildung



Der Zustand des Schnittwerkzeugs sowie der Verschleißzustand haben dabei großen Einfluss auf die Gratbildung.

Wie in den Bildern gut zu erkennen ist, entspricht in diesem Fall die maximale Länge der möglichen Partikel der Länge der Schnittkante.

Abb. 24, 25: Abgefallene Partikel vom geschnittenen Draht D = 1,8 mm (Kupfer verzinkt)

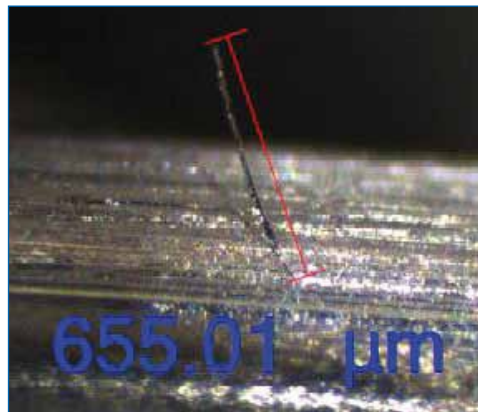


Abb. 26: Anhaftender Partikel (Zinn) an einem verzinnnten Kupferdraht $D = 2,25 \text{ mm}$



Abb. 27: Detaildarstellung mit Vermessung der Partikellänge

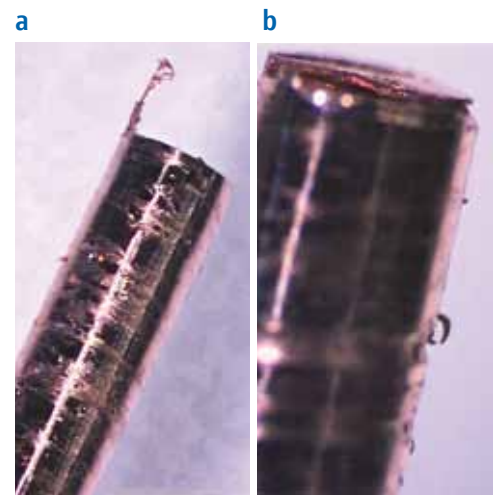
Abb. 28: Abgeschabter Partikel (Zinn) in Haarform auf einem verzinnnten Draht (Länge 655 µm)



Werden verzinnnte Drähte eingesetzt, können viele Flitter und Metallstäube auf dem angelieferten Draht gefunden werden. Durch Wickeln und Umlenkprozesse entstehen Abschabungen, die teilweise wieder an den Draht gepresst werden.

Beim mechanischen Abisolieren (Rotationsfräsen) von runden Lackdrähten sind Späne unvermeidlich. Diese Späne haften aufgrund der Weichheit von Kupfer gut am Grundmaterial.

Abb. 29: Abgefräste Lackdrähte



Da bei vielen Bauelementen eine Verzinnung oder Lötung der Anschlussdrähte an Stifte erfolgt, ist ein Tauchverzinn-Prozess mit flüssigem Lot erforderlich. Um eine gute Benetzung zu ermöglichen, wird eine vorherige Befeuchtung mit Flussmittel durchgeführt.

Dieses Flussmittel hat eine Trägerflüssigkeit (Wasser, Lösungsmittel), welche beim Eintauchen in das Lot schlagartig verdampft und somit Gasblasen und in Folge ‚wegfliegende‘ Lotperlen erzeugt.

Der Effekt ist bei Leiterplatten-Lötungen mit Wellenlötanlagen bekannt. Diese Lotspritzer oder Lotkugeln werden typischerweise einige Zentimeter vom Entstehungsort weggeschleudert und kleben mehr oder weniger an Nachbaroberflächen an.

Teilweise schmelzen sie sich in Kunststoffe ein und sind ‚eingebrennt‘.

Abb. 30, 31: Eine in ein Kunststoffgehäuse eingeschmolzene Lotperle



Diese Lotperlen sind als verschleppte Partikel auch flach gequetscht, an Gehäuse anhaftend, zu finden. Da Zinn weich ist, werden kleine Kugeln auf Tischoberflächen oder zwischen Werkzeugen flach gepresst, und haften als Flitter leicht an rauen Oberflächen an.

Die Anzahl an Zinnperlen ist beispielsweise durch das Abdecken des Umfelds beim Verzinn-Vorgang zu verringern (Spritzschutz).

Induktive Bauteile besitzen normalerweise einen magnetischen Kern, daher kann es auch dort zur Partikelbildung kommen. Beispielsweise sind Ferrite (Keramik aus Metalloxid) bruchempfindlich und besitzen scharfe Kanten oder Grate, die bei Stoß oder Berührung leicht absplintern. Hier kann man an Kernmontageplätzen viel Ferritstaub, aber auch millimetergroße Partikel finden.

Ferrit ist typischerweise ein Halbleiter, kann also begrenzt Strom fließen lassen und dadurch auch Kurzschlüsse erzeugen.

Abb. 32: Ferritpartikel, erkannt als Metall (419 µm)



Abb. 33: Ferritpartikel, erkannt als Nichtmetall (558 µm)



Abb. 34: Nichtmetallischer Partikel, vermutlich Grat oder Kunststoffrest (217 µm)



Abb. 35: Nichtmetallischer Partikel, vermutlich Verpackungsmaterial, rosa Schaumstoff'



Der Ferritpartikel in Bild 32 zeigt anschaulich das Problem der Detektion von Metall mit dem optischen Verfahren. Durch unterschiedliche Glanzbedingungen (im Vergleich zu Bild 33) kommt es zu Fehlinterpretationen bei der automatischen Entscheidung Metall/Nichtmetall.

Weichmagnetische Kerne aus amorphen und nanokristallinen Werkstoffen bestehen aus Bandmaterial, welches auch leicht zu Splitterbildung neigt. Da die Kerne aber oft in geschlossenen Kunststoffkapseln verwendet werden, ist das direkte Abplatzen nicht mehr möglich. Da in dem Verarbeitungsbereich eine Verschleppung durch Transportmittel und die Mitarbeiter normal ist, müssen die Kapseln außen gereinigt werden.

4.3.4 Cluster elektromechanische Bauelemente

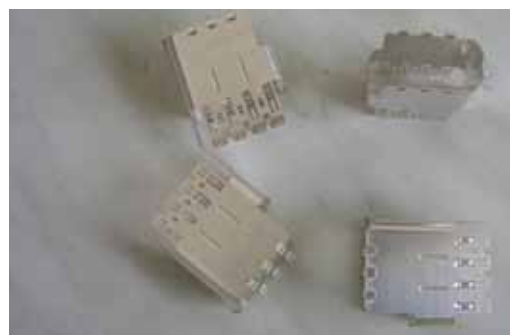
In Bezug auf elektrische Steckverbinder lassen sich die elektrisch leitfähigen Partikel als die primär funktionskritischen einstufen.

Mögliche Quellen für metallische Partikel:

- Verschleppung aus vorhergehenden Prozessen
- Stanzprozess (Schneiden/Reißen, Biegen, Umlenken, Weitertransport, Gratbildung)
- Transport, Führung beim/nach Haspeln
- Vereinzelung von Metallbauteilen am Band
- Abscheren bei Fügeprozessen
- Abplatzen bei Biegeprozessen
- Abrieb beim oder durch das Handling von Metallbauteilen
- Vibrationen bei Transportvorgängen
- usw.

Gestanzte Metallkomponenten mit vorveredelter Bandware

Abb. 36, 37, 38: Schirmblech



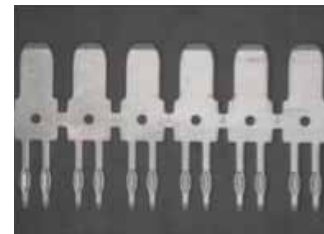
Gestanzte Metallkomponenten mit unveredelter Bandware und anschließendem Galvanikprozess

Abb. 39, 40, 41, 42: Stanzkontakte

metallischer Partikel 373 µm



metallischer Partikel 265 µm



In einem Galvanikprozess erfahren die Teile eine Reinigung, was sich positiv auf die Bauteilsauberkeit auswirkt.

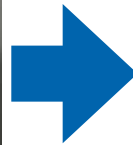
metallischer Partikel 2176 µm



metallischer Partikel 1623 µm

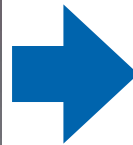
**Gedrehte Metallstifte mit
anschließendem Galvanikprozess**

Abb. 43, 44, 45: Steckerstift



Spritzgießprozess (ohne Metalleinleger)

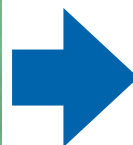
Abb. 46, 47, 48: Steckergehäuse



Der Werkzeugverschleiß beim Spritzgießen ist in der Regel minimal und hat keine bedeutenden Auswirkungen auf die Bauteilsauberkeit.

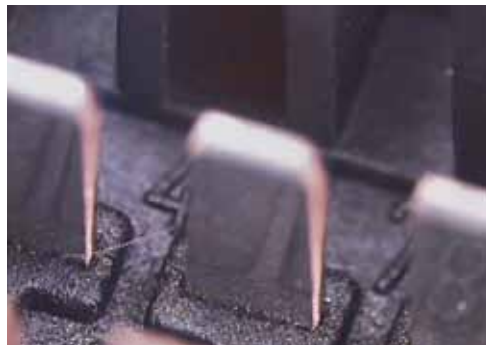
Montageprozess von Metall- und Kunststoffteilen

**Abb. 49, 50, 51:
Steckergehäuse 58-polig**



metallischer Partikel 421 μm

Abb. 52, 53: 12-poliger Stecker mit überbrückten Kontakten



Dem Fertigungsprozess nachgeschaltete Reinigungsstationen (mechanisch und/oder fluidisch) erhöhen deutlich den Aufwand und die Fertigungskosten, sind in manchen Fällen jedoch notwendig, um eine verbesserte bzw. die geforderte Bauteilsauberkeit zu erreichen.

4.3.5 Cluster Leiterplatte

Im Herstellungsprozess von Leiterplatten lässt sich die Partikelentstehung nicht vermeiden. Insbesondere bei der Konturbearbeitung, wie auch bei der Verarbeitung von gestanzten metallischen und nichtmetallischen Versteifungen, lässt sich die Partikelentstehung nicht vermeiden.

Abb. 54: Kunststoffpartikel + Fasern

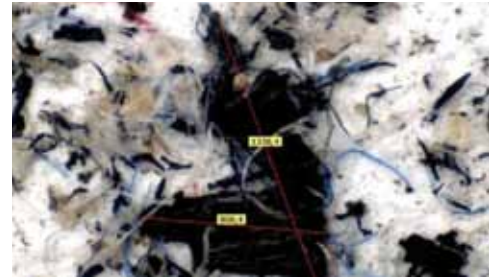


Abb. 55: Kunststoffpartikel



Abb. 56: Metallische Partikel



Mögliche Quellen für metallische Partikel:

- Querkontaminierung durch nicht gereinigte Anlagen/Prozesse
- Stanzprozess (Umlenken, Weitertransport, Gratbildung)
- Abscheren bei Fügeprozessen
- Abrieb beim oder durch das Handling von Metallbauteilen
- Transport in verunreinigter Verpackung
- usw.

Je kleiner die metallischen Partikel sind, desto eher haften sie durch elektrostatische Kräfte an der Leiterplatte. Die metallischen und nichtmetallischen Partikel können – falls nötig – durch zusätzliche Reinigungsschritte größtenteils aber nicht vollständig entfernt werden. Die Reinigungsprozesse erhöhen deutlich den Aufwand und die Fertigungskosten.

Zusätzlich kann durch das Design bzw. die Konstruktion einer Leiterplatte Einfluss auf die Partikelentstehung genommen werden. Somit kann im Vorfeld die Erzeugung bzw. der Eintrag von metallischen wie auch nichtmetallischen Partikeln reduziert werden.

Designempfehlungen zur Reduzierung von Partikeln:

- Kerbritzen von Leiterplatten-Nutzen
 - Fräskanäle sollten nicht durch Ritzstrecken verlaufen
 - Ritzstrecken sollten sich nicht mit Fräsungen überdecken

Abb. 57: Fräsung läuft durch die Ritzstrecke

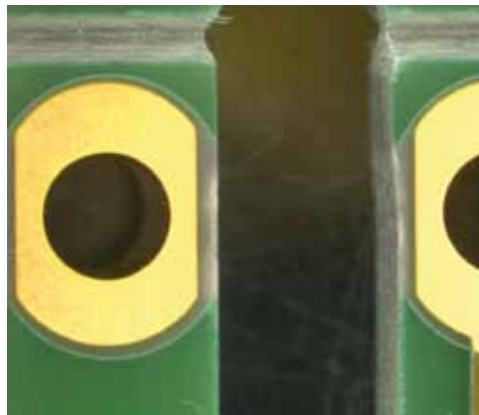
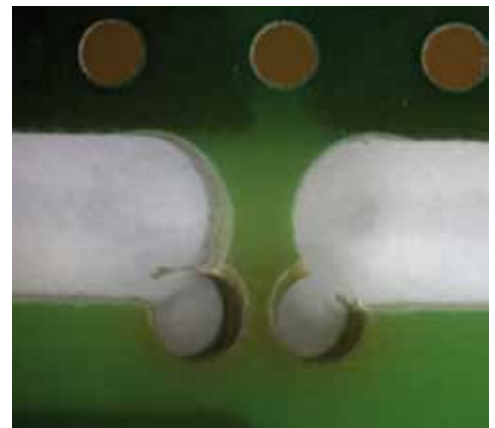


Abb. 58: Ritzstrecke liegt auf Fräskante



- Anfräsen von Bohrungen für Sollbruchstellen/Haltestege erzeugt nichtmetallische Partikel

Abb. 59: Spanbildung in angefräster Bohrung

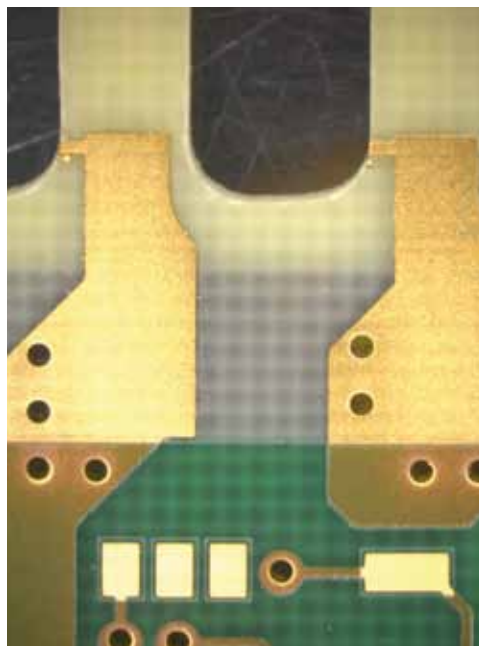


- Kupferflächen an der Leiterplattenkontur erzeugen metallische Partikel z. B. bei Kantenmetallisierungen oder dem Trennen von Anbindungen für galvanisch vergoldete Kontaktfinger

Abb. 60: Kantenmetallisierung

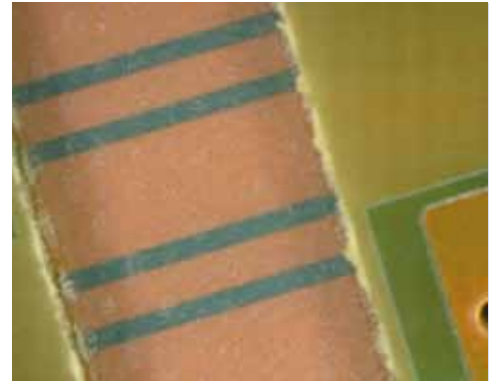


Abb. 61: Anbindungen für galvanische Vergoldung



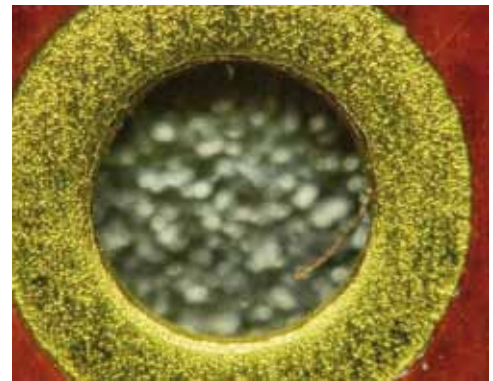
- Kavitäten, Vertiefungen und Tiefenfräsungen bei Leiterplatten erzeugen nicht-metallische Partikel

Abb. 62: Tiefenfräsung



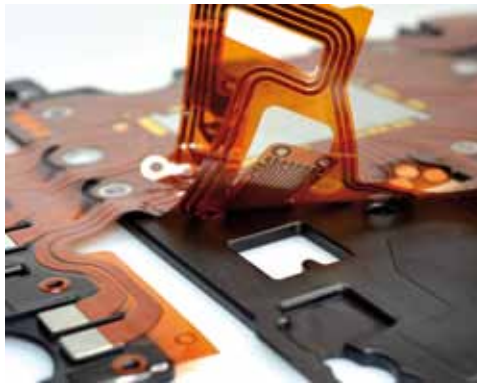
- Stanzen in metallisierte Flächen vermeiden (z. B. Nickel, Gold, Zinn), um die Spanerzeugung zu reduzieren

Abb. 63: Spanbildung durch Stanzung



- Hinterschnitte vermeiden: Partikel sammeln sich in Hinterschnitten an und sind auch mit einem zusätzlichen Reinigungsschritt schwer zu entfernen

Abb. 64: Flexible Leiterplatte mit Hinterschnitt



- Gestanzte metallische Elemente grat- und beschädigungsfrei verarbeiten, um den Partikeleintrag zu reduzieren

Abb. 65: Stanzgrat in Bohrung

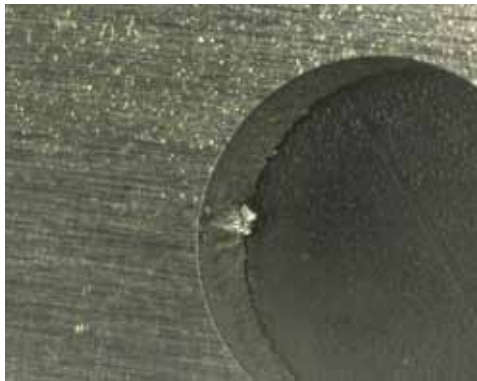


Abb. 66: Stanzgrat



Abb. 67: Beschädigte metallische Versteifung



- Durch den Beizprozess kann bei gebeizten Stanzkanten am Metall anliegender Stanzrest angelöst und somit die Stanzkante ausgearbeitet werden.

Abb. 68: Anliegender Stanzrest an Stanzkante

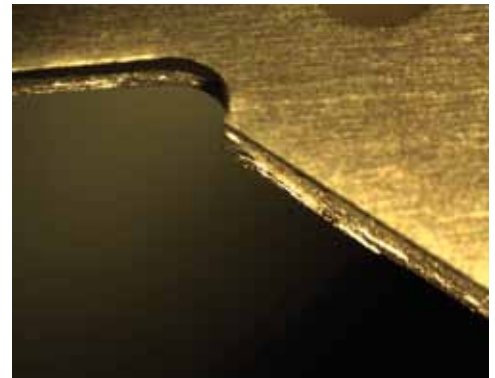


Abb. 69: Stanzreste durch Beizen gelöst



- Kunststoffelemente grat- und beschädigungsfrei verarbeiten, um den Partikeleintrag zu reduzieren

Abb. 70: Kunststoffelement mit Grat



Abb. 71: Partikel von angelieferten Kunststoffelementen



4.4 Sauberkeitsgerechte Konstruktion und Prozessauswahl

Aspekte einer sauberkeitsgerechten Konstruktion / Produktion in Bezug auf metallische Partikel

Nach derzeitigem Wissensstand gilt, dass die meisten Partikel aus dem Bearbeitungsprozess der Bauelemente, Baugruppen stammen (genannt werden ca. 80 %) und nur ein Bruchteil (ca. 20 %) auf Umgebungseinflüsse zurückzuführen ist.

Da wegen der Komplexität des Themas nicht auf alle möglichen Funktionsstörungen und Fertigungsprozesse eingegangen werden kann (siehe Kapitel 2.3 und Kapitel 4.1), soll hier der Fokus nur auf die metallischen Partikel gerichtet sein.

Um ein möglichst partikelfreies Produkt herzustellen, muss präventiv in der Produkt- und Prozessanalyse festgelegt werden, welche Fertigungsprozesse sich dazu am besten eignen. Das heißt: Wie und womit kann das Produkt gestaltet werden, um ein möglichst geringes Partikelpotenzial zu erreichen?

1. Produkt

- Das Bauteildesign sollte so robust sein, dass die Bauteilfunktion tolerant gegen Verschmutzungen ist. Beispielsweise sollten Abstände zwischen elektrischen Potenzialen sowie Luft- und Kriechstrecken so großzügig wie möglich gestaltet bzw. elektrische Potenziale räumlich voneinander entfernt und nicht nebeneinander platziert werden. Wenn das nicht möglich ist, sind gefährdete Bereiche zu schützen (Abdecklackierung, Trennstege, Gehäuse ...).
- Partikel sollten einfach beseitigt werden können. Das Bauteil sollte vor Inbetriebnahme einer effektiven Endreinigung unterzogen werden können. Dies wird durch verdeckte und verwinkelte Strukturen erschwert oder unterbunden.
- Stanzprodukte haben eine hohe Partikelfracht. Diese wird in galvanischen Prozessen auf ein Minimum reduziert. Stanzprodukte, die nachträglich keine galvanischen Reinigungsprozesse erfahren, sollten gegebenenfalls nachgereinigt werden.
- Fügeprozesse können Partikel erzeugen; so kann zum Beispiel ein hoher Glasfaserteil in Kontaktträgern beim Bestücken mit Kontakten an den relativ weichen Zinnoberflächen zu Abschabungen führen. Pressflächen sind möglichst klein auszuführen und eine Nachreinigung ist vorzusehen.
- Freie Partikelreduktion. Eine senkrecht angebrachte Flachbaugruppe begünstigt die Selbstreinigung durch abfallende Partikel. Werden diese zusätzlich ganz abgeführt

oder zumindest in Taschen gefangen, sind sie für das System unschädlich gemacht.

- Bare-die-Chips sind idealerweise durch gehauste Chips zu ersetzen.
- BGAs mit Underfiller sind zu nutzen.
- Die Verwendung von Bauelementen, die klassischerweise viele Partikel mitbringen, ist einzuschränken bzw. auf ihre Verwendung ist vollständig zu verzichten oder sie sind in Gehäuse zu verpacken (z. B. Ferrite, Kabelbäume mit Crimpkontakten, elektro-mechanische Baugruppen, große Spulen ...).
- Schraublöcher zum Beispiel in Gehäusen sind entweder offen zu gestalten und nachzureinigen oder besser gleich geschlossen mit selbstfurchenden Schrauben in Sackloch auszuführen (Achtung: In diesem Fall ist aber Nacharbeit einzuschränken oder zu verbieten).

2. Produktionsprozesse

Die Überlegungen zur Optimierung in Bezug auf Partikelquellen sollten von innen (Prozesse; Baugruppen) nach außen (Milieu, Umgebung) erfolgen. Das heißt: das Geschehen direkt am Bauteil betrachten und zuerst damit beginnen.

Eine Priorisierung der Prozesse nach dem Kriterium, welche zuerst überprüft und gegebenenfalls optimiert werden sollten, ergibt folgende Reihenfolge:

Priorität 1:

- Stanz-/Biegeprozesse
- Fügevorgänge
- Schraubprozesse
- Löt-/Schweißprozesse
- Führungen
- Greifer
- Werkstückträger
- Verpackungsart (Schüttgut)
- ...

Diese Prozesse und Werkzeuge sollten abrieb- und reinigungsoptimiert ausgelegt werden. Nicht zu vermeidende Partikel müssen nach Möglichkeit passiv (abfallen) oder aktiv

(z. B. abblasen, absaugen) vom Produkt abgeführt werden.

Partikelansammlungen im Produktionsbereich dürfen nicht entstehen. Diese Bereiche sind sauber zu halten und turnusmäßig zu kontrollieren.

Priorität 2:

- Partikel aus Anlagen- und Werkzeugverschleiß
- Partikelverschleppung durch das Personal
- Partikel von der Verpackung
- ...

Eine aktive Partikelverteilung/-abgabe durch prozessfremde Arbeiten wie beispielsweise Reinigungsarbeiten, offenes Pressluftreinigen, Trennschleifer usw. während der Fertigung ist zu vermeiden.

Dafür ist eine Verhaltensrichtlinie, welche die Vorgaben beschreibt, notwendig (siehe Definition Sauberzone VDA 19 Teil 2).

Priorität 3:

- Partikel aus der Fertigungsumgebung (weit flugfähige Partikel)
- Partikel aus der Umwelt (offene Fenster, Tore ...)
- Partikel, hochgewirbelt von Flurförderfahrzeugen
- ...

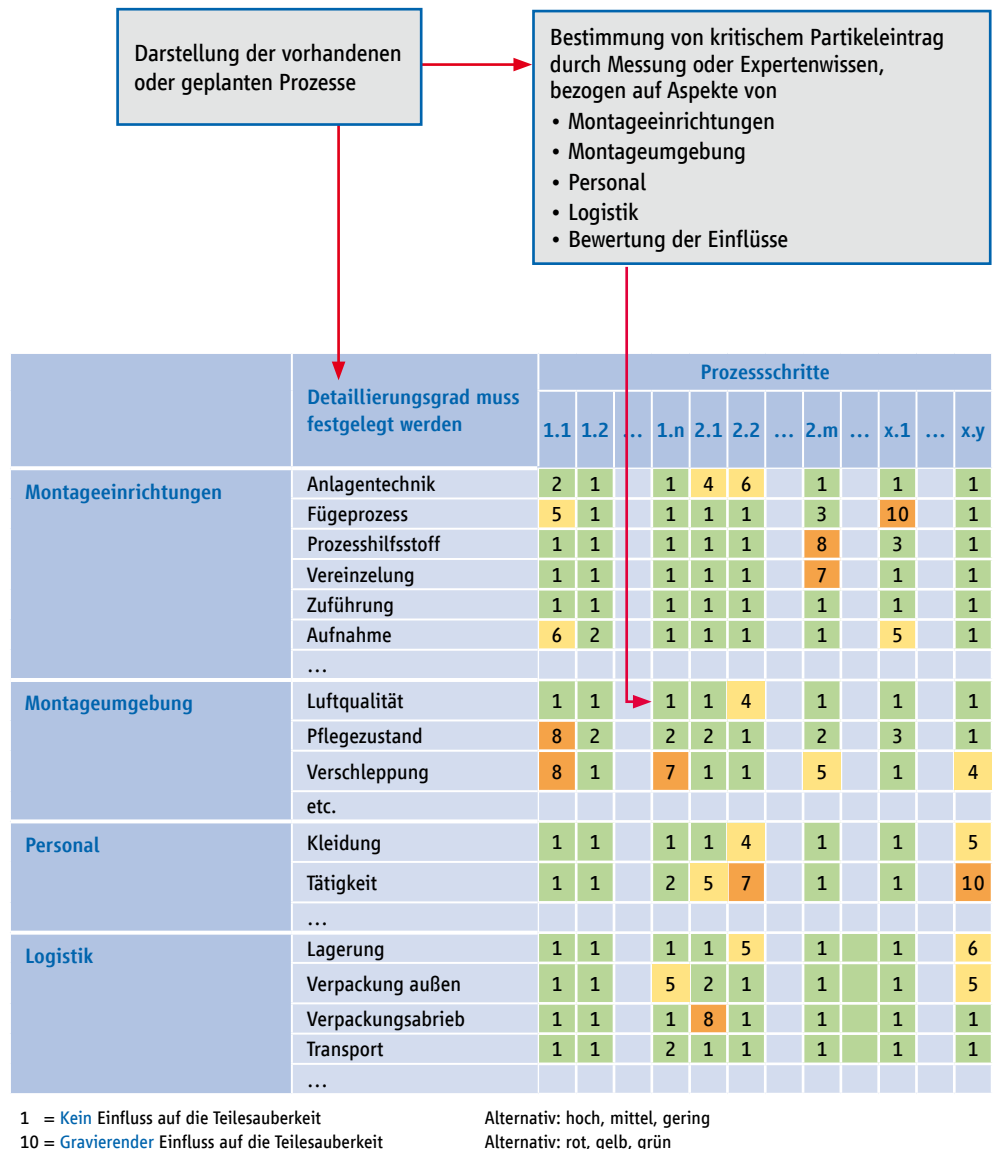
Stichwort: Umgebungsauberkeit und Visualisierung

Genaue Antworten bzw. Lösungen können nur produktbezogen gefunden werden. Dies erfordert eine spezifische Analyse firmeninterner Produktionsprozesse.

Bei der Erstellung eines Lastenhefts (Montagemaschine) ist der Punkt Technische Sauberkeit als gesonderter Punkt zu behandeln. Weiterhin ist eine produktspezifische Konstruktionsrichtlinie zu empfehlen (Fehlerkatalog mit Abstellmaßnahmen), die zum Beispiel folgende Punkte konkret definiert:

- Prozesse sollten möglichst wenig Partikel erzeugen oder – besser noch – die Anzahl vorhandener Partikel reduzieren
 - Prozessumgebungen sollten einfach gereinigt werden können
 - Prozesse sollten Partikel vom Bauteil bzw. aus der operativen Umgebung abführen
 - Partikelansammlungen dürfen nicht entstehen
 - Trennung/Abschottung sensibler Prozesse von partikelerzeugenden Prozessen
 - Werkstückträger sind so zu gestalten, dass eine Partikelentstehung nicht stattfindet:
 - Minimalpunktauflage
 - entgratete und polierte Berührungspunkte/-flächen
 - „weiche“ Berührungspunkte/-flächen
 - Werkstückträger sind so zu gestalten, dass eine Partikelansammlung nicht stattfindet
 - gut zu reinigen
 - flächenreduziert und offen
 - Berücksichtigung der Gravitation
 - bevorzugter Bearbeitungsbereich „unten“: Partikel fallen unterhalb des Teils ab
 - Partikelentstehung und -reduzierung im Rütteltopf/Schwingförderer
- Eine Prozesskettenanalyse, wie in VDA 19 Teil 2 vorgeschlagen, strukturiert das Vorgehen und gibt einen Überblick der relevanten Partikelquellen:

Abb. 72: Prozesskettenanalyse nach VDA 19 Teil 2



Dem Thema „Montageeinrichtungen“ wurde in VDA 19 Teil 2 ein ganzes Kapitel gewidmet, in dem detailliert auf Kriterien und Maßnahmen unterschiedlicher Prozesse eingegangen wird. Ferner wird dort auch eine beispielhafte Beurteilung von Fügeprozessen gegeben.

4.5 Umgebungsauberkeit und Visualisierung

Fertigung im Sauberraum/ Reinraum. Ist dies notwendig?

Abb. 73, 74: Reinraumfertigung



Ablauf der Umgebungsanalysen:

1. Aufstellen und Beschriften der Partikelfallen

- Partikelfallen, die für Vergleiche herangezogen werden, sollten die gleiche Aufstellhöhe haben.
- Die Partikelfallen sollten individuell, einheitlich und systematisch beschriftet werden, sodass sie den Analyseberichten zugeordnet werden können.

- Ein Foto vom Standort der Partikelfallen dient der Reproduzierbarkeit bei Wiederholungen.
- Eine Kurzinformation für die Mitarbeiter mit Hinweisen wie zum Beispiel „Klebefläche nicht berühren“ muss neben jeder Falle vorhanden sein.
- Der Aktivierungszeitpunkt wird auf der Partikelfalle dokumentiert, nachdem der Deckel und die Schutzfolie entfernt wurden.
- Der Deckel der Partikelfalle muss nach der Aktivierung „sauber“ gelagert werden, um eine Querkontamination beim Verschließen zu vermeiden.

2. Expositionszeit

- Während die Partikelfallen aktiviert sind, sollten die Klebeflächen regelmäßig auf Partikelüberfrachtung (siehe VDA 19 Teil 2 Kap. 7.6) überprüft werden.
- Die übliche Expositionszeit liegt bei sieben Tagen, Reinigungen sind zu berücksichtigen.

3. Deaktivieren der Partikelfallen

- Beim Handling der Partikelfallen kann eine Fixierung des Deckels durch Klebestreifen sinnvoll sein.

4. Analyse

- Die Analyseberichte enthalten detaillierte Informationen, zum Beispiel den Verschmutzungsgrad der Partikelfalle.
- Ein Abklärungsbogen wird für die Durchführungsbeschreibung und Dokumentation dringend empfohlen (siehe Anhang).

5. Dokumentation

- Mithilfe einer Datenbank lassen sich die Illig-Werte (siehe VDA 19 Teil 2) automatisiert berechnen. Mit dem Illig-Wert lässt sich ein Analyseergebnis mit einem Wert ausdrücken.

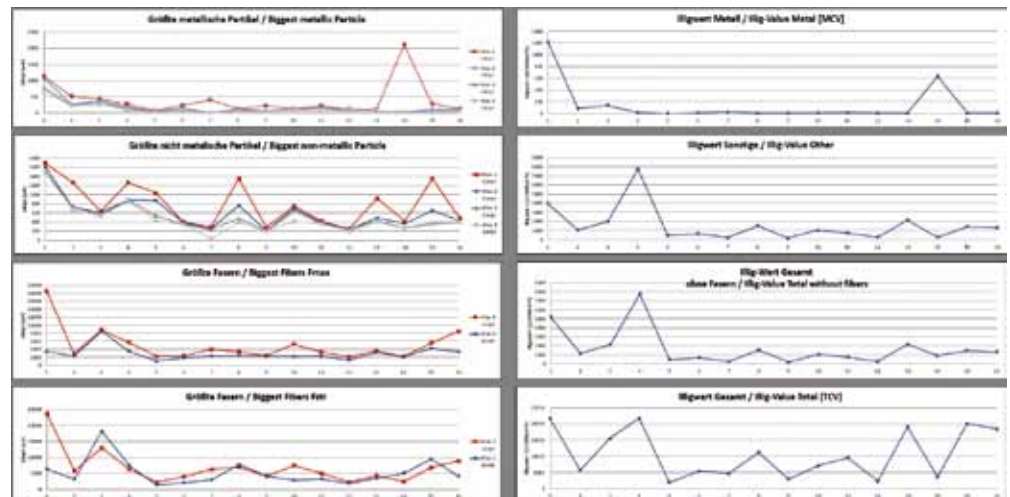
Abb. 75: Beispiel einer Partikelfalle



Abb. 76: Position der Partikelfalle



Abb. 77: Datenbank: Visualisierung



6. Aufbau einer Datenbank

Eine umfangreiche Datenerfassung ermöglicht die systematische Auswertung der Informationen. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, sich mit dem Umfang und der Skalierbarkeit der Datenbank auseinanderzusetzen. Eine möglichst detaillierte Erfassung der Daten ist anzustreben.

Beispiele:

- Partikelfallen-Nummer, Aufstellungsdatum und Aufstellungsort
- Die drei größten Partikel jeder Gruppe (metallische Partikel, nichtmetallische Partikel und Fasern), Länge und eventuell Breite
- Anzahl der Partikel in der jeweiligen Größenklasse und Partikelart
- Aufstellungszeitraum und Aufstellungshöhe
- Verlinkungen zu: Analyse, Bild des Standorts und Position im Fertigungslayout
- Wichtige Hinweise wie zum Beispiel „Insekt in der Falle“, „Fingerabdruck“ oder „deutlich abweichende Höhe“

Aus selektierten Werten lassen sich automatisch Diagramme bilden, die einer visualisierten Aussage zum Verschmutzungsgrad des jeweiligen Produktionsbereichs entsprechen.

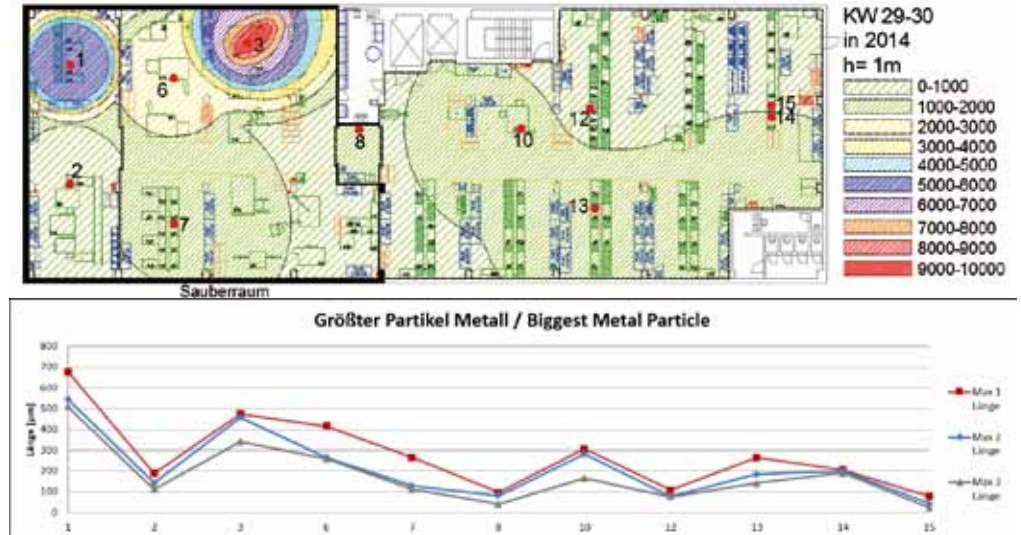
Wichtiger Hinweis:

Bei einem hohen Ilig-Wert gehen einzelne Ausreißer „unter“. Es ist zu empfehlen, sich zum Beispiel die drei größten Partikel in Länge und eventuell Breite im Vergleich zum Ilig-Wert anzuschauen.

7. Visualisierung des Illig-Werts im Produktionsbereich

Abb. 78: Darstellung des Illig-Werts mit max. drei Partikeln

Illig-Wert metallisch und nichtmetallisch



Wichtig hierfür ist:

- Im Lageplan muss angegeben werden, um welchen Illig-Wert es sich handelt, zum Beispiel „Illig-Wert metallisch“ oder „Illig-Wert metallisch + nichtmetallisch“ usw.
- Es muss eine Legende angefügt werden.

Bei Veränderungen in den Produktionsbereichen, zum Beispiel durch den Einsatz einer neuen Lüftungsanlage, kann der Nachweis erbracht werden, inwieweit sich der Verschmutzungsgrad in der Umgebung verändert hat.

Interpretation der Ergebnisse:

- Gibt es kritische Verunreinigungen durch Partikel aus der Umgebungsluft?
- In der Theorie dient das Flugfähigkeitsdiagramm als erster Anhaltspunkt.

Das Flugfähigkeitsdiagramm verdeutlicht, dass metallische Partikel (ungünstigster Fall: faserförmiger Alu-Partikel) nur bis zu einer Größe von 50 µm in der Umgebung schweben können. Das bedeutet, dass ein Sauber- oder Reinraum keine entscheidende Verbesserung bei der Reduktion von größeren (>>50 µm) metallischen Partikeln ermöglicht.

Bei der Implementierung von sauberkeitsrelevanten Bereichen müssen Verhaltensrichtlinien erstellt werden. Hier bietet der VDA 19 Teil 2 ein breites Spektrum an Vorschlägen, die für die individuelle Gestaltung herangezogen werden können.

Abb. 79: Flugfähigkeitsdiagramm

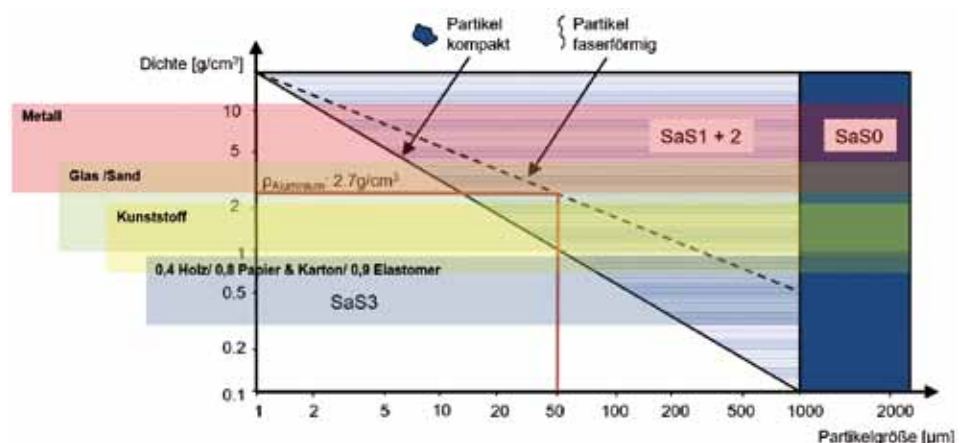
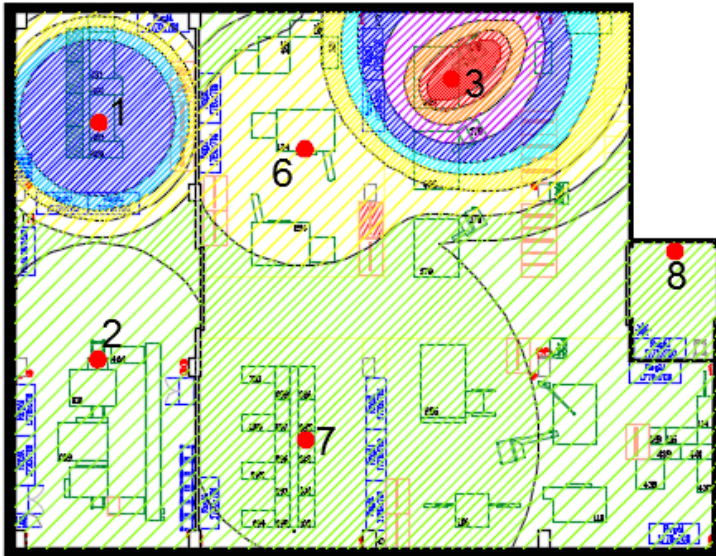
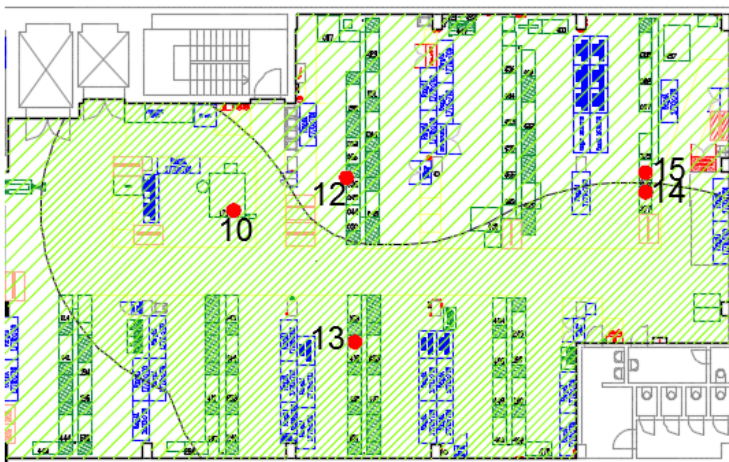


Abb. 80: Analyseergebnisse im Sauberraum: (in Rot dargestellt)



In den Analyseergebnissen ist zu erkennen, dass vereinzelt Partikelfallen im Sauberraum deutlich verschmutzter (in Rot dargestellt) sind als andere. Diese sind auch deutlich schlechter als die Ergebnisse aus dem nach VDA 19 nicht regulierten Bereich.

Abb. 81: Analyseergebnisse im nach VDA 19 nicht regulierten Bereich:



Dies liegt an der Auswahl der Positionen der Partikelfallen. Die Partikelfallen 2, 6, 7, 10, 12, 13, 14 und 15 wurden entfernt von den Herstellungsprozessen aufgestellt, um Partikel aus der Raumluftumgebung¹ zu sammeln.

Die Partikelfallen 1 und 3 wurden prozessnah aufgestellt und haben neben der Raumluftumgebung auch die Prozessumgebung² aufgezeichnet.

Anhand der durchgeführten Analysen ergeben sich zusammenfassend folgende Erkenntnisse:

Die Umgebungsauberkeit hat im Allgemeinen einen eingeschränkten Einfluss auf die Bauteilsauberkeit. In der Regel sind es die Herstellungsprozesse (intern/extern), die einen signifikanten Einfluss auf die Bauteilsauberkeit haben.

Eine angemessene Variante bildet hierbei das Monitoring mittels Partikelfallen. Das Verfahren bietet die Möglichkeit, den Schwerpunkt

auf die Erfassung der Raumluftumgebung oder der Prozessumgebung zu legen. Dies sollte im Vorfeld der Untersuchung festgelegt werden.

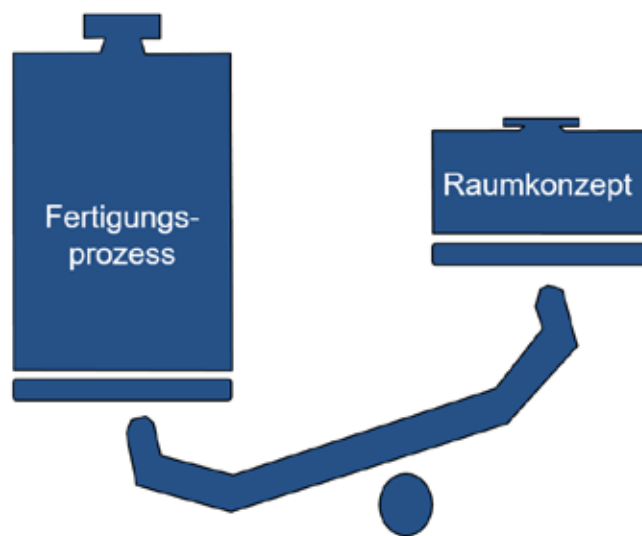
Bei der Auswahl der Partikelfallenpositionen in der Prozessumgebung ist die Ballistik der Partikel zu beachten.

Im Gegensatz zur 5S-Methode ist hier das Wissen um die Produktverschmutzung von Interesse.

¹ Raumluftumgebung: Luftqualität ohne Einfluss von Fertigungsprozessen

² Prozessumgebung: Luftqualität mit Einfluss von Fertigungsprozessen

Abb. 82: Gewichtung der Einflussfaktoren auf die Technische Sauberkeit



Fazit:

Fertigungsprozesse (intern/extern) müssen sauberkeitgerecht abgestimmt werden!

Diese Aussage wird auch durch akkreditierte Labore unterstützt.

4.6 Tipps zur Reinigung

Grundsätzlich ist ein sauberer Arbeitsplatz eine Grundvoraussetzung zur Einhaltung der Technischen Sauberkeitsforderungen. Wenn an einem Arbeitsplatz Partikel entstehen, ist die Separation sofort am Ort ideal. Beispielsweise sind Arbeitsflächen in Gitterform (Fliegengitter) eine gute und kostenneutrale Separationsmöglichkeit. Wenn große Mengen entstehen, sollte gleich abgesaugt werden. Die Verschleppung von Partikeln mit den Händen und mit Arbeitskleidung ist gerade bei wechselnden Tätigkeiten ein Problem. Hier sind Maßnahmen wie Schleusen, Hände waschen, Kittel wechseln usw. anzuwenden.

4.6.1 Waschen

Waschanlagen sind Reinigungssysteme für Bauteile. Diese sind allerdings nicht als flächendeckendes Standardverfahren in der Industrie eingeführt. Aus Gründen der Kosten, der technischen Kompatibilität (z. B. Korrosion, Verformung) sowie der teils geringen Effizienz sind Waschprozesse eher in besonders kritischen Anwendungen (Luft- und Raumfahrt) oder bei besonderen Verschmutzungen üblich. Besonders für die Abreinigung von Ölen, Fetten oder auch Flussmitteln (ionische Kontamination) sind sie weit verbreitet, für partikuläre Kontamination eher nicht.

Die meisten Anwendungen gibt es im Bereich Elektronik und Metall.

Für die Entfernung von Partikeln aus der Reinigungsflüssigkeit ist eine effiziente Filterung notwendig. Die Gefahr beim Nassreinigen besteht z. B. in der Anschwemmung von Schmutzpartikeln in ‚ruhige Bereiche‘ bzw. ‚Hohlräume‘ oder der Verteilung von Ölfilmen oder leitfähigen Salzen über die gesamte Oberfläche.

Grundsätzlich unterscheidet man Verfahren, die mit lösemittel- oder wasserbasierten Reinigungsmedien arbeiten. Bei letzteren ist ggf. eine gewisse Anzahl von Zusätzen notwendig, wie z. B. Korrosionsinhibitoren. Anspruchsvoll ist die Auswahl des Mediums, die Kontrolle der Reinigungswirkung und die Wartung der Bäder.

4.6.2 Bürsten

Die Anwendung von Bürsten entfernt fester anhaftende Partikel von der Oberfläche. Allerdings sammelt die Bürste die Partikel und muss wiederum selbst regelmäßig gereinigt oder ausgetauscht werden. Da bei Relativbewegungen von Isolatoren Reibungselektrizität entsteht, sollte eine ESD-Bürste benutzt werden, damit Ladungen über die Hand und die Person zur Erde abfließen können. Beim Gebrauch von ESD-Bürsten mit leitfähigen Kohlefasern ist zu beachten, dass die Kohlefasern abbrechen können und damit ihrerseits wieder als potenzielle Quelle für leitfähige Partikel wirken können. Teilweise kann man argumentieren, Partikel, die nach dem Bürsten nicht abgefallen sind, haften gut und dauerhaft und sind damit unkritisch. Bürsten mit Hand stellt immer ein Risiko bezüglich Ausführung und Sorgfalt des Bedieners dar. Einer Automatisierung stehen die meist komplexe Geometrie von Bauteilen und die geringe Flexibilität einer Anlage entgegen.

Abb. 83: Manuelle Reinigung mit einer Bürste unter der Leuchtlupe

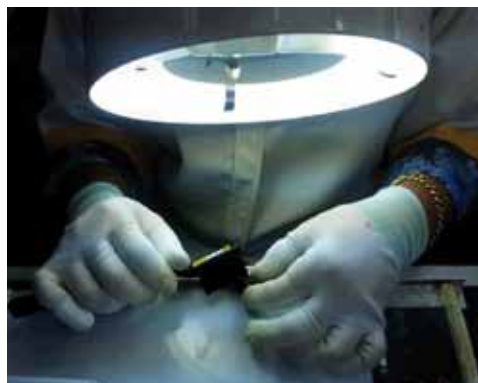


Abb. 84: ESD-Bürste



4.6.3 Saugen

Grundsätzlich ist das Absaugen eine gute Reinigungsmöglichkeit, da man die Partikel gezielt aus dem Prozess entfernt. Nachteil ist die geringe Wirkungstiefe bzw. der begrenzte Unterdruck oder Sog, den man erzeugen kann. Leider sind Saugprozesse häufig mit erheblicher Lärmbelastung verbunden.

4.6.4 Abblasen

Eine weitere Möglichkeit bietet Abblasen. Darunter versteht man die Reinigung einer Oberfläche mit einem Luftstrom. Dies ist ein schneller Prozess mit großer Wirktiefe.

Druckluft ist in Fertigungen weit verbreitet. Die Ölfreiheit ist zu beachten. Beim Abblasen wird typischerweise ionisierte Luft verwendet.

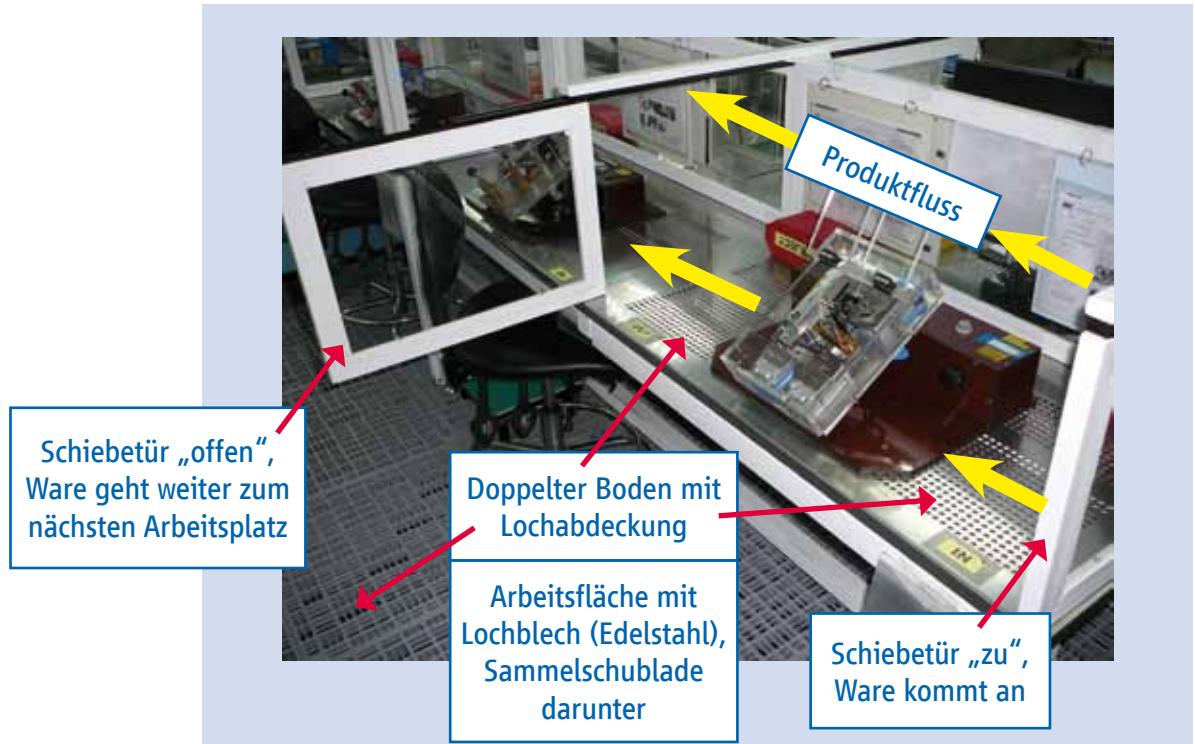
Allerdings kann es bei ungünstiger Ausführung zu einem Verteilen der Partikel, z. B. auf Nachbarbauteilen oder in der Umwelt, und der Gefährdung des Bedieners führen (Augen, Einatmen von Stäuben).

Je kleiner die metallischen Partikel sind, desto eher haften sie durch elektrostatische Kräfte an anderen Oberflächen. Hier kann ein einfaches Abblasen nicht ausreichen, eine mechanische Bewegung z. B. durch Bürsten ist dann erfolgversprechender.

In der Praxis hat sich die gleichzeitige Anwendung von Abblasen und Absaugen etabliert.

4.6.5 Reduktion von Verschleppung, saubere Arbeitsplatzgestaltung

Abb. 85: Tischarbeitsplätze in „sauberkeitsgerechter Ausführung“



Durch das Lochsystem auf der Arbeitsfläche und am Boden werden Partikel ohne Mehraufwand aus der Arbeitsumgebung entfernt. Die Schiebetüren zwischen den Tischarbeitsplätzen stellen „partikeldichte“ Barrieren beim Arbeiten dar, die nur zur Weitergabe der Produkte geöffnet werden. Damit kann die Verschleppung von Partikeln reduziert und die Menge an Partikeln auf den Produkten deutlich gesenkt werden.

Solche sauberkeitsgerechten Tischarbeitsplätze können in bestehende Räumlichkeiten der Fertigung integriert werden und stellen so eine kostengünstige modulare Möglichkeit dar, um die Partikelfracht auf Erzeugnissen in der Fertigungslinie zu verbessern. Adressiert werden hier Partikel, die aus dem Prozess heraus entstehen und wegen ihrer Größe und Gewicht der Schwerkraft folgen und nach unten fallen.

4.6.6 Adhäsionsverfahren

Zur Reinigung von flächigen Bauteilen wie z. B. Leiterplatten ist der Einsatz von Adhäsionsverfahren wie Rollen und Stempeln möglich.

Abb. 86: Adhäsionsrolle für die Durchlaufreinigung von Leiterplatten



4.7 Anforderungen an Verpackung und Logistik

- Verpackung, die in Kontakt mit dem Bauelement kommt, muss das Sauberkeitslevel des Bauelements erhalten und sicherstellen, dass keine funktionsrelevante Kontamination von außen an das Bauelement kommt.
- Die Verpackung muss sicherstellen, dass keine zusätzlichen funktionsrelevanten Partikel und andere Verunreinigungen generiert werden.
- Das Entpacken, Lagern und Weiterverarbeiten der Bauelemente muss so erfolgen, dass keine Rückverschmutzung erfolgt.
- Das Sauberkeitsniveau in der Prozesskette muss hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit so angepasst sein, dass das Sauberkeitsniveau möglichst erhalten bleibt.

5 Warum lösen metallische Partikel in Baugruppen so selten Kurzschlüsse aus?

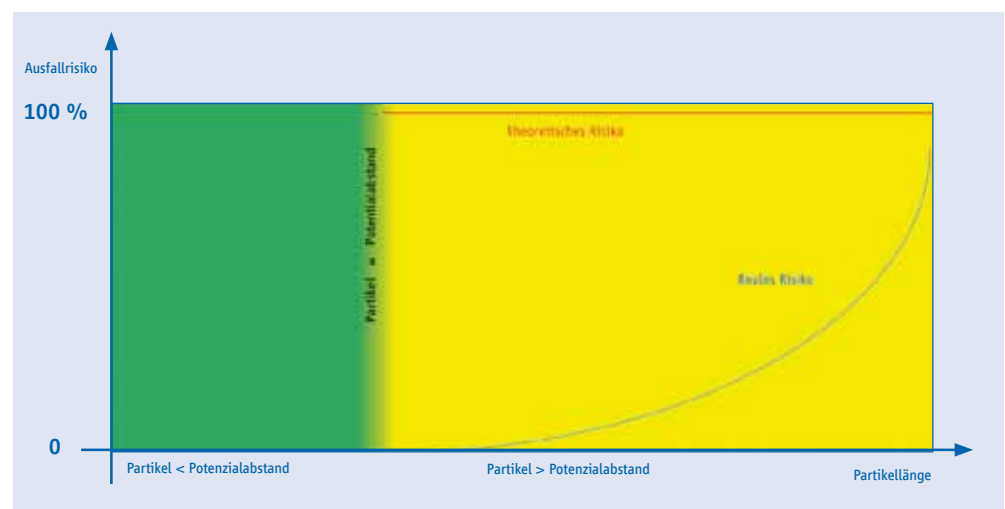
Wenn man das Fehlergeschehen bei Baugruppen in Gehäusen zum Beispiel im Kfz betrachtet und dabei die kritischste Gruppe – die metallischen Partikel – in Bezug auf einen elektrischen Kurzschluss untersucht, dann passt das Ergebnis nicht zu den bei Extraktionsanalysen gefundenen Mengen an metallischen Partikeln.

Diese Diskrepanz kann man grafisch auch als Lücke (Gap) zwischen dem theoretischen und dem realen Feldrisiko darstellen. Es wird gemeinhin davon ausgegangen, dass das Risiko für den elektrischen Kurzschluss, verursacht durch metallische Partikel, dann sprunghaft ansteigt, wenn die Partikellänge gleich groß oder größer als der kleinste elektrische Abstand zwischen zwei stromführenden Bereichen ist. Mithilfe von Untersuchungen im ZVEI-Arbeitskreis wurde festgestellt, dass die Funktion in der Realität deutlich flacher verläuft, als es auf Basis einer rein theoretischen Betrachtung unter Zugrundelegen der Geometrie zu erwarten ist. Die Menge der Partikel sowie deren Mobilität während des Betriebs einer Baugruppe im Feld bestimmen wesentlich die Gestalt der Funktion.

Um diese Diskrepanz zu erklären, bieten sich diese Theorien bzw. Vermutungen an, die in den folgenden Kapiteln eingehender betrachtet werden:

- Nicht jeder geometrische Kurzschluss ist ein elektrischer Kurzschluss (Kurzschlusswahrscheinlichkeit)
- Die Partikelextraktion mit einer Flüssigkeit zeigt mehr „mobile“ Partikel, als in Realität unter Einsatzbedingungen mobil sind
- Partikel sind mobil, erreichen aber während der Einsatzzeit dauerhaft Bereiche, wo sie nicht mehr aktiv werden können („Senken“)
- Nicht jedes Paar benachbarter Kontakte, das durch ein metallischer Partikel elektrisch kurzgeschlossen wird, löst ein Problem bzw. eine Funktionsstörung aus („Kurzschlüsse ohne Folgen“)
- Die Kurzschlusswahrscheinlichkeit sinkt mit dem Alter der Kontaktpartner (Partikel und Elektronik) durch zunehmende Oxidation und das Bilden von Fremdschichten

Abb. 87: Schematische Darstellung der Ausfallrisiken auf Basis metallischer Partikel auf Baugruppen



5.1 Kontaktwahrscheinlichkeit

5.1.1 Einleitung, Theorie

Durch die Berührung zweier stromführender Bauteile entsteht ein elektrischer Kontakt (Lit. 1). Bei einem Kurzschluss durch einen leitfähigen Partikel zwischen zwei Potentialen in einer Elektronik sind also zwei Kontakte herzustellen. Die Annahme, dass ein leitfähiger Partikel, der geometrisch zwei Leiterbahnen, Kontaktierungsstellen oder Ähnliches miteinander verbindet, auch zwangsläufig immer eine elektrische Überbrückung darstellt, schließt nicht alle physikalischen Gegebenheiten in die Betrachtung ein. Eine theoretische Herleitung der Kontaktierungswahrscheinlichkeit wäre nur bedingt möglich, da nicht alle Einflussfaktoren und deren Parameter in ihrer Gesamtheit erfasst und untersucht werden können.

Einflussfaktoren:

- Kontaktnormalkraft
- Oberflächentopografie
- Oberflächen-Oxidationsgrad
- Zeitdauer der Kontaktierung
- Elektrische Leitfähigkeiten
- Spannungsdifferenz
- Filmische Fremdschichten und andere

Wenn sich zwei Kontaktflächen berühren, liegen aufgrund der Rauigkeit der Flächen nur sehr kleine Bereiche aufeinander. Diese Bereiche werden auch als wirksame Kontaktfläche bezeichnet. Der Übergangswiderstand bzw. das Zustandekommen des elektrischen Kontakts wird von der Situation an diesen lokalen Kontaktstellen bestimmt.

In alltäglichen Situationen sind des Weiteren Fremdschichten auf der Metalloberfläche zu finden (Lit. 2).

1. Diese Fremdschichten können im einfachsten Fall aus Gasmolekülen bestehen, die beispielsweise durch Van-der-Waals-Kräfte, die auf elektrischen Phänomenen basieren, an die Oberfläche angelagert werden (Physisorption).
2. Nach einer bestimmten Zeit beginnt dann zum Beispiel durch eine Katalysatorwirkung des Grundmetalls eine Dissoziation der Gasmoleküle, die reaktive Gasatome erzeugt, die nun eine engere Bindung mit dem Metall eingehen (Chemisorption).
3. Abhängig vom Metall und dem Gas können Metallionen aus dem Metallgitter austreten und eine chemische Reaktion zwischen Grundmetall und chemisorbierten Gasatomen eingehen. Als Reaktionsprodukt entstehen zum Beispiel Metalloxide oder im Fall von Silber und Schwefel sulfidische Deckschichten.
4. In diese Fremdschicht wandern mit der Zeit zusätzliche Metallionen sowie Gasatome, sodass diese Fremdschicht mit der Zeit weiterwächst.

Nicht alle Metalle durchlaufen die beschriebenen vier Stufen vollständig (Lit. 3).

Das System Gold-Sauerstoff beschränkt sich auf die Absättigung der Metalloberfläche mit Gasionen, während bei Platin-Sauerstoff eine Oxidbildung beginnt, die passivierend wirkt und das weitere Anwachsen der Fremdschicht begrenzt.

Eine Gashaut nach 1 und 2 bildet bei ausreichender Spannung keinen Widerstand für den Stromfluss, da sie aufgrund des Tunneleffekts von den Elektronen verlustlos durchtunnelt wird. Bei den Fremdschichten nach 3 und 4 wird der Stromfluss merklich behindert, dies kann unter Umständen bis zur vollständigen Isolation führen.

Lit. 1 VDE 0660/12.52, Niederspannungsschaltgeräte

Lit. 2 Vinaricky, Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen, Springer Verlag, 2002, S. 32, 413

Lit. 3 Keil, Werkstoffe für elektrische Kontakte, Springer Verlag, 1960, S. 23

Abb. 88: Prinzipskizze der elektrischen Anordnung (Partikel liegt als „Brücke“ auf zwei Leiterbahnen)

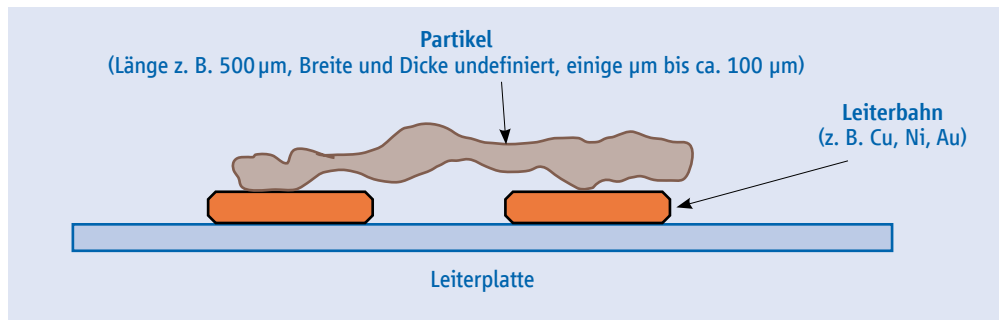
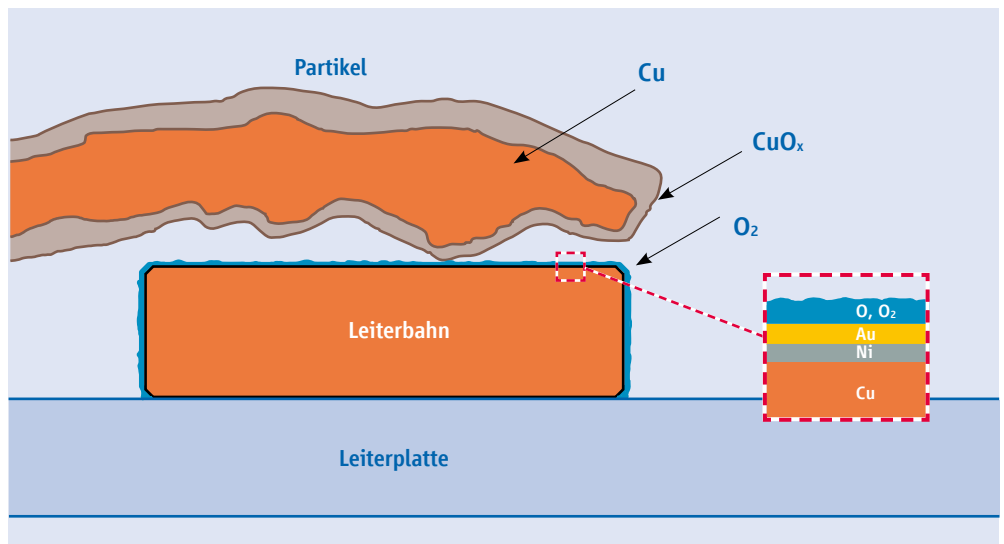


Abb. 89: Schematische Darstellung der Kontaktstelle eines Partikels auf einer Leiterbahn am Beispiel: Leiterbahn Nickel-Gold und eines Partikels aus Kupfer (Zoom von Abb. 88, Prinzipskizze, nicht maßstäblich)



Die Fremdschichten haben eine unterschiedliche Dicke und Härte und variieren entsprechend beim elektrischen Durchbruch. Bei Gold mit einer adsorbierten Gasschicht von nur ca. 1–10 nm stellt die Fremdschicht, die leicht durchtunnelt werden kann, kein Hindernis dar. Der in der Elektrotechnik wichtige Werkstoff Zinn hat eine passivierende Oxidschicht von ca. 50–100 nm, die eine große Härte besitzt und nur durch Reibung oder plastische Deformation durchstoßen werden kann (Lit.2, S. 413). Bei Kupfer sind die sich bildenden Kupferoxide Halbleiter, die in idealer stöchiometrischer Zusammensetzung mit $10 \text{ G}\Omega \text{ cm}$ hochohmig sind, allerdings bei Abweichungen von der idealen Zusammen-

setzung durchaus Widerstandswerte hinab in den Bereich von Kilo- Ω erreichen können (Lit. 2, S. 36).

Eine frische Metalloberfläche bildet, abhängig vom Metall, selbst unterschiedlich schnell adsorbierte Lagen an Sauerstoff. Während bei Kupfer bereits nach 20 Sekunden einige Lagen und nach zehn Minuten bis einigen Wochen bis zu zehn Lagen nachgewiesen wurden, konnte bei Gold nach zehn Minuten eine Lage, nach zwei Tagen ebenfalls nur eine Lage gemessen werden. In diesem Zusammenhang fällt das extreme Verhalten von Aluminium auf, das nach 20 Sekunden bereits sieben Lagen besitzt (Lit. 4).

Lit. 2 Vinaricky, Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen, Springer Verlag, 2002, S. 36, 413
Lit. 4 Holm 1967, S. 106

Ob die aus der Kontaktforschung für Schaltkontakte – wie zum Beispiel Relais – bekannten Zusammenhänge zwischen Kontaktkraft und Kontaktwiderstand auf das hier beschriebene Problem (ein metallischer Partikel liegt zwischen zwei Kontaktflächen, wobei beide Seiten fremdschichtbehaftet sein können) anzuwenden sind, ist fraglich. Die Untersuchungen in der Literatur (Lit. 4, S. 49) gehen bis zu Minimal Kräften von $0,5 \times 10^{-5}$ N, ein zylinderförmiger Kupfer-Partikel der Abmessung $d = 50 \mu\text{m}$, $L = 600 \mu\text{m}$ hat eine Kontaktkraft von nur $5,2 \times 10^{-8}$ N auf einer Seite der Brücke. Derartige kleine Auflagekräfte erzeugen nur elastische Deformationen auf der Metallfläche.

Neben diesen unter Laborbedingungen an Kontaktflächen vorzufindenden Erscheinungen sind natürlich noch die im Alltag wirkenden zusätzlichen „Schutz- oder besser Schmutzeffekte“ zu berücksichtigen, wie zum Beispiel Beläge der Kontakte mit Staub bzw. nicht leitenden Partikeln, mit organischen Stoffen usw.

Alle diese Beläge isolieren mehr oder weniger gut, werden bei Druck komplett oder im anderen Extrem auch gar nicht durchstoßen, das heißt, sie führen zu einer zusätzlichen Streuung im realen Verhalten.

5.1.2 Versuche zur Kontaktwahrscheinlichkeit

Um die Kontaktwahrscheinlichkeit von metallischen Partikeln unter realen Umweltbedingungen zu bewerten, wurden zuvor Versuche zur genaueren Bewertung des Kurzschlussrisikos durchgeführt. Dafür wurde eine der wahrscheinlichsten Kurzschlussituationen in einer elektrischen Schaltung nachgestellt. Ein Partikel bewegt sich auf einer verbauten Elektronikbaugruppe und kommt auf zwei metallischen Kontakten zum Liegen.

Versuchsaufbau:

Aus dem Bereich der Elektrotechnik wurden repräsentative Metallkomponenten zusammengestellt. Die Auswahl erfolgte einerseits nach der Verwendung in üblichen Elektronikschaltungen, aber auch danach, welche Materialien als Partikel bei Extraktionsanalysen gefunden wurden.

Tab. 28: Liste der im Versuch verwendeten Materialien

	1	Cu	Kupfer	z. B. Leitungen, Stromschienen
	2	CuNiSi	Kupferlegierung	z. B. Kontaktmaterial, Einpresspins
	3	Au	Gold	z. B. Bonddraht, Steckerbeschichtung
	4	Sn	Reinzinn	z. B. Beschichtungen
	5	SnAg3Cu0.5 (SAC305)	Lotmaterial	z. B. Lotpaste, Lotbarren
	6	ZnAl4Cu1	Zinkdruckguss	z. B. Gehäuse
	7	AlSi12	Alu-Druckguss	z. B. Gehäuse, Deckel, Träger
	8	CuFe2P	Kupfereisen	z. B. Busbar, Leadframes
	9	FeSi3	Elektroblech	z. B. Stator, Rotor, Transformator
	10	X10CrNi18-8	Federstahl	z. B. Feder
	11	MnZn-Oxid	Ferrit	z. B. Magnetkern, Drossel, Transformator

Lit. 4 Holm 1967, S. 49

Um realistisch geformte Partikel zu erhalten, wurden sie mit Feilen auf eine Größe von 500–600 μm zerspannt. Der Bonddraht wurde geschnitten.

Für die Partikel wurden folgende Zustände zur Ermittlung der Kurzschlusswahrscheinlichkeit berücksichtigt:

- Neuzustand (Partikel unmittelbar vor der Messung hergestellt)
- Alterung im trockenen Klima (155 $^{\circ}\text{C}$; 4 h; gem. IEC 60068-2-58)
- Alterung im feuchtwarmen Klima (85 $^{\circ}\text{C}$; 85 % RLF; 4 h; gem. IEC 60068-2-58)

Als Gegenpart wurden Testleiterplatten mit einer Kammstruktur hergestellt. Die Leiterstrukturen bestanden im ersten Fall aus frischen Leiterbahnen (chemisch NiAu) und im zweiten Fall aus daraus gelöteten Leiterbahnoberflächen nach einem Reflowprozess mit SAC 305. Die Leiterplatten hatten keinen Lötstopplack in den Zwischenräumen, um eine ungehinderte Auflage der Partikel zu gewährleisten.

Abb. 90: SIR Testleiterplatten (Layout als verzahnte Kammstrukturen)



Die Messungen wurden mit unterschiedlichem Messaufbau durchgeführt.

Abb. 91: Spannungsquelle mit einer Stromerfassung durch analoges Pico-Amperemeter

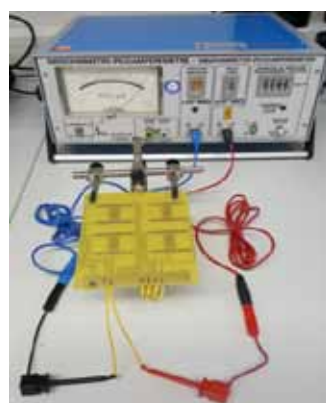


Abb. 92: Automatisierte softwaregestützte Strommessung



Versuchsdurchführung:

Ein Partikel wurde manuell auf zwei benachbarte Leiterbahnen aufgelegt, sodass man nach einer optischen Kontrolle davon ausgehen konnte, dass er auf beiden Metalloberflächen aufliegt. Danach wurde die Gleichspannung zwischen den Leiterbahnen vom Startpunkt bei 1 V, aufsteigend in 1-V-Schritten, bis maximal 60 V erhöht und bei jedem Spannungswert für ca. fünf Sekunden angelegt. Konnte ein signifikanter Stromfluss verzeichnet werden, wurde die momentan angelegte Spannung als Messergebnis, das heißt als Durchbruchspannung bzw. Frittspannung notiert. Der Strom der Spannungsquelle war auf maximal 2 mA begrenzt. Nach einer Neupositionierung des Partikels wurden die Messungen wiederholt. Um eine statistisch relevante Basis zu erhalten, wurde dies so lange wiederholt, bis 25 Durchbrüche erreicht waren. Zusammen mit der Anzahl der Messungen, die bei einer angelegten Spannung von 60 V keinen Durchbruch gezeigt hatten, erhält man den 100-Prozent-Bezug. Da in einigen Fällen der Aufwand, 25 Durchbrüche zu erreichen, zu hoch war, wurde die maximale Anzahl der Messungen auf 50 begrenzt. Somit wurden pro Partikel und Zustand mindestens 25 und maximal 50 Messungen durchgeführt.

Nach dem Durchschlag konnte man häufig ein leichtes Anhaften des Partikels an der Leiterplatte beobachten. Die bei den Versuchen gefundene Mikro-Verschweißung der metallischen Partikel mit den Leiterbahnen der Leiterplatte deuten auf ein „Fritten“ hin. Dieses Verhalten beschreibt den elektrisch-thermischen Durchschlagsprozess, bei dem eine Fremdschicht mit steigender Spannung ruckartig den Widerstand von Megaohm in den Ohm-Bereich verringert. Hier sind im Wesentlichen halbleitende Schichten und das Feldverhalten in diesen verantwortlich. Nach dem Durchbruch entstehen metallische Brücken zwischen den Kontaktpartnern (Lit. 2, S. 38ff).

5.1.3 Ergebnisse

Beispielhaft sind hier Messergebnisse von Kupferpartikeln auf gelöteten Leiterplatten in Form eines Balkendiagramms dargestellt.

Die Kontaktwahrscheinlichkeit, bezogen auf die unterschiedlichen Spannungsbereiche, erfolgte kumulativ, entsprechend folgender Berechnung:

$$\text{Kontaktwahrscheinlichkeit} = \frac{\text{Anzahl der Durchbrüche} \times 100 \%}{\text{Anzahl aller Messungen}}$$

Vergleicht man alle Ergebnisse miteinander, erkennt man, welchen Einfluss die angelegte Spannung, der Partikelzustand und das Material des Partikels auf die Kontaktierungseigenschaften haben.

Die Messergebnisse streuen teilweise erheblich, sie beruhen jedoch auf realitätsnahen Simulationen und zeigen somit die Komplexität der Verhältnisse. Andererseits ist vermutlich auch ein Teil der Streuungen der schwierigen Versuchsdurchführung aufgrund der kleinen Dimensionen der Partikel geschuldet. Zusammenfassend können folgende Ergebnisse festgestellt werden:

Abb. 93: Vergleich der Cu-Partikel in drei Zuständen auf SAC305-Leiterplatten

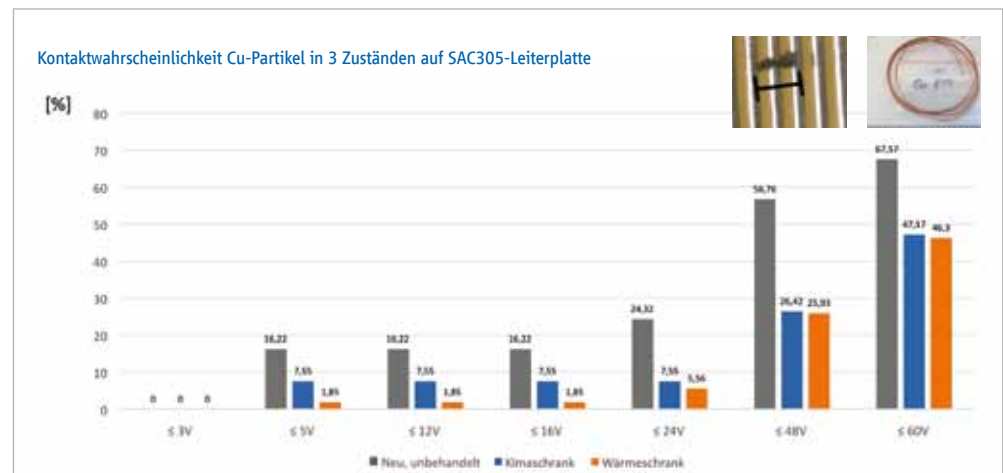
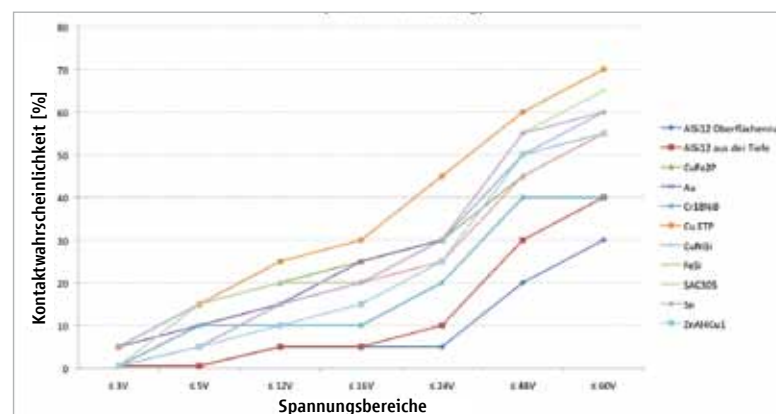


Abb. 94: Übersicht über alle Metalle in den Spannungsstufen, gerundet



Lit. 2 Vinarichy, S. 38 ff.

- Aus allen untersuchten Kombinationen resultiert eine elektrische Kontaktwahrscheinlichkeit von deutlich unter 100 Prozent.
 - Die Kurzschlusswahrscheinlichkeit ist bei verschiedenen Materialien unterschiedlich, die Grundtendenz, dass mit steigender Spannung die Wahrscheinlichkeit zunimmt, ist durchgängig zu finden.
 - Die Kurzschlusswahrscheinlichkeit ist bei kleinen Spannungen sehr gering, häufig gibt es oberhalb von 12 V eine deutliche Erhöhung. Diese deutlichen Unterschiede sollten bei den bisher üblichen 12-V-Anwendungen und den modernen 48-V-Anwendungen berücksichtigt werden.
 - Die Lagerung unter verschärften Klimabedingungen wie trockener Wärme oder aber auch Feuchte führt zu einer verringerten Wahrscheinlichkeit, was auf eine Oberflächenreaktion der Metalle – zum Beispiel Bildung von Metalloxiden – hindeutet.
 - Die edleren Metalle wie zum Beispiel Gold zeigen tendenziell eine höhere Kurzschlusswahrscheinlichkeit als die unedleren Metalle wie zum Beispiel Aluminium.
- a. In einem stichprobenartigen Versuch wurden nacheinander zehn kräftig ausgeführte Stöße (ca. 2 Joule) auf eine vertikal aufgehängte Baugruppe aufgebracht. Nach jedem Stoß wurden die Partikel, die von der Leiterplatte abgelöst wurden, quantifiziert. Nach Durchführung aller zehn Stöße wurde die Leiterplatte einer Sauberkeitsanalyse mit Kaltreiniger unterzogen. Es zeigte sich, dass durch die zehn Stöße lediglich 30 bis 50 Prozent der Partikel abgelöst wurden. Die verbleibenden 50 bis 70 Prozent der Partikel konnten erst durch die Sauberkeitsanalyse mit Kaltreiniger abgelöst werden.
 - b. In einem weiteren Stichversuch wurde eine Leiterplatte auf einem Schwingtisch einem typischen Automotive-Vibrationsprofil ausgesetzt. Die bei diesem Schwingversuch abgelösten Partikel wurden quantifiziert. Danach wurde die Leiterplatte einer Sauberkeitsanalyse mit Kaltreiniger unterzogen. Es zeigte sich, dass durch das Vibrationsprofil lediglich ca. sechs Prozent der Partikel abgelöst wurden. Die verbleibenden 94 Prozent der Partikel konnten erst durch die Sauberkeitsanalyse mit Kaltreiniger abgelöst werden.

5.2 Waschextraktion vs reale Mobilität

Die bei einer Sauberkeitsanalyse mit Kaltreiniger ablaufenden Prozesse können deutlich mehr Partikel ablösen, als dies beim realen Betrieb im Feld zum Beispiel unter Vibrationsbelastung im Fahrzeug möglich ist.

Dieser Ansatz lässt sich auf zwei Arten nachweisen:

1. Gemäß VDA 19 ist neben der Sauberkeitsanalyse durch Flüssigkeitsextraktion auch die Luftextraktion zulässig. Ein Vergleich beider Extraktionsmethoden zeigt, dass tendenziell mit der Luftextraktion eine geringere Anzahl an Partikeln ermittelt wird.
2. Eine Vibrationsbelastung, die beim Betrieb im Feld auf ein Erzeugnis einwirkt, wurde in Laborversuchen vereinfacht nachgestellt:

5.3 Partikelsenken

Partikel, die sich auf einer elektrischen Baugruppe befinden, werden durch verschiedene Mechanismen dort festgehalten; dies ist jedoch nicht für alle Partikel dauerhaft der Fall. Die Haftkräfte, die beispielsweise durch Van-der-Waals-Kräfte, elektrostatische oder magnetische Kräfte entstehen, sind unter anderem vom Material sowie der Partikelgröße abhängig. Bei jeder Erschütterung oder jedem Stoß kann es zum Verlust von Partikeln kommen; hierbei spielt die Einbaulage eine große Rolle. Bei vertikalem Einbau wird ein merklicher Anteil der Partikel die Baugruppe verlassen und durch die Schwerkraft nach

unten fallen. Der Gehäuseboden wirkt in diesem Fall als Senke. Hier sammeln sich diese Partikel, wobei es eher unwahrscheinlich ist, dass sie durch weitere Erschütterungen erneut auf die Baugruppe gelangen. Bei horizontaler Einbaulage können Partikel für längere Zeit bzw. über viele Stöße auf der Baugruppe herumwandern und sind entsprechend wirksam. Die Erfahrung zeigt, dass sich viele der Partikel nach einer größeren Anzahl von Stößen in einer Ecke sammeln, dass sie eingeklemmt werden oder nach Erreichen des Randes die Baugruppen durch einen Fall nach unten dauerhaft verlassen.

Je kleiner die Partikel sind, desto höher sind die Haftkräfte im Verhältnis zur Schwerkraft, das heißt, die Mobilität zum Beispiel durch Stöße nimmt mit der Partikelgröße deutlich ab.

5.4 Auswirkung von Kurzschlüssen an ICs

Aufgrund von spezifischen Pinbelegungen ist eine allgemeingültige Betrachtung der Auswirkungen von Kurzschlüssen bei ICs nicht möglich. Dennoch werden nachfolgend einige grundlegende Betrachtungshilfen aufgeführt. Zwischen den einzelnen Bauteilpins bei ICs liegen in der Regel Spannungen von 3–5 V an. Damit liegt man deutlich unter der derzeit marktüblichen Iso-Bordnetzspannung von 12 V im Auto, womit die Kontaktwahrscheinlichkeit entsprechend sinkt (siehe Kapitel 5.1).

Ebenfalls ist zu bewerten, inwieweit von der verwendeten Software elektrische Kurzschlüsse zwischen bestimmten Potenzialen abgefangen werden können.

Letztlich verbleibt nur eine begrenzte Anzahl an benachbarten Pins, die zu einem funktionsrelevanten Fehler führen können. Die Identifikation dieser Pins sowie die Bewertung der funktionsrelevanten Fehler kann in einer sogenannten Pin-FMEA bewertet werden.

5.5 Tool zur Abschätzung des Kurzschlussrisikos (<https://bauteilsauberkeit.zvei.org/>)

5.5.1 Einleitung

Derzeit finden sich in Bauteilspezifikationen oft Partikelgrenzwerte, die vom kleinsten elektrischen Abstand zwischen zwei stromführenden Bereichen abgeleitet sind. Dies führt dazu, dass extrem scharfe Anforderungen zugrunde liegen, die einerseits technisch und wirtschaftlich nicht umzusetzen sind und andererseits für das Risiko der Baugruppe in Richtung elektrischem Kurzschluss nicht notwendig sind.

Beispiel: Bei der Betrachtung einer realen Baugruppe findet sich auf einer Leiterplatte durchaus eine dreistellige Anzahl an Bauelementen. Darunter ist häufig nur eine geringe Anzahl an Finepitch-Bauelementen (Pitch 0,4/0,5 mm). Viele andere Bauelemente haben Pitchabstände größer als 1 mm. Würde man die Grenzwerte für tolerierbare metallische Partikel anhand der Finepitch-Bauelemente ableiten, so käme man auf Grenzwerte für die maximal zulässige Partikellänge im Bereich von ca. 200 µm (unter Berücksichtigung von Löt pads).

Um die Sinnhaftigkeit der Festlegung solcher scharfer Grenzwerte zu hinterfragen, machen wir folgendes Gedankenexperiment. Gemäß des obigen Ansatzes würde gelten:

Metallische Partikel auf der Leiterplatte mit der Länge von 199 µm haben kein Risiko; aber mit einer Länge von 201 µm hat man ein potenzielles Risiko für den elektrischen Kurzschluss, allerdings kein 100-prozentiges (Ausfall aller Baugruppen bei Vorhandensein nur eines Partikels mit 201 µm Länge).

Um nun diese extreme Differenz zwischen null und 100 Prozent wissenschaftlich bewerten zu können, wird im Folgenden eine Möglichkeit zur applikationsspezifischen Risikobetrachtung, bezogen auf den elektrischen Kurzschluss, vorgestellt. Dieser Ansatz berücksichtigt zum einen die reale Situation hinsichtlich aller Abstände zwischen stromführenden

Bereichen, zum anderen die tatsächlich vorhandene Partikelfracht auf dem zu bewertenden Erzeugnis.

Mit diesem Ansatz kann eine Ausfallwahrscheinlichkeit abgeleitet werden, die an verschiedene applikationsspezifische Randbedingungen geknüpft ist.

Hierbei liegt die Annahme zugrunde, dass ein elektrischer Kurzschluss mit einem Funktionsausfall der Baugruppe gleichzusetzen ist. Dies wird sicherlich in der Realität nicht immer der Fall sein.

6. Partikel sind beweglich
7. Für die gesamte Baugruppe wird eine einheitliche Spannung angenommen

Zu 1: Natürlich hat ein Partikel neben Längenausdehnung auch eine Ausdehnung in Breite und Höhe. Da aber reale Partikel keine plane Oberfläche, sondern eine Topologie besitzen, ergeben sich in der Realität einzelne Auflagepunkte. Somit ist der Ansatz, eine Linie statt einzelner Punkte zugrunde zu legen, bereits eher ein Worst-Case-Ansatz.

Zu 2: Bei der Betrachtung von elektrischen Abständen zwischen zwei stromführenden

Abb. 95: Funktionsstruktur Risikoabschätzungstool



5.5.2 Modellannahmen

Zudem werden für die Modellbildung folgende Annahmen und Vereinfachungen getroffen:

1. Ein Partikel hat eine zu vernachlässigende Breite
2. Die betrachteten Leiter liegen auf unterschiedlichen Potenzialen
3. Die vorhandenen Partikel sind in der Baugruppe gleich verteilt
4. Die Partikel haben geometrisch „perfekte“ Kontaktflächen, das heißt:
 - a. eine plane Oberfläche über die gesamte Ausdehnung
 - b. keine Krümmung
5. Jeder geometrische Kontakt führt auch zu einem elektrischen Kontakt

Bereichen liegen diese in der Realität teilweise auf gleichem Potenzial. Der gewählte Ansatz geht davon aus, dass alle stromführenden Bereiche unterschiedliches Potenzial aufweisen, und ist damit ebenfalls ein Worst-Case-Ansatz.

Zu 3: Partikel können generell überall in der Baugruppe gleich verteilt sein. In der Praxis werden Partikel aber der Schwerkraft oder Haftkräften folgen und sich somit lokal sammeln. Abhängig davon, ob sich benachbarte kritische stromführende Bereiche in der Nähe der Partikelansammlungen befinden, ist der Ansatz „Gleichverteilung“ konservativ oder nicht konservativ.

Zu 4: Gekrümmte Partikel würden, wenn sich zwischen den stromführenden Bereichen zum Beispiel Lötstopplack befindet, unter Umständen nicht beide Kontaktflächen berühren können. Somit ist der Ansatz „keine Krümmung“ ebenfalls ein Worst-Case-Ansatz.

Zu 5: In der Praxis führt nicht jeder geometrische Kontakt zu einem elektrischen Kontakt. Dieser ist von mehreren Randbedingungen abhängig, siehe Kapitel 5.1. Somit geht der gewählte Ansatz ebenfalls vom Worst Case aus.

Zu 6: Um neben dem initialen Risiko, das beim End-of-line-Test erkannt wird, ein Risiko während des Betriebs im Feld hervorzurufen, muss die Beweglichkeit von Partikeln vorausgesetzt werden. Im Berechnungstool wird als Worst-Case-Ansatz angenommen, dass jeder betrachtete Partikel nicht anhaftend und damit mobil ist.

Zu 7: Dadurch, dass für die Betrachtung die für die gesamte Baugruppe anliegende Spannung (in der Regel Iso-Bordnetz von 12 V) und nicht die real anliegende Spannung bei Finepitch-Bauelementen zwischen den einzelnen Pins verwendet wird, ist der gewählte Ansatz ebenfalls ein Worst-Case-Ansatz.

5.5.3 Berechnungsmethode

Gemäß den Grundlagen in Kapitel 5.1.1 und den getroffenen Modellannahmen in Kapitel 5.1.2 kann mithilfe der nachfolgenden Formel das Risiko für den elektrischen Kurzschluss von Partikeln einer Größenklasse berechnet werden.

$$P_{\text{Ausfall}} = \frac{A_{\text{kritisch}}}{A_{\text{gesamt}}} * n * O_{\text{Partikel}} * GF_{\text{Kontakt}} * GF_{\text{OrLP}} * GF_{\text{PrSp}} * GF_{\text{Mobil}}$$

Das Berechnungstool summiert zum einen das Risiko, das Partikel in ihrer Abstandsklasse verursachen, sowie zum anderen das Risiko, das diese Partikel in allen kleineren Abstandsklassen verursachen. Dieses wird über alle Größenklassen von Partikeln aufsummiert.

- P_{Ausfall} Ausfallwahrscheinlichkeit $0 \leq P \leq 1$
- A_{kritisch} Kritische Fläche (siehe folgendes Kapitel) der betrachteten Größenklasse
- A_{gesamt} Gesamte für Partikel zugängliche Fläche
- n Partikelmenge der betrachteten Größenklasse (z. B. Ergebnisse aus Extraktionsanalyse eines Bauteils)
- O_{Partikel} Orientierungsfaktor der Partikel (siehe Kapitel 5.5.4)
- GF_{Kontakt} Kontaktwahrscheinlichkeit bei geometrischer Verbindung wird über das Partikelmaterial, durch Spannungen und Alterung bestimmt (siehe Kapitel 5.1)
- GF_{OrLP} Leiterplattenorientierung = Einbausituation der Leiterplatte (1 ... horizontal, 0,01 ... vertikal, 0 ... Überkopf, dazwischen mit dem Cosinus des Einbauwinkels)
- GF_{PrSp} Produktspezifischer Faktor durch Wärmeleitpasten, Kleber, Magnetfelder etc.
- GF_{Mobil} Faktor tatsächliche mobile Partikel vs. durch Flüssigkeitsextraktion ermittelte Partikel (siehe Kapitel 5.2)

Detaillierte Informationen zu den verschiedenen Faktoren finden sich in den folgenden Kapiteln.

5.5.4 Orientierungsfaktor

In der Praxis kommen häufig parallel verlaufende Kontaktflächen vor, zum Beispiel Bauelement-Pins, Leiterbahnen oder Ähnliches. Schaut man sich schematisch ein solches Kontaktpaar (siehe Grafik) mit dem Abstand D an, muss der Partikel auf der kritischen Fläche (hellblau in Abb. 96) sowohl in Länge, Winkel und Position „richtig“ liegen, um einen geometrischen Kontakt zu erzielen.

Diese Thematik kann mathematisch mit der Lösung zum Buffonschen Nadelproblem beschrieben werden.

Folgende drei Fälle sind zu unterscheiden:

1. Partikellänge $L < \text{Abstand } D$

Es besteht kein geometrischer Kontakt, folglich besteht auch kein elektrischer Kontakt.

2. Partikellänge $L = \text{Abstand } D$

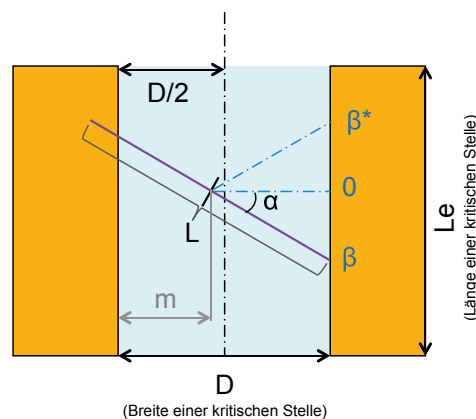
Ein geometrischer Kontakt ist möglich, wenn der Partikel orthogonal und zentriert zum Kontaktpaar orientiert ist ($\alpha = 0$, $m = D/2$). Somit ist auch ein elektrischer Kontakt möglich, wenn die Randbedingungen aus Kapitel 5.1 erfüllt sind.

3. Partikellänge $L >$ Abstand D

Ein geometrischer Kontakt ist möglich, auch wenn der Partikel gedreht ist ($\alpha \neq 0$). Die Anzahl an Möglichkeiten der Kontaktierung steigt als Funktion der Partikellänge.

Mit zunehmender Partikellänge L steigt ebenfalls die Wahrscheinlichkeit für einen geometrischen Kontakt, da der Partikel auch lateral um m verschoben werden kann und dennoch weiterhin einen geometrischen Kontakt hat.

Abb. 96: Geometrische Bedingungen an einem Kontaktpaar



5.5.5 Kritische Fläche

Auf der Leiterplatte gibt es verschiedene metallische, nicht mit Lötstopplack abgedeckte Kontaktflächen wie zum Beispiel Bauelemente-Pins, Lands, Vias. Die Zwischenbereiche (grün markiert in Abb. 97–99) entsprechen den kritischen Flächen. Art und Größe sind abhängig von der zu untersuchenden Abstandsklasse. Man versucht nun, diese Flächen sinnvoll zu klassifizieren, im einfachsten Fall gemäß der Größenklassen (hier als Begriff Abstandsklasse) nach VDA 19 / ISO 16232. Diese Herangehensweise ist nachfolgend exemplarisch anhand der Abbildungen dargestellt.

Abb. 97: Abstandsflächen bis 400 μm (in Grün)

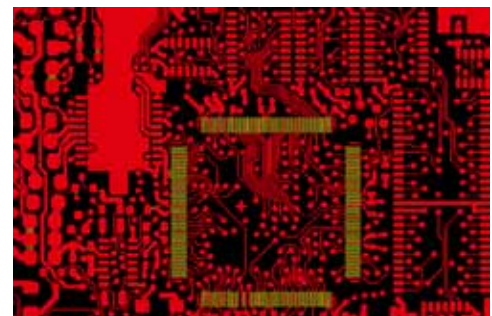


Abb. 98: Abstandsflächen bis 600 μm (in Grün)

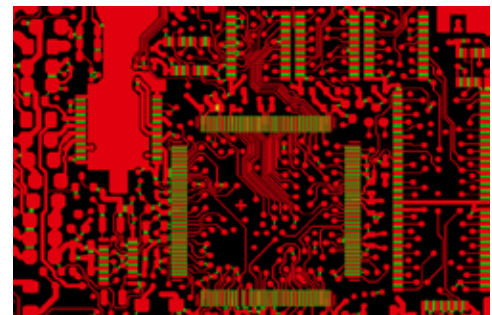
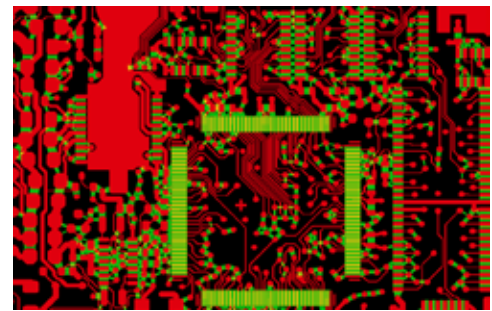


Abb. 99: Abstandsflächen bis 1000 μm (in Grün)



Man sieht, dass die kleinen Abstandsklassen (z. B. Finepitch-Bauelemente) eher untergeordnet vertreten sind und dass mit größer werdender Abstandsklasse auch die Flächenhäufigkeit ansteigt.

5.5.6 Anzahl Partikel pro Größenklasse

Für die Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit wird als weitere Eingangsgröße die Partikelfracht auf dem zu untersuchenden Erzeugnis herangezogen. Da als Fehlerbild der elektrische Kurzschluss untersucht wird, werden hierbei lediglich metallische Partikel betrachtet. Diese sollten nach den Größenklassen gemäß VDA 19 Teil 1 klassifiziert vorliegen, um dann für die Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit in das Berechnungstool 1:1 übertragen werden zu können. Als Hinweis ist zu erwähnen, dass die Einzelwerte von Partikeln in einer Größenklasse natürlich jeden Wert zwischen der oberen und unteren Dimensionsgrenze annehmen können. In der Basiseinstellung rechnet das Berechnungstool konservativ mit dem Maximalwert. Eine benutzerdefinierte Anpassung kann jedoch vorgenommen werden.

Die einzutragenden Werte können entweder als Istwerte aus durchgeführten Sauberkeitsanalysen extrahiert werden oder als Sollwerte aus vorhandenen Spezifikationen.

Mit den Istwerten erhält man somit typische Ausfallraten für das Fehlerbild elektrischer Kurzschluss als Momentaufnahme, mit den Sollwerten erhält man eine Obergrenze, die in der Lieferkette gemäß der Spezifikation zulässig ist.

Neben der oben genannten Verwendung im Bereich der Qualitätssicherung kann das Berechnungstool auch im Bereich der Entwicklung genutzt werden, um bei einer gegebenen Ausfallrate (z. B. definiert durch Kunde) Partikelgrenzwerte abzuleiten.

5.5.7 Gewichtungsfaktoren

Zusätzlich zu den messbaren bzw. berechenbaren Faktoren gibt es weitere physikalisch begründete Einflussgrößen (Gewichtungsfaktoren), welche die Ausfallwahrscheinlichkeit beeinflussen.

Untersucht wurden folgende relevante Faktoren:

1. Einbaulage
2. Kontaktwahrscheinlichkeit
3. Ergebnisse aus der Sauberkeitsanalyse, verglichen mit tatsächlich beweglichen Partikeln
4. Produktspezifische Faktoren

Zu 1: Unter der Voraussetzung, dass gemäß der Modellannahme leitfähige Partikel auf der Leiterplatte mobil sind, gibt es einen Unterschied bei der Kurzschlusswahrscheinlichkeit von der Oberseite und der Unterseite der Leiterplatte. Im Fall der Unterseite der Leiterplatte würden mobile Partikel der Schwerkraft folgen, damit die Leiterplatte verlassen und somit keinen elektrischen Kurzschluss verursachen können. Im Fall der Oberseite der Leiterplatte hat keiner der Partikel die Möglichkeit, die Leiterplatte zu verlassen, lediglich eine laterale Bewegung ist möglich; somit können alle Partikel zur Kurzschlusswahrscheinlichkeit beitragen.

Neben den beiden angesprochenen Extremfällen der Orientierung in null Grad (Oberseite der Leiterplatte) und 180 Grad (Unterseite der Leiterplatte) ist jede weitere Winkellage (je nach Einbausituation) möglich. Im Berechnungstool kann die tatsächliche Winkellage in Grad eingegeben werden. Das Berechnungstool berücksichtigt bei der Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit diese dann entsprechend.

Zu 2: Neben dem rein geometrischen Kontakt zwischen metallischen Partikeln und stromführenden Bereichen muss es auch zu einem elektrischen Kontakt kommen. Die Herleitung der Kontaktwahrscheinlichkeit wird in Kapitel 5.1 beschrieben.

Zu 3: Zur Bestimmung der Partikelfracht werden gemäß VDA 19 Sauberkeitsanalysen durchgeführt. Die Annahme ist, dass die experimentell bestimmte Partikelfracht mit den tatsächlich beweglichen Partikeln im Betrieb übereinstimmt. Die Realität zeigt jedoch, dass zum Beispiel Partikel in Flussmittelresten

fixiert und damit nicht beweglich sind oder dass Stanzgrate ggf. erst durch den Extraktionsvorgang abgelöst werden und nicht zum Beispiel durch Vibration im Betrieb. Somit gibt es Diskrepanzen zwischen den Ergebnissen der Sauberkeitsanalyse und der Anzahl an tatsächlich beweglichen Partikeln. Die Skalierung zwischen diesen beiden Ergebnissen erfolgt durch einen Anpassungsfaktor. Die Höhe des Anpassungsfaktors wurde experimentell bestimmt, siehe Kapitel 5.2.

Zu 4: Es sind weitere produktspezifische Verdünnungsfaktoren denkbar, die durch ihr Design die Ausfallwahrscheinlichkeit verringern können. Dies können zum Beispiel:

- Flächen eines Wärmeleitmediums sein, die Partikel aufgrund der Hafteigenschaften festhalten und damit immobilisieren können
- lackierte Bereiche sein, bei denen die stromführenden Bereiche abgedeckt und somit für metallische Partikel unkritisch sind
- Zwischenräume sein (z. B. zwischen Leiterplatte und Gehäuse), die es erlauben, dass Partikel die Leiterplatte verlassen können und sich in elektrisch nicht relevanten Bereichen der Baugruppe sammeln, ohne wieder zurück auf die Leiterplatte gelangen zu können (siehe Kapitel 5.3)
- Bauteile mit einem Dauermagneten sein, die ferromagnetische Partikel anziehen und festhalten

5.6 Beispielhafte Anwendung des Risikotools

5.6.1 Beispielhafte Anwendung des Risikotools für Ausfallrate

Der im vorherigen Kapitel erläuterte theoretische Hintergrund zur Anwendung des Risikoabschätzungstools soll nun anhand eines konkreten Beispiels erläutert werden.

Für eine beispielhafte Elektronik wurden die kritischen Flächen für die einzelnen Abstandsklassen bestimmt, zudem wurde die Partikelfracht mithilfe von Sauberkeitsanalysen ermittelt. Diese Daten werden nun unter Berücksichtigung von Zusatzdaten wie zum Beispiel Einbaulage, Kontaktwahrscheinlichkeit usw. in das Risikoabschätzungstool eingegeben. Als Ergebnis erhält man für dieses konkrete Beispiel ein Risiko für den elektrischen Kurzschluss von 12 ppm.

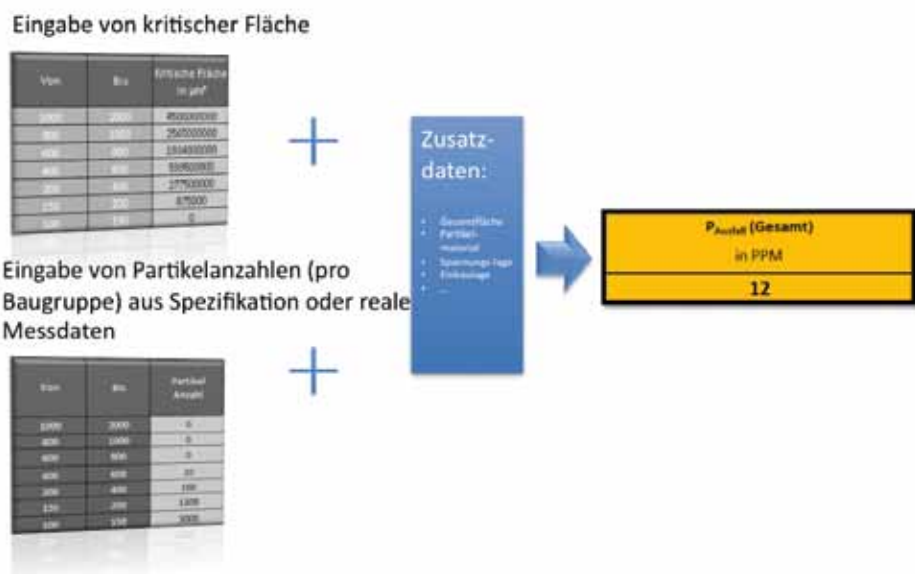
Dadurch dass, wie im Kapitel zuvor erläutert, die getroffenen Annahmen in allen Fällen konservativ gewählt wurden, ist auch das Risiko im Vergleich zu tatsächlichen Ausfallraten im Feld als Ergebnis konservativ. Das heißt das Risiko (durch das Rechentool

bestimmt) liegt in der Regel höher als das der beobachteten Felddaten. Da das Tool idealerweise bereits in einer Designphase zur Bewertung verwendet werden soll, ist ein konservativer Ansatz sinnvoll.

In jedem Fall ist, falls vorhanden, der Vergleich mit beobachteten Ausfallraten aus Felddaten zur Prüfung der Plausibilität der Ergebnisse anzuraten.

Neben der reinen Risikobewertung, wie in diesem Beispiel dargestellt, kann das Tool auch für die Bewertung von Designänderungen oder der Risikoabschätzung bei Spezifikationsverletzung herangezogen werden.

Abb. 100: Berechnungsbeispiel 1: Berechnung einer absoluten Ausfallwahrscheinlichkeit

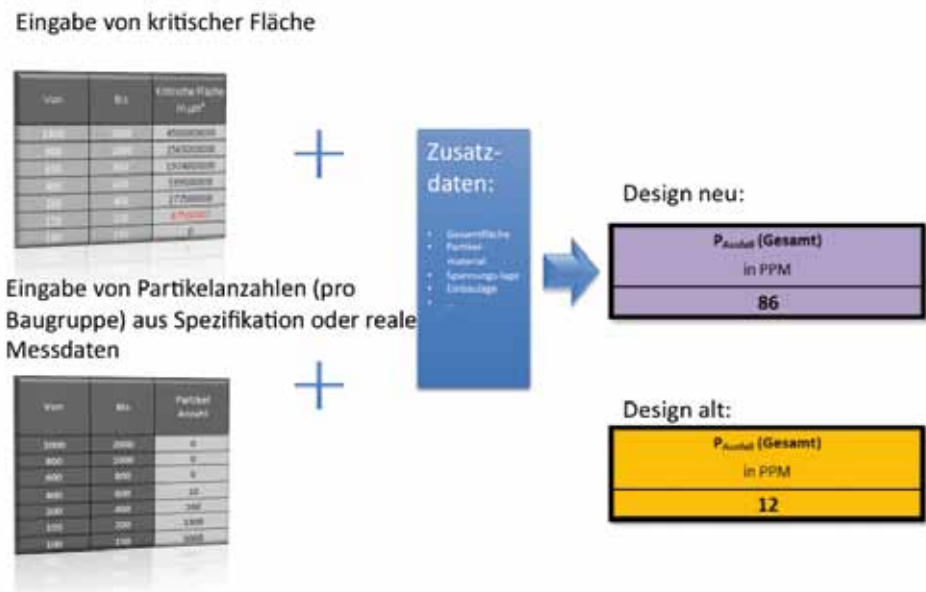


5.6.2 Beispielhafte Anwendung des Risikotools bei Designänderung

Im Rahmen des Produktentstehungsprozesses (z. B. von B-Muster nach C-Muster) oder bei Applikationen aus bestehenden Plattformen kommt es häufig zu Änderungen des Layouts. Diese Änderungen können hinsichtlich der Auswirkung auf die Kurzschlusswahrscheinlichkeit als Deltabetrachtung mit dem Risikoabschätzungstool durchgeführt werden. Als „altes“ Design soll das unter 5.6.1 genannte Beispiel zugrunde gelegt werden. Als „neues“ Design dient nachfolgendes Beispiel, das sich in einer Abstandsklasse hinsichtlich seiner kritischen Fläche vergrößert hat.

den Größenklassen nachzudenken, die entweder den Hauptanteil am Gesamtrisiko ausmachen oder die technologisch noch beeinflussbar sind. Den gleichen Ansatz kann man für die kritischen Flächen verfolgen, auch hier lohnt es sich, darüber nachzudenken, inwieweit gewisse Bereiche des Layouts hinsichtlich ihrer Abstände vergrößert oder geschützt werden können, um das Risiko für den elektrischen Kurzschluss zu senken.

Abb. 101: Berechnungsbeispiel 2: Berechnung von Ausfallwahrscheinlichkeiten bei Layoutänderungen z. B. bei einer neuen Bauteilgeneration



Wie in der Abbildung 101 ersichtlich, hat sich das Risiko für den elektrischen Kurzschluss durch die Designänderung deutlich erhöht.

Wo lohnt es sich nun, eine Optimierung anzustoßen, um mit moderatem Aufwand das Risikopotenzial zu senken? Dazu kann man sich die Haupteinflussfaktoren auf das Risiko seitens der Partikel fracht oder seitens der kritischen Fläche ansehen. Es ist sinnvoll, über eine mögliche Reduktion der Partikel fracht in

Abb. 102: Berechnungsbeispiel 3: Optimierung von Haupteinflussfaktoren

Anzahl Partikel:

Von	Bis	Partikel Anzahl
1000	2000	0
800	1000	0
600	800	0
400	600	22
200	400	188
150	200	1300
100	150	2000

Von	Bis	Ausfallwahrscheinlichkeit
1000	2000	0,00
800	1000	0,00
600	800	0,00
400	600	0,00
200	400	0,02
150	200	0,08
100	150	0,08

Kritische Fläche:

Von	Bis	Kritische Fläche in µm²
1000	2000	40000000
800	1000	25000000
600	800	15000000
400	600	9000000
200	400	4500000
150	200	2250000
100	150	0

Von	Bis	Ausfallwahrscheinlichkeit
1000	2000	0,00
800	1000	0,00
600	800	0,00
400	600	0,00
200	400	0,02
150	200	0,08
100	150	0,08

5.6.3 Beispielhafte Anwendung des Risikotools zur Risikoabschätzung bei Spezifikationsverletzung

Da eine Ausfallwahrscheinlichkeit von 0 ppm nur in den seltensten Fällen möglich ist, ist es sinnvoll, ein Design und auch Fertigungsprozesse sowie Komponenten auf eine gewisse

Partikelanzahl auszulegen. Dieses wird in Qualifikationstests validiert und in Spezifikationen festgeschrieben. Weicht man nun vom spezifizierten Zustand ab, kann man das daraus erhöhte Risiko mithilfe des Berechnungstools bestimmen und gegebenenfalls entsprechende Maßnahmen einleiten.

Abb. 103: Berechnungsbeispiel 4: Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeitsänderung bei Spezifikationsverletzung

Zustand nach Spezifikation

Von	Von	Bis	Partikel Anzahl
2000			
800	1000	2000	0
600	800	1000	0
400	600	800	0
200	400	600	22
150	200	400	188
100	150	200	1300
50	100	150	2000

$P_{\text{Ausfall (Gesamt)}}$
in PPM
12

Wie wirkt sich ein unsauberes Zukaufteil aus?

Von	Von	Bis	Partikel Anzahl
2000			
800	1000	2000	0
600	800	1000	0
400	600	800	1
200	400	600	18
150	200	400	188
100	150	200	1300
50	100	150	2000

$P_{\text{Ausfall (Gesamt)}}$
in PPM
22

6 Zusammenfassung

Zusammenfassend wurden im Arbeitskreis folgende inhaltliche Schwerpunkte behandelt und dargestellt:

- Eine Detaillierung von VDA 19
- Eine Empfehlung, wie Sauberkeitsanalysen durchgeführt und deren Ergebnisse dargestellt werden sollten
- Eine Darstellung des Istzustands hinsichtlich Partikelbelastungen im Bereich der Fertigung von elektrischen, elektronischen, elektromechanischen Bauelementen, Leiterplatten und elektronischen Baugruppen. In dieser überarbeiteten und ergänzten Fassung wurde das Portfolio an exemplarischen Ergebnissen für Zulieferteile deutlich erweitert (z. B. Chip-Bauelemente, ICs, Aluminiumdruckgussgehäuse, versch. Steckertypen, ...).
- Risikoabschätzungstool (<https://bauteilsauberkeit.zvei.org/>) zur Berechnung des Risikos eines elektrischen Kurzschlusses, verursacht durch metallische Partikel. Dazu wurden u. a. experimentelle Untersuchungen zur Kurzschlusswahrscheinlichkeit durchgeführt.
- Eine Betrachtung möglicher Partikelquellen innerhalb von Prozessen
- Die Darstellung von (Design-)Empfehlungen zur sauberkeitsgerechten Konstruktion und damit zur Reduktion von Partikeln am Erzeugnis
- Hinweise für Umgebungssauberkeit, Transport und Logistik
- Inhaltliche Abgrenzung zu der Technischen Sauberkeit verwandte Themen wie ionische, filmische und biologische Kontamination sowie Whisker
- Die Bereitstellung von Abklärungsbogen für Analysen

7 Ausblick

Als die erste Fassung des ZVEI-Leitfadens Bauteilsauberkeit im Jahr 2013 veröffentlicht wurde, sah man sich in der Lieferkette lediglich an einigen Stellen mit Anforderungen hinsichtlich der Technischen Sauberkeit konfrontiert. Nun, ziemlich genau fünf Jahre später, ist die Technische Sauberkeit als Qualitätsmerkmal flächendeckend in der Lieferkette der Elektronikindustrie angekommen.

Während der vergangenen fünf Jahre ist es mithilfe des ZVEI-Leitfadens gelungen, einige Standards in der Elektronikindustrie zu schaffen. So ist inzwischen die Extraktionsanalyse als Methode der Wahl in dieser Branche etabliert, die Darstellung der Ergebnisse, bezogen auf eine Fläche von 1000 cm², wird allgemein für die Vergleichbarkeit angewendet und es ist in der Lieferkette auch angekommen, dass statistische Gesichtspunkte in die Diskussionen zur Technischen Sauberkeit miteinbezogen werden müssen. Dies wohl wissend, dass die Ergebnisse des Merkmals der Technischen Sauberkeit stark streuen und folglich Ausreißerregelungen im Kunden-Lieferanten-Verhältnis diskutiert und abgestimmt werden müssen. Zudem ist festzustellen, dass nicht überall in der Lieferkette Reinigungsschritte für den Erhalt der Vorgaben benötigt werden.

Neben all den angesprochenen Standards und den positiv zu bewertenden einheitlichen Vorgehensweisen wird unter anderem eine zentrale Fragestellung weiterhin uneinheitlich gehandhabt: die Herangehensweise bei der Ableitung von Spezifikationswerten.

Häufig werden Spezifikationswerte für metallische Partikel abgeleitet, indem der minimale Potenzialabstand auf einer bestückten Leiterplatte ermittelt wird. Von diesem Wert ausgehend, wird dann in der Praxis unter Berücksichtigung eines Sicherheitsfaktors der halbe minimale Potenzialabstand als Spezifikationswert herangezogen.

Nähert man sich der Definition von sinnvollen Spezifikationswerten von der Funktion her

kommend, so erscheint dem ZVEI-Arbeitskreis Bauteilsauberkeit diese Herangehensweise einerseits nicht notwendig, andererseits aber auch schwer umsetz- bzw. einhaltbar und daher wenig zielführend. Jeder wird zustimmen, dass bei einem halben minimalen Potenzialabstand von z. B. 150 µm das funktionale Risiko für einen elektrischen Kurzschluss bei Vorhandensein von metallischen Partikeln von 149 µm zwar mehr oder weniger null sein wird, dass das funktionale Risiko für einen elektrischen Kurzschluss bei Vorhandensein von metallischen Partikeln von 151 µm aber nicht plötzlich und unstetig auf 100 Prozent ansteigt. Damit wird offensichtlich, dass das Risiko als Funktion der Größe und Anzahl von metallischen Partikeln stetig ansteigt.

Um nun das funktionale Risiko für den elektrischen Kurzschluss, verursacht durch metallische Partikel, bewerten zu können, hat der ZVEI-Arbeitskreis während der letzten Jahre erhebliche Anstrengungen unternommen. Es wurden experimentelle Untersuchungen zur Kontaktwahrscheinlichkeit durchgeführt. Auf dieser Basis ist ein Risikoabschätzungstool (<https://bauteilsauberkeit.zvei.org/>) zur Berechnung des elektrischen Kurzschlusses auf einer bestückten Leiterplatte, verursacht durch metallische Partikel, entstanden.

Mithilfe dieses veröffentlichten Tools ist es zum ersten Mal möglich, das Risiko für einen elektrischen Kurzschluss, verursacht durch metallische Partikel, in ppm abzuschätzen. Folglich ist es nun möglich, sich von einem pauschalen Spezifikationswert (halber minimaler Potenzialabstand) hin zu einem individuellen Spezifikationswert zu entwickeln, der durch die Funktionalität bestimmt wird. Das individuelle Layout einer bestückten Leiterplatte mit den entsprechenden Potenzialabständen wird dabei zugrunde gelegt und auch die ermittelte individuelle Partikelfracht metallischer Partikel auf einem Erzeugnis hierbei berücksichtigt. Der ZVEI-Leitfaden Bauteilsauberkeit schafft somit die Grund-

lage für die Ableitung und die Diskussion von Spezifikationswerten und hofft, dass dieser neue Impuls intensiv in der Lieferkette diskutiert wird, breite Beachtung findet und sich zukünftig als die Vorgehensweise der Wahl bei der Ableitung von Spezifikationswerten durchsetzt.

Damit entspannt sich auch gleichzeitig der Widerspruch zwischen den an verschiedenen elektronischen Produkten ermittelten Partikelbelastungen als Status quo in der Zuliefererindustrie und der theoretischen Forderung von Maximalwerten, die dem halben Potenzialabstand entsprechen.

Es ist davon auszugehen, dass durch die Nutzung des Tools u. a. wirtschaftlichere Lösungen zur Einhaltung der Technischen Sauberkeit möglich werden, als dies bisher der Fall war.

Darüber hinaus ist anzumerken, dass die sauberkeitsgerechte Konstruktion und Prozessauswahl eine deutlich größere Aufmerksamkeit erhalten sollte.

Zudem arbeitet der ZVEI-Arbeitskreis Bauteilsauberkeit derzeit an der Verfassung eines sogenannten „Technical Reports“ im Rahmen seiner Kooperation mit dem DKE-Gremium K682 und dem IEC-Gremium TC91, WG1 und stellt somit die Weichen, dass die in der deutschsprachigen Elektronikindustrie geschaffenen Standards auch international Beachtung und Anwendung finden.

Der ZVEI-Arbeitskreis Bauteilsauberkeit plant auch nach der Veröffentlichung des völlig überarbeiteten und ergänzten Leitfadens, die weitere Entwicklung der Technischen Sauberkeit in der Elektronikindustrie zu beobachten, und möchte auch weiterhin aktiv in die Bearbeitung von Themen im Zusammenhang mit der Technischen Sauberkeit in der Elektronikindustrie involviert sein.

8 Verwandte Themen

8.1 Ionische Kontamination

Definition:

Als ionische Verunreinigungen gelten Ansammlungen von Rückständen, welche die Funktion oder die Lebensdauer der Leiterplatte oder Baugruppe unter anderem durch Korrosion, Kriechströme oder Kurzschlüsse einschränken können.

Diese Rückstände gelten bei trockener Umgebung als nicht leitend. Sobald adsorbierte Feuchte schon in wenigen Monolagen auf der Baugruppe entsteht, dissoziieren salzartige Rückstände zu negativ (Anion) und positiv (Kation) geladenen Ionen und werden somit leitfähig.

Herkunft:

Quellen ionischer Verunreinigungen können vielseitig sein und unter anderem durch folgende Produktionsschritte und Hilfsstoffe entstehen:

- Fertigungsrückstände (z. B. Lötrückstände von Lotpasten und Flussmitteln)
- Rückstände auf Zukaufteilen / Herauslösen aus Materialien (z. B. PCB, elektronische Bauteile)
- Fehlerhafter Reinigungsprozess (manuell/ automatisch)
- Handling (z. B. Fingerabdrücke)
- Weitere

Risiken:

Der Großteil der sich auf der Baugruppe befindenden Ionen stammt aus den im Flussmittel eingesetzten Aktivatoren (z. B. Halogenidverbindungen oder schwache organische Säuren). Diese Rückstände können wasserlöslich und hygroskopisch sein, sodass sich Wasserdampf aus der Umgebungsluft bereits unterhalb der Sättigungsgrenze auf der Leiterplatte anlagert. Entsteht ein Wasserfilm auf der Baugruppenoberfläche, kann dies zu Kriechströmen und zur Elektrochemischen Migration führen. Ist der Kriechstrom ausreichend groß, kann die Funktion der Baugruppe temporär beeinträchtigt werden, solange

genügend Feuchtigkeit vorliegt. Im weiteren Verlauf bilden sich durch die Elektrochemische Migration bereits nach wenigen Minuten elektrisch leitende metallische Dendriten aus. Ein abgeschlossenes Dendritenwachstum zwischen zwei Potenzialunterschieden führt zum Kurzschluss, der die elektronische Baugruppe dauerhaft schädigen kann (siehe Abb. 104). Die Ausbildung von Kriechströmen und Dendriten wird durch die Anwesenheit von dissoziierten Verunreinigungen im Wasserfilm beschleunigt.

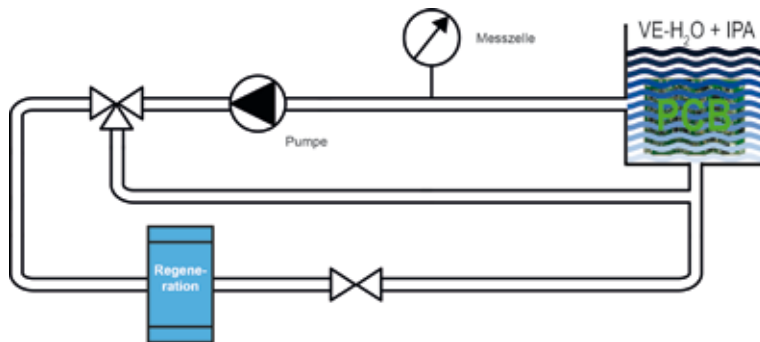
Abb. 104: Dendritenbildung zwischen einer Kammstruktur auf einer Leiterplatte



Messung der ionischen Kontamination

In der IPC-TM-650 2.3.25 werden drei Testverfahren beschrieben: eine manuelle, eine statische und eine dynamische Methode. In Europa ist das gängigste Verfahren das statische Messverfahren. Hierbei wird eine Baugruppe in einer geschlossenen Testkammer platziert (Abb. 105). Die Baugruppe ist vollständig eingetaucht und wird mit einem Isopropanol-DI-Wassergemisch (meist 75/25 Vol.-%, aber auch 50/50 Vol.-%) umspült. Das zirkulierende Testmedium wird hinsichtlich seiner Leitfähigkeit gemessen. Mit der Zeit lösen sich die ionischen Verunreinigungen von der Baugruppe und gehen in Lösung über. Die elektrische Leitfähigkeit der Lösung steigt damit stetig an. Die Messung wird abgeschlossen, wenn die Änderung der Leitfähigkeit nur noch geringfügig zu messen ist. In der Regel ist die Messung nach 15 Minuten abgeschlossen.

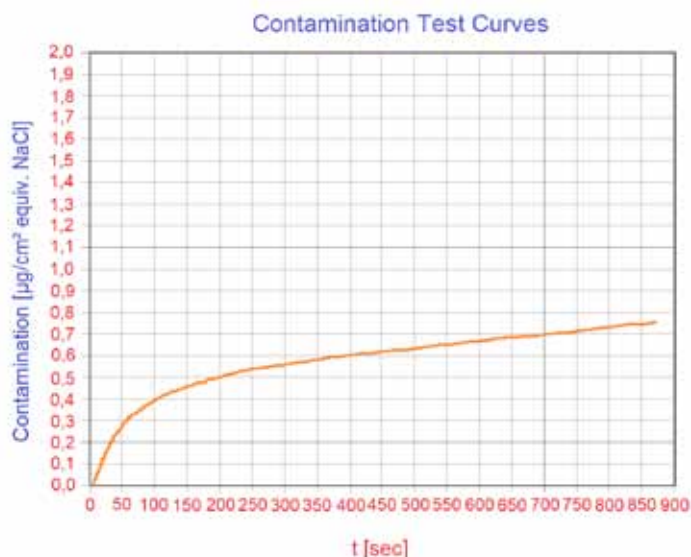
Abb. 105: Messprinzip



Da bei der Messung alle in Lösung gegangenen ionischen Komponenten, unabhängig von ihrer eigentlichen elektrischen Ladung, gemessen werden, wird durch eine entsprechende Software der Messwert als Gesamtionengehalt (in μg) zum Äquivalent Natriumchlorid pro cm^2 Baugruppenoberfläche angegeben.

Bei einem Messwert von beispielsweise $0,5 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ NaCl Äquivalent bedeutet dies, dass sich die gesamte ionische Verunreinigung auf der Baugruppe in ihrer elektrochemischen Eigenschaft wie die angegebene Menge an Natriumchlorid verhält. In Abb. 106 ist ein beispielhafter Verlauf einer Messkurve dargestellt.

Abb. 106: Messkurve



Interpretation der gemessenen Daten

Die ermittelte Kontamination [$\mu\text{g}/\text{cm}^2$ equiv. NaCl] aus dem beschriebenen Testverfahren setzt sich aus der Summe aller vorliegenden Ionen zusammen. Damit lassen sich ionische Verunreinigungen nur in ihrer Gesamtheit beurteilen. Die gemessene Kontamination lässt weder eine Aussage über die Art der Substanz noch über ihre kritische Wirkung zu. Die Art oder Zusammensetzung der Kontamination kann zum Beispiel mit einer Ionenchromatografie eruiert werden. Des Weiteren lassen sich aus dem Ergebnis des Testversuchs keine Angaben über die räumliche Verteilung der Ionen auf der zu testenden Oberfläche und das damit verbundene Gefährdungspotenzial ableiten. Um die räumliche Verteilung der Kontamination (schwache organische Säuren) sichtbar zu machen, kann der Blau-Test herangezogen werden. Der Blau-Test weist durch eine Farbreaktion die Aktivatoren (schwache organische Säuren) von Flussmitteln sichtbar nach und zeigt ihre lokale Verteilung.

Der Messwert „Kontamination [$\mu\text{g}/\text{cm}^2$ equiv. NaCl]“ wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst, wie zum Beispiel:

- Geometrie der Baugruppe
- Eingesetzte Lotpaste/Flussmittel (Löslichkeit)
- Art der Messmethode (dynamisch/statisch)
- Eingesetztes Equipment, Messtemperatur und Testzeitraum

Dadurch ist eine Vergleichbarkeit von verschiedenen Baugruppentypen oder verschiedenen Messverfahren nicht möglich. Es wird ersichtlich, dass ein allgemeingültiger Grenzwert für alle Baugruppen keine Gewährleistung für eine ausfallsichere Baugruppe darstellt. Wird eine Baugruppe nach der Fertigung und anschließender Qualifikation als ausfallsicher eingestuft, kann die ionische Kontamination ermittelt und dieser Wert zur Überwachung der Fertigung weiterer Baugruppen des gleichen Typs verwendet werden. Hinzu kommt, dass ein möglicher Ausfall einer Baugruppe von produktspezifischen Parametern abhängt: zum Beispiel Potenzial, Potenzialabstände

und Einsatzumgebung. Die Zuverlässigkeit einer Baugruppe sollte mit weiteren Testmethoden, beispielsweise mit einem Klimastresstest, bestätigt werden. Das Verfahren der ionischen Kontamination dient eher als Werkzeug einer Prozesskontrolle für die Herstellung einer Baugruppe.

8.1.1 Filmische Verunreinigung

Unter einer filmischen Verunreinigung versteht man das nicht gewollte Auflagern eines Films auf Oberflächen. Filmische Verunreinigungen werden weiter in chemisch filmische und biologisch filmische Verunreinigungen unterschieden.

8.1.2 Biologische Filme

Biologische Filme sind Bakterien und/oder Pilze. Sie können mithilfe von Nährlösungstests nachgewiesen werden.

8.1.3 Chemische Filme

Chemische Filme können aus Wasser mit eingelagerten dissoziierten Salzen oder organischen Stoffen wie beispielsweise Ölen, Fetten oder Harzen bestehen, die unter anderem auch Ionen einschließen können. Diese Filme entstehen meist durch die in der Produktion verwendeten Hilfsstoffe und angegliederten Prozesse.

8.2 Whisker

Bedingt durch EU-Richtlinien wie ELV (End of Live Vehicle / 2000/53/EG), die Stoffverbote, das Rücknahmesystem und Recycling im Automobilsektor zur Gefahrstoffreduzierung regelt, wurde vor einigen Jahren unter anderem die Verwendung von Blei in der Elektronik bis auf eine geringe Restmenge von 0,1 Gewichtsprozent je homogenen Werkstoff untersagt.

Als Folge dieser EU-Richtlinien wurde deshalb aus technischer sowie preislicher Sicht überwiegend die Metallisierung der Bauteilanschlüsse auf Reinzinn bzw. SnAgCu (ca. 96 % Zinn) umgestellt.

Im Rahmen von technischen Untersuchungen zur „Zuverlässigkeit“ stieß man wieder vermehrt auf das schon bekannte, aber, bedingt durch die Zugabe von Blei, stark eingeschränkte Whiskerphänomen. Es wurde sehr bald von sicherheitsorientierten Anwendern im Luft-/Raumfahrt- und Automobilbereich als sehr kritisch eingestuft. Als Folge davon wird Reinzinn in Luft- und Raumfahrt nur unter wenigen bestimmten Bedingungen verwendet.

Was sind Whisker?

Zinn-Whisker sind mikroskopisch elektrisch leitende, haarähnliche kristalline Strukturen, die aus einer Zinnschicht und Zinnlegierungen herauswachsen und bei Berührung des Nachbarkontakts zu einem Kurzschluss führen können. Zu beachten ist dabei, dass Whisker bis zu 60 mA Strom leiten, bei höherer Belastung abbrennen und im ungünstigsten Fall einen Lichtbogen zünden können. Dieser Kurzschluss setzt nicht nur die gesamte Elektronik außer Betrieb, sondern kann auch, bedingt durch den Lichtbogen, bis zum Abbrand führen.

Whisker wachsen aufgrund interner Spannungsgradienten aus der Zinnoberfläche heraus.

Einige Einflussfaktoren auf das Whiskerwachstum sind Korrosion, Oberflächenoxide, unregelmäßiges intermetallisches Wachstum, äußere Kräfte, u.s.w.

Deshalb soll hier nur kurz auf Whisker-Vermeidungsmaßnahmen eingegangen werden.

- Zinnschichten nach ZVEI-Tabelle mit entsprechender Zwischenschicht
- Nachbehandlung mittels „Annealing“ oder eines Reflow-Prozesses zur Ausbildung einer homogenen Schicht intermetallischer Phase mit min. 0,5 µm Dicke
- Vermeidung von externen Kräften oder Nachbehandlungen, die den oben genannten Gegenmaßnahmen entgegenwirken

Im Gegensatz zu Partikeln, deren Länge eindeutig bestimmt werden kann, wachsen Whisker bis zum Abklingen der inneren Spannungen weiter.

Abb. 107: Whiskerwachstum von > 8 mm über einen Zeitraum von > 10 Jahren

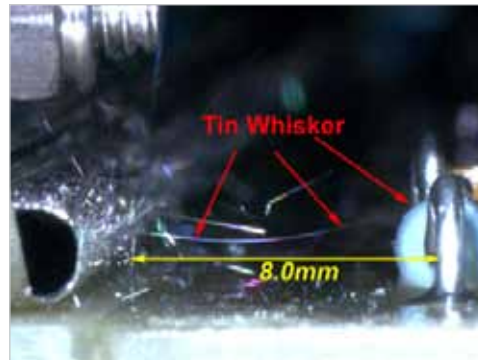


Abb. 108: Whiskerwachstum von > 2 mm über einen Zeitraum von > 6 Monaten



Es ist anzunehmen, dass mehrere Wochen oder einige Monate notwendig sind, bis Whisker entstehen können. Die Länge der Whisker kann dabei von einigen Mikrometern bis zu einigen Zentimetern reichen.

Somit ist es höchst unwahrscheinlich, bei einer fertigungsbegleitenden Sauberkeitsanalyse, die Partikel ab 50 µm betrachtet, Whisker zu finden.

Details zu Whiskern, ihrem Wachstum und ihrer Vermeidung können in der ZVEI-Dokumentation „Pb-frei: Whiskerarme Zinnoberflächen. Verarbeitbarkeit, Löten und Lötwärmebeständigkeit für Automotive Anwendungen“ nachgelesen werden.

Des Weiteren ist ein internationaler Standard (IEC 60068-2-82), der Tests zu Qualifikation und Nachweisführung von Zinnoberflächen bezüglich Whisker beschreibt, verfügbar.

9 Weiterführende Literatur

- VDA 19 Teil 1, Prüfung der Technischen Sauberkeit – Partikelverunreinigung funktionsrelevanter Automobilteile, 2. Auflage 2015
- VDA 19 Teil 2, Technische Sauberkeit in der Montage – Umgebung, Logistik, Personal und Montageeinrichtungen, 1. Auflage 2010
- ISO 16232 (Part 1–10), Road vehicles – Cleanliness of components of fluid circuits, 2007
- VDE 0660/12.52, Niederspannungsschaltgeräte
- Vinaricky, Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen, Springer Verlag, 2002,
- Holm, Electric Contacts, Theory and Application, Springer Verlag, 1967
- Keil, Werkstoffe für elektrische Kontakte, Springer Verlag, 1960

10 Beteiligte Firmen

Ba·Ti·Loy

Gesellschaft für
Lötmitteltechnik mbH



BOSCH

Technik fürs Leben

brose

Competence in Mechatronics

cms
electronics

Continental

 **Fraunhofer**
IPA



KOSTAL


KSG LEITERPLATTEN

LOEWE.

MekTEC Group



muRata
INNOVATOR IN ELECTRONICS



SEMIKRON
innovation+service

Unimicron
GERMANY

VAC
VACUUMSCHMELZE



ZESTRON
High Precision Cleaning

Zollner



Der Arbeitskreis ‚Bauteilsauberkeit‘ anlässlich seiner Arbeitssitzung (nicht alle Mitglieder anwesend) bei der Firma Zestron in Ingolstadt am 27.6.2018.

Bildnachweise, Quellen und Copyright

Tab. 1: Copyright © TDK Electronics AG

Tab. 2: Copyright © Zollner Elektronik AG

Tab. 3 und 4.: Copyright © TDK Electronics AG

Tab. 5a, b, 6: Copyright © Kostal Kontakt Systeme GmbH
und TE Connectivity Germany GmbH

Tab. 7: Copyright © Mektec Europe GmbH und Ruwel International GmbH

Tab. 8 bis Tab. 28: Copyright © ZVEI Arbeitskreis Bauteilsauberkeit

Tab. 29: Copyright © Zollner

Abb. 1: Copyright © VDA e.V.

Abb. 2a, b: Copyright © Vacuumschmelze GmbH & Co. KG

Abb. 2c: Copyright © TE Connectivity Germany GmbH

Abb. 2d: Copyright © TDK Electronics AG

Abb. 3, 4, 5: Copyright © Vacuumschmelze GmbH & Co. KG

Abb. 6: Copyright © ZVEI Arbeitskreis Bauteilsauberkeit

Abb. 7, 8: Copyright © TE Connectivity Germany GmbH

Abb. 9 bis 20: Copyright © Kostal Kontakt Systeme GmbH

Abb. 21: Copyright © Mektec Europe GmbH

Abb. 22: Copyright © Ruwel International GmbH; Bosch Motorsteuerung

Abb. 23 bis 31: Copyright © Vacuumschmelze GmbH & Co. KG

Abb. 32 bis 35: Copyright © TDK Electronics AG

Abb. 36 bis 41: Copyright © Kostal Kontakt Systeme GmbH

Abb. 42: Copyright © TE Connectivity Germany GmbH

Abb. 43 bis 51: Copyright © Kostal Kontakt Systeme GmbH

Abb. 52, 53: Copyright © TE Connectivity Germany GmbH

Abb. 54 bis 56: Copyright © Hydac International GmbH

Abb. 57 bis 62: Copyright © Ruwel International GmbH

Abb. 63 bis 71: Copyright © Mektec Europe GmbH

Abb. 72: Copyright © VDA e.V.

Abb. 73 bis 74: Copyright © Robert Bosch GmbH

Abb. 75 bis 82: Copyright © Kostal Kontakt Systeme GmbH

Abb. 83 bis 85: Copyright © Vacuumschmelze GmbH & Co. KG

Abb. 86: Copyright © Zollner Elektronik AG

Abb. 87: Copyright © ZVEI Arbeitskreis Bauteilsauberkeit

Abb. 88, 89: Copyright © Vacuumschmelze GmbH & Co. KG

Abb. 90, 91: TE Connectivity Germany GmbH

Abb. 92: Copyright © Zollner Elektronik AG

Abb. 93: TE Connectivity Germany GmbH

Abb. 94 bis 96: Copyright © ZVEI Arbeitskreis Bauteilsauberkeit

Abb. 97 bis 99: Copyright © Continental AG

Abb. 100 bis 103: Copyright © ZVEI Arbeitskreis Bauteilsauberkeit

Abb. 104: Copyright © Balver Zinn Josef Jost GmbH & Co. KG

Abb. 105, 106: Copyright © Kolb Cleaning Technology GmbH

Abb. 107: Copyright © NASA

„Tin Whiskers: A History of Documented Electrical System Failures“, April 2006
https://nripp.nasa.gov/whisker/reference/tech_papers/2006-Leidecker-Tin-Whisker-Failures.pdf

Abb. 108: DfR Solutions

Abb. 109, 110: Copyright © Zollner Elektronik AG

Abb. 111, 112: Copyright © ZVEI Arbeitskreis Bauteilsauberkeit

Bild Arbeitskreis (s. o.): Copyright © ZVEI Arbeitskreis Bauteilsauberkeit

11 Appendix

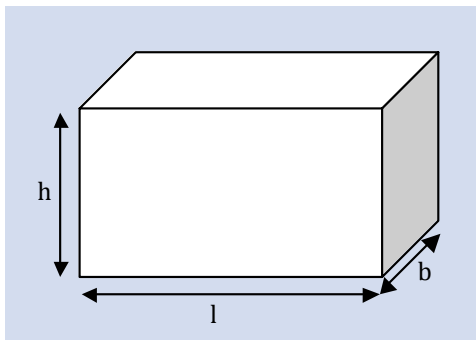
Bestimmung der Oberfläche von Bauelementen und bestückten Leiterplatten

Aufgrund der komplexen Oberflächenstruktur einer bestückten Leiterplatte ist die Bestimmung der Bauteiloberfläche schwierig und zeitaufwendig.

Um den Aufwand so gering wie möglich zu halten und trotzdem ein annähernd exaktes und vergleichbares Ergebnis zu erhalten, wurde im Rahmen des Arbeitskreises eine einheitliche Methode zur Bestimmung der Oberfläche festgelegt.

Für quaderförmige Bauteile gilt:

Abb. 109: Abschätzung für quaderförmige Bauelemente



Chip-Bauteile, BGA, SO, SOT, QFP, Tantal-Kondensatoren usw.:

$$O_Q = 2 \cdot h \cdot (l + b) + l \cdot b$$

Leiterplatte:

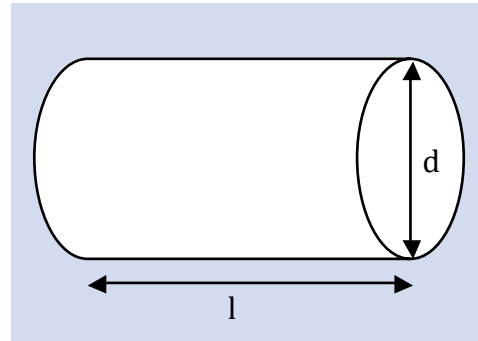
$$O_L = 2 \cdot (l \cdot h + b \cdot h + l \cdot b)$$

Stecker:

$$O_S = [2 \cdot h \cdot (l + b) + l \cdot b] \cdot 2$$

Für zylinderförmige Bauteile gilt:

Abb. 110: Abschätzung für zylinderförmige Bauelemente



liegend (z. B. Melf-Bauteile):

$$O_{Zl} = \pi \cdot d \cdot (l + \frac{d}{2})$$

stehend (z. B. Elko):

$$O_{Zs} = \pi \cdot d \cdot (l + \frac{d}{4})$$

Gesamtoberfläche:

$$O_{Gesamt} = O_L + \sum_{i=1}^m O_{Qi} + \sum_{j=1}^n O_{Zlj} + \sum_{k=1}^o O_{Zsk} + \sum_{l=1}^p O_{Sl}$$

- Bei Bauteilen, die flächig aufliegen, wird die Grundfläche nicht mitberechnet (z. B. Chip-BE).
- Die Formel für die Abschätzung der Leiterplattenoberfläche gilt nur für annähernd rechteckige Bauteile. Bohrungen werden nicht berücksichtigt. Andere Formen müssen leiterplattenspezifisch berechnet werden.
- Aufgrund der unregelmäßigen Oberfläche und dem Vorhandensein von Innenflächen bei Steckern wird allgemein die doppelte Oberfläche eines Quaders (ohne Grundfläche) angenommen.

Beispielwerte von Standardbauteilen zur Bestimmung der Bauteiloberfläche siehe Tabelle 29 im Anschluss.

Tab. 29: Beispielwerte von Standardbauteilen zur Bestimmung der Bauteiloberfläche

Funktion	Bauform	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Geometrie	Oberfläche [mm ²]
Resistor	0201	0,60	0,30	0,23	Quader	0,59
Resistor	0402	1,00	0,50	0,32	Quader	1,46
Resistor	0603	1,55	0,85	0,45	Quader	3,48
Resistor	0805	2,00	1,25	0,52	Quader	5,88
Resistor	1206	3,20	1,60	0,55	Quader	10,40
Resistor	1210	3,20	2,50	0,55	Quader	14,27
Resistor	1812	4,50	3,20	0,60	Quader	23,64
MLCC	0402	1,00	0,50	0,50	Quader	2,00
MLCC	0603	1,60	0,80	0,80	Quader	5,12
MLCC	0805	2,00	1,25	0,85	Quader	8,03
MLCC	1206	3,20	1,60	1,15	Quader	16,16
MLCC	1210	3,20	2,50	2,00	Quader	30,80
MLCC	1808	4,50	2,00	1,02	Quader	22,26
Shunt	2010	5,08	2,54	0,64	Quader	22,58
Shunt	2512	6,35	3,05	0,70	Quader	32,53
Shunt	2725	6,90	6,60	2,40	Quader	110,34
Shunt	2816	7,10	4,20	0,80	Quader	47,90
Shunt	3920	10,00	5,20	0,50	Quader	67,20
Tantal	A	3,20	1,60	1,60	Quader	20,48
Tantal	B	3,50	2,80	1,90	Quader	33,74
Tantal	C	6,00	3,20	2,60	Quader	67,04
Tantal	D	7,30	4,30	2,80	Quader	96,35
Quartz	3225	3,20	2,50	0,90	Quader	18,26
Quartz	5032	5,00	3,20	1,00	Quader	32,40
Inductor(Chip)	0402	0,95	0,45	0,45	Quader	1,69
Inductor(Chip)	0603	1,45	0,80	0,80	Quader	4,76
Inductor(Chip)	0805	2,00	1,25	0,85	Quader	8,03
Varistor	0603	1,60	0,80	0,90	Quader	5,60
Varistor	0805	2,01	1,25	1,02	Quader	9,16

Funktion	Bauform	Durchmesser [mm]	Höhe [mm]	Geometrie	Oberfläche [mm ²]
Melf-Resistor	0102	1,10	2,20	Zylinder	9,50
Melf-Resistor	0204	1,40	3,60	Zylinder	18,91
Melf-Resistor	0207	2,20	5,80	Zylinder	47,69
Capacitor	SMD Al-Cap	6,90	18,50	Zylinder	438,42
Capacitor	SMD Al-Cap	8,50	18,50	Zylinder	550,76
Capacitor	axial Al-Cap	8,00	8,50	Zylinder	263,89
Capacitor	axial Al-Cap	10,50	18,50	Zylinder	696,84
Capacitor	axial Al-Cap	10,50	25,00	Zylinder	911,26
Capacitor	axial Al-Cap	10,50	30,50	Zylinder	1092,69
Capacitor	axial Al-Cap	13,00	30,50	Zylinder	1378,37
Capacitor	axial Al-Cap	15,50	30,50	Zylinder	1673,88
Capacitor	axial Al-Cap	16,50	39,90	Zylinder	2282,09
Capacitor	axial Al-Cap	18,00	20,00	Zylinder	1385,44
Capacitor	axial Al-Cap	18,50	30,50	Zylinder	2041,45
Capacitor	axial Al-Cap	18,50	41,50	Zylinder	2680,76
Capacitor	axial Al-Cap	21,50	41,50	Zylinder	3166,14

Abb. 111.1: Abklärungsbogen „Umgebungsauberkeit“

Index: 01.2017


ZVEI:
Die Elektroindustrie

Abklärungsbogen Umgebungsauberkeit

Auszufüllen vom Anforderer

Auftraggeber	Analyselabor
Firma: <input type="text" value="Musterfirma GmbH"/>	Firma: <input type="text" value="Musterfirma GmbH"/>
Straße/Nr.: <input type="text" value="Musterstr. 2"/>	Straße/Nr.: <input type="text" value="Musterstr. 2"/>
PLZ Ort: <input type="text" value="12345"/> <input type="text" value="Musterstadt"/>	PLZ Ort: <input type="text" value="12345"/> <input type="text" value="Musterstadt"/>
Ansprechpartner: <input type="text" value="Max Mustermann"/>	Ansprechpartner: <input type="text" value="Max Mustermann"/>
Telefon od. Handy: <input type="text" value="01234 56789"/>	Telefon od. Handy: <input type="text" value="01234 56789"/>
E-Mail: <input type="text" value="max.mustermann@e_mail.de"/>	E-Mail: <input type="text" value="max.mustermann@e_mail.de"/>

Informationen zur Partikelfalle:

Nr. Partikelfalle: <input type="text" value="10"/> von <input type="text" value="20"/>	<p style="text-align: center;">Ggf. Bild:</p> <div style="text-align: center;">  </div>
Aufstellungsort: <input type="text" value="Maschine 4711"/>	
Aufstellhöhe [in m]: <input type="text" value="1,0"/>	
Fläche der Falle [in cm ²]: <input type="text" value="15,2"/> <i>Bei Verwendung eines Partikelstempels (Fläche x Anzahl der Stempel)</i>	
Durchführender Mitarbeiter: <input type="text" value="Max Mustermann"/>	
Aufstellungszeitraum: <input type="text"/>	
Aktivierung: <input type="text" value="TT.MM.JJJJ"/> <input type="text" value="HH:MM"/> Uhr	
Deaktivierung: <input type="text" value="TT.MM.JJJJ"/> <input type="text" value="HH:MM"/> Uhr	
Dauer [in h]: <input type="text" value="167,25"/>	

Auszufüllen vom Fachpersonal

Angabe zur Analyse

Lichtmikroskop
 Lichtmikroskop m. Polarisationsfilte
 REM / EDX

Details: _____

Auswertungen: Partikelgrößenklasse von bis

Algorithmus zur dimensionalen Bestimmung:

Partikel: Ferret max. _____

Fasern: Ferret max.
 gestreckte Länge
 Verhältnis 10/1

Abb. 111.2: Abklärungsbogen „Umgebungssauberkeit“

Index: 01.2017



Partikelzählung			
<input checked="" type="checkbox"/>	Metallisch glänzende Partikel	<input checked="" type="checkbox"/>	Fasern
<input type="checkbox"/>	Korund/Sand	<input type="checkbox"/>	_____
<input checked="" type="checkbox"/>	Nicht metallisch glänzende Partikel		
Partikelzählung nach:		<input checked="" type="checkbox"/>	Länge
<input type="checkbox"/>	Breite	<input type="checkbox"/>	_____
Partikelanzahl		Illig-Wert	
<input checked="" type="checkbox"/>	CCC	<input checked="" type="checkbox"/>	Pro Falle
<input checked="" type="checkbox"/>	Pro 1.000 cm ²	<input checked="" type="checkbox"/>	Metallisch glänzende Partikel
		<input checked="" type="checkbox"/>	Nicht metallisch glänzende Partikel
		<input checked="" type="checkbox"/>	Fasern
		<input checked="" type="checkbox"/>	Gesamt mit Fasern
		<input checked="" type="checkbox"/>	Gesamt ohne Fasern
Verbleib der Partikelfallen			
<input checked="" type="checkbox"/>	Partikelfallen zurückschicken	<input type="checkbox"/>	Partikelfallen verschrotten
Darstellung der Ergebnisse			
Größe und Anzahl Partikel mit Bildern für:		<input checked="" type="checkbox"/>	Gesamt Filter als Bild
<input checked="" type="checkbox"/>	Metallisch glänzende Partikel	4	
<input checked="" type="checkbox"/>	Nicht metallisch glänzende Partikel	4	
<input checked="" type="checkbox"/>	Fasern	3	
Anzeige der Partikel mit Bildern:		<input checked="" type="checkbox"/>	Länge
<input checked="" type="checkbox"/>	Breite	<input type="checkbox"/>	_____
Die größten Partikel nach:		<input checked="" type="checkbox"/>	Länge
<input type="checkbox"/>	Breite	<input type="checkbox"/>	_____
Bericht			
Sprachen des Berichts:		Versand über:	
<input checked="" type="checkbox"/>	Deutsch	<input checked="" type="checkbox"/>	E-Mail
<input checked="" type="checkbox"/>	Englisch	<input type="checkbox"/>	Sonstig
<input type="checkbox"/>	_____	<input type="checkbox"/>	_____
Dateiformat:			
<input checked="" type="checkbox"/>	JJJJ-MM-TT_Analyse Nr.	<input type="checkbox"/>	_____
Voraussichtlicher Versand der Partikelfallen:		TT.MM.JJJJ	Terminwunsch: KW
_____	Max Mustermann	TT.MM.JJJJ	KW_JJJJ
Auftraggeber: (Name, Datum)			

Abb. 112.1: Abklärungsbogen „Bauteilsauberkeit“

Index: 01.2017



Abklärungsbogen Bauteilsauberkeit

Auszufüllen vom Anforderer


Auftraggeber		Analyselabor	
Firma: <input type="text" value="Musterfirma GmbH"/>		Firma: <input type="text" value="Musterfirma GmbH"/>	
Strasse/Nr.: <input type="text" value="Musterstr. 2"/>		Strasse/Nr.: <input type="text" value="Musterstr. 2"/>	
PLZ Ort: <input type="text" value="12345"/> <input type="text" value="Musterstadt"/>		PLZ Ort: <input type="text" value="12345"/> <input type="text" value="Musterstadt"/>	
Ansprechpartner: <input type="text" value="Max Mustermann"/>		Ansprechpartner: <input type="text" value="Max Mustermann"/>	
Telefon od. Handy: <input type="text" value="01234 56789"/>		Telefon od. Handy: <input type="text" value="01234 56789"/>	
E-Mail: <input type="text" value="max.mustermann@e_mail.de"/>		E-Mail: <input type="text" value="max.mustermann@e_mail.de"/>	
Informationen zum Prüfling:			
Bezeichnung: <input type="text" value="Artikel 123456"/>	Ggf. Bild mit Skalierung: 		
Projektnummer/bezeichnung: <input type="text" value="Projekt:11111"/>			
Bauteilnummer: <input type="text" value="123456789"/>			
Bemerkungen: <input type="text"/>			
Kunde: <input type="text" value="Musterfirma GmbH"/>			
Zu analysierender Bereich:			
<input checked="" type="checkbox"/> <input type="text" value="Gesamt"/>	<input type="text" value="Prüflosgröße je Analyse: 26"/>		
<input type="checkbox"/> <input type="text" value="Bereich definieren"/>	<input type="text" value="Anzahl der Analysen: 3"/>		
<input checked="" type="checkbox"/> <input type="text" value="Oberfläche/Bauteil [cm²] 39,04"/>	<input type="text" value="Gesamtfläche cm² 1015"/> <i>[1000cm² anstreben]</i>		
Entnahmebedingungen (Zur Dokumentation beim Auftraggeber)			
Wer: <input type="text" value="Max Mustermann"/>	Wo: <input type="text" value="Versand"/>		
Wann: <input type="text" value="TT.MM.JJJJ"/>	Wie: <input type="text" value="Handentnahme mit Handschuhen aus Serien-Verpackung"/>		
Anforderungen			
Prüfspezifikation: <input type="text" value="Musterfirma GmbH 1234"/>	Mit Ausreißerregelung: <input type="checkbox"/> Ja <input checked="" type="checkbox"/> Nein		
Details: <input art="" berücksichtigt"="" glas="" jede="" korund,="" nicht="" quarz,="" sand,="" strahlgut\"="" type="text" und="" value="\" von="" werden=""/>	Details: <input type="text"/>		
Anforderungsspezifikation: <input type="text" value="Musterfirma GmbH 5678"/>	Mit Eskalationsstrategie: <input type="checkbox"/> Ja <input checked="" type="checkbox"/> Nein		
Details: <input type="text" value="Zielwert 800µm"/>	Details: <input type="text"/>		
Wird eine Abklümmessung benötigt?:			
<input type="checkbox"/> Ja <input checked="" type="checkbox"/> Nein <input type="checkbox"/> <input type="text" value="Vorgabe siehe Prüfspezifikation"/> <input type="checkbox"/> <input type="text" value="Bereits erstellt:"/>			
<input type="checkbox"/> <input type="text" value="Bauteilfamilie, Verifizierung der Parameter durch Zweifachmessung (mit Verweis auf Prüfspezifikation)"/>			

Abb. 112.2: Abklärungsbogen „Bauteilsauberkeit“

Index: 01.2017



Auszufüllen vom Fachpersonal / Nach Rücksprache mit Labor

Angabe zur Analyse

Lichtmikroskop Lichtmikroskop mit Polarisationsfiltere REM / EDX _____

Details: _____

Mit Gravimetrie Ja Nein

Auswertungen: Partikelgrößenklasse von E [50µm] bis N [> 3000µm]

Details: _____

Algorithmus zur dimensional Bestimmung:

Partikel: Ferret max. _____

Fasern: Ferret max. Gestreckte Länge Verhältnis 10/1

Partikelzählung

Metallisch glänzende Partikel Fasern Korund / Sand _____

Nicht metallisch glänzende Partikel

Partikelanzahl

CCC Pro Prüflös Pro 1000 cm²
 Pro Bauteil

Oberflächensauberkeitswert (OSW)

Metallisch glänzende Partikel
 Nicht metallisch glänzende Partikel
 Fasern
 Gesamt mit Fasern Gesamt ohne Fasern

Filtrierung

Filtrierungsart: Kaskadenfiltrierung Filterart: PET - Siebgewebefilter _____ [z. B. 5µm]
 Einfachfiltrierung Porenfilter _____ 5µm
 _____ Zellulosefilter _____

Verbleib der Teile & Filter

Proben zurückschicken Proben verschrotter
 Filter Zuschicken In Diarahmen Laminiert (Folie) Elektronisch & Archivierung im Labor
 Filter Entsorgen

Abb. 112.3: Abklärungsbogen „Bauteilsauberkeit“

Index: 01.2017 **ZVEI:**
Die Elektroindustrie

Darstellung der Ergebnisse

Größe und Anzahl Partikel mit Bildern für: Gesamt Filter als Bild

Metallisch glänzende Partikel 4

Nicht metallisch glänzende Partikel 4

Fasern 3

Anzeige der Partikel mit Bildern: Länge Breite _____

Die größten Partikel sortiert nach: Länge Breite _____

Verpackung

Originalverpackung PE-Beutel antistatisch Verpackung ist Bestandteil der Prüfun

Vorbereitung im Labor

Anlösen Demontage Entmagnetisierung Vorreinigung _____

Bericht

Video zu den Prüflingen: Nein Je Abklingsmessung Je Analyse

Sprachen des Berichtes: Deutsch Englisch

Versand über: E-Mail Sonstige

Dateiformat: JJJJ-MM-TT_Analyse Nr. _____

Vorraussichtlicher Versand der Proben: TT.MM.JJJJ Terminwunsch: KW KW_JJJJ

Max Mustermann TT.MM.JJJJ

Auftraggeber: (Name, Datum)

3 Erstellt von: xxx Datum: 08.02.2017



ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik-
und Elektronikindustrie e.V.
Lyoner Straße 9
60528 Frankfurt am Main
Telefon: +49 69 6302-0
Fax: +49 69 6302-317
E-Mail: zvei@zvei.org
www.zvei.org

