

Funktionale Schichten in Leiterplatten
Entwicklung von intelligenten
Mikrovibrationssensoren in mehrdimensionaler
Leiterplattentechnologie

Zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

der Fakultät für Maschinenbau

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

genehmigte

Dissertation

von

Dipl. Ing. Thomas Blank

Tag der mündlichen Prüfung: 8. 11. 2013

Hauptreferent: Prof. Dr. V. Saile

Korreferent: Prof. Dr. H. Gemmeke

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand am Institut für Prozessdatenverarbeitung und Elektronik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). Ich möchte mich an dieser Stelle bei all jenen bedanken, die mir mit Rat und Tat zur Seite standen und damit zum Gelingen dieser Arbeit beitrugen.

Ich möchte mich besonders bei Herrn Prof. Dr. V. Saile und Herrn Prof. Dr. H. Gemmeke für die Ermöglichung der Dissertation bedanken.

Ebenso danke ich den Kollegen M. Bruns, U. Geckle und V. Trouillet vom IAM-ESS, die mich beim Anfertigen von zahlreichen Spektren und Analysen unterstützt haben. Ferner bedanke ich mich bei Herrn R. Prang vom INT und R. Mönig vom IAM-WBM für die Erstellung der FIB-SEM Bilder. Danken möchte ich auch Herrn B. Leyrer und T. Piller vom IPE, die mich in vielen technischen Angelegenheiten unterstützt haben.

Ferner danke ich Herrn Hörhold von der Heger GmbH und der Heger GmbH selbst für die Geduld und Unterstützung bei dem Aufbau der Leiterplatten.

Mein besonderer Dank gebührt meiner Familie für die Geduld und Unterstützung in den letzten Monaten.

Kurzfassung

Leiterplatten sind preiswerte Bauteilträger für elektronische Systeme. Sie werden aus hochwertigen, glasfaserverstärkten und kupferkaschierten Kunststoffplatten aufgebaut. Die elektronischen Komponenten werden auf den Außenseiten der Platten aufgebracht. Die Forderungen des Marktes nach immer kleineren elektronischen Systemen haben zu Entwicklungen geführt, Bauteile auch in das Innere der Leiterplatte zu integrieren. Dieser Ansatz ist Gegenstand meiner Arbeit mit der Zielsetzung, intelligente Mikrovibrationssensoren in Leiterplattentechnik aufzubauen. Vibrations- bzw. Bewegungssensoren wurden aufgrund ihres breiten technischen Anwendungsspektrums sowie ihrer großen wirtschaftlichen Relevanz ausgewählt. Das Sensorprinzip basiert auf einer Kugel, die im Inneren einer Kavität der Leiterplatte zwei Kontaktflächen elektrisch miteinander verbinden oder voneinander trennen kann. Dieses Sensorprinzip ist bereits seit mehr als 100 Jahren bekannt. Klassische Kugelsensoren werden bisher jedoch meist in bedrahteten, metallischen Gehäusen mit großen physikalischen Abmessungen angeboten. Die Verwendung von Kugelsensoren bietet sich an, wenn lediglich der Bewegungszustand eines Gerätes erkannt werden muss, eine quantitative Erfassung der Beschleunigung jedoch nicht erforderlich ist. Dies ist beispielsweise bei batteriebetriebenen Fahrradbeleuchtungen, Schrittzählern, GPS gestützten Navigationssystemen, Fernbedienungen und anderen batteriebetriebenen Systemen der Fall. Große Kugelsensoren können jedoch aufgrund des eingeschränkten Bauraums nicht in diese Geräten integriert werden.

Die größte Herausforderung für die Realisierung von Mikrovibrationssensoren in Leiterplattentechnik bestand in der Entwicklung geeigneter, serientauglicher Fertigungs- und Qualitätssicherungsverfahren. Daher waren bereits beim Systementwurf Kosten, Qualitäts- und Materialaspekte sowie Anforderungen an die Lebensdauer und Einsatzbedingungen (Temperatur, Beschleunigung) zu berücksichtigen.

Für die Umsetzung der Aufbaukonzepte verschiedener Mikrovibrationssensortypen wurde eigens eine neue CAD-Entwurfsmethodik entwickelt, da für die Integration von funktionellen Schichten in die Leiterplatte bisher noch keine geeigneten Entwurfswerkzeuge existierten. Mit dieser Methodik wurden auch hochintegrierte, „intelligente“ Mikrovibrationssensoren entwickelt, bei denen gemeinsam mit der Kugel ein gedünnter, ungehäuster Mikrocontroller in die Leiterplatte eingebettet wurde. Als besonders vorteilhaft erwies sich dabei die gleichzeitige Entwicklung der Fertigungs- und Testverfahren. Die Anwendung systematischer Qualitätssicherungsprozesse führte schließlich zur kontinuierlichen Verbesserung der Herstell- und Prüfprozesse, wobei die elektrische Charakterisierung der Sensoren eine zentrale Stellung bei den Qualitätstests eingenommen hat. Elektrisch defekte Sensoren wurden eingehend mit oberflächenanalytischen Methoden untersucht.

Nach mehreren Optimierungszyklen konnten stabile Fertigungsausbeuten von weit über 90% erreicht werden - bei einer Jahresproduktionsrate von mehr als zwei Millionen Sensoren. Dabei entsprechen die Sensoren den preislichen und qualitativen Anforderungen des Marktes. Sie können in einem Temperaturbereich von -40 °C bis $+85\text{ °C}$ betrieben werden und widerstehen mehr als drei Millionen mechanischen Stößen von bis zu 40 m/s^2 . Die überdurchschnittliche technische Leistungsfähigkeit und wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit der Mikrovibrationssensoren im Vergleich zu herkömmlichen Kugelsensoren sind auf die innovativen Herstellungsverfahren in Leiterplattentechnik zurückzuführen. Derzeit werden bis zu 108.800 Sensoren in einem Fertigungslos gefertigt. Der elektrische Funktionstest der Sensoren erfolgt automatisch, wobei 1360 Sensoren in weniger als einer Minute charakterisiert werden können. Damit genügen die in der Arbeit entwickelten Entwurfs- und Herstellprozesse für die Mikrovibrationssensoren in Leiterplattentechnik den Anforderungen der Serienreife. Die Verfahren zur Herstellung der Mikrovibrationssensoren wurden in der Zwischenzeit an die Sensolute GmbH lizenziert, einer Ausgründung aus dem KIT.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	5
2.1	Mikromechatronische Produktentstehungsprozesse.....	5
2.1.1	Anwendung und Adaption der V-Methodik auf Mikrovibrationssensoren	7
2.2	Materialauswahl und -verträglichkeit.....	8
2.2.1	Gesetzliche Anforderungen an Materialien für elektronische Produkte.....	8
2.2.2	Marktanforderung an „grüne“ Elektronikmaterialien	9
2.3	Materialien für Mikrokugeln	9
2.4	Materialien für Leiterplatten.....	10
2.4.1	Epoxidharze	11
2.4.2	Reaktionsbeschleuniger und Härtemittel für Epoxidharze	12
2.4.3	Flammschutzmittel	13
2.4.4	Glasfasermaterialien	14
2.4.5	Leiterplattenkerne, Prepregs und Klebefilme	15
2.5	Diffusionsprozesse in Metallen	18
2.6	Eigenschaften elektrischer Kontakte	20
2.6.1	Ideal reine Kontaktwiderstände	22
2.6.2	Fremdschichtbelegte Kontaktwiderstände	23
2.6.3	Oberflächenrauheit	25
2.6.4	Schwingungsreibverschleiß	26
2.6.5	Kontaktmaterialien	27
2.7	Galvanikprozesse.....	29
2.7.1	Elektrochemische Prozesse.....	30
2.7.2	Elektromotorische Kraft	31
2.7.3	Die elektrolytische Doppelschicht	33
2.7.4	Ströme und Massentransport in elektrochemischen Prozessen.....	34
2.7.5	Hemmungen des Stofftransportes	36
2.7.6	Adsorptionseffekte.....	37
2.7.7	Kristallwachstum	39
2.7.8	Streifähigkeit und gleichmäßige Schichtabscheidung	40
2.7.9	Fremdmetall- und Unterpotenzialabscheidung	42
2.7.10	Elektrochemische Metallabscheidung	43
2.7.11	Metallauflösung und Korrosion	45
2.8	Herstellungsverfahren für Mikrokugeln	47
2.9	Herstellungsverfahren für Leiterplatten	48

2.9.1	Lithografische Prozesse	49
2.9.2	Mechanische Produktionsverfahren.....	50
2.9.3	Verarbeitung von Leiterplatten bei erhöhten Temperaturen.....	54
2.9.4	Laminier-Prozesse	55
2.10	Elektronische Signalerfassung.....	56
2.10.1	Schmitt-Trigger Schaltungen.....	56
2.10.2	Pegel- und flankengesteuerte Digitalisierung	57
2.10.3	Erfassung von Bewegungssignalen	58
2.11	Integration funktionaler Schichten in Leiterplatten.....	60
2.12	Aufbau und Funktionsweise von Kugelschaltern.....	61
2.12.1	Funktionsweise von Kugelschaltern und Mikrovibrationssensoren	61
2.12.2	Aufbauarten von Kugelschaltern, Stand der Technik	63
2.13	Qualitätssicherung	64
2.13.1	Der DMAIC-Prozess der Qualitätssicherung.....	65
3	Integration mechanischer Funktionselemente in die Leiterplatte	66
3.1	Aufbau von Mikrovibrationssensoren in Leiterplattentechnik	66
3.1.1	Einseitig und omnidirektional empfindliche Mikrovibrationssensoren.....	66
3.1.2	Bewegungsgehemmte Mikrovibrationssensoren	68
3.1.3	SCiBO - Hochintegrierte, intelligente Mikrovibrations-Sensorsysteme.....	69
3.2	Sensorische Eigenschaften von Mikrovibrationssensoren	71
3.2.1	Empfindlichkeit des Sensors.....	71
3.2.2	Ansprechschwelle von Mikrovibrationssensoren	71
3.2.3	Sensorverhalten bei oszillierender, mechanischer Anregung	72
3.2.4	Stromtragfähigkeit	73
3.3	Elektronische Betriebsstrategien für Mikrovibrationssensoren.....	74
3.3.1	Sensorsysteme mit Mikrovibrationssensoren	74
3.3.2	Intelligente Mikrovibrationssensorsysteme	75
3.3.3	Auswerteschaltungen für Test- und Qualifizierungszwecke	77
4	Herstellungsprozesse für Mikrovibrationssensoren	79
4.1	Design for Manufacturing	79
4.1.1	Entwurfsmethodik für Mikrovibrationssensoren	80
4.2	Produktentwurf.....	81
4.2.1	Dreidimensionaler Entwurf der Sensorzelle	81
4.2.2	Erzeugung fertigungsoptimierter Produktionsdaten	82
4.2.3	Qualitätsgerechter Produktentwurf	84
4.3	Materialauswahl	85

4.3.1	Basismaterialien, Prepregs und Kleber	85
4.3.2	Materialien zur Oberflächenveredelung	87
4.4	Mechanische Bearbeitungsprozesse der Mikrovibrationssensoren	88
4.4.1	Bohrprozesse.....	88
4.4.2	Vereinzelung der Sensoren	89
4.5	Galvanikprozesse.....	93
4.5.1	Kupferabscheidung	93
4.5.2	Galvanische Edelmetallabscheidung	96
4.5.3	Chemische Metallabscheidung	98
4.6	Herstellung der Leiterplattenkerne und Prepregs	99
4.7	Oberflächenreinigungsprozesse.....	100
4.8	Kleberdeposition und –vorbehandlung.....	102
4.9	Laminierprozesse für Mikrovibrationsschalter.....	104
4.10	Befüllung der Kugeln	105
4.11	Sensor-Endmontage.....	105
4.12	Verpackung und Transport	106
4.13	Verfahren zur Herstellung intelligenter Mikrovibrationssensoren	108
5	Test- und Qualitätssicherungsverfahren	111
5.1	Qualitätsanforderungen	111
5.1.1	Produktanforderungen	111
5.2	Schädigungsmechanismen.....	112
5.2.1	Thermische Prozessbeanspruchungen	112
5.2.2	Schädigungen durch Lötprozesse	113
5.3	Prüfung von Umwelteinflüssen	115
5.4	Löttest.....	116
5.5	Design for Testability	116
5.6	Prüfgerechte Sensoranordnung auf dem Wafer	117
5.7	Automatisierte elektronische Produktqualifikation	118
5.7.1	Elektrische Funktionsprüfung mit dem Testsystem <i>VT-I</i>	118
5.7.2	Optimierung des elektrischen Funktionstests	118
5.7.3	Elektrische Funktionsprüfung mit dem Testsystem „ <i>ElFuTe</i> “	119
5.8	Mechanische Produktqualifikation	125
5.9	Schnelltestverfahren zur Qualifizierung galvanischer Prozesse.....	126
6	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess	127
6.1	DMAIC Prozess für Mikrovibrationssensoren	128
6.2	Qualitätssicherung externer Prozesse	130

6.3	Prozessverträglichkeiten.....	131
6.4	Analytikverfahren für die Prozessentwicklung	132
6.4.1	Organische Kontamination der Sensorflächen.....	132
6.4.2	Fremdmetalle in Edelmetallschichten.....	135
7	Zusammenfassung und Diskussion	141
Anhang A		144
A.1	Symmetrischer Schmitt-Trigger.....	144
A.2	Asymmetrischer Schmitt-Trigger	145
A.3	Erfassung von Bewegungssignalen.....	146
A.4	Pneumatische Positioniersysteme	147
A.5	Elektromotorische Positioniersysteme	148
A.6	Ableitung für den Kippwinkel für bewegungsgehemmte Mikrovibrationssensoren	154
A.7	Adaptiver Filteralgorithmus für den PIC12LF1822.....	155
Literaturverzeichnis		156
Bildverzeichnis		173
Tabellenverzeichnis		176

1 Einleitung

Eine Leiterplatte mit integrierten Funktionsschichten ist ein gedruckter Schaltungsträger, in dessen Innenraum Funktionen realisiert werden, welche über die für die Leiterplattentechnologie übliche Strom- und Signalverteilung hinausgehen.

Die Herstellung von Leiterplatten oder gedruckten Schaltungen geht auf das Jahr 1943 zurück. Paul Eisler hat in der Patentschrift „Manufacture of Electric Circuits and Circuits Components“ (Eisler & Strong, 1943) bereits wesentliche Grundzüge der Leiterplattenherstellung beschrieben, die auch heute noch Anwendung finden. Im Jahr 1963 wurde die Mehrebenenschaltung patentrechtlich das erste Mal erwähnt. Kern dieser Erfindung ist die Herstellung von Durchkontaktierungen mit chemisch abgeschiedenen Kupferschichten (Bedson & et al., 1963). Heute wird die Leiterplatte als Bauteilträger definiert, der aus einem isolierenden Werkstoff mit elektrisch leitenden, festhaftenden Verbindungen besteht. Sie fungiert als „mechanischer Träger von Bauelementen und verbindet diese durch elektrisch leitende Bahnen“ (VDE/VDI, 1999).

In den 1960ern wurden auch erste Leiterplatten mit oberflächenmontierten Bauteilen, sogenannten „Surface Mounted Device“ vorgestellt. Die SMD-Technologie erlebte ihren industriellen Durchbruch jedoch erst Ende der 1980er (Beine, 2012). Sie dominiert die Aufbautechnik für elektronische Schaltungen bis heute. Die Motivation für die Einführung der SMD-Technik bestand damals in der Erhöhung der Bauteildichte auf der Leiterplattenoberfläche. Ferner ermöglichte die SMD-Technik einen höheren Automatisierungsgrad im Vergleich zu der bis dahin vorherrschenden Aufbautechnik mit bedrahteten Komponenten.

Noch heute besteht ein Weiterentwicklungsbedarf der Leiterplattentechnik, bedingt durch die Marktforderung nach immer kleineren und leistungsfähigeren elektronischen Systemen. Mit neuen und verbesserten lithografischen Prozessen, hochpräzisen mechanischen Bearbeitungszentren, innovativen Laserstrukturierungstechniken, optimierten Galvanik- und Ätzprozessen, aber auch kontinuierlich weiterentwickelten Materialien versucht man, die Anforderungen des Marktes nach höheren Integrations- und Funktionsdichten zu erfüllen. Heute definieren in Europa Leiterplatten mit Leiterbahnabständen von 100 μm den Stand der Technik (Moitzi, 2007). In Asien werden Leiterplatten mit einem Pitch von unter 40 μm bei einem Aspektverhältnis von 1,5 hergestellt (Fujimoto & et. al., 2011).

Trotz der beeindruckenden technischen Weiterentwicklung der Leiterplattentechnologie und der Miniaturisierung elektronischer Bauteile kann der auf der Leiterplatte zur Verfügung stehende Bauraum die Forderungen des Marktes nach höheren Integrationsdichten bei Weitem nicht befriedigen. Dieser Engpass offenbarte sich bereits vor etwa 35 Jahren. Deshalb integrierte die Firma Ohmega Widerstände in die Leiterplatte, indem sie anstelle der Kupferfolien ätztechnisch strukturierbare Widerstandsfolien nutzte (Ohmega Tech., Inc., 2013). Die ersten Konzepte, Chips in Platten zu integrieren, gehen in die 1980er zurück. Sie wurden für die Herstellung von Chipkarten genutzt (Badet & et al., 1980) und waren damit die Vorläufer der Verfahren, die auch heute noch zur Herstellung von Kredit- und Bankkarten verwendet werden. Methoden, mehrere komplexe Bauteile in Leiterplatten zu integrieren, wurden erst in den letzten fünf bis zehn Jahren vorgestellt. Eine mögliche Prozesskette wurde in dem EU-Projekt „hermes“ entwickelt und demonstriert (Wolkenstein, 2008). Mittlerweile wird eine Vielzahl unterschiedlicher Funktionalitäten in die Leiterplatte integriert, um den Bauraum auf der Oberfläche für andere Aufgaben zu nutzen oder das System als Ganzes zu verkleinern.

Tabelle 1-1 zeigt eine Übersicht der Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Integration funktionaler Schichten in Leiterplatten. Derzeit befasst man sich mit der Technologieentwicklung für die Integration leistungselektronischer Bauteile in die Leiterplatte sowie mit Fragen der Entwärmung und Einbettung signalverarbeitender Komponenten. Die Integration mechanischer Komponenten in die Leiterplatte für den Aufbau mikromechatronischer Systeme ist weitgehend unbekannt.

Integrierte Funktionen/Komponenten	Technologie
<u>Dickkupferelemente</u> Entwärmung & Stromtragfähigkeit	Massive Kupferschienen/Dickkupferlagen (Andus GmbH, 2012), (Foley, 2010)
<u>Leistungselektronische Halbleiter</u> Verbesserte Kühlung, bessere Kontakttechnik, höhere Stromtragfähigkeit	Einlaminierten und Sintern von leistungselektronischen Halbleitern (Power-Mosfets & IGBTs) (ProPower, 2012)
<u>Si-Chip</u> Erhöhung der Integrationsdichte und Realisierung von Sicherheitsfunktionen (Schutz vor Raubkopie)	Einlaminierten von gedünnten Chips (hermes, 2008), (Endler, 2012)
<u>Fluidkanäle</u> Entwärmung	Einbringen von Kanälen in die Leiterplatte (Schweizer Electronic AG, 2009)
<u>Widerstände</u> Erhöhung der Integrationsdichte, Zuverlässigkeit	Geätzte Folien (Ohmega Tech., Inc., 2013), Siebdruck & Lasertrimmung (Würth Elektronik GmbH, 2009)
<u>Spulen</u> Erhöhung der Integrationsdichte	Mehrlagige geätzte Cu-Leiterbahn in Spulenform (keine klassische Integrationstechnologie) (Würth Elektronik GmbH, 2012)
<u>Kondensatoren</u> Erhöhung der Integrationsdichte, Zuverlässigkeit und Leistung in HF-Schaltungen	Verwendung dielektrischer Folien für das Verkleben von Leiterplattenkernen (Andresakis & et al., 2006), (Waffenschmidt, 2005) Einbetten von diskreten Kondensatoren für die LED-Beleuchtungssysteme (Hofmann Leiterplatten, 2012)
<u>Optische Komponenten</u> Erhöhung der Integrationsdichte, Erhöhung der Datenübertragungsraten	Einbringen von Glasfasern oder polymeren Lichtwellenleitern in die Leiterplatte (Schneider, Kühner, & et al., 2010)
<u>Mechanische Komponenten</u>	?

Tabelle 1-1: Forschungsaktivitäten zur Einbettung funktionaler Schichten in Leiterplatten

Aus dieser Forschungslücke leiten sich die Ziele der Arbeit ab. Sie bestehen in der Entwicklung neuer Prozesstechniken und Methoden, mit denen mechanische Komponenten in die Leiterplatte integriert werden können. Die zu entwickelnden Prozessketten sollen industriellen Ansprüchen genügen, damit der Technologietransfer aus der Forschung in kommerzielle Anwendungen erleichtert wird. Daher sind sowohl ein hoher Automatisierungsgrad als auch Qualitätsstandards anzustreben, die über den Nachweis der grundlegenden Funktionsfähigkeit hinausgehen. Eine besondere Relevanz erlangen dabei die Qualitäts- und Prüfverfahren. Ohne automatisierte, inline- oder quasi-inline-fähige Prüfmethoden ist eine automatisierte Fertigung komplexer und fehlerbehafteter Systeme nicht möglich. Daher sind für die Erreichung der Qualitätsstandards automatisierte Testsysteme zu entwickeln.

Daneben sollen Verfahren entwickelt und prototypisch demonstriert werden, welche die dreidimensionale Integration mechanischer Komponenten und ungehäuster Silizium-Chips in das Innere der Leiterplatte ermöglichen. Der Integrationsgrad soll hinsichtlich des zur Verfügung stehenden Bauraums optimiert werden, sodass hochkompakte mikromechatronische Systeme in Leiterplattentechnik erstellt werden können.

Die grundlegenden Verfahren und Technologien sollen am Beispiel intelligenter Mikrovibrationssensoren in Leiterplattentechnik evaluiert werden. Kern des Sensors ist eine frei bewegliche Mikrokugel, die in eine Kavität im Inneren der Leiterplatte eingebracht wird. Durch die Bewegung der Kugel wird ein elektrischer Kontakt geöffnet und geschlossen. Die dadurch gegebenen Schaltimpulse werden zur Detektion der Vibration des Sensors benutzt. Der Nachweis der Funktionsfähigkeit einer industriefähigen Prozesskette soll an einem Mikrovibrationssensor erbracht werden,

- dessen Volumen weniger als 15 mm³ misst,
- dessen Lebensdauer eine Millionen Schaltimpulse übersteigt,
- der quaderförmige Außenabmessungen aufweist,

- der vollautomatisch in RoHS¹ konformen SMT²-Prozessen verarbeitbar ist,
- dessen Ansprechschwelle unterhalb eines Beschleunigungswertes von 1 m/s² liegt,
- der in einem Spannungsbereich von 2,5 – 24 V einsetzbar ist,
- der in einem Temperaturbereich von -20 °C bis + 70 °C betrieben werden kann,
- und dessen Zielpreis bei geringen Produktionsmengen von 100.000 Sensoren pro Jahr unter 0,50 €/pro Stück liegt.

Die Motivation zur Entwicklung von Bewegungssensoren ergibt sich aus einem großen Marktpotenzial und ökologischen Aspekten. Man findet diese Sensoren ebenso in sicherheitskritischen automotiven Applikationen wie in Anwendungsfeldern des täglichen Gebrauchs. Zu den automotiven Anwendungen gehören beispielsweise Airbags oder Fahrdynamiksysteme, in täglichen Gebrauchsgegenständen werden Bewegungssensoren in Laptops und Tablets, Spielen und drahtlosen Kommunikationssystemen, insbesondere Smartphones eingesetzt. Die wirtschaftliche Relevanz dieser Märkte kann aus der Zahl der im ersten Quartal 2013 weltweit verkauften Smartphones abgeleitet werden. Mehr als 216 Millionen Geräte wurden in diesem Zeitraum abgesetzt (Revisto & et al., 2013). Mikrovibrationssensoren werden bevorzugt zur Energieflusssteuerung batteriebetriebener Systeme wie Fahrradrückleuchten, beleuchtete Hundehalsbänder, GPS-Detektoren, Schrittzähler und Computermäuse verwendet. Die Energie-Einsparmöglichkeiten durch die Verwendung von Bewegungssensoren in batteriebetriebenen Geräten sind enorm. So kann die Energieaufnahme von optischen Computermäusen durch die Auswertung der Bewegungsinformation um den Faktor 30 reduziert werden. Die Menge an AA-Zellen, die eingespart werden kann und nicht entsorgt werden muss, ist beeindruckend. Dies ist in Bild 1-1 anschaulich dargestellt.



Bild 1-1: Einsparpotenzial an AA-Zellen bei optischen Computermäusen mit Bewegungserkennung

Zur Umsetzung der Ziele werden zunächst theoretische Vorgehensweisen der Produktentwicklung mikromechatronischer Systeme analysiert. Der theoretische Ablauf der Produktentstehungsprozesse wird an die Erfordernisse für den Aufbau der Mikrovibrationssensoren angepasst. In der anschließenden konzeptionellen Entwurfsphase wird eine Sensorzelle entworfen, welche bereits die erforderlichen Funktionsmerkmale besitzt und weitgehend kompatibel zu den vorhandenen Fertigungstechnologien der Leiterplattentechnik ist. Die Überführung des Sensorkonzeptes in produktionsgerechte Fertigungsdaten erfordert den Aufbau einer computergestützten Entwurfsmethodik, bei der CAD-Werkzeuge der Elektrotechnik und des Maschinenbaus gemeinsam genutzt werden. Begleitend zum Entwurf der Fertigungsdaten für die Sensoren wird das Testkonzept für die Sensoren entwickelt. Hierbei werden Sensoranordnungen auf der Leiterplatte identifiziert, mit denen sich die Test- und Produktionsverfahren synergetisch optimieren lassen. Nach der Erstellung der Fertigungsdaten werden die erforderlichen Fertigungsprozesse und die Prozesskette zur Herstellung der Mikrovibrationssensoren entwickelt. Fehlende Methoden müssen ergänzt, bisher ungeeignete Fertigungsverfahren an die Anforderungen der Mikrovibrationssensoren angepasst werden. Zu den anzupassenden Prozessen zählen viele Verfahren der klassischen

¹ RoHS bedeutet: „Restriction of hazardous Substances“ (Kapitel 2.2.1)

² SMT bedeutet „Surface Mount Technology“

Leiterplattenproduktion, bei den fehlenden Produktionsverfahren handelt es sich beispielsweise um Bumping³- und Flip-Chip⁴-Prozesse, mit denen der ungehäuste Si-Chip in den intelligenten Mikrovibrationssensor integriert wird. Aber auch die Klebetechniken, die Verfahren zur Einbringung der Kugeln und zur Herstellung der sensorischen Oberflächen müssen entwickelt bzw. an die Erfordernisse angepasst werden.

Der Test der Sensoren erfordert die Entwicklung einer automatisierten Prüfeinrichtung zur elektrischen Endprüfung und weiterer quasi-inline Testsysteme, mit der Halbzeuge für die Sensorfertigung geprüft werden können. Mit Hinblick auf die Industrialisierbarkeit der Herstellungsprozesse sind Konzepte zur Datenarchivierung und der Rückverfolgbarkeit bei der Entwicklung des Testautomaten zu berücksichtigen.

Die Qualität der elektrischen Kontakte wird mithilfe von oberflächenanalytischen Charakterisierungsmethoden wie XPS- und EDX-Methoden ermittelt. Ferner werden REM- und FIB⁵-SEM-Bilder für die Qualitätsanalyse genutzt. Die Ergebnisse der Untersuchungen werden einerseits für die Prozessoptimierung genutzt. Andererseits werden quasi-inline Schnelltestverfahren entwickelt, mit denen Aussagen über die Prozessqualität mit einfacheren Verfahren abgeleitet werden können.

Der Produktzyklus schließt sich durch die Auflage einer Kleinserie von Mikrovibrationssensoren und der Erprobung der Bauteile in verschiedenen kommerziellen Anwendungen wie batteriebetriebenen Fahrradrücklichtern, die mechanisch stark belastet und unter rauen Umweltbedingungen eingesetzt werden.

Diese wissenschaftliche Ausarbeitung grenzt sich zu anderen Arbeiten auf dem Gebiet der Integration funktioneller Schichten in Leiterplatten sowohl in technologischer als auch funktioneller Art ab. Klassische Bewegungssensoren auf Kugelbasis der Firmen Comus (Comus Intl., 2008a), CoActive Technologies (ck-components, 2011) und SignalQuest (SignalQuest, 2012) unterscheiden sich signifikant von dem Mikrovibrationssensor. Sie verwenden zur Bewegungsdetektion zwar ebenfalls Kugeln, differenzieren sich aber im Herstellungsprozess und der Aufbauart. Zudem sind die klassischen Kugelsensoren meist größer, verfügen über eine geringere Lebensdauer und sind oft nicht für die Montage im SMD-Prozess geeignet.

MEMS-Beschleunigungssensoren bestehen hingegen aus vollkommen anderen Materialien, verwenden andere sensorische Konzepte und werden auf völlig andere Art hergestellt.

Die bisher entwickelten Verfahren zur Integration aktiver oder passiver Komponenten in die Leiterplatte unterscheiden sich ebenfalls bedeutend von denen in dieser Arbeit zu entwickelnden Technologien. Bisher veröffentlichte Konzepte basieren immer auf einer vollständig, luftfreien Einbettung der Komponenten in die Leiterplatte (hermes, 2008). Dies ist bei der Integration mechanischer, beweglicher Teile nicht möglich.

Die vorliegende Arbeit unterteilt sich in sieben Abschnitte. Nach den einleitenden Worten des ersten Kapitels werden im zweiten Kapitel die theoretischen Grundlagen und der Stand der Technik beschrieben. Dort wird zunächst auf allgemeine Konzepte von Produktentstehungszyklen, auf gesetzliche und wirtschaftliche Randbedingungen sowie auf die Materialien zur Herstellung von Mikrovibrationssensoren eingegangen. Es folgt die Betrachtung der Grundlagen der Herstellungs- und Produktionsprozesse, der Prüf- und Testverfahren sowie die in der Arbeit angewendeten Methoden zur Qualitätssicherung. Das Kapitel schließt mit der Vorstellung des Technikstandes zur Integration funktionaler Schichten in Leiterplatten.

Im dritten Kapitel werden Aufbau und Funktionsweise von Mikrovibrationssensoren erläutert. Verschiedene Varianten des Mikrovibrationssensors in Leiterplattentechnik werden vorgestellt. Nach

³ Unter "Bumping" oder "Balling" versteht man einen Prozess, kleine Kontaktkugeln auf einen ungehäusten Si-Chip aufzubringen. Mit diesen Kontaktkugeln kann der elektrische Kontakt zwischen dem Chip-Träger und dem Chip selber hergestellt werden.

⁴ Der Flip-Chip-Prozess beschreibt ein Verfahren, bei dem die Kontaktflächen des Si-Chips zur Substratoberfläche zeigen. Hierfür muss der Chip vom Wafer abgenommen und um 180° gedreht (geflippt) werden.

⁵ Bei einer FIB-SEM Untersuchung wird eine Probe mit einem fokussierten Ionenstrahl (Focus Ion Beam) präpariert und in einem Rasterelektronenmikroskop analysiert.

der Vorstellung der Designmethodik für den Sensor werden die Funktionsweise und die elektronischen Auswertekonzepte besprochen.

Das vierte Kapitel stellt den realen Produktionsablauf für den Mikrovibrationssensor vor. Die implementierten Prozesse und deren Abweichungen vom Stand der Technik werden erläutert und die Unterschiede und Gemeinsamkeiten zur klassischen Leiterplattenmontage herausgearbeitet.

Fragen der Qualitätssicherung und die Optimierung der Sensorproduktionsprozesse sind Gegenstand des Kapitels fünf. Die Vorstellung der hierfür entwickelten Testsysteme sowie der genutzten Prüf- und Charakterisierungsmethoden beendet dieses Kapitel. Das in den Test- und Charakterisierungsverfahren generierte Know-How fließt in die Wissensbasis ein und trägt zur Entwicklung neuer, verbesserter Produkte bei. Somit schließt sich der Produktentstehungszyklus.

Im sechsten Kapitel werden logistische Aspekte des vollständigen Produktentstehungszyklus - von der Bestellung bis zur Lieferung - vorgestellt.

Die Arbeit schließt mit der Diskussion der Realisierbarkeit von funktionalen Schichten in Leiterplatten, der Betrachtung der Vor- und Nachteile sowie der Perspektiven dieser Technologie.

2 Grundlagen

In dem Grundlagenkapitel werden die erforderlichen Methoden und die wesentlichen Prozesse und Materialien für den Aufbau von Mikrovibrationssensoren erläutert. Nach einer Einführung in die Theorie der Produktentstehungsprozesse werden die Materialien für den Sensoraufbau und deren Eigenschaften vorgestellt. Die Materialeigenschaften beeinflussen die Prozesstechnik, insbesondere die elektrochemische Metallabscheidung, die sich als Schlüsselprozess für den Aufbau funktionsfähiger Sensoren herauskristallisiert hat.

2.1 Mikromechatronische Produktentstehungsprozesse

Der Begriff „Produktentstehungsprozess“ beschreibt die Arbeitsabläufe, die von einer Produktidee zu einem herstellbaren und vermarktaren Produkt führen. Produktentstehungsprozesse sind häufig sehr komplex und dauern mehrere Jahre. Nach (Gausemeier, Ebbesmeyer, & Kallmeyer, 2001) durchläuft der Produktentstehungsprozess drei Phasen:

- In der ersten Phase findet die strategische Produktplanung statt. In diesem Entwicklungsabschnitt werden wirtschaftlich und technologisch aussichtsreiche Produktentwürfe identifiziert.
- In der zweiten Phase findet die eigentliche Produktentwicklung statt. Sie endet mit der Demonstration eines voll funktionsfähigen Prototyps.
- Die letzte Phase beinhaltet die Prozess-Entwicklung und die Fertigungsplanung. Nach dem Abschluss dieses Abschnittes stehen die Fertigungsprozesse und –abläufe, sodass die Serienproduktion beginnen kann.

Ein erfolgreicher Produktentstehungsprozess erfordert eine methodische Vorgehensweise. Sie hilft, Schwachpunkte des Innovationsprozesses und der Organisation der Prozesse aufzudecken und zu vermeiden (Seidel, 2005). Verschiedene, ganzheitliche Methoden werden für diese strukturierte Arbeitsweise empfohlen. Neben phasenorientiert gesteuerten Abläufen werden unter anderem qualitätsbasierte Verfahren zur Unterstützung der Produktentstehung genutzt. Die qualitätsorientierten Verfahren werden bei Prozessen eingesetzt, bei denen zu Beginn der Produktentwicklung bereits eine umfangreiche Wissensbasis vorliegt. Somit wird es möglich, „Quality Gates“ einzuführen, welche zur weiteren Entwicklung zwingend erreicht und erfolgreich passiert werden müssen. Bei geringem Wissensstand sind phasenorientierte Methoden eher für die Produktentwicklung geeignet. Ein methodischer Ansatz hierfür ist das V-Modell des VDIs. Es ist in der Richtlinie VDI-2206 beschrieben.

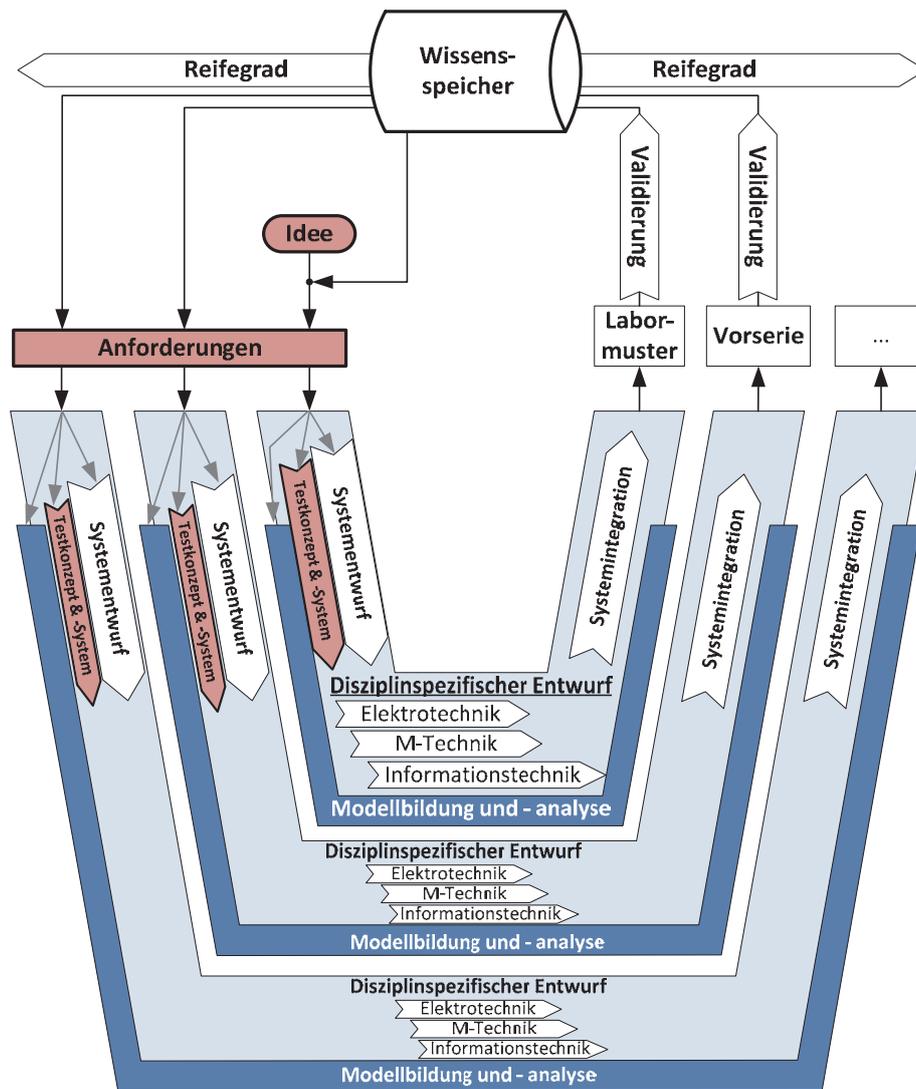


Bild 2-1: Produktentstehungsprozess für Mikrovibrationssensoren. In Ergänzung zum bekannten V-Modell (Möhringer, 2003) werden bei dem modifizierten Produktentstehungsprozess für den Mikrovibrationsschalter das Testsystem und Prüfkonzepte parallel zur Systementwicklung durchgeführt.

Bild 2-1 veranschaulicht die vorgeschlagene Methodik für die Entwicklung mechatronischer Systeme (Möhringer, 2003). Der Produktentstehungsprozess ist ein zyklischer V-Prozess, der mit dem Systementwurf beginnt. Die spezifischen elektronischen, mikro- und informationstechnischen Teilkomponenten des Systems werden durch die zugehörigen Disziplinen entwickelt und zu einem Gesamtsystem integriert. Der Zyklus wird durch den Validierungsschritt vervollständigt, bei dem die Systemeigenschaften mit dem Anforderungsprofil abgeglichen werden. Das Ergebnis dieses Kreislaufes ist ein Produkt höherer Güte und eine verbreiterte Wissensbasis. Dieser Ablauf wird bis zur Markteinführung des Produktes wiederholt. Die in dem ursprünglichen Diagramm (Möhringer, 2003) aufgeführte Disziplin des Maschinenbaus ist in dieser Arbeit in die „M-Technik“ eingeflossen, die Mikro- und Maschinenbautechnik zusammenfasst.

Das V-Modell ist flexibel und unterstützt prinzipiell den Aufbau einer soliden Wissensbasis, die Grundlage für einen erfolgreichen Produktentstehungsprozess ist. Er berücksichtigt den Systementwurf, die Modellierung und geht auf die Systemvalidierung ein. Dennoch erfüllt er die methodischen Erfordernisse für die Produktentwicklung aus dem Umfeld der Wissenschaft und Forschung nur zum Teil. Die Entstehung völlig neuartiger Produkte ist eng mit dem Aufbau von grundlegendem Wissen verbunden. Die gewonnenen Erkenntnisse führen zur Entwicklung neuer Produktionsprozesse sowie zur Entwicklung neuer Testabläufe, -kriterien und -einrichtungen.

Zu Beginn des Produktentstehungsprozesses wird ein wesentlicher Teil der Erfahrungen im Validierungsschritt gewonnen. Hierbei sind prinzipiell die Charakterisierungsmethoden zur Bestimmung der funktionellen Eigenschaften des Produktes von den Verfahren zur Bestimmung der Qualität und Merkmale der Herstellprozesse zu unterscheiden. Während die funktionale Produktcharakterisierung in der Regel mithilfe spezifisch entwickelter Testsysteme erfolgt, sind im Bereich der Prozessentwicklung häufig leistungsfähige analytische Charakterisierungsmethoden wie etwa XPS oder REM-Systeme erforderlich. Diese sind nur außerhalb der Produktionskette – also Offline – verfügbar. Deshalb sind aus den gewonnenen Erkenntnissen inlinefähige Prüfmerkmale abzuleiten, welche die Grundlage für eine wirtschaftliche Produktion darstellen. Merkmale, für die keine inlinefähigen Prüfmerkmale ermittelt werden können, müssen durch eine konsequente und möglichst automatisierte Überwachung der Fertigungsprozesse garantiert werden.

In allen technischen Phasen kann die Produktentstehung durch Simulationstechnologien abgesichert und beschleunigt werden. Voraussetzung für die Anwendung der simulationsgestützten Produktentwicklung sind jedoch fundierte Kenntnisse über das funktionale Verhalten des Produktes sowie seiner Produktionsprozesse. Zu Projektbeginn können Teile des erforderlichen Wissens durch Recherchen und die Integration firmeninterner und –externer Experten gewonnen werden. In den nachfolgenden Prozessschritten wird der Wissensspeicher zunehmend mit den Ergebnissen der Validierungs- und Testschritte gefüllt. Damit wird die Verwendung von Simulationstechniken auch parallel zur Produktentwicklung des ersten Durchlaufs des V-Zyklus (Bild 2-1) möglich.

2.1.1 Anwendung und Adaption der V-Methodik auf Mikrovibrationssensoren

Die Wissensbasis für Produkte, die aus dem Umfeld der Forschung heraus entstehen, ist definitionsgemäß zunächst gering. Deshalb ist die Einbindung aller verfügbarer Wissensquellen Voraussetzung für einen erfolgreichen Produktentstehungsprozess. Eine weitere Möglichkeit, Know-how zu generieren, besteht im Test der Produkte und der Qualifizierung der Prozesse. Um diese Informationsquelle bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt im Produktentwicklungsprozess nutzen zu können, wurde das Konzept des „Design for Testability“ im Rahmen der Arbeit neu interpretiert und abgewandelt. Das Produkt und die Testeinrichtung wurden gemeinsam entwickelt. Neben dem frühzeitigen Ausbau der Wissensbasis ergibt sich ein weiterer positiver Effekt dieses Co-Designs. Das Produkt und der Funktionstest können optimal bezüglich der Herstellungs- und Testkriterien ausgelegt werden. Im Rahmen der Arbeit wurde deswegen ein modifizierter V-Zyklus für den Produktentstehungsprozess erarbeitet und angewendet (Bild 2-1).

Der Produktentstehungszyklus für den Mikrovibrationssensor beginnt mit der Idee, den Sensor in Plattentechnik aufzubauen. Nach der Festlegung der funktionalen, technischen und wirtschaftlichen Produkthanforderungen wird parallel mit dem Entwurf der Testsysteme begonnen. Hierfür sind Zuarbeiten der verschiedenen Disziplinen der Elektrotechnik, der M-Technik (Seite 6) und der Informationstechnik erforderlich. Die disziplinspezifischen Komponenten werden in das Gesamtsystem integriert. Neben dem Labormuster des Produktes erhält man einen ersten Prototyp der Testeinrichtung. Die Muster werden validiert, die Ergebnisse in den Wissensspeicher übertragen und gegebenenfalls neue Anforderungen entwickelt. Der Zyklus beginnt erneut, wobei alle Systeme einen höheren Reifegrad erreicht haben. Die Produktreife der Mikrovibrationssensoren zeigt sich an den verschiedenen Entwicklungsstufen der Sensoren und der elektrischen Prüfstände.

Für die Validierung der Herstellungsprozesse sind oft keine schnellen oder inline-fähigen Messsysteme vorhanden. Aufwendige Prüfverfahren sind erforderlich, um die Wissensbasis mit Qualitätsinformationen über die Produktionsprozesse füllen zu können.

2.2 Materialauswahl und -verträglichkeit

Technische Systeme werden aus unterschiedlichen Materialien aufgebaut, um eine oder mehrere Funktionen zu erfüllen. Die Anforderungen an das Material werden aber nicht allein durch die Funktion des Systems bestimmt. Anforderungen des Marktes nach Preis und Haltbarkeit aber auch die Verarbeitbarkeit und gesetzliche Aspekte bestimmen die Materialauswahl (Ashbey, 2005). Einige Materialien mögen technisch die besten Ergebnisse liefern, sie sind aber nicht mit bestehenden Verarbeitungsprozessen verträglich. So zeigte sich beispielsweise, dass die ursprünglich gewählte Materialkombination aus keramischen und dicken metallischen Platten ungeeignet für den Aufbau von Mikrovibrationssensoren war. Die Materialkosten waren zu hoch und es konnte kein geeigneter Vereinzelungsprozess entwickelt werden.

Neben den rein technischen Aspekten werden häufig auch gesellschaftlich-ethische oder gesetzliche Forderungen an die Materialien gestellt. Dies gilt insbesondere für Elektronikprodukte, die im folgenden Abschnitt behandelt werden.

2.2.1 Gesetzliche Anforderungen an Materialien für elektronische Produkte

Firmen, die elektronische oder elektrische Geräte⁶ (EEE) in der Europäischen Union vermarkten, müssen die gesetzlichen Vorgaben der WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment Directive) und der RoHS (Restriction of Hazardous Substances Directive) erfüllen.

Die WEEE-Direktive regelt die Verantwortlichkeiten der Firmen bezüglich der Sammlung und des Recyclings von Elektronikschrott. Die RoHS untersagt die Verwendung bestimmter Materialien in EE-Produkten oberhalb fest vorgeschriebener Grenzwerte. In Tabelle 2-1 sind die Materialien und deren Konzentrationsgrenzwerte in Gewichtsprozent angegeben:

Materialbezeichnung	Grenzwert (Gewichtsprozent)
Blei	0,1 %
Quecksilber	0,1 %
Kadmium	0,01 %
Sechswertiges Chrom	0,1 %
Polybromierte Biphenyle (PBB)	0,1 %
Polybromierte Diphenylether (PBDE)	0,1 %

Tabelle 2-1: Materialien und Grenzwerte der in der RoHS erfassten Substanzen (EU-RoHS, 2011)

Zu den Ausnahmen der RoHS zählen:

- Systeme der Sicherheits-, der Militär- und der Weltraumtechnik,
- fest installierte Großanlagen und große stationäre industrielle Geräte und Werkzeuge,
- Personen- und Warentransportmittel mit mehr als zwei Rädern sowie mobilen „Non-Road“ Maschinen für die gewerbliche Nutzung,
- aktive implantierbare medizinische Geräte,
- fest installierte photovoltaische Systeme für die dauerhafte Nutzung zur Energieerzeugung
- und Systeme, die lediglich zu Forschungs- und Entwicklungszwecken zwischen Unternehmen eingesetzt werden.

Die RoHS zielt darauf ab, die Umwelt und die Gesundheit der Menschen zu schützen. Sie hat jedoch zu massiven Änderungen im Bereich der Herstellung elektronischer Produkte geführt. So ist Blei ein wesentlicher Bestandteil von Zinn-Blei Lötverbindungen. Dieses Lot hat eine Schmelztemperatur von 183°C. Es wird in Reflow-Lötanlagen bei einer Temperatur von etwa 210°C umgeschmolzen. Alle Materialien für den Aufbau elektronischer Systeme waren für den Einsatz in diesem

⁶ „Electrical and Electronic Equipment“ wird als EEE abgekürzt.

Temperaturbereich geeignet. Neue Lötwerkstoffe auf Zinn-Silber-Kupferbasis (SAC-Lote) schmelzen erst bei einer Temperatur von 221°C. Deshalb werden die Reflow-Lötanlagen bei etwa 250°C betrieben.

Die Unverträglichkeit zwischen den Werkstoffen und dem neuen Lötprofil führte dazu, dass sehr viele Materialien und Prozesse requalifiziert oder neu entwickelt werden mussten. Zu den steigenden Anforderungen an die thermische Belastbarkeit der Materialien kam das Verbot der flammhemmenden polybromierten Substanzen (PBB, PBDE). Somit wurde die Entwicklung neuer Werkstoffe für den Aufbau von Leiterplatten erforderlich. Diese mussten nicht nur den thermischen Belastungen standhalten, sondern auch zu den galvanischen Prozessen kompatibel sein.

Kadmium wurde in EE-Produkten eher selten eingesetzt. Die wesentlichen Anwendungsbereiche sind Foto- und Infrarotdetektoren oder Nickel-Kadmium Batterien. Quecksilber wurde ebenfalls häufig in Batterien eingesetzt, man findet es aber auch in Quecksilberdampflampen oder in Bewegungssensoren. Sechswertiges Chrom wird in elektronischen Produkten sehr selten verwendet (Goosey, 2007).

2.2.2 Marktanforderung an „grüne“ Elektronikmaterialien

„Grüne“ Elektronik entspricht den Anforderungen der RoHS und der WEEE und ist zudem weitestgehend frei von flammhemmenden, halogenhaltigen Substanzen. Von halogenfreien Leiterplatten spricht man gemäß der IEC 61249-2-21, wenn die Gewichtsanteile von Chlor und Brom jeweils unter 900 ppm liegen. Die Summe der Gewichtsanteile beider Halogene darf 1500 ppm nicht überschreiten. Halogene wie Fluor, Jod oder Astat werden in der Norm nicht berücksichtigt. Neben den Leiterplatten versuchen viele Firmen, auch PVC aus elektronischen Produkten zu verbannen. So verlangt die Fa. Philips beispielsweise von ihren Zulieferern, gegurtete Bauteile nicht in PVC-Gurtmaterial zu liefern.

Das Verbot halogenhaltiger Substanzen beruht auf dem Umstand, dass bei der Verbrennung von halogenhaltigen Kunststoffen Dioxine und Furane entstehen können (Flinders, 2008).

2.3 Materialien für Mikrokugeln

Die Anforderungen an die Materialien für die Kugeln der Mikrovibrationssensoren sind durch technische und wirtschaftliche Randbedingungen vorgegeben. Die technischen Anforderungen an die Kugeln bestehen in:

- einer thermischen Belastbarkeit bis 260°C
- einer hohen Dichte für ein hohes Kugelgewicht
- einem nicht oder kaum magnetisierbaren Werkstoff
- guten Rundlaufeigenschaften und einer hohen Oberflächenqualität
- einer geringen Korrosionsneigung
- einer galvanisch metallisierbaren Oberfläche

Wirtschaftliche Zwänge erfordern die Verwendung möglichst preiswerter Kugeln für Mikrovibrationssensoren. Daher bietet sich die Verwendung von Kugeln an, die in Massen produziert werden. Diese werden in der Regel aus harten, gut schleifbaren Kohlenstoffstählen hergestellt. Für korrosionsgefährdete Anwendungen werden Chrom- oder nicht rostende Edelmehle genutzt.

Kohlenstoffstähle enthalten maximal 2% Kohlenstoff, wobei ein Stahl als härtbar gilt, wenn sein Kohlenstoffanteil 0,3% übersteigt (Müller, 2010). Kohlenstoffstähle sind aufgrund des geringen Nickelanteils recht preiswert, aber auch magnetisierbar.

Chrom- und nicht rostende Edelmehle werden mit mindestens 10,5% Chrom und maximal 1,2% Kohlenstoff legiert. Der Chromanteil passiviert die Oberfläche und schützt das Metall vor korrosiven Angriffen der Atmosphäre und milden wässrigen Medien. Fügt man dem Chromstahl Nickel und

Molybdän hinzu, kann die Korrosionsbeständigkeit noch deutlich erhöht werden (Lucefin S.p.A., 2012).

Standardmaterialien für die Herstellung industrieller Kugeln sind beispielsweise Kohlenstoffstähle des Typs WK 1.3505 oder rostfreie Edelmessingstähle mit den Werkstoffkennungen WK 1.4031 und WK 1.4034. Alle drei Werkstoffe sind für die Herstellung von Mikrovibrationssensoren geeignet, wobei sie jedoch magnetisierbar sind. Tabelle 2-2 zeigt eine Übersicht über die Zusammensetzung der Stähle zur Herstellung von Mikrokugeln.

AISI	WK	Zusammensetzung								HRC Härte
		C [%]	Si [%]	Mn [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	P [%]	S [%]	
52100	1.3505	0,9-1,05	0,15-0,35	0,25-0,45	1,35-1,65	<0,3	-	<0,03	<0,025	60-66
420	1.4031	0,36-0,42	<1	<1	12,5-14,5	-	-	<0,04	<0,03	50-52
420C	1.4034	0,42-0,5	<1	<1	12,5-14,5	-	-	<0,04	<0,03	52-55
304	1.4301	<0,07	<1	<2	17-19,5	8-10,5	-	-	<0,03	27-39
310	1.4841	<0,25	<1,5	<2	25	20	0,5	<0,04	-	-
316	1.4401	<0,07	<1	<2	16-18	10-14	2-2,5	<0,04	<0,03	27-39
316L	1.4404	<0,03	<1	<2	16,5-18,5	11-14	2-2,5	<0,04	<0,03	27-39
904L	1.4539	<0,02	<0,7	<2	19-21	24-26	4-5	<0,03	<0,01	-

Tabelle 2-2: Kenndaten von Stählen für Mikrokugeln (DIT Holland B.V., 2012)

Für die Herstellung der Kugeln der Mikrovibrationssensoren ist der bevorzugte Werkstoff der Stahl WK 1.4031. Er ist preiswert und lässt sich gut schleifen. Nicht-magnetische Kugeln werden entweder aus dem Werkstoff WK 1.4404 (AISI 316L) mit thermischer Nachbehandlung oder aus WK 1.4539 (AISI 904L) hergestellt. Alle Materialien sind gut galvanisierbar, weisen eine hohe Dichte auf, sind thermisch belastbar und lassen sich in der erforderlichen Güte herstellen. Alternativ können Messingkugeln genutzt werden, die jedoch deutlich teurer sind.

2.4 Materialien für Leiterplatten

Leiterplatten- bzw. Laminatwerkstoffe werden in der (IPC-4104, 1999) spezifiziert. Sie bestehen aus Polymeren, in die organische und anorganische Füllstoffe sowie Gewebelagen aus unterschiedlichen Materialien eingebracht sind. Auf den Außenseiten der Laminatplatten sind metallische Schichten aufgebracht, die meist aus Kupfer bestehen.

Die Auswahl des polymeren Grundwerkstoffs wird durch die Anwendung festgelegt. Besonders preiswerte Materialien sind Polyester und Epoxide. Polyimide und LCP⁷-Werkstoffe sowie teflonbasierte Materialien sind besonders teuer und werden nur in sicherheitskritischen Anwendungen der Luft- und Raumfahrt sowie Hochfrequenzanwendungen verwendet.

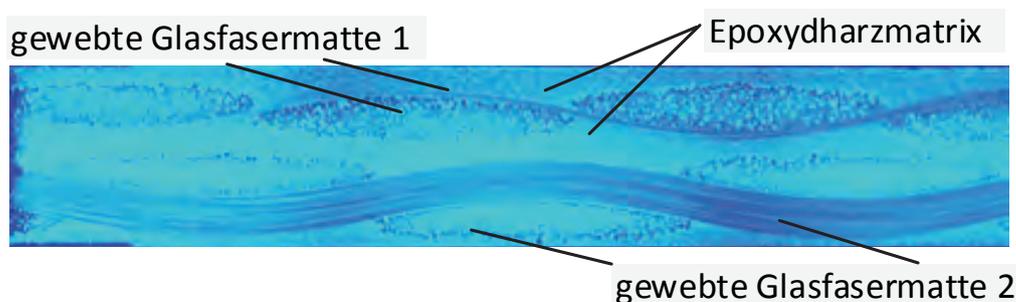


Bild 2-2: Schliff durch eine etwa 200 µm starke FR4-Leiterplatte

⁷ LCP bedeutet Liquid Crystal Polymer

Die Gewebereinlagen verstärken die Harzmatrix und geben der Leiterplatte eine erhöhte mechanische Stabilität. Die IPC-4101 führt über 50 verschiedene Gewebereinlagen auf. Zusammen mit den verschiedenen Kupfersorten, den Füll- und Flammhemmstoffen und Harzformulierungen wird die Zahl der möglichen Laminatsysteme unüberschaubar. Einige Laminattypen, die für den Aufbau elektronischer Schaltungen Bedeutung erlangt haben, sind in Tabelle 2-3 angeführt (Khandpur, 2006).

Klasse	Harzsystem	Gewebereinlage
FR2	Phenolharz	Zellulose-Papier
FR3	Epoxidharz	Zellulose-Papier
FR4	Epoxidharz	gewebte Glasfasern
FR5	Epoxidharz	gewebte Glasfasern, wärmebeständiger als FR4
CEM1	Epoxidharz	gewebte Glasfasern+Zellulosepapier
CEM3	Epoxidharz	gewebte Glasfasern+Glasfasermatte

Tabelle 2-3: Übersicht über gängige Leiterplattenmaterialien

FR4-Materialien werden häufig in industriellen und automotiven Anwendungen genutzt. FR2- und CEM-Materialien findet man in kostensensitiven Anwendungen wie der weißen Ware oder in Funk-Fernbedienungen. FR5-Materialien sind für die Verwendung bei erhöhten Betriebstemperaturen entwickelt worden. Darüber hinaus existieren für spezielle Anwendung der Hochfrequenztechnik, der Leistungselektronik oder der LED-Beleuchtungstechnik Schaltungsträger mit Teflon-, Keramik- oder Aluminiumkernen.

2.4.1 Epoxidharze

Epoxidharze sind die am häufigsten genutzten Harzsysteme zur Herstellung von elektronischen Leiterplatten. Sie haben gute mechanische, elektrische und thermische Eigenschaften. Darüber hinaus sind sie preiswert und gut zu verarbeiten. Ihren Namen haben sie von den Epoxidgruppen erhalten, die auf einem Oxiranring basieren. Dies ist ein ringförmiger Zusammenschluss aus zwei Kohlenstoff- und einem Sauerstoffatom (Brockmann, 2005).

Die wirtschaftlich bedeutendste Epoxidharzgruppe entsteht bei der Reaktion von Epichlorhydrin und Bisphenol A. Die chemische Reaktion von zwei Epichlorhydrin-Molekülen mit Bisphenol A zu einem difunktionalen Epoxid mit zwei Epoxidgruppen ist exemplarisch in Bild 2-3 dargestellt. Werden in das Polymer vier oder mehr Epoxidgruppen eingebaut, spricht man von tetra- bzw. multifunktionalen Epoxidharzen. Reale Leiterplatten sind häufig aus einer Mischung dieser Epoxide aufgebaut, um sowohl die Temperaturbeständigkeit als auch die mechanischen Eigenschaften an die Produkterfordernisse anzupassen. Hochvernetzte Epoxidharze sind temperaturstabil, oft aber auch spröde und mechanisch schwer zu bearbeiten (Combs, 2008).

Teile des im Epichlorhydrin enthaltenen Chlors können in der ausgehärteten Polymer-Matrix verbleiben. Das Chlor kann in Verbindung mit Wasser zu Salzsäure umgesetzt werden, wodurch Korrosionsschäden in elektronischen Systemen entstehen können. Epoxidharze für elektrotechnische Systeme werden deswegen oft mit besonderem Reinheitsgrad angeboten (Habenicht, 2009).

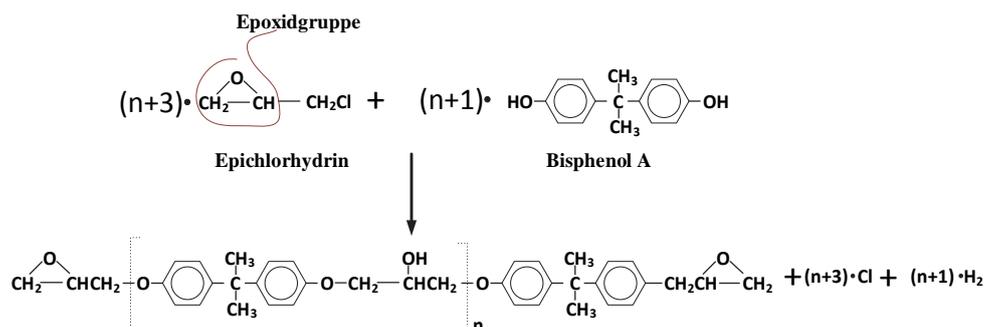


Bild 2-3: Reaktionsmechanismus zur Bildung von difunktionalem Epoxidharz (Combs, 2008)

Polymere erweichen oberhalb einer definierten Temperatur, der *Glastemperatur* T_g . Sie ändern in diesem Bereich ihre mechanischen Eigenschaften wie den E-Modul und ihren thermischen Ausdehnungskoeffizienten.

Die Ausdehnung des Laminats, also des Verbundes aus dem Polymer und der eingelegten Glasfasern, wird durch die Glasfasern bestimmt. Sie beträgt etwa 12-14 ppm und ändert sich auch oberhalb der Glastemperatur des Polymers nur unwesentlich (Bild 2-4). Besondere Bedeutung hat die Ausdehnung in z-Richtung, d. h. orthogonal zu den Fasermatten. Bei Überschreiten der Glastemperatur nimmt der thermische Ausdehnungskoeffizient der Platte von ca. 20-50 ppm auf 120-300 ppm zu. Diese Ausdehnung kann zu Qualitätsproblemen in der Leiterplatte führen. Bedingt durch die hohe Ausdehnung in z-Richtung können beispielsweise Risse in den Kupferhülsen der Durchkontaktierungen auftreten.

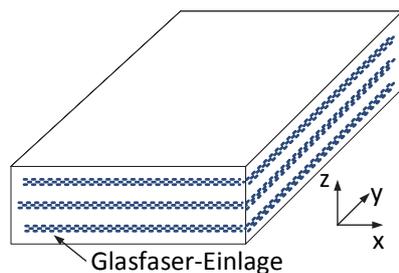


Bild 2-4 :Festlegung des Koordinatensystems in Leiterplatten

Neben der Glastemperatur ist die Zersetzungs- oder Dekompositionstemperatur T_D der zweite Parameter, der mit Einzug der RoHS in die Elektronikproduktion in den Fokus der Weiterentwicklung gelangt ist. Die Dekompositionstemperatur eines Polymers gibt die Temperatur an, bei der ein Polymer 5% seiner Masse bei einer Aufheizrate von 10 K/min verloren hat (IPC, 2006). Bei Standard-Leiterplattenmaterialien, die für den verbleiten Lötprozess entwickelt worden waren, lag die Zersetzungstemperatur T_D im Bereich von 290-310 °C. Im bleifreien Lötprozess verlieren diese Materialien aufgrund der erhöhten Temperaturen jedoch bereits schon 1-3% ihrer Masse (Bild 2-5). Die erforderliche Erhöhung der Zersetzungstemperatur wurde durch Modifikation der Harze aber auch durch neue Füllmaterialien möglich.

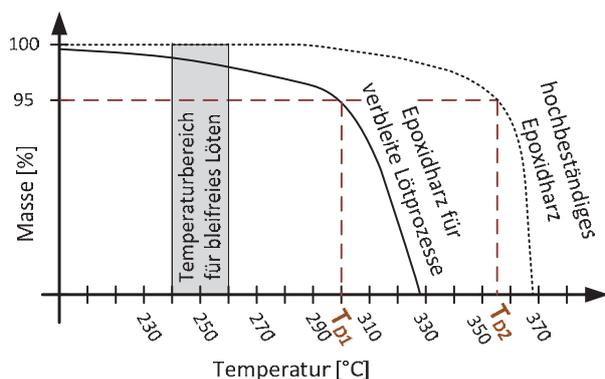


Bild 2-5: Zersetzungstemperaturen T_{D1} , T_{D2} verschiedener Leiterplattenarten (Combs, 2008)

2.4.2 Reaktionsbeschleuniger und Härtemittel für Epoxidharze

Bei der Reaktion zwischen dem Epichlorhydrin und dem Bisphenol A entstehen in der Regeln nur kurze Molekülketten. Erst durch die Zugabe von Reaktionsbeschleunigern oder Härtern werden temperaturbeständige und mechanisch belastbare Harzsysteme gebildet (Combs, 2008). Die Reaktion beruht auf der Öffnung des Oxiranringes, wodurch entweder eine Additionsvernetzung oder eine Polymerisationsvernetzung eingeleitet wird. Dabei vernetzen sich die kurzen Molekülketten und bilden lange Polymerketten.

Übliche Reaktionsbeschleuniger, die in Leiterplattenmaterialien zu einer Additionsvernetzung führen, sind Diamine (Michalovic & et al., 2012). Im Leiterplattenbereich werden häufig Dicyandiamine

(„DICY“) eingesetzt. Daneben werden eine Reihe weiterer Härter verwendet, unter anderem auch phenolische. Bei der chemischen Reaktion der phenolischen Härter entsteht infolge einer Kondensationsreaktion Wasser, das schwerwiegende Qualitätsprobleme in den Leiterplatten verursachen kann. Besonders häufig sind Delaminationen zu beobachten (Zhuqing, 2001). Daneben können unvernetzte Phenolgruppen die chemische und galvanische Metallabscheidung auf den Leiterplatten beeinträchtigen (Endres, 2011), (Kapitel 6.4.2).

Additionsvernetzung

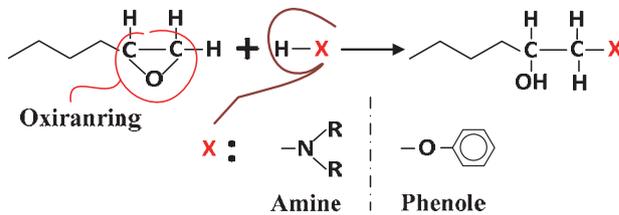


Bild 2-6: Additionspolymerisation bei Epoxiden nach (Brockmann, 2005)

2.4.3 Flammenschutzmittel

Kunststoffe sind im Allgemeinen leicht entzündlich. Durch die Zugabe von Flammenschutzmittel kann der Verbrennungsprozess gehemmt oder vollständig unterdrückt werden. Sie behindern sowohl den Zündvorgang als auch die thermische Zersetzung des Kunststoffes sowie die Ausbreitung der Flammen. Verschiedene Mechanismen tragen zur Brandhemmung bei:

- Die Kühlung der Brandstelle durch endotherme Prozesse und Verdünnen der Brandgase bei der Umsetzung anorganischer Hydroxide. Zu diesen zählen Aluminiumhydroxid ($\text{Al}(\text{OH})_3$) und Aluminiummonohydrat ($\text{AlO}(\text{OH})$).
- Die Ausbildung einer Kohle-Schutzschicht, meist unter Bildung von Phosphor- oder Stickstoffverbindungen. Nicht verbrannte Substratbereiche werden vor Hitze und Sauerstoffzufuhr geschützt. Die Schichten können aufquellen (intumeszieren) und durch Schaumbildung die brandhemmende Wirkung verstärken. Ein Beispiel für schaubildende Flammhemmer sind Melanin-Phosphate (Lu & Hamerton, 2002).
- Die Neutralisation stark reaktiver H- und OH-Radikale, die sich im Brandgas befinden. Sie reagieren mit Phosphor-, Brom- oder Chlorwasserstoffen.

Aluminiumhydroxid ist eine mineralische Substanz, die in Leiterplatten häufig zur Flammhemmung eingesetzt wird. Es zersetzt sich ab Temperaturen von 200 °C zu Aluminiumoxid und Wasser. Der Zersetzungsprozess ist ein endothermer Vorgang, für den etwa 298 kJ/Mol aufgebracht werden müssen. Diese Energie wird der Brandstelle entzogen, wodurch eine Kühlung eintritt. Zugleich verdünnt das verdampfende Wasser die reaktiven Brandgase (Clariant International AG, 2012). Diese Reaktion allein kann nur dann eine ausreichende Flammhemmung generieren, wenn der Kunststoff mit einem hohen Anteil Aluminiumhydroxid gefüllt ist. Der mineralische Füllstoff verändert sowohl die mechanischen als auch die elektrischen Eigenschaften des Kunststoffes. Daneben kann die niedrige Zersetzungstemperatur des Hydroxids im Lötprozess zur Freisetzung von Wasser im Basismaterial führen, das wiederum zu Delaminationen oder Schädigungen an Durchkontaktierungen führt. Deswegen wird zunehmend die Verwendung von Aluminiummonohydrat („Böhmit“) als Flammenschutzmittel für Leiterplatten geprüft. Böhmit ist zwar weniger effektiv als Aluminiumhydroxid, weist aber mit 340°C eine deutlich höhere Zersetzungstemperatur auf (Ihmels, 2012).

Phosphorhaltige Flammschutzsubstanzen werden bei der thermischen Zersetzung der Leiterplatte in Phosphorsäure umgewandelt. Die Säure reagiert mit Kohlenstoffketten zu chemisch trägen Verkohlungs-schichten, welche die Leiterplatte schützen. Häufig werden sowohl Stickstoff- als auch Phosphorverbindungen gemeinsam als Brandschutzmittel genutzt (Döring & Diederichs, 2009). Neue Harzsysteme verzichten vollständig auf die Verwendung von Phosphor. Sie verfügen über exzellente

mechanische und elektrische Eigenschaften und sind zudem ungiftig und recycelbar (Hitachi Chemicals, 2012), (Murai & et al., 2001).

Halogene wie Brom hingegen bilden bei erhöhten Temperaturen Halogen-Wasserstoffverbindungen (H-Br), die mit den im Brandgas befindlichen Wasserstoff- und Hydroxylradikalen (H•, OH•) reagieren. In halogenhaltigen Leiterplatten wird meist eine bromierte Variante des Bisphenols A verwendet, das Tetrabrombisphenol A (TBBPA, Bild 2-7) (Clariant International AG, 2012).

Flammschutzmittel werden beständig weiterentwickelt. Ein hoher Füllgrad an mineralischen Brandhemmer wirkt sich positiv auf den Ausdehnungskoeffizienten auf, behindert jedoch die mechanische Verarbeitbarkeit. Umweltverträgliche, halogenfreie Leiterplattenmaterialien mit rein stickstoffhaltigen Flammhemmern von Hitachi verfügen über exzellente technische Eigenschaften. Die phosphorlosen Leiterplatten sind gemäß den Datenblattinformationen am geeignetsten für den Aufbau von Mikrovibrationssensoren, da sie weniger Feuchtigkeit aufnehmen als phosphorhaltige Leiterplatten.

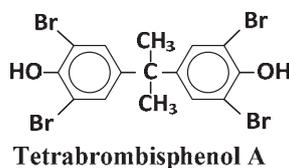


Bild 2-7: Strukturformel von Tetrabrombisphenol (Clariant International AG, 2012)

2.4.4 Glasfasermaterialien

Ein elektronischer Baugruppenträger muss thermisch und mechanisch belastbar sein. Epoxidharze alleine erfüllen diese Anforderungen nicht, weswegen die Polymere der Leiterplatten mit unterschiedlichen Materialien verstärkt werden. Neben anorganischen Füllstoffen werden Papier, Baumwollgewebe, Glasfaser-Vliese und Matten aus gewebten Glas- oder Aramidfasern verwendet.

Im europäischen Markt werden vorzugsweise glasfaserverstärkte FR4-Leiterplattenmaterialien für hochwertige elektronische Systeme verarbeitet. Die in Leiterplatten am häufigsten verwendete Glasfaserart ist das E-Glas („Electronic grade“), gefolgt von NE- („New Electronic Grade“) und S-Gläsern („high strength“). Sie unterscheiden sich in ihrer Zusammensetzung und ihrem Aufbau. Die wichtigsten Bestandteile der Gläser sind Oxide des Siliziums, Kalziums, Aluminiums, Magnesiums, Titans, Natrium und Kalium. Durch die Zusammensetzung können der Verlustfaktor und die thermomechanischen Ausdehnungseigenschaften eingestellt werden. Die Art des Gewebes, sein Fadendurchmesser und die Webart wirken ebenfalls auf die Hochfrequenzeigenschaften aus und beeinflussen die Prozessfähigkeit des Laminats. Spezielle Webarten mit flachen Gewebeaufbauten sind besonders verzugsarm. Sie werden für komplexe Leiterplattenaufbauten oder Chipgehäuse genutzt.

Die Oberfläche der Glasfasern bzw. des Gewebes wird während der Herstellung mit verschiedenen Substanzen modifiziert. Diese vermindern die Reibung und die statische Aufladung der Fasern, wodurch sich deren Verarbeitbarkeit verbessert. Besonders wichtig ist die Beschichtung der Fasern mit Siloxanen, die für eine gute Haftung zwischen der Harzmatrix und dem Glas sorgen (Combs, 2008). Eine unzureichende Verbindung zwischen dem Harz und den Fasern ermöglicht das Wachstum metallischer Filamente⁸ in elektrochemischen Prozessen. Diese können zu einem Kurzschluss und dem Ausfall der Leiterplatte führen (Turbini, 2006).

⁸ Dieser Versagensmechanismus ist als CAF in der Literatur beschrieben und steht für „Conductive Anionic Filament“.

Glas	Eigenschaften	CTE ⁹			Gewichtsanteil [%]					
		ppm	D _k ⁹ 1 GHz	D _f ⁹ 1 GHz	SiO ₂	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	CaO	MgO	R ₂ O
E	Standardmaterial	5.6	6,8	0,0035	52-56	12-16	5-10	20-25		0-0,8
NE	HF ⁹ -Schaltungen	3.3	4,8	0,0015	50-56	10-18	18-25	5-12		0-1
T	niedriger CTE	2.8	5,4	0,0043	64-66	24-26	-	-	9-11	-

Tabelle 2-4: Glasgewebearten für die Leiterplattenherstellung (Nittobo, 2011)

In Tabelle 2-4 sind die wichtigsten Eigenschaften und Materialbestandteile einiger Glasgewebe für die Leiterplattenherstellung zusammengestellt. Weitere Details über Glassorten und deren Zusammensetzung sind in (Wallenberger & Bingham, 2010) angeführt. Zusätzliche Informationen zur Verwendung spezieller Glassorten in Leiterplatten findet man in (Nittobo, 2011).

Die Verarbeitungstechnologie der Glasfasern ist ausgereift und spielt somit auch keine Rolle für den Aufbau von Mikrovibrationssensoren. In umfangreichen Untersuchungen an verschiedenen Basismaterialien konnte keine signifikante Diffusion von Feuchtigkeit entlang der Fasern festgestellt werden, welche die Qualität der Sensoren beeinträchtigt hätte.

2.4.5 Leiterplattenkerne, Prepregs und Klebefilme

Mehrlagige Leiterplatten werden aus Kernplatten und Prepregs aufgebaut. Ein Kern besteht aus einer oder mehreren Glasfasermatten, eingebettet in einer vollständig ausgehärteten Harzmatrix (Bild 2-2). Prepregs sind vergleichbar aufgebaut, nur ist die Harzmatrix noch nicht durchpolymerisiert. Sie kann durch Druck und Temperatur aufgeschmolzen werden, wodurch es erneut fließfähig wird und zwei Kernplatten formschlüssig miteinander verbinden kann.

Der Polymerisationsprozess und die Beschaffenheit der Epoxide hängen von der Aushärtetemperatur und der Aushärtezeit ab. Sie werden in „Time-Temperature-Transition“-Kurven (Bild 2-8) dargestellt. Abhängig von der Zeit und der Härtetemperatur befindet sich das Harz im Sol-, im Sol-Gel- oder im Gel-Zustand. Im Sol-Zustand ist das Harz-Härter-System fast vollständig in den Lösungsmitteln gelöst, im Sol-Gel-Zustand sind lösliche und unlösliche Teile gemischt und im Gel-Zustand ist das Epoxidharz vollständig ausgehärtet.

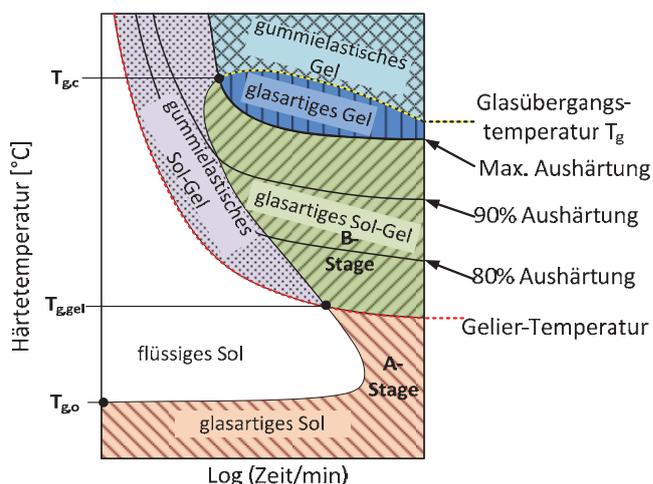


Bild 2-8: Härting von Epoxidharzen (Wacker, Trawiel, & Ehrenstein, 2010)

Das flüssige und frisch angesetzte Polymersystem aus Harz und Härter besitzt eine Glastemperatur T_{g0} , die in der Regel unter -40 °C liegt. Unterhalb dieser Temperatur liegt die Mischung als glasförmiges Sol vor. Übersteigt die Temperatur die untere Glastemperatur T_{g0} , so verflüssigt sich das Harz. Wird das Material über einen längeren Zeitraum in einem Temperaturbereich zwischen der

⁹ CTE: Coefficient of Thermal Expansion – Thermischer Ausdehnungskoeffizient; D_k steht für die dielektrische Zahl bzw. die relative Permittivität eines Werkstoffes; D_f gibt den Verlustfaktor ($\tan \delta$) an; HF steht für Hoch-Frequenz

Glastemperatur T_{g0} und der Geliertemperatur $T_{g, \text{gel}}$ gelagert, so verglast es erneut. Es befindet sich im sogenannten „A-Zustand“. Die Zeit bis zur Verglasung verkürzt sich mit steigender Temperatur.

Oberhalb der Geliertemperatur $T_{g, \text{gel}}$ setzt die chemische Reaktion ein und die Moleküle vernetzen sich. Lange Polymerketten bilden nun mit einzelnen Monomeren ein Sol-Gel Gemisch. Bei einer kurzen Verweilzeit oberhalb der Gel-Temperatur bildet sich eine gummiartige Sol-Gel Mischung. Verbleibt das Harz eine längere Zeit oberhalb der Geliertemperatur, so geht die Sol-Gel-Mischung in einen glasartigen Zustand hoher Viskosität - den „B-Zustand“ (B-Stage) - über (Wacker, Trawiel, & Ehrenstein, 2010).

Die Reaktionskinetik ist zu Beginn der Vernetzung durch die Reaktivität der Moleküle geprägt. Mit wachsendem Vernetzungsgrad und steigender Moleküllänge wird die Reaktionsgeschwindigkeit jedoch zunehmend durch Diffusionseffekte bestimmt und verlangsamt sich. Bei Überschreiten der Temperatur, die zur maximalen Aushärtung des Harzes führt, wechselt es in einen glasartigen Zustand. Die Moleküle werden in der Glasmatrix eingefroren und die Reaktion kommt zum Stillstand (Xu & et al., 2008). In diesem hochviskosen Zustand können jedoch noch elementare, reaktionsfähige Ausgangssubstanzen wie Phenole oder Epoxidgruppen vorliegen. Diese Komponenten sind oftmals unerwünscht, da sie Folgeprozesse beeinträchtigen können (Kapitel 2.4.2). Sie können jedoch durch eine Lagerung der Leiterplatte bei einer Temperatur von etwa 130°C für zwei Stunden weitgehend aus dem Material beseitigt werden (Hörhold, 2012).

Der Vernetzungsgrad der Polymerisation hängt von der absoluten Aushärtetemperatur und dem Temperaturgradienten ab. Höhere Aushärtetemperatur und Temperaturgradienten verstärken den Vernetzungsgrad des Harzes (Harsch & et al., 2007). Wird ein nicht vollständig vernetztes Harz erneut über die Glastemperatur erhitzt, erhöht sich dessen Glastemperatur in geringem Maß.

Obwohl Prepregs nicht vollständig durchpolymerisiert sind, sind sie bei Raumtemperatur trocken und können problemlos mit Leiterplattenkernen zu einem Multilayer-Presspaket zusammengestellt werden. Eine gute Fließfähigkeit des Prepregs ist bei der Herstellung konventioneller Leiterplatten gewünscht, um das Kupfer und andere Hohlräume zwischen zwei Laminatplatten formschlüssig und lunkerfrei abzuschließen. Zur Integration von Funktionsschichten in Leiterplatten ist hingegen eine geringe Fließneigung erwünscht, um die Kavitäten frei von Harz zu halten. Für solche Zwecke sind spezielle NoFlow-Prepregsorten entwickelt worden, die nur eine geringe Fließfähigkeit aufweisen. Diese Materialien bestehen aus multifunktionalen Epoxiden und werden in einer hochvernetzten Form ab Werk geliefert. Die Fließfähigkeit des Harzes kann über den Temperaturgradienten und den Druck gesteuert werden. Ein geringer Temperaturanstieg kann den Harzfluss um den Faktor 5-8 reduzieren (Arlon, 2011). Da die Vernetzung während der Lagerung kontinuierlich fortschreitet, sind besondere Bedingungen bei der Lagerung zu beachten. Alle Prepregs sind generell bei niedrigen Temperaturen (unter 5°C) und bei geringer Luftfeuchtigkeit (kleiner 55 rH) zu lagern. Sie sollten innerhalb von drei bis sechs Monaten verarbeitet werden.

Das Fließverhalten von NoFlow-Prepregs ist eine charakteristische Eigenschaft und wird nach normierten Verfahren festgestellt (IPC-TM-650-2.3.17.2, 1997). Bei diesem Verfahren werden zwei 25,4 mm große kreisförmige Öffnungen in das Prepreg gestanzt. Drei Prepregs werden übereinandergelegt und zusammen mit einer FR4-Trägerplatte bei einem Druck von 14 Bar und einer Temperatur von 171°C für eine Dauer von 20 Minuten verpresst. Die Fließwerte des Prepregs werden aus der Differenz der Bohrungsradius R_N und des minimalen Radius der verpressten Prepregs $R_{L \text{min}}$ ermittelt.

$$\text{Flow}_{\text{Max}} = R_N - R_{L \text{min}} \quad (2.1)$$

Das wesentliche Differenzierungsmerkmal zwischen Prepregs und Klebefilmen besteht darin, dass die Klebefilme ohne Gewebeeinlage hergestellt werden. Dadurch werden sie flexibler und sind besser für den Aufbau von flexiblen Schaltungen geeignet. Wie die Prepregs werden auch die Kleberschichten in einem B-Zustand an den Leiterplattenhersteller geliefert. Dabei werden zwei Materialsysteme

bevorzugt eingesetzt. Ein System basiert auf modifizierten Epoxiden, das andere auf modifizierten Acrylaten. Während die Prepregs als Plattenware geliefert werden, sind die Acrylate auf einer Rolle mit einer Deck- und Trennfolie. Die Folie verhindert das Verkleben der Wicklungen auf der Rolle und erhöht die Stabilität während der mechanischen Strukturierung durch Schneide-, Fräs- und Bohrprozesse. Acrylatkleber sind hochflexibel, weshalb sie bevorzugt in dynamisch stark beanspruchten Schaltungen verwendet werden.

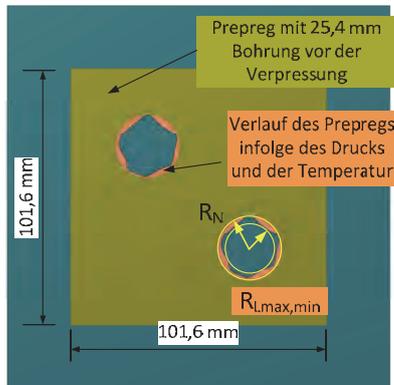


Bild 2-9: Bestimmung der Flussrate von NoFlow-Prepregs

Das Verfahren zur Bestimmung des Flusses von Klebefilmen ist in der (IPC-TM-650-No. 2.3.17.1, 1998) angegeben. Es weicht von dem in der (IPC-TM-650-2.3.17.2, 1997) aufgeführten Verfahren in verschiedenen Punkten ab. Wesentlich ist, dass das Fließverhalten bei Klebefilmen auf die Dicke der Kleberschicht bezogen wird. In den Datenblättern findet man die dimensionslose Angabe des relativen Flusses $Flow_{Relative}$:

$$Flow_{Relative} = \frac{\text{microns}}{\text{micron}} = \frac{\text{average flow}}{\text{adhesive thickness}} \quad (2.2)$$

Da die Kleberdicke vorgegeben ist, lässt sich der für die Schaltung relevante durchschnittliche Fluss („average flow“) leicht ermitteln. In Tabelle 2-5 sind die Fließwerte und weitere charakteristische Eigenschaften für einige Kleberfilme und NoFlow-Prepregs aufgelistet:

Material	Schichtdicke	Fluss-Min	Fluss-Max	Klebechemie	Halogenfrei	Gewebe	T _g [°C]
Pyralux LF 200	50 µm	101 µm	203 µm	Mod. Acrylat	✓	Nein	40
Nikaflex SAFP	40 µm	180 µm	200 µm	Mod. Epoxid	✓	Nein	80
Arlon 49N	58 µm	762 µm	2300 µm	Epoxid	✗	Ja	170
Ventec VT-447 PP	48 µm	254 µm	1217 µm	Epoxid	✓	Ja	170
Ventec VT-447 PP	74 µm	254 µm	1217 µm	Epoxid	✓	Ja	170

Tabelle 2-5: NoFlow-Prepregs und Kleber

Die Herstellung von Leiterplatten mit Prepregs stellt für den Leiterplattenhersteller die optimale Lösung dar. Die Prepreg sind durch die Gewebeeinlage sehr stabil und lassen sich einfach handhaben. Ein Großteil der Epoxygruppen ist bereits polymerisiert und nicht mehr gesundheitsschädlich.

Für den Aufbau von Mikrovibrationssensoren ist die Verwendung von Klebern oder Noflow-Prepreg zwingend erforderlich, da definierte Hohlräume harz- oder kleberfrei bleiben müssen. Da die Flussrate von Klebern sehr viel niedriger ist als von NoFlow-Prepregs, werden üblicherweise Klebefilme für den Aufbau von Mikrovibrationssensoren verwendet. Erst seit kurzem sind Noflow-Prepreg verfügbar, mit denen der Aufbau von Mikrovibrationssensoren realisierbar scheint (Tabelle 2-5). Gegenwärtig sind die Untersuchungen jedoch noch nicht abgeschlossen.

Eine weitere, interessante Alternative für den Auftrag von Klebeschichten kann der Siebdruck von ungehärtetem Epoxiklebstoff sein. Das erforderliche Strukturbild wird direkt im Druckprozess übertragen, der ca. nach 30 Sekunden abgeschlossen ist. Der Zeitgewinn ist enorm, da der Strukturierungsprozess für eine Kleber- oder Prepreglage im Fall der Mikrovibrationssensoren etwa 15 Minuten dauert. Dieser wirtschaftliche Vorteil wird allerdings durch andere technische Faktoren aufgewogen. Folgende Aspekte sind zu berücksichtigen:

- Das Ausbluten der Lösemittel des Klebers.
- Die Einstellung eines geeigneten Trocknungsgrades (B-Zustand) zur Erhöhung der Viskosität im Laminierprozess.
- Die Auswahl eines geeigneten Klebstoffes unter Berücksichtigung der Verträglichkeit mit nachfolgenden Prozessen (Beständigkeit in Galvanikbädern, Verschmierung im Bohrprozess, Ausgasung, Wasseraufnahme, Lötbeständigkeit, ...).

Epoxidharze bluten durch die Migration von unvernetzten, niedermolekularen Bestandteilen und Lösungsmitteln aus (Ebnesajjad, 2010). Der Prozess der Ausblutung kann durch eine Erwärmung der Oberfläche unmittelbar nach dem Siebdruck vermindert werden. Diese Erwärmung kann jedoch bereits die Polymerisation einleiten und die Überführung des Harzes in einen stabilen B-Zustand beeinflussen. Dieser Prozess ist aufwendig und nicht mit jedem Klebstoff zuverlässig realisierbar.

Eine Alternative zu den rein thermisch vernetzenden Epoxiden sind UV-empfindliche Klebstoffe. Diese gehen durch UV-Bestrahlung in den B-Zustand über und werden wie Prepregs zu einem späteren Zeitpunkt thermisch nachgehärtet. Die primäre Anwendung dieser Klebstoffe ist die Montage von Gläsern für Kamerasysteme in Handys (Delo GmbH, 2011). Die Produkte befinden sich allerdings noch in einem Entwicklungsstadium und sind noch nicht für die Herstellung von Mikrovibrationssensoren geeignet.

2.5 Diffusionsprozesse in Metallen

Die Diffusion ist nach (Dini, 1993) eine spontane Reaktion, mit der ein System Konzentrationsgefälle ausgleicht. In (Job & Rüffler, 2011) wird diese Definition verfeinert. Treibende Kraft der Diffusion sind Unterschiede im chemischen Potenzial. Diese Potenzialgradienten können durch verschiedene Konzentrationen der Substanzen im System hervorgerufen werden. Die Diffusion tritt sowohl in homogenen, einphasigen Systemen als auch in mehrphasigen, heterogenen Systemen auf.

Die Diffusion kann weitreichende schädigende Folgen nach sich ziehen. So wurden etwa Kupferkontakte für Steckverbinder mit einer reinen Goldschicht überzogen, um den Stecker vor Korrosion zu schützen. Das unterliegende Kupfer diffundiert jedoch durch die Goldschicht und korrodiert an der Oberfläche. Die erste Generation der Kugeln wurde mit goldplattierten Edelstahlkugeln aufgebaut. Auch dieses System zeigt Diffusionserscheinungen. Nicht alle Arten der Diffusion sind schädlich. Derzeit befinden sich Diffusionslote zur Herstellung hochwärmefester Lötverbindungen für Hochleistungs-Elektronikmodule in der Entwicklung (Purschel, 2011).

In Metallen können Atome diffundieren, indem sie den Gitterplatz wechseln, über Leerstellen im Gitter oder entlang von Korngrenzen oder Gitterstörungen wandern. Für den Platzwechsel der Atome müssen sich die Atome durch die vorhandenen Atome zwängen, wofür die Aktivierungsenergie Q überwunden werden muss.

Der Diffusionsstrom J gibt die Masse dm der Teilchen an, die in der Zeit dt durch die Fläche A durchtreten. Dieser Teilchenstrom ist nach dem ersten Fickschen Gesetz proportional zur Änderung der örtlichen Teilchenkonzentration $\partial c / \partial x$. Die Proportionalitätskonstante ist die Diffusionskonstante D , die stark temperaturabhängig ist und dem Arrheniusansatz $D = D_0 \cdot \exp(-Q/R \cdot T)$ genügt. Damit ergibt sich der Diffusionsstrom J zu:

$$J = \frac{1}{A} \cdot \frac{dm}{dt} = -D \cdot \frac{\partial c}{\partial x} = -\left(D_0 \cdot \exp\left(-\frac{Q}{R \cdot T}\right) \right) \cdot \frac{\partial c}{\partial x} \quad (2.3)$$

Der in Gleichung (2.3) angegebene Zusammenhang beschreibt den Massetransport im stationären Zustand, wobei D_0 als Frequenzfaktor bezeichnet wird, Q die Aktivierungsenergie angibt und R für die allgemeine Gaskonstante steht. Die zeit- und ortsabhängige Beschreibung der Konzentration erhält man aus dem zweiten Fickschen Gesetz:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \cdot \frac{\partial c}{\partial x} \right) = D \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = D \cdot \Delta c \quad (2.4)$$

Im Allgemeinen wird wie in Gleichung (2.4) die Konzentrationsabhängigkeit des Diffusionskoeffizienten vernachlässigt. Dies ist für große Festkörper meist zulässig.

Für dünne metallische Schichten im Bereich einiger weniger Nanometer bis zu einigen Mikrometern spielt der kristalline Aufbau der Schicht jedoch eine signifikante Rolle für das Diffusionsverhalten. Die Atome wandern bei dünnen Schichten hauptsächlich entlang der Korngrenzen. Die Wanderung wird durch Gitterfehler und Poren dominiert, sodass die in der Literatur angegebenen Diffusionskoeffizienten stark variieren. Für das Schichtsystem Kupfer-Nickel findet man beispielsweise Werte für den Frequenzfaktor D_0 , die zwischen $10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s}$ und $10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s}$ schwanken. Die zur Beschreibung der Temperaturabhängigkeit erforderliche Aktivierungsenergie variiert zwischen 1.0 eV und 2.32 eV (Abdul-Lettif, 2007). Auch für Gold ist bekannt, dass die Diffusionsrate entlang der Korngrenzen und Defektstellen mehrere Größenordnungen höher ist als die Diffusion durch das Gitter (Pinnel, 1979). Die hohe Diffusionsrate in dünnen Schichten kann bei erhöhten Verarbeitungstemperaturen massive Änderungen der Schichteigenschaften nach sich ziehen (Kapitel 5.2.1).

Für eine einfache phänomenologische Betrachtung der Diffusion in Dünnschichtsystemen kann man nach (Belova & Murch, 2006) einen effektiven Diffusionskoeffizienten einführen, der mit dem Gewichtungsfaktor g und den Diffusionskonstanten der Korngrenze D_{gb} und des Gitters D_1 beschrieben werden kann:

$$D_{\text{eff}} = g \cdot D_{gb} + (1 - g) \cdot D_1 \quad (2.5)$$

Infolge der Interdiffusion zweier Materialien mit unterschiedlichen Diffusionskoeffizienten können sich Poren an der Schichtgrenze ausbilden. Diesen Effekt nennt man Kirkendahl Effekt. Er ist unter anderem an der Grenzfläche zwischen Gold und Kupfer zu beobachten. Die Porenbildung kann so stark werden, dass kaum noch eine Haftung zwischen den beiden Schichten besteht. Damit sinken deren Stromtragfähigkeit sowie die thermische und mechanische Belastbarkeit.

Zur Vermeidung dieses Effektes trennt man Substanzen, die stark ineinander diffundieren, durch diffusionshemmende Materialien. Geeignete Metalle für elektronische Anwendungen sind beispielsweise Nickel aber auch Palladium. Bild 2-10 zeigt das Diffusionsverhalten von Kupfer und Gold, das durch eine Nickelschicht getrennt ist. Die Probe wurde bei 500 °C gelagert. Kupfer und Gold lösen sich kaum in Nickel, wie aus den Konzentrationverläufen für Kupfer und Gold in Nickel abgelesen werden kann. Dennoch können beide Materialien entlang der Korngrenzen des Nickels in die jeweils andere Schicht gelangen. Das Kupfer kann schließlich an die Oberfläche der Goldschicht wandern und dort korrodieren. Die Diffusionsraten durch das Nickel sind jedoch so gering, sodass dieses Schichtsystem in elektrotechnischen Anwendungen sehr beliebt ist (Pinnel, 1979).

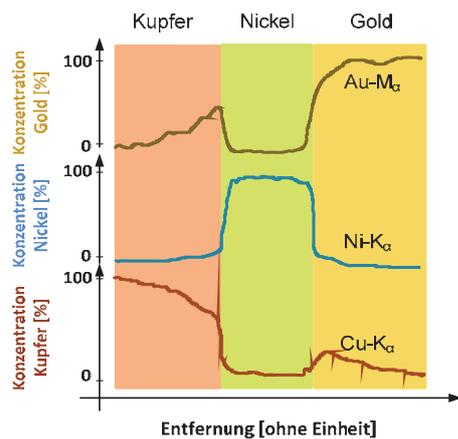


Bild 2-10: Schematische Darstellung der Diffusion von Cu, Ni, Au. Unter 500°C ist Nickel mit Gold oder Kupfer kaum mischbar. In oder auf der Gold- und Kupferschicht befindet sich nur wenig Nickel (blauer Konzentrationsverlauf Ni-K_α). Das an der Goldoberfläche detektierbare Nickel wird über Leerstellen im Gitter an die Oberfläche transportiert (Pinnel, 1979). Trotz der geringen Löslichkeit von Gold und Kupfer in Nickel können beide Materialien durch das Nickel transportiert werden. An der Grenzfläche zwischen Cu und Ni reichert sich Gold an (Au-M_α-Linie) und an der Ni-Au Grenze Kupfer (Cu-K_α-Line). Das Kupfer wandert schließlich an die Oberfläche und kann dort korrodieren.

Eine weitere Verringerung der Diffusion kann erreicht werden, indem eine Diffusionsbarriere aus unterschiedlichen diffusionshemmenden Materialien aufgebaut wird. Neben Nickel ist eine dünne Palladiumschicht gut geeignet, metallische Interdiffusionseffekte zu behindern. Das Verhalten von Palladium, Titan und Goldschichten ist in (Poate, 1981) umfassend beschrieben.

Diffusionsprozesse sind für die Mikrovibrationsschalter sehr bedeutsam. Infolge der Anreicherung von Fremdmetallen an der Oberfläche können die Leitfähigkeit und das Schaltverhalten der Sensoren verschlechtert werden. Eine detaillierte Beschreibung der Auswirkung der Diffusion auf den Mikrovibrationssensor erfolgt in Kapitel 6.4.2.

2.6 Eigenschaften elektrischer Kontakte

Elektrische Kontakte haben die Aufgabe, zwischen zwei elektrisch leitenden Komponenten eine stromleitende Verbindung herzustellen. Man unterscheidet unlösbare, lösbare, schleifende und rollende Kontaktverbindungen. Unlösbare elektrische Kontaktstellen werden durch Klebe-, Sinter-, Schweiß-, Bond-, Löt-, Press- oder Nietprozesse hergestellt. Lösbare Verbindungen werden geschraubt, geklemmt, gesteckt oder aufeinandergedrückt.

Zu den wirtschaftlich bedeutenden lösbaren Verbindungen zählen die steckbaren Verbinder sowie Relais, Schalter und Kontakt- und Prüfnadeln. Die Zahl der geometrischen Ausführungen der Kontaktflächen ist vielfältig, häufig bestehen sie jedoch aus zwei Ebenen oder einer ebenen und einer halbrunden Fläche. Ebene Kontaktflächen finden Anwendung in Schaltern oder Relais, runde Kontaktflächen werden in Kontaktpins für Test- und Prüfsysteme sowie Relais verwendet.

Die Kontaktfläche ideal glatter, elastischer Werkstoffe kann mit den Formeln der Hertzschen Kontakttheorie berechnet werden. Die Auflagefläche einer Kugel des Materials (1) auf einer ebenen Fläche des Materials (2) ergibt sich nach (Popov, 2010) zu:

$$a = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot F \cdot R}{4 \cdot E^*}} \quad ; \quad \text{mit} \quad \frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (2.6)$$

In Gleichung (2.6) bedeuten:

- a = Radius der kreisförmigen Auflagefläche
- F = Kontaktkraft (N),
- R = Radius der Kugel (mm),
- $\nu_{1,2}$ = Poisson-Zahlen der Kontaktmaterialien (1), (2),
- $E_{1,2}$ = E-Module der der Kontaktmaterialien (1), (2).

Die Kontaktfläche ist der Bereich, über den der elektrische Strom fließen kann. Aus der Gleichung (2.6) lässt sich ableiten, dass die Kontaktfläche a von der Kontaktkraft F abhängt. Die Kugeln der Mikrovibrationssensoren wirken mit sehr geringen Kräften auf die Oberfläche ein. Sie liegen im

Bereich einiger μN und sind damit um eine Größenordnung geringer als in mikromechanischen Relais (McBride & et al., 2009). Dies führt dazu, dass sich nur sehr kleine Kontaktflächen ausbilden. In Tabelle 2-6 sind einige Werte für Stahlkugeln mit verschiedenen Oberflächenbeschichtungen exemplarisch angegeben. Der Durchmesser der Berührfläche liegt im Bereich eines Mikrometers. Die Eindringtiefe d ergibt sich nach (Popov, 2010) zu $d=a^2/R$. Bei den gewählten Parametern beträgt sie für die Kugel etwa 0,25 nm.

Kugelmaterial	Padmaterial	Gewichtskraft [N]	Kugelradius [mm]	E-Modul1 Kugel [kN/mm ²]	E-Modul2 Pad [kN/mm ²]	Poisson Zahl1-Kugel	Poisson Zahl2-Pad	1/E*	E*	a-spot Radius [mm]	a-spot diameter [mm]
Au	Pd	2,30E-05	0,4	8,00E+04	1,17E+05	0,42	0,39	1,75E-05	5,70E+04	4,95E-04	9,89E-04
Pd	Pd	2,30E-05	0,4	1,17E+05	1,17E+05	0,39	0,39	1,45E-05	6,90E+04	4,64E-04	9,28E-04
Au	Au	2,30E-05	0,4	8,00E+04	8,00E+04	0,42	0,42	2,06E-05	4,86E+04	5,22E-04	1,04E-03
Pd	Pd	7,15E-05	0,6	1,17E+05	1,17E+05	0,39	0,39	1,45E-05	6,90E+04	7,75E-04	1,55E-03
Pd	Pd	2,65E-03	2	1,17E+05	1,17E+05	0,39	0,39	1,45E-05	6,90E+04	3,86E-03	7,72E-03
Pd	Pd	3,02E-02	4,5	1,17E+05	1,17E+05	0,39	0,39	1,45E-05	6,90E+04	1,14E-02	2,28E-02
WC	Al	1,00E-02	0,02	5,00E+05	7,00E+04	0,23	0,34	1,45E-05	6,88E+04	1,30E-03	2,59E-03

Tabelle 2-6: Auflagefläche einer Edelmetallkugel mit Stahlkern auf einer ideal glatten Fläche

Die Materialdaten stammen aus (Vinaricky, 2002) und (Barat Carbide GmbH, 2006). Die Andruckkräfte für die Kugeln ergeben sich aus der Gewichtskraft der Kugeln. Die Wolframkarbidkugel (WC) simuliert das Verhalten einer Wafer-Prüfnadel, die mit einer Andruckkraft von 10 mN auf das Al-Pad gedrückt wird (Kataoka & et al., 2003). Bei einem Spitzendurchmesser von 40 μm dringt die Prüfnadel etwa 500 nm in das Aluminiumpad ein. Die Eindringtiefe der Prüfnadel liegt somit in einem Bereich, der in dieser Größenordnung auch messtechnisch ermittelbar ist.

Da die Oberflächen technischer Werkstücke immer rau sind, ergeben sich in der Praxis andere Verhältnisse als durch die Hertzsche Kontakttheorie beschrieben. Der elektrische Kontakt realer, aufeinandergedresser Verbindungen wird über einzelne, sehr kleine metallische Berührungsflächen, den „a-spots“ hergestellt. Zudem sind die Oberflächen mit einer Fremdschicht überzogen, deren Schichtdicke von den Materialien und Produktionsbedingungen abhängt. Die Berührfläche realer Kontakte wird nach (Vinaricky, 2002) in die scheinbare Kontaktfläche A_S , die mikroskopisch tragende Kontaktfläche A_T und die elektrisch wirksame Konturfläche A_W unterteilt (Bild 2-11). Die gesamte tragende Kontaktfläche A_T sowie die elektrisch wirksame Konturfläche A_W ergeben sich aus der Summe der zugehörigen einzelnen mikroskopischen Berührflächen. Die elektrisch wirksame Fläche A_W ist dabei stets kleiner als die tragende Fläche A_T .

Die metallischen, elektrisch leitenden Zonen entstehen durch eine plastische Verformung der Mikrospitzen der Oberflächen. Hierfür ist eine hinreichend große Kraft erforderlich. Bei einer elastischen Verformung des Kontaktmetalls kann die Fremdschicht in angrenzende Vertiefungen geschoben werden, wodurch die elektrisch wirksame Fläche weiter vergrößert wird.

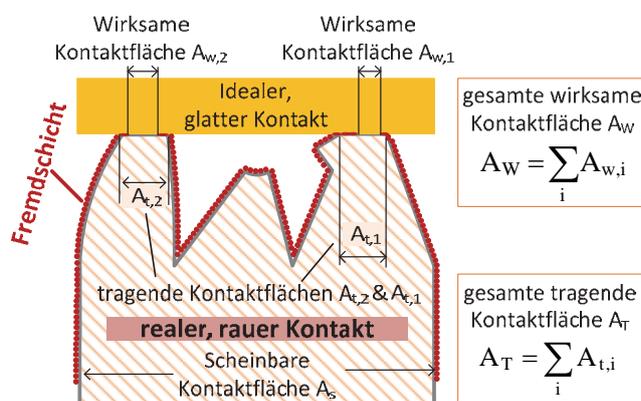


Bild 2-11: Darstellung eines Kontakts zwischen einer rauhen und ideal glatten Fläche

Der elektrische Widerstand über der Kontaktstelle ergibt sich aus der Parallelschaltung der Widerstände der gesamten elektrisch wirksamen Kontaktflächen A_W und dem Widerstand der Fremdschichtbelegten Fläche. In realen Kontakten reicht die Fremdschichtdicke von wenigen Atomlagen im Sub-Nanometerbereich bis zu einer dicken, sichtbaren Schicht im Mikrometerbereich. Abhängig von der Schichtdicke können die Elektronen ungehindert durch die Fremdschicht tunneln oder sie werden bei ihrem Durchtritt behindert, was sich in einer Erhöhung des Widerstandes bis hin zur vollständigen Isolation äußert.

2.6.1 Ideal reine Kontaktwiderstände

Der Strom, der über die elektrisch wirksame Kontaktfläche A_W fließt, fließt über einen verengten Bereich, die sogenannte Engstelle. Die Ermittlung des Engwiderstandes realer Kontakte erfolgt nach (Timsit, 1998) mithilfe des Holmschen Ellipsenmodell (Holm, 2000). Der Engwiderstand R_E ergibt sich in diesem Modell aus dem spezifischen elektrischen Widerstand ϱ und dem Radius der Engstelle a zu:

$$R_E = \varrho / (2 \cdot a) \quad (2.7)$$

Der Widerstand der elektrisch wirksamen Kontaktfläche A_W erhält man aus der Parallelschaltung der Einzelwiderstände:

$$R_E = \varrho / \left(2 \cdot \sum_{i=1}^n a_i \right) \quad (2.8)$$

Bei der Parallelschaltung gleichgroßer Einzelkontakte ergibt sich der in Bild 2-12-rechts dargestellte Widerstandsverlauf des Gesamtkontaktes. Die elektrische Leitfähigkeit und der Durchmesser der Einzelkontakte wurden willkürlich gewählt. Erst bei einer gleichzeitigen Kontaktierung von etwa 20-30 Einzelflächen ist der Einfluss der Topografie der Oberfläche auf das Schaltverhalten gering. Wird der elektrische Kontakt nur über wenige Punkte hergestellt, so ist der Durchgangswiderstand sehr von der Topografie abhängig und schwankt stark.

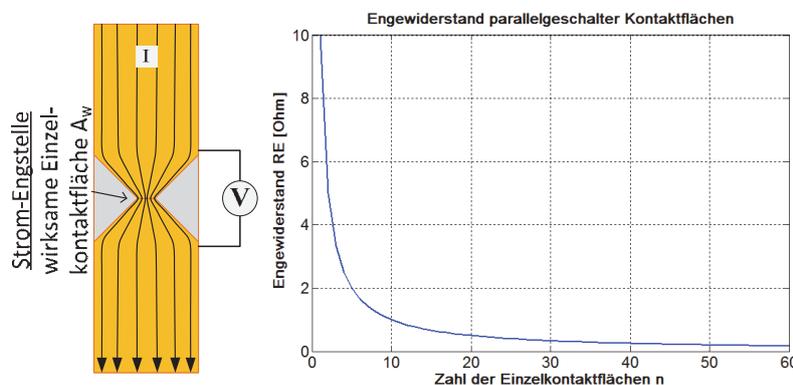


Bild 2-12: Einschnürung des Stromflusses durch die wirksame Kontaktfläche

In Tabelle 2-7 ist der rechnerische Wert des Engwiderstandes einer Kontaktstelle in Abhängigkeit des Radius a für verschiedene Materialien angegeben. Eine kreisförmige, rein metallische Kontaktstelle mit einem Radius von $10 \mu\text{m}$ weist für Kupfer und Gold einen Widerstand im Bereich von einem Milliohm auf. Palladium ist mit 5 Milliohm etwas hochohmiger.

Engewiderstand (Constraint Resistance)			
Material	spez. Widerstand [$\Omega \mu\text{m}$]	a-spot Radius [μm]	Engewiderstand [Ω]
Cu	1,70E-02	0,1	0,085
		10,0	0,00085
Au	2,20E-02	0,1	0,11
		10,0	0,0011
Pd	1,08E-01	0,1	0,54
		10,0	0,0054

Tabelle 2-7: Engewiderstand für verschiedene Materialien und Kontaktradien

Empirische Untersuchungen und theoretische Betrachtungen (Greenwood, 1966) für reale, raue Oberflächen haben ergeben, dass der Engewiderstand reiner metallischer Kontakte nahezu umgekehrt proportional zur Kontaktkraft F_k ist (Gleichung (2.9)).

$$R_E \sim F_k^{-0,9} \quad (2.9)$$

Die Diskrepanz der Exponenten, die zwischen den zusammengefassten Gleichungen (2.6) und (2.7) [$R_E \sim F_k^{-0,3}$] und der Gleichung (2.9) besteht, ergibt sich aus dem Umstand, dass die Untersuchungen zur Ermittlung der Gleichung (2.9) üblicherweise mit hohen Kontaktkräften in einem Bereich von 1-1000 N durchgeführt wurden. Bei diesen Kräften werden die Mikrospitzen plastisch verformt (Vinaricky, 2002) und die Oberfläche vergrößert sich stärker als im rein elastischen Verformungsfall.

2.6.2 Fremdschichtbelegte Kontaktwiderstände

Fremdschichten auf Metalloberflächen entstehen durch Ablagerungen von Partikeln oder durch Adsorption von Molekülen aus Flüssigkeiten und Gasen. Partikel auf der Leiterplattenoberfläche können beispielsweise Löt- oder Bondprozesse beeinflussen. Partikel können meist durch einfache Reinigungsschritte von der Oberfläche entfernt werden. Moleküle hingegen, die auf der Oberfläche adsorbiert werden, reagieren im Allgemeinen mit der Oberfläche. Das Reaktionsprodukt kann elektrisch isolierend sein oder zu einem korrosiven Angriff der Oberfläche führen. Adsorbierte Moleküle können meist nur noch durch aufwendige Reinigungsverfahren wie die Plasmareinigung von der Oberfläche beseitigt werden. Gasförmige Substanzen, die durch Adsorption zu chemischen Veränderungen metallischer Oberflächen führen, sind u. a. Sauerstoff, in Luft gelöste Wassermoleküle, Stick- und Schwefeloxide sowie Ausgasungsprodukte aus Kunststoffen.

Damit ein elektrischer Strom durch eine fremdschichtüberzogene Kontaktstelle fließen kann, muss die Fremdschicht durchbrochen werden. Dies kann durch hohe mechanische Kräfte oder durch elektrische und thermische Mechanismen geschehen.

In Mikrokontakten können die Fremdschichten aufgrund der geringen Kontaktkräfte mechanisch nicht beseitigt werden (Tyco Electronics Ltd., 2001). Dünne Ablagerungen bis etwa 20 nm (Holm, 2000) werden jedoch bei Feldstärken von 10^7 V/cm von den Elektronen durchtunnelt. Handelt es sich bei diesen Ablagerungen um chemische Reaktionsprodukte, so weisen die Schichten einen halbleitenden Charakter auf. Der Kontaktwiderstand verhält sich bei diesen Schichten stark nichtlinear und nimmt oberhalb einer Schwellwertspannung rapide ab (Vinaricky, 2002).

Wenn die Deckschichten in ihrer Stärke zunehmen und nicht mehr getunnelt werden können, fließt kein Strom mehr. Zur erneuten Herstellung der Leitfähigkeit der Schicht muss die Spannung deutlich erhöht werden. Ab einem bestimmten Spannungswert können die Elektronen an einigen Stellen wieder tunneln. Der Stromfluss führt zu einer Verdrängung der Fremdschicht und zu einer Ausbildung eines stromtragenden Kanals. Die Stromdichte in diesem Kanal führt zu einer enormen Wärmeentwicklung, bei der das Metall lokal aufschmilzt und eine Metallbrücke bildet. Die Fremdschicht wird bei diesem Vorgang zerstört und der Widerstand sinkt ab. Dieser Zustand wird als A-Fritting bezeichnet. Mit zunehmender Dauer des Stromflusses verbreitern sich die leitfähigen Kanäle und der Widerstand nimmt weiter ab. Man spricht von der B-Fritting (Braunovic & et al., 2007). Die Spannung, bei welcher der Widerstand zusammenbricht, bezeichnet man als Frittingspannung U_F . Die Spannung, die

sich am Ende des Frittvorganges einstellt, wird als Schlussspannung U_S bezeichnet (Vinaricky, 2002), (Degen & et al., 2006). Die Abnahme des Widerstandes im Bereich der B-Frittung muss nicht zwangsläufig linear verlaufen. Sie kann, wie in Bild 2-13 dargestellt, auch sprunghaft erfolgen.

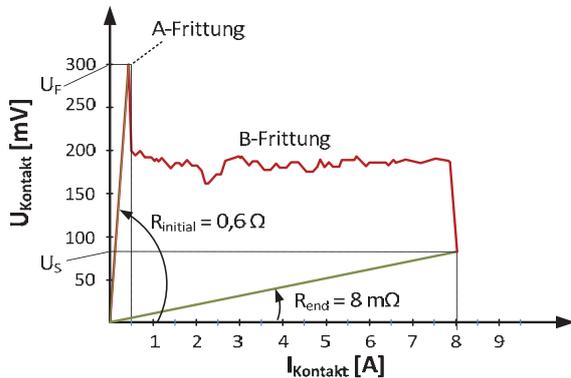


Bild 2-13: Kontaktspannung in mV über der Stromstärke in A für einen frittenden Kontakt

Die Übertemperatur, die sich in der Engstelle bei Stromfluss einstellt, kann mit dem spezifischen elektrischen Widerstand λ und thermischen Leitfähigkeit ρ aus

$$T_m - T_1 = V^2 / (8 \cdot \lambda \cdot \rho) \quad (2.10)$$

ermittelt werden. Hierbei steht V für die Spannung über der Engstelle. $T_m - T_1$ gibt die Differenz zwischen der Temperatur der Engstelle und des Kontaktes (Timsit, 1998) an. Aus Gleichung (2.10) ergibt sich, dass viele elektrotechnisch relevante Metalle wie Gold, Nickel und Kupfer bereits bei einer Spannung zwischen 0,08 V und 0,16 V erweichen und zwischen 0,24-0,7 V schmelzen. Für Gold ergibt sich bei einer thermischen Leitfähigkeit von $314 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, einem spezifischen Widerstand von $2,2 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$ und einer Schmelztemperatur von $1064 \text{ }^\circ\text{C}$ eine Schmelzspannung von $V = 0,24 \text{ V}$ (mit $T_1 = 20^\circ\text{C}$). In Gleichung (2.10) wird die Temperaturabhängigkeit der thermischen Leitfähigkeit und der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit unterschlagen, so dass man in der Realität meist höhere Werte für die Schmelzspannung misst. Diese liegen für Gold bei 0,43 V (Cuthrell & Jones, 1978).

Während die Frittung insbesondere bei sulfidischen und oxidischen Belägen zu beobachten ist, kann bei organischen Schichten eine „Antifrittung“ auftreten (Vinaricky, 2002). Die organische Fremdschicht zersetzt sich unter dem Einfluss der hohen Temperaturen im Fall des Stromflusses und führt zu einer Verkokung der Kontaktstelle. Somit nimmt der Widerstand oberhalb einer Grenzspannung zu.

Organische Fremdschichten sind häufig bei Kontaktflächen zu beobachten, die in Kunststoffgehäusen integriert sind. Bei unzureichender Vernetzung oder ungeeigneter Polymermatrix (Kapitel 2.4.2) dampfen organischen Substanzen bei höheren Temperaturen aus den Kunststoffen aus und kondensieren unter anderem auf den Kontaktflächen. In Relais wurden diese Effekte in den Jahren von 1970 bis etwa 1985 erforscht. Die kondensierten organischen Stoffe verzundern bei Stromfluss und bilden braune, puderartige isolierende Schichten im Bereich der stromtragenden Kontaktstelle. Im Jahr 2000 haben (Koidl & et al., 2000) systematische Untersuchungen durchgeführt, um die Sensitivität verschiedener metallischer Oberflächen bezüglich der Ausgasung aus technisch relevanten Kunststoffarten zu analysieren. Neben aliphatischen Kohlenwasserstoffen (Hexanen), die beispielsweise aus Acrylaten abdampfen, wurden aromatische Substanzen wie Toluene, Phenole und andere untersucht. In Bild 2-14 ist die Abhängigkeit des Kontaktwiderstandes verschiedener metallischer Substanzen von organischen Dämpfen dargestellt. In dem orange dargestellten Bereich übersteigt der Kontaktwiderstand den von (Koidl & et al., 2000) festgelegten kritischen Wert von einem Ohm. Die Ursache für das unterschiedliche Verhalten der verschiedenen Metalle liegt in deren Adsorptionsfähigkeit, die ebenfalls in (Koidl & et al., 2000) untersucht wurde. Silber zeigt dabei eine geringe Neigung zur Adsorption von Kohlenwasserstoffen, ist allerdings sehr empfindlich gegenüber Sulfidbildung (Tyco Electronics, 2000).

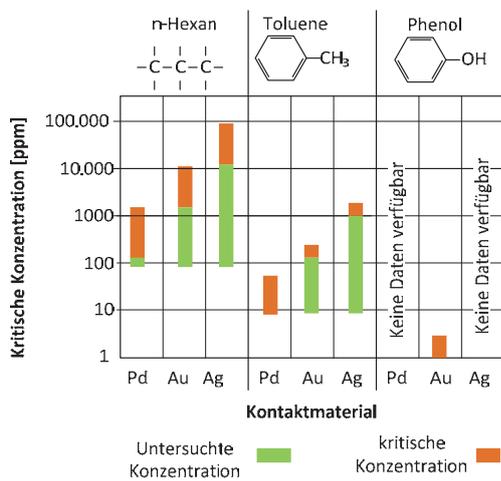
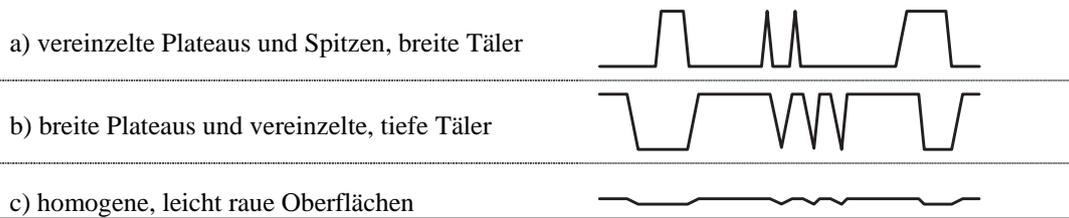


Bild 2-14: Widerstandsverhalten elektrischer Kontakte in organikhaltigen Atmosphären (Koidl & et al., 2000)

2.6.3 Oberflächenrauheit

Der elektrische Widerstand des Kontaktes hängt von der Dichte und der Fläche der a-spots im Kontaktbereich ab. Der Widerstand wird somit substanziell durch die Oberflächenrauheit bestimmt. Generell kann man verschiedene Oberflächentopologien unterscheiden:



Im Fall a) ist mit der Kontaktbildung durch wenige aber große „a-spots“ zu rechnen. Bei einer Topologie des Typs b) oder c) wird der Kontakt über viele kleinere wirksame Flächen gebildet (Slade, 1999). Die wirksame Fläche, die sich über zwei Kontakte ausbildet, ist unabhängig von ihrer scheinbaren Berührfläche und hängt allein von der Kontaktkraft ab (Kapitel 2.6.1). Bei der wachsenden Zahl von Kontaktstellen innerhalb einer größeren scheinbaren Berührfläche nimmt der Druck auf den einzelnen Punkt ab, wodurch sich dessen wirksame Fläche verringert. Damit bleibt die gesamte wirksame Kontaktfläche konstant.

Die Mikro-Rauheit der Oberfläche ist überaus widerstandsfähig gegen mechanische Belastungen. Williamson und Hunt haben 1972 an verschiedenen Metallen nachgewiesen, dass hohe statische mechanische Belastungen zwar den gesamten Körper verformen, die Mikrorauheiten damit jedoch kaum verändern. Neben Gold wurde dieses Verhalten für Aluminium aber auch für das sehr weiche Indium nachgewiesen. In Bild 2-15 ist schematisch die Oberfläche eines Aluminiumprofils nach der Verformung mit einer glatten Kugel dargestellt. Trotz der großen makroskopischen Verformung bleibt die mikroskopische Rauheit erhalten

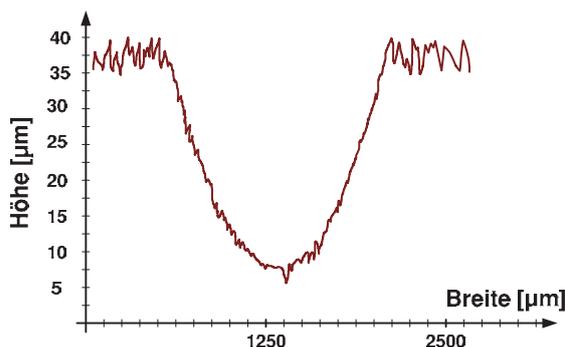


Bild 2-15: Oberflächen-Mikrorauheit nach mechanischer Belastung (Williamson & Hunt, 1972)

Die Betrachtungen dieses Abschnitts zeigen (Tabelle 2-6 und 2-7), dass auch sehr kleine Stahlkugeln mit einem Durchmesser von 830 μm und darunter prinzipiell niedrige Kontaktwiderstände generieren können. Selbst bei rein elastischer Verformung bildet sich theoretisch noch eine Kontaktstelle mit einem Durchmesser von einem Mikrometer aus, sodass mit einem guten Schaltverhalten zu rechnen ist. Hierfür müssen allerdings die Oberflächen sehr sauber sein, da die Fremdschichten mechanisch nicht aufgebrochen werden können. Ferner ist zu berücksichtigen, dass die Kugel zwei Kontaktstellen überbrücken muss.

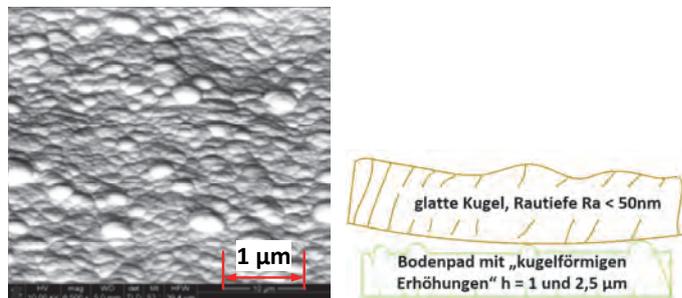


Bild 2-16: REM Aufnahme der Oberfläche eines galvanisch beschichteten Kontaktpads

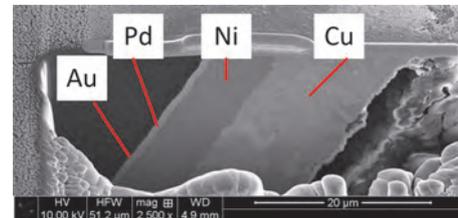


Bild 2-17: FIB-Schnitt durch eine chemische Ni-Pd-Au Schicht

Die Kontaktfläche, die sich zwischen der Kugel und der sensorischen Oberfläche ausbildet, hängt von dem Beschichtungsprozess ab. Galvanisch aufgebaute Nickel-Goldschichten sind durch wenige Kontaktstellen und breite Täler geprägt. Chemisch hergestellte Nickel-Palladium-Gold Schichten sind sehr viel ebener, sodass die Kontaktfläche durch ein breites Plateau mit wenigen Vertiefungen gekennzeichnet ist. Bild 2-16 zeigt in einer REM-Aufnahme die typische Oberflächentopologie eines galvanisch mit Nickel und Gold beschichteten Bodenpads. Sie ist durch viele halbkugelartige Erhöhungen im Bereich zwischen einem und drei μm geprägt. Somit bildet sich der elektrische Kontakt der sehr glatt geschliffenen Kugel und dem Bodenpad nur an wenigen Punkten aus.

In Bild 2-17 ist ein Schnitt mit einem fokussierten Ionenstrahl (FIB) durch die elektrochemisch aufgebaute Ni-Pd-Au Oberfläche auf der Leiterplatte eines Mikrovibrationssensors dargestellt. Die Oberfläche ist deutlich ebener, sodass sich als Kontaktfläche ein breites Plateau mit einigen Vertiefungen ausbildet. Ob eine der Oberflächentopologien Vorteile gegenüber der anderen bezüglich der Herstellung der Vibrationssensoren hat, kann nicht abschließend beurteilt werden. Das Herstellungsverfahren zur Produktion von Vibrationssensoren mit galvanisch abgeschiedenen Schichten ist nach der Umstellung auf elektrochemischen Schichten nicht weiter verfolgt worden.

2.6.4 Schwingungsreibverschleiß

Der Schwingungsreibverschleiß¹⁰ beschreibt mechanische Effekte, die infolge geringer Schwingungen der Kontaktflächen zueinander zu einer Widerstandserhöhung führen. Die Schwingungsamplituden für das Auftreten des „Frettings“ liegen in einem Bereich von einigen 100 nm bis zu 100 μm (Slade, 1999). Die Schwingungen werden durch Vibrationen und durch thermische sowie äußere magnetische Effekte verursacht. Mechanische Verschleißerscheinungen sind somit bei den Mikrovibrationssensoren auch in die Klasse des Schwingungsreibverschleißes einzuordnen. Die Verschlechterung des elektrischen Kontaktes kann zwei unterschiedliche Ursachen haben. Einerseits können sich isolierende Metalloxidschichten aufbauen, andererseits können Polymerschichten in der Kontaktstelle gebildet werden.

Im Falle der Metalloxydation verursacht die relative Bewegung der Oberflächen zueinander einen geringen Oberflächenabrieb und legt hochreines Metall frei. Es ist chemisch sehr aktiv ist und oxidiert

¹⁰ Der Schwingungsreibverschleiß wird auch als Fretting bezeichnet.

in sauerstoffhaltigen Atmosphären schnell. Durch die schwingende Bewegung werden auch die oxidierten Oberflächenbestandteile abgerieben. Sie reichern sich zunächst in den Mikro-Vertiefungen der Oberfläche an und wachsen solange auf, bis die Oberfläche vollständig mit einer Oxidschicht überzogen ist (Bild 2-18).

Die Polymerbildung durch Reibung betrifft im Wesentlichen nur die Gruppe der Platinmetalle, zu denen auch Palladium zählt. Man geht davon aus, dass Bruchstücke organischer Kohlenwasserstoffverbindungen aus der Atmosphäre von der katalytisch wirkenden Oberfläche adsorbiert werden und dort zu langkettigen Polymeren umgesetzt werden. Durch die Reibung werden immer wieder hochreine Bereiche auf dem Metall freigelegt, sodass der katalytische Polymerbildungsprozess auf dem Palladium nicht stoppt. Dicke Polymerschichten können gebildet werden (Braunovic & et al., 2007).

Das Kontaktversagen durch Fretting kann reduziert werden, indem man oxidationsanfällige Metalle wie Kupfer mit einer Edelmetallschicht überzieht. Silber verhindert das Fretting am effektivsten, neigt jedoch zur Bildung von Silbersulfid oder Silberchlorid. Gold oder Hartgoldlegierungen verhindern bei geringen Kontaktkräften das Fretting ebenfalls überaus effektiv.

Zur Unterdrückung des Polymerfrettings wird Palladium häufig mit einer dünnen Goldschicht überzogen. Spezielle Relais werden mit Schutzgas gefüllt und aus Kunststoffen aufgebaut, die nicht oder nur in vernachlässigbarem Ausmaß Kohlenwasserstoffe abgeben.

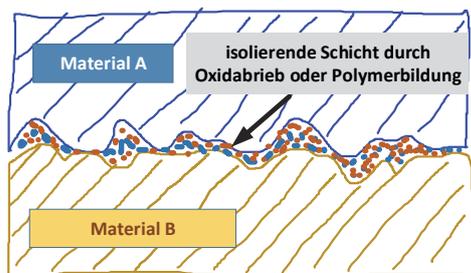


Bild 2-18: Bildung einer isolierenden Schicht infolge von Reibverschleiß („Fretting“)

Die Ursachen des mechanischen Verschleißes sind nach (Braunovic & et al., 2007) bis heute noch nicht abschließend erklärt worden. In einfacher Form kann der Verschleiß von Kontaktstellen gemäß der Gleichung

$$I = k \cdot F / H \quad (2.11)$$

beschrieben werden (Archard, 1953), (Braunovic & et al., 2007). In Gleichung (2.11) gibt I das Volumen des verschlissenen Materials an, das bei einer vorgegebenen Verschiebung der Kontaktpartner produziert wird. F steht für die Kraft, mit der die Kontakte gegeneinander gepresst werden und H kennzeichnet die Härte des Materials. Die Konstante k ist ein materialspezifischer Korrekturfaktor. Der Gleichung liegt eine einheitlich lange Bewegungsstrecke zugrunde.

Unterhalb einer minimalen Krafeinwirkung von 5 cN ist beispielsweise bei Gold keine Bildung von Abrieb mehr zu beobachten (Suh, 1973). Diese Beobachtung deckt sich mit meinen Prüfergebnissen mechanisch stark belasteter Mikrovibrationssensoren, bei denen ebenfalls kein loser Abrieb zu erkennen ist.

2.6.5 Kontaktmaterialien

Die Anforderungen an Materialien für elektrisch schaltende Kontakte sind vielfältig. Sie müssen eine hohe elektrische Leitfähigkeit besitzen, gegen Korrosion, Elektromigration und chemische Angriffe resistent und zudem mechanisch belastbar sein. Ein preiswertes Material, das alle diese Eigenschaften besitzt, ist nicht verfügbar. Die elektrischen und chemischen Eigenschaften werden allesamt nur von der Gruppe der Edelmetalle erfüllt. Reines Gold ist jedoch teuer und mechanisch nur wenig beanspruchbar. Die Metalle der Platingruppe haben gute mechanische und elektrische Eigenschaften, wirken aber katalytisch. So versuchen Materialwissenschaftler, durch den Einsatz von metallischen

Legierungen oder der Herstellung von Schichtsystemen den technischen und wirtschaftlichen Systemanforderungen zu genügen. Zu den wichtigsten elektrischen Materialien für schaltende Kontakte zählen Silber, Gold, Palladium, Wolfram, Nickel und eine Vielzahl von Legierungen aus diesen und anderen Metallen.

Im Folgenden werden einige Eigenschaften von Kontaktmetallen vorgestellt, die für die Herstellung von Mikrovibrationssensoren bedeutend sind.

Gold ist chemisch überaus inert und verfügt über eine sehr hohe elektrische Leitfähigkeit. Es ist hervorragend für Anwendungen geeignet, bei denen Fremdschichten infolge geringer Kontaktkräfte mechanisch nicht aufgebrochen werden können. Da Gold in einer reinen Form sehr weich ist und dünne Goldschichten schnell durchgerieben werden, wird es in Schalteranwendung meist mit Kobalt, Nickel oder Eisen legiert. Diese Hartgoldschichten werden vorzugsweise in Applikationen mit hohen mechanischen Anforderungen eingesetzt. Allerdings neigen die Dotierungszuschläge dazu, sich bei hohen Temperaturbelastungen an der Oberfläche anzureichern. Sie bilden dort eine Oxidschicht mit verringerter elektrischer Leitfähigkeit. Die Erhöhung der Härte alleine ist bei den Hartgoldschichten nicht für die erhöhte Verschleißfestigkeit maßgeblich. Vielmehr wird durch den Einbau des Kobalts, Eisens oder Nickels auch eine gewisse Menge organischer Substanzen mit in das Gold eingebaut, die eine schmierende Wirkung haben (Okinaka, 2000).

Aufgrund des hohen Goldpreises verwendet man heute in der Regel nur noch sehr dünne Goldschichten, die durch elektrochemische-, Sputter- oder Aufdampfverfahren auf die Oberfläche der Kontaktwerkstoffe aufgebracht werden. Die reinsten Goldschichten können mit gesputterten oder aufgedampften Schichten aufgebaut werden. Jedoch muss man berücksichtigen, dass innere Spannungen der Schichten bei Überschreiten einer Grenztemperatur abgebaut werden und eine Rekristallisation der Schicht einsetzt. Hierdurch bilden sich Poren, wodurch das unterliegende, meist unedle Material, nicht mehr vollständig geschützt wird. Die Oberfläche kann infolge von Porenkorrosion ihre Funktion vollständig verlieren. Dieser Effekt ist nicht nur bei gesputterten Schichten (Hymann, 1999), sondern auch bei galvanisch abgeschiedenen Schichten zu beobachten (Khan & et al., 1991). Galvanisch aufgebaute Schichten sind immer porenbehaftet. Eine Goldschicht kann durch mechanische Bearbeitung leicht verdichtet werden. Die Kugel des Mikrovibrationsschalters wurde mittels eines Vibrationsteststand (Kapitel 5.8) stark beschleunigt, sodass die heftigen Stöße die Oberfläche kalt verformt haben. Bild 2-19 zeigt die Oberfläche einer Kugel nach der Bearbeitung. Die poröse Oberfläche konnte jedoch nicht vollkommen eingebnet werden.

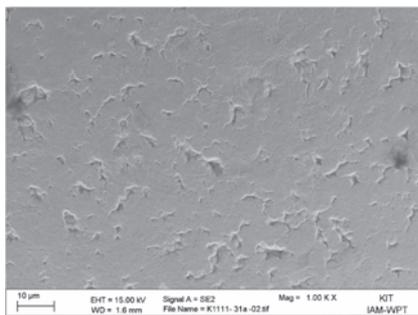


Bild 2-19: Poren in einer vergoldeten Edelstahlkugel nach der Kaltverformung

Palladiumhaltige Kontaktmaterialien werden seit den 1970ern für den Einsatz in Leiterplatten und Relais genutzt. Palladium kann bei hohen Temperaturen (>300-350°C) oxidieren und Palladiumoxid bilden. In chlorhaltigen Umgebungen neigt es zur Bildung von Palladium-Chloridsalzen (PdCl₂). Ferner neigt es in Atmosphären mit organischen Spuren zum Polymerfretting.

Palladium kann galvanisch oder elektrochemisch abgeschieden werden. Im Fall der elektrochemischen Abscheidung wird in die Palladium-Schicht etwa drei Prozent¹¹ Phosphor eingebaut. Hierdurch bildet

¹¹ Gewichtsprozent

sich eine amorphe Struktur aus, die eine sehr gute Diffusionsbarriere für andere Metalle darstellt. Palladiumschichten ab einer Dicke von etwa 150 nm gelten als diffusionsdicht (Ötzkök, 2012). Im Gegensatz zu vielen elektrochemisch abgeschiedenen Goldschichten lässt sich Palladium auch problemlos in hohen Schichtdicken über 500 nm abscheiden. Somit kann das Risiko einer funktionsunfähigen Schicht durch partielle Fehler in der Abscheidung erheblich minimiert werden.

In Bild 2-20 ist der Widerstand metallisch reiner Gold-Gold Kontakte und Palladium-Palladium Kontakte über der Anpresskraft aufgetragen. Die dargestellten Ergebnisse nach (Hosaka & et al., 1994) decken sich allerdings nicht mit den Untersuchungen, die im Rahmen dieser Arbeit mit den Sensorkugeln ermittelt wurden. Die Widerstandswerte liegen für die Kugeln der Mikrovibrationssensoren mit einem Durchmesser von 800 μm und einer Gewichtskraft von etwa 20 μN in einem Bereich von 250-500 $\text{m}\Omega$. Andere Untersuchung von (Hymann, 1999) geben Widerstandswerte in ähnlichen Größenordnungen an. Bei der Beurteilung der Ergebnisse sind jedoch immer die Qualität der Edelmetallschicht und der eingebaute Fremdstoffgehalt zu berücksichtigen.

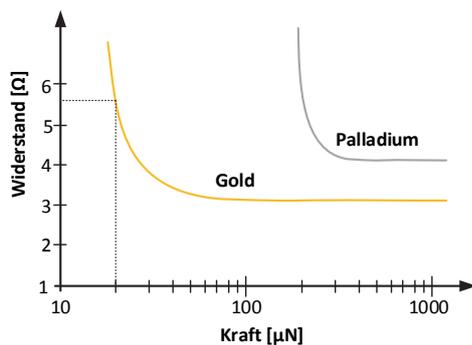


Bild 2-20: Übergangswiderstände für Au und Pd Kontakte

Die theoretischen Betrachtungen der Kontakttheorie belegen, dass die Herstellung eines Mikrovibrationssensors mit hochreinen Goldkugeln bis zu einem Durchmesser unter 500 μm möglich ist. Hierbei spielt allerdings die Oberflächenreinheit eine herausragende Rolle. Die galvanisch abgeschiedene Edelmetallschicht kann kontaminiert sein, so dass signifikante Abweichung von den theoretisch zu erwartenden Kontaktwiderständen beobachtbar sind.

2.7 Galvanikprozesse

Elektrochemische Verfahren basieren auf der Wechselwirkung zwischen chemischen und elektrischen Prozessen. Bild 2-21 stellt die Unterteilung elektrochemischer Verfahren in Prozesse zur Speicherung von Energie und zur Stoffumwandlung dar.

Im Rahmen dieser Arbeit sind die Stoffumwandlungsprozesse relevant. Hierzu zählen der Korrosionsschutz, die galvanische Abscheidung und die Auflösung von Metallen. Diese drei Prozesse sind von hoher wirtschaftlicher Relevanz. So betrug der Anteil der Oberflächentechnik am Bruttosozialprodukt im Jahr 2005 in Deutschland ca. 2%. Die daraus generierte Wertschöpfung wird mit 20% angegeben, was allein im Bereich des Korrosionsschutzes im Jahr einem Volumen von 150 Mrd. € entsprach (sofia, 2012). Der bedeutendste Markt für die Oberflächentechnik ist die Automobilbranche, in die etwa 40% aller oberflächenbehandelten Produkte geliefert werden. Galvanisch bearbeitete Oberflächen sind jedoch auch in allen elektronischen Komponenten, Leiterplatten und Steckern anzutreffen.

In den Mikrovibrationsschaltern werden elektrochemische Prozesse für den Aufbau der sensorischen, metallischen Schichten auf den Leiterplatten und Kugeln, zur Strukturierung der Leiterbahnen und zur Herstellung der Durchkontaktierungen verwendet. Die detaillierte Kenntnis der Grundlagen der Galvanikprozesse war entscheidend, um Fehlerquellen bei der Herstellung von Mikrovibrationssensoren auszuschließen.

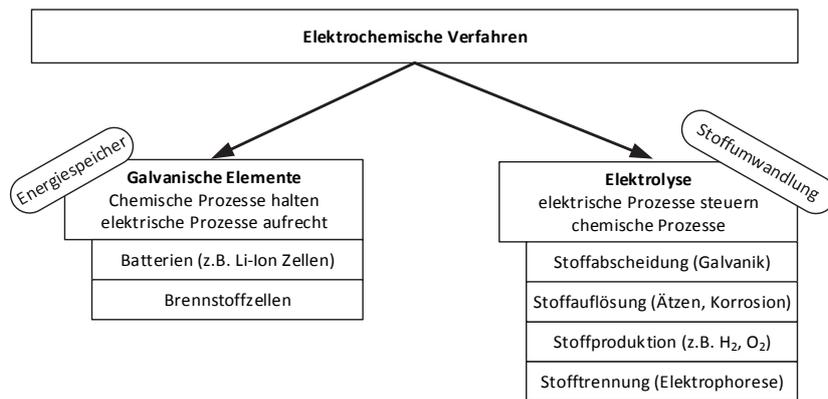
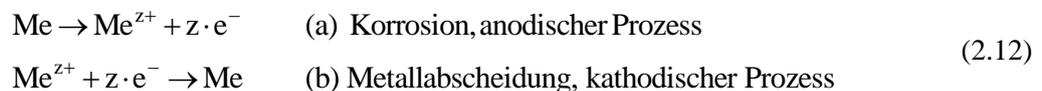


Bild 2-21: Übersicht über elektrochemische Verfahren

2.7.1 Elektrochemische Prozesse

Bringt man einen metallischen Festkörper in eine Elektrolytlösung ein, finden zwei Reaktionen gleichzeitig statt: Zum einen lösen sich Metallatome (Me) aus dem Festkörper und gehen als z -fach positiv geladene Ionen (Me^{z+}) in Lösung (Gleichung (2.12)-(a)), zum anderen scheiden sich Metallionen aus der Lösung auf dem Festkörper ab (Gleichung (2.12)-(b)).



Allgemein wird die Gleichung (2.12) auch als Redoxreaktion geschrieben werden:



wobei Ox die oxidierte, Red die reduzierte Form des Metalls und z die Ladungszahl bezeichnen.

Die Elektrolytlösung, in der diese Reaktion abläuft, besteht aus gelösten Metallsalzen. Die Metallsalze werden auch als der Elektrolyt bezeichnet (Bagotsky, 2006). Wenn die Ionen in Lösung gehen, spricht man von der Solvatisierung des Elektrolyten. Handelt es sich bei dem Lösungsmittel um Wasser, wird der Elektrolyt hydratisiert. Bei der Hydratisierung umgeben sich die Ionen des Elektrolyten mit einer Hülle aus Wassermolekülen. Da die Ionen in der Elektrolytlösung beweglich sind, ist sie elektrisch leitfähig.

Gelöste Metallionen liegen in reiner Form immer kathodisch (positiv geladen) vor. Wenn mehr Atome das Metall verlassen als aus dem Elektrolyten abgeschieden werden, lädt es sich negativ auf. Werden mehr Metallionen aus der Lösung auf dem Festkörper abgeschieden, wird das Metall positiv geladen. Deswegen bildet sich über der Grenzschicht zwischen der flüssigen und festen Phase eine Zone aus, in der sich positive und negative Ladungsträger gegenüberstehen. Diese Zone wird als elektrische Doppelschicht bezeichnet. Über dieser Schicht entsteht ein elektrisches Potenzialgefälle, das einen Gleichgewichtszustand zwischen der Auflösung und der Abscheidung des Metalls bewirkt. Im Gleichgewicht gilt das Massenwirkungsgesetz, wonach das Verhältnis der Entstehungsraten der Produkte und Edukte proportional zueinander ist:

$$\beta = K_{eq} = \frac{\prod_{i=1}^n P_i^{\nu_i}}{\prod_{j=1}^m E_j^{\nu_j}} \tag{2.14}$$

Hierbei beschreibt K_{eq} oder auch β die Gleichgewichts- bzw. die Stabilitätskonstante. Die Aktivitäten der Reaktionsprodukte werden mit P_i gekennzeichnet, die der Edukte mit E_j . Die Menge der Stoffe wird durch den Exponenten ν_j beschrieben. Eine hohe Gleichgewichtskonstante kennzeichnet eine stabile chemische Reaktion. Ein niedriger Wert signalisiert hingegen, dass nur ein geringer Teil der Ausgangssubstanzen an der Reaktion teilnimmt. Die Kenntnis der Gleichgewichtskonstanten erlaubt Vorhersagen über die Stabilität von Elektrolytlösungen für galvanische Bäder.

Die Ursache der Metallabscheidung bzw. -auflösung besteht in den unterschiedlichen elektrochemischen Potenzialen des Metalls im Festkörperzustand und in der Lösung. Das chemische Potenzial μ beschreibt die Fähigkeit einer Substanz, sich zu ändern oder umzuwandeln (ETHZ-CCI, 2006). Es gibt für beliebige Stoffgemische die aufzubringende Arbeit δG (Gibbs-Energie) an, um die Menge des Stoffs i in dem Stoffgemisch um Δn_i Mol zu erhöhen (Gleichung (2.15)).

$$\mu_i = \left(\frac{\partial G}{\partial n_i} \right)_{T, p, n_j (j \neq i)} \quad (2.15)$$

Dabei werden Druck, Temperatur und die Menge aller anderen Substanzen des Systems konstant gehalten. Handelt es sich bei den Teilchen um elektrisch geladene Teilchen, so spricht man vom elektrochemischen Potenzial. Das elektrochemische Potenzial berücksichtigt neben dem chemischen Energiegehalt auch die der Änderung der Systemenergie durch den elektrischen Anteil der Energie:

$$\bar{\mu}_i = \mu_i + z \cdot F \cdot E \quad (2.16)$$

Dieser hängt von der Potenzialdifferenz E ab, welche die Teilchen mit der Ladungszahl z bei Eintritt oder Verlassen des Systems überwinden müssen. In Gleichung (2.16) steht F für die Faradaysche Konstante.

Bringt man zwei Phasen mit unterschiedlichen elektrochemischen Potenzialen in Kontakt, so läuft nach (Hamann & Vielstich, 2005) die Stoffumwandlung des Systems mit dem höheren Potenzial in Richtung des niedrigeren solange freiwillig ab, bis das elektrochemische Gleichgewicht für beide Phasen erreicht ist.

$$\bar{\mu}_i(\text{I}) = \bar{\mu}_i(\text{II}) \quad (2.17)$$

Im Gleichgewichtszustand bildet sich, wie oben beschrieben, eine Potenzialdifferenz aus, die als Galvanispannung bezeichnet wird. Der Potenzialgradient ist für die elektrochemischen Prozesse von fundamentaler Bedeutung. Er *beeinflusst* die Abscheide- und die Korrosionsgeschwindigkeit der Metalle, die Kristallstruktur und viele weitere relevante Merkmale der galvanisch abgeschiedenen Schichten.

Im stromlosen Fall hängt die Potenzialdifferenz von der Konzentration bzw. der Aktivität der reagierenden Substanzen ab. Die Herleitung des Zusammenhangs zwischen der Potenzialdifferenz und der Aktivität der Produkte und Edukte erfolgt über die Betrachtung der Änderung der freien Energie (Paunovic & Schlesinger, 2006) und führt zur Nernst Gleichung in allgemeiner Form:

$$\Delta\varphi_0 = \Delta\varphi_{00} + \frac{R \cdot T}{z \cdot F} \cdot \ln \left(\frac{\prod [\text{Edukte}]}{\prod [\text{Pr odukte}]} \right) = \Delta\varphi_{00} + \frac{R \cdot T}{z \cdot F} \cdot \ln \left(\frac{\prod [\text{Ox}]}{\prod [\text{Red}]} \right) = \Delta\varphi_{00} + \frac{R \cdot T}{z \cdot F} \cdot \ln(\beta) \quad (2.18)$$

In Gleichung (2.18) steht $\Delta\varphi_0$ für die Galvanispannung, die über der Doppelschicht abfällt. Sie hängt von der Galvanispannung $\Delta\varphi_{00}$ unter Standardbedingungen¹² und dem Reaktionsverhältnis der Edukte und Produkte ab. R kennzeichnet die allgemeine Gaskonstante, T die absolute Temperatur in Kelvin.

2.7.2 Elektromotorische Kraft

Die Spannung über der Phasengrenze kann messtechnisch nicht direkt ermittelt werden. Durch die Einführung einer zweiten Elektrode ist die an den beiden Elektroden anliegende Potenzialdifferenz E_0 messbar. Die Spannung über den beiden Elektroden wird als Elektromotorische Kraft (EMK) bezeichnet (Bild 2-22). Die Anordnung von zwei Elektroden in einem Elektrolyten wird als galvanisches Element bezeichnet.

¹² In der Elektrochemie sind die Standardbedingungen durch einen Druck von 101,3kPa, eine Stoffaktivität von 1 und einer Temperatur von 25°C gekennzeichnet.

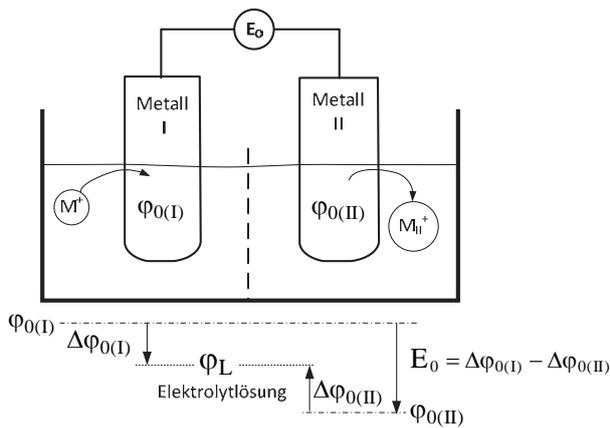


Bild 2-22: Aufbau einer galvanischen Zelle und Messung der elektromotorischen Kraft

Die Elektromotorische Kraft für zwei metallische Elektroden in einem galvanischen Element ergibt sich zu:

$$\begin{aligned}
 E_0 &= \varphi_{00}(\text{I}) - \varphi_{00}(\text{II}) + \frac{R \cdot T}{z(\text{I}) \cdot F} \cdot \ln(a_{\text{M}_I^{z+}}) - \frac{R \cdot T}{z(\text{II}) \cdot F} \cdot \ln(a_{\text{M}_{II}^{z+}}) \\
 &= E_{00} + \frac{R \cdot T}{z(\text{I}) \cdot F} \cdot \ln(a_{\text{M}_I^{z+}}) - \frac{R \cdot T}{z(\text{II}) \cdot F} \cdot \ln(a_{\text{M}_{II}^{z+}})
 \end{aligned}
 \tag{2.19}$$

In Gleichung (2.19) gibt a die Aktivität der Ionen an. In Lösungen mit niedrigen Konzentrationen bis zu etwa einem Mol Teilchen pro Liter sind Konzentration und Aktivität nahezu identisch (Holze, 1998).

E_{00} gibt die EMK unter Standardbedingungen an. Handelt es sich bei dem zweiten Reaktionspartner nicht um ein Metall, sondern um die Normal-Wasserstoffelektrode, spricht man vom Standardpotenzial:

$$E_{00} = \varphi_{00}^{\text{Metall}} - \varphi_{00}^{\text{Normal-Wasserstoffelektrode}} = \varphi_{00}^{\text{Metall}}
 \tag{2.20}$$

In Gleichung (2.20) wird benutzt, dass die Galvanispannung φ_{00} der Normal-Wasserstoffelektrode (NHE) auf 0 V normiert ist und die Aktivität der Wasserstoffionen $a_{\text{M}_{II}^{z+}} = a_{\text{H}^+} = 1$ bei Standardbedingungen definitionsgemäß 1 beträgt. Die elektromotorische Kraft bzw. das Elektrodenpotenzial ergibt sich in diesem Fall zu:

$$E_0 = E_{00} + \frac{R \cdot T}{z(\text{I}) \cdot F} \cdot \ln(a_{\text{M}_I^{z+}})
 \tag{2.21}$$

Tabelle 2-8 zeigt die Standardpotenziale für einige metallische Substanzen, die für die Herstellung von Leiterplatten oder in der Elektrotechnik verwendet werden.

Element	Elektrodenreaktion	Standardpotenzial E_{00} / V
Lithium	$\text{Li} \rightleftharpoons \text{Li}^+ + \text{e}^-$	-3,02
Zink	$\text{Zn} \rightleftharpoons \text{Zn}^{2+} + 2 \text{e}^-$	-0,76
Eisen (II)	$\text{Fe} \rightleftharpoons \text{Fe}^{2+} + 2 \text{e}^-$	-0,44
Kobalt	$\text{Co} \rightleftharpoons \text{Co}^{2+} + 2 \text{e}^-$	-0,27
Nickel	$\text{Ni} \rightleftharpoons \text{Ni}^{2+} + 2 \text{e}^-$	-0,24
Zinn (II)	$\text{Sn} \rightleftharpoons \text{Sn}^{2+} + 2 \text{e}^-$	-0,14
Kupfer	$\text{Cu} \rightleftharpoons \text{Cu}^{2+} + 2 \text{e}^-$	0,35
Kupfer	$\text{Cu} \rightleftharpoons \text{Cu}^+ + \text{e}^-$	0,52
Silber	$\text{Ag} \rightleftharpoons \text{Ag}^+ + \text{e}^-$	0,80
Palladium	$\text{Pd} \rightleftharpoons \text{Pd}^{2+} + 2 \text{e}^-$	0,83
Platin	$\text{Pt} \rightleftharpoons \text{Pt}^{2+} + 2 \text{e}^-$	1,20
Gold	$\text{Au} \rightleftharpoons \text{Au}^{3+} + 3 \text{e}^-$	1,42
Gold	$\text{Au} \rightleftharpoons \text{Au}^+ + \text{e}^-$	1,70

Tabelle 2-8: Übersicht über die Standardpotenziale einiger Metalle (Gaida, 1999)

Elektrochemische Redoxreaktionen laufen häufig unter Beteiligung von Wasserstoff- oder Hydroxid-Ionen ab. Das Galvanipotenzial wird dadurch vom pH-Wert abhängig. In galvanischen Prozessen sind deshalb die Kontrolle und genaue Einhaltung des pH-Wertes Voraussetzung für einen stabilen und reproduzierbaren Abscheide- oder Korrosionsprozess. Neben dem pH-Wert beeinflussen Komplexbildner elektrochemische Prozesse signifikant. Komplexbildner sind organische oder anorganische Substanzen, die Metallionen zentral binden. Die angelagerten Moleküle, die Liganden, maskieren das Metallion und verschieben das Standardpotenzial. Das Potenzial von Goldatomen, die in eine Cyanidlösung eingebracht werden, verschiebt sich aus dem Bereich von 1,71-1,83 Volt für einwertiges Gold hin zu einem Wert von -0,6 Volt für den Dicyanoaurat-Komplex (Hu & Ritzdorf, 2007).



Die starke Potentialverschiebung ergibt sich aus der sehr hohen Stabilitätskonstanten des Dicyanoaurat-Komplexes. Sie beträgt nach (Schlesinger & Paunovic, 2010) $\beta=10^{-39}$.

2.7.3 Die elektrolytische Doppelschicht

Die elektrolytische Doppelschicht ist der Ort, an dem die elektrochemischen Reaktionen ablaufen. In dieser Zone wird das Metall unter Einfluss eines elektrischen Potenzials abgeschieden oder aufgelöst. Die elektrochemischen Prozesse sind durch die Kontrolle des elektrischen Feldes in der Doppelschicht in weiten Grenzen beeinflussbar. So können beispielsweise die Korrosions- und Abscheiderate, aber auch die Struktur und Zusammensetzung von abgeschiedenen Metallschichten grundlegend beeinflusst werden.

Die Dicke der elektrolytischen Doppelschicht, die sich beim Eintauchen der metallischen Elektrode in der Elektrolytlösung bildet, ist abhängig von der Konzentration der Ionen in der Lösung und beträgt etwa 0,5 nm bis 30 nm (Hamann & Vielstich, 2005). Aufgrund der geringen Schichtdicke ist die Feldstärke in der Grenzschicht extrem hoch. Sie kann bis zu 10^7 V/cm betragen und durch äußere Strom- oder Spannungsquellen beeinflusst werden.

Die Beschreibung der elektrochemischen Vorgänge in der elektrolytischen Doppelschicht erfolgt häufig mit dem Modell von Stern und Graham. Hierbei wird die Phasengrenze in drei Zonen unterteilt. Der Bereich, der unmittelbar an die metallische Elektrode grenzt, wird als die innere Helmholtzschicht bezeichnet. Diese Schicht besteht in wässrigen Elektrolytlösungen im Wesentlichen aus adsorbierten Wassermolekülen und chemisch adsorbierten Substanzen. An die innere Helmholtzschicht schließt sich die äußere Helmholtzschicht an. Diese Zone erstreckt sich etwa bis zum Zentrum der ersten Ionenlage. Die Ionen liegen in der äußeren Helmholtzschicht meist hydratisiert vor. In Bild 2-23 ist diese Situation exemplarisch am Beispiel der Kationen dargestellt. Der Abstand der äußeren Helmholtzschicht zur Metalloberfläche beträgt ca. 1 nm (Nicolics, 2006).

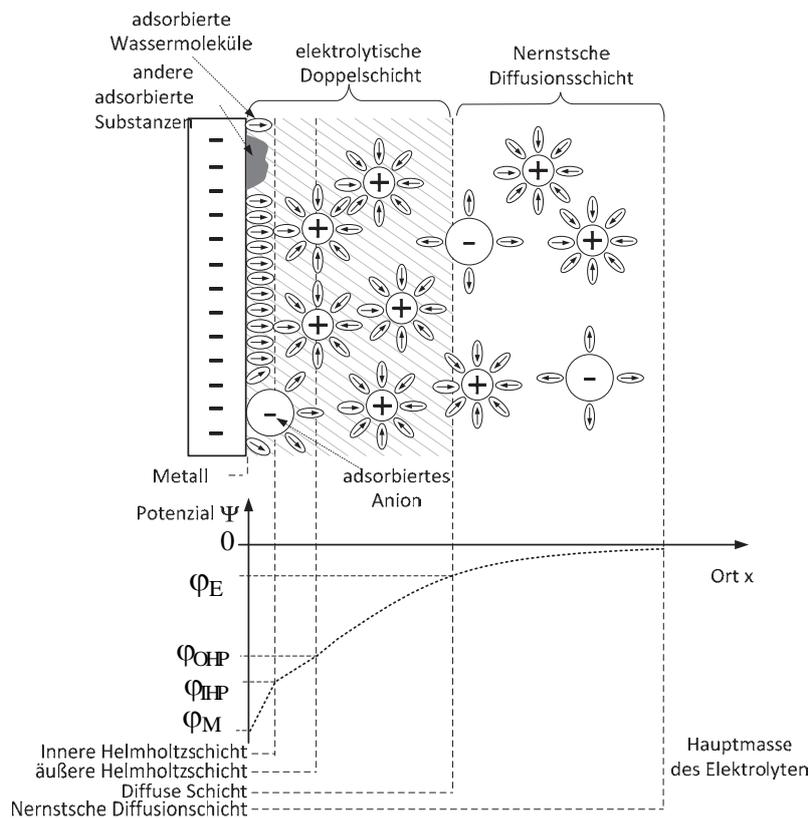


Bild 2-23: Stern-Graham-Modell der elektrolytischen Doppelschicht (Bagotsky, 2006)

An die äußere Helmholtzschicht schließt sich die diffuse Doppelschicht an. In diesem Bereich sind die Ionen im Gegensatz zur Helmholtzschicht beweglich. Mit wachsendem Abstand von der Elektrode vermischen sich die Ionen mit der neutralen Elektrolytlösung zunehmend.

Das Potenzial ändert sich über die Helmholtzschicht linear, da die Ionen in diesem Bereich fixiert sind. In der diffusen Doppelschicht nimmt es exponentiell ab. Die Diffusionsschicht endet definitionsgemäß, sofern das Potenzial auf den e -ten Teil des Potentials im Metall (φ_M / e) abgesunken ist (Schmidt, 2003). Die Galvanispannung φ_G , die sich über der Doppelschicht ausbildet, ergibt sich zu:

$$\varphi_G = \varphi^{(M,E)} + \chi^{(M)} - \chi^{(E)} \quad (2.23)$$

Hierin gibt $\varphi^{(M,E)} = \varphi_M - \varphi_E$ die Potentialdifferenz über die beiden Phasen (Metall, Elektrolyt) an, die sich ohne Berücksichtigung der auf der Oberfläche adsorbierten Ionen einstellen würde. Diese Effekte werden durch die Oberflächenpotenziale und $\chi^{(E)}$ berücksichtigt. $\chi^{(M)}$ bezeichnet das Oberflächenpotential des Metalls. Es ist im Wesentlichen identisch zum Potential im Inneren des Metalls. Das Oberflächenpotential $\chi^{(E)}$ des Elektrolyten wird besonders von der Adsorption von Ionen und polaren Molekülen geprägt. Starke lokale Potentialschwankungen können entstehen, die zu inhomogenen Abscheidungen führen (Bagotsky, 2006).

2.7.4 Ströme und Massentransport in elektrochemischen Prozessen

In der elektrolytischen Doppelschicht findet der Ladungsaustausch zwischen den Ionen des Elektrolyten und dem Metall der Elektrode statt. Dabei werden die Ionen in das Metallgitter eingebaut oder sie verlassen es. Der dabei entstehende Massetransport ist direkt mit einem Stromfluss verbunden.

Die Masse m , die bei der elektrochemischen Reaktion umgesetzt wird, erhält man aus dem Faradayschen Gesetz:

$$m = \frac{M}{z \cdot F} \cdot I \cdot t \quad (2.24)$$

wobei M die molare Masse der umgesetzten Substanz beschreibt. Das Faradaysche Gesetz besagt, dass die in einer elektrochemischen Reaktion umgesetzte Masse m proportional zum Strom und der Zeit ist. Es ermöglicht dem Galvanotechniker, Schichtdicken gezielt durch die Stromintegration einzustellen.

Ein messbarer Stromfluss tritt auf, wenn das Potenzial $\Delta\phi$ an der Elektrode von dem Gleichgewichtspotenzial $\Delta\phi_0$ verschieden ist. Es liegt eine Überspannung η vor (Pohlmann, 2005).

$$\eta = \Delta\phi - \Delta\phi_0 \quad (2.25)$$

Die Stromdichte j erhält man aus der Überlagerung der Teilreaktionen der Anode und Kathode. Sie wird als Butler-Volmer Gleichung bezeichnet:

$$j = j_0 \cdot \left\{ \exp\left(\frac{\alpha \cdot z \cdot F \cdot \eta_D}{R \cdot T}\right) - \exp\left(-\frac{(1-\alpha) \cdot z \cdot F \cdot \eta_D}{R \cdot T}\right) \right\} \quad (2.26)$$

In Gleichung (2.26) steht j_0 für die Austauschstromdichte im stromlosen Fall, bei dem Metallabscheidung und -auflösung im Gleichgewicht stehen. η_D bezeichnet die an der Elektrode anliegende Durchtrittsüberspannung. Die Durchtrittsüberspannung verleiht den Elektronen die erforderliche Energie, um zwischen dem Metall und den Ionen wechseln zu können. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass der Ladungstransferkoeffizient α von den Eigenschaften und dem Potenzialverlauf in der Doppelschicht abhängt. Für kleine Werte der Überspannung ($\eta_D < 0,01$ V) erhält man aus Gleichung (2.26) näherungsweise einen linearen (ohmschen) Zusammenhang zwischen der Stromdichte und der Überspannung mit dem Durchtrittswiderstand R_D :

$$\eta_D = R_D \cdot j_D \text{ mit } R_D = \frac{R \cdot T}{z \cdot F \cdot j_0} \quad (2.27)$$

Für große Werte der Überspannung ($\eta_D > 0,1$ V) erhält man aus Gleichung (2.26) die Tafelgleichung:

$$\eta_D = \beta \cdot \lg\left(\frac{j}{j_0}\right) \quad (2.28)$$

Kennzeichnet man die anodische Reaktion mit β_a bzw. die kathodische Reaktion mit β_b , gilt für die Koeffizienten β der Tafelsteigung:

$$\beta_a = \ln(10) \cdot \frac{R \cdot T}{\alpha \cdot z \cdot F} \text{ und } \beta_k = -\ln(10) \cdot \frac{R \cdot T}{(1-\alpha) \cdot z \cdot F} \quad (2.29)$$

Für einwertige Ionen ($z=1$) und einem Durchtrittsfaktor von $\alpha=0,5$ ergibt sich bei einer Temperatur von 25°C die Tafel-Steigung zu 118 mV/Dekade. Das bedeutet, die Stromdichte verzehnfacht sich, wenn die Spannung an der Elektrode um 118 mV erhöht wird.

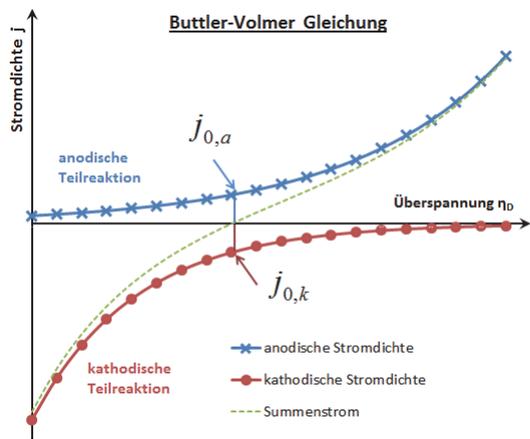


Bild 2-24: schematische Darstellung der Buttler-Volmer Gleichung. Dargestellt sind die anodische, die kathodische und die Summenstromdichte j über der Überspannung η_D deren Austauschstromdichten $j_{0,a}$ und $j_{0,k}$.

Die Buttler-Volmer Gleichung (2.26) gilt nur für einfache Elektronentransferreaktionen, bei denen die Überspannung lediglich durch die Hemmung des Elektronenwechsels (Durchtrittshemmung) zwischen dem Metallgitter und dem Ion entsteht. Der Stromfluss kann jedoch durch zusätzliche „chemische Widerstände“ gehemmt sein. Zu diesen zählt man den Diffusions-, den Reaktions-, den Adsorptions- und den Kristallisationswiderstand. Infolge der Widerstände der chemischen Reaktion setzt sich die Überspannung η aus den einzelnen Spannungskomponenten zusammen, die den Widerständen zugeordnet sind:

$$\eta = \eta_{\text{Durchtritt}} + \eta_{\text{Diffusion}} + \eta_{\text{Reaktion}} + \eta_{\text{Adsorption}} + \eta_{\text{Kristallisation}} \quad (2.30)$$

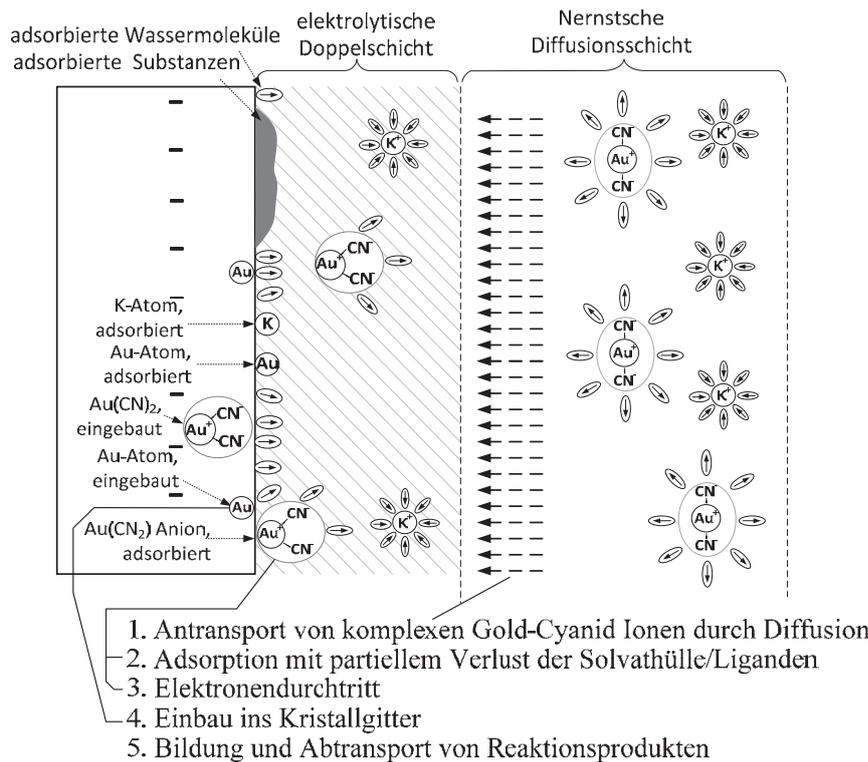


Bild 2-25: Veranschaulichung der Reaktionshemmnisse

2.7.5 Hemmungen des Stofftransportes

Die zeitlich differenzierte Form der Gleichung (2.26) stellt den Zusammenhang zwischen der Stromdichte und dem Teilchenfluss $\dot{\Lambda}$ dar.

$$j = F \cdot z \cdot \dot{\Lambda} \quad (2.31)$$

Der gesamte Teilchenfluss setzt sich aus den Anteilen der Diffusion, der Migration und der Konvektion zusammen (Schmidt, 2003):

$$\begin{aligned} \dot{\Lambda} &= \dot{\Lambda}_{\text{Diffusion}} + \dot{\Lambda}_{\text{Migration}} + \dot{\Lambda}_{\text{Konvektion}} \\ &= D \cdot \frac{\partial c}{\partial x} - \mu \cdot c \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial x} + c \cdot v_y(x) \quad , \text{für glatte, ebene Oberflächen} \end{aligned} \quad (2.32)$$

In realen elektrochemischen Anwendungen kann der konvektive Anteil des Stofftransportes vernachlässigt werden (Kanani, 2009). Der Migrationsanteil verschwindet, wenn die Leitfähigkeit des Elektrolyten hoch ist und somit der Potenzialgradient $\partial\varphi/\partial x$ im Elektrolyten gegen null geht. Die Diffusion mit dem Konzentrationsgradienten $\partial c/\partial x$ verbleibt als einzig signifikante Größe des Teilchenflusses.

Die Berechnung des Stofftransportes durch Diffusion erfolgt mithilfe des Nernstschen Modells. Dies setzt eine Diffusionsgrenzschicht mit der Dicke δ_n voraus, innerhalb derer ein linearer Konzentrationsverlauf ($\partial c/\partial x$) herrscht. Unter diesen Voraussetzungen erhält man für die elektrische Stromdichte infolge der Teilchendiffusion:

$$j = -z \cdot F \cdot D \cdot \left. \frac{\partial c}{\partial x} \right|_{x=0} = z \cdot F \cdot D \cdot \frac{c_{\text{Elektrolyt}} - c_0}{\delta_n} \quad (2.33)$$

In der Gleichung (2.33) steht D für den Diffusionskoeffizienten, c_0 für die Konzentration der Teilchen unmittelbar vor der Elektrodenoberfläche und $c_{\text{Elektrolyt}}$ für die Konzentration der Teilchen in der Elektrolytlösung. Die Diffusion ist die einzige Methode, mit der die Ionen in oder aus der Doppelschicht gelangen können. Wenn der Diffusionsprozess behindert wird, kann die Stromstärke durch die Entladung einer Ionenart nicht mehr zunehmen. Die Stromdichte erreicht einen maximalen Wert, die Grenzstromdichte:

$$j_{gr} = z \cdot F \cdot D \cdot \frac{c_{\text{Elektrolyt}}}{\delta_n} \quad (2.34)$$

In technischen galvanischen Bädern ist δ_n auf einen Maximalwert von 0,5 mm beschränkt. Die Breite der Diffusionsschicht kann durch Umwälzen des Bades, durch Einblasen von Luft und andere Maßnahmen wie Ultraschall auf ca. einen Mikrometer reduziert werden (Kanani, 2009).

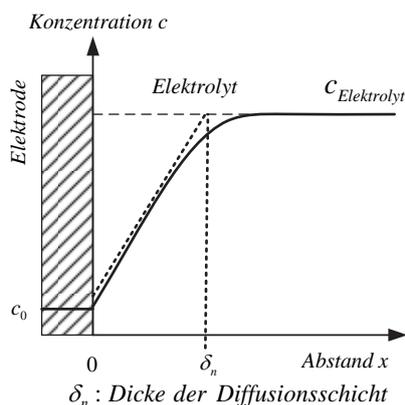


Bild 2-26: Konzentrationsprofil an der Phasengrenze zwischen Elektrode und Elektrolyt

2.7.6 Adsorptionseffekte

Unter Adsorption versteht man die Anreicherung von Teilchen an einer Grenzfläche zwischen zwei Phasen. Adsorptionsprozesse finden bei elektrochemischen Prozessen in der elektrolytischen Doppelschicht statt und haben einen maßgeblichen Einfluss auf den Reaktionsverlauf. Auf der Elektrode werden sowohl elektrochemisch aktive Substanzen (die Ionen) als auch elektrisch inerte Bestandteile der Elektrolytlösung an der Elektrodenoberfläche adsorbiert.

An der Oberfläche der Elektrode steht eine Anzahl von Adsorptionsplätzen Γ zur Verfügung, die von der Oberflächenstruktur und ihrer Mikrorauheit abhängt. Der Grad der Oberflächenbedeckung ergibt sich zu:

$$\theta = \frac{\text{Anzahl der besetzten Plätze } A_j}{\text{Gesamtzahl der Adsorptionsplätze } A_0} \quad (2.35)$$

Im Grenzfall der Monolagenadsorption, bei der die komplette Oberfläche mit einer Atomlage des Adsorbates bedeckt ist, gilt $\theta = 1$. Für Werte von $\theta < 0,1$ wird die Adsorption als unbedeutend, für Werte $\theta > 0,5$ als signifikant für den elektrochemischen Prozess eingestuft (Bagotsky, 2006).

Adsorptionsprozesse werden grundlegend nach ihrer Bindungsart in Physisorption und Chemisorption unterteilt. Die Physisorption basiert auf den schwächeren Van-der-Waals Kräften, bei der die Teilchen leicht desorbieren können. Chemisch adsorbierte Teilchen sind hingegen sehr fest an die Oberfläche gebunden und ziehen oft eine Änderung der chemischen Struktur des Adsorbates nach sich. Werden beispielsweise Wasserstoffmoleküle oder andere Moleküle wie Methanol an einer Palladiumoberfläche adsorbiert, können sie aufgespalten werden.

Chemisorbierte Moleküle verlieren meist ihre Solvathülle oder die Liganden. Ferner können infolge der Chemisorption andere physisorbierte Substanzen vollständig von der Oberfläche verdrängt werden (Bagotsky, 2006).

Die Adsorption von Teilchen an der Oberfläche kann starken Einfluss auf die Stromdichte haben. Die Grenzstromdichte hängt, basierend auf empirischen Angaben, exponentiell von der Adsorption ab (Gamburg & Zangari, 2011):

$$j_0 = k \cdot c \cdot \exp(-a \cdot \theta^m), \quad m > 1 \quad (2.36)$$

Die Oberflächenbelegung der Elektrode mit adsorbierten Substanzen ist stark potenzialabhängig. Mit steigendem Potenzial nimmt die Belegung bis zu einem Maximum zu, um bei weiter steigenden Werten wieder abzunehmen (Bild 2-27).

Ein Grund für die Abnahme der Oberflächenbelegung bei höheren Potenzialen ist der zunehmende Einschluss der adsorbierten Moleküle in das Elektrodenmaterial. Dieser Prozess kann die abgeschiedene galvanische Schicht massiv kontaminieren und deren Eigenschaften beeinflussen.

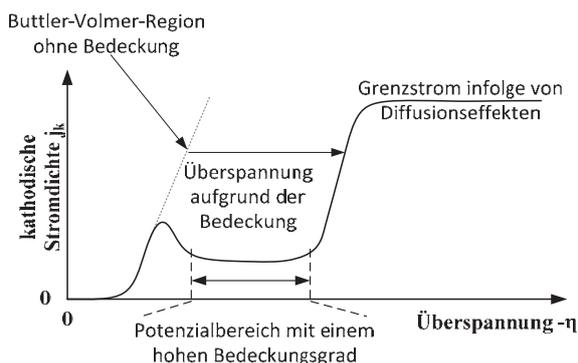


Bild 2-27: Stromdichte-Spannungskurve einer Oberfläche mit hohem Bedeckungsgrad. Die Stromdichte durch die mit Adsorbat belegte Oberfläche steigt zunächst an. Bei einer Grenzstromdichte (der Passivierungsstromdichte) fällt die Stromdichte ab. Erst bei der weiteren Erhöhung der Überspannung kann vermehrt eine Desorption auftreten oder das Adsorbat in die Schicht eingebaut werden (Gamburg & Zangari, 2011).

Eine Möglichkeit, die Adsorption zu verringern, besteht im Pulse Plating. Durch das kontinuierliche Umpolen (Pulse Plating) der Spannung über Anode und Kathode kann der Grad der Kontamination durch Adsorption deutlich verringert werden. In dem Zeitraum der invertierten Spannung tritt eine verstärkte Desorption des Fremdmaterials im Vergleich zu den adsorbierten Metallionen auf (Chandrasekar & et al., 2008). Ferner ist es mit Pulse-Plating Verfahren möglich, sehr feinkristalline, hochdichte Schichten aufzubauen. Der Grund hierfür liegt in den hohen anwendbaren Stromdichten und der reduzierten Mobilität der adsorbierten Metallionen (Jacobson & Holbom, 1988). Hierdurch werden viele Kristallisationskeime gebildet. Großtechnisch werden Pulse-Plating Anlagen jedoch nur

selten eingesetzt, weil die Technik zu aufwendig, zu teuer und die Lebensdauer der Inverter zu gering ist (Schlesinger & Paunovic, 2010).

2.7.7 Kristallwachstum

Das Wachstum einer Metallschicht auf der Elektrode erfordert die Adsorption der Metallionen auf der Elektrode und deren Entladung. Das gebildete Metallatom kann spontan einen Kristallisationskeim bilden, an dem sich weitere Atome anlagern und eine Kristallisationslage bilden. Das Atom kann aber auch zu einer bereits existierenden Wachstumsstelle wandern oder es kann direkt am Ort der Entladung ins Gitter eingebaut werden (Holze, 1998). Der Oberflächenzustand und die Zusammensetzung bzw. Belegung mit adsorbierten Substanzen beeinflussen die Keimbildung entscheidend. Raue Oberflächen bieten mehr Möglichkeiten der spontanen Keimbildung oder der direkten Integration der Atome.

Neben den Oberflächeneigenschaften beeinflusst die Konzentration der entladbaren Ionen bzw. die Stromdichte die Morphologie der Metallschicht. In Bild 2-28-a ist die Entstehung galvanischer Schichten stark vereinfacht dargestellt. In Bild 2-28-b sind die Schichteigenschaften in Abhängigkeit von der Überspannung dargestellt. Im Bereich (I) ist die Stromdichte durch den Ladungsdurchtritt bestimmt. Die Stromdichte ist gering. Es bilden sich kompakte Schichten aus. In der Zone (II) nehmen die Stromdichte und Abscheiderate zu. Der Prozess wird nun zunehmend durch Konzentrations- und Diffusionshemmungen kontrolliert. Die abgeschiedenen Schichten sind polykristallin. Im Gebiet (III) erfolgt die Abscheidung unter Grenzstrombedingungen und ist vollständig durch den Massetransport bestimmt. Das Wachstum von kugelförmigen Ausblühungen, Dendriten und Nadelkristallen ist zu beobachten. Bei einer weiteren Anhebung der Überspannung kommt es zur vermehrten Wasserstoffabscheidung (Zone IV). Die Dendriten brechen und das Metall wird pulvrig abgeschieden (Walsh & Herron, 1991).

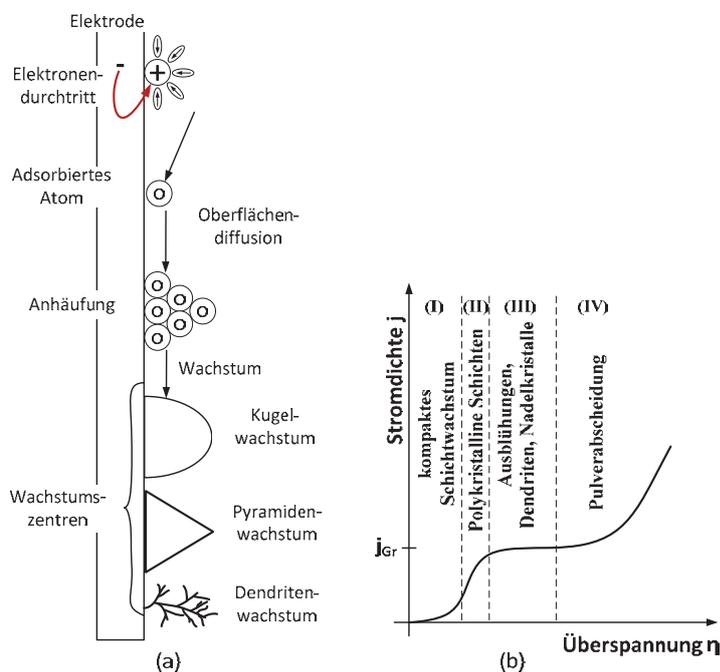


Bild 2-28: modellhafte Darstellung des Schichtwachstums auf der Elektrode. Links (a) dargestellt: Nach der Adsorption und dem partiellen Verlust der Liganden und der Hydrathülle findet der Elektronendurchtritt statt. Das Ion wird zu einem Atom reduziert. Die Atome diffundieren zu energetisch günstigen Stellen, wo sie in das Metallgitter integriert werden. Abhängig von der Überspannung bilden sich verschiedene Kristallformen aus. Rechts (b) sind die Schichteigenschaften infolge der Überspannung η und der resultierenden Stromdichte j dargestellt.

Die Struktur der abgeschiedenen Schicht hängt jedoch nicht nur von der Stromdichte, sondern von einer Vielzahl anderer Parametern ab. Dies sind die Ionen-Konzentration, die Additive, die Polarisation, die Temperatur und die Durchmischung des Elektrolyten (Paunovic & Schlesinger, 2006). Darüber hinaus beeinflussen die kristalline Struktur und die Metallart der zu beschichtenden Oberfläche sowie deren Kontaminationsgrad die Abscheidung. In Bild 2-29 ist der Einfluss der Abscheideparameter tabellarisch dargestellt.

große Kornstruktur	mittlere Kornstruktur	kleine Kornstruktur	Größe
			Parameter
Niedrig	Mittel	Hoch	Konzentration Metallionen
←	←	←	Temperatur
←	←	←	Badbewegung
→	→	→	Stromdichte
→	→	→	Polarisation
→	→	→	Additive

Bild 2-29: Einfluss der Abscheideparameter auf die Gefügestruktur einer galvanischen Schicht (Paunovic & Schlesinger, 2006)

Die Auswirkungen, die falsche Einstellungen oder lokale organische Anreicherungen haben, sind in Bild 2-30 dargestellt. Auf der sensorischen Schicht der Kammer ist eine lokale, kugelförmige Abscheidung zu sehen.

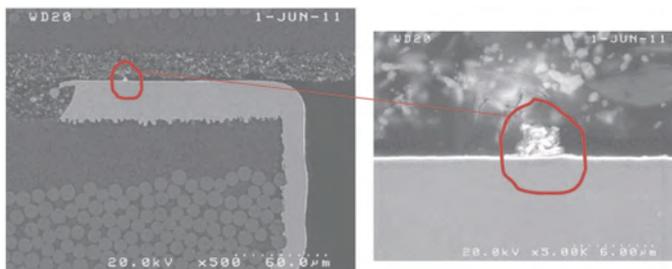


Bild 2-30: Abscheidung einer kugelförmigen Ausblüher. Dargestellt ist die Abscheidung einer ca. 6 µm starken kugelförmigen Abscheidung in einem Mikrovibrationssensor, die infolge einer lokalen Stromdichteüberhöhung entstanden ist.

In Kapitel 6.4.2 werden weitere Untersuchungsergebnisse vorgestellt, um den Einfluss der Stromdichte auf die Schichteigenschaften und den Einbau von Fremdatomen in galvanisch abgeschiedene Goldschichten zu untersuchen.

2.7.8 Streufähigkeit und gleichmäßige Schichtabscheidung

„One of the most difficult problems in electroplating is that of producing a deposit within the recesses of an object of complicated shape“ stellte Charles Kasper bereits 1940 fest (Kasper, 1940). Die Eigenschaft eines Elektrolyten, gleichmäßige Schichten auf beliebigen Oberflächen abzuscheiden, wird als “Throwing Power“ oder Streufähigkeit bezeichnet (Kanani, 2009). Eine gleichmäßige Schichtabscheidung setzt eine homogene Stromdichteverteilung über die gesamte Oberfläche der Elektrode voraus. Da die Stromdichte der zu beschichtende Oberfläche jedoch in aller Regel lokal stark variiert, wird eine gleichmäßige Schichtabscheidung behindert.

Zur Beschreibung der Stromdichteverteilung geht man davon aus, dass das Elektrolytvolumen V einer galvanischen Zelle durch die isolierende Oberfläche S mit dem Potenzial ϕ_s begrenzt wird. Bei Stromfluss variiert das Potenzial $\varphi(x,y,z)$ im Elektrolyten. Die Stromdichte auf den Elektroden ist ortsabhängig: $j=j(x,y,z)$. Zwischen dem Potenzialgradienten und dem Strom kann nach (Gamburg & Zangari, 2011) in Anlehnung an das Ohmschen Gesetz folgender Zusammenhang formuliert werden:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = i \cdot \rho \quad (2.37)$$

ρ entspricht dem ortsabhängigen Widerstand des Elektrolyten, $\partial \varphi / \partial n$ ist die Potenzialdifferenz zwischen zwei Punkten n_1 und n_2 im Raum und i der Strom, der zwischen den Punkten fließt. Der Widerstand des Elektrolyten ist stark temperaturabhängig. Setzt man eine konstante Temperatur und eine gute Durchmischung des Elektrolyten voraus, so kann der Widerstand des Elektrolyten in der galvanischen Zelle als konstant angenommen werden. Nimmt man zusätzlich an, dass die elektrische

Leitfähigkeit der Elektrode im Vergleich zum Elektrolyten hoch ist, können zur Ermittlung der Potenzial- und Stromdichteverteilung drei Fälle unterschieden werden (Gamburg & Zangari, 2011):

1. Elektrostatistischer Zustand: Es fließt kein Strom. Für Gleichung (2.37) gilt in Bereichen isolierender Oberflächen $\partial\varphi/\partial n=0$, an der Anodenoberfläche wird $\varphi_A=0$ und an der Kathodenoberfläche $\varphi_C=U_{\text{ext}}=\text{const}$ gesetzt. Der Widerstand zwischen der Elektrode und dem Elektrolyten ist vernachlässigbar. In diesem Fall folgt das elektrische Potenzial dem Oberflächenverlauf der Elektrode. Die Stromdichtelinien stehen senkrecht auf der Oberfläche und deren Verteilung wird maximal inhomogen. Diese Grenzsituation wird von der primären Stromverteilung bzw. Feldverteilung beschrieben. Sie hängt allein von geometrischen Faktoren des Bades ab.
2. In den Elektrolyten wird ein konstantes elektrisches Feld eingepreßt: $\partial\varphi/\partial n = i \cdot \rho = \text{const}$. Bei einem konstanten, eingepreßten Feld erreicht man eine maximal homogene Stromverteilung. Dieser Fall ist in galvanischen Bädern nur theoretisch einstellbar. In der Praxis wird eine homogene Stromverteilung durch Zugabe von organischen Substanzen erreichbar, die zu einer temporären isolierenden Schicht an Stellen hoher Stromdichte führen. In elektrochemischen Bädern liegt kein äußeres Feld an, sodass die Stromliniendichte ebenfalls nahezu homogen ist.

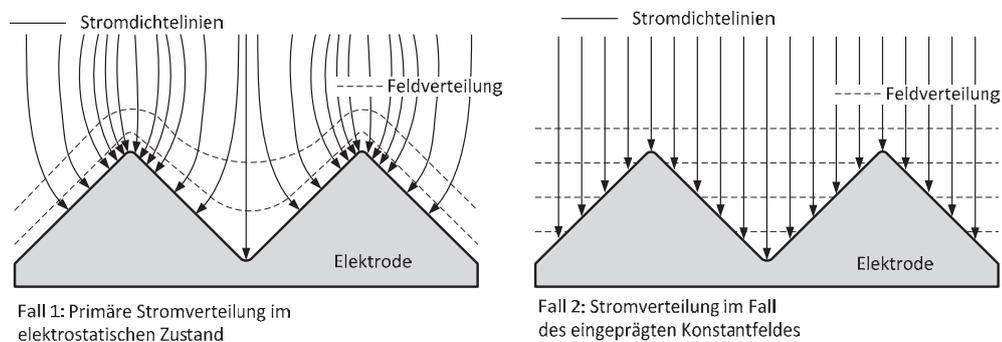


Bild 2-31: Stromverteilung in galvanischen Zellen

3. Die galvanische Abscheidung von Metallen erfolgt in technischen Bädern immer unter einer Überspannung und in der Regel weit unterhalb der maximalen Grenzstromdichte, die durch die Transportbedingungen (Diffusion) gegeben ist. In diesem Fall gilt für die Grenzbedingung an der Elektrode:

$$\phi = U - \eta(i) \quad (2.38)$$

mit $\eta(i)$ als Überspannung. Man definiert die Polarisierbarkeit der Elektrode:

$$\beta = \partial\eta / \partial i \quad (2.39)$$

Für $0 < \beta < \infty$ bewegt sich die Verteilung des Potenzials zwischen dem elektrostatischen Fall ($\beta=0$) und dem Fall des eingepreßten Konstantfeldes ($\beta=\infty$). Für den Fall, dass die Überspannung allein auf Durchtrittseffekten beruht, spricht man von der sekundären Stromverteilung. Kommt es zu einer Verarmung an Ionen in der Diffusionsschicht und somit zu einer Konzentrationsüberspannung, arbeitet man im Bereich der tertiären Stromverteilung (Schmidt, 2003). Nimmt man mit $\eta = \eta_0 + \beta i$ einen linearen Zusammenhang zwischen der Überspannung und dem Stromfluss an, so erhält man mit Gleichung (2.38) den technisch relevanten Fall:

$$\phi = (U - \eta_0) - \beta \cdot i \quad (2.40)$$

Die tertiäre Stromdichteverteilung ist relevant für Elektrodengeometrien der Mikrotechnik (Dambrowski, 2007), deren Abmessungen häufig im Bereich der Dicke der Diffusionsschicht δ_n (Bild 2-26) liegen.

Die numerische Beschreibung der Streufähigkeit wird mit TP bezeichnet (Gamburg & Zangari, 2011) und ergibt sich zu:

$$TP = \frac{\beta}{\beta + \rho \cdot 1}, 0 < TP < 1 \quad (2.41)$$

Für TP=0 wird die Streufähigkeit allein durch die primäre Stromverteilung bestimmt, im Fall von TP=1 nur durch die sekundäre Stromverteilung. Die Streufähigkeit hängt stark von den Additiven und der Art der komplexen Bindung ab. Für die Herstellung von Leiterplatten gibt es Kupferbäder auf Sulfatbasis, deren Streufähigkeit über 85% liegt. Sie wurden speziell für die Herstellung von Durchkontaktierungen entwickelt (Nikolova & et al.).

Die sekundäre Stromdichteverteilung kann die Effekte der primären zum Teil kompensieren. In technischen Bädern werden spezielle Additive (Einebner) verwendet, um ein gleichmäßigeres Schichtwachstum zu erreichen (Kanani, 2009).

Die primäre Stromdichteverteilung kann für einfache Geometrien analytisch geschlossen ermittelt werden. Für eine Scheibenelektrode gilt nach (Gamburg & Zangari, 2011):

$$i_p = i_{av} \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{1 - r^2 / R^2}} \quad (2.42)$$

R gibt hierbei den Radius der Scheibe an, r den Abstand vom Ursprung der Scheibe, an dem der Stromfluss i_p der primären Stromverteilung ermittelt wird. i_{av} stellt den mittleren Stromfluss über die gesamte Elektrode dar. Für diese Geometrie, aber auch für alle anderen gilt, dass an Kanten oder geometrischen Begrenzungen (insbesondere für $r=R$) der Elektrode signifikante Stromerhöhungen auftreten, die nach dem Faradayschen Gesetz sehr inhomogene Abscheidungen nach sich ziehen.

2.7.9 Fremdmittel- und Unterpotenzialabscheidung

Für die Herstellung hochleitfähiger, elektrischer Kontakte sind reine Edelmetallschichten erforderlich. Einlagerungen von Fremdmetallen oder organischen Substanzen beeinträchtigen deren elektrischen Eigenschaften. In technischen, galvanischen Goldbädern zur Herstellung von Leiterplatten und sensorischen Schichten für die Vibrationssensoren treten Verschleppungen von Zinn, Nickel und Kupfermetallen auf. Damit diese Metalle in die Goldschicht eingelagert werden können, muss ihr Elektrodenpotenzial E_0 in einem Bereich liegen, der eine gemeinsame Abscheidung ermöglicht. Dies ist durch die Komplexbildung der Fremdmetalle mit den freien Komplexbildnern möglich. Bei cyanidischen Goldelektrolyten handelt es sich dabei um freie Cyanokomplexe, die in der Elektrolytlösung in geringen Mengen auftreten. Durch die Komplexbildung wird der Elektrolyt stabilisiert und das Standardpotenzial für die Goldabscheidung verschiebt sich von +1,7 Volt auf -0,6 Volt (Tabelle 2-9). Die verschleppten Metalle können in dem Bad ebenfalls komplex gebunden werden und verschieben sich in einen ähnlichen Potenzialbereich, sodass eine Co-Deposition nicht auszuschließen ist.

Substanz	Stabilitätskonstante (log K bei 25°C)	Standardpotenzial [V] des Metalls	z	Standardpotenzial des Komplexes [V]
$[\text{Co}(\text{CN})_6]^{3-}$	64	-0.28	3	-1.55
$[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}$	43.6	-0.04	3	-0.90
$[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$	39	1.69	1	-0.63
$[\text{Ni}(\text{CN})_4]^{2-}$	30.2	-0.26	3	-0.86
$[\text{Cu}(\text{CN})_4]^{3-}$	23.1	0.34	2	-0.35
$[\text{Zn}(\text{CN})_4]^{3-}$	19.6	-0.76	2	-1.34

Tabelle 2-9: Stabilitätskonstanten komplex gebundener Metalle (Thermo Scientific, 2003).

Üblicherweise erfolgt die Metallabscheidung auf der Kathode nur dann, wenn das Potenzial der Ionen im Elektrolyten höher ist als das der Elektrode. Es ist jedoch auch möglich, dünne unedle metallische Schichten auf edlen Schichten abzuscheiden (Kanani, 2009). Man spricht in diesem Fall von Unterpotenzialabscheidung. Die chemisch treibende Kraft für diesen Effekt sind die Bindungskräfte zwischen dem unedlen Atom und der Substratoberfläche. Sie können größer sein als die Kräfte unter den gleichen Atomen selbst. Der Aufbau geschlossener Schichten ist jedoch nur bei geringen Stromstärken möglich (Bozzini, Giovannelli, & al., 2002).

Die dritte Möglichkeit, unedle Fremdmetalle in die Edelmetallschicht einzubauen, besteht in der Adsorption. Die Adsorption und Desorption sind ebenfalls von der Stromstärke, aber auch von der Temperatur und der Konzentration der Fremtteile in der Lösung abhängig (Gamburg & Zangari, 2011).

Die sicherste Methode zur Vermeidung unerwünschter Fremdmetalle in Edelmetallschichten ist die Verwendung von sehr reinen Bädern. Dies ist aus wirtschaftlichen Gründen jedoch nicht immer möglich.

2.7.10 Elektrochemische Metallabscheidung

Bei der elektrochemischen Metallabscheidung aus einem Elektrolyten werden die benötigten Elektronen nicht über einen äußeren Stromkreis zur Verfügung gestellt, sondern stammen aus den an der Reaktion beteiligten Substanzen selbst. Von einer rein chemischen Abscheidung spricht man, wenn ein edles Metall in der Lösung durch eine Austauschreaktion auf der Elektrode abgeschieden wird. Die chemische Abscheidung von Gold auf Nickel wird im Leiterplattenbereich häufig verwendet, um die Oberfläche vor Korrosion zu schützen und deren Löteigenschaften zu verbessern. Mit rein chemischen Verfahren lassen sich allerdings nur geringe Schichtdicken aufbauen. Der Prozess stoppt, sobald die Oberfläche vollständig und porenfrei mit dem edlen Metall bedeckt ist. Dieser Prozess wird als „Immersion-Verfahren“ bezeichnet.

Ein Aufbau höherer Schichten erfordert die Verwendung eines Reduktionsmittels. Es ist Bestandteil der Elektrolytlösung. Anstelle der Oxidation des unedlen Metalls an der Kathode wie beim „Immersion-Verfahren“ tritt nun die Oxidation des Reduktionsmittels an der Elektrode. Hierdurch werden die notwendigen Elektronen für die Reduktion des Metalles in der Lösung geliefert. Gängige Reduktionsmittel für die elektrochemische Abscheidung von Nickel und Palladium sind Natrium-Hypophosphide (NaH_2PO_2) und für Kupfer Formaldehyd (HCOH).

Elektrochemisch aufgebaute Schichten sind im Allgemeinen sehr viel porenärmer als elektrolytisch hergestellte. Die elektrochemischen Bäder besitzen eine Streufähigkeit von nahezu 100%. Sie arbeiten elektrodenlos, wodurch auch komplexe Leiterbilder beschichtbar sind. Sie werden allerdings meist bei hohen Temperaturen bis zu 95°C betrieben, sind sehr instabil und neigen zu Wildabscheidungen. Um Wildabscheidungen auf der Leiterplatte, an den Wänden des galvanischen Bades oder im Bad zu vermeiden, werden der Lösung Stabilisatoren in Form organischer und anorganischer Zusätze beigemischt. Zur Erhöhung der Stabilität des Bades und der Vermeidung einer Spontanzerersetzung werden Stabilisatoren eingesetzt. Die Konzentration der Stabilisatoren in der Elektrolytlösung ist genau zu kontrollieren, da sie teilweise in die Metallschicht eingebaut werden und die Schichteigenschaften beeinflussen (Kanani, 2009).

Die Abscheideraten elektrochemischer Schichten sind im Allgemeinen sehr gering. Sie liegen für Kupfer zwischen $0,1 \mu\text{m/h}$ und $12 \mu\text{m/h}$ (Hanna & et. al., 2003). Bei Palladium erreicht man Raten zwischen $0,8 \mu\text{m/h}$ und $12,7 \mu\text{m/h}$ (Schlesinger & Paunovic, 2010). Die chemische Abscheidung ist somit im Allgemeinen sehr viel langsamer als die galvanische. Die Abscheideraten erreichen für Kupfer und Nickel ca. $60 \mu\text{m/h}$, für Palladium etwa $1000 \mu\text{m/h}$ und für Silber ca. $5400 \mu\text{m/h}$ (umicore Lieferprogramm, 2012).

Zur Erhöhung der Abscheiderate können den Bädern Beschleunigungsadditive zugegeben werden. Dabei muss darauf geachtet werden, dass die Wirkung der Stabilisatoren nicht beeinträchtigt wird (Pauliukait & et al., 2006). Weitere Parameter, die die Abscheiderate beeinflussen, sind der pH-Wert und die Temperatur des Bades. Eine höhere Temperatur beschleunigt die Abscheidung des Metalls im Allgemeinen.

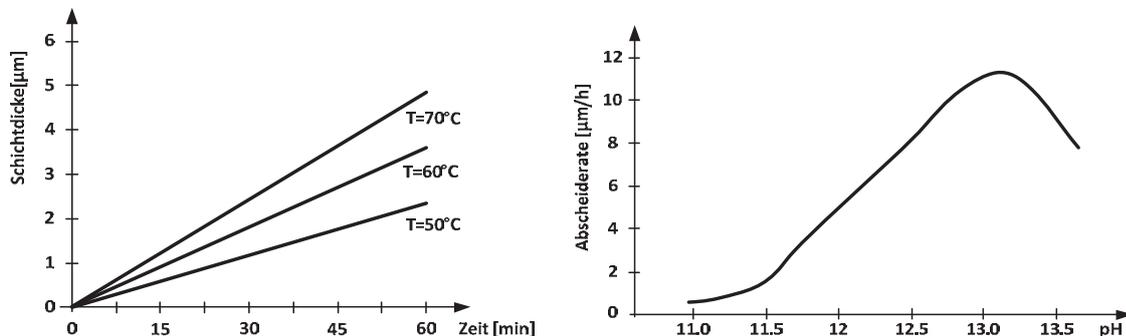
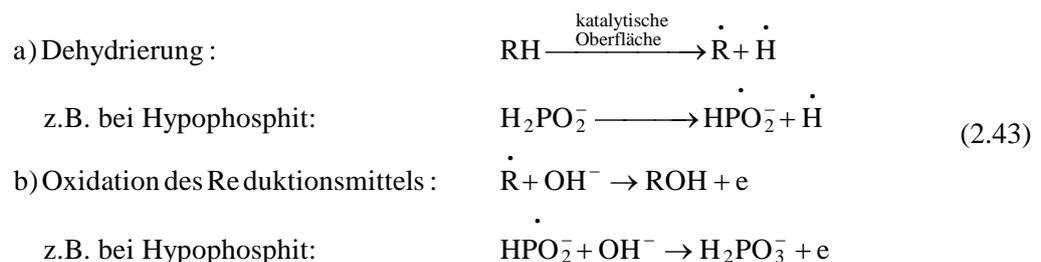


Bild 2-32: Abscheiderate als Funktion der Temperatur und des pH-Wertes

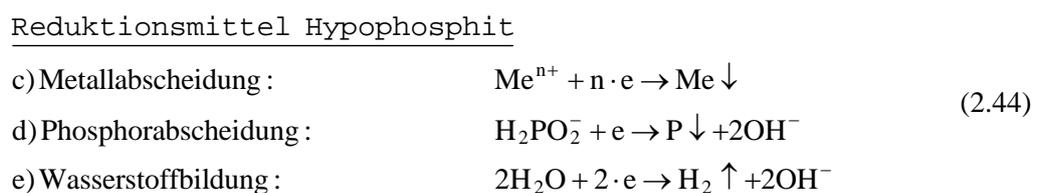
In Bild 2-32 ist links schematisch die Schichtdicke über der Zeit in Abhängigkeit von der Temperatur aufgetragen (Kanani, 2009). Rechts ist die Abhängigkeit der Abscheiderate für Kupfer vom pH-Wert dargestellt (Hanna & et. al., 2003). Auch elektrochemische Nickel-Phosphor- und Palladium-Phosphorbäder zeigen eine starke Abhängigkeit vom pH-Wert, wobei die maximale Abscheiderate im schwach sauren Bereich bei einem pH-Wert von ca. 4,5 erreicht wird (Endres, 2012).

Generell ist bei elektrochemischen Bädern darauf zu achten, den pH-Wert konstant zu halten. Geringfügige Änderungen des pH Wertes ziehen starke Änderungen der Phosphoreinlagerungen nach sich und beeinflussen somit die Schichteigenschaften. Zur Stabilisierung des pH-Wertes werden der Elektrolytlösung Puffersubstanzen wie Essig-, Propion- oder Adipinsäure zugegeben (Kanani, 2009).

Die prinzipiellen Reaktionsschritte der elektrochemischen Abscheidung können nach (Van den Meerakker, 1981) in anodische und kathodische Schritte unterteilt werden. Voraussetzung für eine chemische Metallabscheidung ist die Dehydrierung des Reduktionsmittels. Hierfür ist ein katalytisch wirksamer Keim erforderlich. Der anodische Schritt lautet:



Ohne die katalytische Wirkung der Oberfläche wird der Prozess der chemischen Metallabscheidung nicht in Gang gesetzt. Nach der Dehydrierung werden durch die Oxidation des Reduktionsmittels Elektronen freigesetzt, die zur Reduktion der Metallionen und Teilen des Hypophosphits selbst führen. Der kathodische Prozess lautet:



Sowohl das Metall als auch der Phosphor werden in die Schicht eingebaut. Teilweise kann es auch zur Integration von Wasserstoff in den Schichten kommen. Insbesondere Palladium ist dafür bekannt, große Mengen an Wasserstoff aufnehmen zu können. Bei richtiger Prozessführung ist jedoch kaum mit der Integration von Wasserstoff in die Palladiumschicht zu rechnen (Malleroy & Hajdu, 2009). Kontaminationen, schwankende pH-Werte oder andere Störungen können jedoch durchaus zur Einlagerung von Wasserstoff in die Palladiumschicht führen (Rao & Trivedi, 2005).

Durch die Metall- und Phosphorabscheidung und Wasserstoffbildung reichern sich in der Lösung Reaktionsprodukte an. Dazu verarmt die Lösung an Metallen, Stabilisatoren und anderen Zusätzen. Deshalb sind chemisch wirkende Galvanikbäder fortlaufend zu kontrollieren, zu reinigen, und die Metallsalze und anderen Substanzen ständig nachzudosieren. Ansonsten kann eine gleichbleibende Schichtqualität nicht gewährleistet werden.

Die Lebensdauer eines chemischen Bades wird durch die MTO-Kennzahl („Metall Turn Over“) gekennzeichnet. Ein MTO ist dabei die Menge des Metalls, die aus einem Bad abgeschieden werden kann, ohne Metallsalze nachzugeben. Das Alter des Bades ergibt sich zu:

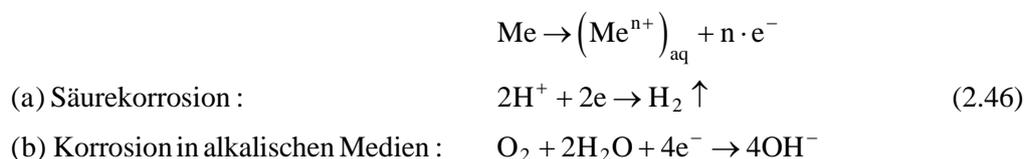
$$n_{\text{MTO}} = m_{\text{gesamt}} / m_{\text{MTO}} \quad (2.45)$$

Hierin gibt n_{MTO} das Verhältnis der im Bad insgesamt umgesetzten Metallmenge m_{gesamt} zur Menge des Metalls im Ursprungsbad m_{MTO} an. Die Nickelbäder zur Herstellung von Leiterplatten werden meist nach fünf MTO getauscht (Endres, 2012).

Ein immerwährendes Problem bei der Verwendung elektrochemischer Bäder ist deren hohe Sensitivität gegen organische Kontaminationen. Manche Bäder reagieren überaus empfindlich gegenüber Fremdstoffen in der Lösung, sodass sich das Bad spontan zersetzen kann, es zu Wildabscheidungen kommt oder gestörte Schichten aufgebaut werden (Endres, 2012). Diese Probleme sind insbesondere für die ENIG¹³-Schichten umfassend untersucht worden und als Black-Pad Effekt bekannt. Dass ganz ähnliche Effekte auch für ENEPIG¹⁴-Schichten auftreten können ist bisher nicht bekannt. Die Untersuchungsergebnisse werden in den Kapiteln 4.5.3 und 6.4 besprochen.

2.7.11 Metallauflösung und Korrosion

Der Begriff Korrosion bezeichnet die Reaktion eines Werkstoffes mit Substanzen aus seiner Umgebung (Tostmann, 2001). Man unterscheidet zwischen innerer und äußerer Korrosion sowie zwischen elektrochemischer, chemischer und metallphysikalischer Korrosion. Die am häufigsten anzutreffende Korrosionsart ist die äußere, elektrochemische Korrosion. Bei diesem Vorgang handelt es sich um die anodische Metallauflösung, bei der das Metall in eine ionische Form überführt und im Elektrolyt gelöst wird. Metalle können dabei in sauren Medien unter Wasserstoffreduktion, in neutralen und alkalischen Medien unter Sauerstoffreduktion aufgelöst werden.



Die Herstellung von Leiterplatten ist ohne Korrosionsprozesse nicht durchführbar. Ätzverfahren werden zur Leiterbildstrukturierung genutzt. Für die Auflösung des Kupfers stehen saure und alkalische Ätzmedien zu Verfügung. Bei der Medienauswahl spielen folgende Faktoren eine Rolle:

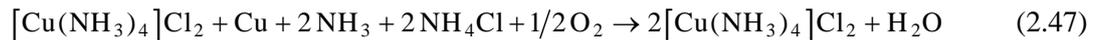
- der Preis und die Recyclierbarkeit des Ätzmittels,
- die Entsorgungskosten,
- eine hohe Ätzrate, bei gleichzeitig geringer Unterätzung.

¹³ ENIG steht für „Electroless Nickel Immersion Gold“

¹⁴ ENEPIG bedeutet „Electroless Nickel Electroless Palladium Immersion Gold“

Die relevanten, sauren Ätzlösungen basieren auf Lösungen, die Kupferchlorid (CuCl_2), Wasserstoffperoxid-Schwefelsäure ($\text{H}_2\text{O}_2\text{-H}_2\text{SO}_4$) oder Ammoniumpersulfat ($[(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8]$) enthalten (Khandpur, 2006). Alkalische Ätzlösungen werden mit Ammoniumchlorid ($[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]\text{Cl}_2$) oder Ammoniumsulfat ($[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]\text{SO}_4$) erzeugt (Lal & Smith, 1992).

Für die Herstellung von Mikrovibrationssensoren werden alkalische Ammoniumchloridlösungen in horizontalen Sprüh-Durchlaufanlagen verwendet. Zu den positiven Eigenschaften der Ätzlösungen zählen die geringe Unterätzung, die hohen Ätzraten mit bis zu $60 \mu\text{m Cu/min}$ und die hohe Kupfer-Aufnahmekapazität von etwa 150 g/l (Khandpur, 2006). Die grundlegende chemische Reaktion für alkalische Ammoniumchloridlösungen in geschlossenen Kreislaufanlagen lautet (Achternbosch & Brune, 1996):



Wenn die Lösung mit Kupfer gesättigt ist, kann sie in modernen Anlagen vollständig recycelt werden. Da beim Recycling der Lösung Chlorgas entstehen kann, werden zunehmend auf Ammoniumsulfat basierende Ätzlösungen verwendet (Piest, 2005).

Bei der Herstellung von Leiterplatten werden in der Regel nur reine Kupferschichten geätzt. Für die Herstellung von Mikrovibrationssensoren befinden sich unterschiedlich edle Metalle in dem Ätzmedium. Wenn diese Metalle elektrisch leitfähig miteinander verbunden sind, liegt ein galvanisches Element mit einer Anode und Kathode vor. In diesem Falle spricht man von Kontaktkorrosion (Kaesche, 1990). Über die Kontaktbrücke fließt ein Elektronenstrom, der durch den kathodischen und anodischen Ionentransport des Ätzmediums zu einem geschlossenen Stromkreis führt. Die Korrosionsrate steigt. Solange das Metall aufgelöst wird, befindet es sich im aktiven Korrosionsbereich (Bild 2-33). Bei einigen Metallen wie bei Aluminium, Chrom und Nickel bildet sich bei Überschreiten einer Grenzstromdichte ein chemisch sehr stabiles Oxid. Es schützt die unterliegende metallische Schicht vor einer weiteren Oxidation. Die Korrosionsstromdichte nimmt stark ab, das Metall befindet sich im passiven Bereich. Erhöht man das Elektrodenpotenzial durch eine äußere Spannungsquelle oder durch den Kontakt mit einem geeigneten, edlen Metall weiter, setzt die Korrosion erneut ein. In diesem Bereich ist das Metall transpassiv. Dabei wird das Metalloxid in eine andere Form mit höherer Oxidationszahl umgewandelt, das nicht mehr über die gleichen korrosionshemmenden Eigenschaften verfügt (Kritzer, 1998).

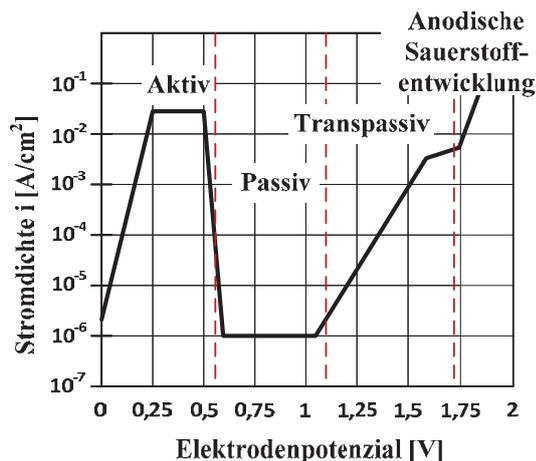


Bild 2-33: Exemplarische Darstellung des Korrosionsverhaltens von passivierbaren Metallen

Die Kontaktkorrosion und die Passivität von Nickel spielen eine bedeutende Rolle bei der Herstellung der Durchkontaktierungen der Vibrationssensoren, auf die in Kapitel 6.3 eingegangen wird.

Alkalische Ätzlösungen sind kompatibel mit metallischen Ätzresists auf Zinn-Basis. Das Zinn kann in einem besonders einfachen elektrolytischen Schritt direkt nach der Verkupferung der Durchkontaktierungsbohrungen aufgebracht werden (Kapitel 4.6). Der Resist schützt die Kupferbereiche vor dem Ätzangriff. Nicht abgedeckte Bereiche werden durch die Lösung angegriffen

und abgetragen. Die Lösung wird dabei in einem horizontalen Prozess über Düsen auf die Kupferoberfläche gesprüht. Der Sprühdruck ist einstellbar. Die Platten werden mithilfe eines Antriebs automatisch mit konstanter Geschwindigkeit unter den Düsen durchgeführt. Das Ätzmedium wird unmittelbar nach dem Aufsprühprozess von der Platte abgesaugt, um ungleichmäßige Ätzbilder aufgrund von Pfützen zu vermeiden.

Charakteristisch für das Ätzen von Metallen ist die Unterätzung unter dem Ätzresist. Durch den weitgehend isotropen Angriff des Ätzmediums werden alle Bereiche des Kupfers angegriffen, auch die Flanken der Leiterbahnen. Da das Medium die Kupferschicht auch unter dem Resist angreift, verbleibt eine Kupferleiterbahn mit einem konkaven Querschnitt. Der obere Überhang wird jedoch meist beim Strippen des Resists entfernt, sodass man eine trapezförmige Leiterbahn erhält. Hierbei entspricht die Breite des Leiterbahnfußes in etwa der Stärke des Ätzresists. Die Oberseite der Leiterbahn ist stark verjüngt (Bild 2-34).

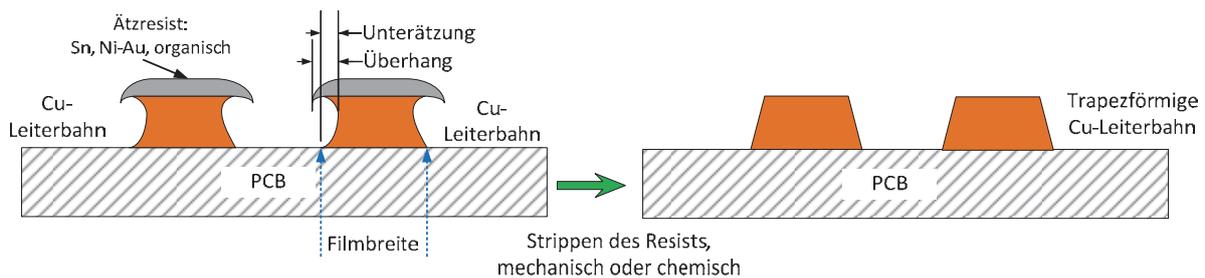


Bild 2-34: Schaubild zur Erläuterung der Unterätzung bei der Strukturierung von Leiterplatten

Die Unterätzung ist bei Ätzresists aus edlen Metallen wie Gold aufgrund der Kontaktkorrosion besonders hoch. Die Edelmetallschicht wird nach der Strukturierung nicht gestrippt. Sie verbleibt als Funktionsschicht auf der Leiterplatte. Die Auswirkungen dieser Produktionstechnik auf die Vibrationssensoren werden in Kapitel 4.2.2 (Bild 4-5) diskutiert.

2.8 Herstellungsverfahren für Mikrokugeln

Kugeln für industrielle Anwendungen werden aus den unterschiedlichsten Materialien hergestellt. Neben Stählen und Edelstählen werden Kupfer, Wolframcarbid, Glas, Kunststoffe und keramische Werkstoffe verwendet. Die preiswertesten Mikrokugeln, die für Mikrovibrationssensoren geeignet sind, werden aus Stahl oder Edelstahl gefertigt. Sie kommen in großen Stückzahlen in Kugelschreibern oder in Kugellagern zum Einsatz.

In der DIN 5401 sind Kenngrößen zur Beurteilung der Kugelqualität definiert. Die wichtigsten Angaben daraus sind der nominelle Kugeldurchmesser D_w , das positive Abmaß P_{XX} , das negative Abmaß N_{XX} , die Differenz zwischen dem größten und dem kleinsten Kugeldurchmesser V_{DWS} , der Mittenrauwert R_a sowie die Güteklasse G . In Tabelle 2-10 sind exemplarisch die Güteklassen und Kenngrößen für einige Kugeln angegeben, die für die Herstellung von Mikrovibrationsschaltern genutzt wurden.

Grad	D_w [μm]	Abmaß [μm]	V_{DWS} [μm]	R_a [μm]	Qualität	Kosten	Anmerkung
G28	500	P30	0,7	0,05	○	—	Spiegelnd polierte Kugel
G28	700	P30	0,7	0,05	○	—	Spiegelnd polierte Kugel
G28	800	P30	0,7	0,05	○	—	Spiegelnd polierte Kugel
G28	1000	P30	0,7	0,05	○	—	Spiegelnd polierte Kugel
G100	700	P0	2,5	0,10	—	+	Preiswert, verzundert
G100*	800	P30	2,5	2,50*	—	+	Preiswert, verzundert

Tabelle 2-10: Kugelspezifikationen für den Aufbau von Mikrovibrationssensoren

Die Kugeln der Klasse G100* entsprechen im Mittenrauwert R_a nicht der Norm. Sie wurden bewusst nach dem Härtingsprozess und dem ersten Grobschliff aus der Fertigung genommen, um Sensoren mit einer sehr rauen Kugeloberfläche aufzubauen.

Der erste Schritt zur Herstellung von Stahlkugeln besteht in der Anfertigung eines Drahtabschnittes, der ein geringfügig größeres Volumen aufweist als die herzustellende Kugel. Das Drahtstück wird in zwei halbkugelförmigen Presswerkzeugen zu einer Rohkugel gestaucht. Sie weist in der Mitte einen Wulst, den sogenannten Pressring auf. An den Enden befinden sich zwei Drahtstümpfe (Bild 2-35, rechte Darstellung). Diese Rohkugeln werden grob geschliffen und erhalten ihre endgültige Form. Die Oberflächeneigenschaften und der Enddurchmesser werden durch einen Feinschliff und dem finalen Läppprozess eingestellt. Vor dem Feinschliff werden die Kugeln in der Regel gehärtet, da sich weiche Materialien nur mit beträchtlichem Aufwand in hohen Güten herstellen lassen.

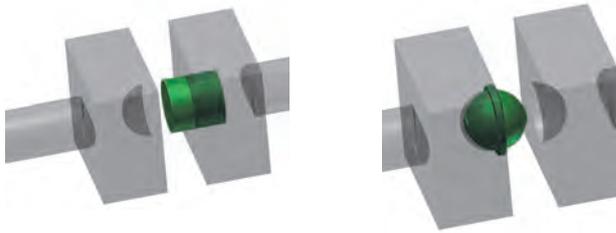


Bild 2-35: Pressen der Rohkugel aus einem Drahtstück

Links ist das Drahtstück vor, rechts die Rohkugel mit dem mittleren Pressring und den Drahtstümpfen nach dem Pressvorgang dargestellt.

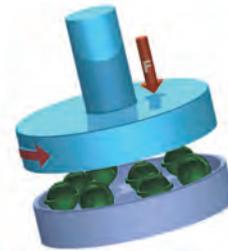


Bild 2-36: Grob- und Feinschliff der Kugeln zwischen zwei Schleiftellern.

2.9 Herstellungsverfahren für Leiterplatten

Mehrlagige Leiterplatten werden aus unterschiedlich dicken Kernplatten aufgebaut, die beidseitig mit Kupfer kaschiert sind. Diese Platten werden im ersten Fertigungsschritt auf das Fertigungsformat zugeschnitten. Danach werden die Kupferoberflächen gebürstet, um Partikel und Verunreinigungen von der Oberfläche zu entfernen (Bild 2-37:1). Auf die so vorbereiteten Kupferschichten der Innenlagen wird ein Fotolack aufgebracht, belichtet und entwickelt (Bild 2-37:2). Die freiliegenden Kupferstellen werden durch einen Ätzschritt entfernt. Der Fotoresist wird gestrippt (Bild 2-37:3). Anschließend werden Justagebohrungen oder -marken durch Bohren, Fräsen oder Stanzen in die Kerne eingebracht. Diese dienen zur genauen Ausrichtung der Lagen zueinander, bevor sie verpresst werden. Vor der Verpressung wird die Oberfläche des verbliebenen Kupferbelages chemisch angeraut („brown oxidation“). Hierdurch vergrößert sich die Oberfläche, wodurch die Haftkraft der im Laminierprozess verklebten Lagen erhöht wird (Bild 2-37:4). Erst jetzt kann der eigentliche Lagenaufbau der Multilayerschaltung beginnen. Abwechselnd werden Kerne und Prepregs zu einem Pressstapel zusammengelegt. Die Kerne werden über die mechanischen Aufnahmestifte während des Pressvorganges in ihrer Position gehalten. Alternativ können sie an einigen kleinen Stellen vorverpresst werden (Bild 2-37:5). Nach der Laminierung der Leiterplatte werden die Durchkontaktierungen gebohrt. Die Außenlagen der Leiterplatten sind zu diesem Zeitpunkt noch vollflächig mit Kupfer bedeckt. Der Bohrstaub sowie der Bohrgrad auf der Oberfläche werden in einem erneuten Bürstschritt entfernt. Die Harzablagerungen auf dem Kupfer in der Bohrung werden durch einen chemischen Desmearprozess entfernt. Dabei wird die Harzmatrix teilweise abgetragen, sodass eine raue Bohrwand entsteht. Auf die Oberfläche der Bohrung und der Leiterplatte werden im „Black Hole“ Verfahren Kohlenstoff-Nanopartikel aus einer Lösung aufgebracht. Nach der Trocknung wird das Kupfer leicht angeätzt, sodass die Kohlestoffpartikel von den verkupferten Flächen abgetragen werden. Die Kohlenstoffschicht auf der Bohrlochwand bleibt erhalten (Bild 2-37:6). Sie bildet eine leitfähige Brücke zwischen der Ober- und der Unterseite der Leiterplatte.

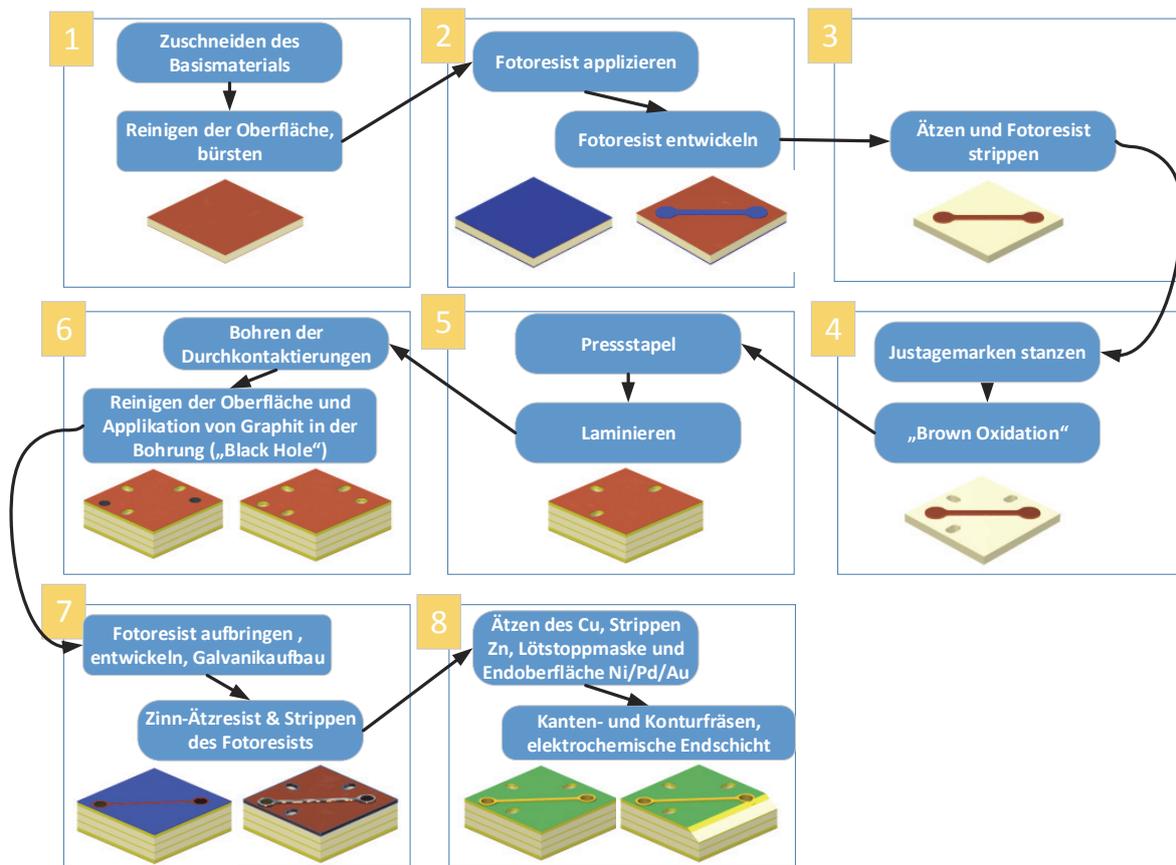


Bild 2-37: Vereinfachte Darstellung des Produktionsablaufes für die Leiterplattenherstellung

Auf die so vorbereitete Platte wird erneut ein Fotoresist aufgebracht, mit dem das Leiterbild auf den Außenlagen strukturiert wird (Bild 2-37:7). Dabei wird zunächst Kupfer galvanisch aufgebaut, wobei auch die Wände der Bohrungen verkupfert werden (Ding & et al.). Nach der Verkupferung wird eine Zinnschicht galvanisch auf das Leiterbild aufgebracht. Sie dient im abschließenden Kupferätzprozess als Ätzresist. Nach dem Ätzen des Kupfers wird das Zinn gestrippt, die Lötstopmmaske aufgebracht und die Endoberfläche der Leiterplatte hergestellt. Dies kann in einem galvanischen oder in einem elektrochemischen Prozess geschehen. Vor der Auslieferung wird die Platine nochmals mechanisch bearbeitet, um die Kontur- oder Kantenfräsungen herzustellen (Bild 2-37:8).

Für die Herstellung der Mikrovibrationssensoren sind signifikante Änderungen der Prozesse und des Fertigungsablaufes erforderlich. Sie werfen Fragen der Prozesskompatibilität auf. Diese betreffen die Art der Herstellung der Einzelkerne, die Laminierung aber auch die galvanischen Prozesse. Insbesondere die galvanischen Prozesse und die Verpressung sind für die Qualität der Mikrovibrationssensoren von besonderer Bedeutung. Sie werden zusammen mit den Bohrprozessen und den thermischen Arbeitsschritten in Kapitel 4 genauer beschrieben.

2.9.1 Lithografische Prozesse

Schlüsseltechnologie für den preiswerten Aufbau von Leiterplatten sind lithografische Prozesse. Bei diesen Prozessen wird eine Struktur mittels einer Filmmaske auf das Substrat übertragen. Die Maske besteht in der Regel aus einem lichtempfindlichen Fotoresist, der flächig auf die Leiterplatte aufgebracht wird. Der Resist kann in flüssiger Form durch Vorhanggießen, Siebdruck oder elektrostatische Sprühbeschichtung auf das Substrat aufgetragen werden (Hultsch & et al., 1990). Die ätztechnische Strukturierung der Innenlagen von Leiterplatten erfolgt meist mithilfe von Trockenresists (Bild 2-38). Sie werden bei ca. 110 °C auf die Platte laminiert.

Die Strukturen werden über einen Polyesterfilm mit einer UV-Lichtquelle auf den Resist übertragen (Janssens, 2005). Zur Herstellung von Leiterplatten mit höheren Genauigkeitsanforderungen werden UV-Direktbelichtungssysteme genutzt. Durch die UV-Belichtung wird eine Polymerisationsreaktion im Kunststoff des Films initiiert, wodurch die Kunststoffmatrix weiter vernetzt¹⁵. Die nicht belichteten und schwach vernetzten Filmbereiche werden durch einen nasschemischen Entwicklungsschritt in einer Kaliumcarbonat-Lösung aufgelöst und von der Platte abgespült. Die belichteten Bereiche verbleiben auf dem Kupfer und dienen als Ätzresist.

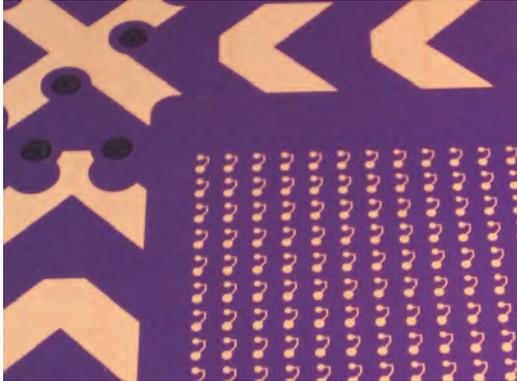


Bild 2-38: Entwickelter Negativ-Trockenresist auf der Innenlage der Mikrovibrationsensoren

Die resistfreien Kupferbereiche werden durch Ätzen entfernt (Bild 2-37, Schritt 2 und 3). Nach dem Ätzen des Kupfers wird der noch auf der Platte befindliche Resist mit einer Natrium- oder Kaliumhydroxidlösung gestrippt. Häufig werden auch herstellereigene Lösungen für die Entwicklung und das Strippen verwendet (DuPont, 2007).

Zur Herstellung von Leiterplatten werden drei Arten von fotostrukturierbaren Kunststoffen eingesetzt. Neben den Ätz- und Galvanoresists werden auch Lötstopplacke mit lithografischen Methoden strukturiert. Hierfür wird der komplette Nutzen¹⁶ mit Lötstopplack bedeckt und zwischen 80-90 °C für ca. 40 Minuten getrocknet. Anschließend wird der Lack belichtet, entwickelt und nachgehärtet (Peters GmbH, 2003).

Für die Kopie „grober“ Leiterbildstrukturen genügt es, einfache Silber-Polyesterfilme zu nutzen. Zur Herstellung feinerer Strukturen oder für die positionsgetreue Übertragung des Bildes werden mittlerweile vermehrt Laser-Direktbelichtungssysteme verwendet.

2.9.2 Mechanische Produktionsverfahren

Die Fertigung von Leiterplatten erfordert eine Reihe mechanischer Bearbeitungsschritte. Die wichtigsten sind der Zuschnitt des Plattenmaterials sowie Ritz-, Säge-, Fräs- und Bohrprozesse. Durch den Zuschnitt bringt der Leiterplattenhersteller die oftmals sehr großen Grundplatten auf ein produktionsgerechtes Maß. Auf diesem Nutzen befinden sich mehrere Leiterplatten, die über das Restmaterial entlang einer Ritzlinie zusammengehalten werden. Nach der Bestückung der Karten im Nutzenformat können diese voneinander getrennt werden. Da die Leiterplatten beim Trennen starkem mechanischem Stress ausgesetzt werden und aus den Kanten Faserreste hervorragen, werden die Platten häufig gesägt oder gefräst. Der Fräsprozess bietet zudem die Möglichkeit der freien Konturformung und der Herstellung von Freistellungen oder Ausbrüchen im Inneren der Leiterplatte.

Die mechanischen Prozesse zur Herstellung von Leiterplatten werden fast ausschließlich sequenziell ausgeführt. Sie benötigen dementsprechend lange Fertigungszeiten und sind sehr kostenintensiv. Der aufwendigste Bearbeitungsschritt ist das Bohren der Löcher für die Durchkontaktierungen.

¹⁵ Fotoresists, deren Kunststoffmatrix durch UV-Bestrahlung weiter polymerisiert, werden als Negativ-Resists bezeichnet. Werden durch die UV-Bestrahlung Polymerketten aufgebrochen, spricht man von Positiv-Resists.

¹⁶ Von einem Nutzen oder Leiterplattennutzen spricht man, wenn auf einer großen Leiterplatte mehrere identische kleinere Leiterkarten untergebracht sind.

Die meisten Bohrungen in Leiterplatten werden zur Umverteilung der elektrischen Signale auf verschiedene Ebenen der Leiterplatte genutzt. Die Durchkontaktierungen können entweder durch die gesamte Leiterplatte („Plated Through Hole Via“) oder nur durch einen Teil der Leiterplatte (Sackloch oder vergrabene Bohrung – „blind via“ oder „burried via“) geführt werden (Bild 2-39). Die Produktion der Durchkontaktierungen kann sehr aufwendig sein, da sich auf komplexen Leiterplattennutzen oft über 30.000 Bohrungen befinden. Deswegen verwenden Leiterplattenhersteller Hochleistungsbohrmaschinen mit bis zu sechs gleichzeitig arbeitenden Bohrspindeln. Mit einer Spindel können unter optimalen Bedingungen etwa 48.000 Löcher pro Stunde gebohrt werden (Eltroplan, 2009). Die praktisch erreichbare Bohrgeschwindigkeit hängt jedoch stark vom Bohrbild und der Stärke des zu durchbohrenden Materials ab und liegt meist erheblich unter den theoretisch erreichbaren Werten. Eine weitere Möglichkeit zur Beschleunigung des Bohrprozesses besteht in der Paketierung der Leiterplatten zu Leiterplattenstapeln. Ein solches Bohrpaket besteht aus mehreren Leiterplatten, die mit Passbohrungen und -stiften positionsgenau übereinander gestapelt werden.

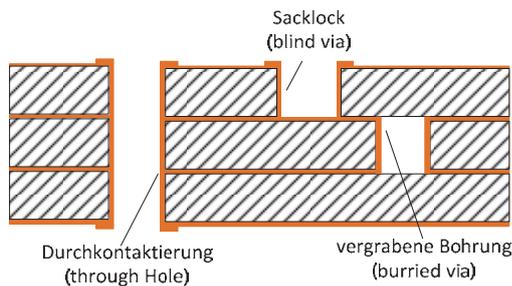


Bild 2-39: Durchkontaktierungen in verschiedenen Ausführungen

Trotz der hohen Arbeitsgeschwindigkeit der Bohrmaschinen bleibt der Bohrprozess ein sequenzieller und kostenintensiver Prozess. Alternative Verfahren wie das Stanzen der Löcher sind nur für Materialien wie CEM3 geeignet, bei denen sich im inneren des Kernmaterials kein Glasfasergewebe befindet. Das Lasern von Löchern ist technisch und wirtschaftlich nur für kleine Bohrungen mit einem Durchmesser unter 150 μm sinnvoll.

Die Bohrer bestehen aus Vollhartmetall. Dies ist ein Sinterwerkstoff aus etwa 92% Wolframcarbid, ca. 6% Kobalt sowie weiteren Zusätzen. Das Material ist durch eine hohe Biegehärtigkeit und Verschleißfestigkeit gekennzeichnet (VDE/VDI, 1999). Die Biegefestigkeit beeinflusst das Übermaß der Bohrung und den Bohrerlauf. In Bild 2-40 ist links ein normales Bohrbild mit einem Grad der Höhe h_G in der Kupferschicht und einer Rauheit von R_z der Wandung dargestellt. Das Übermaß ΔD ergibt sich aus der Differenz zwischen dem Lochdurchmesser D_h und dem Durchmesser des Bohrers D_d . Rechts im Bild ist die Situation dargestellt, bei der der Bohrer im Material verläuft. Die Eintritt- und Austrittsstelle weichen um den Bohrerlauf D_v voneinander ab. Die Materialien und geometrischen Formen werden immer weiter verbessert (Gotou, 2011). Heute können Mikrolöcher mit einem Durchmesser unter 200 μm und einem Aspektverhältnis von 5:1 (Fechner Schulte Leiterplattentechnik, 2012) hergestellt werden. Der Verlauf eines Bohrers mit einem Durchmesser von 0,3 mm durch vier doppelseitig kupferbeschichtete FR4-Platten liegt in einem Bereich von $\pm 50 \mu\text{m}$, wobei die Leiterplattenstärke einer einzelnen Platte des Bohrpaketes 0,8 mm beträgt (Panasonic Corporation, 08).

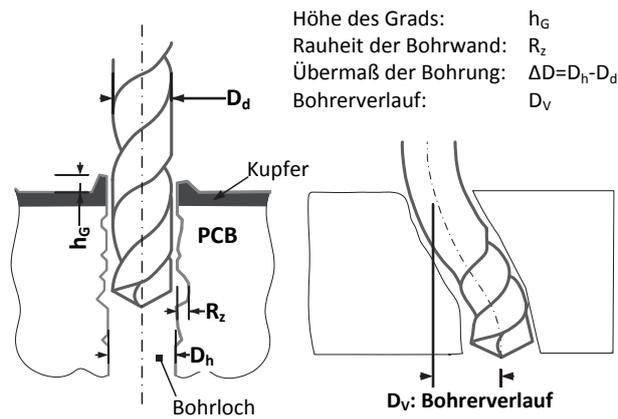


Bild 2-40: Qualitätsmerkmale von Bohrungen in Leiterplatten

Die Durchkontaktierung einer Leiterplatte stellt eine der häufigsten Fehlerursachen bei der Herstellung von Leiterplatten dar. Die Bohrung spielt dabei eine wesentliche Rolle (Frühauß & et al., 2012).

Die Herstellung guter Bohrungen erfordert die Nutzung von scharfen Bohrwerkzeugen mit hoher Verschleißfestigkeit. Die Schnittfähigkeit des Bohrers nimmt durch die abrasiven Füllstoffe aus Aluminium- und Titanoxid und die Glasfasern schnell ab. Bei der Verwendung stumpfer Bohrwerkzeuge

- treten Harzverschmierungen auf den Kupferflächen der Innenlagen auf, die den nachfolgenden Prozess der Metallisierung beeinträchtigen.
- erweicht das Epoxidharz infolge der hohen Reibungstemperatur, sodass das Kupfer nicht mehr richtig geschnitten wird. Es entstehen sogenannte „Nagelköpfe“ (Zheng & et al., 2012).
- reißen Fasergewebe aus der Harzmatrix, sodass die Bohrwand sehr rau und deren Metallisierung unzuverlässig wird (VDE/VDI, 1999).
- wird die Entstehung von Bohrgraten auf den äußeren Kupferlagen begünstigt.

Die Gradbildung kann durch die Abdeckung des Bohrstapels mit einer dünnen Aluminiumplatte minimiert werden. Die Unterseite wird mit einer melaminharzbeschichteten Spanplatte unterlegt, die einen einwandfreien Bohrertritt aus dem Bohrpaket ermöglicht (Khandpur, 2006).

Automatisierte Prozesskontrollen und Werkzeugwechselsysteme in den Bohrmaschinen haben das Problem schlechter Durchkontaktierungen entschärft. Dennoch bleibt der Bohrprozess als Teilprozess der Durchkontaktierung ein kritischer Prozess.

Das Vereinzeln von Leiterplattenmaterialien auf Wafersägen wird meistens nur im Packagingbereich angewendet. Es werden kunststoffgebundene, metallgesinterte oder elektro-geformte Sägeblätter verwendet, in die kleine Diamantsplitter eingearbeitet sind. Kunststoffgebundene Blätter sind deutlich preiswerter als metallgebundene, allerdings erreichen sie bei weitem nicht die Standzeit der gesinterten Metall- oder der elektro-geformten Nickelblätter. Da kunststoffgebundene Sägeblätter mechanisch kaum belastbar sind, werden sie zum Trennen von Leiterplatten erst ab einer Sägeblattbreite von 250 µm empfohlen (Fa. DiscoEurope Technologies, 2012). Die Vereinzeln der Mikrovibrationssensoren mit einer 120 µm breite Sägegasse ist nur mit metallischen oder nickelgebundenen Sägeblättern möglich. In Tabelle 2-11 sind exemplarisch verschiedene Nickelsägeblätter, die Größe der Diamantsplitter sowie die empfohlene Anwendung dargestellt.

Anwendung	Diamantgröße
PCB & LED Gehäuse	10-17µm
Plastic Ball Grid Array (PBGA) und Spritzguß Epoxidgehäuse	30-50µm
Mehrlagen-Kondensatoren (MLC) und „Grüne“ Keramik (Green Tape)	30-70µm
Piezo-Keramik (PZT)	6-10µm

Tabelle 2-11: Sägeblattempfehlung (LEL Diamond Tools International, Inc., 2009)

Metallische Sägeblätter können aufgrund ihrer hohen mechanischen Stabilität auch mit Schlitzten hergestellt werden. Die Schlitzte ermöglichen zum einen eine verbesserte Kühlung des Blattes, zum anderen ist die effektive Fläche, die mit dem zu trennenden Werkstück in Kontakt kommt, geringer als bei Vollblättern. Somit reduzieren sich die Schnittkräfte. Nachteilig können sich hingegen höhere Vibrationen auswirken (ADT Advances Dicing Technologies, 2012), wodurch sich die Schnittbreite vergrößert.

Daneben ist bei der Verwendung von elektro-geformten Nickelblättern zu beachten, dass die Diamanten der einen Sägeblattseite produktionstechnisch zunächst vollständig in das Nickel eingebettet sind. Hierdurch treten auf beiden Seiten des Sägeblattes ungleichmäßige Schneidkräfte auf, wodurch

- schief gesägte Außenkanten auftreten können
- und infolge des ungleichmäßigen Blattverschleißes ein frühzeitiger Blattbruch auftreten kann.

Daher müssen diese Blätter vor und während der Verwendung „gedresst“ werden. Beim „Dressen“ werden die Diamanten gleichmäßig freigelegt (Disco Technologies, 2012).

Deutlich bessere Ergebnisse erreicht man mit Blättern, die werkseitig elektrochemisch zurückgeätzt und vorgeschliffen sind. Bei diesen Blättern sind beide Schnittseiten bereits bei der Auslieferung nahezu identisch. Dies führt zu rechtwinkligen Schnittkanten und zu einer hohen Blattstandzeit. Sie müssen während der Nutzung aber dennoch regelmäßig gedresst werden, um die mit Epoxidharz verunreinigten Diamanten zu reinigen.

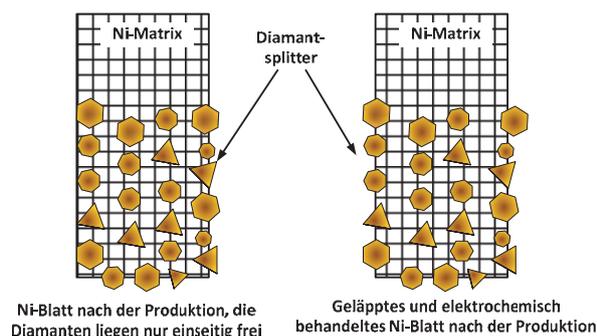


Bild 2-41: Galvanisch hergestellte Sägeblätter nach der Produktion

Vor dem Sägeprozess wird das Blatt mit einem vorgegebenen Drehmoment auf den Sägeflansch aufgezogen, der mit der luftgelagerten Antriebsspindel verbunden ist. Die Schnitttiefe wird über die Spindel eingestellt. Generell sind zwei verschiedene Sägestrategien zu unterscheiden:

- a) Das Werkstück wird nicht vollständig durchtrennt.
- b) Das Werkstück wird vollständig durchtrennt, wobei in die Folie eingesägt wird.

Silizium gehört beispielsweise zu den Werkstoffen, die applikationsabhängig nicht vollständig durchgesägt werden. Der verbleibende Reststeg wird beim Expandieren der Sägefolie oder beim Ausstechen vor der Bestückung getrennt.

Leiterplattenmaterialien, faserhaltige Substanzen aber auch Substanzen mit dicken Metallschichten auf der Klebeseite der Folie müssen vollständig getrennt werden. Insbesondere Metallreste können dabei leicht verschmieren und in die weiche Sägefolie gedrückt werden. Bei der Einstellung der Schnitttiefe ist dieses Materialverhalten zu berücksichtigen, da die Metallspäne die Folie verletzen und aufreißen können. In der Folge wird das Vakuum schwächer und die Sägeergebnisse können sich verschlechtern.

Für den eigentlichen Sägeprozess wird das Blatt über die Spindel in Rotation versetzt. Der mit dem Wafer beklebte Waferring wird auf den Vakuumtisch der Maschine aufgelegt und in Richtung der Sägegassen bewegt. Die Maschine korrigiert dabei automatisch anhand der Werkstückhöhe $h_{\text{Werkstück}}$ und des Blattradius r_{Blatt} die Startposition des Schnittes, die mindestens den Abstand d_{Min} vom

Sägeblatt entfernt sein muss. Bei Vernachlässigung der Eindringtiefe des Blattes in die Folie ergibt sich für den Abstand:

$$d_{Min} = \sqrt{2 \cdot r_{Blatt} \cdot h_{Werkstück} - (h_{Werkstück})^2} \quad (2.48)$$

Zu diesem Abstand addiert die Maschine noch einen kleinen, einstellbaren Sicherheitsabstand d_{saf} , sodass die minimale Länge der Sägegasse L_{Cut} für ein Werkstück der Breite $b_{Werkstück}$

$$L_{Cut} = 2 \cdot (d_{Min} + d_{Saf}) + b_{Werkstück} \quad (2.49)$$

beträgt (Bild 2-42). Die Summe aus dem Sicherheitsabstand d_{saf} und dem minimalen Abstand zum Werkstück infolge seiner Höhe d_{Min} tritt doppelt auf, um einen sicheren Austritt des Sägeblattes nach Durchsägen des Werkstückes zu garantieren.

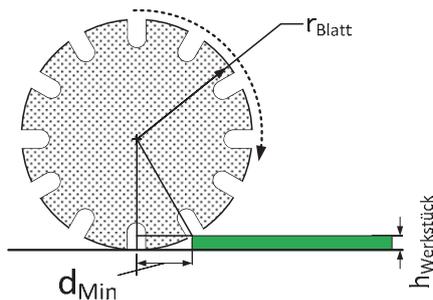


Bild 2-42: Ermittlung der Startposition des Sägeschnittes

Die maximale Schnittgeschwindigkeit, die bei dünnen Leiterplatten bis etwa 0.8 mm Dicke erreicht werden kann, beträgt 100 mm/sec. Zur Minimierung der entstehenden Reibung und der Wärme kann dem Kühlwasser ein Schmiermittel zugegeben werden. Die Zeit, die für den vollständigen Trennprozess eines Wafers benötigt wird, ergibt sich aus der Anzahl und der Länge der Schnitte in den Wafer.

2.9.3 Verarbeitung von Leiterplatten bei erhöhten Temperaturen

RoHS-konforme Lotwerkstoffe sind durch eine Schmelztemperatur gekennzeichnet, die knapp 40 °C über der Schmelztemperatur eutektischer Zinn-Blei-Lote liegt. Die höheren Löttemperaturen wirken sich massiv auf die Verarbeitung der Leiterplatten und die verwendeten Materialien aus. Daher wurden besondere Maßnahmen zur Herstellung qualitativ hochwertiger Schaltungen erforderlich, da die höheren thermischen Belastungen

- zu einer verstärkten Delamination des Plattenmaterials führten,
- erhöhte Ausfallraten der Durchkontaktierungen verursachten,
- die Verbindung zwischen den Glasfasern und der Epoxidmatrix lösten,
- eine verringerte Haftkraft der Kupferfolie auf dem Substrat mit sich brachten,
- die Zersetzung des Harzsystems verursachte.

Viele der Fehler werden durch einen erhöhten Restfeuchtegehalt im Epoxidharz verursacht. Die Feuchtigkeit wird in den Prozessen oder durch falsche Lagerbedingungen aufgenommen. Sie verdampft bei den hohen Löt- und Laminiertemperaturen schlagartig, sodass sich Risse, Blasen und Delaminationen in dem Leiterplattenmaterial bilden können (Zhao, 2007). Feuchtigkeit im Bereich der Durchkontaktierung führt zu schlechten oder fehlerhaften Metallisierungen.

Eine schonende Möglichkeit, die Feuchtigkeit aus den Leiterplatten auszutreiben, ist das Trocknen. Darunter versteht man die Warmauslagerung eines Materials für einen definierten Zeitraum unterhalb der Glastemperatur des Materials. Tempern hingegen bezeichnet die Lagerung von Leiterplatten oberhalb der Glastemperatur. Unterhalb einer Restfeuchtigkeit von 800 ppm sind gemäß der IPC Norm M-109 keine Schwierigkeiten im Laminiertprozess zu erwarten. Dieser Feuchtigkeitswert wird bei normalen Umgebungsbedingung ($T=23\text{ °C}$, 30 % < rel. Feuchte < 60 %) nach einer Lagerzeit von

ca. 70-100 Tagen überschritten (Fermond, 2006). Wenn die Restfeuchtigkeit den Grenzwert überschreitet, müssen die Platten vor der Verpressung oder dem Lötschritt getrocknet werden. Nach der Strukturierung des Leiterbildes sollten die Platten jedoch nicht getempert werden. Oberhalb der Glastemperatur können innere Spannungen des Glasgewebes abgebaut werden, die zu einem Verzug des Leiterplattenmaterials führen. Das Leiterbild passt in diesem Fall nicht mehr zu den Bildern der anderen Lagen. Deswegen sollten strukturierte Leiterplatten deutlich unterhalb der Glastemperatur getrocknet werden.

2.9.4 Laminier-Prozesse

Unter Laminieren von Leiterplatten versteht man das Verpressen mehrerer Kern- und Prepregplatten zu einer formschlüssig verbundenen Platte. Der Pressvorgang läuft bei erhöhten Temperaturen ab, die für normale Epoxy-Prepregs bei etwa 180°C liegen. Der Laminierdruck ist abhängig vom Substrat und liegt zur Herstellung von Standardleiterplatten bei etwa 30 Bar. Zur Laminierung der Leiterplatten werden heute fast ausschließlich hydraulische Pressen mit Vakuumunterstützung verwendet. Autoklaven werden nur noch selten verwendet, da die Aufheizraten des Pressstapels in dem Vakuumbeutel zu gering und die Zeiten für den Aufbau des Vakuums zu hoch sind (Combs, 2008).

Für den Aufbau von Multilayer-Leiterplatten ist es erforderlich, die einzelnen Lagen vor der Verpressung genau zueinander auszurichten. Dieser Prozess wird als Registrierung bezeichnet. Die maßgeblichen Registrierungsverfahren sind das „Pin-Lam“-Verfahren und eine Methode, bei der die Registrierung optisch und die Fixierung der Position über eine Vorlaminierung mit Heizpatronen erfolgt. Die zweite Methode wird im weiteren Diskurs als „Opto-Prelam-Verfahren“ bezeichnet.

Beim Pin-Lam Verfahren werden die Lagen über mechanische Passstifte in Langlochform zueinander ausgerichtet (Bild 2-39). Die Passlöcher sind in Richtung der flachen Seite der Passstifte etwas größer ausgestanzt, sodass sich das Plattenmaterial bei der Verpressung ausdehnen und zusammenziehen kann. Bei einer spielfreien Passung über runde Passstifte würden unerwünschte Spannungen in das System eingebracht.

Das Opto-Prelam-Verfahren ermöglicht die Justage und Laminierung mit einer höheren Genauigkeit. Die Registrierungsgenauigkeit für Außenlagen liegt beim Pin-Lam-System bei etwa 71 µm, bei optischen Systemen bei 66 µm (Wundt, 20xx). Die Fehlerkette der Registrierungsschritte bis zur Stanzung der Justagelöcher ist lang. Die Positioniergenauigkeit der Passmarken wird durch die Stanzmaschine selbst, aber auch durch das Material beeinflusst. So ist die Stanzung nach der ätztechnischen Strukturierung deutlich genauer als davor, da das Basismaterial während der Bearbeitung meist schrumpft. Bei der Leiterplattenherstellung wird dies durch entsprechende Skalierungsfaktoren in den Filmen berücksichtigt.

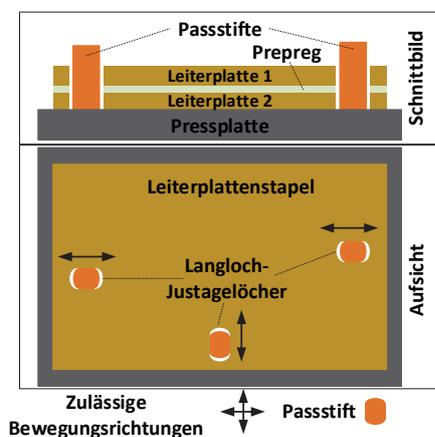


Bild 2-43: Aufbau eines Pin-Lam Pressstapels im Querschnitt (oben) und der Aufsicht (unten)

Nach der Registrierung wird das Presspaket mit einem definierten Temperatur- und Druck-Zeitprofil im Vakuum verpresst. Das Harz des Prepregs schmilzt auf und fließt in Hohlräume. Der

Laminierprozess benötigt inklusive der Aufheiz- und Abkühlzeiten ca. 90-120 Minuten. Ein typisches „Kiss“-Laminierprofil ist in Bild 2-44 dargestellt. Der Pressstapel wird bei sanftem Druck (vergleichbar dem eines Kusses-„Kiss“) bei etwa 10 Bar in die Presse eingelegt. Nach dem Aufschmelzen des Prepregs wird der Druck auf den finalen Schließdruck (etwa 30 Bar) erhöht. Das Harz des Prepregs fließt stark und beginnt kurz danach mit der Aushärtung. Um Verwölbungen im Material zu vermeiden („Warpage“), werden die Platten unter Druck abgekühlt.

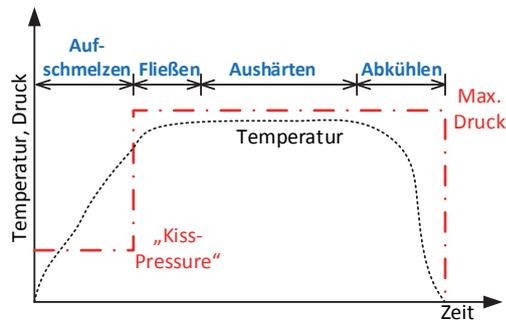


Bild 2-44: Darstellung eines Kiss-Laminierzyklus nach (Combs, 2008)

Die vorgegebenen Pressparameter sind zwingend einzuhalten. Verkürzt man die Aushärtezeiten reduziert man die Aushärtetemperatur, so beeinflusst man die Eigenschaften des laminierten Produktes. Die Platinen bauen innere Spannungen auf und sind nach dem Pressvorgang verbogen. Dies kann zum Ausfall der kompletten Lieferung führen.

2.10 Elektronische Signalerfassung

Die Herstellung sowie die Qualitätsprüfung der Vibrationssensoren erfordern automatisierte mess- und Prüfeinrichtungen, die elektronisch betrieben werden. Zu den Schlüsseltechnologien dieser Testeinrichtungen ist die Digitalisierung der analogen Signale mit asymmetrischen Komparator-Schaltungen zu zählen. Diese Schaltungen sind auch elementare Baugruppen für die Anwendung von Mikrovibrationssensoren. Daneben werden integrierte Analog-Digitalwandler (ADCs) und optische Positionencoder zur Steuerung der Prüf- und Testeinrichtungen verwendet.

2.10.1 Schmitt-Trigger Schaltungen

Eine grundlegende Schaltungskomponente für die Digitalisierung analoger Signale sind Schmitt-Trigger-Schaltungen. Sie sind in fast allen digitalen Eingangsstufen von integrierten Schaltungen zu finden.

Ein Schmitt-Trigger erzeugt ein digitales Ausgangssignal in Abhängigkeit von seiner Eingangsspannung. Sofern das Eingangssignal niedriger als eine untere Schwellwertspannung V_{TL} ist, beträgt die Ausgangsspannung des Schmitt-Triggers den Wert V_H . Erst bei Überschreiten eines weiteren, positiveren Schwellwertes V_{TU} ändert der Ausgang seinen Zustand und nimmt den Wert V_L an. Die Differenz

$$V_{Hyst} = V_{TU} - V_{TL} \quad (2.50)$$

kennzeichnet die Hysteresespannung zwischen den beiden Schaltpunkten (Bild 2-45). Schmitt-Trigger-Schaltungen sind sehr unempfindlich gegen verrauschte Eingangsgrößen.

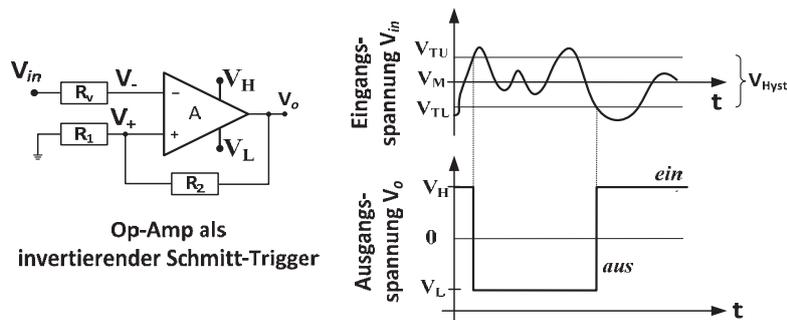


Bild 2-45: Funktionsweise eines Operationsverstärker in Schmitt-Trigger-Konfiguration

Die Digitalisierung der analogen Signale der Mikrovibrationssensoren erfolgt mit unipolar versorgten Operationsverstärkern, bei der die negative Versorgungsspannung geerdet ist. Sind zudem asymmetrische¹⁷ Schaltschwellen erforderlich, kann die in Bild 2-46 dargestellte Schaltungstopologie verwendet werden.

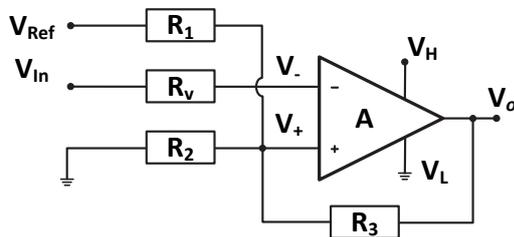


Bild 2-46: Schmitt-Trigger-Schaltung mit asymmetrischen Schaltschwellen. Die Anbindung des positiven Eingangs an eine statische Referenzspannung führt zu einer Verschiebung der Mittenspannung V_M der Schalthysterese V_{Hyst} .

Durch die Widerstände R_1 , R_2 und R_3 können bei gegebenen Spannungswerten V_{Ref} und V_H die Schwellwertspannungen berechnet werden, bei denen der Ausgang umgeschaltet wird. Umgekehrt können bei gegebenen Schwellwertspannungen V_{TL} und V_{TU} die Widerstände R_1 , R_2 und R_3 berechnet werden (siehe Anhang A.2). Die Werte ergeben sich aus den Gleichungen (2.51) und (2.52).

R_2 wird festgelegt z.B. $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$	$R_v = R_1 R_2 R_3$	
$R_3 = R_2 \cdot (\Lambda \cdot \kappa - 1) / (\Lambda + 1)$	mit $\Lambda = (V_{Ref} - V_{TL}) / V_{TL}$	(2.51)
$R_1 = (R_2 \cdot R_3) / (R_2 \cdot \kappa - R_3)$	mit $\kappa = (V_H - V_{Hyst}) / V_{Hyst}$	(2.52)

Die Kalkulation setzt die Verwendung von Rail-to-Rail Operationsverstärkern voraus, bei denen der Ausgang bis an die Grenzen der Versorgungsspannung V_H und V_L angesteuert werden kann. Der Widerstand R_2 muss vorab festgelegt werden, da sonst das Gleichungssystem unterbestimmt ist.

Die dargestellte Schmitt-Trigger-Schaltung mit einstellbaren, asymmetrischen Schwellwerten bildet die Schlüsselbaugruppe für einen effizienten elektrischen Test der Mikrovibrationssensoren. Sie wird in Kapitel 5.7 eingehend besprochen.

2.10.2 Pegel- und flankengesteuerte Digitalisierung

Nach der Digitalisierung kann die Übernahme des Schmitt-Trigger-Ausgangssignals vom logischen System pegel- oder flankenbasiert erfolgen. Bei einer Pegelerfassung wird das Signal synchron mit dem Systemtakt abgefragt. Dieses Verfahren wird zur Digitalisierung der Sensorsignale des Mikrovibrationsschalters im FPGA genutzt. Es dient aber auch zur Erhöhung der Robustheit elektronischer Systeme gegen elektromagnetische Störungen. Hierbei muss der Signalpegel innerhalb eines Abtastfensters bei mehrfach aufeinanderfolgenden Abtastungen den gleichen Wert liefern (Texas Instruments, 2007). Die Kombination der Pegelabtastung mit einem Abtastfenster ist in Bild 2-47

¹⁷ Asymmetrische Schaltschwellen sind durch eine offsetbehaftete Mittenspannung V_M der Schalthysterese gekennzeichnet. Für die Mittenspannung gilt $V_M = V_{Hyst} / 2 + V_{TL}$.

dargestellt. Das analoge Signal wird mithilfe eines Schmitt-Triggers binär codiert und im Logiksystem mehrfach abgetastet. Die Logikeinheit übernimmt den Signalzustand erst, wenn n aufeinanderfolgende Abtastwerte (hier n=6) der gleichen Wert zurückgeliefert haben.

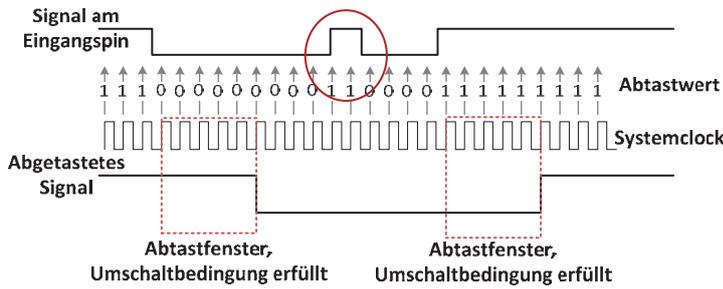


Bild 2-47: Pegelgesteuerte Digitalisierung eines Eingangssignals mit Abtastfenster

Die flankengesteuerte Signalerfassung wird häufig in Systemen verwendet, in denen Pulse gezählt werden müssen. Magnetische oder optische Encoder zur Bestimmung der Drehgeschwindigkeit und der Rotorposition von Motoren, aber auch Längenmesssysteme für die Positionserfassung der Arbeitsköpfe von Werkzeug- oder Bestückmaschinen basieren auf der Zählung von Flanken.

Die Auswertung der Flanken bietet den Vorteil, dass der Eingangspin nicht kontinuierlich von der Logikeinheit überwacht werden muss. Erst nachdem sich der Zustand des Signals am Pin ändert und eine entsprechende steigende oder fallende Flanke erzeugt, wird ein Zählimpuls erfasst. Aus der Signaländerungsrichtung der Flanke kann der Pinzustand abgeleitet und zwischengespeichert werden.

Flankengesteuerte Eingangsports werden auch dazu verwendet, um den Arbeitsablauf des Logiksystem zu unterbrechen und das externe Signal zu verarbeiten (externer Interrupt). So kann ein Mikrocontroller beispielsweise mit minimalem Zeitverzug und ohne Belastung der Rechenleistung auf Störfälle reagieren, die durch einen flankengesteuerten Eingangspin signalisiert werden. Diese Art der Signalerfassung ist daneben auch die Schlüsseltechnologie für den Aufbau sehr leistungsarmer elektronischer Systeme. Der Mikroprozessor und alle peripheren Komponenten verharren solange in einem Schlafzustand, bis ein externes Signal an einem flankengesteuerten Eingangspin anliegt. Dieses Signal kann beispielsweise von einem Mikrovibrationssensor stammen. In diesem Fall zeigt es an, dass das Gerät bewegt und somit benutzt wird.

Eine hardwaretechnische Implementierung zur Erkennung von Schaltflanken ist in Bild 2-48 dargestellt. Das Eingangssignal CLK wird mit seiner leicht zeitverzögerten und invertierten Version auf ein UND-Gatter geleitet. Durch die Zeitverzögerung liegt bei einer steigenden Flanke an beiden Eingängen kurzzeitig ein High-Pegel an, sodass das Ausgangssignal CLK' kurzzeitig einen Puls ausgibt, der die steigende Flanke signalisiert. Für die Erkennung fallender Flanken werden die Eingangssignale am Eingang des UND-Gatters invertiert.

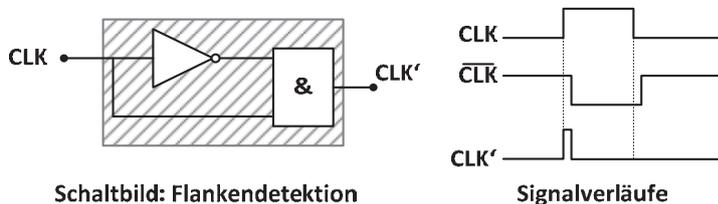


Bild 2-48: Schaltbild zur Erkennung steigender Flanken und Signalverläufe

2.10.3 Erfassung von Bewegungssignalen

Mikrovibrationssensoren können nur einfache Bewegungsformen beziehungsweise Erschütterungen erfassen. Sie sind nicht geeignet, die Bewegung eines Körpers im Raum vollständig zu beschreiben. Hierfür sind sechs freie Bewegungsgrade zu erfassen, drei translatorische und drei rotatorische. Sie ergeben sich aus der Beschleunigung und der Corioliskraft, die in allen Raumrichtungen auf eine Probemasse wirken. Moderne MEMS-Sensoren sind heute in der Lage, alle sechs Freiheitsgrade in

einer integrierten Komponente zu erfassen. Dabei wird die Signalverarbeitungsintelligenz häufig mit in das System integriert (Bosch Sensortec GmbH, 2012).

Für hochgenaue Inertialnavigationssysteme sind die mikrotechnisch hergestellten Komponenten zu ungenau. Alternative Sensorsysteme, die auf der Auswertung optischer und anderer Signale beruhen, sind beispielsweise in (Barbour, 2011) und (Merchant, 2009) beschrieben. In Tabelle 2-12 sind die Anforderungen an die Genauigkeit von Bewegungssensoren zusammengestellt. Die höchsten Anforderungen stellen die U-Boot Navigation und die Ausrichtung von Teleskopen. Taktische Navigationssysteme erfordern eine Kurzzeitnavigation, wenn kein GPS-Signal zur Verfügung steht oder die Zeit für die Auswertung von GPS-Signalen zu kurz ist (El-Sheimy, 2009), (Barbour, 2011). Zu den klassischen Consumer-Anwendungen zählen Navigationsapps für Handys oder Spielecontroller.

Anwendung	Drehratensensor	Beschleunigungssensor
Strategisch	1 Grad/Monat (0,0005 - 0,001 deg/h)	~ 1 μ g
Navigation	1 Grad/Woche (0,002 - 0,015 deg/h)	~ 25 μ g
Taktisch	1 Grad/Stunde (0,1 - 10 deg/h)	~ 1 mg
Consumer	1 Grad/Sekunde (100 - 10000 deg/h)	> 50 mg

Tabelle 2-12: Genauigkeitsanforderungen an Bewegungssensoren

Die Signale der mikromechanischen Bewegungssensoren beruhen auf Änderung der Kapazität, auf dem piezoresistiven oder piezoelektrischen Effekt (Kempe, 2012). Zur Kompensation von Nichtlinearitäten, Temperaturgängen und zur Rauschreduzierung werden häufig differenzielle Messanordnungen genutzt. Dies ist exemplarisch in einer Messzelle zur Erfassung der Beschleunigung in Bild 2-49 dargestellt. Hierbei wird die Kapazitätsänderung durch die Veränderung der Position der beweglichen Kondensatorplatten (blau) gegenüber den statischen Platten (grau) ermittelt und ausgewertet.

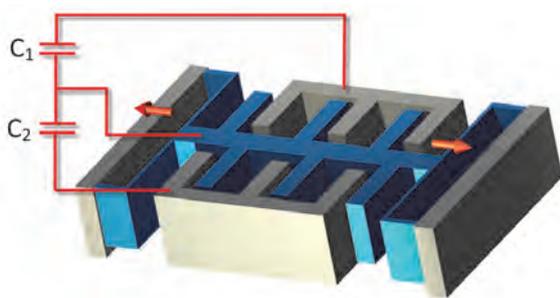


Bild 2-49: MEMS-Beschleunigungssensors mit differenzieller, kapazitiver Auswertung

Ein wichtiger Aspekt für den Einsatz von MEMS-Sensoren in tragbaren, batteriebetriebenen Systemen ist deren Energieaufnahme. Bis etwa in das Jahr 2005 übertraf die Stromaufnahme von kommerziell verfügbaren MEMS-Beschleunigungssensoren 5 mA. Heute können einzelne Typen bei einer Versorgungsspannung von 2,0 V mit einem Strom von 1,8 μ A betrieben werden (Analog Devices, 2012). Seit dem Jahr 2006 sind Beschleunigungssensoren mit „bewegungsaktivierten“ Schlafmodus bekannt, in dem sie lediglich 270 nA benötigen. Dies entspricht einer Eingangsimpedanz von etwa 7,5 Megaohm und liegt nur noch geringfügig oberhalb der Leistungsaufnahme von Mikrovibrationssensoren.

Für die Auslegung und Charakterisierung der technischen Daten der Mikrovibrationssensoren wurde ein Datenlogger-System MSR-145 der Fa. MSR aus der Schweiz mit dreiaxsigem MEMS-Beschleunigungssensor verwendet. Der Sensor kann in allen drei Raumachsen Beschleunigungssignale bis maximal +/- 15g bei einer Auflösung von +/- 0,15g aufnehmen. In Bild 2-53 sind einige typische Beschleunigungsverläufe dargestellt. Die in den Bildern gezeigten

Beschleunigungskurven stellen den Betrag der Beschleunigung im Raum dar. Er ergibt sich nach Gleichung (2.53) zu:

$$\text{Beschleunigung} = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (2.53)$$

In Gleichung (2.53) steht a_x, y, z jeweils für die Beschleunigung in der Raumrichtung x, y, z . Die vom Datenlogger aufgezeichneten Beschleunigungswerte sind stark abhängig von der Einbausituation. Im gut gedämpften und gefederten Fahrzeuginnenraum ist die Beschleunigung bei einer normalen Autofahrt im Stadtgebiet mit diesem Sensorsystem kaum erfassbar. Trampolin-Springen mit einem am Fußknöchel montierten Sensor liefert hingegen sehr hohe Beschleunigungswerte. Auch beim Radfahren oder bereits beim normalen Gehen sind Signale erfassbar, die deutlich über der Ansprechschwelle der Mikrovibrationssensoren von etwa 50 mg liegen.

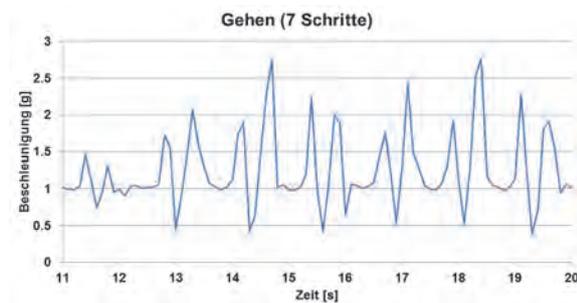


Bild 2-50: Beschleunigungssignale beim Gehen. Der Sensor ist am Fußknöchel befestigt. Es wurden sieben Schritte getätigt.

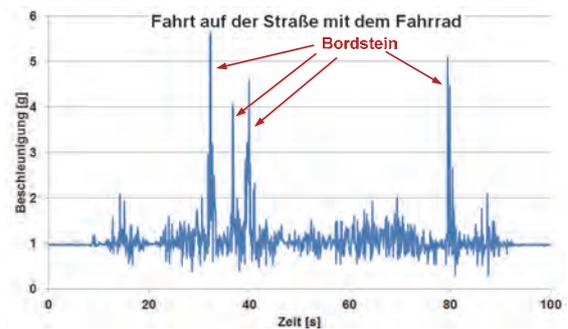


Bild 2-51: Beschleunigungssignale beim Fahrradfahren. Der Sensor ist am Gepäckträger beim Rücklicht montiert.

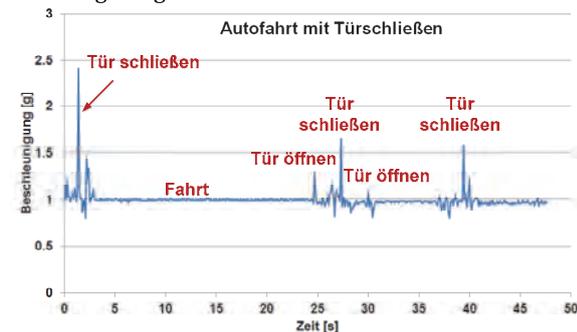


Bild 2-52: Beschleunigungssignale bei einer Autofahrt. Der Sensor ist unter der fahrerseitigen Sonnenblende angebracht.

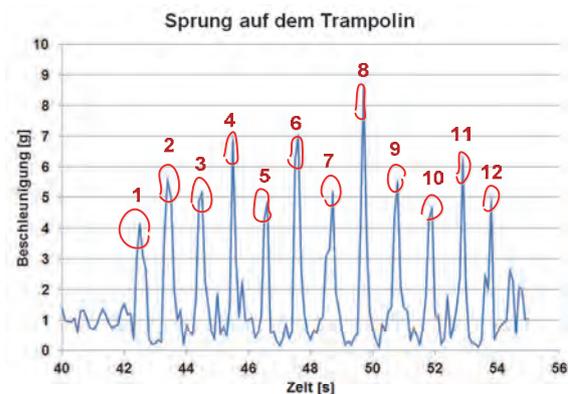


Bild 2-53: Beschleunigungssignale beim Springen auf dem Trampolin. Der Sensor ist am Knöchel befestigt. Der Proband ist 12-mal gesprungen.

Die typischen Beschleunigungswerte, die in alltäglichen Situationen auftreten, liegen oft beachtlich über der typischen Ansprechschwelle der Mikrovibrationssensoren, die in der Regel unterhalb von 0,1 g liegt (Bild 3-9). Damit ist der Mikrovibrationssensor für ein breites Anwendungsspektrum geeignet.

2.11 Integration funktionaler Schichten in Leiterplatten

Üblicherweise dienen Leiterplatten zur Verteilung elektrischer Energie und zur Übertragung von Signalen zwischen elektronischen Bauteilen, die sich auf den Oberflächen der Platten befinden. Durch die ständig steigende Integrationsdichte elektronischer Systeme wird seit längerer Zeit daran gearbeitet, Komponenten in die Leiterplatte einzubringen. Erst kürzlich wurde beispielsweise das EU-

Projekt „hermes“¹⁸ abgeschlossen, das sich vollständig mit der Fragestellung der Integration aktiver und passiver Komponenten in die Leiterplatte auseinandergesetzt hat.

Die ersten Komponenten, die in die Leiterplatte eingebracht wurden, waren flächenbasierte kapazitive und resistive Elemente (Piasecki & et al., 2012). Kapazitive Elemente werden in Form von Plattenkondensatoren in die Leiterplatte eingebracht. Die Kapazität eines Plattenkondensators hängt von der relativen Permittivität und dem Abstand der beiden metallischen Flächen ab. Mit sehr dünnen Prepreg-Materialien, die eine relative Permittivität von 30 aufweisen und 8 µm hoch sind, können Kapazitäten bis etwa 1,7 nF/cm² realisiert werden. In Testanwendungen wurden somit die Zahl der Kondensatoren auf der Außenseite der Boards um bis zu 77 % gesenkt (SANMINA - SCI, 2006).

Widerstände werden ebenfalls als Flächenelemente in die Leiterplatte integriert. Sie werden entweder im Siebdruckverfahren (Schweizer Electronic AG, 2013) oder durch die ätztechnische Bearbeitung spezieller Kupfer-Nickelphosphor-Folien hergestellt (Omega Tech. Inc., 2013).

Die Einbettung diskreter Komponenten in die Leiterplatte wird von allen größeren europäischen Leiterplattenherstellern vorangetrieben. Für den Aufbau kompakter LED-Beleuchtungsmodule werden beispielsweise hochkapazitive keramische Multi-Layer-Kondensatoren (MLC) in die Leiterplatte eingebracht (Seki, 2011). Zur Herstellung bauraumoptimierter leistungselektronischer Systeme werden induktive Elemente, gedünnte Si-Mikrocontrollerchips und Leistungsmosfets in die Leiterplatte eingefügt. Diese Technologie bietet grundsätzlich die Möglichkeit, hochintegrierte Leistungsmodule bis zu einer Leistung von 10 kW in Leiterplattentechnik aufzubauen (Ostmann & et al., 2010). Die Chips werden vollständig in die Leiterplatte eingebettet. Zur Herstellung der elektrischen Kontakte werden Öffnungen in das Leiterplattenmaterial über den Kontaktstellen des Chips gelasert. Diese Öffnungen werden in einem galvanischen Prozess an den Halbleiter angebunden (Böttcher & et al., 2008).

Zur Kühlung der leistungselektronischen Komponenten bringt man Kühlkanäle in die Leiterplatte ein (Schindler-Saefkow & et al., 2006). Von kommerziellen Anwendungen der Kühltechnologie wird bisher jedoch nur selten berichtet.

In weiteren Forschungsprojekten wie dem EU-Projekt TIPS (McHugh & et al., 2013) werden schließlich Verfahren erforscht, 50 -100 µm dünne Si-Chips in mehreren Ebenen in die Leiterplatte zu integrieren.

2.12 Aufbau und Funktionsweise von Kugelschaltern

Die Verwendung von Kugeln für die Herstellung elektrischer Kontakte wurde bereits vor knapp 90 Jahren veröffentlicht (Nelson, 1927). Hierbei handelte es sich jedoch meist um große, stromtragende Schaltersysteme. Erste Trägheitssensoren zur Detektion von Bewegung sind seit 1971 bekannt (Schneider C. , 1971). Sie waren bereits für die Verwendung in elektronischen Systemen vorgesehen.

2.12.1 Funktionsweise von Kugelschaltern und Mikrovibrationssensoren

Kugelsensoren zur Bewegungserkennung bestehen aus mindestens drei Kontaktflächen, von denen zwei feststehen und eine beweglich ist. Die Kugel ist das bewegliche Sensorelement und kann die beiden feststehenden Kontaktflächen bei Bewegung elektrisch überbrücken. Damit ändert sich der Widerstand zwischen den beiden äußeren Anschlussflächen. Die Widerstandsänderung über den Kontaktflächen lässt Rückschlüsse auf den Bewegungszustand des Sensors zu. Ändert sich der Widerstand, so wird der Sensor bewegt (Bild 2-54 und Bild 2-55).

¹⁸ Das Projekt HERMES wurde während der Laufzeit von 2008-2011 mit einem Volumen von etwa 8,35 Mio € gefördert (Wolkenstein, 2008).

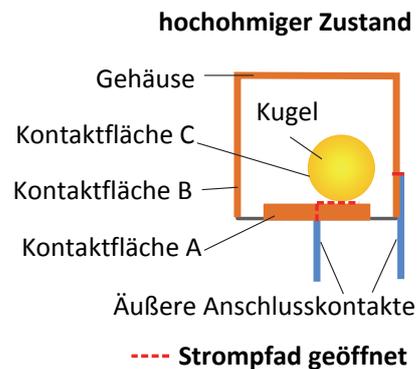
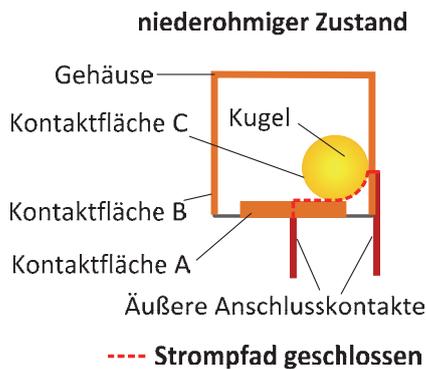


Bild 2-54: Funktionsweise eines Kugelsensors im geschlossenen, niederohmschen Zustand. Die elektrisch leitfähige Kugel überbrückt die beiden Kontaktflächen. Der Widerstand zwischen den Flächen ist niedrig. Er liegt unter 100 Ohm.

Bild 2-55: Funktionsweise eines Kugelsensors im offenen, hochohmigen Zustand. Die elektrisch leitfähige Kugel überbrückt die beiden Kontaktflächen nicht. Der Widerstand zwischen den Flächen ist hoch. Er liegt weit über 50 Megaohm.

Die Sensitivität des Sensors wird durch die Masse der Kugel und die geometrischen Eigenschaften der Kontaktflächen bestimmt. Je geringer die Kugelmasse ist, desto niedriger muss die extern einwirkende Kraft sein, um die Kugel in Bewegung zu versetzen. Die Gewichtskraft einer Stahlkugel hängt kubisch von deren Durchmesser ab. In Bild 2-56 ist die Gewichtskraft der Mikrokugeln über ihrem Durchmesser aufgetragen. Um eine Stahlkugel mit einem Durchmesser von 800 μm aus der Ruhe gegen die Schwerkraft auszulenken, sind etwa 22 μN erforderlich. Bei Kraftereinwirkungen aus anderen Raumrichtungen sind die Roll- und Haftreibung zu überwinden, die stark von den Oberflächeneigenschaften der Kugel und der Oberfläche abhängen. Die Sensitivität verschiedener Sensoren unterliegt infolge von Kontaminationseffekten (Kapitel 2.6.2) oder unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften erheblichen Schwankungen. Darüber hinaus können die Einbaulage des Sensors und die Einbausituation der Geräte variieren. Zur Abschätzung der minimal erforderlichen Anregung reicht deswegen die Betrachtung der Gewichtskraft.

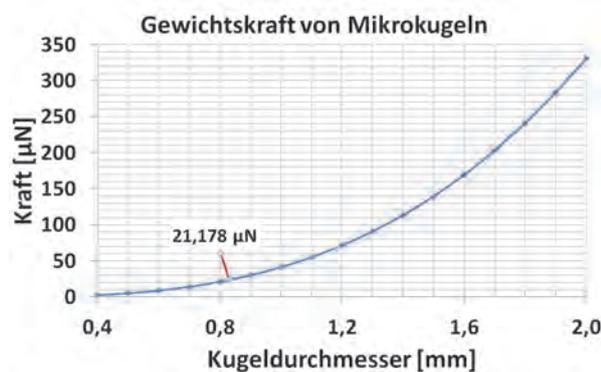


Bild 2-56: Darstellung der Gewichtskraft in μN über dem Kugeldurchmesser in mm

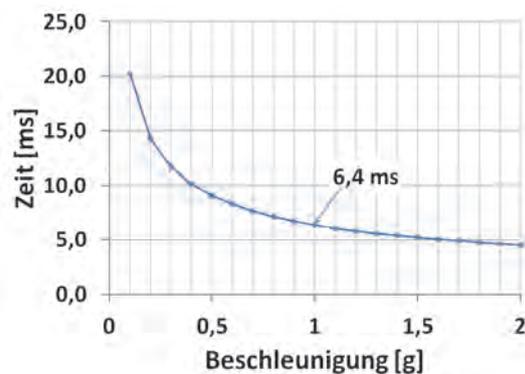


Bild 2-57: Zeit in ms über der Beschleunigung in g für das Zurücklegen einer Distanz von 200 μm .

In Bild 2-57 ist die Zeit t angegeben, die eine Kugel bei Anwendung einer gleichförmigen Beschleunigung a nach $s=1/2 \cdot a \cdot t^2$ benötigt, um eine Strecke von $s=200 \mu\text{m}$ zurückzulegen. Die Energieumsetzung in die Rotationsbewegung der Kugel und Reibungseffekte wurden nicht berücksichtigt. Bei einer Beschleunigung von $9,81 \text{ m/s}^2$ benötigt die Kugel eines Standard-Vibrationssensors demnach etwa 6,4 ms, um von einer Seite zur gegenüberliegenden Seite zu rollen. Damit ergeben sich aus der Reaktionszeit des Sensors für praktisch relevante Anwendungen in der Regel keine Einschränkungen.

2.12.2 Aufbauarten von Kugelschaltern, Stand der Technik

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, Vibrationssensoren auf Kugelbasis aufzubauen. Die Mehrzahl der technisch realisierten Sensoren besteht aus einer metallischen Kappe, an dessen Außenseite ein Kontaktstift geschweißt ist. Die Innenfläche der Metallkappe bildet eine sensorische Kontaktfläche. An die Außenseite der Metallkappe ist ein Kontaktstift geschweißt. In die Kappe wird eine Kugel eingebracht. Dieses Gebilde wird mit einer Bodenplatte verschlossen, in die ein zweiter Kontaktstift eingepresst ist. Der Stift ist elektrisch isoliert von der Kappe. Auf dem Stift kann ein flacher oder halbrunder Kopf angebracht sein, auf dem die Kugel liegt (Bild 2-58, Schnittbild rechts). Der Strompfad verläuft entlang der beiden Stifte, der Innenwand der Kappe und der Kugeloberfläche.

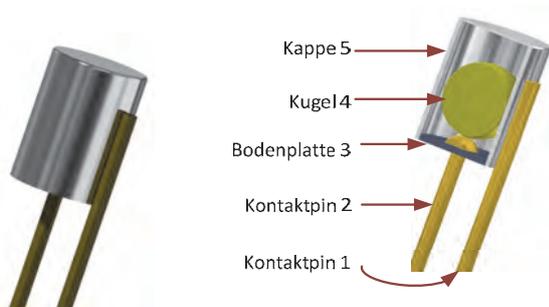


Bild 2-58: Bauform und Schnitt durch einen Becher-Kugelsensor

Eine andere Aufbauform von Kugelsensoren ist in Bild 2-59 dargestellt. Diese Sensoren bestehen aus zwei zylindrischen Endkappen (1,5), die auf eine zylindrische Hülse (2) gesetzt werden. Die Kappen weisen eine halbkugelförmige Vertiefung auf (Bild 2-60). Der Durchmesser dieser Vertiefungen ist geringfügig größer als die beiden Kugeln (3,4), die in das Innere des Sensors eingebracht sind. Die Kugeln werden im Ruhezustand durch die Schwerkraft aneinandergedrückt. Der elektrische Pfad über die beiden Kappen und die Kugeln ist somit geschlossen. Bei einer Vibration prallen die Kugeln gegeneinander und trennen sich kurzzeitig. Der Sensor wird hochohmig.

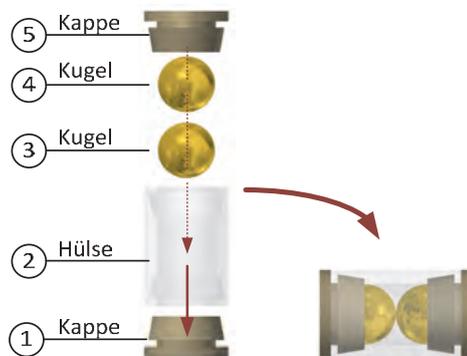
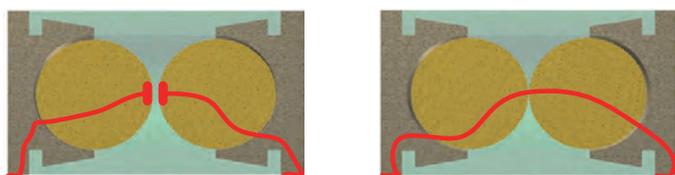


Bild 2-59: Aufbaumethode der Kugelschalter der Fa. SignalQuest



— Strompfad geöffnet

— Strompfad geschlossen

Bild 2-60: Funktionsweise des Kugelschalters der Firma SignalQuest (Chou, 2008)

Die Herstellung dieser Sensoren ist sehr aufwendig. Für jeden Sensor müssen fünf Einzelteile hergestellt und gehandhabt werden. Aufgrund der aufwendigen Handhabungsprozesse der Einzelteile ist der Sensor nur beschränkt miniaturisierbar. Bei einer Verkleinerung der Baugröße müssen alle Maschinen zur Herstellung der Halbzeuge umgestellt oder neu entwickelt und aufgebaut werden. Ferner geraten die Handhabungsautomaten für die Zusammensetzung der Einzelteile zum Sensor bei

einer Miniaturisierung an die Grenzen ihrer Funktionsfähigkeit. Deshalb sind diese Sensortypen nur wenig flexibel hinsichtlich der geometrischen Skalierbarkeit.

Neben der Produktion ist der Test sehr aufwendig. Entweder werden die Sensoren nach der Produktion nur stichprobenartig getestet, oder jeder Sensor muss einzeln geprüft werden. Auch dieser Prozess lässt sich nur mit einem hohen technischen und zeitlichen Aufwand realisieren.

Trotz der aufwendigen Verfahren werden Kugelsensoren dieser Bauart noch immer in großen Stückzahlen hergestellt und vertrieben. In Tabelle 2-13 wird eine Übersicht über verschiedene Kugelsensoren, deren Eigenschaften und Hersteller gegeben.

Hersteller	Bezeichnung	Typ	Baugröße [mm ³]	Durchmesser Kugel [mm]	Max. Strom [mA]	R _{on} [Ω]	Lebensdauer
Assemtch Int.	MS24	Becher	645	-	25	-	-
Assemtch Int.	ASL 5	Becher	298	-	250	10	-
Bai Ling	SW300 DA	Becher	158	2,5	20	10	100.000 Pulse
Bai Ling	BL-600	Zylinder	108	2,5	50	30	50.000 Stunden
SignalQuest	SQ-MIN-200	Zylinder	65	2	10	-	1.000.000 Pulse
SignalQuest	SQ-MIN-200	Zylinder	11,3	0,5	10	-	1.000.000 Pulse

Tabelle 2-13: Marktübersicht über einige Kugelsensoren und spezifischer Eigenschaften

Die Marktübersicht der Tabelle 2-13 zeigt, dass kommerziell verfügbaren Sensoren weder die Anforderungen an die Baugröße und an die Bauform erfüllen und auch nicht die erforderliche Lebensdauer aufweisen, die zur Entwicklung der Mikrovibrationssensoren in Leiterplattentechnik geführt haben.

2.13 Qualitätssicherung

Die Qualität eines Produktes kennzeichnet nach der EN ISO 9000:2005 das Maß, mit dem es den gestellten Anforderungen genügt. Die Anforderungen müssen an objektiv messbaren Merkmalen validiert werden. „Produktqualität“ ist ein sehr umfassender Begriff. Die minimalen Anforderungen, denen das Produkt genügen muss, werden durch den Hersteller garantiert und sind in der Regel im Datenblatt angegeben. Generell werden die Ansprüche aber vom Kunden oder Anwender gestellt. Daher können in besonderen Fällen die Spezifikationen auch erweitert werden.

Die Qualitätssicherung verfolgt mehrere Ziele. Eine wichtige Aufgabe besteht in der Qualitätskontrolle und Fehlervermeidung. Dabei können die Fehler oder potenzielle Fehlerquellen bereits während der Entwurfsphase in das Produkt eingebaut werden. Sie können aber auch aufgrund unzureichender Produktionsprozesse, der Verwendung minderwertiger Halbzeuge oder durch unsachgemäße Nutzung entstehen. Ganz abstrakt gesehen kann man qualitätssichernde Methoden in Maßnahmen zur Verbesserung der Produktentwicklung, des Produktionsprozesses und des Verhaltens im Feldeinsatz unterteilen, wie in Bild 2-61 dargestellt (Lanza, Blank, & Haefner, 2013). Generell gilt die Feststellung, dass Aufwand und Kosten steigen der Fehlerkorrektur steigen, je später der Fehler detektiert wird. Im schlimmsten Fall wird der Fehler erst durch den Kunden erkannt.

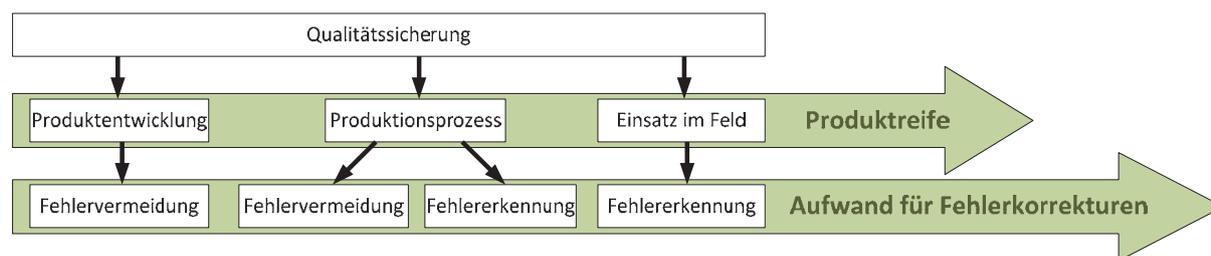


Bild 2-61: präventive und detektierende Qualitätssicherungsmaßnahmen

2.13.1 Der DMAIC-Prozess der Qualitätssicherung

Eine qualitativ hochwertige Arbeitsweise lassen sich die meisten Firmen durch die Zertifizierung nach der DIN ISO 9001:2008 bescheinigen. Ein Bestandteil der Zertifizierung ist die ständige Verbesserung aller Firmenprozesse. Hierfür werden systematische Methoden wie der DMAIC-Prozess (Define, Measure, Analyze, Improve, Control) verwendet. Für die einzelnen Phasen des DMAIC-Verfahrens werden verschiedene Werkzeuge und Methoden für eine systematische Bearbeitung vorgeschlagen (Lunau & al., 2012).

Die *Definitions-Phase* dient zur Beschreibung des Problems eines Prozesse und zur Festlegung der Anforderungen an einen Sollprozess. Sie erfolgt in Form eines Projektes, zu dessen Erarbeitung ein Budget und ein Team erforderlich sind.

In der *Measure-Phase* wird ermittelt, wie schwerwiegend das Problem eines Prozesses ist. Hierfür werden die Ausgabegröße des Prozesses messtechnisch erfasst (Lunau & al., 2012). Das Messobjekt und die Messgrößen, die Messinstrumente, die Methoden und die Entscheidungskriterien sind detailliert zu beschreiben. Die für den Prozess relevanten Ausgabegrößen werden in einer Messgrößenmatrix tabellarisch zusammengefasst und gemäß ihrer Prozessrelevanz bewertet.

Verkettete Prozesse, wie die chemische Abscheidung metallischer Schutzschichten auf Leiterplatten, können nicht getrennt voneinander durchgeführt werden. Daher sind in der Messgrößenmatrix inline erfassbare Messgrößen zu bevorzugen. Jede Offline-Messung, die außerhalb der Prozesskette stattfindet, beeinflusst den Gesamtprozess und kann die Messergebnisse beeinträchtigen.

Die *Analyze-Phase* versucht, die Schlüsselursachen des Problems zu identifizieren. In Ursache-Wirkungsdiagrammen, in Fehlerbaumdiagrammen oder in FMEA¹⁹-Tabellen werden Hypothesen für die Ursachen von Problemen formuliert, die systematisch mit Prozess- und Datenanalysewerkzeugen verifiziert werden. Nach dem der kausale Zusammenhang zwischen der Ursache und Wirkung theoretisch belegt ist, werden die Kernursachen durch Priorisierung aller Einzelursachen extrahiert. Diese werden in der Improve-Phase genauer betrachtet (Lunau & al., 2012).

Ein wesentliches Element der Analyse ist es, die Informationen dort zu sammeln, wo die Wertschöpfung stattfindet. Diese Methode ist als Gemba-Ansatz bekannt (Liker & Franz, 2011). In einer arbeitsteiligen Welt ist dies jedoch für Klein-Unternehmen oder Forschungseinrichtungen nicht immer realisierbar.

Die *Improve-Phase* beschäftigt sich mit der Erarbeitung von Lösungen für die Kernursachen des Problems. Die gefundenen Lösungsvorschläge werden mit schnell realisierbaren, zum Teil auch behelfsmäßigen Mitteln zunächst in kleinem Maßstab evaluiert. Damit die Wirkung des modifizierten Prozesses nachhaltig gesichert werden kann, sind bereits bei der provisorischen Änderung des Prozesses Überlegungen anzustellen, wie der Prozess langfristig überwacht und gesteuert werden kann. In der Improve-Phase sind gegebenenfalls die Prüfsequenz abzuändern und Teilprozesse genauer zu überwachen. Diese Maßnahme verhindert zwar nicht die Fehlproduktion, sie trägt jedoch durch frühzeitige Identifikation fehlerhafter Subkomponenten dazu bei, die Ausschusskosten zu reduzieren.

Die *Control-Phase* erfasst die Veränderungen und Verbesserungen nachhaltig. Die Erkenntnisse aus den provisorischen Versuchen der Improve-Phase werden hinsichtlich ihrer Wirkung und Implementierung optimiert. Die gewonnenen Erkenntnisse werden in den Wissensspeicher der Organisation (vergleiche Bild 2-1) eingepflegt. Die Nachhaltigkeit garantiert, dass die getroffenen Verbesserungen dauerhaft wirken. Hiervon sind nicht nur die technischen Prozesse betroffen, sondern auch das Verhalten der am Prozess mitwirkenden Mitarbeiter. Bei erfolgreicher und dauerhafter Wirkung der neuen Prozesse wird deren Steuerung fest in die Organisation integriert. Die Prozesskontrolle wird kontinuierlich aufrechterhalten und bei Bedarf wird der DMAIC-Zyklus erneut durchlaufen.

¹⁹ FMEA steht für Failure, Methods, Effects, Analysis

3 Integration mechanischer Funktionselemente in die Leiterplatte

Im Rahmen der Arbeit wurde eine neue Aufbautechnik geschaffen, die es ermöglicht, mechanische Komponenten als funktionale Elemente in die Leiterplatte zu integrieren. Die Funktionselemente können sich frei im Inneren der Leiterplatte bewegen. Damit wird es möglich, die entwickelten Methoden und Prozesse am Beispiel von Mikrovibrationssensoren in Leiterplattentechnik zu validieren.

In diesem Kapitel werden der Aufbau der sensorischen Grundzelle und davon abgeleitete Varianten wie der omnidirektional sensitive und der bewegungsgehemmte Sensor beschrieben. Die Weiterentwicklung der Aufbautechnik führt schließlich zum intelligenten Mikrovibrationssensor, der einen ungehäusten Siliziumchip und die mechanische Kugel in der Leiterplatte vereint. Nach der Beschreibung des Aufbaus der intelligenten Mikrovibrationssensoren werden die elektrischen Eigenschaften des Sensors sowie verschiedene Systemintegrationsmöglichkeiten vorgestellt.

3.1 Aufbau von Mikrovibrationssensoren in Leiterplattentechnik

Kapitel 2.12 beschreibt den grundlegenden Aufbau bisher bekannter Kugelschalter. Die meisten Sensoren sind sehr groß und nur als bedrahtetes Bauteil verfügbar. Sie können daher nicht automatisch als SMD-Komponente verarbeitet werden. Systemintegratoren können diese Bauteile ohne Spezialmaschinen kaum wirtschaftlich verarbeiten. Daher wurde ein sehr kleiner Kugelsensor entwickelt, der vollautomatisch mit den in der Elektronikbranche üblichen Pick- und Place Automaten bestückbar ist. Dieser neue Mikrovibrationssensor ist aufgrund seiner Aufbauart deutlich kleiner als Vergleichsprodukte und sein elektronischer Test ist zudem parallelisierbar. Eine positive Begleiterscheinung der geringen Baugröße ist die nicht mehr wahrnehmbare Geräuschentwicklung der Kugel²⁰.

Für die Herstellung eines Sensors mit diesen Eigenschaften wurde das herkömmliche Aufbaukonzept mit metallischen Bechern vollständig aufgegeben und eine *disruptive Lösung* in Plattenbauweise entwickelt. Durch die Verwendung einer Mikrokugel mit einem Durchmesser von 830 µm und die Einführung der Plattenbauweise konnte das Sensorvolumen z. B. um einen Faktor von 58 im Vergleich zu einem handelsüblichen Sensor der Firma Assemtech (ASSEMtech Europe Ltd, 1999) verkleinert werden.

3.1.1 Einseitig und omnidirektional empfindliche Mikrovibrationssensoren

Die grundlegenden Designüberlegungen zum Aufbau der Sensoren in Plattenbauweise ergaben sich aus dem Wunsch, eine einfache, parallelisierbare Aufbautechnik für den Sensor zu entwickeln. Hierfür bietet sich die Plattenbauweise an. Aus verschiedenen Konzepten (Bild 3-1) hat sich schließlich die in Leiterplattenvariante mit Isolationsringen als die geeignetste erwiesen. Die erste Variante, ein hybrider Aufbau aus Keramik- und strukturierten Kupferplatten, stellte sich als zu teuer und zu aufwendig in der Prozessführung heraus. Alternativ dazu wurden zwei Hauptrichtungen in Leiterplattentechnik untersucht. Die Aufbauvarianten, bei der die Bodenplatte mit einer Durchkontaktierung versehen wurde, mussten aufgrund technischer Probleme mit der Ebenheit der Kontaktflächen zurückgestellt.

²⁰ Bewegen sich Kugeln in Metallgehäusen, so ist ab einem Kugeldurchmesser von 2 mm mit einer vom Menschen wahrnehmbaren Geräuschentwicklung zu rechnen. Dies hat zu Reklamationen der Geräte geführt, in denen derartige Sensoren verbaut wurden.

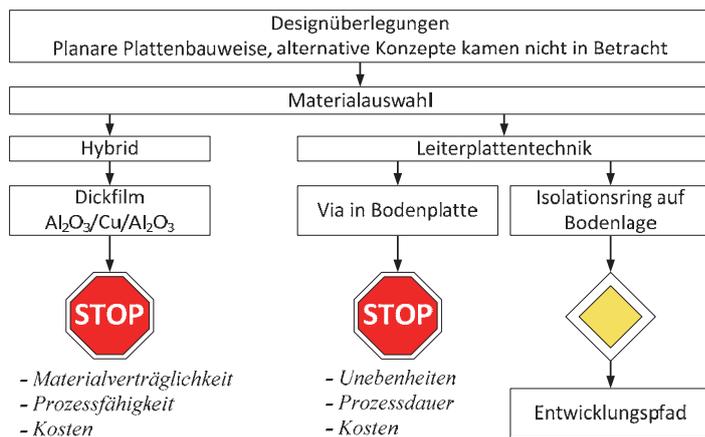


Bild 3-1: Designüberlegungen für planare Sensorkonzepte

Das letztlich umgesetzte Aufbaukonzept für die Mikro vibrationssensoren in Plattenbauweise ist in Bild 3-2 dargestellt. Der Sensor besteht aus drei strukturierten Funktionsplatten (1, 3, 5), die über zwei Klebeschichten (2a, 2b) miteinander verbunden sind. Die Funktionsplatten umfassen die Bodenplatte (1), die Kammerplatte (3) sowie die Deckelplatte (5). In der Mitte der Bodenlage befindet sich eine kreisrunde Kontaktfläche, das Bodenpad. Es bildet einen feststehenden Sensorkontakt. Dieser wird über eine metallische Umverdrahtung zur Außenseite des Sensorgehäuses geführt. Dort mündet die Umverdrahtung in die Durchkontaktierung (6b), mit der das elektrische Signal schließlich auf das Anschlusspad (7b) der Unterseite geführt wird. In die Kammerlage (3) wird konzentrisch zum Bodenpad eine Bohrung eingebracht, dessen Außenwände metallisiert sind. Sie bildet die zweite, feststehende Sensorfläche. Auch dieser Kontakt wird über eine Umverdrahtung zu einer weiteren Durchkontaktierung (6a) und schließlich auf das äußere Anschlusspad (7a) geführt. In die Kammer wird eine Kugel (4) eingebracht. Der Kugeldurchmesser ist etwa 20 % kleiner als der Durchmesser der Bohrung, wodurch sich die Kugel in der Kammer bewegen kann. Ihre Oberfläche bildet den dritten, beweglichen Sensorkontakt. Die Kugel kann den elektrischen Strompfad zwischen den beiden äußeren Anschlussflächen (7a, 7b) und den innenliegenden sensorischen Flächen schließen.

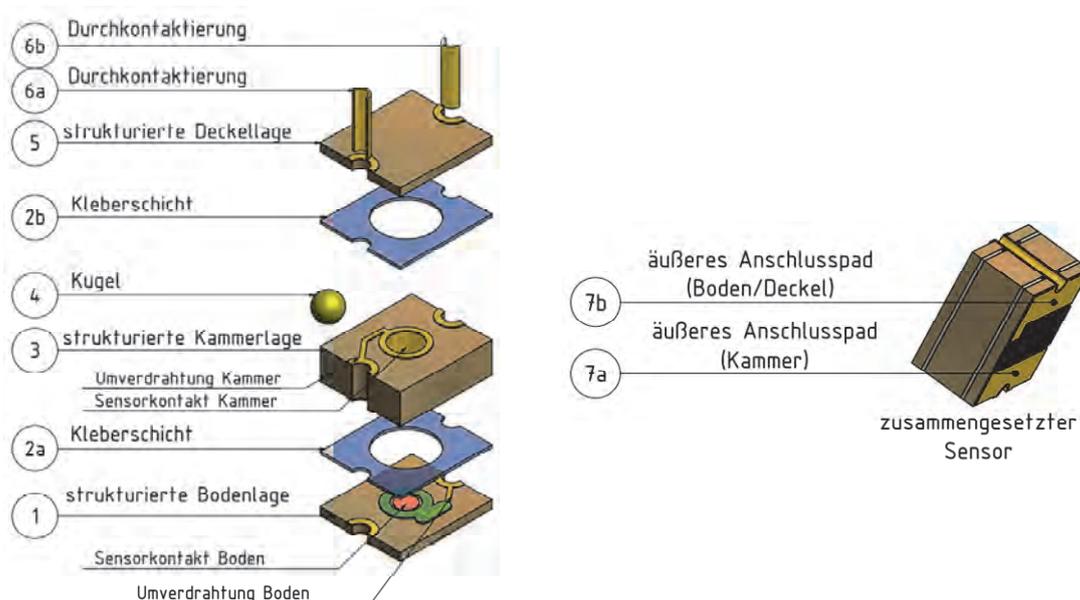


Bild 3-2: Explosionszeichnung eines Mikro vibrationsschalters in Plattenbauweise. Im linken Teil des Bildes sind die einzelnen Teile des Sensors in einer Explosionszeichnung dargestellt, rechts ist der zusammengesetzte Sensor zu sehen.

Abhängig von der Gestaltung des Deckels kann ein Sensor aufgebaut werden, der ein asymmetrisches Sensorverhalten zeigt. Fehlt der sensorische Kontakt im Deckel, liegt ein einseitig sensitiver Sensor vor. Er ist unempfindlich gegen mechanische Anregungen, wenn der Deckel zur Erdoberfläche zeigt.

Wird der Sensor hingegen um 180° gedreht und die Bodenplatte zeigt zur Erde, so reagiert der Sensor sehr empfindlich auf mechanische Anregungen.

Einen omnidirektional sensitiven Sensor erhält man, indem die Deckkellage spiegelsymmetrisch zur Bodenplatte aufgebaut wird. Der Deckel besitzt dann ebenfalls eine sensorische Fläche, die an die gleiche äußere Anschlussfläche (7b) wie die sensorische Fläche des Bodens angeschlossen wird. In dieser Aufbauvariante reagiert der Sensor weitgehend unabhängig von seiner Orientierung im Raum auf Beschleunigungsimpulse.

3.1.2 Bewegungsgehemmte Mikrovibrationssensoren

Mikrovibrationssensoren sprechen je nach Einbaulage extrem empfindlich auf Vibrationen an. Die Ansprechschwelle liegt bei etwa $0,5 \text{ m/s}^2$ (vergleiche Kapitel 3.1.3). In vielen Anwendungen ist diese geringe Ansprechschwelle erwünscht. Hierzu zählen beispielsweise Diebstahlsschutzsysteme, die an hochwertigen Elektrogeräten (Kameras) oder teuren Parfümflakons angebracht werden. In anderen Anwendungen wie Freisprechanlagen für Kraftfahrzeuge sind oft weniger sensitive Sensoren gefragt, um damit die Zahl der Fehlaktivierungen gering zu halten.

Die niedrige Ansprechschwelle der Standard-Mikrovibrationssensoren leitet sich aus ihrer Aufbauform ab. Die Kugel kann ungehemmt auf der leicht rauen Oberfläche des Bodenkontaktes rollen (Bild 2-54). Sie verändert bereits bei leichten Erschütterungen ihre Position, wodurch der Strompfad geöffnet oder geschlossen wird.

Bringt man in die Mitte der Bodenfläche eine Vertiefung ein, so nimmt die Kugel in Ruhe eine stabile Vorzugslage ein (Bild 3-3). Der Sensor ist bevorzugt hochohmig. Besonders einfach lassen sich die sensorischen Flächen des Bodens und Deckels als Scheibe („Donut“) ausbilden (Blank & et. al., 2012). In waagerechter Einbaulage wird die Empfindlichkeit durch diese einfache Maßnahme erheblich reduziert. Während die Kugel bei einer ideal glatten Oberfläche lediglich durch die Rollreibung an der Bewegung gehindert wird, muss die Kugel bei einem „Donut“-Sensor erst aus der Vertiefung gehoben werden (Bild 3-4). Die hierfür erforderliche Haltekraft $F_h = F_{g_Kugel} \cdot \sin(\alpha)$ liegt erheblich über der Rollreibung $F_{rr} = \mu_{rr} \cdot F_g$ eines Standard-Mikrovibrationssensors.

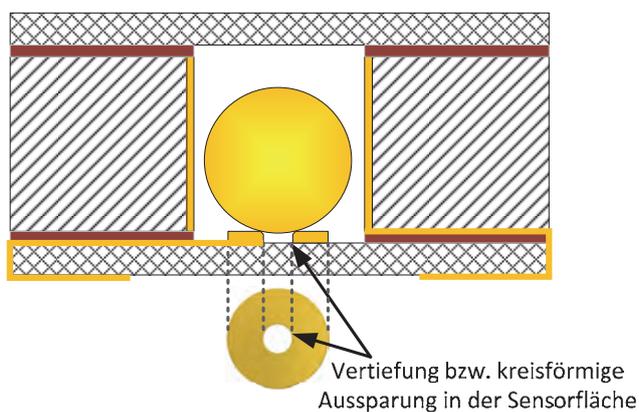


Bild 3-3: Schematische Darstellung eines „Donut“-Sensors

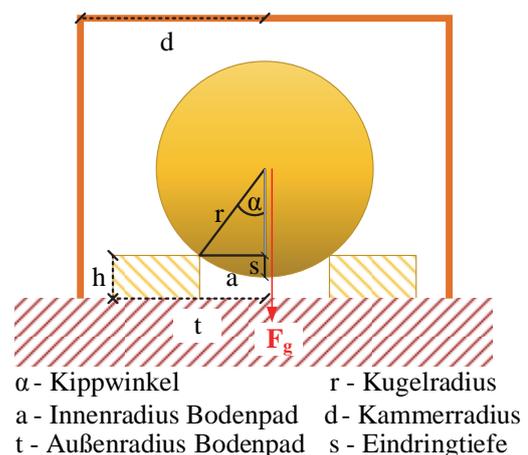


Bild 3-4: Darstellung des Kippwinkels eines „Donut“-Sensors

Wird der Sensor aus der horizontalen Lage um einen maximalen Kippwinkel geneigt, verlässt die Kugel die Vertiefung. Er verhält er sich wie ein normaler Vibrationssensor. Ein Sensor mit einer $20 \mu\text{m}$ starken Metallisierung auf der Bodenplatte und einer Aussparung mit einem Durchmesser von $150 \mu\text{m}$ kann beispielsweise maximal um 10° gekippt werden. Mit einer Reibungszahl von $0,002^{21}$

²¹ Für die Reibungszahl wurden typische Werte von Stahl auf Stahl herangezogen. Die Werte sind beispielsweise unter: <http://www.forum-sondermaschinenbau.de/seiten/Reibungszahlen.htm> nachzulesen.

erhöht sich die zur Bewegung der Kugel erforderlichen Kraft eines „Donut“-Sensors im Vergleich zu einem Standard-Sensor etwa um das 88-fache. Reale Werte liegen darunter, da die Oberflächenrauheit des Standardsensors die Kugelbewegung ebenfalls behindert. Modelliert man die Oberflächenrauheit in gleicher Weise wie beim „Donut“-Sensor, so erhält man (Anhang A.6) das Verhältnis η der Kräfte, welche die Kugel eines „Donut“-Sensor im Vergleich zu einem Standardsensors in Bewegung versetzen, aus dem Verhältnis der Summe der Haltekraft F_{hS} eines Standardsensors und seiner Rollreibung F_{r} zur Summe der Haltekraft F_{hD} und Rollreibung F_{r} des „Donut“-Sensors.

$$\eta = \frac{F_{hD} + F_{r} + F_{hS}}{F_{hS} + F_{r}} = \frac{\sin(\alpha_D) \cdot F_g + \mu_r \cdot F_g + \sin(\alpha_S) \cdot F_g}{\sin(\alpha_S) \cdot F_g + \mu_r \cdot F_g} \quad (3.1)$$

In Gleichung steht α_D für den Kippwinkel des Donutsensors, α_S für den Kippwinkel des Standardsensors auf der rauen Oberfläche. In Bild 3-6 ist η über dem Haltewinkel α_D grafisch aufgetragen. Die Rautiefe der Sensoroberfläche wurde mit $Ra=1,5 \mu m$ angenommen.

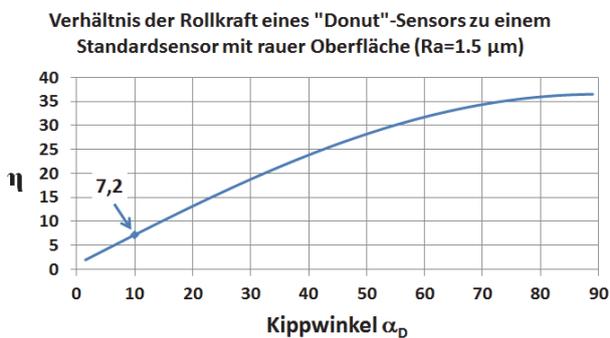


Bild 3-5: Verhältnis der Rollkraft eines "Donut"-Sensors zu einem Standardsensor. Als mittlere Rautiefe Ra wurde ein Wert von $1.5 \mu m$ angenommen.

Aus der Grafik kann man entnehmen, dass für „Donut“-Sensoren mit einem Kippwinkel von $\alpha_D=10^\circ$ etwa eine 7,2 mal so hohe Beschleunigung für die Bewegung der Kugel erforderlich ist wie beim Standardsensor mit rauer Oberfläche.

Mit dieser Technologie können Sensoren mit gleich bleibenden Außenabmessungen aufgebaut werden, sofern deren maximaler Kippwinkel 25° nicht überschreitet. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Kupferschichtdicke angepasst werden muss. Die mathematische Herleitung zur Ermittlung des maximalen Kippwinkels unter Berücksichtigung der Nebenbedingungen (Toleranzen, Schichtdicken, etc.) sind im Anhang A.6 nachzuschlagen. Im Rahmen dieser Arbeit sind erste Prototypen mit einem Kippwinkel von 10° realisiert worden.

3.1.3 SCiBO - Hochintegrierte, intelligente Mikrovibrations-Sensorsysteme

Der mechanische Mikrovibrationssensor wandelt Bewegungen in elektrisch verarbeitbare Informationen um. In vielen Anwendungen, in denen der Mikrovibrationssensor verwendet wird, werten kleine Mikrocontroller das Bewegungssignal und andere Informationen aus und steuern die Systemfunktionalität. In batteriebetriebenen Fahrradrücklichtern werden beispielsweise neben der Bewegung auch Lichtsensoren ausgewertet, sodass die Lampe nur bei Dunkelheit und Bewegung aktiviert wird.

Besonders kompakte und intelligente Mikrovibrationssensoren können aufgebaut werden, indem der Mikrocontroller als ungehäuseter, dünner Siliziumchip in die Boden- oder Deckelplatte des Mikrovibrationssensors eingebracht wird.

Seit dem Jahr 1994 sind Verfahren zur formschlüssigen Einbettung dünner Chips in die Leiterplatte bekannt (Wojnarowski & et al., 1994). Prozessbedingt müssen die Chips vollständig vom Harz des Prepregs umgeben werden. Deswegen ist ihre Höhe auf $100-200 \mu m$ begrenzt (Manassis & et al., 2007). Nach der Verpressung werden die Kontaktpads des Chips mit einem Röntgensystem registriert und mit einem Laser freigelegt. In anschließenden Galvanikprozessen wird der Chip elektrisch an die Kupferlage der äußeren Leiterplatte angebunden (Aschbrenner & et al., 2004). Die Prozesstechnik

erlaubt die Herstellung kompakter Systeme für dünne Chips. Dieses Verfahren ist sehr aufwendig und derzeit allenfalls für elektronische Systeme geeignet, die in Großserie hergestellt werden.

Eine Alternative zu dieser Technologie stellt die in dieser Arbeit entwickelte Aufbautechnologie zur Herstellung intelligenter Mikrovibrationssensoren dar. Hierbei wird die Grundplatte des ursprünglichen Mikrovibrationssensors in eine zweiteilige Chip-Bodengruppe überführt (Bild 3-6). Dabei befinden sich die äußeren Anschlusskontakte (nicht dargestellt) sowie die elektrischen Anschlussflächen für den Chip (4) auf der Chip-Trägerplatte (5). Auf die Chip-Trägerplatte wird eine Kernplatte (2) mithilfe eines Klebefilmes (3) auflaminiert. Sowohl in der Kernplatte als auch in dem Klebefilm ist eine Kavität eingebracht, in welche der Chip (1) eingebracht wird. Die Klebeschicht und die Kernplatte sind zusammengenommen etwas höher als der Chip.



Bild 3-6: Aufbau der Bodenplatte eines intelligenten Mikrovibrationssensors

Auf diese neue Bodengruppe wird die ursprüngliche funktionelle Komponente des Mikrovibrationsschalters mit dem mikromechanischen Sensorelement laminiert. Der prinzipielle Aufbau der Teilkomponenten des Mikrovibrationssensors (1), der Chipträgerplatte (2) und der zusammengesetzte Sensor sind in Bild 3-7 dargestellt. Der Sensor ist als BGA²²-Komponente ausgelegt, das heißt, auf der Unterseite des Bauteils befinden sich Lotdepots in Kugelform (5). Der Chip ist über entsprechende Leiterzüge an die Durchkontaktierungen (6) in den Ecken mit der Sensorzelle (1) verbunden.

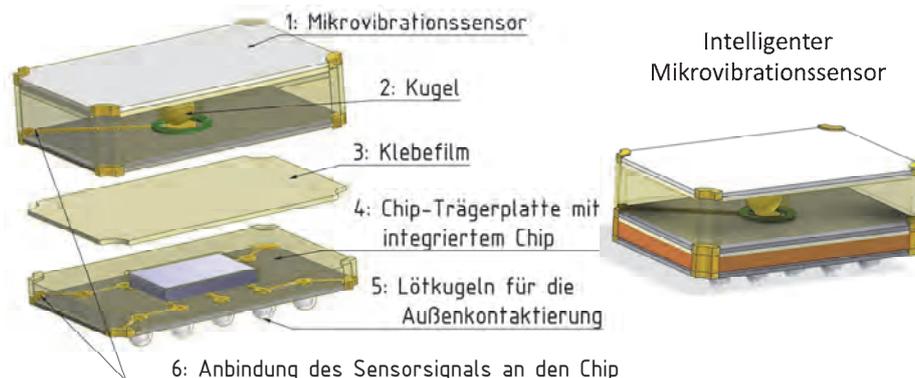


Bild 3-7: Aufbaumethode zur Herstellung intelligenter Mikrovibrationssensoren

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte und patentrechtlich angemeldete Technologie (Blank & et al., 2012c) bietet einige Vorzüge gegenüber der im Projekt *hermes* entwickelten Verfahren. Diese sind:

- Flexibilität bei der Einbettung dickerer Chips oder Bauteile wie diskrete Kondensatoren
- Preiswerte und leicht verfügbare Technologie
- Geeignet auch für den Aufbau kleinerer Stückzahlen
- Hohe Prozesssicherheit

²² BGA steht für Ball Grid Array

In Bild 3-8 ist ein vollständig aufgebauter intelligenter Mikrovibrationssensor (oben) im Vergleich zu einem rein mechanischen Mikrovibrationssensor ohne Intelligenz dargestellt. Er ist nur unwesentlich größer, verfügt dabei aber über acht Anschlüsse zur Steuerung des Systems.

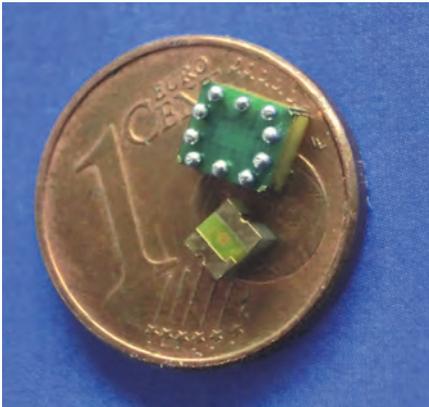


Bild 3-8: Intelligenter und herkömmlicher Mikrovibrationssensor (unten)

3.2 Sensorische Eigenschaften von Mikrovibrationssensoren

Der Mikrovibrationssensor wandelt eine mechanische Anregung in elektrische Größen um. Die wichtigsten sensorischen Eigenschaften sind

- die Ansprechschwelle, ab welcher der Sensor eine mechanische Anregung detektiert,
- der Widerstand des Sensors im geschlossenen und geöffneten Schalterzustand,
- die Stromtragfähigkeit des Sensors,
- und die maximale erfassbare Frequenz der Anregung.

3.2.1 Empfindlichkeit des Sensors

Die Empfindlichkeit des Mikrovibrationssensors wird definiert als Anzahl der Schaltimpulse pro Sekunde infolge einer vorgegebenen mechanischen Anregung. Ein Schaltimpuls des Sensors ist per Definition durch die Widerstandsänderung von einem Wert über 206 Ohm auf unter 16 Ohm gekennzeichnet. Die Widerstandsgrenzwerte ergeben sich aus der Beschaltung der asymmetrischen Schmitt-Trigger-Schaltung, die im Testplatz „*ELFuTe*“ (Kapitel 5.7.3) zur elektrischen Charakterisierung genutzt wird. Bei der vorgegebenen mechanischen Anregung handelt es sich um die Rotation des Sensors um eine durch die Kammerbohrung weisende Achse. Die Achse ist leicht gegen die Erdoberfläche geneigt und ihre Rotationsfrequenz beträgt 0,125 Hz (Kapitel 5.7.3). Empfindliche Sensoren geben etwa 60-100 Pulse, schwächere Sensoren weniger als 30 Impulse pro Sekunde ab.

3.2.2 Ansprechschwelle von Mikrovibrationssensoren

Die experimentelle Ermittlung der Ansprechschwelle des Mikrovibrationssensors erfolgt mithilfe einer Versuchseinrichtung, bei der ein Mikrovibrationssensor und ein hochempfindlicher Beschleunigungssensor auf eine 5 cm lange, 1,5 cm breite und 1,6 cm starke Leiterplatte montiert werden (Bild 3-9, links). Der Beschleunigungssensor hat eine Empfindlichkeit von 500 mV/mg bei einer Offsetspannung von drei Volt. Die elektrischen Ausgangssignale beider Sensoren wurden nach leichter Anregung aufgenommen. In dieser Anordnung spricht der Mikrovibrationssensor bei einer Anregung von etwa 20 mg an (Bild 3-9, rechts).

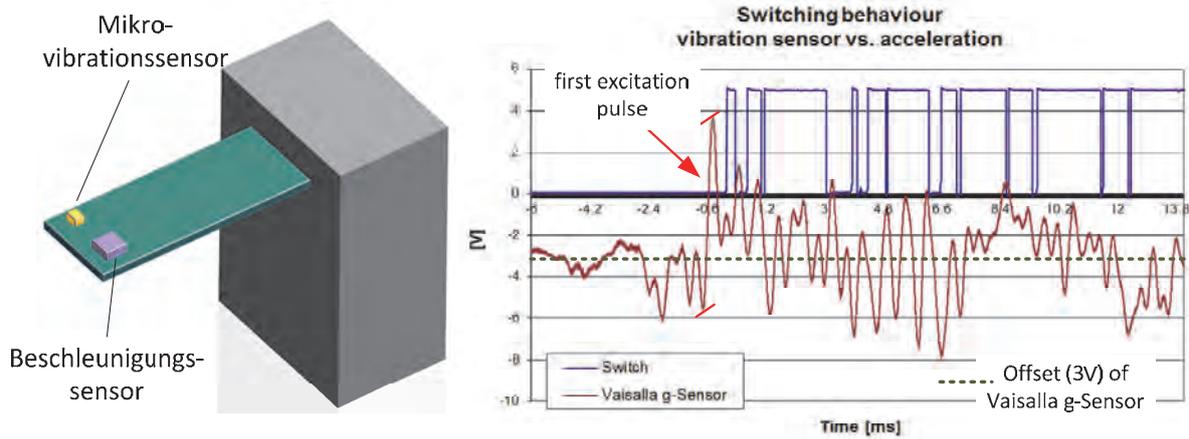


Bild 3-9: Ermittlung der Empfindlichkeit von Mikro vibrationssensoren

Die Ansprechschwelle ist von der Einbaulage und den oberflächenabhängigen Kontakteigenschaften des Sensorexemplars abhängig. Daher dient die Angabe von 20 mg lediglich zur Orientierung. Die minimale Ansprechschwelle für den Mikro vibrationssensor wird daher im Datenblatt der Firma Sensolute mit „etwa 50 mg“ beziffert (Sensolute GmbH, 2013).

Das Schaltsignal des in Bild 3-9 dargestellten Sensors ist nahezu binär. Entweder ist der Sensor kurzgeschlossen oder geöffnet. Bei einer Kontamination der sensorischen Oberflächen kann die Ansprechschwelle jedoch spannungsabhängig sein, der Sensor frittet (Kapitel 2.6.2, Kapitel 6.4.2, Bild 6-13). Kontaminierte Oberflächen können das Fritten des Schalters bewirken. Sie können aber auch zu Schalterzuständen führen, bei denen der Sensor jeden beliebigen Widerstandswert zwischen 0 Ohm und ∞ Ohm einnimmt (Bild 3-14). Dadurch wird die Empfindlichkeit des Sensors ebenfalls herabgesetzt.

Sieht man von den Fehlerfällen ab, so sprechen die Mikro vibrationssensoren bereits bei sehr niedrigen Erschütterungen an. Die Empfindlichkeit eines Standard-Sensors im Vergleich zu einem Donut-Sensor ist in den Bildern 3-10 und 3-11 dargestellt. Beide Sensoren liegen bei dieser Prüfung waagrecht auf einer definierten Prüfplatte und werden durch den Aufschlag eines Prüfkörpers mit einer Masse von 100 Gramm aus einer Höhe von 5 cm mehrfach angeregt. Während der Standardsensor direkt auf die Impulse reagiert, gibt der Donut-Sensor nur wenig Pulse ab. Die Verminderung der Ansprechschwelle aufgrund der Vertiefung ist unmittelbar aus der Vergleichsmessung ersichtlich.

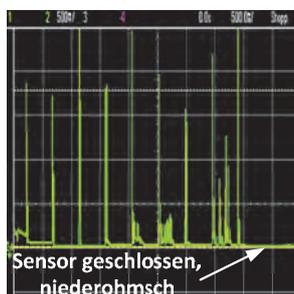


Bild 3-10: Sensorsignal eines „Standard-Sensors“ bei leichter Anregung

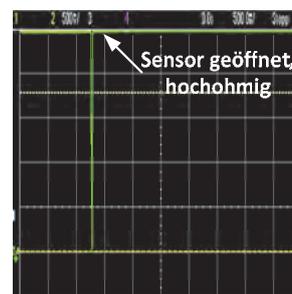


Bild 3-11: Sensorsignal eines „Donut-Sensors“ bei leichter Anregung

3.2.3 Sensorverhalten bei oszillierender, mechanischer Anregung

Wird der Mikro vibrationssensor oszillierend angeregt, beginnt die Kugel ab einer Anregungsfrequenz von etwa 20 Hz entlang Kammerwand zu laufen. Sie gibt keine Schaltimpulse mehr ab. Die Anregungsfrequenz ist abhängig von der Qualität der Oberflächen. Bei sehr glatten sensorischen Oberflächen ist eine Verringerung der Sensitivität bereits ab Frequenzen oberhalb von 10 Hz

erkennbar. Für die experimentelle Ermittlung der Grenzfrequenzen wurde die Testeinrichtung zur Charakterisierung der mechanischen Belastbarkeit der Sensoren verwendet (Kapitel 5.8).

Dies bedeutet für praktische Anwendung, dass der Sensor nur bedingt in Systemen eingesetzt werden kann, die periodisch angeregt werden. Zu diesen zählen beispielsweise Betriebsstundenzähler für große, industrielle Druckluftkompressoren.

3.2.4 Stromtragfähigkeit

Die Stromtragfähigkeit für Leiterplatten wird als maximale Stromstärke definiert, die von einem elektrischen Leiter kontinuierlich getragen werden kann, ohne dass eine nachhaltige Änderung der elektrischen oder mechanischen Eigenschaften des Leiterzuges zu beobachten ist (IPC-2152, 2009).

Überschreitet die Stromstärke einen vorgegebenen Grenzwert, können sich infolge der hohen Temperatur Fremdschichten auf den Kontaktflächen bilden, welche die elektrischen Eigenschaften beeinflussen. Bei Leiterplatten kann beispielsweise das Basismaterial verkohlen.

Die maximale Stromtragfähigkeit des Sensors wurde auf 2 mA begrenzt. Dieser Wert basiert auf Literaturangaben (Brümmer, 1980) und hat sich in der Praxis bewährt. Eine höhere Stromtragfähigkeit ist für die Wandlung des Bewegungssignals in ein elektrisches Signal nicht erforderlich. Im realen Betrieb kann der Sensor mit über 2 A bestromt werden. Der Spannungsabfall beträgt dann knapp ein Volt. Kurzzeitig sind keine Änderungen der elektrischen Eigenschaften des Sensors zu beobachten. Die hohe Wärmeentwicklung zieht allerdings die Verkokung des Leiterplattengehäuses nach sich, wie in Bild 3-12 dargestellt.

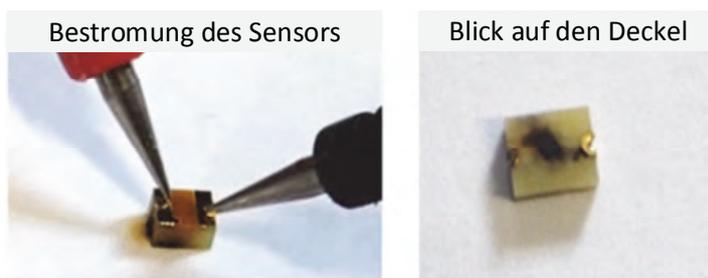


Bild 3-12: Bestromung eines Mikrovibrationssensors mit zwei Ampere

In Tabelle 3-1 sind einige charakteristische Daten und Eigenschaften verschiedener Belastungsbereiche für schaltende Kontakte aufgeführt.

Belastungsbereich	Richtwerte für Spannung/Strom	Kontakteigenschaften
Trocken schaltende Kontakte $U < U_E^{23}$	$U < 100 \text{ mV};$ $I < 10 \text{ } \mu\text{A}$	Keine Neigung zur Fremdschichtbildung
Geringer Belastungspegel der Schaltkontakte $U_E < U < U_L$	$100 \text{ mV} < U < 600 \text{ mV}$ $I < 10 \text{ mA}$	Keine Neigung zur Fremdschichtbildung
Zwischenbereich, Auftreten kleiner Lichtbögen $U_S < U < U_L$	$0,6 \text{ V} < U < 10 \text{ V}$ $I < 300 \text{ mA}$	Applikationsspezifisch: geringe Fremdschichtbildung, Abbrand, Materialwanderung
Starkstrom, niedriger Leistung, stabile Lichtbögen. Selbst-verlöschung des Lichtbogens in AC-Anwendungen	$10 \text{ V} < U < 300 \text{ V}$ $0,3 \text{ A} < I < 50 \text{ A}$	Geringer Abbrand, geringe Schweißneigung und Materialtransport

Tabelle 3-1: Stromtragfähigkeit elektrischer Kontakte (Brümmer, 1980)

²³ U_E steht für die Entfestigungsspannung, U_S für die Schmelzspannung, U_L für die Lichtbogenanspannung

3.3 Elektronische Betriebsstrategien für Mikrovibrationssensoren

Die Sensorzelle des Mikrovibrationssensors wandelt eine mechanische Anregung in eine elektrische Widerstandsänderung um. Dazu ist es jedoch erforderlich, den Sensor in ein Sensorsystem zu integrieren. Eine der Grundaufgabe des Sensorsystems ist die Versorgung der Messzelle mit elektrischer Energie. Ferner passt das Sensorsystem die physikalischen Signale der Sensorausgangsstufe an die Eingangsstufe des Gesamtsystems an.

3.3.1 Sensorsysteme mit Mikrovibrationssensoren

Ein ideal schaltender Mikrovibrationssensor lässt sich sehr einfach in ein Sensorsystem integrieren. Der Sensor MVS1 wird über einen Vorwiderstand R1 mit elektrischer Energie versorgt (Bild 3-13). Gleichzeitig wird das Widerstandssignal in ein Spannungssignal überführt. Das Spannungssignal zwischen dem Vorwiderstand und dem Vibrationssensor kann direkt von einem nachfolgenden System verarbeitet werden.

Der Energieverbrauch wird durch die Verwendung hochohmiger Vorwiderstände im Bereich zwischen 10 und 30 Megaohm minimiert. Das Sensorsignal kann in diesem Fall allerdings nicht mehr genutzt werden, um große Lasten zu treiben. Es kann jedoch einen Schalttransistor ansteuern, über den eine Leistungsverstärkung erfolgt.

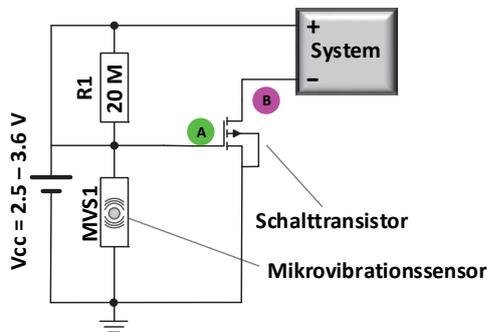


Bild 3-13: Schaltbild eines Mikrovibrationssensorsystems mit Mosfet

Die in Bild 3-13 dargestellte Auswerteschaltung ist aus verschiedenen Gründen nur unzureichend geeignet, ein reales technisches System bei Bewegung zu aktivieren oder deaktivieren. Diese sind:

Unzuverlässige Öffner- und Schließfunktion einzelner Sensorexemplare. Bei diesen Sensorexemplaren kann sich die Ausgangsspannung des Sensorsystems am Punkt A (grüne Oszilloskopkurve in Bild 3-14)

- auf einen Wert zwischen 785 mV und 865 mV einstellen. In diesem Spannungsbereich arbeitet der genutzte Mosfet im linearen Bereich und schaltet nicht sauber durch (Signal B).
- Das Sensorprellen (Bild 3-10) verhindert einen kontinuierlichen Betrieb des Gesamtsystems. Es wird permanent aktiviert bzw. deaktiviert.
- Ein statischer hoch- oder niederohmiger Zustand des Sensors führt zu einem statischen Schaltzustand des Systems. Im ungünstigen Fall bleibt das System auch in Ruhe aktiviert oder deaktiviert.



Bild 3-14: Steuer- und Ausgangssignal eines Mikrovibrationssensorsystems mit Mosfet

3.3.2 Intelligente Mikrovibrationssensorysysteme

Das in Bild 3-13 dargestellte Sensorsystem kann verbessert werden, indem das Sensorsignal durch ein passives RC-Filter gedämpft wird. Die Tiefpassschaltung entschärft das Sensorprellen und ermöglicht ein zeitverzögertes Ein- und Ausschalten. Das gefilterte Signal wird mithilfe eines Logikbausteins mit Schmitt-Triggereingängen zur Ansteuerung des Lasttransistors digitalisiert. Der Mosfet kann somit nicht mehr im linearen Bereich betrieben werden. Besonders geeignete Logikbausteine sind retriggerbare, monostabile Multivibratoren (Bild 3-15). Die Eingänge des Multivibrators SN74LVC1G123 reagieren zudem flankengesteuert, d.h. statische Zustände am den Eingängen des Bausteins führen nicht zu einer Änderung des Ausgangssignals. Eine dauerhafte Aktivierung oder Deaktivierung des Systems ist bei einem statischen Sensorzustand nicht möglich. Die Nachlaufzeit wird über die externen Komponenten C_{ext} und R_{ext} eingestellt. Über den Ausgang des Multivibrators (Q) wird die Versorgungsspannung des Systems zu- oder abgeschaltet. Dieses Auswertekonzept wurde patentrechtlich geschützt (Blank & et al., 2005).

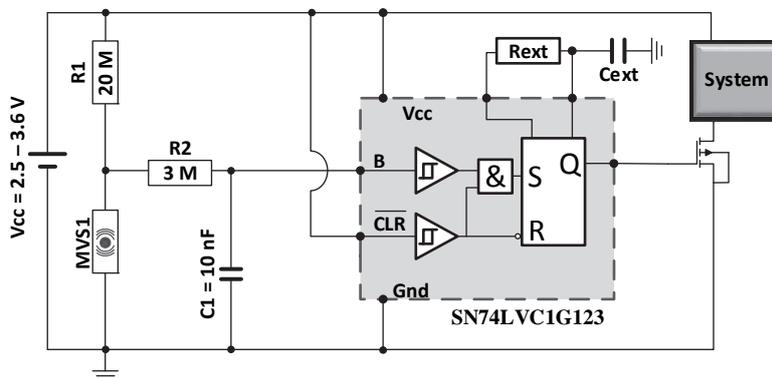


Bild 3-15: Mikrovibrationssensorysystem mit retriggerbarem Multivibrator

Neben der Signalkonditionierung mit Logikbausteinen bietet sich die Auswertung durch Mikrocontroller an. Sie sind nur unwesentlich teurer als die Logikbausteine, erlauben aber deutlich flexiblere und leistungsfähigere Signalbearbeitungsmethoden. Für den Aufbau eines intelligenten Mikrovibrationssensorysystems wurde der Mikrocontroller PIC12LF1822 der Firma Microchip® ausgewählt.

Die Beschaltung des Controllers ist einfach. Es müssen lediglich die Versorgungsspannung, der Mikrovibrationssensor und der Schalttransistor angeschlossen werden. Das erforderliche Taktsignal erzeugt sich der Controller mithilfe eines internen RC-Oszillators selbst. Die Taktfrequenzen reichen von 31 kHz bis 16 Mhz und erlauben auch die Implementierung adaptiver digitaler Filter. Sie ermöglichen die Adaption der Empfindlichkeit des Sensorysystems an die Sensoreigenschaften und die Programmierung der Nachlaufzeit des Systems.

In Bild 3-16 ist der Systemaufbau schematisch dargestellt. Die Versorgungsspannung wird an den Prozessor und über den Vorwiderstand R1 an den Mikrovibrationssensor MVS1 geleitet. Das Spannungssignal des Sensors wird auf den Pin 2 (RA5) und alternativ auf den Pin 3 gelegt. Der Pin 2 ist mit dem Timer/Counter1 verbunden, mit dem die Pulse des Sensors gezählt werden. Bei einer vorgegebenen Anzahl an Pulsen wird ein Interrupt ausgelöst und der Mikrocontroller verlässt den Schlafmodus. Der Stromverbrauch steigt in diesem Betriebsmodus auf etwa 2 μ A. Das Gesamtsystem wird über den Transistor T1 (Pin 5, RA2) aktiviert. Mit dem Timer T0 kann die Nachlaufzeit des Systems auf einen definierten Wert eingestellt werden. Nach Ablauf des Timers0 wird das System wieder in den Ruhezustand versetzt.

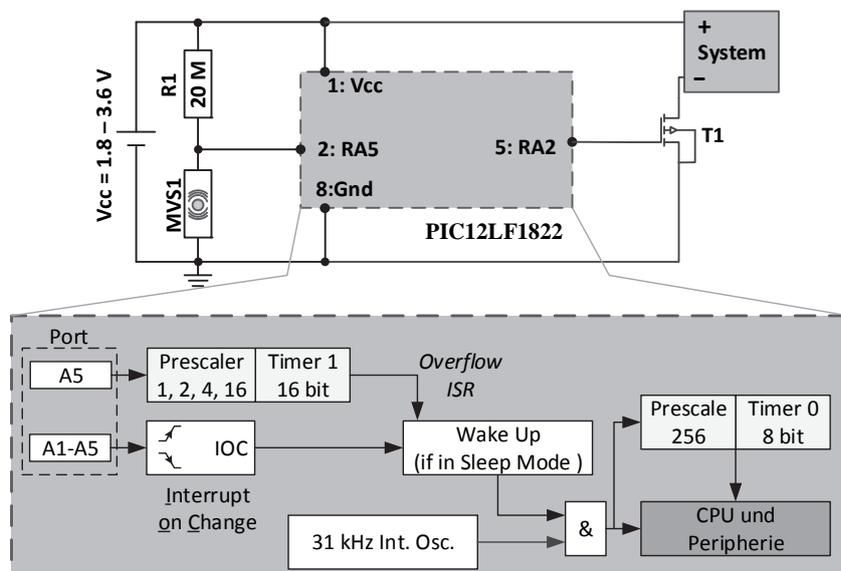


Bild 3-16: Mikrovibrations-sensorsystem mit einem PIC12LF1822-Mikrocontroller

Die Vielzahl an Möglichkeiten, applikationsspezifische Systemeigenschaften durch Verwendung eines Mikrocontrollers einzustellen, ist enorm. Im einfachsten Fall der Auswertung kann man auf den Timer1 ganz verzichten. Stattdessen wird der Prozessor aus dem Schlafzustand geholt, wenn eine Zustandsänderung an einem Eingang erkannt wurde (Interrupt On Change). Der Eingang reagiert in diesem Modus flankengesteuert. Statische Zustände am Eingang führen nicht zur Aktivierung des Systems. Die Leistungsaufnahme des Mikrocontrollers ist in diesem Betriebszustand minimal.

Für die Signalauswertung wurde ein adaptiver Filter unter Verwendung der beiden Timer/Counter entwickelt und für Testzwecke implementiert. Der Filter wird im Anhang A.7 vorgestellt. Mit diesem Filter passen sich die Ansprechschwelle und die Nachlaufzeit automatisch an die Empfindlichkeit des Sensors an.

Durch die intelligente Signalauswertung lassen sich auch Sensoren mit einer breiten Streuung der elektrischen Eigenschaften in einem System integrieren und vermarkten. Dies ist insbesondere in der ersten Markteinführungsphase der Sensoren von Relevanz, in der die elektrischen Eigenschaften aufgrund der Herstellungsprozesse noch stark streuen.

Zur Demonstration der Leistungsfähigkeit der beiden Systeme wurden im Rahmen der Arbeit zwei Systeme aufgebaut. Ein System mit der Logikbaustein SN72LVC1G123 und ein, das auf einem Mikrocontroller des Typs PIC12LF1822 basiert. Das System mit dem Logikbaustein (Bild 3-15) benötigt eine Aufbaufläche unter 1 cm^2 . Es wurde exemplarisch in eine Personenwaage zur Bestimmung des Körpergewichts eingebaut und arbeitet dort seit mehr als sieben Jahren zuverlässig. In diesem Zeitraum wurden die Batterien bisher viermal gewechselt. Im Ruhezustand beträgt der Stromverbrauch des Sensorsystems etwa $10 \mu\text{A}$. Hiervon entfallen 0,5 % auf den Sensor MVS1 mit dem Vorwiderstand R1, 10 % auf die Leckströme des Mosfets und 89,5 % auf die Signalanpassung durch den SN72LVC1G123. Ein Gerät, das mit einer handelsüblichen Lithium CR2032-Knopfzelle mit einer Kapazität von 210 mAh betrieben wird, kann theoretisch durch die Verwendung des Mikrovibrationssensor-Systems 21.000 Stunden (knapp 2,5 Jahre) im Stand-By-Betrieb nutzbar.

Das System mit dem Prozessor kann deutlich länger im Stand-By betrieben werden, da die Prozessorfamilie sehr energiesparend ist. Im „Sleep“-Modus benötigt der Prozessor bei einer Versorgungsspannung von 3 Volt typischerweise 30 nA . Wenn der Prozessor mit einer niedrigen Frequenz von 31 kHz betrieben wird, liegt die Stromaufnahme im Bereich von $2 \mu\text{A}$ (Microchip Tech. Inc., 2012). Mikrovibrationssensorsysteme, die mit diesem Prozessor und einer CR2032-Knopfzelle aufgebaut werden, können bis zu 10 Jahre betrieben werden.

3.3.3 Auswerteschaltungen für Test- und Qualifizierungszwecke

Die elektronischen Auswertekonzepte für die qualifizierende Endprüfung der Sensoren vor der Auslieferung an die Kunden sind in der Regel deutlich komplexer als die Auswerteschaltungen in Serienprodukten. Für den Aufbau des Testplatzes wurden zwei elektronische Auswertekonzepte untersucht. In klassischen Signalaufbereitungsketten werden hoch auflösende AD-Wandler zur Wandlung und Erfassung analoger Signale verwendet. Setzt man von einem acht Sekunden andauernden mechanischen Anregungszyklus, eine Abtastfrequenz v_{Tast} von 4 kHz und einen 8-Bit-Wandler voraus, fallen 32 Kilobyte an Daten pro Sensor an. Bei einer angenommenen jährlichen Produktionsmenge von 2 Millionen Sensoren werden somit etwa 6,4 Gigabyte Daten erzeugt, die verwaltet und archiviert werden müssen. Während die Speicherung der Daten auf modernen PCs kein Problem darstellt, so stellen das Handling und die Echtzeitübertragung der Messdaten von der eingebetteten Messelektronik zum PC eine Herausforderung dar. Eine Übertragung in Echtzeit darf das eingebettete Testsystem bei der Messwerterfassung nicht beeinträchtigen. Dies ist jedoch selbst nicht mit leistungsfähigen, modernen Signalprozessoren kaum realisierbar. Beispielsweise kann der Prozessor TMS320F2812 der Firma Texas Instruments® Daten höchsten mit 10 Mbit/s übertragen. Die Übertragungszeit für die Daten eines Sensors vom eingebetteten Messsystem zum PC würde über 25 ms betragen, wodurch eine parallele Echtzeitcharakterisierung aller Sensoren auf dem Wafer nicht mehr möglich wäre. Daher müssten zur Zwischenspeicherung der Daten auf dem eingebetteten System etwa 64 Megabyte RAM-Speicher installiert werden. Diese Lösung wäre sehr aufwendig und nur schwer erweiterbar.

Folglich wurde ein anderes Konzept entwickelt. Der Sensor wird mithilfe eines Serienwiderstandes zu einem Sensorsystem erweitert. Der Widerstand wird an eine zwischen 0 V und 5 V einstellbare Messspannung V_{mess} gelegt. Das Spannungssignal über dem Sensor wird mit einem asymmetrischen Schmitt-Trigger digitalisiert (Kapitel 2.10.1). Die Triggerpunkte können in dem Teststand mit einem Digital-Analogwandler über die Referenzspannung V_{Ref} eingestellt werden. Der untere Schaltungspunkt entspricht einem Widerstandswert des Sensors von $R_L = 16$ Ohm, der obere von $R_H = 206$ Ohm (Bild 3-17). Liegt der Widerstand des Sensors unter R_L , ist die Ausgangsspannung V_o des Schmitt-Triggers „High“. Übersteigt der Widerstand den Grenzwert von R_H , ist sie „Low“. Sensoren unterhalb des Widerstandswertes R_L weisen in der Regel metallisch sehr reine Oberflächen auf. Der obere Wert R_H wird meist deutlich überschritten und liegt im Megaohmbereich.

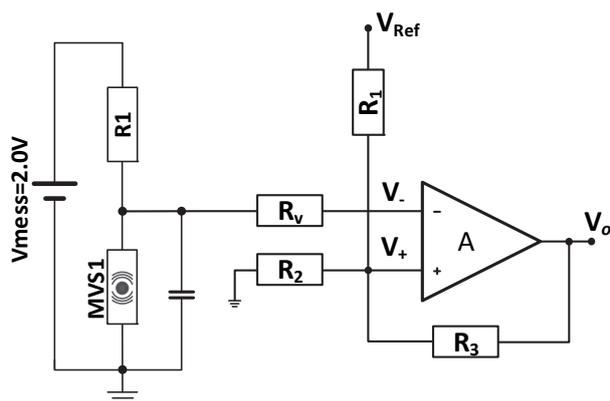


Bild 3-17: Optimiertes elektronisches Auswertekonzept für Testsysteme

Das digitalisierte Signal des Operationsverstärkers wird mit einer konstanten Frequenz von einem FPGA²⁴ abgetastet. Das Produkt aus der Anzahl der Abtastwerte unterhalb R_L und der Abtastgeschwindigkeit τ_{Tast} ergibt den Zeitraum T_{RL} , in dem der Schalter geschlossen ist. Hieraus lässt sich das *erste Gütekriterium* für einen Sensor im Anregungszeitraum $T_{Anregung}$ ableiten:

²⁴ FPGA steht für Field Programmable Gate Array

$$On_{Ratio} = \frac{T_{RL}}{T_{Anregung}} \quad (3.2)$$

Das zweite Gütekriterium ergibt sich aus der Zahl der erfassten Widerstandsänderungen des Sensors im Messintervall. Ändert sich der Zustand des Widerstandswertes von R_L über die Schaltschwelle R_H oder umgekehrt, so wird ein im FPGA implementierter Pulszähler für den Sensor erhöht. Bezeichnet man den digitalen Zustand am Ausgang des Schmitt-Triggers zum Abtastzeitpunkt i mit $V_i \in (0,1)$, so ergibt sich für die Zahl der Pulse:

$$n_{Pulse} = \sum_{i=1}^M (V_i - V_{i-1})^2 \quad (3.3)$$

In Gleichung (3.3) steht M für die Gesamtzahl der Abtastungen während der Prüfzeit. Ein guter Sensor ist durch eine hohe Zahl an Pulsen und (oder) einer langen Schließzeit gekennzeichnet.

In den Bildern 3-18 und 3-19 sind die Histogramme über die gemittelte Impulszahl sowie der On_{Ratio} über 20.000 Entwicklungssensoren dargestellt. Der Mittelwert der Pulsanzahl liegt bei 74 bei einer Standardabweichung von 14 Pulsen. Dabei sind die Sensoren im Mittel 80 % der Zeit geschlossen. Die Daten wurden mithilfe des Testplatzes „ElFuTe“ (Kapitel 5.7) ermittelt.

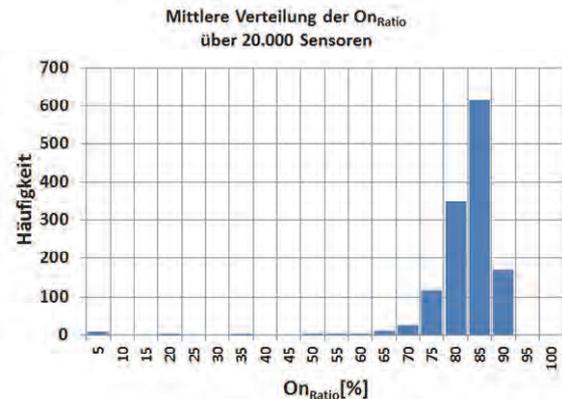
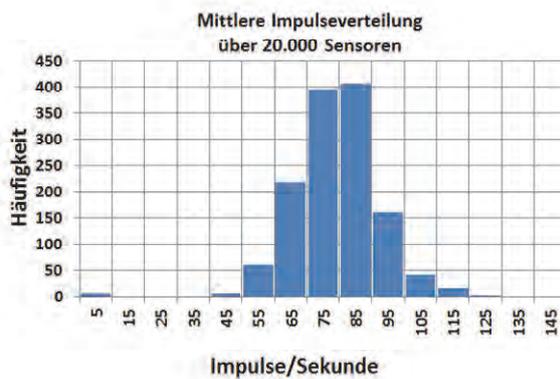


Bild 3-18: Gemittelte Pulszahl über 20.000 Entwicklungssensoren

Bild 3-19: Verteilung der On_{Ratio} über 20.000 Entwicklungssensoren (gemittelt)

Für die Klassifizierung der Sensoren kann eine Matrix herangezogen werden, in der die Pulsdauer und das Verhältnis On_{Ratio} eingetragen werden.

On_{Ratio} \ Pulse	niedrig	mittel	hoch
niedrig	✗	✗	✗
mittel	✗	✓	✓
hoch	✓	✓	✓

✓ Sensor gut ✗ Sensor schlecht

Bild 3-20: Klassifizierung der Sensoren mithilfe einer Beurteilungsmatrix

Die elektrischen Eigenschaften eines Sensors können somit durch zwei Datenworte mit je 16 Bit beschrieben werden. Das eine Wort enthält die Pulszahl n_{Pulse} das andere die Kenngröße On_{Ratio} . Die Übertragungszeit für die 32 Bit beträgt $3,2 \mu s$ bei einer Übertragungsrate von 10 Mbit/s.

Dieses Auswertekonzept ist optimal auf die Charakterisierung vieler, parallel angeordneter Sensoren im Waferverbund zugeschnitten. Alle erforderlichen Informationen zur elektrischen Charakterisierung der Sensoren werden erfasst. Sie können in Echtzeit an einen übergeordneten PC zur Auswertung, Archivierung und Steuerung der nachfolgenden Bearbeitungsprozesse übertragen werden.

4 Herstellungsprozesse für Mikrovibrationssensoren

Die Herstellung von Mikrovibrationssensoren erfordert die Verarbeitung verschiedener Materialien in komplexen Prozessfolgen. Nur wenn die Materialien und Prozesse aufeinander abgestimmt sind, können stabile und robuste Fertigungsprozesse aufgesetzt werden (Kapitel 2.2). Da die Vielzahl an Prozess- und Materialparametern sehr groß ist, wird für die Entwicklung der Produktionsprozesse für die Mikrovibrationssensoren zunächst auf bekannte und bewährte Materialien und Methoden zur Herstellung von Leiterplatten zurückgegriffen. Darauf aufbauend müssen die Prozesse und Materialkombinationen an die Anforderungen der Sensoren angepasst, weiterentwickelt und optimiert werden. Die Optimierung der Herstellungsprozesse für die Mikrovibrationssensoren zielt ab auf

- möglichst niedrige Produktkosten,
- eine hohe Fertigungsausbeute und Zuverlässigkeit des Produktes
- sowie auf möglichst gleichbleibende und reproduzierbare elektrische Eigenschaften.

Viele Teilaspekte dieser Ziele lassen sich bereits beim Entwurf des Systems berücksichtigen. Die Produktentstehungskosten können durch „Design-for-Manufacturing“-Verfahren²⁵ minimiert werden. Qualitätsaspekte werden durch „Design-for-Quality“-Verfahren²⁵ und die funktionale Charakterisierbarkeit durch „Design-for-Testability“-Methoden²⁵ adressiert.

In den folgenden Abschnitten werden zunächst die Designtechniken für einen produktionsfähigen Mikrovibrationssensor vorgestellt. Anschließend wird auf die einzelnen Prozessschritte zur Herstellung der Sensoren und die Verträglichkeit der Materialien und Prozesse eingegangen.

4.1 Design for Manufacturing

Unter DFM („Design for Manufacturability“) versteht man ein methodisches Verfahren, die produktspezifischen Herstellungsverfahren im Produktentwurf zu berücksichtigen. Moderne Entwurfsmethoden für mechanische und elektronische aber auch für mechatronische Systeme erfolgen computerunterstützt. Das Ergebnis des Produktentwurfes sind Daten, mit denen die Fertigungsmaschinen und Herstellprozesse für das Produkt gesteuert werden können.

Mechanische Systeme werden mithilfe von M-CAD-Tools entworfen. Die Systeme werden als dreidimensionale Computermodelle konstruiert. M-CAD-Tools unterstützen den Produktentwurf durch virtuelle Produktionstechniken, wodurch Konflikte zwischen dem Design und der Produktion frühzeitig aufgedeckt werden können. Der computergestützte Entwurf wurde im Rahmen dieser Arbeit zur Herstellung der mechanischen Dreh- und Frästeile angewendet, die für die Testplätze der Mikrovibrationssensoren benötigt wurden.

Zur Herstellung gedruckter elektronischer Schaltungen werden E-CAD-Werkzeuge verwendet. Im Gegensatz zum dreidimensionalen Entwurf mechanischer Bauteile erfolgt die Konstruktion der Leiterplatte zweidimensional auf mehreren Lagen. Jeder Konstruktionsebene wird eine strukturierte Metallebene zugewiesen. Die Strukturinformationen sind in den Daten enthalten, aus denen Filme für Ätz- und Galvanoresist und Steuerungsprogramme für Bohr- und Fräsmaschinen erzeugt werden. E-CAD-Werkzeuge unterstützen den Designer bei dem Entwurf elektronischer Leiterplatten, indem sie die Einhaltung von Entwurfsregeln („Design Rules“) automatisch überwachen. Die Regeln basieren auf physikalischen, elektronischen und produktionstechnischen Beschränkungen. So werden unter anderem Kurzschlüsse, zu geringe Leiterbahnabstände oder offene Verbindungen automatisch erkannt und dem Designer mitgeteilt.

Das Datenformat der E-CAD-Tools ist nicht mit denen der M-CAD-Tools kompatibel. Standardisierte Datenformate zur Herstellung von Leiterplatten sind das Gerber- (RS-274), Extended-Gerber- (RS-274-X) oder Excellon-2-Format. Gerber- und Extended-Gerber-Daten können von den meisten Fotoplottern direkt verarbeitet werden, um damit Filme für die lithografischen Prozesse herzustellen.

²⁵ „Design for Manufacturing“ wird auch mit DFM abgekürzt. DFQ steht für „Design for Quality“ und DFT für „Design for Testability“.

Excellon-2 Daten steuern Bohr- und Fräsmaschinen für die mechanische Bearbeitung der Leiterplatten (Ucamco, 2012).

4.1.1 Entwurfsmethodik für Mikrovibrationssensoren

Produkte, die in verketteten Prozessen hergestellt werden, benötigen in der Regel unterschiedliche Entwurfswerkzeuge. Insbesondere für mechatronische oder mikromechatronische Produkte existieren derzeit kaum integrierte E/M-CAD-Umgebungen²⁶, die einen disziplinübergreifenden Entwurf unterstützen. Deshalb wurden für den Entwurf der Mikrovibrationssensoren M-CAD- und E-CAD-Tools, aber auch lagenorientierte, 2D-Konstruktionsprogramme verwendet.

Der durchgängige Produktentwurf mit M-CAD Systeme war nicht möglich, da sie die großen Datenmengen nicht handhaben und keine Produktionsdaten zur Herstellung von Leiterplatten erzeugen können. E-CAD-Tools können die dreidimensionalen geometrischen Designanforderungen der Mikrovibrationssensoren nicht bedienen und waren ebenfalls bei der Handhabung großer Datenmengen eingeschränkt²⁷. Daher wurde ein neuer Arbeitsablauf erforderlich, der auf der in Tabelle 4-1 beschriebenen Vorgehensweise basiert.

Nr.	Arbeitsschrittbeschreibung
1.	Konstruktion eines 3D-Modells der Sensorzelle mit M-CAD-Tools
2.	Ableitung der Höheninformationen der Schichten aus dem 3D-Modell
3.	Übertragung der elektrotechnischen Information in eine 2D-Konstruktionsbeschreibung
4.	Produktionsgerechte Vervielfältigung der 2D-Konstruktionsdaten eines Einzelsensors
5.	Import der 2D-Konstruktionsdaten in ein E-CAD-Werkzeug
6.	Prüfung und Korrektur der Daten im E-CAD-Tool
7.	Export produktionsgerechter Leiterplattendaten
8.	Erzeugung von Metadaten zur Beschreibung zusätzlicher Eigenschaften der Lagen wie etwa die Materialbeschaffenheiten.

Tabelle 4-1: Methodik zur Herstellung der Produktionsdaten für Mikrovibrationssensoren

Zur Implementierung dieser Methode wurde neben dem 3D-Konstruktionsprogramm AutoDesk-Inventor[®] das 2D-Konstruktionsprogramm AutoCAD[®] verwendet. Es ist für zweidimensionale Konstruktionsaufgaben sehr gut geeignet. Das Programm verfügt über eine leistungsfähige „Grafikengine“ und kann große Datenmengen problemlos bearbeiten. Zudem bietet es viele nützliche Funktionen, mit denen die Bearbeitung der Daten vereinfacht und beschleunigt werden kann. AutoCAD unterstützt die Erstellung von 2D-Konstruktionen auf mehreren Lagen. Die Daten werden im „dxf“-Format²⁸ gespeichert, das von vielen E-CAD-Programmen importiert werden kann.

Das dxf-Format ordnet jedem Datenelement der Zeichnung eine eindeutige Identifikationsnummer zu. Da sich der Katalog der Identifikationsnummern mit jeder neuen Version von AutoCAD ändert, können Fremdprogramme mitunter die Kennungen beim Datenimport fehlerhaft interpretieren. Durch die Verwendung einfacher geometrischer Elemente wie Polylinien, Kreise und Texte sinkt die Wahrscheinlichkeit einer fehlerhaften Datenübertragung erheblich (Garrison, 2013). Dennoch sind Prüfungen und Korrekturen der importierten Daten im E-CAD-Tool unverzichtbar.

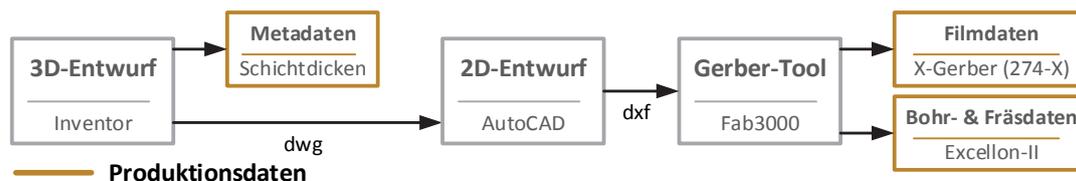


Bild 4-1: Entwurfsmethodik für die Produktionsdatenerzeugung

²⁶ Eine Entwurfsumgebung wird von der Fa. MECADTRON mit dem Tool NEXTRA angeboten. Sie basiert auf Datenaustausch.

²⁷ Bei den evaluierten E-CAD Programmen handelte es sich um Eagle und Pads in den Programmversionen des Jahres 2008.

²⁸ dxf steht für *design exchange format*. Das dxf-Format ist ein offenes aber proprietäres Format der Firma AutoDesk, das kontinuierlich weiterentwickelt wird.

4.2 Produktentwurf

Das Ergebnis des DFM-Prozesses sind Daten, mit denen der prinzipielle Aufbau einer Sensorzelle beschrieben wird und die Prozesse zur Herstellung gesteuert werden können. In diesem Abschnitt wird erläutert, wie dieses Verfahren angewendet wird, um aus der konzeptionell entwickelten Sensorzelle ein serienfertiges Produkt zu erzeugen.

4.2.1 Dreidimensionaler Entwurf der Sensorzelle

Der dreidimensionale Entwurf der Sensorzelle dient zur Ermittlung der Höheninformationen der verschiedenen Lagen, aus denen der Vibrationssensor aufgebaut wird. Die Höheninformationen müssen dem Leiterplattenhersteller als Metadatensatz zur Verfügung gestellt werden, da diese Informationen nicht in den Konstruktionsdaten der Lagen enthalten sind. Ferner wird der 3D-Entwurf zur Validierung der elektrischen Funktionalität sowie zur Visualisierung des Aufbaus der Sensorzelle genutzt.

Die räumliche Konstruktion beginnt mit der Festlegung der äußeren Abmessungen des Sensors. Sie ergaben sich aus Restriktionen der Transport- und Lieferverpackung (Kapitel 4.12) und betragen $2,79 \times 2,49 \times 1,55 \text{ mm}^3$ ($L \times B \times H$)²⁹. Die Länge und Breite des Sensors bilden die Basis für die zweidimensionale Konstruktion der Lagen, die Gesamthöhe des Sensors von 1,55 mm geht in den Metadatensatz der Produktionsdaten ein.

Die zweite Höhenrestriktion ergibt sich aus dem Durchmesser der Kugel. Er beträgt etwa 800 μm (Kapitel 2.3). Die Stärke der Kammerplatte und des Kugeldurchmessers sind aus produktionstechnischen Gründen miteinander verbunden (Kapitel 4.10). Die Höhe der Kammerplatte h_{Kammer} sowie der Durchmesser des Hohlraums d_{Hohlraum} leiten sich aus dem Durchmesser der Kugel d_{Kugel} ab und liegen vorzugsweise in einem Bereich von:

$$1,125 \cdot h_{\text{Kammer}} = d_{\text{Hohlraum}} < 1,375 \cdot d_{\text{Kugel}} \quad (4.1)$$

Es wurde eine 1000 μm starke Kammerplatte gewählt. Der Bohrungsdurchmesser zur Aufnahme der Kugel wurde ebenfalls auf 1000 μm festgelegt.

Die dritte Höhenangabe ergibt sich aus den verfügbaren Kleberstärken und deren Fließigenschaften im Laminierprozess (Kapitel 2.4.5). Es wurde ein 50 μm starker Klebefilm gewählt.

Damit können die Höhen für die Deckel- und Bodenlage ebenfalls abgeleitet werden. Sie dürfen maximal 300 μm betragen. Unter Berücksichtigung möglicher Materialtoleranzen wurden 250 μm starke Platten für Boden und Deckel gewählt.

Die Höhenbeschränkung für die Schichtdicken der Metallaufgaben und der Isolationsschicht leitet sich ebenfalls aus der Kleberschichtdicke ab. Die Höhen der Metall- und Isoschichten, der Kleberlage und dessen Design müssen so aufeinander abgestimmt sein, dass

- der Kleber beim Verpressen nicht in den Hohlraum der Kammer eindringen kann,
- alle anderen Bereiche vollständig mit Kleber gefüllt sind.

Empirisch ergab sich daraus für die Schichtdicke des Klebers:

$$(d_{\text{Bot_Top-Cu}} + d_{\text{Kam_Bot-Cu}}) \cdot 0,9 = d_{\text{Kleber}} \quad (4.2)$$

In Gleichung (4.2) beschreibt $d_{\text{Bot_Top-Cu}}$ die Schichtdicke der zur Kammer zeigenden Metallisierung der Bodenplatte und $d_{\text{Kam_Bot-Cu}}$ die Höhe der Metallisierung der Kammerseite, die zum Boden zeigt. Dieser Ansatz gilt analog für den Verbindungsbereich zwischen Kammer und Deckel.

²⁹ Nach Wissen des Autors ist der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Mikrovibrationssensor der bis heute weltweit am höchsten integrierbare, kugelbasierte Bewegungssensor. Der nächstbeste Kugelschalter benötigt für die Montage auf der Leiterplatte etwas mehr Bauraum. Er besitzt eine zylindrische Form und misst 3,6mm \times 1,95 mm (SignalQuest, 2012).

Die Kupfer-Schichtdicken auf den Außenseiten des Deckels (d_{Dec_Top-Cu}) und des Bodens (d_{Bot_Btm-Cu}) werden durch den Sägeprozess bestimmt (Kapitel 4.4.2).

4.2.2 Erzeugung fertigungsoptimierter Produktionsdaten

Für die Erstellung der Produktionsdaten müssen die zweidimensionalen Konstruktionsdaten der Lagen erstellt werden. Aus Bild 4-2 kann man ableiten, dass für die Beschreibung eines Sensors 14 Lagen benötigt werden. Dies sind die Leiterbilder des Deckels, der Kammer und des Bodens (sechs Lagen), die Isolationsschicht und die Lötstopmmaske von Deckel und Boden (drei Lagen), die Bohrdaten von Kleber, Deckel und Boden (fünf Lagen). In zwei weiteren Lagen, die in dem Schnittbild nicht dargestellt sind, werden die Durchkontaktierungen sowie die Konturfräsungen der Platten festgehalten.

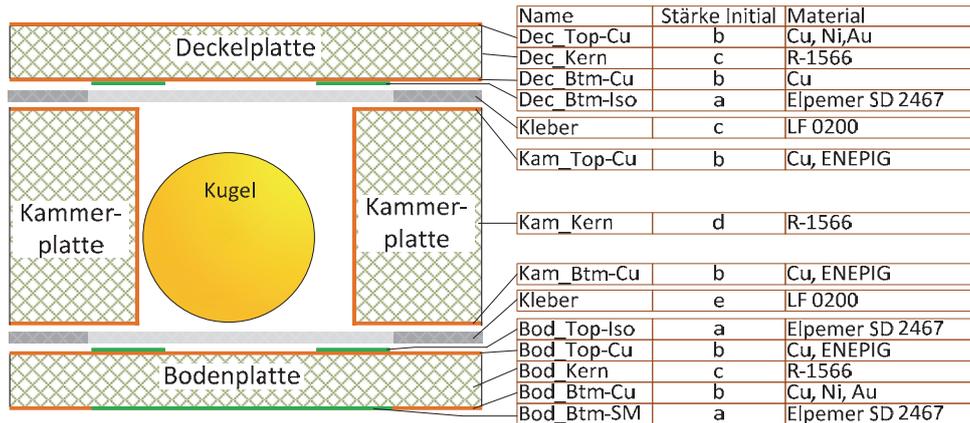


Bild 4-2: Schnittbild des Lagenaufbaus eines Vibrationssensors

Durch den Aufbau der Mikrovibrationssensoren in Plattenbauweise ergibt sich die Möglichkeit, die Einzelsensoren in einer regelmäßigen Matrix, einem Wafer, zu vervielfältigen. Die Diagonale des Wafers ist auf 152,4 mm beschränkt, um die Sensoren auf 6“ Wafersägen vereinzeln zu können. Da die Abmessungen des Leiterplattengrundmaterials $280 \times 300 \text{ mm}^2$ betragen, werden vier Wafer auf eine Großplatte, einen Nutzen, aufgebracht (Bild 4-3). In einem typischen Fertigungsauftrag von 10 Nutzen werden somit über 54.000 Sensoren gleichzeitig hergestellt.

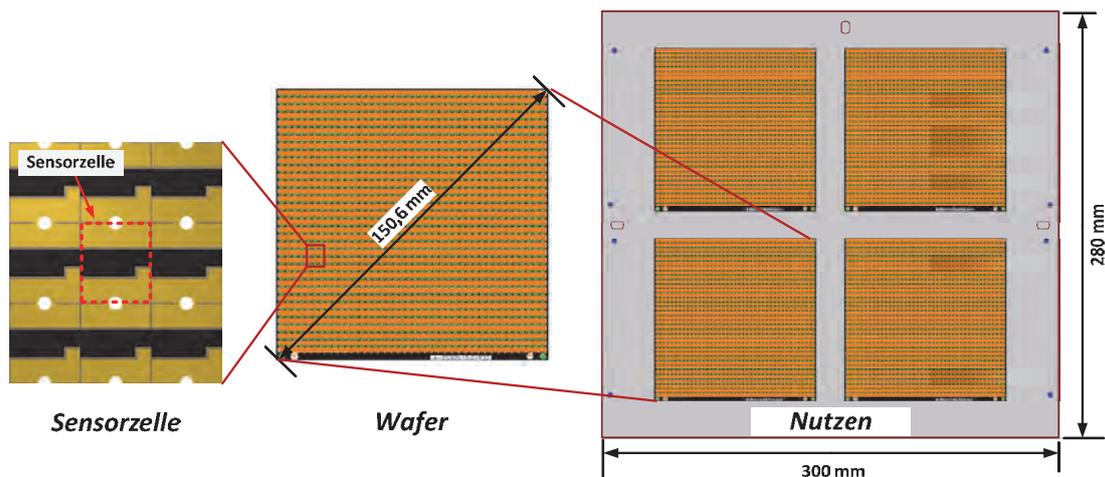


Bild 4-3: Anordnung der Sensoren im Wafer und Nutzen

Bei dem 2D-Entwurf der Produktionsdaten aller 16 Lagen muss die Einhaltung der elektrischen und fertigungstechnischen Randbedingungen vom Designer selbst beachtet werden. Das Layoutprogramm AutoCAD kennt keine Entwurfsregeln. Die Regeln, die beim Entwurf des Leiterbildes zu beachten sind, besagen,

- dass die Leiterbahnbreite 120 μm nicht unterschreiten soll,
- dass der Kupferrestring um eine metallisierte Bohrung mindestens 150 μm betragen soll,
- und dass die Leitungslänge zwischen der Durchkontaktierung und den sensorischen Flächen möglichst maximiert werden soll.

Daneben ergeben sich weitere Restriktionen aus dem geometrischen Abmessungen der zylindrischen Kammer und dem Aufbau der Sensoren. Die sensorischen Flächen des Bodens und des Deckels sollten kreisförmig und konzentrisch zur Kammerbohrung angeordnet sein. Ferner muss bei der Auslegung ihres Durchmessers die Toleranzen möglicher Verschiebungen bei der Verpressung berücksichtigt werden (Bild 4-34).

Die untere Metallfläche auf der Bodenplatte (Bild 4-2: Bod_Btm-Cu) dient zur Herstellung der äußeren Kontakt- und Lötflächen. Die Abmessungen des Pads betragen 2,53 x 0,845 mm. Die Pads ragen bis etwa 40 μm an die Kante des Sensors heran. Nach der Vereinzelnung mit einem 120 μm breitem Sägeblatt endet die metallische Fläche des Anschlusspads fluchtend mit der Sensorkante. Diese Eigenschaft ist relevant für Anwendungen, bei denen die Sensoren stehend, 90° um die Längsachse gedreht auf die Leiterplatte des Kundensystems gelötet werden müssen. Dies ist beispielsweise bei Anwendungen wie beleuchteten Hundehalsbändern oder Fahrradbeleuchtungen der Fall, da die Systemleiterkarte orthogonal zur Erdoberfläche ausgerichtet ist. Damit sich der Sensor beim Umschmelzen des Lotes durch die Oberflächenspannung nicht verschiebt, wird der Sensor mit einem Tropfen SMD-Kleber versehen (Bild 4-4).

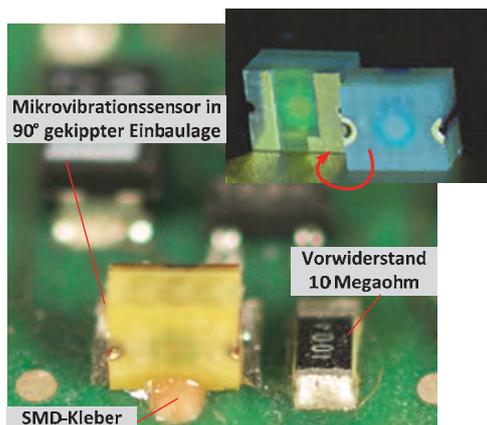


Bild 4-4: Einbaulage eines stehenden, 90° um die Längsachse gedrehten Sensors

Die Lötstopmmaske auf der Unterseite (Bild 4-2: Bod-Btm-SM) überdeckt die metallischen Anschlusspads partiell um ca. 100 μm . Die Oberfläche der Anschlusspads ist durch den reinigenden Bürstprozess vor der Aufbringung der Ni/Au-Endschicht stark aufgeraut und erschwert die automatische Bildererkennung. Die für die Bildererkennung erforderliche, scharfe Struktur wird durch die Lötstopmmaske des Bodens erzeugt. Dadurch wird die automatische Bildererkennung der verwendeten Bestückautomaten deutlich verbessert und die Position des Sensors auf dem Wafer kann fehlerfrei erkannt werden. Zusätzlich dient die Lötstopmmaske zur Kennzeichnung der Oberseite für die automatische Sortierung im Gurtautomaten.



Bild 4-5: Bildererkennung eines Vibrationssensors auf der DataCon-Evo

Das Leiterbild auf der Oberseite des Bodens (Bild 4-2: Bod_Top-Cu) beschreibt das mittig angeordnete sensorische Pad sowie den Leiterzug zur Signalverteilung in den Außenbereich, die sogenannte Kontaktfahne. Das Pad misst 0,6 mm im Durchmesser und berücksichtigt somit hinreichend mögliche Verschiebungen, die zwischen den verschiedenen Lagen im Pressvorgang entstehen können. Vom Pad aus führt die Kontaktfahne zur Durchkontaktierungsbohrung. Entgegen der allgemeinen Tendenz, Leiterbahnen kurz zu halten, wurde für die Kontaktfahne ein besonders langer Weg gewählt. Hierdurch wird verhindert, dass Elektrolytlösung bei der Herstellung der Durchkontaktierung entlang der Leiterbahn in die Kammer eindringt (Bild 6-1 und Bild 6-2).

Die elektrische Isolation zwischen den metallischen Schichten der Bodenplatte (Bot_Top-Cu) und der Kammerplatte (Kam_Btm-Cu) erfolgt durch eine ca. 20 µm starke, fotostrukturierte Isolationsschicht (Bild 4-2: Bot_Top-Iso). Die Isolationsschicht ist konzentrisch um das Sensorpad angeordnet. Sie ist ringförmig mit einem Innendurchmesser von 750 µm und einem Außendurchmesser von 1,2 mm ausgelegt (Bild 4-6).

Die Kammerplatte weist drei metallische Bereiche auf. Eine sensorische Fläche auf der Innenwandung der Bohrung sowie die Kontaktfahnen auf der Ober- und Unterseite der Platte. An dem Kreuzungspunkt zwischen der Leiterbahn des Bodens und dem metallischen Restring der Kammer ist die Breite des Rings um etwa 50 % erhöht worden. Die größeren übereinanderliegenden Flächen reduzieren die lokale Druckerhöhung beim Verpressen und beugen einem Kurzschluss zwischen Boden und Kammer vor (Bild 4-6).

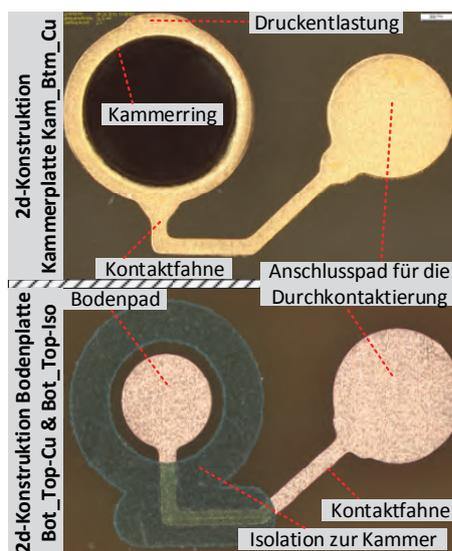


Bild 4-6: Leiterbild der Kammerunterseite und der Bodenplatte

Aufgrund der symmetrischen Anordnung der Deckel- und Bodenplatte können die zur Kammer orientierten Leiterbilder des Deckels und des Bodens spiegelsymmetrisch ausgeführt werden.

4.2.3 Qualitätsgerechter Produktentwurf

Qualitätsprobleme können oftmals durch einfache Designanpassungen in einer frühen Produktentstehungsphase verhindert werden. Dieses Vorgehen erfordert weitreichende Kenntnisse über die Fertigungsprozesse und mögliche Fehlerquellen. Ferner setzt es voraus, dass die Fehler durch konstruktive Maßnahmen vermieden werden können. Diese Situation ist jedoch bei der Entwicklung neuartiger Systeme unter Verwendung neuer Prozesse nicht gegeben. Das erforderliche Know-how wird erst in den verschiedenen Phasen der Produktentstehung generiert (Kapitel 2.1.1). Für den Mikrovibrationsschalter wurden in den verschiedenen Produktzyklen folgende konstruktive Elemente als qualitätsrelevant identifiziert:

- (I) die Durchkontaktierungen,
- (II) die geometrischen Abmessungen,
- (III) die Höhe der galvanischen abgeschiedenen Kupferschichten der Kammer.

(I): Durchkontaktierungen sind oftmals die Ursache von Mängeln in Leiterplatten (Buck, 2007). Die Hauptfehlerquellen bestehen in der hohen mechanischen Belastung im Lötprozess sowie in der fehlerhaften Vorbehandlung vor der galvanischen Verkupferung (Oliveira, 2011). Produktionsbedingt werden die Durchkontaktierungen bei der Vereinzelung der Mikrovibrationssensoren mittig durchtrennt (Kapitel 4.4.2). Bei diesem Prozess wird die Kupferhülse mechanisch stark beansprucht. Eine gute Haftung der Hülse erreicht man, indem sie über ein Anschlusspad an jede Kupferlage angebunden wird (Bild 4-6).

(II): Geeignete geometrische Abmessungen minimieren das Kurzschlussrisiko zwischen den sensorischen Flächen der Kammer und des Bodens oder Deckels.

(III): Die Schichtdickenverteilung des Kupfers im Randbereich des Kammernutzens kann durch ein geeignetes Layout homogenisiert werden (Kapitel 4.5).

Das Füllen der Wissensbasis mit Know-how kann ein langwieriger Prozess sein. Ausgehend von dem ersten Design des Mikrovibrationssensors mit der Revisionsstand R0 wurden viele Entwurfszyklen zur Optimierung der Sensorfertigung durchlaufen. Nach dem Durchlaufen von 32 Revisionszyklen steht mittlerweile ein umfangreicher Wissensspeicher zur Verfügung (Kapitel 2.1). Er dient als Ausgangspunkt für die Produktdiversifikation des Mikrovibrationssensors, die zu einer ganzen Klasse an Bewegungssensoren in Leiterplattentechnik geführt hat.

So wurden mit dieser Methodik (Kapitel 3.1)

- einseitig sensitive Bewegungssensoren,
- omnidirektional sensitive Bewegungssensoren,
- Bewegungssensoren zur Erkennung der Lage (Top/Bottom),
- Bewegungssensoren mit verminderter Sensitivität
- und „intelligente“ Bewegungssensoren mit integriertem Siliziumchip

aufgebaut und evaluiert. Die entwickelten Technologien sind durch eine Reihe von Patenten geschützt und können in (Blank & al., 2003), (Blank, 2006), (Blank & et. al., 2012), (Blank & et al., 2012a), (Blank & et al., 2012b) eingesehen werden.

4.3 Materialauswahl

Der Vibrationssensor besteht zu über 90 % aus Leiterplatten-Kernmaterial. Verschiedene Plattenmaterialien wurden evaluiert, wovon die meisten auf glasfaserverstärkten Epoxiden basieren (Kapitel 2.4). Es wurden aber auch hochtemperaturbeständige Hightech-Materialien evaluiert, da über einen langen Zeitraum unklar war, ob im Lötprozess entstehende Zersetzungsprodukte des Plattenmaterials einen Einfluss auf die Sensorqualität haben.

4.3.1 Basismaterialien, Prepregs und Kleber

Die *Basismaterialien* für die Kerne müssen preiswert und temperaturstabil sein. Sie müssen sich inert gegenüber elektrochemischen Metallisierungsprozessen verhalten. Eine Reihe unterschiedlicher Materialien³⁰ wurde auf die Prozess- und Funktionsverträglichkeit getestet (Tabelle 4-2). Es konnte jedoch kein Zusammenhang zwischen den verwendeten Leiterplattenmaterialien und den elektrischen Eigenschaften der Sensoren nachgewiesen werden. Dies betrifft einerseits die Verträglichkeit der Lötprozesse, andererseits sind auch keine Einflüsse auf die elektrochemischen Bäder zur Abscheidung der Edelmetallschichten zu beobachten.

³⁰ Die Daten der in Tabelle 4-2: Evaluierte Leiterplattenmaterialien zum Aufbau von MikrovibrationssensorenTabelle 4-2 aufgelisteten Basismaterialien können aus den Datenblättern der Hersteller entnommen werden. Sie stehen auf den Homepages zur Verfügung.

Bezeichnung	Hersteller	Tg	Td	Aushärtemechanismus	Halogenfrei
		[°C]	[°C]		
R1566	Panasonic	170	350	Dicy	✓
R1755	Panasonic	155	370	Dicy	✗
R1577	Panasonic	190	380	?	✓
R2125	Panasonic	190	380	?	✗
IS400	Isola	150	330	Dicy	✗
VT-447	Ventec	150	>350	phenolisch	✓
RO4003	Rogers	280	390	?	✗
NPG-170	Nan Ya	170	350	Dicy	✓
PCL-FR-226	Polyclad	140	320	Dicy	✗

Tabelle 4-2: Evaluierte Leiterplattenmaterialien zum Aufbau von Mikrovibrationssensoren

Die Leiterplattenmaterialien müssen hohen thermischen Belastungen widerstehen. Neben der Zersetzungstemperatur T_D ist die temperaturabhängige Ausdehnung des Materials ein klassisches Gütekriterium für die Leiterplatte. Die Kennlinien für einige Materialien, die für den Aufbau von Mikrovibrationssensoren genutzt wurden, sind in Bild 4-7 dargestellt. Bei den Materialien Arlon 35 und Roger R4003 handelt es sich nicht um Epoxide, sondern um sehr teure Spezialwerkstoffe.

Das Panasonic-Material R1755C hat bei 250 °C die höchste Ausdehnung von etwa 3,5 %. Trotz dieser hohen Ausdehnung kann es bedenkenlos für die Herstellung von Mikrovibrationssensoren verwendet werden.

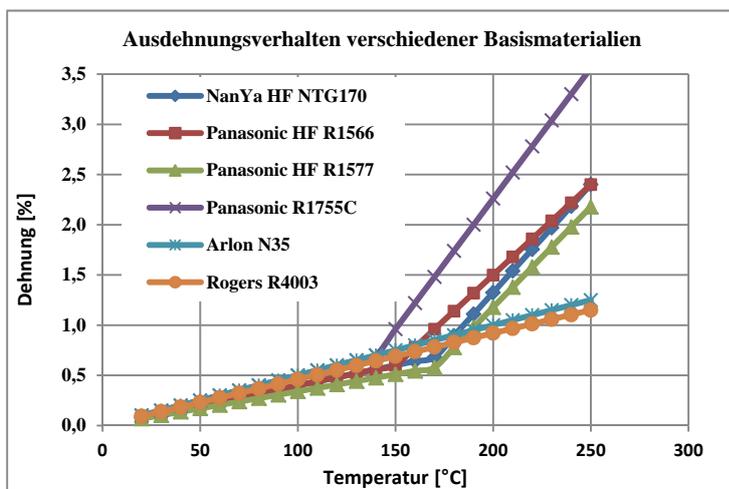


Bild 4-7: Ausdehnungsverhalten für verschiedene Basismaterialien über der Temperatur

Als alleiniger Kleber für die Laminierung der Kernplatten stand der acrylatische Klebefilm der Firma Dupont™ aus der Pylalux®-Serie zur Verfügung. Andere Klebefilme schieden aufgrund ungeeigneter Verarbeitungsparameter oder ungenügender Schichtdicken aus. Die Fließneigung des Klebers ist sehr gering. Ein Eindringen des Klebers in den sensorischen Bereich ist ausnahmslos auf eine fehlerhafte Justage des Klebers zurückzuführen. Der Kleber wird jedoch von vielen Leiterplattenherstellern nicht zusammen mit Epoxidharzplatten verarbeitet, weil Probleme bei der Herstellung der Durchkontaktierungen zu erwarten wären. Im Bohrprozess wird der acrylatische Kleber auf der Innenwand der Bohrung verschmiert. Diese Rückstände müssen vor der Verkupferung der Durchkontaktierung entfernt werden, da sonst der Metallisierungsprozess fehlerhaft abläuft. Hierfür werden in sicherheitskritischen Anwendungen Plasmareinigungsanlagen verwendet, die jedoch für den Mikrovibrationssensor nicht erforderlich sind (Blank & Hörhold, 2008). In praktischen Untersuchungen konnte in mehr als 4 Millionen Durchkontaktierungen kein Fehler gefunden werden, der auf eine Unverträglichkeit des Klebers zurückgeführt werden konnte. Darüber hinaus ist die

Verarbeitung des Klebers aufwendig und fehleranfällig. Die niedrige Glasstemperatur von etwa 40 °C und das geringe E-Modul erschweren seine Bearbeitung erheblich.

Aus diesem Grund wird die Verwendung von Noflow-Prepregs für den Aufbau von funktionalen Schichten in Leiterplatten geprüft. Sie lassen sich aufgrund der eingelassenen Glasfaser deutlich einfacher verarbeiten als ungefüllte Klebefilme. Allerdings fließen sie stärker. Um die Wahrscheinlichkeit des Eindringens von Harz in die Kammer zu reduzieren, werden während des Pressvorganges aufwendige Temperatur- und Presszyklen durchlaufen (Kapitel 2.4.5). Erste Untersuchungen zeigen, dass das Fließverhalten der Prepregs derart gesteuert werden kann, dass kein Harz in die Kammer eindringt (Bild 4-8, links). Das Harz kann aber auch massiv in die Kammer eindringen, wie im rechten Teil des Bildes dargestellt. Aussagen bezüglich des funktionalen Verhaltens der Sensoren können noch nicht getroffen werden, da die Pressversuche bisher nicht abgeschlossen wurden.

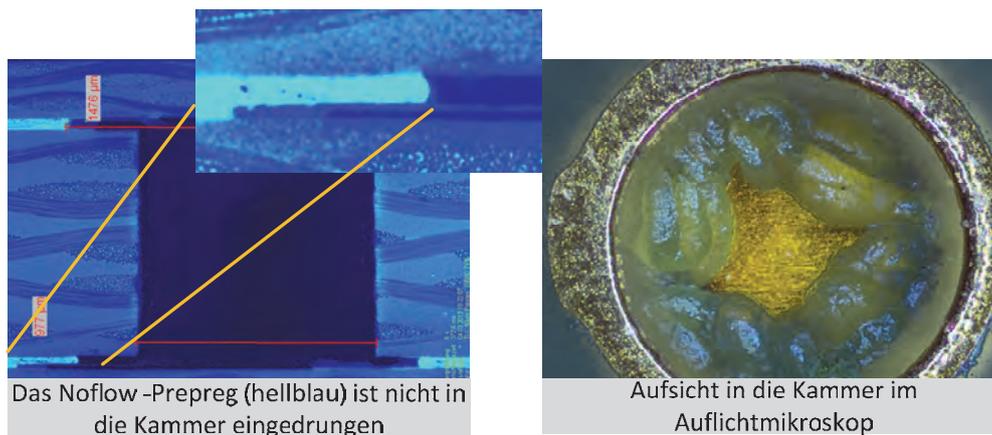


Bild 4-8: Mikroskopaufnahmen von Sensoren, die mit Noflow-Prepregs aufgebaut wurden

4.3.2 Materialien zur Oberflächenveredelung

Eine sichere und zuverlässige Schaltfunktion der Mikrovibrationssensoren kann aufgrund der geringen Andruckkraft der Kugel nur dann erreicht werden, wenn die metallischen Oberflächen elektrisch hoch leitfähig sind. Daneben müssen sie mechanischen Beanspruchungen widerstehen können und möglichst diffusionsdicht sein.

Für die Veredelung der Oberflächen der Kugeln wurden Feingoldschichten, verschiedene Hartgoldschichten und Palladiummetallisierungen evaluiert. Die besten elektrischen Eigenschaften weisen Feingoldschichten auf. Kommerziell verfügbare Hartgoldschichten werden mit Kobalt-, Nickel- oder Eisenzusätzen angeboten. Während die Feingoldschichten mit einer Reinheit von bis zu 99,99 % abgeschieden werden, liegt der Goldgehalt bei den Hartgoldlegierungen zwischen 99,6 % - 99,9 %. Elektrolytische abgeschiedene Goldschichten sind durch eine sehr gute Korrosionsbeständigkeit gekennzeichnet. Sie sind jedoch mit vielen Kristallgitterdefekten versehen und verfügen über viele Korngrenzen, weshalb sie bei erhöhten Temperaturen anfällig gegen Diffusionserscheinungen sind. Ferner bilden sich die Kristallstrukturen bei erhöhten Temperaturen um, sodass Poren in der Goldschicht entstehen oder wachsen können. Infolge der Gitterstruktur und der Porosität kann das unterliegende Material korrodieren und zu einer Oxidbildung auf der Oberfläche führen (Kapitel 6.3).

Palladium ist aufgrund seiner hervorragenden diffusionshemmenden Eigenschaften und seiner guten elektrischen Leitfähigkeit als Endoberfläche für die Kugeln geeignet. Es gibt allerdings nur wenige Dienstleister, die hochreine galvanisch abgeschiedene Palladiumschichten für technische Anwendungen in geringen Stückzahlen anbieten.

Alternativ wurden die Eigenschaften chemisch abgeschiedener Palladiumschichten evaluiert. Diese werden in einer Stärke von ca. 500 nm auf einer 6 µm - 8 µm hohen Nickelschicht aufgebaut. Sie werden zum Schutz vor Fretting (Kapitel 2.6.4) mit einer 20 nm - 30 nm starken Goldschicht überzogen³¹. In der chemisch abgeschiedenen Palladiumschicht befinden sich etwa 4-6 Gew. % Phosphor. Die Härte dieser Palladiumschicht wird mit 500 HV³² angegeben und liegt damit einen Faktor 5-10 über der Härte von Feingold und einem Faktor 2-3 über den Werten von Hartgold (Özkök & et al., 2010a).

Eine weitere evaluierte Beschichtungsvariante wurde mit einer ENEPIG-Schicht hergestellt, die mit einer 500 nm starken, galvanisch abgeschiedenen Feingoldschicht überzogen wurde. Die verstärkte Feingoldschicht dient als zusätzlicher Schutz vor Fretting und erhöht die Lebensdauer bei mechanischer Belastung (Bild 5-17).

Für den Aufbau von Edelmetallschichten auf den Leiterplatten wurden galvanisch abgeschiedene Fein- und Hartgoldschichten sowie chemisch abgeschiedene ENEPIG-Schichten evaluiert. Prozessbedingt bergen die galvanisch abgeschiedenen Schichten ein sehr hohes Kontaminationsrisiko (Kapitel 4.5). Daher wurde von der weiteren Verwendung galvanisch abgeschiedenen Oberflächen auf den Leiterplatten abgesehen.

4.4 Mechanische Bearbeitungsprozesse der Mikrovibrationssensoren

Von besonderer Bedeutung für die Herstellung von Mikrovibrationssensoren sind die Bohr- und Fräsprozesse sowie die Vereinzelung der Sensoren. Es handelt sich um zeitintensive, sequenzielle Prozesse, die hochgenau durchgeführt werden müssen. Während die Bohr- und Fräsprozesse beim Leiterplattenhersteller durchgeführt werden, findet die Vereinzelung der Sensoren auf einer hochgenauen Wafersäge im AVT-Labor des KIT statt. Dieses Kapitel beschreibt die Anforderungen an den Bohrprozess zur Herstellung hochwertiger Kammern und Durchkontaktierungen und an die Vereinzelung der Sensoren. Für einen reibungslosen Vereinzelungsprozess und die problemlose Weiterverarbeitung der Wafer wurden zusätzlich geeignete Methoden zur Montage der Wafer auf UV-empfindlichen Sägefolien entwickelt.

4.4.1 Bohrprozesse

Die Fertigung der Bohrungen zählt zu den zeitintensiven Arbeitsschritten für die Herstellung der Mikrovibrationssensoren. Über 20.000 Löcher werden in einen Vibrationssensor-Nutzen mit vier Wafern gebohrt. Dies sind 10.880 Kleberbohrungen, 5.480 Löcher zur Herstellung der äußeren Durchkontaktierungen und 5.440 Kammerbohrungen. Somit beträgt allein die Bohrzeit für die Kammer bei einem Vorschub von 2,9 mm/s etwa 45 Minuten. Zur Erhöhung der Produktivität werden jeweils 2 Kammern gemeinsam in einem Schritt gebohrt. Der Bohrer wird nach 4000 Löchern gewechselt, also nach einer Bohrstrecke von acht Metern. Dieser Wert liegt deutlich unterhalb des vom VDE/VDI spezifizierten Bereichs, der für 1 mm Bohrer einen Werkzeugwechsel nach 15-25 Metern vorsieht (VDE/VDI, 1999). Trotz des häufigen Bohrerwechsels schwankt die Qualität der Bohrungen erheblich. In Bild 4-9 sind zwei schlechte Durchkontaktierungen dargestellt. Sie sind auf der gleichen Maschine mit identischen Bohrparametern entstanden. Bild 4-9 zeigt eine Nagelkopfbildung. Auf Bild 4-10 ist ein Faserausriss erkennbar.

³¹ Die Schichten werden als ENEPIG Schichten bezeichnet: Electroless Nickel, Electroless Palladium, Immersion Gold

³² HV steht für die Vickershärte

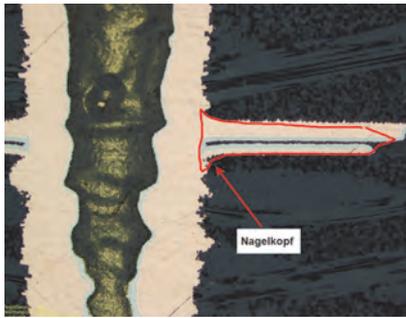


Bild 4-9: Darstellung einer schwachen Nagelkopfbildung



Bild 4-10: Faserausris in einer Durchkontaktierung mit einer unkritischen Tiefe von 18 µm

Eine Verbesserung der Bohrlochgüte lässt sich durch eine weitere Verringerung der Zahl der Bohrhübe auf 2000 erreichen. Die Richtwerte aus der Veröffentlichung des VDE/VDI stammen aus dem Jahr 1999, lange vor der Zeit der harten, temperaturstabilen, RoHS geeigneten Basismaterialien. Die Abnutzung des Bohrers ist in diesen neuen Basismaterialien deutlich höher. Selbst Firmen wie Panasonic spezifizieren den Bohrerterlauf für ihr Basismaterial R-1566W nur noch für 3000 Hübe (Panasonic Corporation, 08). Alternativ kann die Zahl der Platten, die gleichzeitig gebohrt wird, halbiert werden.

Der Bohrprozess für die Kleber hat keinen Einfluss auf die Güte der Löcher im Kleber. Daher können die Kleber-Lagen in Vierer-Paketen gebohrt werden, wobei zwischen jede Kleberlage eine 250 µm starke Aluminiumplatte gelegt wird. Die Bohrzeit für die vier Kleberlagen beträgt etwa 15 Minuten.

Die äußeren Durchkontaktierungen des laminierten Sensorstapels werden einzeln gebohrt, da deren Positionen exakt zur Lage der Kammerbohrungen ausgerichtet werden müssen. Für diesen Zweck sind optische Positioniermarken auf die Kammer aufgebracht worden. Die Kamera des Bohrautomaten kann die Marken durch entsprechende Freistellungen im Deckel und Boden erkennen und den Bohrprozess auf eine Genauigkeit von ca. 20 µm ausrichten.

Beachtet man die hier angeführten Randbedingungen für die Bohrprozesse der Klebefilme und der Basismaterialien, dann tritt der Bohrprozess selten in der Liste der Produktionsfehler in Erscheinung.

4.4.2 Vereinzelung der Sensoren

Die Vereinzelung der Sensoren erfolgt auf einer Wafersäge im AVT-Labor des KIT. Die Maschine verfügt über eine luftgelagerte Spindel, die sich bis zu drei Mikrometer genau positionieren lässt und mit bis zu 80.000 Umdrehungen pro Minute läuft (Disco Technologies, 2012). Der optimale Sägeprozess für die Mikrovibrationssensoren ist durch

- eine hohe Schnittgeschwindigkeit,
- einen geringen Schnittdruck und
- eine vertikal in die Tiefe laufende Sägegasse

gekennzeichnet.

Bevor der Wafer gesägt werden kann, wird er auf eine Sägefolie montiert. Die Sägefolie wird zur Stabilisierung auf einen Haltering aus Metall oder Kunststoff, den sogenannten Spanrahmen, geklebt. Die Wahl der Folie beeinflusst den Sägeprozess aber auch die nachfolgenden Verarbeitungsprozesse erheblich. Für die Vibrationssensoren werden UV-sensitive Folien des Typs D-628 der Fa. Lintec verwendet. Bei dieser Folie ist eine 10 µm starke Lage aus einem Acrylklebstoff auf einer 80 µm dicken Basisschicht aus Polyolefin aufgetragen. Diese Folie erwies sich als die geeignetste aus einer Reihe getesteter Folien (Tabelle 4-3).

Tape	D-210	D-410T	D-510T	D-628	D-650
Dicke [μm]	125	130	170	90	90
Basisfolie [μm]	100	100	140	80	80
Kleberschicht [μm]	25	30	30	10	10
Klebekraft [g/inch] vor UV	2000	2000	2300	1000	350
Klebekraft [g/inch] nach UV	20	70	80	10	10
Geeignet für Chipgröße	$>1 \times 1 \text{ mm}^2$	$>0,5 \times 0,5 \text{ mm}^2$	$>0,5 \times 0,5 \text{ mm}^2$	$>0,5 \times 0,5 \text{ mm}^2$	$>1 \times 1 \text{ mm}^2$
Anwendung	Glas & Keramik	CSP, BGA	CSP, BGA	Kleine Chips	Geringe Rückstände

Tabelle 4-3: Evaluierten Folientypen (Lintec of America, Inc.)

Der Klebstoff fixiert das Bauteil während des Sägeprozesses auf der Folie. Die Klebekraft ist proportional zur geklebten Fläche und abhängig von den Eigenschaften der Kleberschicht (Ganesh & Lee, 2006). Der Acryl-Klebstoff der Folie D628 verringert seine Klebekraft bei UV-Belichtung von 1000 g/25 mm auf unter 10 g/25 mm. Die Dosis der UV-Strahlung sollte 160 mJ/cm² bei einer Leistung von 220 mW/cm² betragen. Als erforderliche Wellenlänge wird ein Wert um 365 nm angegeben (Lintec Corp., 2012).

Neben dem Folienmaterial beeinflusst die Wafermontage auf die Folie den Sägeprozess. Der Wafer muss über seine gesamte Fläche homogen auf die Folie geklebt werden, damit jeder Sensor nach der Vereinzelung gleich fest auf der Folie haftet. Ist dies aufgrund einer lokalen Kontamination oder eines Lufteinschlusses (Blase) zwischen der Folie und dem Wafer nicht gegeben, kann der Sensor durch die hohen Sägekräfte von der Folie gerissen werden. Es besteht die Gefahr, dass Wafer und Sägeblatt zerstört werden.

Eine ausreichende und reproduzierbare Haftung erreicht man, indem die Folie bei der Montage immer mit dem gleichen Anpressdruck an den Wafer gedrückt wird. Hierfür wurde eine Montagehilfe entwickelt, mit dem die Folie blasenfrei bei konstantem Druck auf den Wafer aufgezogen werden kann. Die Folie befindet sich vor der Montage ca. 0,5 mm über dem Wafer und ist auf dem Waferring aufgespannt. Sie wird über eine Walze an den Wafer angedrückt, wobei die Luft durch den Linienkontakt zwischen der Walze und der Folie verdrängt wird. Die Andruckkraft wird über einen pneumatischen Zylinder erzeugt (Bild 4-11). Geringe Lufteinschlüsse verbleiben dennoch am Überstand der Durchkontaktierung und führen zu Bereichen, bei denen der Wafer nicht an die Folie geklebt ist (Bild 4-12, rot markierter Bereich).

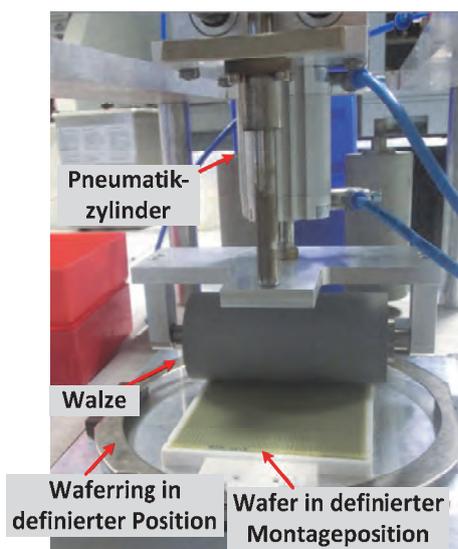


Bild 4-11: Montageautomat zum Auflaminieren der Wafer auf die Sägefolie

Durch die passive, mechanische Zwangsausrichtung des Wafers zum Waferring erzwingt man eine zentrische Montage des Wafers bezogen auf den Waferring. Die zentrische Montage ist Voraussetzung für eine automatische Verarbeitung des Wafers auf der Wafersäge und auf dem Diebonder.

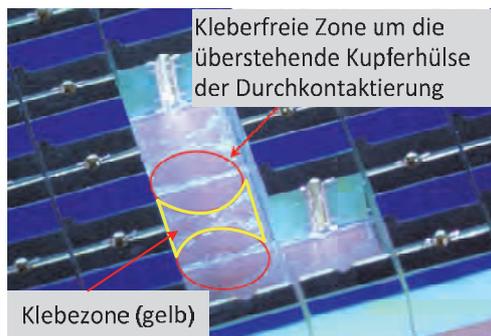


Bild 4-12: Mikroskopaufnahme von Sensoren nach dem Sägen auf der Sägefolie

Für das Sägen der Sensoren werden nickelgebundene, geläppte und elektropolierte Blätter verwendet. Sie sind geschlitzt, 120 µm breit und ermöglichen einen senkrechten Schnitt durch das Material (Bild 2-41, rechts). Die Verwendung von Blättern von nicht geläpften, elektropolierten Blättern ist nicht zu empfehlen. Das Sägeblatt verläuft beim Schneiden und die Sensorkanten sind nicht mehr rechtwinklig. Ferner verschleißt das Blatt einseitig. Die Standzeit des Blattes verringert sich etwa um 30 % im Vergleich zu einem elektrochemisch behandelten und geläpften Blatt. Die Lebensdauer des Blattes und die Schnittqualität werden durch regelmäßiges Dressen des Blattes verbessert. Bei diesem Prozess werden nach der Bearbeitung von 30 Wafers einige Schnitte in eine harte Keramik eingebracht, sodass die mit Kunstharzen verschmierten Diamanten wieder freigelegt werden (Bild 4-13). Dargestellt ist ein Teil eines Sägeblattes zum Schneiden der Vibrationssensoren. Nach dem Dressen sind die Diamanten freigelegt. Dies kann an den unterschiedlichen Farben des Blatts oberhalb und unterhalb der grünen Bogenlinie erkannt werden.

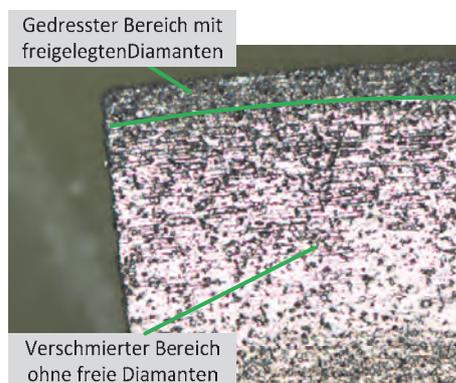


Bild 4-13: Effekt des Dressens eines Sägeblattes

Die Vibrationssensoren werden mit einem Vorschub knapp 40 mm/s gesägt. Die Dauer, die für den vollständigen Trennprozess eines Wafers benötigt wird, ergibt sich aus der Anzahl und der Länge der Schnitte in den Wafer. Die erforderliche Zeit für das Sägen eines Wafers beträgt etwa fünf Minuten. Ein Sägeblatt hat eine Standzeit von ca. 150 Wafers. In Bild 4-14 ist ein vollständig gesägter Wafer im Spannrahmen auf der Folie dargestellt. Einige Sensoren sind bereits abgenommen.

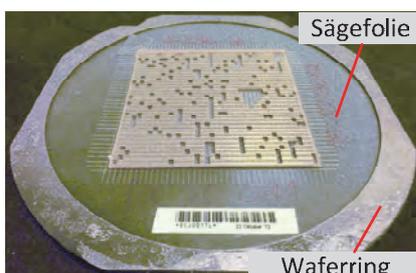


Bild 4-14: Vollständig aufgebauter und gesägter Wafer auf der Folie im Waferring

Während des Sägeprozesses kleben die Sensoren sehr gut auf der Sägefolie. Für die Lieferung an den Kunden müssen die Bauteile vom Wafer abgenommen und umverpackt werden (Kapitel 4.12). Dies ist nur dann möglich, wenn die Folie nicht mehr klebt.

Bei Belichtung der Folie mit UV-Licht einer Wellenlänge von etwa 365 nm verliert der Film seine Klebewirkung. Aus den Belichtungsdaten der Folie ist ersichtlich, dass eine sehr starke UV-Quelle für die Belichtung erforderlich ist. Zur Belichtung der Vibrationssensoren wird eine Quecksilberdampflampe mit einer elektrischen Anschlussleistung von 3,5 kW verwendet. Diese emittieren jedoch auch im Infraroten, sodass die belichteten Werkstoffe sehr warm werden. Eine Erwärmung des Folienklebstoffes auf Temperatur oberhalb von 40 °C ist aber in jedem Fall zu vermeiden. Bei hohen Temperaturen setzt die thermische Vernetzung des Klebstoffes ein, die zu einer vollständigen Polymerisation des Klebstoffes führt. Die gesägten Bauteile lassen sich in diesem Fall nicht mehr von der Sägefolie lösen. Um dies zu vermeiden, werden die gesägten Wafer 80 cm von der Lichtquelle entfernt auf eine Quarzglasplatte gelegt. Die Belichtungsleistung liegt mit gemessenen 20 mW/cm² deutlich unter der vom Folienhersteller empfohlenen Leistung. Die erforderliche Belichtungs-dosis wird über die Steuerung der Belichtungszeit erreicht. Der Belichtungsprozess besitzt Optimierungspotenzial, da nach dem Prozess noch Kleberrückstände auf dem Sensor verbleiben.

Eine alternative Belichtungsmöglichkeit besteht in der Verwendung von Hochleistungs-UV-Dioden. Zur Evaluation der Belichtung wurde eine UV-Quelle mit einer digital steuerbaren Stromquelle mit DC/DC Konverter und PFC Regelung entwickelt (Janson, 2013). Die UV-Quelle wurde mit 42 LEDs des Typs EV-U40A der Fa. SemiLEDs[®] aufgebaut. Die LEDs emittieren im Wellenlängenbereich zwischen 380-385 nm. Generell sind LEDs sehr schmalbandige Strahler. Die spektrale Halbbreite wird mit 12 nm angegeben. Die optische Leistungsdichte des gewählten Typs mit dem BIN-Code EAU8 liegt bei 200 mW/mm² bei einer elektrischen Eingangsleistung von 1 Watt (SemiLEDs Optoelectronics Co.,Ltd., 2013).

Die messtechnisch ermittelte Leistungsdichte des entwickelten Moduls (Bild 4-15) betrug etwa 50 mW/cm², wobei die Messeinrichtung 10 mm von den Dioden entfernt war. Die Folie wurde selbst in einer 20 Sekunden andauernden Belichtungsphase bei einer elektrischen Leistungsaufnahme von 80 Watt nicht erwärmt. Allerdings fühlte sich die Folie nach dieser recht langen Belichtungsdauer immer noch klebrig an. Erst bei deutlich verlängerten Belichtungszeiten verliert die Folie ihre Klebewirkung vollständig. Eine Reduktion der Kleberückstände kann bei den 380 nm-Dioden im Vergleich zum Belichtungsverfahren mit Quecksilberdampflampen nicht beobachtet werden. Weitere Untersuchungen mit UV-Dioden im Wellenlängenbereich von 365 nm sind erforderlich.

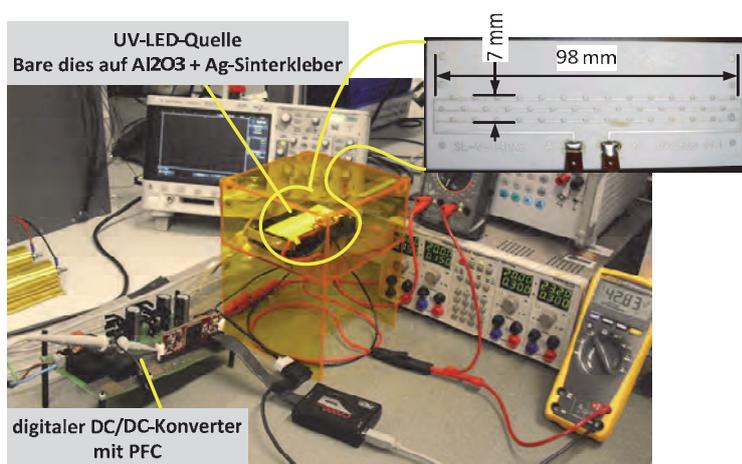


Bild 4-15: UV-LED Lichtquelle mit digital regelbarer Stromquelle (20-100 Watt)

Korrekturen am Belichtungsprozess beeinflussen die Sensorqualität jedoch nur noch geringfügig und sind nicht zwangsläufig erforderlich.

4.5 Galvanikprozesse

Für die Herstellung von Mikrovibrationsschaltern sind drei verschiedene Galvanikprozesse erforderlich. Diese sind:

- die galvanische Abscheidung von Kupferschichten für den Aufbau der Durchkontaktierungen der Kammerplatte und des Sensorverbundes,
- die chemische Abscheidung von Nickel-Palladium-Gold auf den sensorischen Flächen bzw. alternativ die galvanische Abscheidung von Nickel und Gold,
- die galvanische Abscheidung von Nickel und Gold auf den Außenflächen.

Die besonderen Anforderungen an die Kupferabscheidungen liegen in der Abscheidung sehr homogener Schichten mit eng tolerierten Höhenvariationen. Die Edelmetallschichten müssen porenfrei und metallisch rein aufgebaut werden. Zudem müssen sie vor Diffusion unedler Metalle aus tieferen Schichten geschützt werden. Dieser Abschnitt beschreibt die erforderlichen Verfahren und Methoden zur Herstellung der galvanisch und chemisch abgeschiedenen Metallschichten für den Mikrovibrationssensor.

4.5.1 Kupferabscheidung

Die Herstellung von Mikrovibrationssensoren erfordert die Abscheidung von Kupfer auf den Wänden der Kammerbohrung und der Durchkontaktierungen. Die galvanische Kupferabscheidung auf Kunststoffen erfordert eine Aktivierung des Kunststoffes mit einer katalytisch aktiven Schicht. Industriell werden verschiedene Aktivatoren genutzt. Neben palladiumhaltigen Aktivatoren werden flüssigen Medien auf graphitischer Basis oder leitfähiger Polymere genutzt (VDE/VDI, 1999). Zur Aktivierung der Bohrwände der Mikrovibrationssensoren werden graphitische, wässrige Medien verwendet. Der Kohlenstoff scheidet sich aus der Lösung auf der gesamten Leiterplatte ab. Die bedeckten Bereiche sind in Bild 4-16 mit einem 'G' gekennzeichnet. Nach der Trocknung der Lösung wird der Kohlenstoff vom normalen Kupfer durch einen schwach sauren Ätzschritt von den Kupferflächen entfernt. Er verbleibt aber auf dem Kunststoff der Bohrung und bildet eine leitfähige Brücke (Bild 4-17), auf der im galvanischen Beschichtungsschritt Kupfer abgeschieden werden kann.

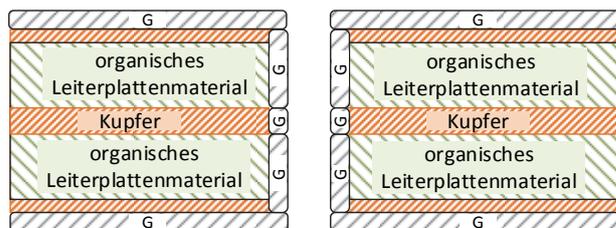


Bild 4-16: Graphitbedeckung der Leiterplatte vor der Herstellung der Durchkontaktierung. Die Graphitschicht ist mit (G) gekennzeichnet.

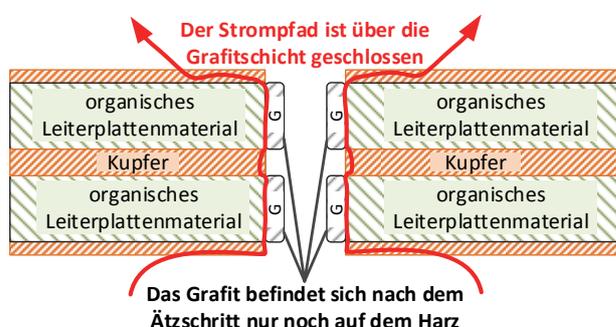


Bild 4-17: Graphitbedeckung der Leiterplatte nach dem Mikroätzschritt. Das Graphit haftet nur noch auf dem Harz. Der Stromfluss kann dennoch durch die Bohrung erfolgen.

Der Mikroätzschritt verläuft normalerweise sehr langsam und nimmt nur etwa 1-3 μm von der Kupfereauflage ab (Hörhold, 2009). Ist die Innenlage jedoch aus sensorischen Gründen mit einer Nickel-Goldschicht überzogen, bildet sich ein galvanisches Kontaktelement zwischen dem edlen Gold, dem unedlen Nickel und dem etwas edleren Kupfer aus. Dies führt zu einer erhöhten

Ätzgeschwindigkeit und verursacht eine starke Unterätzung (Bild 4-18). Die Innenwandung der Durchkontaktierung wird in diesem Fall nicht aufgekupfert und ist fehlerbehaftet (Kapitel 6.3).

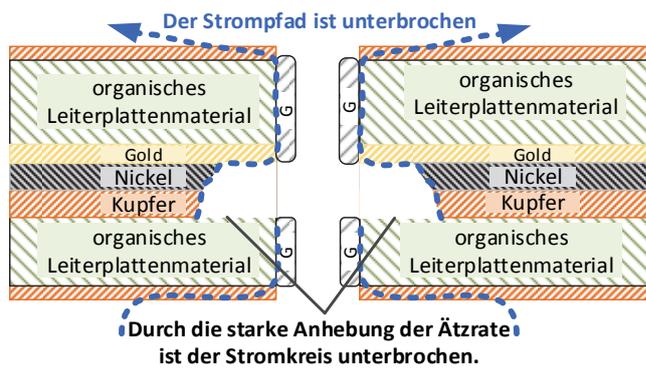


Bild 4-18: Unterätzung einer Leiterplatte mit Ni-Au Schichten nach dem Mikroätzschritt

Weiter muss berücksichtigt werden, dass die Kupferabscheidung aus dem galvanischen Bad nicht homogen abläuft. Die Schichtdicke nimmt zum Rand des Nutzens hin zu (siehe Gleichung (2.42)). Mit der in Gleichung (4.2) beschriebenen Beziehung ergibt sich, dass die Kupferschicht auf den Außenseiten der Kammer maximal $30\ \mu\text{m}$ hoch sein darf. Berücksichtigt man die $12\ \mu\text{m}$ hohe Kupferkaschierung auf den Außenseiten, so können maximal $18\ \mu\text{m}$ in der Durchkontaktierung aufgebaut werden. Sind die metallischen Schichtdicken zwischen der Kammer und den außen liegenden Deckel- und Bodenplatten nicht angepasst, wird der Kleber nicht richtig verpresst und Elektrolytflüssigkeit kann in die Kammer eindringen (Kapitel 6.1).

Die Homogenität der Kupferabscheidung kann verbessert werden, indem die zu beschichtende Nutzenfläche vergrößert wird. Hierfür bringt man neben den Nutzen sogenannte Opferplatten an (Bild 4-19). Durch diese Maßnahme verbessert sich die primäre Stromverteilung in dem relevanten Nutzbereich der Abscheidung. In der mathematischen Betrachtung nach Gleichung (2.42) entspricht die Flächenvergrößerung einer Erhöhung des Außenradius R .

Bei der Beschichtung der Kammerplatten werden vier Nutzen gleichzeitig durch das galvanische Bad gefahren. Dazu werden die Platten an ein Transportgestell geschraubt. Sie bilden die Kathode des Galvanikprozesses. Die Anode besteht aus zwei Kupferplatten, die über ein Joch elektrisch miteinander verbunden sind. Jeder Seite der Kammerplatte steht eine derartige Anodenkonstruktion gegenüber (Bild 4-19). Zur Ermittlung der Wirksamkeit der Opferplatten wurde ein CAD-Modell in das numerische Simulationsprogramm COMSOL[®] importiert und die primäre Stromdichteverteilung auf der Oberfläche der Kammerplatte rechnerisch ermittelt. Das Ergebnis lässt lediglich qualitative Aussagen zu, da keine exakten Materialangaben für den Elektrolyten vorliegen und das Modell stark vereinfacht wurde. Dennoch reichen die Ergebnisse aus, um die Effekte des Opferbleches auf die Abscheidung zu verstehen. Die Stromdichte ist erwartungsgemäß in den Randbereichen höher als in der Mitte. Bereiche hoher Stromdichten sind in Bild 4-19-rechts durch rote Farbtöne gekennzeichnet. Im rechten Bereich wurde kein Opferblech berücksichtigt. Dort ist die Stromdichte höher. In diesen Bereichen scheidet sich nach dem Faradayschen Gesetz mehr Kupfer ab (Gleichung (2.24)).

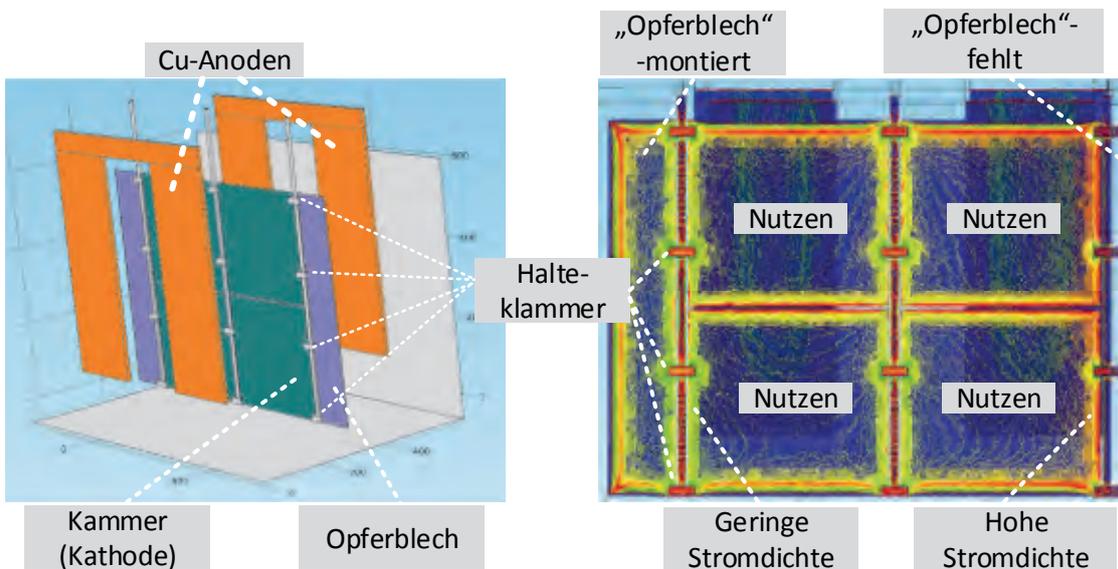


Bild 4-19: Simulierte Stromdichte für die galvanische Verkupferung der Kammern. Links ist das freigestellte, geometrische Modell dargestellt, rechts die simulierte Stromdichteverteilung.

Aus der Simulation lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- durch die Opferbleche wird die Stromdichteverteilung auf dem Nutzen gleichmäßiger,
- im Bereich der Halteklammern kommt es zu lokalen Überhöhungen in der Stromdichte,
- sind an den oberen und unteren Kanten keine Opferbleche montiert, kommt es zu einer lokalen Überhöhung der Stromdichte.

Die Auswirkungen nicht angepasster Schichtdicken zwischen Kammer und Außenlage sind in Bild 4-20 dargestellt. Im Randbereich ist die Metallisierung der Kammer zu hoch. Daher kann der Kleber beim Verpressen nicht fließen. Die Kammer wird nicht abgedichtet.

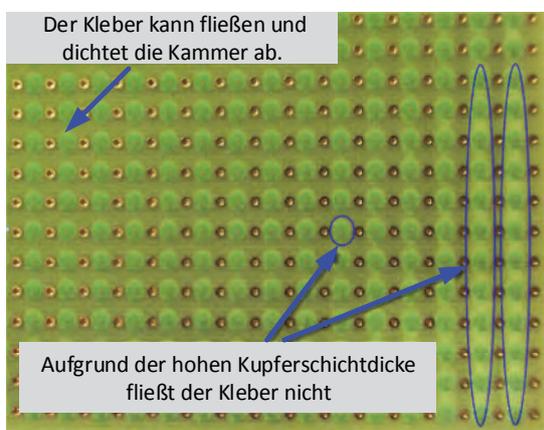


Bild 4-20: Delamination der Kammer- und Deckelplatte. Die Metallschichten zwischen den beiden Lagen sind nicht angepasst, sodass die Platten nicht richtig verklebt werden (helle Stellen zwischen den Durchkontaktierungen).

Weiter Verbesserungen können erreicht werden, indem man ein Nutzenformat mit einem größeren Randbereich verwendet, die Schichtdicke des galvanisch abgeschiedenen Kupfers verringert, oder einen Elektrolyten mit einer verbesserten Streufähigkeit verwendet (Kapitel 2.7.8). Die Elektrolyten sind allerdings bereits sehr leistungsfähig, wie der homogene Schichtaufbau der Kammermetallisierung in Bild 4-21 zeigt.

homogene Schichtdicke

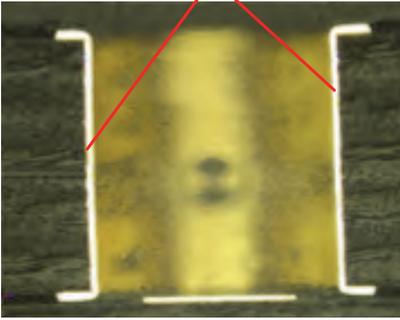


Bild 4-21: Schnitt durch eine Kammerbohrung mit homogenem Kupferaufbau

Eine gleichmäßige Kupferabscheidung in Bohrungen oder Kavitäten ist besonders schwierig, da sich die Metallionenkonzentration in den Hohlräumen bereits nach kurzer Abscheidungszeit stark abnehmen kann. Eine gleichmäßigere Abscheidung erreicht man, indem die Durchmischung des Elektrolyten durch Ultraschall, mechanische Vibrationen oder Einblasen von Luft verbessert (Kanani, 2009). Diese Technologie kann jedoch zur Herstellung der Mikrovibrationssensoren nicht genutzt werden. Die mechanischen Vibrationen des Galvanoautomaten können zu einer mechanischen Voralterung des Schalters führen, da sich zum Zeitpunkt der Herstellung der Durchkontaktierungen die Kugel bereits in der Kammer befindet. Die Frequenz der mechanischen Schwingung beträgt 80 Hz. Die Anregung erfolgt in einem getakteten Rhythmus, bei dem die Vibrationen 60 Sekunden an-, 90 Sekunden aus-, 20 Sekunden an- und 90 Sekunden ausgeschaltet sind. Danach wiederholt sich die Anreigungssequenz.

4.5.2 Galvanische Edelmetallabscheidung

Galvanische Edelmetallschichten können als sensorische Endoberfläche sowie als lötbare Oberflächenschicht auf den äußeren Anschlusspads verwendet werden. Wird das Gold zur Herstellung einer lötbaren Oberfläche genutzt, so sind die Anforderungen an die Reinheit nicht hoch. Es wird auf eine Nickelschicht aufgebracht, die als Diffusionsbarriere dient. Die Nickel-Gold-Oberfläche schützt das unterliegende Kupfer vor Korrosion, wodurch der Sensor auch nach Lagerzeiten von bis zu sechs Monaten im Lötprozess verarbeitbar bleibt. Bei Lagerung unter Stickstoff kann die Verarbeitbarkeit auch erhöht werden.

Bei der Verwendung von galvanisch abgeschiedenen Goldschichten für den Aufbau sensorischer Schichten sind jedoch einige Aspekte zu beachten. Anstelle des Zinns bringt man Nickel und Gold als Ätzresist auf die freiliegenden Kupferstellen auf (Bild 2-37, Schritt 7). Nach dem Strippen des Fotoresists und dem Ätzen des freiliegenden Kupfers sind die Leiterzüge an der Oberfläche vergoldet. Diese Technologie erfordert jedoch eine genaue Prozessführung, da durch die nachfolgenden Strip- und Ätzschritte die Goldoberfläche kontaminiert werden kann. Aufwendige Reinigungsschritte müssen durchgeführt werden (Kapitel 4.6). Zusätzlich ist nur die Oberfläche des Leiterzuges mit Nickel/Gold bedeckt. Die Flanken der Leiterzüge sind blankes Kupfer und können korrodieren.

Die Leiterplatten werden für die galvanische Vernickelung und Vergoldung in ein Gestänge eingespannt und vertikal hängend in einem Becken bearbeitet. Die Kugeln hingegen werden als Schüttgut in einer Trommel beschichtet. Hierfür wird in das Innere der Schüttung ein Kabel mit einer metallischen Endkappe eingelegt, die den kathodischen Kontakt herstellt. Die Trommel bewegt sich mit einer konstanten Frequenz, sodass ständig neue Kugeln aus dem Inneren der Schüttung an die Oberfläche gelangen und vergoldet werden können. Der Anodenkontakt wird durch ein gebogenes platinisiertes Titanblech hergestellt. In Bild 4-22 ist die Vergoldung der Kugeln in einem sulfidischen Elektrolyten dargestellt.

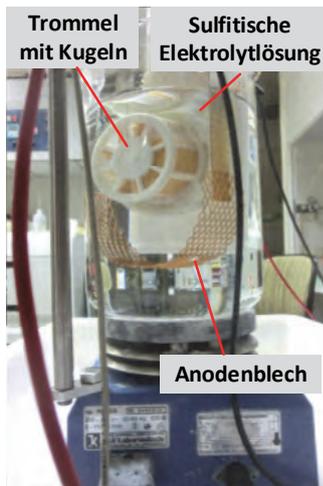


Bild 4-22: Galvanische Beschichtung von Mikrokugeln in einem sulfitischen Goldbad

Die Anforderungen an die Qualität und Reinheit der Edelmetallschichten sind für einen funktionsfähigen Sensor essenziell. Aus den Ableitungen in Kapitel 2.7 geht hervor, dass bei der galvanischen Beschichtung eine Vielzahl an Prozessparametern beachtet werden müssen. Diese sind unter anderem die Temperatur, der Edelmetallgehalt des Bades, der pH Wert und die Überspannung bzw. die Stromdichte. Weichen die Werte von den vorgegebenen Prozessparametern ab, ist mit inhomogenen Abscheideergebnissen zu rechnen. Dies kann sich in vermehrter Knospenbildung ausdrücken oder aber auch in veränderten Metallstrukturen mit einem höheren Porenanteil.

Während die Temperatur und der pH-Wert durch einfache Messverfahren Inline zu ermitteln sind, wird die chemische Zusammensetzung meist durch spezielle Analytiklabors überprüft. Diese Analysen werden im Bereich der Leiterplattenherstellung nur alle vier Wochen durchgeführt. Dabei zeigt sich, dass die Konzentration von Nickel- und Kupferionen im Goldbad auf bis zu 500 ppm ansteigen kann (Hörhold, 2008). Die hohen Werte sind für die Herstellung von Leiterplatten tolerierbar, da nur ein kleiner Teil der Fremdionen in die Edelmetallschicht eingebaut wird. Doch selbst dieser geringe Anteil verschlechtert die elektrischen Eigenschaften der Edelmetallschicht, sodass sie für die Mikroviibrationssensoren nicht verwendet werden können. Diese Ergebnisse wurden durch die Beschichtungsversuche der Leiterplatten bei verschiedenen Dienstleistern bestätigt.

Das Problem von kontaminierten, galvanischen Edelmetallschichten kann bei der Herstellung der Kugeln vermieden werden. Für die Beschichtung der Kugeln kann auf ein frisches, galvanisches Goldbad zurückgegriffen werden. In Bild 4-23 sind die elektrischen Eigenschaften zweier Kugeln dargestellt, die mit einer Goldschicht aus einem cyanidischen und einem sulfitischen Bad überzogen wurden. Die Messspannung betrug 1,8 Volt. In den Oszilloskopbildern ist die Spannung über dem Sensor dargestellt, der in Reihe mit einem Widerstand von einem Kiloohm an die Messspannung angeschlossen war.

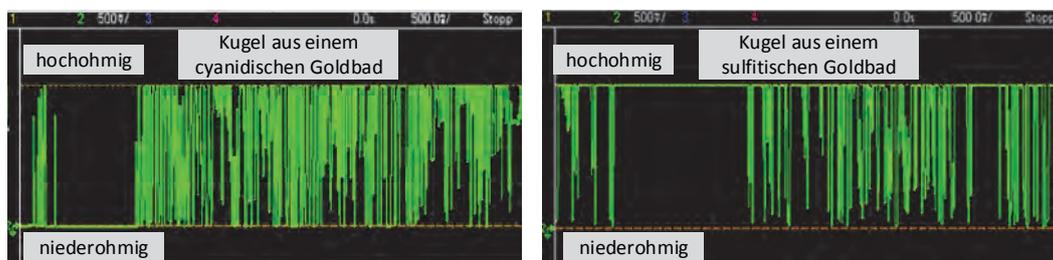


Bild 4-23: Darstellung des Schaltverhaltens von Mikrokugeln aus neuen Goldbädern

Als Kontaktpartner diente eine Testplatine, die mit einer ENEPIG-Schicht beschichtet war. Die Schaltsignale wurden für Kugeln ermittelt, die sechs Minuten bei 250 °C in einem Ofen erhitzt wurden. Beide Kugeln sind mit dem gleichen metallischen Unterbau (ENEPIG) versehen, wodurch Diffusionseinflüsse ausgeschlossen werden können. Die im sulfitischen Goldbad beschichtete Kugel

scheint stärker auf den Wärmeeintrag zu reagieren. Sie gibt weniger Impulse als die cyanidisch beschichtete Kugel ab. Die Pulse der sulfidischen Kugel sind zudem hochohmiger. Der Aufbau der Testeinrichtung ist in Bild 5-18 dargestellt.

Unter der Voraussetzung, dass der Zustand des galvanischen Bades in Ordnung ist, sind die galvanisch abgeschiedenen Oberflächen für die Herstellung der Mikrovibrationssensoren geeignet. Allerdings birgt die Prozessführung bei der Beschichtung der Leiterplatten viele Kontaminationsquellen, sodass die Leiterplatten mittlerweile mit einer chemischen Edelmetallschicht überzogen werden.

Die Kugeln werden aus Gründen der mechanischen Haltbarkeit wird sie 0,5 µm messenden galvanischen Feingoldschicht überzogen (Kapitel 5.8). Als Diffusionsbarriere dient eine ENEPIG-Schicht unter dem Feingold.

4.5.3 Chemische Metallabscheidung

Seit dem Jahr 2012 stehen kommerzielle Prozesse zur elektrochemischen Beschichtung von Leiterplatten mit Nickel-, Palladium-, Goldschichten zur Verfügung. In den Prozessen werden zunächst Nickel-Phosphor, dann Palladium-Phosphor und schließlich Gold auf dem Kupfer der Leiterplatten abgeschieden. Der Phosphor stammt aus dem Reduktionsmittel Hypophosphit (Kapitel 2.7.10) und führt zu einer leicht amorphen Abscheidung des Nickels und des Palladiums (Bild 6-17).

Das Palladium verbessert die technischen Eigenschaften der Leiterplattenoberfläche im Vergleich zur preiswerten ENIG³³-Schicht erheblich. Bei dieser Schicht kann es zu einer Korrosion des Nickels unter der Goldschicht³⁴ kommen, die erst im Produktionsprozess beim Löten der elektronischen Bauteile erkannt wird. Palladium schützt das unterliegende Nickel vor der Korrosion im Goldbad (Milad & Walsh, 2013). Ferner ist Palladium aber auch eine hervorragende Diffusionsbarriere. Es verhindert überaus wirksam die Diffusion von Nickel an die Oberfläche der Edelmetallschicht (Kurtz & et al., 2011). Die Goldschicht dient zur Unterdrückung der katalytischen Funktion des Palladiums und verbessert die Lötbarkeit der Oberfläche.

Die Betriebstemperatur des Nickel- und des Goldbades liegen zwischen 80–90 °C. Palladium wird chemisch bei etwa 65 °C abgeschieden (Carano, 2010). Die Prozesszeiten richten sich nach den abzuscheidenden Schichtdicken und den Eigenschaften der Elektrolyte. Für eine 4–8 µm dicke Nickelschicht werden etwa 20 Minuten benötigt. Eine 500 nm starke Palladiumschicht ist nach knapp 30 Minuten aufgebaut. Die 25–40 nm starke Goldschicht wird in 5 bis 10 Minuten abgeschieden (Endres, 2012). Der Goldelektrolyt ist sauer und liegt in einem pH-Bereich zwischen 4,5 und 4,7 (Milad & Walsh, 2013).

Bei der Goldabscheidung handelt es sich um eine Austauschreaktion (Immersion Gold). Nickel tritt durch das Palladium hindurch und geht in Lösung. Gold wird auf der Oberfläche abgeschieden. Die Reaktion endet, wenn die Goldschicht geschlossen ist. Ist bei der Abscheidung der Nickelschicht eine Störung aufgetreten, weil das Nickelbad stark kontaminiert war, kann es leicht korrodieren. Die Korrosion wird durch Goldlösungen beschleunigt, aus denen bereits viel Gold abgeschieden wurde und bei denen der Anteil der Hydroniumionen erhöht ist. Hierdurch sinkt der pH-Wert der Lösung, mit der Folge eines verstärkten Angriffs des Nickels (Kapitel 6.4.2).

Dieses Problem kann umgangen werden, indem Goldelektrolyte für die chemische Abscheidung verwendet werden, deren pH-Wert bei 7,0-7,2 liegt (Milad & Walsh, 2013). Diese Elektrolyte sind allerdings noch nicht kommerziell verfügbar. Alternativ wird von der Firma Atotech ein Prozess angeboten, bei dem die Goldabscheidung durch ein Reduktionsmittel unterstützt wird. Der Abscheidemechanismus zählt zu den autokatalytischen Verfahren. Als Katalysator dient Kupfer, das im sub-ppm Bereich im Elektrolyten gelöst ist. Die Elektronen für den Prozess liefern Hypophosphit-Moleküle (Bachmann, 2013). Die autokatalytische abgeschiedene Schicht ist deutlich dichter und

³³ ENIG steht für Electroless Nickel, Immersion Gold.

³⁴ Aufgrund der dunklen Farbe des korrodierten Nickels wird dieser Effekt als „Black Pad“ bezeichnet.

besser gegen chemische Angriffe aus der Umgebung geschützt. Das Nickel wird bei diesem Prozess nicht angegriffen.

Die elektrochemischen Metallisierungsprozesse weisen gegenüber den galvanischen Verfahren zur Leiterplattenbeschichtung einen wesentlichen Vorteil auf. Die Beschichtung kann auf das bereits fertiggestellte Kupfer-Leiterbild aufgebracht werden. Auch die Lötstoppmaskierungen befinden sich bereits auf der Leiterplatte. Das bedeutet für den Mikrovibrationssensor, dass die sensorischen Oberflächen keinen weiteren nasschemischen Bearbeitungsschritten ausgesetzt werden. Ein prozessbedingtes Kontaminationsrisiko aufgrund nachfolgender Fertigungsschritte besteht im Gegensatz zur galvanischen Beschichtung nicht. Einzig der Galvanoresist (Bild 4-24) auf den Außenlagen muss in einem manuellen Verfahren von den Leiterplatten abgezogen werden.

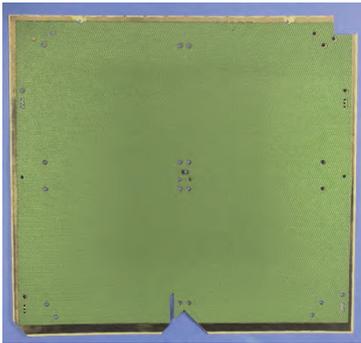


Bild 4-24: Galvanoresist zum Schutz des Kupfers vor der chemischen Metallisierung

4.6 Herstellung der Leiterplattenkerne und Prepregs

Die Herstellung der verschiedenen Einzelkomponenten des Sensors kann vollständig mit Standardprozessen der Leiterplattenfertigung durchgeführt werden. Die grundlegenden Abläufe sind in Bild 2-37 dargestellt. Die Außenlagen (Boden und Deckel) werden gemäß den Bearbeitungsschritten 1-3 vorbereitet. Dabei werden lediglich die sensorischen, das heißt die zur Kammer zugewendeten, Leiterbilder strukturiert. Die Kupferlage der Außenseite wird nicht bearbeitet.

Nach der Bohrung der Positionsmarken (Schritt 4) wird die Lötstopmmaske aufgebracht und ausgehärtet (Kapitel 2.9). Für die Mikrovibrationssensoren wurde der Lack ELPIMER SD2467 SM-DG ausgewählt, der durch sehr geringes Ausgasen gekennzeichnet ist. Er besteht den NASA-Ausgasungstest, bei dem der Lack bei 125 °C für 24 Stunden im Vakuum bei einem Druck von 10^{-6} mbar ausgelagert wird. In dieser Zeit darf der gesamte Masseverlust 1 % nicht übersteigen. Der Anteil der gesammelten, kondensierbaren, flüchtigen Materialien muss unter 0,1 % liegen (ATSM Int'l, 2006). Auf das strukturierte Leiterbild der Platten wird die ENEPIG-Oberfläche aufgebracht. Die Rückseite wird durch einen abziehbaren Galvanoresist vor der Metallisierung geschützt.

Die Kammerplatte wird entsprechend der Schritte 5-8 aufgebaut. Nach dem Bohren der Kammern wird der Galvanoresist aufgebracht und die Kupferschicht wird galvanisch verstärkt. Dabei werden auch die Durchkontaktierungen verkupfert. Anschließend wird eine etwa 3-4 μm starke Zinn-Schicht als Ätzresist aufgebracht (Böckler, 2013), der Galvanoresist gestrippt und das Leiterbild geätzt. Nach der Entfernung des Zinns wird das Kupfer der Kammer ebenfalls mit einer ENEPIG-Schicht überzogen.

Aufgrund der zylindrischen Kammerform können die Kleberschichten ebenfalls durch einfache Bohrprozesse strukturiert werden. Dieser Prozess findet zwei Tage vor dem Aufbau der Presspakete statt. Im Anschluss werden die Kleberschichten in einem gut belüfteten Raum oder Schrank gelagert, damit flüchtige Lösemittel abdampfen können. Somit können sie nicht im Sensor als Kondensat abgeschieden werden.

4.7 Oberflächenreinigungsprozesse

Reine metallische Oberflächen sind für die Mikrovibrationssensoren die Grundvoraussetzung für eine hohe Ausbeute und eine reproduzierbare elektrische Funktionalität. Oberflächenkontaminationen können im Fertigungsprozess oder außerhalb davon entstehen. Während der Prozessdurchführung können beispielsweise die schon angesprochenen Fremdmetalle in die Oberfläche migrieren. Aber auch ionische Kontaminationen können nach nasschemischen Prozessen als Rückstand auf der Oberfläche verbleiben. Zusätzlich können nach der Herstellung der Oberfläche durch unsachgemäße Handhabung Fettflecken, Fingerabdrücke, Öle, Schmierfilme oder Staubpartikel auf die Oberfläche gelangen. Die Liste möglicher Kontaminationsquellen ist lang. Daher ist bei der Bearbeitung der Materialien von vornherein darauf zu achten, Verschmutzungen und Kontaminationen zu vermeiden, anstatt sie zu beseitigen.

Die Bilder 4-25 bis 4-28 zeigen einige typische Kontaminationen. In Bild 4-25 und 4-27 sind partikelartige Kontaminationen dargestellt, in Bild 4-26 und 4-28 sind Verschleppungen nach dem Spülvorgang zu sehen.

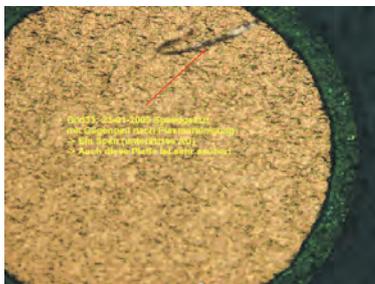


Bild 4-25: Metallspan auf Bodenpad

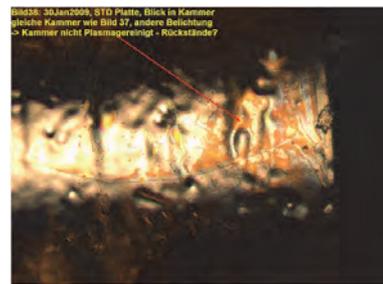


Bild 4-26: Spülverschleppung in der Kammer

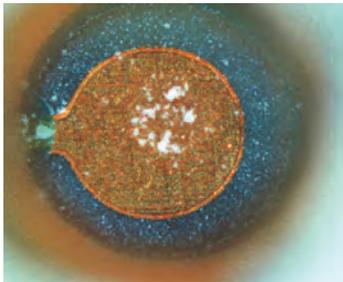


Bild 4-27: Kunststoffpartikel auf Bodenpad

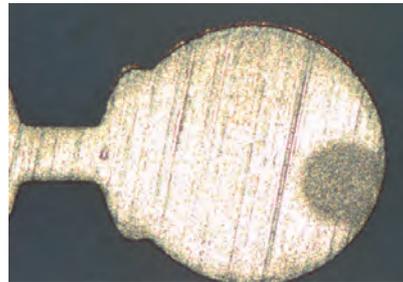


Bild 4-28: Spülverschleppung auf Deckelpad

Zur Vermeidung und Beseitigung der Oberflächenkontaminationen wurden die Reinigungs- und Spülmethode des Leiterplattenherstellers untersucht und an die Erfordernisse der Herstellung von Mikrovibrationssensoren angepasst. Deshalb wurden bei dem Leiterplattenhersteller signifikante Veränderungen an den Spülabläufen nach der Herstellung der Endoberfläche eingeführt („Gemba“-Konzept – Kapitel 2.13). Das Standardverfahren zur Herstellung galvanischer Goldschichten endete bei dem Leiterplattenhersteller mit einem Fließwasser-Spülschritt. Bei dem verwendeten Wasser handelte es sich um normales Leitungswasser. Ein weiterer Reinigungsschritt in VE³⁵-Wasser erfolgte nicht. Die Platten wiesen hohe ionische Kontaminationen auf. Teilweise waren auf den Oberflächen Kalkflecken oder andere Ablagerungen mit bloßem Auge erkennbar (Bild 4-28).

Abhilfe wurde nach der Installation einer Standspüle geschaffen, die vor jedem fertigungslos mit frischem VE-Wasser gefüllt wurde. Die in dieser Form gereinigten Platten wurden stichprobenartig nachkontrolliert. 20 Platten mit den Abmessungen von 300 × 280 mm² verursachten in einem 100-Liter-Tank einen noch akzeptablen Anstieg des Leitwertes von 4 µS/cm auf 10 µS/cm.

³⁵ VE-Wasser ist vollentsalztes Wasser. Die geforderte Leitfähigkeit zur Produktion von Mikrovibrationssensoren darf 20 µS/cm nicht übersteigen.

Zur Beseitigung partikelförmiger Kontaminationen wurde ein automatisiertes Hochdruck-Spülsystem entwickelt. Bei diesem System wird VE-Wasser mit einer Leitfähigkeit von einem $\mu\text{S}/\text{cm}$ und bei einem Druck von bis zu acht Bar über ein Rotationsdüsensystem gegen die Leiterplatten gesprüht. Nach der Reinigung werden die Platten in einem speziell dafür entworfenen Vakuumtempernschrank getrocknet. Auf 30 beheizten Einlegeböden können bis zu 60 Platten gleichzeitig bei Temperaturen bis zu $150\text{ }^\circ\text{C}$ getempert werden. Durch das Vakuum wird der Dampfdruck reduziert, sodass schon bei geringerer Temperatur gute Trocknungsergebnisse erreicht werden können. Ferner wird die Menge an gasförmigen Substanzen in dem Trockenraum drastisch reduziert. Das Risiko der Kondensatbildung aus volatilen Stoffen während der Abkühlphase wird minimiert.



Bild 4-29: VE-Druckspülsystem zur Entfernung von Partikeln von den Leiterplatten



Bild 4-30: Vakuum-Trockenschrank mit 30 Einlegeböden und Temperaturregelung

Neben der Verbesserung der nasschemischen Reinigungsmethoden wurde ein Plasmareinigungsprozess zur Beseitigung von dünnen, organischen Schichten auf den Platten eingeführt. In der Plasmareinigungsanlage (Bild 4-32) werden verschiedene Gase mithilfe einer AC-Hochspannungswechselquelle ionisiert. Das Plasma wird in der Reaktionskammer über den Rezipienten³⁶ geleitet. Dort reagiert es mit der Oberfläche der Leiterplatte. In dem Reaktor herrscht ein Druck von etwa $0,1\text{ mbar}$. Die gasförmigen Reaktionsprodukte werden über die Vakuumpumpe abgesaugt (Bild 4-31).

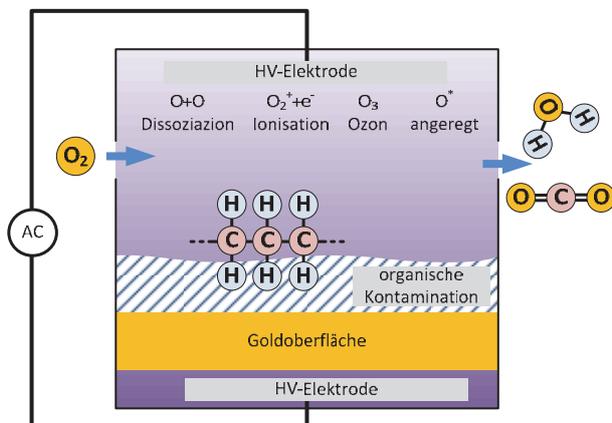


Bild 4-31: Schematische Darstellung des Reaktionsablaufs im Sauerstoffplasma

Zur Beseitigung von organischen Rückständen werden die Platten bei einer Generatorleistung von 800 Watt für eine Dauer von 45 Sekunden mit CF_4 -Plasma, danach 300 Sekunden mit O_2 -Plasma

³⁶ Der Rezipient sind die Leiterplatten des Mikrovibrationssensors.

behandelt. Die Behandlung mit dem Sauerstoffplasma führt zu einer Oxidation der Metalle. Selbst Edelmetalle wie Gold können oxidieren. Daher werden im dritten Prozessschritt die metallischen Oberflächen mit einem Ar-H₂-Plasma für 300 Sekunden reduziert. Vor der Öffnung der Kammer wird diese mit Stickstoff geflutet. Die Prozesstemperatur auf den Leiterplatten liegt bei etwa 80 °C.

Die Plasmareinigung von Werkstoffen ist überaus effizient: Das Plasma ist sehr spaltgänglich, es erreicht einen hohen Entfettungsgrad, der Prozess ist einfach kontrollierbar und der Reinigungsprozess erfolgt bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen (Diener electronic GmbH, 2008). Die Ergebnisse der Plasmareinigung waren zunächst überaus positiv. Der Fertigungsausschuss konnte um über 50 % reduziert werden. Mit zunehmender Optimierung der nasschemischen Prozesse und der Umstellung auf elektrochemische Beschichtungsverfahren konnte jedoch auf die Plasmareinigung vollständig verzichtet werden.



Bild 4-32: Niederdruck-Plasmareinigungsanlage mit vier Prozessgasen O₂, CF₄, Ar-H₂, N₂

4.8 Kleberdeposition und –vorbehandlung

Die drei Platten, aus denen der Mikrovibrationssensor aufgebaut wird, werden mithilfe strukturierter Klebefilme zusammengefügt. Die Strukturierung erfolgt mit einem einfachen Bohrprozess (Kapitel 4.4.1 und Bild 3-2). Alternativ könnte der Kleber gestanzt oder gelasert werden. Die beiden Prozesse scheiden aber auch aus wirtschaftlichen Gründen aus. Die Aussparungen im Kleber dienen dazu, die Kammer frei von Kleber zu halten (Bild 4-8). Zur Erhöhung seiner mechanischen Stabilität ist der Film auf ein beschichtetes Papier aufgewickelt. Die Filme befinden sich im vorpolymerisierten B-Zustand. Dennoch weisen sie einen hohen Anteil an flüchtigen Lösemitteln auf. In den technischen Informationen des Klebers wird darauf hingewiesen, dass er nur in gut belüfteten Räumen verarbeitet werden darf (DuPont, 2012). Kondensieren diese Lösemittel auf den sensorischen Oberflächen in der Abkühlphase des Laminiervorganges, so können sie deren Leitfähigkeit verringern (Bild 2-14). Daher werden die Klebefilme vor der Laminierung für 24 Stunden bei Raumtemperatur in einem Lagerschrank mit Ablufteinrichtung gelagert, damit ein Teil der überschüssigen Lösemittel abdampfen kann.

Vor der Laminierung der Vibrationssensorplatten ist eine Vormontage erforderlich, bei welcher der Kleber in seiner Position zur Boden- oder Deckplatte fixiert wird. Hierfür wird der gebohrte und noch papierbeschichtete Klebefilm über ein passives, mechanisches Justagesystem hochgenau zur Boden- oder Deckplatte ausgerichtet. Mit Heizpatronen wird der Klebefilm punktuell fixiert. Danach wird das Schutzpapier abgezogen. Dieser Arbeitsgang ist sehr aufwendig und fehleranfällig, da sich der Klebefilm sehr leicht verzieht. Gegebenenfalls kann der Kleber mit einem Heizstift umlaufend an den Kanten fixiert werden.

Der Aufwand entfällt weitgehend bei der Verarbeitung von Prepregs. Sie verfügen aufgrund der Glasgewebeeinlage über eine deutlich erhöhte mechanische Stabilität.

Die fertigungstechnisch eleganteste Methode des Kleberauftrags stellt das Siebdruckverfahren von druckfähigen Klebern im A-Zustand dar. Vor der Laminierung ist er in einen höherviskosen B-Zustand zu überführen, um die Fließfähigkeit des Klebstoffes zu reduzieren. Das erforderliche Strukturbild wird direkt im Druckprozess übertragen. Der Prozess ist nach etwa 30 Sekunden abgeschlossen. Der Zeitgewinn ist enorm, da der Bohrprozess für eine Kleber- oder Prepreglage im Fall der Mikrovibrationssensoren etwa 4 Minuten dauert. Dieser Vorteil wird allerdings durch die Nachteile des Verfahrens teilweise aufgehoben:

- Das Ausbluten der Lösemittel des Klebers.
- Die Einstellung eines geeigneten Trocknungsgrades (B-Zustand) zur Erhöhung der Viskosität im Laminierprozess.
- Die Auswahl eines geeigneten Klebstoffes unter Berücksichtigung der Verträglichkeit mit nachfolgenden Prozessen (Beständigkeit in Galvanikbädern, Verschmierung im Bohrprozess, Ausgasung, Wasseraufnahme, Lötbeständigkeit, etc.).

Epoxidharze bluten durch die Migration von unvernetzten, niedermolekularen Bestandteilen und Lösungsmitteln aus (Ebnesajjad, 2010). Der Prozess der Ausblutung kann durch eine Erwärmung der Oberfläche unmittelbar nach dem Siebdruck vermindert werden. Diese Erwärmung kann jedoch bereits die Polymerisation einleiten und die Überführung des Harzes in einen stabilen B-Zustand beeinflussen. Dieser Prozess ist aufwendig und nicht mit jedem Klebstoff zuverlässig realisierbar.

Eine Alternative zu den rein thermisch vernetzenden Epoxiden sind UV-empfindliche Klebstoffe. Diese gehen durch UV-Bestrahlung in den B-Zustand über und werden wie Prepregs zu einem späteren Zeitpunkt thermisch nachgehärtet. Anwendung finden diese Klebstoffe primär in der Montage von Gläsern für Kamerasysteme in Handys (Delo GmbH, 2011). Die Klebstoffe befinden sich allerdings noch in einem Entwicklungsstadium. Die getesteten Produkte waren noch nicht für die Herstellung von Mikrovibrationssensoren geeignet.

Daher wurden Versuche mit einem preiswerten SMD-Klebstoff aufgebaut (Delo GmbH, 2011a). Dieser wurde über ein Zeit-Temperaturprofil mit einer Temperatur von 125 °C und einer Zeit von 45 Sekunden in den B-Zustand überführt. Die mit Klebstoff bedruckten Platten wurden sehr genau übereinandergelegt und in einer Leiterplattenpresse bei einem Druck von 5 Bar und einer Temperatur von 150 °C für 10 Minuten verpresst. Die strukturelle Integrität des durchgehärteten Klebers und der Leiterplattenkerne war nach der Laminierung hervorragend. In Zugtests wurde ermittelt, dass die schwächste Stelle nicht die Klebeschicht ist, sondern die Verbindung zwischen dem Harz der Leiterplatte und der Glasfasermatrix. Die elektrischen Tests der Sensoren ergaben, dass sowohl der gewählte Klebstoff als auch der Prozess prinzipiell geeignet sind, funktionsfähige Sensoren mit diesem Verfahren herzustellen. Die Prozessführung ist für eine Produktion im größeren Rahmen allerdings noch zu optimieren. Dies betrifft insbesondere das Siebdruckverfahren. Eine gleichmäßige Kleberschichtdicke über das gesamte Substrat ist Voraussetzung dafür, dass kein Klebstoff in die Kammer fließt. Eine schief stehende oder defekte Rakel verursacht einen inhomogenen Kleberauftrag. Untersuchungen auf 100×100 mm² großen Substraten haben ergeben, dass die Schichtdicke einseitig bis zu 8 % zunehmen kann (Blank, Leyrer, & Osswald, 2013). Die maximal zulässige Höhenschwankung sollte jedoch unter 4 % liegen. Hierfür muss die Rakel aufwendig tariert werden.

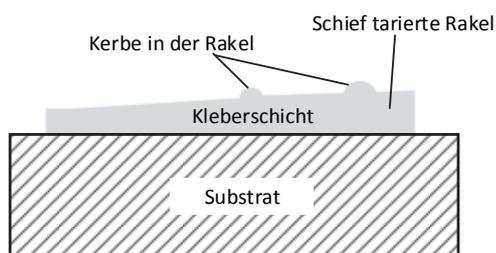


Bild 4-33: Ungleichmäßiger Klebstoffaufdruck infolge defekter und schlecht tariertter Rakel

4.9 Laminierprozesse für Mikrovibrationsschalter

Im Pressvorgang werden die zusammengelegten Platten mit einem definierten Druck-Zeit-Vakuumprofil zusammengefügt. Mehrlagenleiterplatten mit Feinstleiterstrukturen erfordern vor der Verpressung eine sehr genaue Ausrichtung (Registrierung) der Lagen zueinander. Nur so können die einzelnen Lagen über die Durchkontaktierungen zuverlässig miteinander verbunden werden. Bei der Ausrichtung ist die Dimensionsstabilität der Platten zu berücksichtigen, da die Platten abhängig von der Stärke und vom Kupferbelag nach der Laminierung unterschiedlich schrumpfen. Generell gilt, dass dicke Leiterplatten mit einem hohen Kupferanteil nach der thermischen Behandlung einen geringeren Verzug aufweisen als dünne Platten mit wenig Kupfer. Aber auch die Entfernung des Kupfers im Ätzschritt führt zu einer Änderung der Abmessungen der Platten, weil ein Teil der inneren Spannung des Glasgewebes leichter abgebaut werden kann (Xu P., 2010).

Die Verzüge werden experimentell ermittelt, indem einige Justagemarken in die zu verpressenden Platten eingebracht werden und nach jedem Prozessschritt ausgemessen werden. Die 300×280 mm² großen Kammerplatten verziehen sich im Gesamtprozess bis zu 0,1 mm (Hörhold, 2013). Aus der Differenz der Positionen der Bohrlöcher vor und nach der Prozessierung erhält man einen Faktor, der in die Layoutdaten als Korrekturfaktor einfließt (Kapitel 4.2). Der Gesamtversatz zwischen der Kammer und dem Deckel bzw. dem Boden kann somit in der Regel unter 70 µm gehalten werden.

Dennoch treten immer wieder größere Abweichungen zwischen Boden (Deckel)- und Kammerplatte auf (Bild 4-34). Die größten Ungenauigkeiten entstehen bei einem unzureichenden Aufbau der Presspakete bzw. Fehlern der Stanzung der Passstiftmarken.

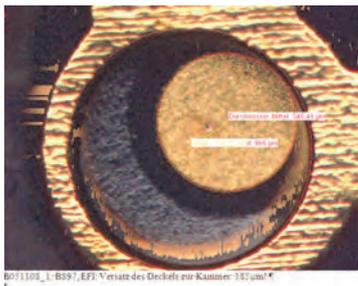


Bild 4-34: Versatz der Boden- zur Kammerplatte. Der Versatz beträgt 185 µm.

Der Aufbau eines Presspaketes ist in Bild 4-35 dargestellt. Die Leiterplattenkerne und der Klebefilm werden von Druckausgleichsfolien umgeben. Die 300 µm starke Druckausgleichsfolie (Pacothane Technologies, 2013) wird im Druckprozess sehr weich. Sie gleicht Unebenheiten des Leiterplattenbildes aus und sorgt für eine gleichmäßige Druckverteilung. Sie muss allerdings durch eine dünne Teflonfolie von dem Kernmaterial getrennt werden, ansonsten könnte die Druckausgleichsfolie nicht vom Leiterplattenmaterial getrennt werden.

Die Kammerplatte wird mithilfe zweier 18 µm starker Kupferfolien und einer Teflonfolie von der Druckausgleichsfolie getrennt. Die Kupferfolie verhindert das Einreißen der Teflonfolie über den Kammerbohrungen und das Verkleben der Bohrungen mit dem Druckausgleichsmaterial.

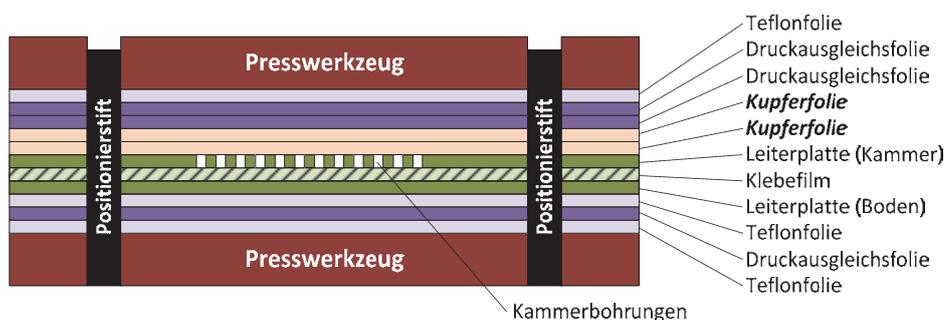


Bild 4-35: Aufbau des Pressstapels für das Laminieren der Vibrationssensoren

In einem typischen Pressvorgang ist die Presse bereits auf 80 °C vorgeheizt. Nach dem Einlegen des Presspakets in die Presse wird die Presskammer bis auf einen Restdruck von 1 mbar evakuiert, damit die Platten ohne Lufteinschlüsse verpresst werden. Der Unterdruck wird für 10 Minuten gehalten, damit alle volatilen Stoffe aus der Kammer herausgepumpt werden. Danach wird der Pressdruck aufgebaut und die Temperatur auf die Aushärtetemperatur angehoben. Die Vakuumpumpe bleibt während der gesamten Zeit aktiv, um weitere Reaktionsprodukte abzusaugen. Der Pressstapel wird 55 Minuten auf Temperatur gehalten, um die vollständige Polymerisation des Klebers zu erreichen. Danach werden die Pressplatten unter Aufrechterhaltung des Drucks wieder auf 80 °C abgekühlt.

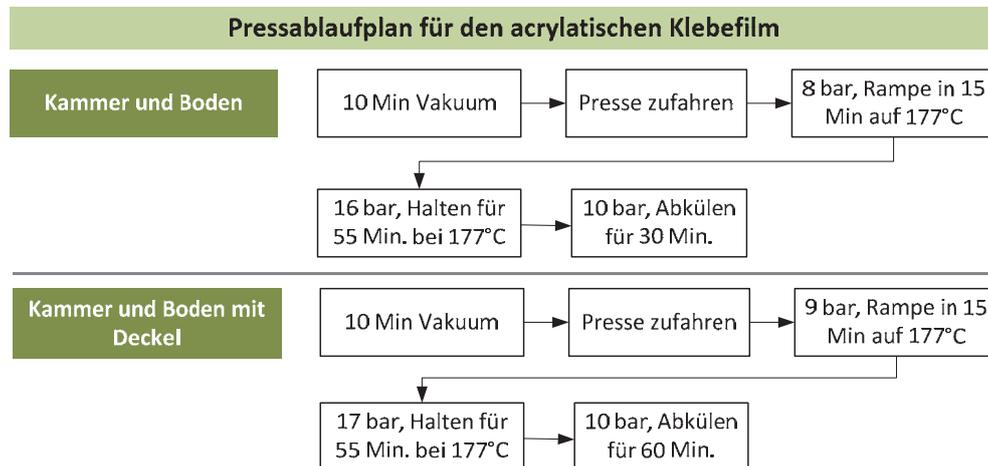


Bild 4-36: Laminierprozess für die Vibrationssensoren mit acrylatischem Kleber

4.10 Befüllung der Kugeln

Nachdem die Kammerplatten mit dem Boden verpresst wurden, können die Kugeln in die nach unten verschlossenen Kavitäten eingebracht werden. Dieser Prozess basiert auf einem Schütt- und Rakelverfahren. Sofern der in Gleichung (4.1) angegebene Zusammenhang zwischen den Abmessungen des Hohlräume und des Kugeldurchmessers gültig ist, kann jeweils nur eine Kugel vollständig in den Hohlraum fallen. Eine weitere Kugel kann nur so tief in den verbleibenden Raum eintauchen, dass ihr Schwerpunkt oberhalb der oberen Kante des Hohlräume liegt. Die überschüssigen Kugeln können mit einer Rakel oder einem breiten Pinsel aus der Bohrung entfernt werden (Bild 4-37).

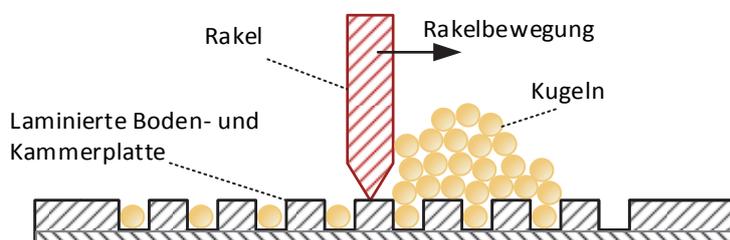


Bild 4-37: Befüllung der Kugeln im Schütt- und Rakelprozess

Die Überprüfung, ob alle Bohrungen mit einer Kugel gefüllt sind, erfolgt optisch. Fehlende Kugeln werden manuell eingebracht.

4.11 Sensor-Endmontage

Nach der Befüllung der Kugeln wird der Deckel auf den bereits zusammengefügteten Boden-Kammernutzen auflaminiert. Dieser Plattenverbund aus Boden-Kammer-Deckel ist nun identisch zu einer normalen Mehrlagenleiterplatte. Die elektrische Anbindung der sensorischen Innenlagen erfolgt

mit Durchkontaktierungen, wie in Kapitel 2.9 beschrieben. Die Bohrung für die Durchkontaktierung wird an der Kammer ausgerichtet, da die Außenlagen noch vollflächig mit Kupfer belegt sind. Hierfür können Röntgenbohrmaschinen verwendet werden. Für die Herstellung der Mikroviibrationssensoren wurde jedoch eine andere Lösung entwickelt, da auf derartige Geräte nicht zurückgegriffen werden konnte. In den Ecken der Decklage werden Freistellungen eingebracht, durch die Referenzmarken auf der Kammer zu erkennen sind. Der Bohrprozess für die Durchkontaktierungen wird anhand dieser Marken ausgerichtet. Nach der Herstellung der Bohrungen werden deren Innenwandungen verkupfert und das äußere Leiterbild hergestellt.

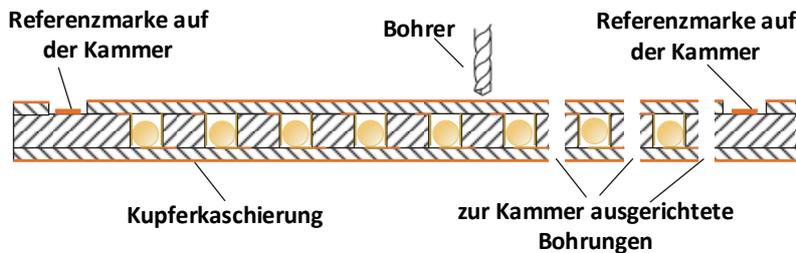


Bild 4-38: Prozess zur Anbindung der sensorischen Flächen an die Außenkontakte

In früheren Herstellungsphasen wurde der Bohrprozess rein mechanisch über Passbohrungen der Einzelplatten ausgerichtet. Zudem wurden zwei Nutzen in einem Bohrpaket zusammengefasst. Infolge von Verschiebungen beim Laminierprozess und bei der Paketbildung trat ein Versatz von bis zu bis zu $250\ \mu\text{m}$ zwischen den Kammerbohrungen und den Durchkontaktierungen auf Bild 4-39. Dies ist kritisch, da die Symmetrie des Sensoraufbaus gestört wird und die Durchkontaktierung sehr nah an der Freistellung des Klebers gebohrt wird (vgl. Kapitel 4.9). Es besteht die Gefahr, dass die Sensorzelle nicht mehr abgedichtet wird. In den nachfolgenden galvanischen Prozessen kann Elektrolytlösung in den sensorischen Bereich eindringen und den Sensor zerstören.

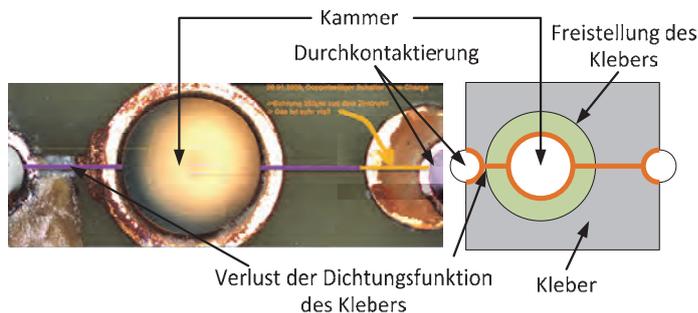


Bild 4-39: Versatz der äußeren Durchkontaktierungen zur Kammerbohrung

4.12 Verpackung und Transport

Bereits bei dem Entwurf des Sensorelementes mussten die Verpackungsmethode, der Transport und die Verarbeitung beim Kunden berücksichtigt werden. Kleine Bauteile der Elektrotechnik werden bevorzugt auf „Gurt und Rolle“ (Bild 4-40) im Tray (Bild 4-41) vertrieben. Beide Verpackungsformen erlauben die direkte Verarbeitung der Mikroviibrationssensoren in automatischen SMD-Bestückautomaten.

Die Kosten für die Tiefziehwerkzeuge und Spritzgusswerkzeuge für die Trays sind sehr hoch. Zur Vermeidung der Kosten für eines neues Tiefziehwerkzeug für den Gurt wurden die Außenabmessungen des Sensors an die Außenabmessungen bestehender Keramik-Kondensatoren der Bauform 1210 ($3,30 \times 2,7 \times 2,0\ \text{mm}^3$) angepasst. Gurte aus unterschiedlichen, umweltfreundlichen Materialien sind im Handel erhältlich.

Die Bestückung der Gurttaschen erfolgt mit einem Gurtautomaten. Die Sensoren werden in einen „Rütteltopf“ eingefüllt. Die Schwingungen befördern die Mikroviibrationssensoren aus dem Topf heraus. Sie werden über eine spiralförmige auf eine gerade Förderrinne transportiert. Optische Sensoren erkennen die Lage der Mikroviibrationssensoren. Verdrehte Sensoren werden mit einem

Druckluftimpuls wieder in die Förderrinne zurückgeblasen. Die korrekt ausgerichteten Komponenten werden mit einem druckluftgesteuerten Umsetzer in die Gurttaschen gesetzt.

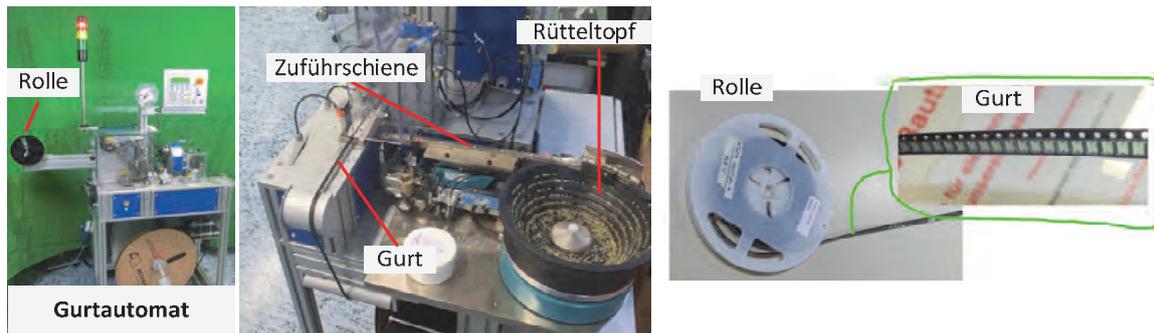


Bild 4-40: Verpackung der Sensoren im Gurt auf der Rolle. Links und in der Mitte ist der Gurtautomat dargestellt, rechts die Sensoren auf Gurt und Rolle.

Der Gurtautomat ist sehr unflexibel und intolerant gegen Bauteilvariationen. Geringe Variationen der Bauteildicke oder der Farbe des Leiterplattenmaterials führen zu Störungen, weshalb die Maschine ständig von Bedienpersonal betreut werden muss. Die automatische Gurtung funktioniert mit dieser Einrichtung zufriedenstellend, sofern alle vorhergehenden Prozessschritte optimal durchgeführt wurden.

Einige Applikationen wie Fahrradrücklichter oder beleuchtet Hundehalsbänder erfordern eine um 90° verdrehte Montage des Sensors auf dem Substrat. Für diese Anwendungen ist trotz der hohen Kosten ein „Tray“ gemäß den Jedec Spezifikationen CO-030-A (Jedec, 1995) konstruiert und als Spritzgussteil umgesetzt worden (Bild 4-41 und Bild 4-42).

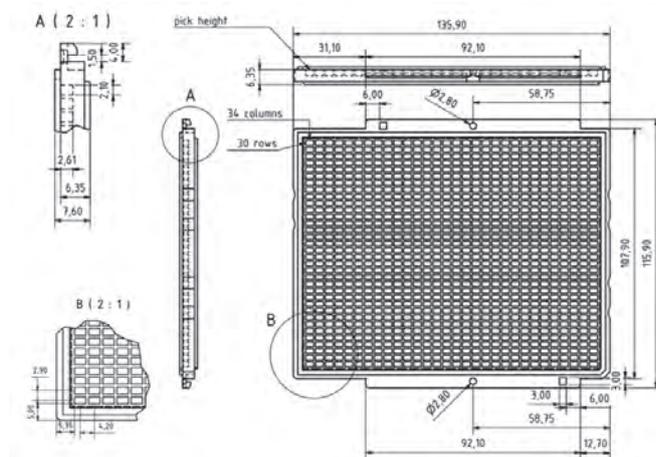


Bild 4-41: Konstruktionszeichnung des Trays zur Aufnahme der um 90° gedrehten Sensoren

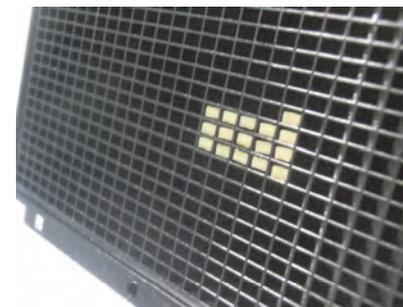


Bild 4-42: Reale Umsetzung des Trays

Das Tray wird von dem Die-Bonder mit den Sensoren bestückt, die im elektrischen Funktionstest als funktionsfähig charakterisiert wurden. Der Sensor wird von der Waferfolie abgenommen, mit dem Fliparm um 90° gedreht und an den Bestückarm übergeben. Der Bestückarm setzt die Sensoren lagerichtig in die Taschen des Trays ein.

Vor dem Versand werden die Trays und die gegurteten Rollen in aluminiumbedampfte, dampfdichte ESD³⁷-Kunststofftüten gefüllt. Dazu werden spezielle Silica-Gel-Beutel in die Tüte gegeben, welche die Luftfeuchtigkeit im Inneren niedrig halten. Nach der Öffnung der Verpackung müssen die Sensoren innerhalb von 168 Stunden verarbeitet werden, ansonsten können Verarbeitungsdefekte

³⁷ ESD steht für Electrostatic DisCharge

infolge aufgenommener Feuchtigkeit auftreten. Damit erfüllen die Sensoren die MSL³⁸-Klasse 3, die in der IPC-M-109 definiert ist (NXP, 2013).

MSL	Bedingungen	Zulässige offene Lagerzeit
1	<=30 °C und 85 % r.F.	unbegrenzt
2	<=30 °C und 60 % r.F.	1 Jahr
2a	<=30 °C und 60 % r.F.	4 Wochen
3	<=30 °C und 60 % r.F.	168 Stunden
4	<=30 °C und 60 % r.F.	72 Stunden
5	<=30 °C und 60 % r.F.	48 Stunden
5a	<=30 °C und 60 % r.F.	24 Stunden
6	<=30 °C und 60 % r.F.	6 Stunden

Tabelle 4-4: Lagerbedingungen bei verschiedenen MSL-Stufen

4.13 Verfahren zur Herstellung intelligenter Mikrovibrationssensoren

Intelligente Mikrovibrationssensoren werden in einem zweistufigen Verfahren hergestellt. Der sensorische Plattenverbund mit der Kugel kann unabhängig von der intelligenten Bodengruppe mit dem eingebetteten Chip hergestellt werden (Bild 3-7). Erst nach Fertigstellung der einzelnen Platten werden die beiden Baugruppen mechanisch verbunden und mithilfe von Durchkontaktierungen elektrisch untereinander verbunden. Dadurch können die Prozesse zur Herstellung der Boden- und der Sensorgruppe parallel durchgeführt werden.

Die intelligente Bodengruppe, in die der Chip integriert wird, ist in Bild 4-43 dargestellt. Die Großplatte, der Nutzen, ist in vier Wafer unterteilt, auf denen sich die einzelnen Kavitäten zur Aufnahme des Silizium-Chips befinden. Das Konzept der Anordnung Sensoren in Matrixform wurde auch für diese Bauform übernommen.

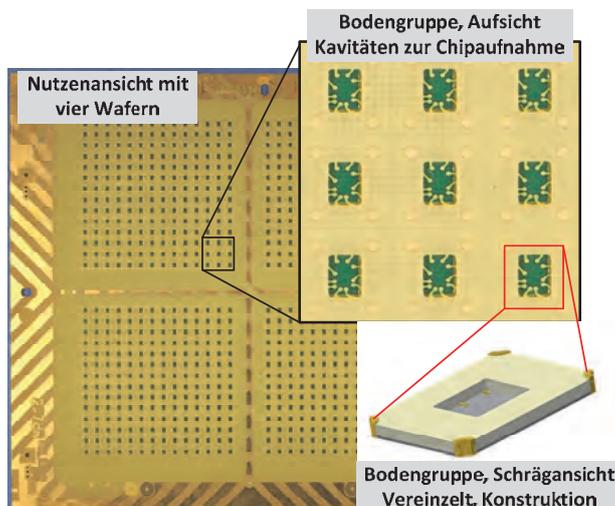


Bild 4-43: Bodengruppe vor der Bestückung der Mikrocontroller in ungehäuster Chipform

Vor dem Bonden des Chips in die Kavität werden die Anschlussstellen der Chips in einem speziellen Ball-Wedge-Bondverfahren mit Gold-Stud-Bumps versehen (Bild 4-44). Da die Lötstopmmaske der Chip-Trägerplatte ähnlich hoch aufbaut wie die Gold-Stud-Bumps, werden zwei Bumps übereinander gesetzt. Für den Bondingprozess des Chips wird eine definierte Menge eines Epoxid-Klebstoffes mittels eines automatischen Dispensprozesses in die Kavität eingebracht.

³⁸ MSL bedeutet Moisture Sensitivity Level

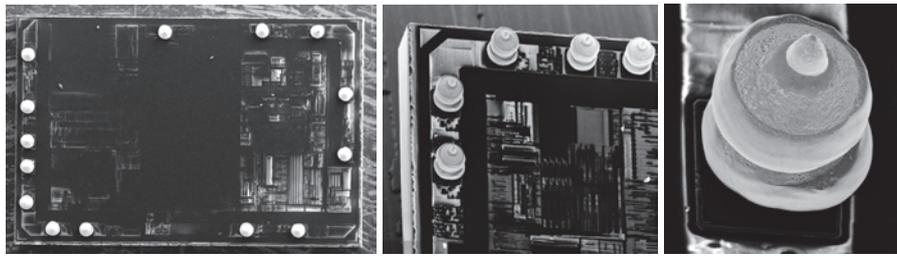


Bild 4-44: Gold-Stud-Bumps, auf einem PIC12LF1822-Mikrocontroller. Links ist der Controller in der Aufsicht dargestellt, in der Mitte und rechts eine vergrößerte Schrägsicht der Bumps.

Derart präpariert kann das Silizium als „Flip-Chip“ auf die Kontaktflächen der Bodengruppe gebondet werden. Der Kleber wird unter Druck und bei Temperaturen von etwa 150 °C in einem „Snap-Cure-Verfahren“ innerhalb von fünf Sekunden ausgehärtet. Seine Endhärte erreicht der Kleber durch eine weitere Wärmebehandlung, wobei der Klebstoff nochmals für 90 Minuten bei etwa 130 °C gelagert wird. Dieser Wärmeeintrag wird bei der Herstellung der Mikrovibrationssensoren in den weiteren Laminierungsprozessen erzeugt. Ein zusätzlicher Fertigungsschritt ist nicht erforderlich.

Für den Die-Bonding-Prozess wurden zwei unterschiedliche Prozess- und Klebstoffvarianten evaluiert. Bei dem einen Prozess handelt es sich um einen anisotropen Leit-Klebeprozess. Der verwendete Klebstoff AC365 (Delo GmbH, 2013) ist mit kleinen Nickel-Gold-Partikeln gefüllt, deren mittlerer Durchmesser 2,5 µm beträgt. Aufgrund des niedrigen Füllgrades sind anisotrope Kleber mit leitfähigen Partikeln im Normalzustand elektrisch nicht leitend. Der Anteil leitfähiger Partikel liegt bei diesen Klebstoffen in einem Bereich von 5 Volumenprozent bzw. 20 Masseprozent (Born, 2001). Erst wenn in einem Fügeprozess ein hoher Druck ausgeübt wird, kann sich ein elektrischer Kontakt in Bereichen enger Spalten ausbilden (Bild 4-45).

Bei dem anderen Prozess handelt es sich um ein Engspaltklebeverfahren. Der Klebstoff ist bei diesem Verfahren ungefüllt. Er hat die Typenkennung NU355 (Delo GmbH, 2011). Der elektrische Kontakt entsteht durch die direkte Berührung der metallischen Flächen des Gold-Stud-Bumps und der Leiterbahn. Dieses Verfahren ist auf ebene Kontaktflächen angewiesen.

Der Bestückvorgang muss bei beiden Verfahren unter hohem Druck durchgeführt werden, damit ein zuverlässiger Kontakt hergestellt wird. Übliche Druckwerte liegen in einem Bereich von 1-2 MPa (Delo GmbH, 2011). Dieser Druck kann mit modernen, automatisierten Bestückautomaten problemlos aufgebracht werden. Die im Rahmen dieser Arbeit aufgebauten Sensormuster wurden mit einem Druck von 3 MPa hergestellt. Die elektrischen Anbindungen des Chips an die Kontaktflächen der Leiterplatten wiesen keine Fehler auf.

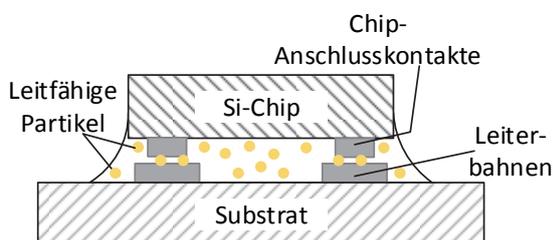


Bild 4-45: Ausbildung einer leitfähigen Brücke mit anisotropem Klebstoff

Die Anforderungen an die Qualität des Leiterbildes der Chip-Trägerplatte und der Bestückgenauigkeit des Flip-Chip-Prozesses sind sehr hoch. Der enge Abstand der Anschlusskontakte auf dem Chip von 92 µm (Microchip Tech. Inc., 2011) erfordert die Bestückung des Chips mit einer Platziergenauigkeit, die besser als 10 µm ist. Bei einem höheren Versatz oder einer Drehung des Chips können einzelne Anschlüsse kurzgeschlossen werden, wodurch der Sensor funktionsunfähig wird. Eine Stelle des Chips ist besonders anfällig gegen Kurzschlüsse. Diese ist im linken Bereich des Bildes 4-46 rot umrandet und als Engstelle markiert. Die Kavität erscheint in dem Röntgenbild leicht heller. Sie ist mit einer gelben, gestrichelten Linie hervorgehoben. Die Gold-Stud-Bumps treten als kleine, schwarze Punkte in Erscheinung. Im Außenbereich sieht man die Pads für die Durchkontaktierung und die

Anbindung des sensorischen Elementes an den Chip. Die Sensorkammer ist in dieser Aufnahme nicht montiert. Im rechten Teil des Bildes kann man in der Schrägansicht erkennen, dass zwei Gold-Stud-Bumps übereinander gesetzt sind. Dadurch wird der Abstand zur Chip-Trägerplatte erhöht.

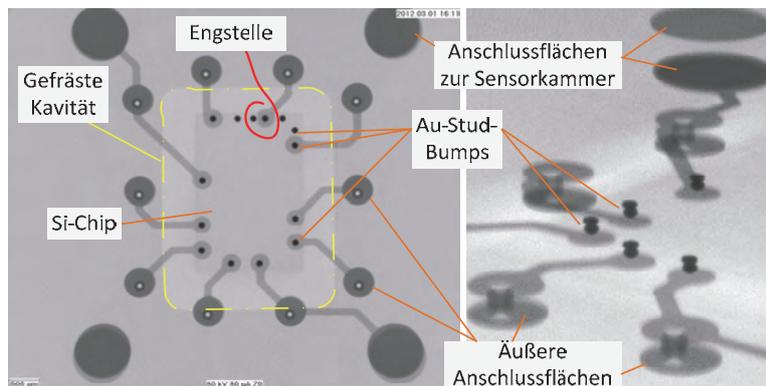


Bild 4-46: Röntgenbild der Chip-Trägerplatte mit Flip-Chip. Links ist die Chip-Trägerplatte mit eingebettetem Chip dargestellt, rechts eine Schrägansicht.

Die Prozess- und Verfahrenseignung wurde durch die Herstellung von funktionsfähigen Mustern nachgewiesen. Die Prozesse können allerdings weiter optimiert werden. Durch die Nutzung von Laserstrukturierungstechniken und Verwendung von Laservias ist eine Erhöhung des Integrationsgrades möglich. Eine Verringerung der Abmessungen von $4,7 \times 4,2 \times 2,5 \text{ mm}^3$ (L×B×H) auf $3,5 \times 3,0 \times 2,2 \text{ mm}^3$ ist realistisch, wodurch sich der Flächenbedarf des intelligenten Mikrovibrationssensors halbieren würde. Bei der Integration der Komponenten in die Leiterplatte ist jedoch zu beachten, dass hochgenaue Bestückmaschinen mit einer Platziergenauigkeit im Bereich von $10 \mu\text{m}$ die großen Nutzenformate der Leiterplattenindustrie heute noch nicht unterstützen.

5 Test- und Qualitätssicherungsverfahren

Qualität muss nach der EN ISO 9000:2005 messbar sein. Für Mikrovibrationssensoren bedeutet dies, dass die elektrische Funktion unter definierten und wiederholbaren Bedingungen messtechnisch erfasst werden muss. Dabei sind viele verschiedene Randbedingungen zu berücksichtigen, wie

- der Betriebstemperaturbereich,
- der Lagertemperaturbereich,
- die mechanische Belastbarkeit,
- die geforderte Lebensdauer,
- die Eignung für den Reflow-Lötprozess.

Die Durchführung des elektrischen Funktionstests kann auf Einzelsensorbasis oder im Waferverbund erfolgen. Für die Mikrovibrationssensoren wurde ein Testkonzept entwickelt, mit dem die elektrische Funktionalität der Sensoren auf Waferbasis bei Raumtemperatur ermittelt wird. Zusätzlich werden auf Stichprobenbasis Löttests durchgeführt. Erst wenn die Ergebnisse beider Prüfungen positiv sind, haben die Sensoren eines Wafers den elektrischen Funktionstest bestanden und können ausgeliefert werden. Die Ermittlung des Betriebs- und Lagertemperaturbereiches, die mechanische Belastbarkeit sowie Lebensdauertests werden nur bei der Einführung eines neuen Sensortyps oder bei Modifikationen der Materialien durchgeführt.

5.1 Qualitätsanforderungen

Die Ansprüche an die Qualität eines Produktes leiten sich aus den Anforderungen des Marktes, des Gesetzgebers oder aus anderen gesellschaftlichen Werten und Normen ab. Die Prüfung und Überwachung dieser Anforderungen ist ein unverzichtbarer, oftmals aufwendiger Teil des Produktentstehungsprozesses. Für die Überprüfung der Qualitätsanforderungen elektronischer Systeme werden Tests durchgeführt, die grundsätzlich in zwei Klassen unterteilt werden können. Die erste Klasse umfasst Methoden, bei denen der Prüfling voll in Betrieb ist und elektrisch bestromt wird („in operando“). Die zweite Klasse beinhaltet Verfahren, bei denen die Baugruppe elektrisch deaktiviert ist.

Neben der Ermittlung der Produkteigenschaften sind die Herstellprozesse für das Produkt zu kontrollieren. Fehler, die in der Fertigung unerkannt bleiben, können zu einem Totalausfall des Produktes führen und erhebliche Kosten verursachen.

In den folgenden Abschnitten werden zunächst die Qualitätsanforderungen an den Mikrovibrationssensor diskutiert, um nachfolgend auf die Prozessanforderungen einzugehen.

5.1.1 Produktanforderungen

Ein Großteil der Qualitätsanforderungen an die Mikrovibrationssensoren in Leiterplattentechnik wurde bereits in Kapitel 1 vorgestellt. Daneben muss der Mikrovibrationssensor

- im eingeschalteten Zustand einen Widerstand unter 20 Ohm aufweisen,
- im ausgeschalteten Zustand einen Widerstand größer 10 Megaohm aufweisen,
- robust gegen mechanische Anregungen (3 Millionen Pulse a +/-3 g) sein.

Die elektrischen Eigenschaften werden für jeden Sensor bei einer Spannung von 2,0 V ermittelt. Die weiteren Produkteigenschaften werden allerdings nur stichprobenartig geprüft. Die Reflow-Lötbarkeit wird für eine kleine Sensormenge eines Wafers ermittelt. Die Klimatests und die mechanischen Belastungstests werden nur bei Prozessstörungen oder Prozessumstellungen durchgeführt.

Die Anforderungen an das Produkt können nur dann erfüllt werden, wenn die Herstellprozesse qualitativ hochwertig sind. Diese Aussage gilt gleichermaßen für die Herstellung der Halbzeuge, der Kugeln und der Leiterplatten, wie für den Aufbau des vollständigen Mikrovibrationssensors.

Die Methoden zur Produktion der Kugeln sind sehr ausgereift. Abweichungen vom spezifizierten Durchmesser von 830 µm und von der Oberflächenbeschaffenheit (Grade 28) sind selten zu beobachten. Zudem beeinflusst die Qualität der Kugel die Funktion des Sensors nur unwesentlich. Auch gegenüber Materialvariationen der Kugel ist der Sensor sehr robust. Niro-Stähle unterschiedlicher Zusammensetzung können bedenkenlos für die Herstellung der Vibrationssensoren genutzt werden.

Die Prozesse für die Herstellung der Leiterplatten des Mikrovibrationssensors sind dagegen deutlich komplexer. Alle Leiterplattenproduktionsverfahren und -materialien, sogar deren Lagerbedingungen, müssen spezifiziert werden. Die Spezifikationen werden dem Leiterplattenhersteller zusammen mit den Fertigungsdaten in einem Metadatensatz übergeben (Kapitel 4.2.2).

Die anspruchsvollsten Prozesse zur Herstellung der Mikrovibrationssensoren sind die galvanischen und elektrochemischen Verfahren zur Herstellung der sensorischen Oberflächen. Hochreine und porenfreie Schichten sind für eine einwandfreie Sensorfunktion erforderlich.

5.2 Schädigungsmechanismen

Treten bei der Herstellung der Halbzeuge oder deren Montage Fehler auf, sind diese nicht immer unmittelbar erkennbar. Erst höhere Belastungen führen zu einem frühzeitigen Ausfall des Sensors.

Die gravierendsten, auf die Sensoren wirkenden Belastungen sind thermischer und mechanischer Art. Die maximale thermische Beanspruchung tritt im Lötprozess des Systemintegrators auf. Abhängig von der Kundenapplikation variieren die mechanischen Belastungen. Die Grenzen der mechanischen Belastbarkeit der Sensoren werden in Kapitel 5.8 vorgestellt.

5.2.1 Thermische Prozessbeanspruchungen

Wärme spielt bei vielen Prozessen der Leiterplattenherstellung eine wichtige Rolle. Sie wird bewusst genutzt, um chemische oder elektrochemische Prozesse zu initiieren (Kapitel 2.4.2 und 4.5). Eine weitere Funktion einer gesteuerten Wärmezufuhr besteht in der Trocknung der Leiterplattenmaterialien vor dem Laminier- und Lötprozess. Durch die Trocknung geben sie Feuchtigkeit ab, die bei unsachgemäßer Lagerung in die Platten diffundiert ist. Die Feuchtigkeit verdampft bei hohen Löt- und Laminiertemperaturen schlagartig, sodass sich Risse, Blasen und Delaminationen in dem Leiterplattenmaterial bilden können (Zhao, 2007). Darüber hinaus führt Feuchtigkeit im Bereich der Durchkontaktierung zu schlechten oder fehlerhaften Metallisierungen.

Die Mikrovibrationsschalter werden während der Produktion und durch den Lötprozess beim Kunden mehrfach thermisch belastet. In Bild 5-1 sind die grundlegenden Verarbeitungsschritte dargestellt, bei denen thermische Belastungen auftreten. Die thermischen Prozesse sind im rechten Bereich dargestellt und orange unterlegt. Die Platten befinden sich insgesamt für einen Zeitraum von über elf Stunden bei einer Temperatur oberhalb von 120 °C, drei Stunden davon sogar bei über 180 °C. Die höchste thermische Belastung tritt beim Lötprozess des Kunden auf. Dabei wird der vereinzelte Sensor Temperaturen bis zu 260 °C ausgesetzt (Kapitel 5.2.1).

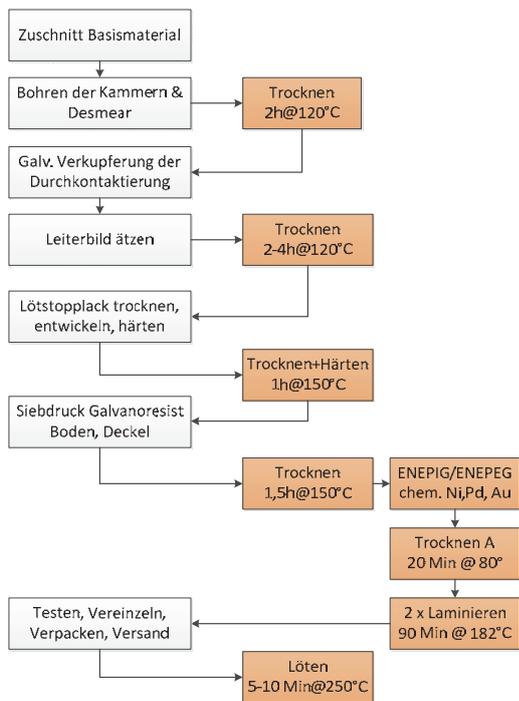


Bild 5-1: Ablauf der Herstellprozesse für Mikrovibrations-sensoren. Prozessschritte, die bei erhöhter Temperatur ausgeführt werden, sind orange unterlegt.

Aufgrund der hohen Abhängigkeit der Qualität der Sensoren von der eingelagerten Feuchtigkeit müssen die Sensormaterialien während der Herstellung häufig getrocknet werden. Eine Temperung bei hohen Temperaturen ist allerdings nicht zu empfehlen, da das Leiterplattenmaterial dann sehr viel Wasser verliert (Kapitel 6.4.1).

Werden die Trocknungsschritte so durchgeführt, wie in Bild 5-1 dargestellt, treten keine Qualitätsprobleme bei der Herstellung der Sensoren auf.

5.2.2 Schädigungen durch Lötprozesse

Durch die Umstellung der Lote auf bleifreie, RoHS kompatible Materialien ist die Liquidustemperatur der Lotmaterialien für den Aufbau elektronischer Schaltungen um etwa 40 °C auf 220 °C angestiegen. Temperaturen von bis zu 260 °C sind in der Peak-Zone des Reflow-Prozesses erforderlich, damit das Lot auf allen Stellen der elektronischen Baugruppe sicher schmilzt. Die hohe thermische Belastung führt zu einem hohen thermomechanischen Stress der Komponenten. In Bild 5-2 ist ein typisches Temperaturprofil eines Lötens dargestellt, in dem SAC305-Lote mit einer Legierungszusammensetzung von 96,5 % Zinn, 3 % Silber und 0,5 % Kupfer gelötet werden.

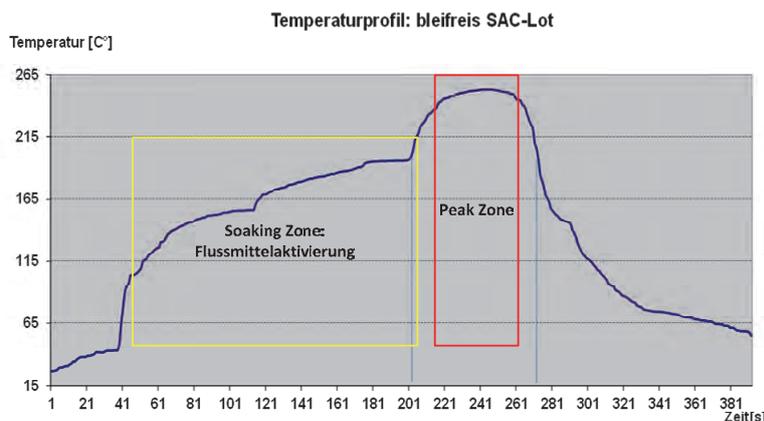


Bild 5-2: Lötprofil für bleifreie Lote mit einer Liquidustemperatur von 220 °C.

Die hohen Temperaturgradienten von bis zu 17 K/s können zu einer schlagartigen Expansion eingeschlossener Feuchtigkeit und zur Beschädigung der Leiterplatte führen.

Wenn die elektronischen Baugruppen nicht den hohen Löttemperaturen ausgesetzt werden sollen, sind alternative Verbindungstechniken wie das Leitleben oder manuelle Löttechniken anzuwenden. Die Temperaturen zum Aushärten des Leitlebers überschreiten selten 180 °C, meist liegen sie unter 150 °C. Leitlebeprozesse werden kommerziell nur für besondere Anwendungen verwendet, da die Klebmaterialien sehr viel teurer als Lote sind. Manuelle Lötverfahren belasten die Bauteilgruppe weniger, weil der manuelle Lötprozess an einer Lötstelle nach ca. 5 Sekunden abgeschlossen ist. Dieses Verfahren wird auch heute noch in Fernost in der Serienproduktion angewendet.

Die Schädigungsmechanismen infolge der hohen Löttemperaturen sind vielfältig. Die für den Sensor relevanten Mechanismen bestehen in

- Hülsenrissen in der Kammer und der Durchkontaktierung,
- Diffusion von Nicht-Edelmetallen an die Oberflächen der Kontakte,
- Korrosion von Nicht-Edelmetallen an der Oberfläche,
- Ausgasung oder Zersetzung von organischen Substanzen,
- Delaminationen des Leiterplattenmaterials, verbunden mit Rissbildung in den sensorischen Schichten.

Die mit Abstand größte Fehlerquelle, die zu beschädigten Sensoren führt, sind die Diffusion und Korrosion von Nicht-Edelmetallen an den sensorischen Oberflächen. Zwei Ursachen wurden für die Anreicherung von Nicht-Edelmetallen an der Oberfläche identifiziert (Kapitel 6.4). Einerseits können in das Edelmetallbad eingeschleppte Fremdmetalle wie Nickel, Eisen oder Kupfer in die Edelmetallschicht aufgenommen worden sein. Dieser Fehler wird häufig in galvanischen Bädern beobachtet, die zur Beschichtung von Leiterplatten eingesetzt werden.

Andererseits können Nicht-Edelmetalle durch Diffusion an die Oberfläche der Edelmetallschicht gelangen. Diffusionseffekte sind bei einer fehlenden oder ungeeigneten Diffusionssperre zu beobachten. Für den Aufbau von vergoldeten Leiterplatten wird häufig Nickel als Sperrmaterial verwendet. Es behindert die Ablagerung von Kupfer auf der Goldoberfläche sehr gut. Untersuchungen an den Kugeln für den Vibrationssensor zeigen, dass auch die Eisendiffusion durch Nickel stark verringert wird. Nickel ist dennoch für die Herstellung von Mikrovibrationssensoren nur bedingt geeignet, da das Nickel selbst an die Oberfläche des Goldes wandert (Kurtz & et al., 2011) und dort oxidieren kann.

Wird die Nickelschicht mit einer dünnen Palladiumschicht überzogen, so kann die Diffusionsrate nochmals deutlich reduziert werden. Nicht-Edelmetalle können nur an die Oberfläche gelangen, wenn die Palladiumschicht gestört ist. Eine Störung der Schicht kann abhängig von der chemischen Zusammensetzung der Bäder und der Prozessführung der Abscheidung auftreten.

Die Ergebnisse der Schichtuntersuchungen für Mikrovibrationssensoren belegen einwandfrei, dass der Immersions-Goldbeschichtungsprozess die Nickelschicht auch durch eine 500 nm starke Palladiumschicht hindurch angreifen kann. Die Palladiumschicht verliert ihre diffusionshemmenden Eigenschaften (Kapitel 6.4.2, Bild 6-18).

Die Auswirkungen organischer Kontaminationen, die aus den polymeren Werkstoffen bei hohen Löttemperaturen austreten, sind für Schaltrelais umfassend untersucht worden. Sie führen bei palladiumhaltigen Edelmetallschichten zu Verzunderungen und verschlechtern das Schaltverhalten. Bereits geringe Phenolkonzentrationen reduzieren die Leitfähigkeit von Gold-, Silber- und Palladiumoberflächen (Koidl, Rieder, & Salzmann, 1997).

Zur Ermittlung des Ausgasungsverhaltens des Leiterplattenmaterials wurde der Restgasgehalt verschiedener Materialien analysiert (Kapitel 6.4.1). Es zeigt sich, dass die meisten Leiterplattenbasismaterialien für den Aufbau von Mikrovibrationssensoren genutzt werden können.

5.3 Prüfung von Umwelteinflüssen

In der DIN EN 60068-2-xx sind eine Reihe an Prüfungen beschrieben, mit denen der Einfluss der Umwelt auf ein Bauteil ermittelt werden kann. Zu diesen gehören thermische und mechanische Prüfungen sowie korrosive Schadgastests. Die thermischen Tests beinhalten die Lagerung und den Betrieb bei variierender Temperatur und Luftfeuchtigkeit. Mechanische Prüfungen simulieren den Einfluss von Erschütterungen oder Vibrationen auf den Prüfling. Schadgasuntersuchungen sind für den Mikrovibrationssensor nicht vorgesehen. Die Tests werden sowohl im aktiven als auch im passiven, ausgeschalteten Betriebszustand durchgeführt. Die Prüfbedingungen überschreiten die realen Umweltbelastungen meist erheblich und führen zu einer vorzeitigen Alterung des Bauteils. Aus dem Alterungsverhalten können Rückschlüsse auf die Lebensdauer der Komponente gezogen werden.

Die Prüfvorschriften für die Mikrovibrationssensoren wurden aus den Vorgaben für optische Computermäuse abgeleitet. Sie sind in Tabelle 5-1 aufgeführt. Der Hoch-Tieftemperatur-Wechseltest HTWT ist hingegen für Systeme bestimmt, die im Innenraum von Kraftfahrzeugen eingesetzt werden.

Test	Abkürzung	Beschreibung
Betrieb bei Hochtemperatur und hoher Luftfeuchtigkeit	HT-HH-O	Betrieb bei 50 °C, 90 % rel. Feuchte ohne Kondensation für 48 h. Keine externen und internen Korrosionsschäden und volle Funktionsfähigkeit.
Betrieb bei tiefen Temperaturen	LT-O	Betrieb bei -20 °C für 48 h.
Temperatur Wechsellagerung	TC	Lagerung - 12 Zyklen: 6 h bei -20 °C, 6 h bei +85 °C, Temperaturwechsel: 3 K/min
Lagertest hohe Luftfeuchtigkeit	HHS	Lagerung für 96 h bei +40 °C und 95 % rel. Feuchte ohne Kondensation. Keine Korrosion oder Bauteil deformation.
Temperaturschock	TS	Lagerung bei +85 °C für 30 Minuten. Transferzeit 10 Sekunden. Lagerung bei -20 °C für 30 Minuten. Dieser Test wurde nicht durchgeführt.
Hoch-Tieftemperatur-Wechseltest	HTWT	Dauerlauf über 1000 h, Temperaturprüfung zum Nachweis der Zuverlässigkeit für den Betrieb bei trockener Kälte/Wärme nach DIN EN 60068-2-14 <div style="text-align: center;"> <p>Temperaturwechseltest nach DIN EN 60068-2-14</p> <p>Der Punkt A beschreibt den Beginn des ersten Zyklus. Der Punkt B kennzeichnet das Ende des ersten Zyklus und den Beginn des zweiten Zyklus. In den ersten 60 Minuten wird der Prüfling auf die Starttemperatur gebracht</p> </div>

Tabelle 5-1: Klimaprüfvorschriften für den Test von Vibrationssensoren

Auch die mechanischen Tests sind von den Testbedingungen für Computermäuse abgeleitet. Manche Anwendungen wie Schrittzähler für Laufschuhe erfordern jedoch schärfere Prüfbedingungen, die in Form von Dauervibrationstests durchgeführt werden. Die Prüfbedingungen für die mechanischen Tests sind in Tabelle 5-2 aufgelistet.

Test	Abkürzung	Beschreibung
Falltest	DT	Fallhöhe 91 cm auf Betonboden, 4 Tests
Schock- und Vibrationen	VT	<ul style="list-style-type: none"> • Halb-Sinus Schock - im Betrieb, vertikale Beschleunigung, 10 g, 16 ms Pulsbreite, 1000 Zyklen in pos. Richtung, 1000 Zyklen in neg. Richtung; 1 Schock/s • Halb-Sinus Schock – nicht in Betrieb, 3 Achsen: X, Y, Z: Beschleunigung 20 g, 6 ms Pulsbreite, 1000 Zyklen in pos. Richtung, 1000 Zyklen in neg. Richtung; 1 • Vibrationstests in Betrieb: Sinus 10 ... 300 Hz; Auslenkung 0,25 mm / 0,25 g; 5 Zyklen 1 Achse
Dauervibrationen	DVT	Vibrationstest nicht in Betrieb, vertikale Richtung +/- 3 g, 15 Hz, 3 Millionen Zyklen

Tabelle 5-2: Mechanischen Prüfvorschriften für die Mikrovibrationssensoren

Die Temperaturwechseltests der Sensoren werden nach der DIN EN 60068-2-14 mit einem aktiven Prüfling durchgeführt. Deshalb werden die Mikrovibrationssensoren im Klimaschrank „in operando“ geprüft.

Der für die Durchführung der Dauervibrationstest (DVT) entwickelte Prüfstand wird in Kapitel 5.8 beschrieben. Da für den Mikrovibrationssensor keine Prüfnormen verfügbar sind, wurde die oben angeführte Kundenanforderung von drei Millionen Pulsen bei ± 3 g als Minimalanforderung zugrunde gelegt. Der Test wird unter verschärften Bedingungen bei einer sinusförmigen Beschleunigung von ± 4 g durchgeführt.

5.4 Löttest

Die höchste thermische Belastung der Mikrovibrationssensoren tritt im Reflow-Prozess auf. Unmittelbar nach dem Lötprozess ist keine Änderung der elektrischen Funktion ermittelbar. Dies ändert sich jedoch bei Sensoren mit defekten Kontaktflächen mit der Zeit. Die Empfindlichkeit kann bis zum Ausfall der Sensoren abnehmen. Daher kann erst drei bis vier Tagen nach dem Löttest eine zuverlässige Aussage getroffen werden, ob die Sensoren ausgeliefert werden können.

Für den Löttest werden etwa 2 % der funktionsfähigen Sensoren eines Wafers zufällig ausgewählt, auf eine speziell vorbereitete Testplatte bestückt und im Reflow-Prozess gelötet (Bild 5-15). Das im Ofen eingestellte Temperaturprofil entspricht dem in Bild 5-2 dargestellten Lötprofil. Diese thermisch beanspruchten Sensoren werden auf dem elektrischen Funktionstester „*ElFuTe*“ (Kapitel 5.7) unter den gleichen Bedingungen wie bei der Wareneingangsprüfung getestet. Aus dem Vergleich der Testergebnisse lässt sich unmittelbar die Qualität der Sensoren ablesen. Im Schadensfall werden die Wafer nicht ausgeliefert. Abhängig vom Fehlerbild werden die Sensoren mit den in Tabelle 6-2 aufgeführten Methoden analysiert und die Prozesse optimiert.

5.5 Design for Testability

Die Prüfung elektronischer Systeme oder Komponenten kann aufwendig und teuer werden. Daher sind bereits beim Systementwurf die späteren Testmethoden zu berücksichtigen. Das System ist so zu entwerfen, dass es einfach, aber hinreichend genau, geprüft werden kann. Diese Methode wird als „Design for Testability“ bezeichnet und wird seit den 80ern bei der Entwicklung integrierter elektronischer Schaltkreise angewendet. Die grundlegenden Konzepte dieser Entwurfsmethode werden zunehmend auch bei elektronischen und mechatronischen Systemen genutzt. Klassische Testverfahren für den Test elektronischer Systeme sind:

- Optische, automatische optische und röntgenoptische Prüfungen (AOI, AXI³⁹)
- In-Circuit-Tests mit „Flying-Needle Probes“ und/oder festen Prüfnadeln
- Boundary-Scan und BIST (Built In Self)-Test

Die Anwendung dieser Prüftechniken erfordert deren Berücksichtigung bereits in der Entwurfsphase (Lanza, Blank, & Haefner, 2013). Beispielsweise müssen elektronische Komponenten so gewählt und platziert werden, dass sie sich in einem AOI-Test nicht gegenseitig verdecken. Ferner müssen Kontaktpunkte für elektrische Prüfnadeln bereits beim Layout berücksichtigt werden.

³⁹ AOI steht für Automatic Optical Inspection, AXI für Automatic X-Ray Inspection

Für Mikrovibrationssensoren werden optische und elektrische Prüfungen durchgeführt. Die optische Kontrolle betrifft die Qualität der Durchkontaktierung der Waferoberfläche. Sie stellt keine Anforderungen an das Systemdesign. Die elektronische Funktionsprüfung des Sensors erfolgt automatisiert. Jeder Sensor muss auf dem Wafer mit zwei Prüfkontakten verbunden werden. Die Sensoren sind derart auf dem Wafer anzuordnen, dass sie

- (PV1) kontaktierbar sind und
- (PV2) sich während der Prüfung nicht gegenseitig beeinflussen.

5.6 Prüfgerechte Sensoranordnung auf dem Wafer

Die Anforderungen (PV1) und (PV2) des elektronischen Funktionstests beeinflussen das Layout und beschränken die Möglichkeiten der Sensoranordnung auf dem Wafer. Die beiden Prüfvoraussetzungen werden erfüllt, wenn die Sensoren mit einem geringen Abstand voneinander auf dem Wafer vervielfältigt werden, ohne dass sie untereinander elektrisch verbunden sind. Da ein Sensor zwei elektrische Anschlusspunkte hat, sind für die auf einem Wafer befindlichen n Sensoren insgesamt $2 \cdot n$ Kontaktstifte erforderlich. Die Wahl der Prüfstifte führt zu weiteren Restriktionen, die sich aus dem minimalen Montageabstand der Nadeln ableiten. Die für den Prüfstand gewählten Kontaktstifte vom Typ *F111* der Firma Feinmetall müssen mit einem Mindestabstand von 1,27 mm montiert werden (Feinmetall GmbH, 2012). Daher beträgt der minimale Abstand der Stifte zwischen den Sensorzeilen:

$$d_z = \text{Prüfnadelpitch} - d_{\text{Duko}} = 1,27 \text{ mm} - 0,85 \text{ mm} = 0,42 \text{ mm} \quad (5.1)$$

d_z gibt in Gleichung (5.1) den Abstand der Pads benachbarter Sensoren in den Zeilen an, d_{Duko} den Durchmesser der Durchkontaktierung. Der Abstand der Spalten entspricht etwa der Breite der Sägegassen und beträgt 100 μm . Diese Matrixanordnung ist in Bild 5-3-links dargestellt.

Durch die Beschränkungen der Prüfstiftmontage ergibt sich für die Fertigung der Sensoren eine Reihe von Nachteilen:

1. Die Flächennutzung auf dem Wafer ist nicht optimal. Durch den Zeilenabstand d_z erhöht sich der Flächenbedarf um 14 % im Vergleich zur minimal möglichen Matrixanordnung, bei der die Sensoren nur durch eine 100 μm breite Sägegasse in Zeilen- und Spaltenrichtung getrennt sind.
2. In Zeilenrichtung ist die Zahl der Sägegassen doppelt so hoch wie in Spaltenrichtung. Der Sägeweg nimmt um etwa 50 % zu. Mehr Sägezeit und -blätter werden benötigt.
3. Die Zahl der Durchkontaktierungen und der Kontaktstifte verdoppelt sich im Vergleich zu einem testoptimierten Layout.

Eine Möglichkeit, die durch die Testrestriktionen eingeführten produktionstechnischen Nachteile zu umgehen, besteht darin, die Prüfregel (PV2) zunächst nicht zu beachten. Stattdessen werden die Sensoren in Zeilenrichtung kurzgeschlossen (Bild 5-3-rechts). Diese Anordnung erhöht die Flächennutzung auf dem Wafer, reduziert die Zahl der erforderlichen Durchkontaktierungen und Prüfstifte und führt zu einem verringerten Sägeaufwand. Hierfür ist allerdings ein elektronisches Auswertekonzept erforderlich, das trotz der spaltenweise kurzgeschlossenen Sensoren eindeutige Messergebnisse für den einzelnen Sensor generieren kann.

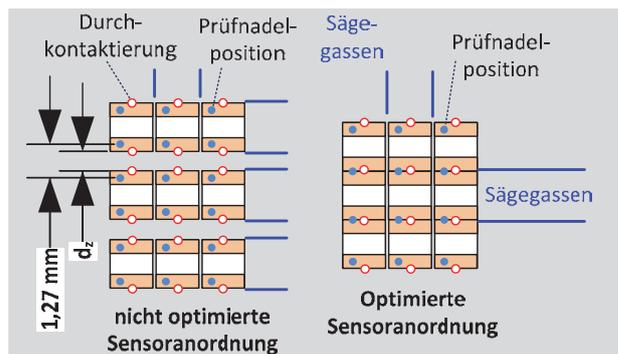


Bild 5-3: Testkompatible Sensoranordnungen auf dem Wafer

5.7 Automatisierte elektronische Produktqualifikation

Die optimierte Anordnung der Sensoren auf dem Wafer führt zu einem Waferdesign, bei dem die Sensoren in der Spalte kurzgeschlossen sind. Der elektrische Test erfordert ein spezielles Prüfverfahren, damit sich die Sensoren bei der Messung nicht gegenseitig beeinflussen (PV2). Prinzipiell können zwei Lösungsstrategien verwendet werden:

VT-I: Es wird lediglich eine Sensorzeile auf dem Wafer kontaktiert. Die Prüfnadeln werden als Schleifkontakte ausgeführt und über eine motorische Einrichtung von Zeile zu Zeile bewegt.

ElFuTe: Alle Sensoren werden gleichzeitig durch die Prüfstifte kontaktiert. Durch eine geeignete Schaltmatrix können zwei Zeilen gleichzeitig ausgewertet werden.

5.7.1 Elektrische Funktionsprüfung mit dem Testsystem VT-I

Das Funktionsprüfsystem *VT-I* besteht aus einer mechanischen Waferaufnahme, die mithilfe eines Schrittmotors verschoben wird. Der Schrittmotor wird so gesteuert, dass die Schleifkontakte jeweils nur eine Sensorzeile vollständig kontaktieren. Infolge des beschränkten Montageraums für die Auswerteelektronik kann in einer mechanischen Anregungsphase jeweils nur ein Drittel aller Sensoren einer Zeile ausgewertet werden. Nach der Vermessung aller Sensoren der Zeile wird der Wafer eine Reihe weiterbewegt.

Das elektrische Ersatzschaltbild der Sensoren des Wafers ist auszugsweise in Bild 5-4 dargestellt. Die Sensoren werden über zwei elektrische Prüfkontakte (rot und blau dargestellt) resistiv ausgewertet.

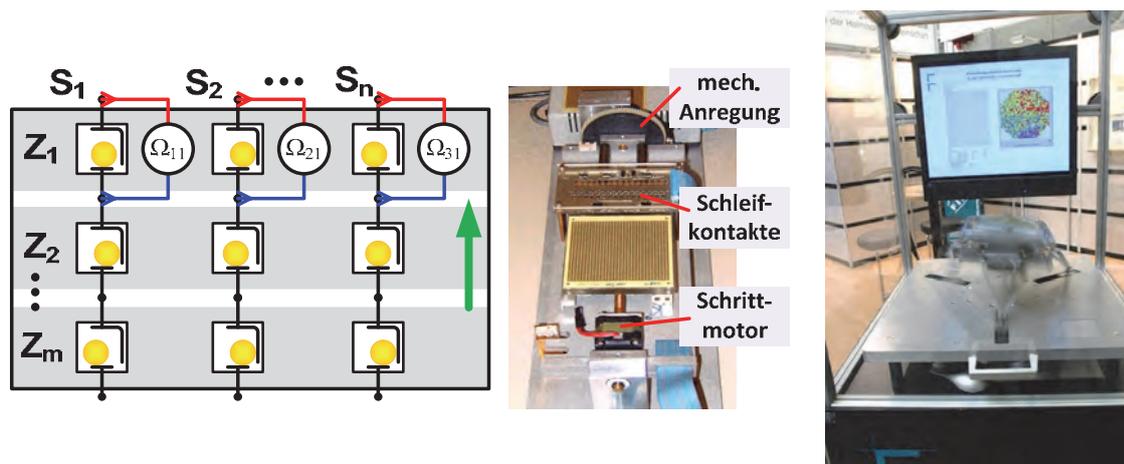


Bild 5-4: Auswertekonzept (*VT-I*) für den elektrischen Funktionstest. Die Ersatzschaltung ist links, die technische Realisierung der ersten Generation in der Mitte und Realisierung der zweiten Generation rechts dargestellt.

Die Auswerteelektronik ermöglicht jeweils nur die gleichzeitige Charakterisierung von etwa 1 % aller Sensoren eines Wafers während einer mechanischen Anregungsphase. Daraus resultiert eine Gesamttestzeit von etwa 50 Minuten für einen Wafer (Blank, Berger, & Balzer, 2005). Bei der im Bild 5-4 rechts dargestellten Testplatzvariante handelt es sich um eine Weiterentwicklung des Testplatzes *VT-I*, bei dem die Testdauer auf 25 Minuten verringert werden konnte.

5.7.2 Optimierung des elektrischen Funktionstests

Im Zuge der Weiterentwicklung der Sensoren und der Erschließung neuer Anwendungsgebiete ergaben sich neue Qualitätsanforderungen an die Sensoren, die mit den oben beschriebenen Testsystemen messtechnisch nicht mehr abgedeckt werden konnten. Der größte Handlungsbedarf ergab sich aus den Forderungen, Testsysteme für eine wachsende Produktvielfalt und steigenden Produktionsmengen zur Verfügung zu stellen. Einerseits mussten Testmöglichkeiten für die Prüfung omnidirektional sensitiver sowie lageempfindlicher Sensoren geschaffen werden. Andererseits wurde

es erforderlich, die Testzeit für einen Wafer deutlich zu reduzieren. Die Anforderungen an den optimierten Testplatz der dritten Generation sind in Tabelle 5-3 zusammengestellt.

	Anforderung	Realisierungsoption
1	Reduktion der Testdauer	Neue Auswerte- und Datenübertragungselektronik
2	Variable Sensor-Prüfspannung und einstellbare Schaltschwellen	Neue Auswerteelektronik mit programmierbaren Testwerten.
3	Sektorielle Qualifizierung des Sensorzustandes	Neue Mechanik, neues Anregungsschema
4	Test von omnidirektionalen Sensoren	Neue Mechanik
5	Test von lagesensitiven Sensoren	Neue Mechanik
6	Berücksichtigung von Sicherheitskriterien (angelehnt an die Maschinenrichtlinie 2006/42/EG)	Berührsicheres Gehäusekonzept mit Lichtvorhang und „Not-Aus“-Schalter
7	Datenbankgestützte Verwaltung der Testergebnisse	Neue Elektronik, Speicherung in einer MySQL-Datenbank

Tabelle 5-3: Anforderungskatalog an den verbesserten elektrischen Funktionstest

Die Anforderungen 1 und 2 betreffen die Verkürzung der Testdauer bei einstellbaren, elektrischen Prüfbedingungen. Sie werden in Kapitel 5.7.3 erörtert. Der Anspruch 3, sektoriell aufgelöste Messdaten von omnidirektionalen und lagesensitiven Sensoren zu erfassen, erfordert ein neues mechatronisches Testplatzkonzept. Die Zylinderoberfläche wird für die sektorielle Charakterisierung in n -Abschnitte (Sektoren) mit einem Winkel von $\varphi_{\text{Sektor}} = 360^\circ / n$ unterteilt. Die Charakterisierung der Mikrovibrationssensoren erfolgt in vier Sektoren. Durch diese Maßnahme können Sensoren identifiziert und aussortiert werden, die in einem oder mehreren Sektoren keine Schaltimpulse abgeben. Die Umsetzung der Anforderungen 3, 4, 5 und 6 sind in Kapitel 5.7.3 beschrieben.

Mit wachsenden Produktionsmengen ist ein intelligentes Dokumentationssystem zur Verwaltung der Prüfergebnisse unverzichtbar. Dieser Anforderung wird durch die Realisierung des Anspruchs 7 nachgekommen, auf die in Kapitel 5.7.3 eingegangen wird.

5.7.3 Elektrische Funktionsprüfung mit dem Testsystem „EIFuTe“

Das Prüfsystem *VT-I* war in der ersten Entwicklungsperiode der Mikrovibrationssensoren ein geeignetes Werkzeug für die elektrische Qualifikation der Sensoren. Die lange Prüfzeit eines Wafers auf dem System *VT-I* und der regelmäßige Tausch der Schleifkontakte behinderten die Arbeitsabläufe sehr. Zudem musste für die omnidirektional sensitiven Sensoren die mechatronische Prüfplattform neu entwickelt werden. Das Testsystem muss diese Sensoren in jeder beliebigen Raumlage mechanisch anregen und elektrisch prüfen können. Daher wurde das neue System *EIFuTe* unter Berücksichtigung der in Tabelle 5-3 aufgeführten Anforderungen realisiert (Bild 5-5). Es besteht aus einem Steuer-PC (2), der die Prüfsequenz steuert und die Testdaten verarbeitet, in einer Datenbank archiviert. Nachdem der Wafer auf die Wafer-Auflageplatte (1) gelegt und die Testsequenz gestartet wurde, fährt der Pneumatikzylinder (4) zu. Wenn der Pneumatikzylinder seine Endposition erreicht hat, kontaktiert der Nadeladapter mit der Testelektronik (6) die Sensoren auf dem Wafer. Der Schwenkmotor (5) neigt die Waferoberfläche in einen programmierten Winkel zur Erdoberfläche und der Rotationsmotor (7) versetzt die Sensoren auf dem Wafer in eine Drehbewegung. Nach Erreichen der Soll-Rotationsgeschwindigkeit beginnt die Charakterisierung der elektrischen Sensoreigenschaften.

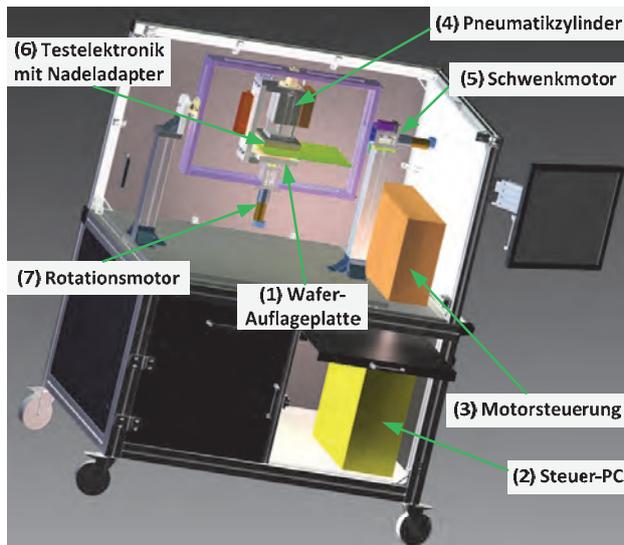


Bild 5-5: Konstruktionsdarstellung des elektrischen Funktionstestplatzes *EIfuTe*

Die Konstruktion des Teststandes und die Testdurchführung vereinfachen sich aufgrund des zur Kammerbohrung rotationssymmetrischen Sensoraufbaus. Für einen dreidimensionalen Sensortest muss der Wafer lediglich in einen beliebigen Winkel zur Erdachse geneigt werden können (Bild 5-6, Schritt 1). Die mechanische Anregung erfolgt durch Drehung des Wafers um den Normalenvektor der Waferoberfläche (Bild 5-6, Schritt 2).

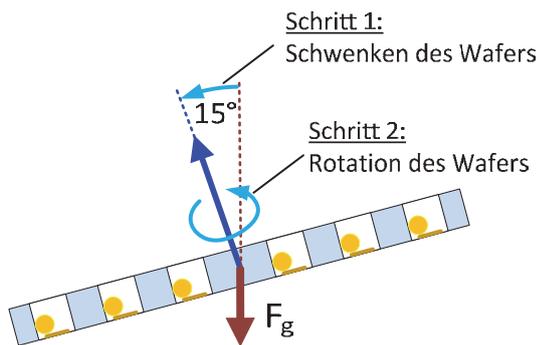


Bild 5-6: Erläuterung des Testkonzepts - Ausrichtung des Wafers im Raum. Für den Test der Kontaktstelle Boden-Kammer-Kugel wird der Normalenvektor der Waferoberfläche (blau) um 15° gegen die Achse der Erdbeschleunigung geneigt (braun) und um den Normalenvektor gedreht.

Die omnidirektionalen und lageempfindlichen Sensoren werden in einem zweistufigen Testverfahren charakterisiert. In der ersten Phase zeigen die äußeren Anschluss pads des Sensors zur Erde, sodass die elektrischen Merkmale zwischen dem Boden, der Kammer sowie der Kugel ermittelt werden. Der Wafer wird nach dem Einlegen (Bild 5-7, links) mit dem Schwenkmotor um 165° in die Prüfposition gedreht (Bild 5-7, rechts). Nach Beendigung der Prüfung der Bodenseite wird der Wafer um 180° geschwenkt. Im zweiten Testschritt werden die Eigenschaften zwischen dem Deckel, der Kammer und der Kugel ermittelt

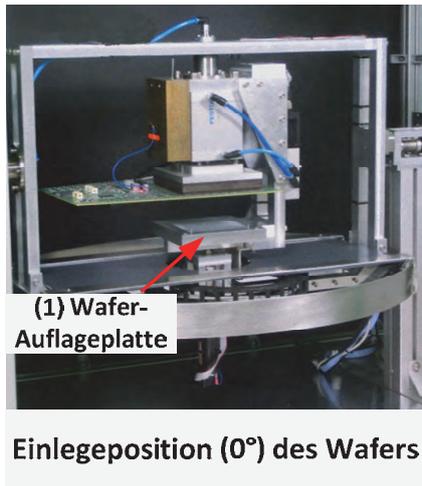


Bild 5-7: mechatronische Implementierung des Testplatzes der dritten Generation

Nachdem der Wafer die Prüfposition erreicht hat, wird er mit dem Rotationsmotor um seine Mittelachse bewegt. Er durchläuft eine vollständige Umdrehung mit einer Umdrehungsgeschwindigkeit von 1/8 Hertz. Der Neigungswinkel und die Rotationsgeschwindigkeit werden mit optischen Drehencodern an den Antriebsmotoren erfasst. Die Referenzierung des Nullpunktes erfolgt mit optischen Endschaltern.

Nachdem der Wafer um einen Sektor (90°) gedreht wurde, wird der Messvorgang kurzzeitig unterbrochen. Die von der Auswerteelektronik erfassten Sektordaten werden an den PC übermittelt. Da die Rotationsbewegung während der Übertragung der Messdaten fortgeführt wird, müssen die Messdaten sehr schnell übertragen werden. Deshalb wird im Gegensatz zur Bewegungssteuerung eine spezielle Highspeed USB-Verbindung mit einer Datenübertragungsrate von 480 Mbit/s verwendet. Über diese Schnittstelle werden die Messdaten aller Sensoren in etwa 3 ms übertragen. Nach der Datenübertragung wird der Messzyklus mit dem nächsten Sektor fortgesetzt. Der Winkelfehler, der durch die fortgeführte Rotation während der Messunterbrechung entsteht, beträgt weniger als 0,2 %. Er kann vernachlässigt werden.

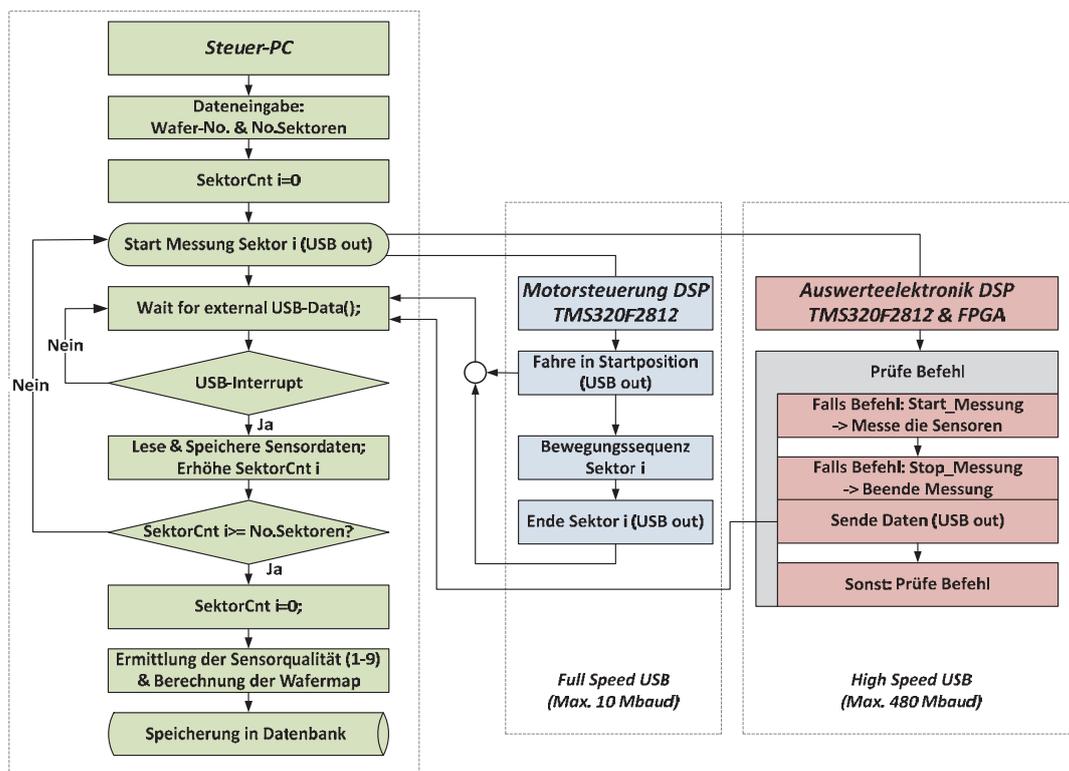


Bild 5-8: Vereinfachter Ablaufplan des sektoriellen Tests der Sensoren

Die Schwenk- und Rotationsachsen werden mit bürstenbehafteten DC-Motoren angetrieben. Die Steuerungselektronik für die Motoren wurde speziell für die Erfordernisse des Testplatzes entwickelt. Sie basiert auf einem Signalprozessor des Typs TMS320F2812. Der Prozessor verfügt über die erforderliche Rechenleistung für die Positions- und Drehzahlsteuerung mit PID-Algorithmen (Anhang A5). Ferner verfügt er über integrierte ADC-Wandler, eine QEP-Einheit zur Auswertung der Drehencoder-Signale (Kapitel 2.10.2) und mehrere SPI- und SCI⁴⁰-Schnittstellen für den Datenaustausch mit anderen externen Komponenten und dem Steuerungs-PC. Die Steuersignale des Prozessors werden über eine Leistungsendstufe verstärkt und auf die Motoren geleitet (Bilder 5-9 und 5-10).

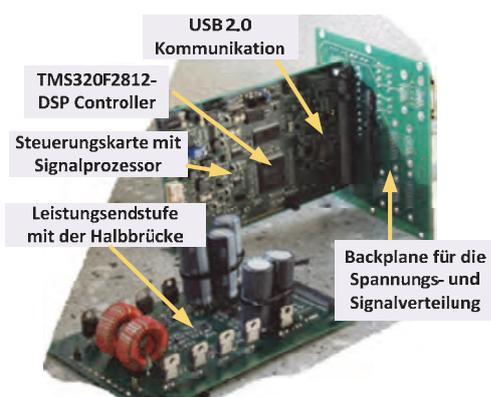


Bild 5-9: Antriebselektronik für die Steuerung des Testplatzes *ElFuTe*. Neben der digitalen Steuerplatine mit dem Signalprozessor sind die Leistungsendstufe mit der H-Brücke und die Backplane für den Datenaustausch zur Energieversorgung dargestellt.

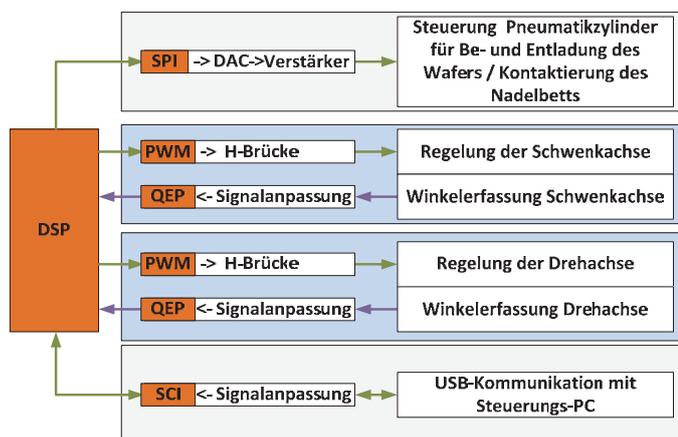


Bild 5-10: Blockschaltbild des Ansteuersystems für den Testplatz *ElFuTe*. Der Signalprozessor TMS320F2812 steuert die Leistungsendstufen für die beiden Motoren (hellblau), den Pneumatikzylinder zur Kontaktierung der Feder-Prüfstifte und kommuniziert über eine SCI \leftrightarrow USB-Schnittstelle mit dem Steuer-PC.

Da die Motoren nur ein relativ kleines Drehmoment von 0,17 Nm aufbringen können, wurde eine Motor-Getriebekombination mit einer 43-fachen Untersetzung gewählt. Damit kann ein Moment von ca. 7 Nm aufgebracht werden. Die Grenzbelastbarkeit des Getriebes ist mit 15 Nm angegeben (Maxon Motor GmbH, 2013). Da der Schwerpunkt konstruktionsbedingt sowohl in der Dreh- als auch in der Schwenkachse liegt, reduziert sich das aufzubringende statische Drehmoment auf 0,8 Nm. Die geringe mechanische Belastung verursacht selbst im Dauerbetrieb keine Schäden an den Antriebskomponenten.

Der Steuerungs-PC gibt die Stellgrößen für die Motoren vor und überträgt sie über eine virtuelle RS-232-Schnittstelle⁴¹ mit einer Übertragungsrates von 19,2 Kbit/s an die Motorsteuerungskarte.

Die Sicherheitskriterien in Anlehnung an die Maschinenrichtlinie 2006/42/EG ergeben sich aufgrund des erforderlichen Arbeiterschutzes (Anforderung 6 - Tabelle 5-3). Dieser sollte auch in Forschungs- und Versuchsanlagen nicht unberücksichtigt bleiben. Daher wurde die Maschine mit einem Lichtvorhang ausgestattet, die den Bewegungsablauf stoppt, sofern sich ein Objekt in den Prüfraum hineinbewegt.

Die verschleißanfälligen Schleifkontakte des Teststandes *VT-I* wurden durch robuste, aber einfach wechselbare Prüfstifte ersetzt. Die Prüfstiftmatrix ermöglicht die parallele Kontaktierung aller Sensoren auf dem Wafer (Bild 5-11).

⁴⁰ SPI steht für „*Seriell Peripheral Interface*“. Es dient zur Ansteuerung von externen Baugruppen wie etwa DAC-Wandlern und Speicherbausteinen. Die Daten werden bidirektional, synchron und seriell übertragen. SCI bedeutet „*Seriell Communication Interface*“, mit der Daten über eine RS-232 Schnittstelle übertragen werden können.

⁴¹ Die virtuelle RS-232 Schnittstelle wird hardwaretechnisch durch eine USB-Schnittstelle realisiert.

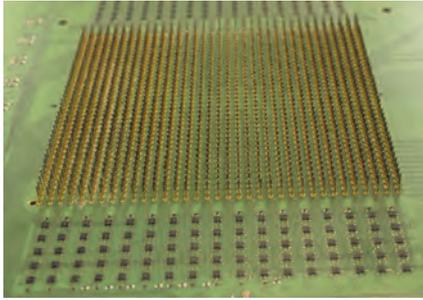


Bild 5-11: Nadeladapter zur gleichzeitigen Kontaktierung aller Sensoren auf dem Wafer

Über die Kontaktstifte werden die Sensoren mit der Auswerteelektronik verbunden. Bild 5-12 zeigt einen Auszug des elektrischen Blockschaltbilds der Auswerteschaltung für den Teststand *ELFuTe*. Aufgrund der kurzgeschlossenen Sensoren einer Spalte kann lediglich das n -te Sensorreihenpaar, bestehend aus den Reihen a_n und b_n , gleichzeitig ausgewertet werden. Der mittlere, gemeinsame Kontakt der Zeilen wird über einen elektronischen Schalter Sw auf Massepotenzial gelegt. Um eine elektrische Wechselwirkung der Sensoren untereinander zu verhindern, werden die anderen Doppelreihen $[a-b]_{i \neq n}$ in einem hochohmigen Zustand geschaltet.

Die Auswertung der Sensoren der i -ten Spalte erfolgt über die Signalkonditionierungsmatrix i . Sie besteht aus einem Multiplexer, der alle Doppelreihen $[a-b]_i$ des Wafers ansteuern kann. Über den Multiplexer werden die zwei Sensoren der Reihen $[a-b]$ in Serie mit dem Referenzwiderstand R_{Ma} bzw. R_{Mb} an die Messspannung V_{mess} gelegt. Der Spannungsabfall über den Sensoren wird über eine Schmitt-Trigger-Schaltung mit asymmetrischen Schaltgrenzen digitalisiert (Bild 2-46) und dem FPGA als Digitalsignal Sig_{a_i} und Sig_{b_i} zur Auswertung zugeführt. Die Schmitt-Triggerschaltung ist so ausgelegt, dass Widerstandswerte kleiner 16 Ohm ein Signal mit einem HIGH-Pegel erzeugen. Übersteigt der Widerstand einen Wert von 206 Ohm, gibt die Schaltung einen LOW-Pegel aus.

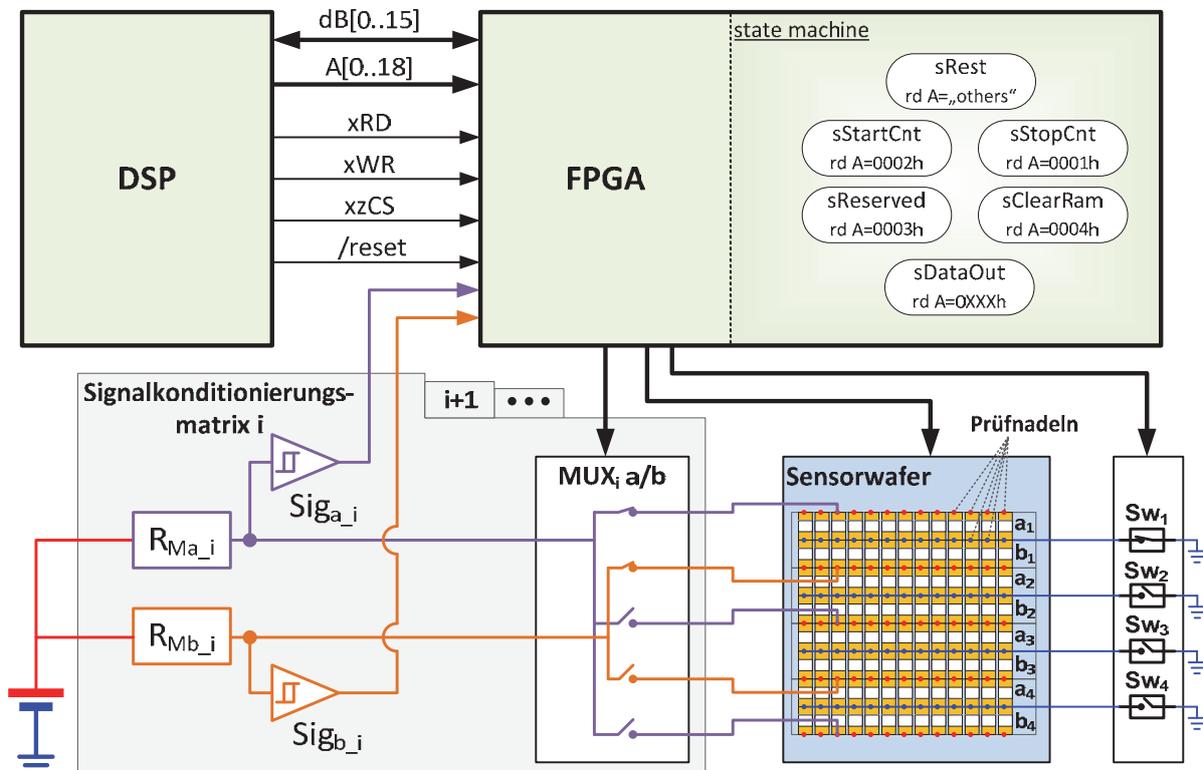


Bild 5-12: Auswertekonzept *ELFuTe* zur parallelen Prüfung der Sensoren auf dem Wafer

Der FPGA wertet die quantisierten Sensorsignale pegel- und zeitbasiert aus. Mit jedem Taktsignal des FPGAs wird der Sensorzustand (LOW/HIGH) erfasst. Die Zeitdauer im jeweiligen Zustand wird in zwei Registern ($Reg_{Hightime}$, $Reg_{Lowtime}$) gespeichert. Zur Ermittlung der Zahl der Schaltimpulse ist ein Differenzierer im FPGA implementiert, mit dem eine Zustandsänderung des Pegels erkannt wird.

Die Zwischenergebnisse der Auswertung einer Sensor-Doppelreihe werden im internen RAM des FPGAs gespeichert. Nach dem Abschluss der Charakterisierung eines Sektors werden die ermittelten Daten über den DSP an den PC gesendet.

Mit diesem Verfahren kann einen Wafer deutlich schneller elektrisch charakterisiert werden, als dies mit der Testplatzvariante *VT-I* möglich war. Durch die neue Auswerteschaltung können sechsmal so viele Sensoren wie mit der Version *VT-I* gleichzeitig vermessen werden. Ferner entfällt durch die gleichzeitige Kontaktierung aller Sensoren die Zeit für die Positionierung des Wafers unter den Schleifkontakten. Stattdessen wird die Sensormatrix mithilfe der elektronischen Schalter (*Sw*) sehr schnell gescannt. Die Umschaltzeit zwischen einem Reihenpaar wird nur durch

- die Umladezeiten der Tiefpassfilter,
- die Einschwingzeit der Multiplexer und
- die Auswerte- und Aktualisierungszeit der Ergebnisse im FPGA

bestimmt. Sie beträgt je Doppelreihe ca. $14,7 \mu\text{s}$, sodass der komplette Wafer innerhalb von $250 \mu\text{s}$ vermessen ist. Kürzere Schaltimpulse können nicht erfasst werden. Diese Einschränkung hat allerdings keine signifikanten Auswirkungen auf die Testergebnisse, da die typische Verweilzeit des Sensors in einem Widerstandszustand $500 \mu\text{s}$ übersteigt (Bild 5-13).

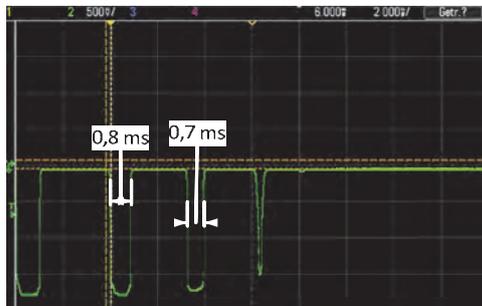


Bild 5-13: Oszilloskopaufnahme des Schaltverhaltens eines Vibrationssensors

Bedingt durch die sektorielle Charakterisierung der Sensoren und die höheren Produktionsraten stieg das Datenaufkommen, sodass intelligente Konzepte und Systeme für die Datenarchivierung und Verarbeitung entwickelt werden mussten. Hierfür wurde im Rahmen der Arbeit ein verteiltes Datenbanksystem spezifiziert, indem sowohl die wirtschaftlichen, kaufmännischen Daten als auch die technischen Daten archiviert werden. Das Konzept ist Bild 5-14 dargestellt. In der technischen Datenbank sind die Bestands- und Detailinformationen der Wafer gespeichert, die für die Lieferung genutzt werden.

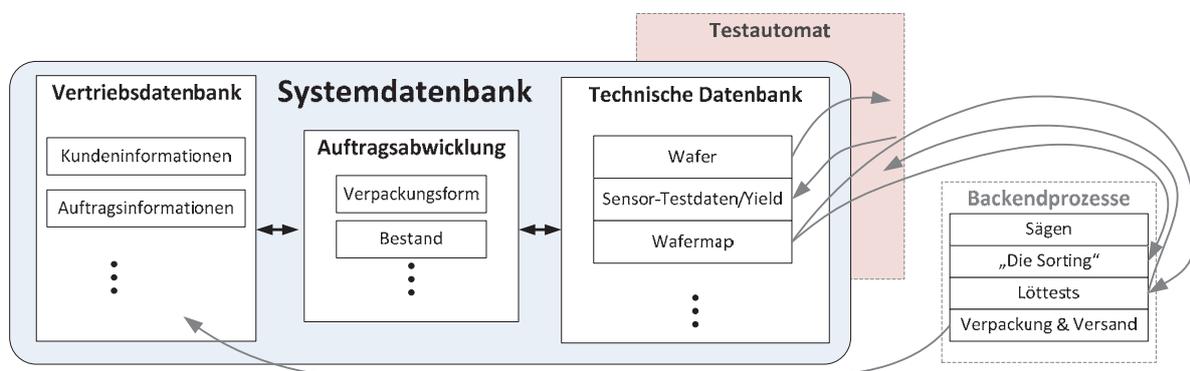


Bild 5-14: Schematische Darstellung des Datenbankenkonzeptes

Das Front-End für die Dateneingabe der technischen Datenbank stellt zugleich die Steuerungseinheit für den Testplatz dar. Wird ein Wafer nach der Eingabe der technischen Daten elektrisch geprüft, werden die Testergebnisse automatisch mit den spezifischen Wafer-Metadaten (Kapitel 4.2.2) verbunden. Nach Ablauf der Messung liegen die Informationen über die Zahl der Schaltimpulse und

die Zeitdauer, in der der Sensor geschlossen war, im PC vor. Die Informationen sind sektoriell aufgelöst. Aus diesen Daten wird die Güte der Sensoren ermittelt (Kapitel 3.3). Sie wird in 9 verschiedene Klassen unterteilt. Die Zuordnung der Güteklasse des Sensors auf dem Wafer wird als Wafermap bezeichnet (Huntley, 1999). Die Map ist kompatibel zu den nachfolgenden Prozessen des Die-Sortings und der Bestückung der Platinen für die Löttestmuster. Mithilfe der Wafermap kann die Bestückmaschine gezielt die Sensoren einer Güteklasse vom Wafer abnehmen. In Bild 5-15 ist der Aufbau einer Löttestplatte dargestellt. In der Wafermap „grün“ markierte Sensoren sind funktionsfähig und werden auf eine Leiterplatte bestückt.

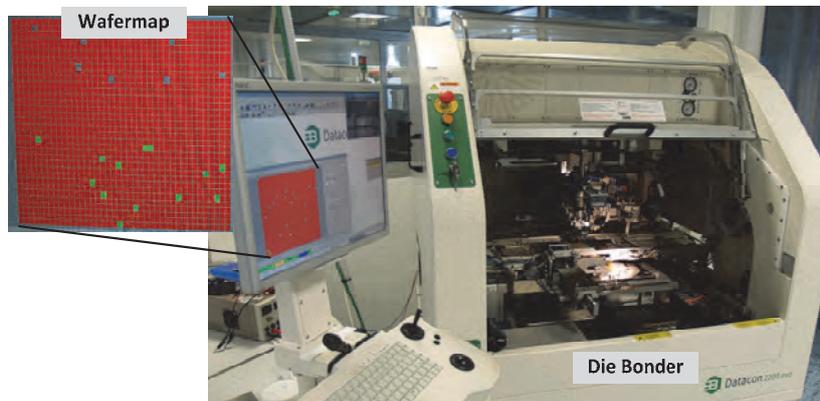


Bild 5-15: Bestückautomat zum Sortieren von Dies bzw. der Mikrovibrationssensoren

Mit dem Testplatz *ElFuTe* werden alle in der Tabelle 5-3 angeführten Anforderungen erfüllt. Die Auswertung eines einseitig sensitiven Wafers erfolgt in weniger als 30 Sekunden, ein omnidirektional empfindlicher Sensor ist bereits nach einer Minute vermessen. Die in der technischen Datenbank gespeicherten Metainformationen sowie die zugehörigen Testergebnisse erleichtert die Produktentwicklung nachhaltig und stellen einen signifikanten Teil des Wissensspeichers dar (Kapitel 2.1).

5.8 Mechanische Produktqualifikation

Die mechanischen Anforderungen an die Belastbarkeit der Mikrovibrationssensoren sind applikationsbedingt stark unterschiedlich. Für die Ermittlung der Grenzen der mechanischen Belastbarkeit (Tabelle 5-2) wurde eine spezielle Prüfeinrichtung entwickelt. Von der Verwendung kommerziell verfügbarer Schwingungs-Prüfsystemen wurde abgesehen, da diese Anlagen für den Sensor überdimensioniert sind.

Der Testplatz besteht aus einer Aufspannplattform für die Wafer, die mithilfe eines Voice-Coil-Aktors in Bewegung versetzt wird. Die Bewegung wird mit einem optischen Wegaufnehmer erfasst und über eine prozessorbasierte Steuerungseinheit geregelt (Bild 5-16). Mit dieser Prüfeinrichtung ist es möglich, Beschleunigungsprofile mit einer Amplitude bis zu $\pm 4\text{ g}$ zu erzeugen (Hager, 2006).

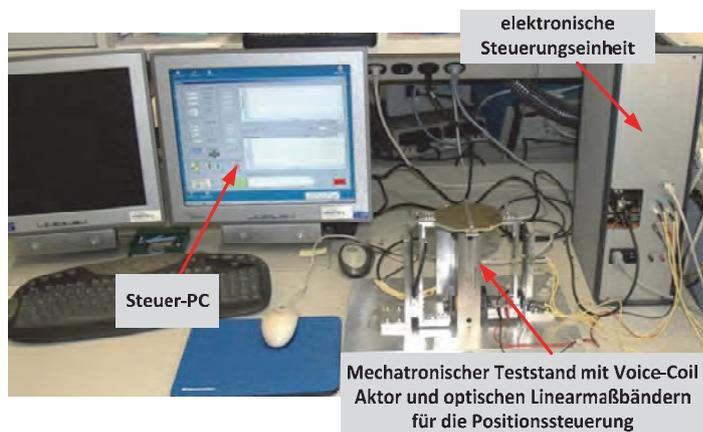


Bild 5-16: Testplatz zur Überprüfung der mechanischen Belastbarkeit der Vibrationssensoren

In Bild 5-17 ist die mechanische Belastbarkeit von Vibrationssensoren mit einer Kombination aus Palladium-Palladium-, Palladium-Gold- und Feingold-Feingoldkontakten dargestellt. Die Palladium-Metallisierung der Leiterplattenkontakte wurde elektrochemisch abgeschieden. Die Abscheidung der Feingoldschicht erfolgte galvanisch. Die Kugeln sind in vergleichbarer Weise aufgebaut worden. Die Feingoldschicht maß sowohl auf der Leiterplatte als auch auf der Kugel einen Mikrometer. Die Palladiumschicht war 500 nm stark.

Die Palladiumoberfläche auf den Sensoren ist extrem belastbar. Sie erfüllt die Prüfanforderung von 3 Millionen Pulsen bei Weitem. Aus dem Empfindlichkeitsverlauf in Bild 5-17 kann ferner abgelesen werden, dass das System aus palladiumbeschichteter Leiterplatte und Feingoldkugel eine höhere mechanische Lebensdauer erwarten lässt als die palladiumbeschichtete Kugel. Am schwächsten schneidet erwartungsgemäß das Feingold-Feingold System ab, das nur etwa 250.000 Stöße übersteht.

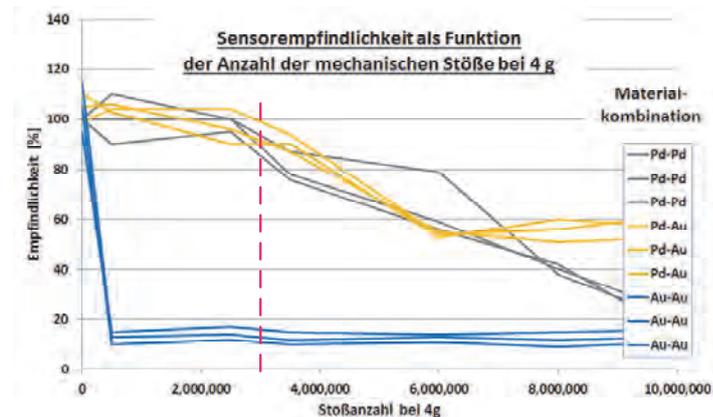


Bild 5-17: Mechanische Belastbarkeit von Mikro vibrationssensoren. Dargestellt ist die Empfindlichkeit der Sensoren in Prozent über der Anzahl der Stöße bei 4 g.

5.9 Schnelltestverfahren zur Qualifizierung galvanischer Prozesse

Die wirtschaftliche Produktion der Mikro vibrationssensoren erfordert die Qualitätskontrolle der Materialien und Halbzeuge, aus denen die Sensoren zusammengesetzt sind. Daher wurden im Rahmen dieser Arbeit ein Schnelltestverfahren zur Prüfung der edelmetallbeschichteten Leiterplatten und Kugeln entwickelt, das der Leiterplattenhersteller nutzen muss. Schadhafte Halbzeuge werden nicht für den Aufbau der Mikro vibrationssensoren genutzt.

Für den Test werden Musterplatten hergestellt, die gleichzeitig und gemeinsam mit den Sensor-Leiterplatten metallisiert werden. Das elektrische Verhalten dieser Musterplatten wird mit einer Kugel geprüft, die nachweislich funktionsfähig ist und eine hohe metallische Reinheit aufweist.

Umgekehrt wird die Qualität neu hergestellter Kugeln mit Plattenmaterial ermittelt, dessen Oberfläche technisch einwandfrei und nicht kontaminiert ist. Die Tests werden mit den gleichen Werkstücken wiederholt, nachdem diese für fünf Minuten bei 250 °C ausgelagert wurden.

Damit die Tests objektiv und immer unter den gleichen Bedingungen durchgeführt werden, wurde der automatisierte Testplatz „KuPlaTe“ entwickelt. Auf diesem Prüfstand werden die Musterplatten unter einem Winkel von 90° in eine mechanische Aufnahme eingespannt, ohne dass die metallischen Flächen kurzgeschlossen werden. Die Einspannklemmen bestehen aus Kupfer und sind elektrisch mit einer Auswerteelektronik verbunden. Legt man eine Kugel zwischen die beiden Prüfplatten, so kann über die Klemmen der ohmsche Widerstand zwischen der Kugel und der beiden Musterplatten ermittelt werden. Die Testeinrichtung wird über einen Motor und eine exzentrische Scheibe in Bewegung versetzt (Bild 5-18). Sie oszilliert um die Lagerachse, sodass die Kugel zwischen den beiden Prüfplatten in eine lineare Rollbewegung versetzt wird. Die Schaltimpulse werden über eine Mikrocontroller-Auswerteeinheit mit integriertem AD-Wandler erfasst. Das Prüfergebnis wird über eine USB-Schnittstelle an einen PC übertragen. Für den Betrieb der Testeinrichtung beim Dienstleister sind zwei Leuchtdioden zur Anzeige des Testergebnisses vorgesehen.

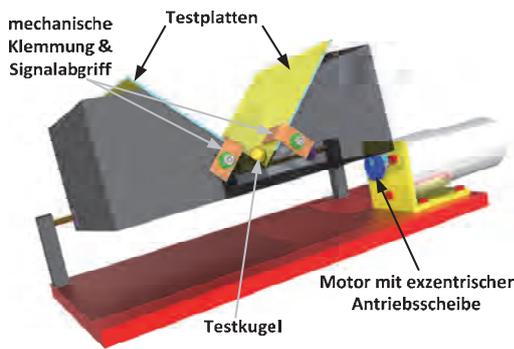


Bild 5-18: Konstruktionsdarstellung des Kugel-Platten-Testplatzes KuPlaTe

Bei auffälligem Verhalten der Testmuster werden die Halbzeuge eindeutig gekennzeichnet. In zusätzlichen Untersuchungen wird ermittelt, ob die Halbzeuge für den Aufbau von Sensoren genutzt werden können (Kapitel 6.2).

Die Bilder 5-19, 5-20 und 5-21 zeigen die Testanordnung und die Ergebnisse für zwei unterschiedliche Kugeln. Eine Kugel war mit einer Nickel- und Feingoldschicht überzogen, die andere mit einer Hartgoldschicht. Die Feingoldkugel wurde für 10 Minuten bei 250 °C gelagert, die Hartgoldkugel für 90 Minuten bei 200 °C. Zur Ermittlung der Leitfähigkeit wurde der elektrische Übergang „Platte-Kugel-Platte“ in Serie mit einem 100-Ohm-Widerstand an eine Spannungsquelle von 300 mV geschaltet. Der Spannungsabfall dieser Testanordnung wurde mit einem Oszilloskop (Bilder 5-20 und 5-21) aufgenommen. Der sensorische Übergang ist niederohmig, wenn das Signal im unteren Bildbereich ist. Das Schaltverhalten der Feingoldkugel ist auch nach der thermischen Auslagerung sehr gut, wohingegen die Hartgoldkugel keine Schaltpulse abgibt. Erst nachdem die Kugel nicht mehr bewegt wird und in einen Ruhezustand übergeht, kann sich ein leitfähiger Kanal ausbilden. Der Widerstand sinkt sehr langsam ab. Die Oberfläche frittet, sie ist mit Metalloxiden bedeckt.

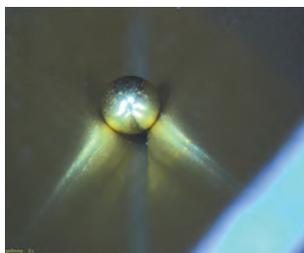


Bild 5-19: Kugel in der Schnelltesteinrichtung KuPlaTe

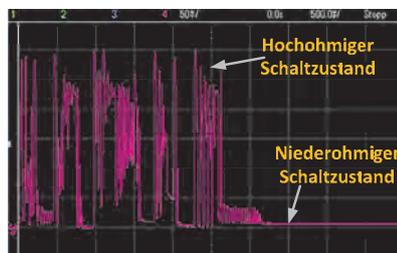


Bild 5-20: Signal der Feingoldkugel. Aufgetragen ist die Spannung über der Zeit. Bei einem niedrigen Spannungswert ist der Sensor niederohmig.

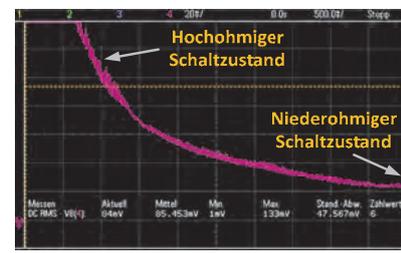


Bild 5-21: Signal der Hartgoldkugel. Aufgetragen ist die Spannung über der Zeit. Bei einem niedrigen Spannungswert ist der Sensor niederohmig.

6 Kontinuierlicher Verbesserungsprozess

„Wenn der Innovations- und Verbesserungsprozess stagniert, stagniert auch das Unternehmen“ (Webber & Wallace, 2008).

Die Weiterentwicklung eines Funktionsdemonstrators in ein serientaugliches Produkt erfordert die permanente Verbesserung des Prototyps sowie seiner Herstell- und Prüfverfahren. Die kontinuierliche Analyse und Beseitigung von Fehlern bilden die Grundlage für die nachhaltige Herstellung hochwertiger Produkte (Kapitel 2.1). Dieses Vorgehensweise wurde auch bei der Entwicklung der Mikrovibrationssensoren angewendet. Daher stehen heute verschiedenfunktionale Mikrovibrationssensoren zur Verfügung, die in unterschiedlichen Anwendungen ihren Einsatz finden.

Der methodische Ansatz zur Verbesserung der Sensorqualität ist an das DMAIC-Verfahren angelehnt (Kapitel 2.13.1). Bei der Anwendung dieser Methode zeigte sich, dass sich die Labormuster der Mikrovibrationssensoren wie eine „Blackbox“ verhielten. Aufgrund der verschiedenen Herstellprozesse und verwendeten Materialien sowie der unterschiedlichen Verarbeitungsstätten erwies sich die Suche nach den Fehlerquellen als sehr komplex. Einerseits traten bereits identifizierte und behobene Prozessfehler insbesondere bei den Fremdlieferanten immer wieder auf. Andererseits war die Zahl der möglichen Fehlerquellen sehr hoch. Daher wurden zur Klärung der Fehlerursachen analytische Messmethoden wie EDX, XPS und Verfahren zur Bestimmung der Restgaszusammensetzung genutzt. Die Verfahren wurden durch bildgebende Analysemethoden mit dem REM, dem FIB-SEM und optischen Mikroskopen ergänzt. Die gewonnenen Erkenntnissen flossen in die Weiterentwicklung der Sensormuster ein und dienten zur Entwicklung eines Schnelltestsystems, mit dem Produktschäden an den Sensor-Halbzeugen frühzeitig identifiziert werden konnten (Kapitel 5.8). Mit diesen Maßnahmen gelang es schließlich, das Design, die Herstellungsprozesse und die Materialauswahl für die Herstellung der Mikrovibrationssensoren so aufeinander abzustimmen, dass eine Serienfertigung wirtschaftlich darstellbar ist.

6.1 DMAIC Prozess für Mikrovibrationssensoren

Die Anwendung der DMAIC-Methode auf die Mikrovibrationssensoren soll am Beispiel unzureichend gefertigter Kammer-Kupferschichten erläutert werden. Das Ergebnis dieser Methode sind qualitativ verbesserte Kammerplatten, modifizierte galvanische Kupferabscheidungsverfahren sowie grundlegende Erkenntnisse über die Prozessfähigkeit und –stabilität.

Nach DMAIC besteht der erste Schritt der Verbesserung in der Beobachtung und Beschreibung des Problems (*Define-Phase*). Wenn das galvanisch abgeschiedene Kupfer der Kammer zu hoch ist, offenbart sich dies in

- einer niedrigeren Klebekraft zwischen dem Boden, der Kammer und dem Deckel,
- einer reduzierten Dichtungsfunktion des Klebers durch mangelhaften Kleberfluss,
- einer völligen Funktionsunfähigkeit des Sensors durch eindringende Flüssigkeit.

In den Bildern 6-1 und 6-2 sind Auswirkungen einer zu hohen Kupferschicht der Kammer dargestellt. In Bild 6-1 erkennt man Flüssigkeitsreste, die infolge der unzureichenden Klebewirkung und Abdichtung in die Kammer gelangt sind. Die Flüssigkeitsreste verursachen Dendriten (Bild 6-2).



Bild 6-1: Flüssigkeitsreste in der Kammer

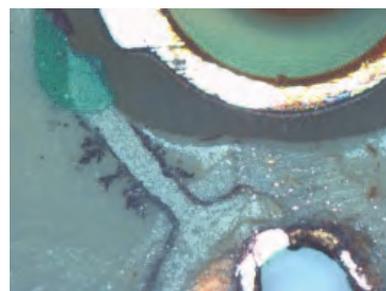


Bild 6-2: Dendritenwachstum

In der *Measurement-Phase* wird messtechnisch erfasst, ob tatsächlich ein schwerwiegendes Problem vorliegt. Hierfür sind geeignete Messgrößen und -bereiche festzulegen. Als Charakteristikum für die Qualität der Kupferabscheidung wurde die maximal zulässige Schichtdicke festgelegt. Die messtechnische Erfassung der Höhe erfolgte mit einem motorisierten, optischen Lichtmikroskop bei hoher Vergrößerung.

In der *Analyse-Phase* versucht man, die Schlüsselursache des Problems zu identifizieren. Die Fehlerannahme, dass zu hohe Kupferschichten die Fehler verursachten, wurde bestätigt. Die Kupferschichtdicken der Kammer betragen teilweise 45 µm und lagen somit 50 % über dem vorgegebenen Höchstwert von 30 µm.

Die *Improve-Phase* führte zu einer nachhaltigen Lösung, indem das Layout des Nutzens optimiert wurde (Kapitel 4.5.1), der Leiterplattenhersteller einen neuen Galvanoautomaten installierte und ein optimiertes galvanisches Kupferbad mit einer höheren Streufähigkeit verwendet wurde.

In der *Control-Phase* wird die Wirksamkeit der getroffenen Maßnahmen überwacht. Durch Abgleich der Produktionsausbeute mit den Fehlerquellen konnte schließlich festgestellt werden, dass die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten zu hoher Kupferschichten gegen Null gesunken war. Die systematische Beurteilung der Fehler führte letztendlich zur Entwurfsrichtlinie nach Gleichung (4.2) für die Integration von mechanischen Komponenten in die Leiterplatte.

Der Prozess der kontinuierlichen Verbesserung kann weitaus komplexer als im oben geschilderten Fall sein. Auch wenn eine eindeutige Beschreibung eines Fehlerbildes und dessen messtechnisch Erfassung möglich sind, muss die Analyse der Kernursache nicht immer zielführend sein. Dieser Zustand beeinflusste eine lange Zeit den Produktentstehungsprozess des Mikrovibrationssensors. Die Beschreibung des Problems „elektrisch defekter Sensor“, seine messtechnische Erfassung und Gewichtung sind durch die elektrische Charakterisierung einfach und schnell möglich (Kapitel 5.7). Die Ursache für elektrisch fehlerhafte Sensoren erschließt sich aus den Testergebnissen jedoch nicht. Das System „Mikrovibrationssensor“ verhält sich wie eine „Blackbox“ (Bild 6-3), in der viele Materialien, Prozesse und Belastungen aufeinandertreffen, deren fehlerhaftes Zusammenwirken zu einem Systemausfall führen kann.

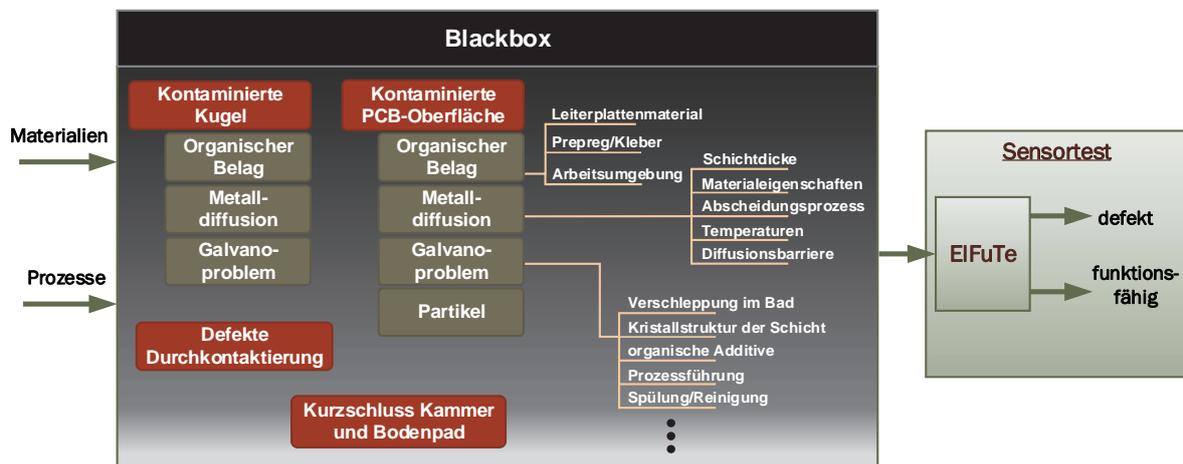


Bild 6-3: Darstellung der Blackbox für den Fehlerfall „elektrisch funktionsunfähiger Sensor“

Der elektrische Funktionstest ermöglicht lediglich die Unterteilung der Sensoren in „defekt“ und „funktionsfähig“. Daher wurden zur Identifikation der Fehlerursache neue, differenziertere Fehlerbeschreibungen und Messverfahren eingeführt. Zu diesen Fehlerbeschreibungen zählen

- fehlende Kugeln,
- Kurzschlüsse,
- defekte Durchkontaktierungen und
- kontaminierte sensorische Oberflächen.

Das durch fehlende Kugeln und Kurzschlüsse verursachte Fehlerbild ist einfach zu erklären und leicht zu beseitigen. Sporadisch auftretende Fehler in den Durchkontaktierungen entstehen infolge von inkompatiblen Prozessen und Materialien. Sie werden in Kapitel 6.3 besprochen.

Oberflächenkontaminationen können organischer, anorganischer oder metallischer Natur sein. Die Ermittlung der Art der Kontamination erfordert oberflächenanalytische Methoden wie XPS- und EDX-Messungen, Verfahren der Restgasanalyse (Kapitel 6.4.1) sowie bildgebende Methoden. Die Bilder wurden mit optischen Mikroskopen, REM- und FIB-SEM-Geräten erzeugt. Alle diese Verfahren sind aufwendig und nur bedingt für eine Inline-Qualitätsanalyse verwendbar.

Die mithilfe der Analytik gewonnenen Erkenntnisse fließen in die Verbesserung der Labormuster ein (*Improve-Phase*). Für die systematische Weiterentwicklung der Mikrovibrationssensoren wurde eine Methodik entwickelt, bei der jeweils nur ein Fertigungsparameter modifiziert wird. In einem neuen Fertigungslos werden Muster mit den modifizierten und den ursprünglichen Fertigungsparametern aufgebaut und miteinander verglichen. Wird beispielsweise das Verhalten eines Sensors mit einer geänderten Kugel untersucht, so werden je 2 Nutzen Vibrationssensoren mit neuen und alten Kugeln aufgebaut. Durch dieses Verfahren kann ausgeschlossen werden, dass infolge eines anderen Prozessfehlers die Untersuchungsergebnisse ihre Aussagekraft verlieren.

Auf diese Art wurde schlussendlich die Kernursache des Problems „elektrisch defekter Sensor“ identifiziert. Im Fall der Mikrovibrationssensoren hat sich gezeigt, dass die Qualität der galvanisch und elektrochemisch hergestellten metallischen Sensoroberflächen der Schlüssel zu funktionsfähigen Sensoren ist (Kapitel 6.4).

6.2 Qualitätssicherung externer Prozesse

In einer arbeitsteiligen Gesellschaft entstehen Produkte in der Regel durch das Zusammenwirken von Teilprozessen und -komponenten unterschiedlicher Hersteller. Die Herstellung der Mikrovibrationssensoren erfordert eine Vielzahl an Prozessen, für die im KIT keine geeigneten Fertigungseinrichtungen zur Verfügung stehen. Diese müssen durch externe Dienstleister bezogen werden.

Die wesentlichen Fertigungsschritte, die durch externe Dienstleister durchgeführt werden, sind in Tabelle 6-1 aufgeführt. In der Spalte „Prozess“ sind die verschiedenen Einzelschritte für die Fertigung der Sensorhalbzeuge aufgelistet. In den weiteren Spalten der Tabelle ist eine Einstufung der Komplexität und des Risikos der Prozesse angegeben. Unter „Risiko“ wird hier die Wahrscheinlichkeit verstanden, dass Sensoren infolge eines Prozessfehlers nicht funktionsfähig sind. Je weiter der Balken gefüllt ist, desto höher ist das Ausfallrisiko.

Prozess	Prozess-Komplexität	Prozess-Risiko
Leiterplattenmaterialien vorbereiten (zuschneiden, trocknen, ...)		
Leiterbild strukturieren (ätzen)		
Bohren von Durchkontaktierungen		
Galvanisieren von Durchkontaktierungen (Kupfer)		
Galvanisieren der Kammerbohrungen (Kupfer)		
Edelmetallbeschichtung galvanisch		
Edelmetallbeschichtung elektrochemisch		
Verpressen der Einzelschichten		
Befüllen der Kugeln		
Herstellung der Kugeln		
Edelmetallbeschichtung der Kugeln		

Tabelle 6-1: Übersicht über externe Prozesse und Risikobeurteilung

Die Expertise der Firmen sowie die systematische Qualitätssicherung nach der DIN EN ISO 9001:2008 führen in der Regel zu einer hochwertigen Produkt- und Prozessqualität. Werden die externen Prozesse jedoch am Rande der technologischen Grenzen durchgeführt, so sind die Auswirkungen auf das Produkt oft nicht abschätzbar. Die in Tabelle 6-1 grau unterlegten Prozesse sind für die Herstellung der Mikrovibrationssensoren als hochriskant einzustufen. Es handelt sich durchweg um galvanische Verfahren. Bei diesen Prozessen werden große Materialmengen gleichzeitig bearbeitet. Fehler werden im schlimmsten Fall erst nach dem vollständigen Aufbau der Vibrationssensoren im elektrischen Funktionstest erkannt.

Zur Minimierung des Risikos eines Totalausfalls, bedingt durch einen Fehler im galvanischen Prozess, werden zwei Strategien verfolgt. Eine Strategie besteht im vollständigen Aufbau einiger Musternutzen aus einem galvanischen Fertigungslos. Die Verarbeitung der kompletten Ware erfolgt nach der Freigabe der geprüften Muster (Bild 6-4). Diese Vorgehensweise führt zu einer zeitliche Verzögerung, die für eine industrielle Produktion nicht vertretbar ist. Die zweite Strategie besteht in der Prüfung der Halbzeuge vor der vollständigen Verarbeitung. Daher wurde das Schnelltestverfahren „KuPlaTe“ (Kapitel 5.8) entwickelt und in die Prozesskette eingebunden. Im Prozessschritt „1“ (Bild 6-4) werden die Edelmetallschichten auf die Halbzeuge eines Produktionsloses und besonderen Prüfplatten aufgebracht. Die Prüfplatten werden im Arbeitsgang „2“ elektrisch getestet. Nach erfolgreichem Test der Prüfplatten werden die Halbzeuge für die Verarbeitung in Schritt „3“ freigegeben.

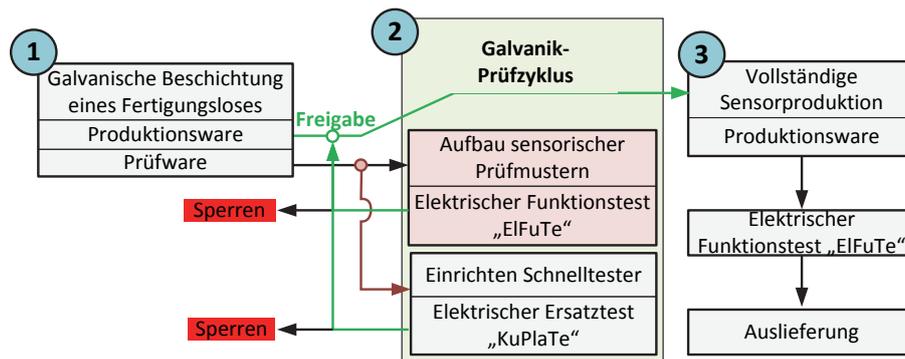


Bild 6-4: Fertigungsablauf für Mikrovibrationssensoren mit zusätzlicher Halbzeugprüfung „Kugel-Plattentest“

Trotz leistungsfähiger analytischer Verfahren bleibt die Optimierung und Stabilisierung der elektrochemischen und galvanischen Prozesse im Zusammenwirken mit externen Dienstleistungsunternehmen eine Herausforderung. Die externen Galvanikdienstleister schätzen die hohen Anforderungen an die Schichtqualität für die Mikrovibrationssensoren in der Regel falsch ein. Bereits geringe Abweichungen von den Prozessvorgaben beeinflussen die Schichtqualität und ziehen Qualitätsmängel im Sensor nach sich (Kapitel 2.7).

6.3 Prozessverträglichkeiten

Die Prozesse zur Leiterplattenherstellung sind genau aufeinander abgestimmt und für spezielle Materialkombinationen optimiert. Ändert man die Materialien oder Prozesse geringfügig, so können massive Qualitätsprobleme auftreten.

Bei der Integration funktionaler Schichten in Leiterplatten ist besonders der Aufbau edelmetallbeschichteter Bereiche im Inneren der Platte kritisch, sofern diese über Durchkontaktierungen elektrisch an andere Bereiche der Leiterplatte angebunden werden sollen (Kapitel 4.5.1, Bild 4-18). In (Bild 6-5) ist eine defekte Durchkontaktierung eines Mikrovibrationssensors dargestellt, die infolge der inkompatiblen Material-Prozesskombination für die Herstellung der Durchkontaktierung entstanden ist.

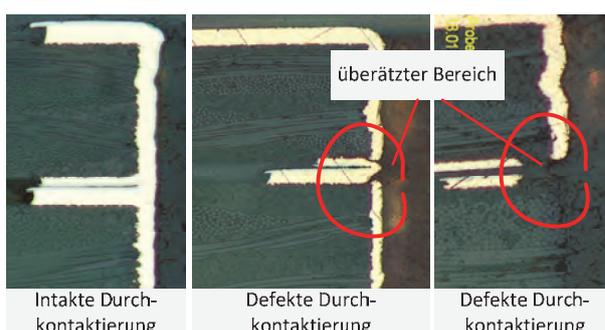


Bild 6-5: Fehlerhafte Durchkontaktierung. Die Zwischenlage wurde mit Ni/Au beschichtet.

Abhilfe lässt sich durch eine andere Materialkombination der sensorischen Schicht schaffen. Die chemisch abgeschiedene Nickel-Phosphorschicht ist in Kombination mit der Palladium- und Goldschicht widerstandsfähig gegen den starken Ätzangriff. Diese spezielle Materialkombination wurde für die Integration von funktionalen Schichten in Leiterplatten patentrechtlich geschützt (Blank & et al., 2012c).

6.4 Analytikverfahren für die Prozessentwicklung

Die elektrischen Prüfverfahren ermöglichen eine schnelle und einfache Identifikation defekter Sensoren. Mit dem Teststand *ELFuTe* können fast alle defekten Mikrovibrationssensoren bereits im ersten Testdurchlauf identifiziert werden. Davon ausgenommen sind Sensoren, deren Durchkontaktierungen vorgeschädigt oder halbddefekt⁴² sind oder deren Schadensbild sich erst nach dem Löttest ausbildet.

Für die Ursachenermittlung der Kontaktprobleme kann der elektrische Teststand nicht genutzt werden. Es müssen oberflächennahe Analysemethoden verwendet werden. In Tabelle 6-2 sind die im Rahmen dieser Arbeit genutzten Verfahren aufgeführt.

Testmethode	Erläuterung
Raster-Elektronenmikroskop (REM)-Analysen	Oberflächen- und Schliiffflächenanalyse
EDX-Analyse	Ermittlung der oberflächennahen (100 nm-etwa 3 µm) chemischen Schichtzusammensetzung mit der Methode der „Energy Dispersive X-ray spectroscopy“.
In situ FIB-SEM und FIB-SEM Aufnahmen	Ein REM mit der Möglichkeit, die Oberfläche der Probe mit einem fokussierten Ionenstrahl (Focus Ion Beam) abzutragen. Bei einem in-situ FIB-SEM besteht die Möglichkeit, die Probe während der Messung thermisch oder mechanisch zu manipulieren.
ToF-SIMS ⁴³ -Messungen	Bestimmung der Elemente und Moleküle, die sich unmittelbar auf der Oberfläche der Probe befinden. Die „Time of Flight Secondary Ion Mass Spectroscopy“-Methode nutzt Ionen zur Anregung der Moleküle der Oberfläche.
XPS („X-Ray Photoelectron Spectroscopy“)-Messungen	Mit der XPS-Messung werden die Atome der Oberfläche durch Röntgenstrahlung angeregt und emittieren Elektronen. Aus der Energie des Elektrons kann auf das Teilchen geschlossen werden, welches das Elektron abgegeben hat.
Gaschromatografische Restgasanalysen	Die gaschromatografischen Untersuchungen werden im Hochvakuum bei etwa 10 ⁻⁹ mbar durchgeführt. Die Proben können auf etwa 200 °C-350 °C erhitzt werden, um organische Zerfallsprodukte aus dem Leiterplattenmaterial zu bestimmen.
Elektrische Charakterisierung	Eigenentwicklung zur frühzeitigen Charakterisierung von Eigenschaften der abgeschiedenen metallischen Sensorschichten.
Nasschemische analytische Untersuchungen	Säuretest mit H ₂ O ₂ zur Bestimmung der Porosität der Immersionsgoldschicht.
Schliffanfertigung und Schliffbildanalyse	Routineverfahren zur Beurteilung der inneren metallischen Schichten und der Bohrqualität.
Mikroskopische Analysen	Standardverfahren zur Analyse der Schriffe.

Tabelle 6-2: Methoden der Oberflächenanalytik zur Optimierung der Vibrationssensoren

6.4.1 Organische Kontamination der Sensorflächen

Neben den bereits diskutierten metalloxidischen Schichten verursachen organische Beläge einen erhöhten elektrischen Kontaktwiderstand. Diese Beläge können ein Nebenprodukt der galvanischen (Romankiw & et al., 2000) oder elektrochemischen Metallabscheidung sein. Sie können aber auch durch Kondensation von Kohlenwasserstoffketten entstehen, die aus dem organischen Basismaterial ausgasen.

⁴² Eine „halbddefekte“ Durchkontaktierung ist im Wafervorbund noch in Ordnung. Nach der Vereinzelung ist die Durchkontaktierung elektrisch nicht mehr funktionsfähig.

⁴³ Die ToF-SIMS-Messungen (Time of Flight Secondary Ion Mass Spectroscopy) wurden nur einmalig für die Charakterisierung einer Goldoberfläche genutzt. Sie brachten keine aussagefähigen Erkenntnisse.

Ein indirekter Hinweis, dass galvanisch aufgebaute metallische Schichten in erheblichem Maße organische Substanzen abgeben können, ergab sich bei den durchgeführten XPS-Messungen. Bei der Einschleusung galvanisch beschichteter Kupferfolien in die Ultrahochvakuum⁴⁴-Vorkammer des XPS-Messsystems wurde festgestellt, dass die zur Evakuierung erforderliche Zeit deutlich höher war als üblich. Die ist ein klares Indiz für einen hohen Gehalt flüchtiger, organischer Stoffe in der Edelmetallschicht auf der Kupferfolie (Bild 6-10). Ähnliche Effekte sind auch in der Literatur für elektrochemisch abgeschiedene Nickel-Gold Schichten beschrieben (Wegerer, 2011).

Das Ausgasungsverhalten des Leiterplattenbasismaterials und des Klebers wurde ebenfalls im UHV ermittelt, wobei die volatilen Gaskomponenten mithilfe eines Restgasanalysators charakterisiert wurden. Nach der Stabilisierung des Druckes in der Vakuumkammer wurden die Proben auf 230 °C bzw. 260 °C erhitzt. Die aus dem Material austretenden Substanzen wurden mit einem Gaschromatographen analysiert. Ziel der Untersuchungen war es, den Einfluss einer spezifischen Vorbehandlung durch Temperung zu ermitteln. In Tabelle 6-3 sind die Testbedingungen und die Vorbehandlungen der Proben aufgeführt.

Versuchsnummer	Probenmaterial	Vorbehandlung	Test
A	R1755	Wie geliefert	Einschleusen - Aufheizen auf 240 °C
B	R1755	Bei 230 °C im Vakuum (1 mbar) für 5 Min. getempert	Einschleusen - Aufheizen auf 260 °C
C	R1755	15h bei 150 °C getempert	Einschleusen - Aufheizen auf 240 °C
D	R1755	2h bei 230 °C	Einschleusen - Aufheizen auf 260 °C
E	LF 200	Wie geliefert	Einschleusen - Aufheizen auf 160 °C

Tabelle 6-3: Testbedingungen und Materialien der im Restgasanalysator geprüften Proben

Die Proben A-D verhalten sich im Restgasanalysator qualitativ sehr ähnlich (Bild 6-6). Beim Einschleusen steigt der Druck der Kammer von ca. 10^{-9} mbar auf knapp 10^{-6} mbar an. Hauptsächlich treten Wasser, Kohlendioxid, Sauerstoff und Stickstoff auf. Kurzketten Kohlenwasserstoffketten, die summarisch als „Benzene“ erfasst werden, sind auch nach der Erhöhung der Temperatur auf 240 °C kaum nachweisbar. Auffällig ist der hohe Sauerstoffgehalt, der nicht der Zusammensetzung normaler Luft entspricht (80 % N₂, 20 % O₂). Insgesamt ist in dem Restgas ein sehr großer Anteil H₂O und CO₂ vorhanden. Der hohe Sauerstoffgehalt ist auf den anfänglich hohen H₂O-Gehalt zurückzuführen. Wird die Probe auf ca. 240 °C aufgeheizt, werden weitere Gase ausgetrieben.

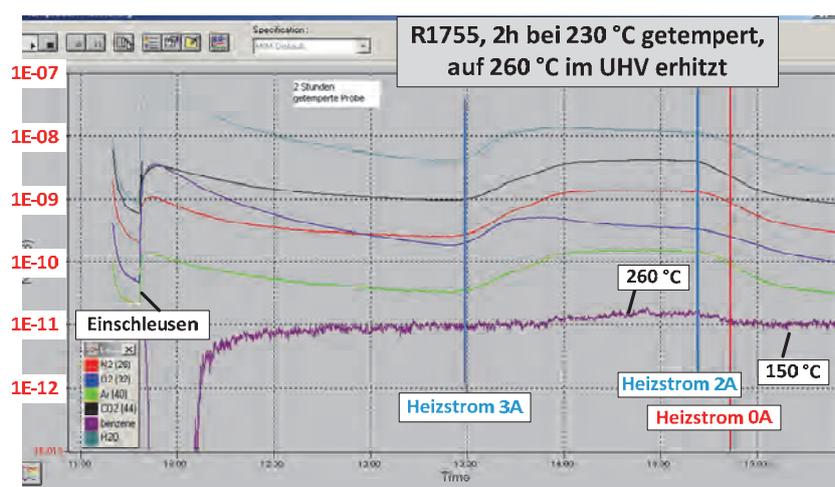


Bild 6-6: Restgasanalyse einer getemperten Leiterplatte, die im UHV auf 240°C erhitzt wurde. Aufgetragen ist der Restdruck in der Kammer über dem zeitlichen Verlauf der analysierten Gaskomponenten. N₂ ist rot, O₂ ist blau, Ar grün, CO₂ schwarz, Benzene violett und H₂O dunkelgrün dargestellt.

Erst bei Überschreiten einer Temperatur von etwa 260 °C nimmt der Anteil benzolhaltiger Verbindungen („Benzene“) zu. Offensichtlich beginnt ab dieser Temperatur die Zersetzung des Basismaterials.

⁴⁴ Ultrahochvakuum bezeichnet einen Druck im Bereich von 10^{-7} bis 10^{-10} mbar. Es wird mit UHV abgekürzt (Dörr, 2011).

Die Versuchsergebnisse decken sich mit den Literaturangaben, wonach Epoxidharze ab einer Temperatur oberhalb von 180 °C unter Wasserabspaltung oxidieren. Die Molekülketten werden bei diesem Prozess zunächst nicht aufgespalten. Sie lagern sich um und spalten dabei Wasser ab (Audouin & et al., 1995). Der Gehalt an kurzkettigen Kohlenwasserstoffketten ist jedoch insgesamt immer noch recht gering.

Im Vergleich zu den beiden vollständig ausgehärteten Epoxiden verhält sich der acrylatische Kleber LF200 erwartungsgemäß bei der einsetzenden Polymerisation ganz anders (Versuch E). Der Anteil an kurzkettigen Kohlenwasserstoffmolekülen steigt im Restgas um zwei Größenordnungen an (Bild 6-7). Nach ca. 45 Minuten hat die Polymerisationsrate ihren Höhepunkt überschritten. Die Menge der „Benzene“ nimmt wieder ab.

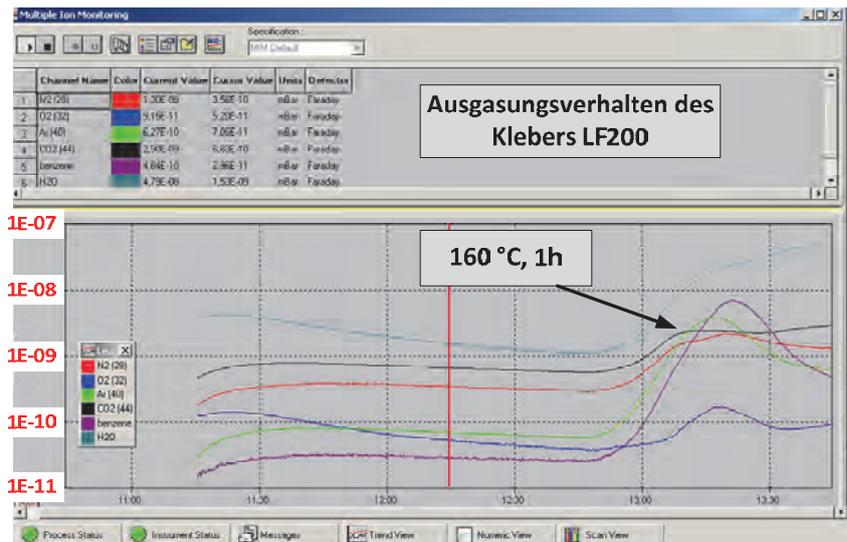


Bild 6-7: Restgasanalyse des Klebers LF200. Aufgetragen ist der Restdruck in der Kammer über dem zeitlichen Verlauf der analysierten Gas-Komponenten. N₂ ist rot, O₂ ist blau, Ar grün, CO₂ schwarz, Benzene violett und H₂O dunkelgrün dargestellt.

Das Ergebnis dieser Untersuchungen zeigt, dass eine Temperung der Materialien zu einer reduzierten Ausgasung führt. Die Ausgasungsprodukte aus den Basismaterialien haben jedoch keinen funktionsrelevanten Einfluss auf den Kontaktwiderstand der Mikrovibrationssensoren. Eine Temperung der Basismaterialien vor der Laminierung der Sensoren ist aus Gründen der elektrischen Funktionalität nicht erforderlich. Der Kleber sollte jedoch vor der Verarbeitung für 24 Stunden offen in einem Schrank mit Abzugseinrichtung gelagert werden. Durch die Lagerung verliert der Kleber einen Teil seiner flüchtigen Lösemittel vor der Verarbeitung.

Eine weitere Quelle organischer Kontaminationen besteht in den galvanischen Metallisierungsprozessen. Organische Substanzen können als Nebenprodukt der Abscheidereaktion in die Schicht eingebaut werden. Sie können aber auch von Elektrolytlösungsresten herrühren, die in Kavitäten und Poren der metallischen Schicht integriert werden. Bei einer Temperaturerhöhung verdampft die Flüssigkeit. Die Metallschicht kann infolge des hohen Druckes aufreißen und die verdampfte Elektrolytlösung verursacht bei ihrer Kondensation organische Niederschläge.

Ein einfaches Verfahren zur Ermittlung dieser Effekte in Leiterplatten ist der Ölttest (Willis, 2011). Bei dieser Methode füllt man ein wärmebeständiges Öl in die Kammer oder in eine Durchkontaktierung und erhitzt die Durchkontaktierung. Bei mangelhaften Durchkontaktierungen kann unter dem Mikroskop beobachtet werden, wie sich Gasblasen entwickeln.

In der lichtmikroskopischen Aufnahme 6-8 sind Kavitäten dargestellt, die durch den Bohrprozess verursacht wurden. In den entstanden Kavitäten kann sich Elektrolyt ansammeln. Rechts daneben ist ein FIB-Schnittbild durch die Kammer eines Sensors dargestellt. Das Kupfer, das spaltfrei mit der Epoxidharzmaske verbunden sein sollte, haftet nicht auf der Kammerwand. Zwischen Kupfer und Epoxid ist ein Hohlraum entstanden, in dem sich ebenfalls Elektrolytlösung ansammeln kann.

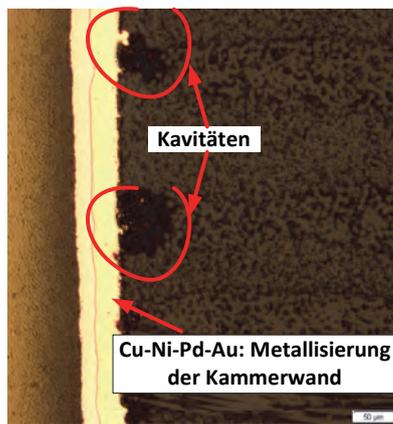


Bild 6-8: Mikroskopaufnahme von einem Schliff einer Kammer

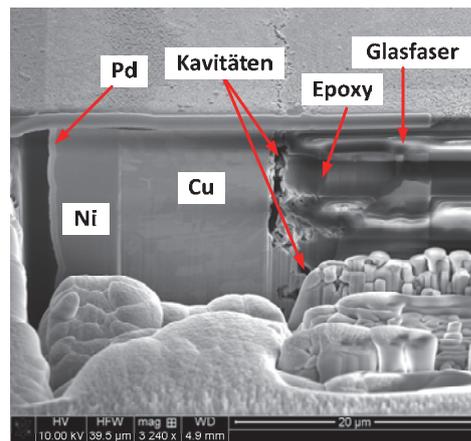


Bild 6-9: FIB-SEM-Aufnahme durch eine ENEPIG-beschichtete Kammer

Die Wahrscheinlichkeit, dass Ausgasungsprodukte aus dem galvanisch abgeschiedenen Schichten zu einem schlechten elektrischen Kontakt führen, ist gering. Defekte Kugeln wiesen immer deutliche Spuren von Nicht-Edelmetallen auf, gute Kugeln jedoch nicht. Die ENEPIG-Schichten zeigen ein sehr gutes elektrisches Schaltverhalten, sodass eine Funktionsbeeinträchtigung der Sensoren durch organische Ausgasungsprodukte im Regelfall ausgeschlossen werden kann.

6.4.2 Fremdmetalle in Edelmetallschichten

Galvanisch oder elektrochemisch abgeschiedene Edelmetallschichten können nicht metallisch rein abgeschieden werden. In der Schicht befindet sich immer ein Restanteil an Fremdmetallen und organischen Substanzen. Fremdmetalle können absichtlich in den Elektrolyten gegeben werden, wodurch die Eigenschaften der abgeschiedenen Schichten verändert werden. Für die Herstellung von Hartgoldschichten werden etwa 0,3 Gew. % Kobalt (Umicore GmbH, 2013), Eisen oder Nickel in die Goldmatrix eingebaut. Durch die Fremdmetalle wird das Gold härter und mechanisch belastbarer. Aufgrund der guten mechanischen Eigenschaften wurden die ersten Vibrationssensoren mit hartgoldbeschichteten Kontaktoberflächen hergestellt. Werden diese Legierungen thermisch belastet, ist jedoch eine deutliche Zunahme des elektrischen Widerstandes zu beobachten⁴⁵ (Antler, 1997). Dieser Effekt ist abhängig von der Zusammensetzung und dem Zustand des Bades (Okinaka, 2000). Infolge der hohen Temperatur entmischen sich das Gold und das Fremdmetall. Die Fremdmetalle reichern sich auf der Oberfläche an, an der sie oxidieren (Kurtz & Barthelmes, 2010).

Fremdmetalle können aber auch unbeabsichtigt in den Elektrolyten geraten. Eine mögliche Quelle sind verschleppte Metalle, die durch die Behandlung in anderen Elektrolyten in das Bad eingetragen werden. Da die Metalle im Elektrolyten immer auch zu einem Teil in Lösung gehen, können die Fremdmetalle von dem behandelten Metall selbst stammen. Spuren dieser Metalle werden bei nachfolgenden Abscheidungsprozessen in die Edelmetallschicht integriert (Kapitel 2.7.9). Ferner können die Fremdmetalle durch Diffusion aus tiefer liegenden Schichten an die Oberfläche gelangen.

Häufig ist eine eindeutige Bestimmung des Ursprungs der Fremdmetalle in der abgeschiedenen Schicht nicht möglich. In Laborversuchen wurden daher Schichten aus Hartgoldbädern

- a) auf einer 6 bis 7 µm starken Nickelsperrschicht und
- b) auf einer 1 µm starken Palladiumsperrschicht über einer 6 bis 7 µm starken Nickelschicht

abgeschieden. Die Proben wurden thermisch bei 300 °C für eine Stunde ausgelagert. Die wesentlichen Ergebnisse dieser Untersuchung sind (Kurtz & et al., 2011):

⁴⁵ Die Widerstandserhöhung ist stark von der Schichtzusammensetzung und den Auslagerungsbedingungen abhängig. Sie kann leicht einen Faktor von 100 übersteigen (Antler, 1997).

- Palladiumschichten sind hoch wirksame Diffusionsbarrieren.
- Der Widerstand der Edelmetallschichten, bei denen kein Palladium als Diffusionsbarriere verwendet wurde, steigt signifikant an. Mit einer Sperrschicht aus Palladium bleibt der Widerstand konstant. Somit diffundiert das Nickel aus der unterliegenden Schicht durch die Hartgoldschicht, oxidiert dort und verursacht eine Widerstandsänderung.
- Verwendet man Palladium als Sperrschicht, findet man auf der Oberfläche der Goldschicht Anreicherungen von Kobalt. Die Schichten sind aber sehr dünn und haben keinen nennenswerten Einfluss auf die elektrische Leitfähigkeit.

In den Untersuchungen von (Kurtz & et al., 2011) wurde keine Aussage über die Reinheit der Bäder getroffen. Bei der Herstellung von Leiterplatten sind Fremdionenkonzentrationen bis zu 500 ppm zulässig (Hörhold, 2008). Daher können Fremdatome in erheblicher Konzentration in die Goldschichten gelangen.

In den galvanischen Goldschichten der Mikrovibrationssensoren wurden Spuren von Kupfer, Zink, Nickel und Eisen gefunden. Der Nachweis der Verschleppungen wurde mit XPS-Messungen an drei Prüfmustern N1, N2 und N3 erbracht. Bei den Prüflingen handelte es sich um schmale Streifen aus einer 200 µm starken Kupferfolie, die galvanisch mit etwa 5-7 µm Nickel und einer 1,5 µm starken Hartgoldschicht überzogen wurden (Bild 6-10). Die Hartgoldschicht wurde aus dem Bad AURUNA 530 (Umicore GmbH, 2013) mit einem Co-Gehalt von 0,3 Gew.% Kobalt abgeschieden.

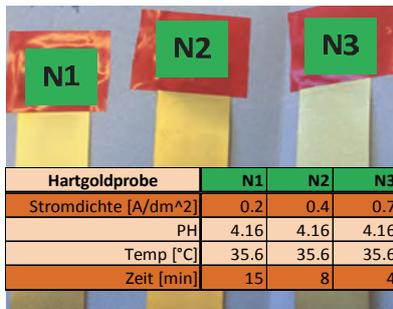


Bild 6-10: Teststreifen zur Charakterisierung galvanisch abgeschiedener Hartgoldschichten

Durch unterschiedlich hohe Stromdichten sollte der Kobaltgehalt in den Schichten variiert werden. Die Untersuchungen ergaben, dass die gewählten Abscheidetparameter keinen erkennbaren Einfluss auf den Kobalt-Gehalt oder die Schichtzusammensetzung hatten. Die ursprüngliche Vermutung, dass sich der Gehalt an Fremdionen mit den Abscheidetbedingungen ändert, konnte in dieser Versuchsreihe nicht bestätigt werden.

Nach der Abscheidung der Goldschicht wurden Teilstücke jeder Probe thermisch ausgelagert. Die Auslagerungszeit betrug fünf Minuten bei einer Temperatur von 300 °C. Für alle Proben wurde ein XPS-Tiefenprofil erstellt. In den Bildern 6-11 und 6-12 sind die Analyseergebnisse für die Probe N3 dargestellt.

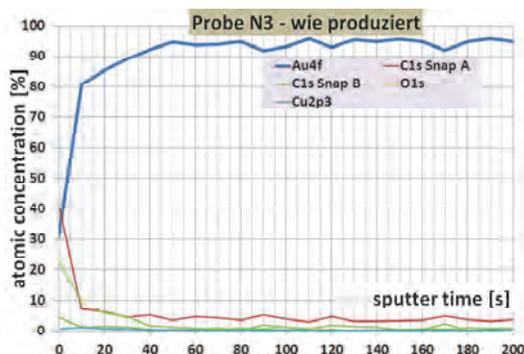


Bild 6-11: Darstellung der atomaren Konzentration über der Abtragszeit nach der Herstellung

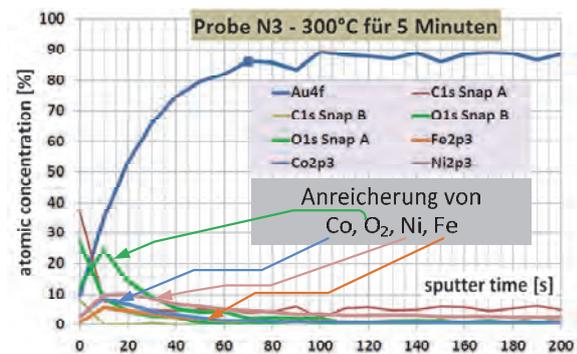


Bild 6-12: Darstellung der atomaren Konzentration nach fünfminütiger Lagerung bei 300 °C

Aus den Messergebnissen kann man folgende Erkenntnisse gewinnen:

- Auf der unbehandelten Oberfläche befindet sich eine ausgeprägte Schicht aus Kohlenstoff und Sauerstoff.
- Die Probe, die für fünf Minuten bei 300 °C gelagert wurde, zeigt eine deutliche Anreicherung von Kobalt, Eisen und Nickel auf der Oberfläche. Ferner ist der Sauerstoffgehalt angestiegen, was auf eine Oxidbildung schließen lässt.
- Unklar ist die Quelle des Eisens. Es muss ein Produktionsbestandteil des Bades sein, der jedoch nicht im Datenblatt aufgeführt ist. Eine Kontamination des Bades mit Eisen durch Verschleppung kann fast sicher ausgeschlossen werden, da in dem Bad keine eisenhaltige Werkstoffe behandelt wurden.

Diese Ergebnisse decken sich mit dem elektrischen Schaltverhalten von Mikrovibrationssensoren, die mit der gleichen Hartgoldschicht aufgebaut wurden. Unmittelbar nach der Lieferung geben sie viele Schaltimpulse ab. Nach dem Lötprozess im Reflow-Ofen sind sie hochohmig und schalten nicht mehr.

Metalloxide auf den Kontaktflächen können zu einem unmittelbaren Ausfall der Sensoren führen, die Sensoren können nach einer thermischen Belastung ausfallen oder sie fritten (Kapitel 2.6.2). Die Auswirkungen eines dünnen, wenige Nanometer messenden Metalloxidfilms auf die elektrischen Eigenschaften der Mikrovibrationssensoren sind in Bild 6-13 dargestellt. Dort sind Schaltsignale eines Sensors über der Zeit abgebildet, bei dem der Oberflächenwiderstand stark von der Messspannung abhängt. Dieser Sensor frittet. Führt man die elektrische Prüfung der Bauteile bei einer Messspannung von 5 Volt durch, erhält man einen voll funktionsfähigen Schalter. Die Elektronen können die Oxidschicht tunneln. Wird der gleiche Sensor jedoch bei einer Spannung von 2V betrieben, ist der Sensor nahezu funktionsunfähig.

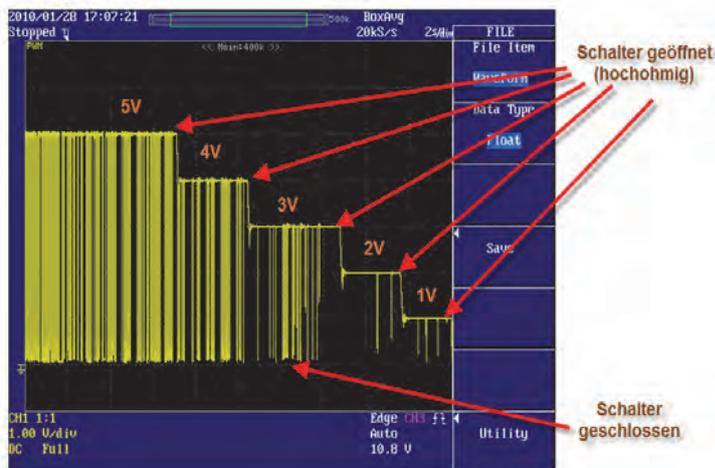


Bild 6-13: Schaltverhaltens von Sensoren mit einer Hartgoldschicht nach thermischer Lagerung

Metalloxide wurden nicht nur auf den Leiterplatten gefunden sondern auch auf den Kugeln. Die Kugeln waren mit einer 1 µm starken Goldschicht bedeckt, die ohne Diffusionsbarriere direkt auf den Stahl aufgebracht wurde. Abhängig von der Qualität und der Stärke der Goldschicht wurde nach dem Lötprozess eine Erhöhung des elektrischen Widerstandes der Kontaktflächen beobachtet.

Die Analyse von Testkugeln im REM und die Charakterisierung der Materialzusammensetzung des oberflächennahen Metallvolumens zeigten, dass Eisen aus dem Kern der Kugel an die Oberfläche diffundiert war. Die untersuchten Kugeln wurden für 20 Minuten bei 300 °C gelagert. In Bild 6-14 ist das REM-Bild einer dieser Kugeln dargestellt. An den Korngrenzen (unterhalb des roten Markierungskreuzes) kann man „Eisenwürmer“ erkennen. Sie konnten nur bei den thermisch ausgelagerten Kugeln nachgewiesen werden. Auch das in der EDX-Messung ermittelte Eisen war lediglich bei der thermisch behandelten Kugel feststellbar. Auf den Oberflächen der Kugeln, die bei Raumtemperatur gelagert wurden, konnte kein Eisen detektiert werden.

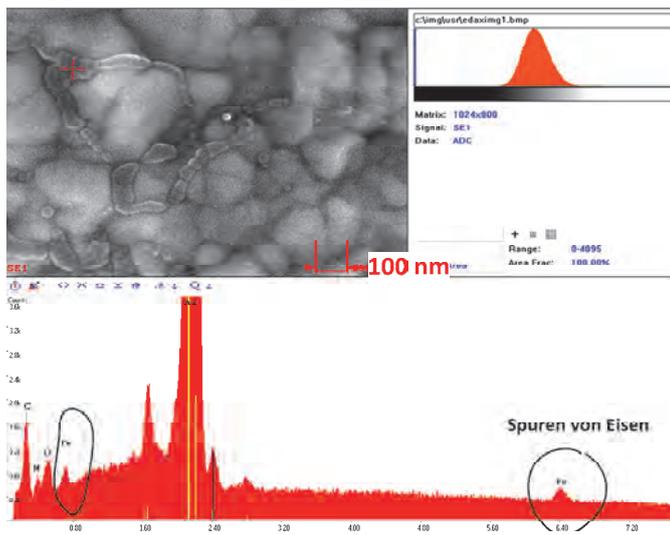


Bild 6-14: REM-Bild einer thermisch ausgelagerten Kugel mit EDX-Analyse

Das EDX-Verfahren ist aufgrund der hohen Anregungsenergie und der großen Eindringtiefe der Elektronen in das Material eher nicht für die Analyse oberflächennaher Schichten geeignet. Bei angepassten Beschleunigungsenergien des Elektronenstrahls und hohen Goldschichtdicken ist die Methode dennoch geeignet, die Goldauflage auf den Kugeln zu untersuchen. Bei entsprechenden Einstellungen können auch 100 nm dünne Goldschichten auf einer Nickelschicht analysiert werden (Takano, 2011).

Das Eisen an der Oberfläche der Kugel beeinflusst die sensorischen Eigenschaften negativ. Daher wurde die Metallisierung aller sensorischen Flächen der Mikrovibrationssensoren auf eine ENEPIG-Schicht umgestellt. Die Kugeln wurden zur Verbesserung der mechanischen Belastbarkeit und zur Reduzierung des Fretting-Risikos mit einer Feingoldschicht aus einem hochreinen galvanischen Bad überzogen (Kapitel 4.5.2).

Die Kontaktschichten für die Mikrovibrationssensoren können nicht aus galvanischen Bädern hergestellt werden, die üblicherweise für die Beschichtung von Leiterplatten verwendet werden. Diese Bäder sind meist zu stark mit Fremdmetallen kontaminiert. Daher werden die Leiterplatten mit ENEPIG-Schichten hergestellt. Die elektrochemischen Bäder zur Abscheidung der ENEPIG-Schicht reagieren jedoch sehr empfindlich auf organische Verunreinigungen (Kapitel 4.5.3). Die Verunreinigungen stammen in der Regel aus nicht ausreichend vernetzten Lacken und Kunststoffen. In den bis zu 90 °C heißen Elektrolytlösungen werden die unvernetzten Polymergruppen aus der Harzmatrix herausgelöst. Sie reichern sich im Bad an und Wildabscheidungen (Kapitel 2.7.10) können auftreten (Bild 6-15).

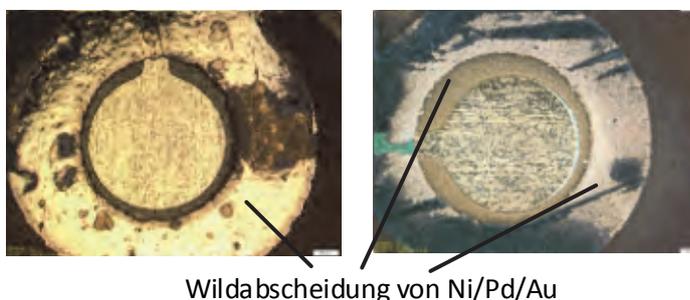


Bild 6-15: Wildabscheidungen aus einem ENEPIG-Prozess

Wildabscheidung von Ni/Pd/Au

Derart offensichtliche Fehler sind selten. Allerdings kann auch der Aufbau der Nickelschicht infolge der Belastung des Elektrolyten gestört sein. Diese Störung setzt sich im Palladium fort. Hierdurch bilden sich Poren- und Kavernen im Palladium, durch welche eine Nickeldiffusion möglich ist. Dieser Effekt ist in Bild 6-16 dargestellt. In der Nickelschicht befinden sich Risse und Kavitäten, die bis in

die Palladiumschicht reichen. Mikrovibrationssensoren, welche mit einer derart vorgeschädigten Schicht hergestellt werden, sind nicht funktionsfähig.

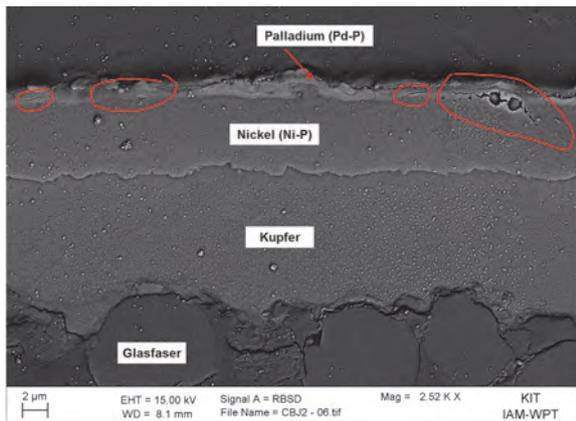


Bild 6-16: REM-Aufnahme einer ENEPIG-Schicht mit Poren- und Rissbildung

Der Schichtaufbau der Palladium- und Nickelschicht kann aber auch durch die Immersionsabscheidung des Goldes auf dem Palladium beeinträchtigt werden (Kapitel 4.5.3). In Bild 6-18 sind die Effekte der Austauschreaktion an der Grenzschicht zwischen Nickel und Palladium dargestellt. Die Abscheidung von Gold erzwingt die Diffusion des Nickels durch die Palladiumschicht. Dicht unter der Palladiumschicht verbleiben Poren und Kavitäten im Nickel. Der Nickelangriff muss nicht immer derart stark erfolgen. Im Bild 6-17 ist der Schichtaufbau der Kugel dargestellt. Die Grenzfläche zwischen Nickel und Palladium ist nicht erkennbar angegriffen. Das Immersionsgold ist mit galvanisch abgeschiedenem Gold überzogen. Bild 6-19 zeigt zum Vergleich den Schichtaufbau einer ENEPIG-Schicht, die mit einem Reduktivgoldverfahren hergestellt wurde.

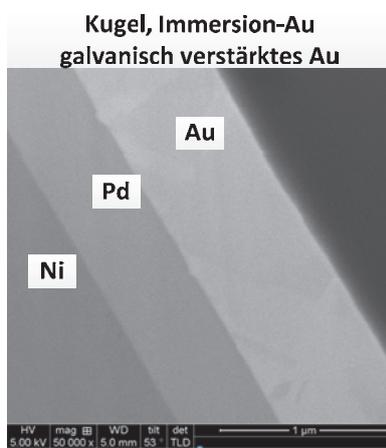


Bild 6-17: Edelmetallschicht auf der Kugel

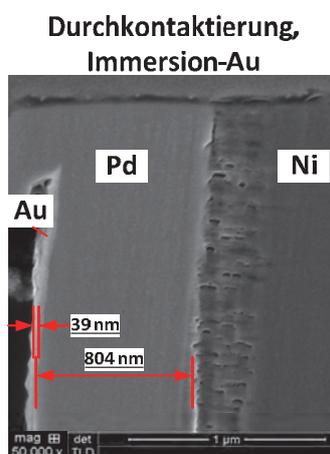


Bild 6-18: ENEPIG-Schicht mit gestörtem Ni-Aufbau und Immersionsgold

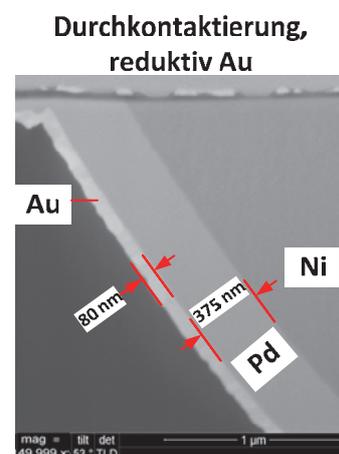


Bild 6-19: ENEPIG Schicht mit reduktiv unterstützter Goldabscheidung

Die in Bild 6-18 dargestellte Störung der Nickelschicht erscheint im Auflichtmikroskop als dunkle Stelle (Bild 6-20). Eine EDX-Analyse ergibt für diesen Bereich eine Sauerstoffanreicherung, die auf ein Metalloxid hinweist (Bilder 6-21 und 6-22).

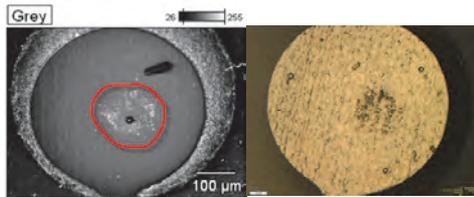


Bild 6-20: REM und optische Aufnahme eines Bodenkontaktes mit gestörter ENEPIG-Schicht

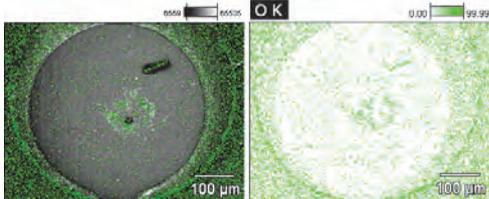


Bild 6-21: REM und überlagerte EDX-Analyse der Schicht - Sauerstoff

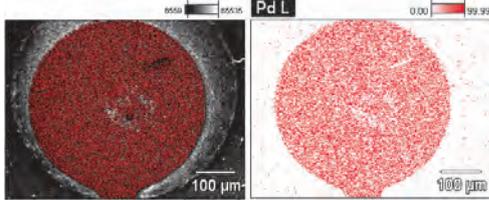


Bild 6-22: REM-Aufnahme und überlagerte EDX-Analyse der Schicht - Palladium

Die abschließende Analyse zur Bestimmung der Metalloxidart steht noch aus. XPS-Analysen weisen jedoch darauf hin, dass es sich um Kupfer handelt (Bilder 6-23 und 6-24). Andere metallische Elemente wie Nickel, Zinn, Zink oder Eisen sind in den oberflächennahen Bereichen nicht zu finden. Die Herkunft des Kupfers ist noch nicht geklärt.

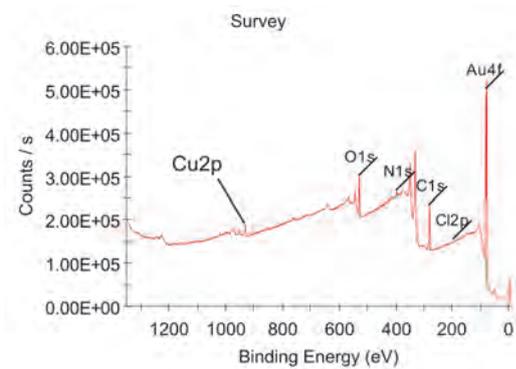


Bild 6-23: XPS-Übersichtsspektrum der Oberfläche

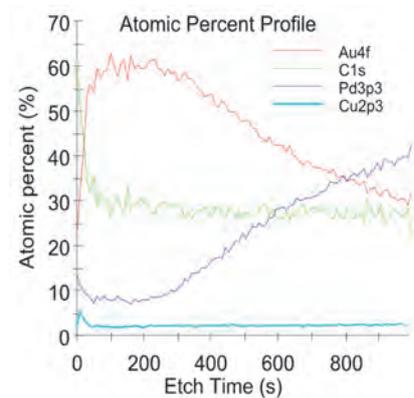


Bild 6-24: XPS-Tiefenprofil

Die Cu-Linie wurde nachträglich aus drucktechnischen Gründen verstärkt gezeichnet.

Die analytischen Untersuchungen haben wesentlich dazu beigetragen, ein besseres Verständnis für die oberflächennahen Kontaminationsprozesse zu erlangen. Mithilfe der Restgasuntersuchungen konnte ausgeschlossen werden, dass die organischen Plattenmaterialien im Bereich der Betriebs- und Verarbeitungstemperaturen die Sensorfunktion beeinträchtigt. XPS- und EDX-Verfahren gaben Aufschluss über die Art der Verunreinigungen auf den Oberflächen. Die lichtmikroskopischen, REM- und FIB-SEM Aufnahmen vermittelten Kenntnisse über die Qualität der Edelmetall-Abscheideprozesse.

Die gewonnenen Erkenntnisse wurden für die Prozessoptimierung genutzt, sodass die Wahrscheinlichkeit einer Fehlproduktion eines ganzen Fertigungsloses drastisch reduziert werden konnte (Kapitel 6.2).

7 Zusammenfassung und Diskussion

Die Integration funktionaler Schichten und komplexer elektronischer Funktionsgruppen in die Leiterplatte gerät als Hochtechnologie zunehmend in den Fokus der industriellen Wertschöpfung. Sie bietet den Vorteil, bisher ungenutzte Bauräume in dicht gepackten elektronischen Systemen zu erschließen, die mit anderen Technologien⁴⁶ nicht genutzt werden können. Der breite Einsatz dieser Technik wird derzeit jedoch noch durch zu große Wissenslücken, notwendige, aber fehlende Spezialprozesse sowie geeigneter Entwurfsmethoden behindert.

Ziel der Arbeit war es, neue Methoden und Prozesstechnologien für die gemeinsame Integration mechanischer und elektronischer Komponenten in die Leiterplatte zu finden. Die Einbettung mechanischer Komponenten in die Leiterplatte und deren Kombination mit intelligenten Elektronikbausteinen war zuvor noch nicht umfassend untersucht worden.

Die Methoden und Prozesse sollten am Beispiel hochintegrierter, intelligenter Mikrovibrationssensoren in Leiterplattentechnik evaluiert und nahezu bis zur Industriereife entwickelt werden. Daher mussten unter Berücksichtigung industriüblicher Qualitätssicherungsverfahren neue Testkonzepte entwickelt, messbare Prüf- und Kenngrößen gesucht, definiert und in automatisierte Prüfeinrichtungen überführt werden. Den industriellen Eignungsnachweis sollte die Technologie durch die Integration der Mikrovibrationssensoren in einem batteriebetriebenen Fahrradrücklicht erbringen. Für diese Anwendung mussten die Sensoren den Ansprüchen der RoHS genügen, reflow-lötbar sein, harschen Umweltbedingungen widerstehen können und sehr klein und preiswert sein. Die avisierte Jahresproduktionszahl lag bei 100.000 Sensoren bei einem Stückpreis unter 0,50 €

Die Beantwortung der Fragestellungen erforderte die Festlegung auf eine methodische Vorgehensweise für die Entwicklung und Herstellung mechatronischer Produkte. Der in der VDI-2206 beschriebene V-Produktentstehungszyklus bildete schließlich die Basis für die Technologie- und Produktentwicklung der Sensoren. Vor Klärung der Technologie- und Prozessfragen wurde mit dem funktionalen Entwurf der Sensorzelle begonnen. Diese Sensorzellen wandeln mechanische Bewegungen einer elektrisch leitfähigen Kugel in elektrische Widerstandsänderungen um. Im Falle des Mikrovibrationssensors wurde die Kugel in eine Kavität der Leiterplatte eingebracht, in der sie sich frei bewegen konnte. In einer bestimmten Lage konnte die Kugel zwei in der Kavität befindliche Kontaktflächen kurzschließen. Zum Schutz vor Umwelteinflüssen wurde die Kavität in das Innere der Leiterplatte gelegt und die Sensorkontakte von außen zugänglich gemacht.

Die technische Umsetzung dieses Konzeptes erforderte die Entwicklung einer Entwurfsmethodik, die auf der Nutzung von CAD-Werkzeugen aus dem Umfeld des Maschinenbaus⁴⁷ und der Elektrotechnik⁴⁷ stammten. Während die M-CAD-Tools für den funktionalen Entwurf der Sensorzelle genutzt wurden, fanden die E-CAD-Tools Verwendung zur Erstellung der Produktionsdaten. Der große Vorteil der Nutzung einer Plattenbauweise lag in der Möglichkeit, die Sensoren in einfacher Form in einer Matrixanordnung zu vervielfältigen. Aus produktionstechnischer Sicht erwies sich die Anordnung der Sensorzellen in Form eines rechteckigen „Wafers“ als optimal, wobei vier Wafer auf einem Leiterplattennutzen gleichzeitig gefertigt werden konnten. Bedingt durch die Nähe des funktionellen Designs zum produktionsgerechten Entwurf wurde die Entwurfsmethodik dahin umgestellt, dass beide Bereiche gleichzeitig im Systementwurf betrachtet wurden. Ferner flossen die Anforderungen an die Testbarkeit der Sensoren in den Designzyklus ein. Daher konnten gleichzeitig funktionelle, prozesstechnische und testspezifische Anforderungen im Produktentwurf berücksichtigt und optimiert werden. So wurde beim funktionalen Entwurf der Sensorzelle darauf geachtet, nur einfache und in der Leiterplattenbranche etablierte Prozesse zur Herstellung der Sensoren zu nutzen. Hierzu zählten Bohr- und Fräsprozesse, fotolithografische Ätz- und Strukturierungsverfahren und galvanische und elektrochemische Verfahren zur Vergoldung der Sensoroberflächen.

⁴⁶ Als alternative Technologie sei hier die 3D-MID Technologie erwähnt, die hinsichtlich der Stromtragfähigkeit beschränkt ist.

⁴⁷ M-CAD-Tools sind CAD-Werkzeuge, die bevorzugt im Maschinenbau eingesetzt werden. Mit E-CAD-Tools werden elektronische Systeme entworfen.

Die Analyse der Einsatzbedingungen der Sensoren im Fahrradrücklicht und anderen Anwendungen führte zur Festlegung der Anforderungsliste für die Prüf- und Testeinrichtungen. Hierzu zählten auch Verfahren zur Speicherung und automatisierten Verarbeitung der Testergebnisse.

Der Design- und Produktionszyklus der Arbeit schloss mit der Entwicklung einer vollständigen Produktionskette, bei der die geprüften Sensoren in einer industriekonformen Verpackung (Tray, Gurt und Rolle) an den industriellen Partner zur Evaluierung übergeben wurden.

In dem nachfolgenden Qualitätszyklus wurde das Verhalten der Sensoren in den Fahrradrücklichtern geprüft. Die Qualitätsprobleme waren vielschichtig, sodass der V-Produktentstehungszyklus mehrfach durchlaufen wurde. Dabei wurden analytische Messmethoden wie XPS- und EDX-Verfahren sowie Restgasanalysemethoden eingesetzt, um die Ursachen der Qualitätsprobleme zu identifizieren. Aus den gewonnen Erkenntnissen wurden verbesserte Prozess- und Fertigungsspezifikationen für die Leiterplattenherstellung abgeleitet. Ferner wurden neue Materialien verwendet sowie quasi-inlinefähige Testverfahren entwickelt, mit denen Qualitätsprobleme bereits in einer frühen Phase der Produktentstehung identifiziert werden konnten.

Schließlich entstand ein Mikrovibrationssensor, der mittlerweile in siebenstelligen jährlichen Stückzahlen gefertigt wird. Er ist für den Einsatz bei Temperaturen von -40 °C bis $+85\text{ °C}$ spezifiziert und ist mechanisch überaus robust. Er übersteht drei Millionen Stoßbelastungen mit einer Stärke von 3 g.

Der Schlüssel für die Stabilisierung der Qualität des Sensors bestand in der Optimierung der Edelmetallbeschichtung. Insbesondere neu entwickelte Technologien zur Abscheidung hochreiner, elektrochemischer Palladium-Goldschichten führten zu dieser verbesserten Produktqualität.

Nach der Prozessstabilisierung wurde die Technologie weiterentwickelt und ein hochintegrierter, intelligenter Mikrovibrationssensor in Leiterplattentechnik prototypisch aufgebaut. Bei diesem Sensor wurde unter die Kavität, in der sich die Kugel befindet, ein ungehäuster Mikrocontroller integriert und elektrisch an die Sensorzelle angebunden. Der Mikrocontroller ermöglichte durch adaptive Filterung der Sensorsignale fertigungsbedingte Signalvariationen bis zu bestimmten Grenzen auszugleichen. Aufgrund seiner Kompaktheit ist dieses System hochinteressant für bauraumbeschränkte Applikationen.

Im Rahmen der Arbeit wurden sieben Schutzrechte für die entwickelten Technologien und die



verschiedenen Sensorkonzepte erworben, wovon sich drei noch in der Prüfung befinden. Ferner wurde ein Firma aus dem KIT ausgegründet, welche die Technologie lizenziert hat und die Sensoren weltweit vermarktet. Verschiedene Preise wurden für den Sensor gewonnen, darunter der dritte Preis des „Produktes des Jahres 2006“, der von den Lesern der Zeitschrift ELEKTRONIK verliehen wurde sowie der Dr.-Rudolf-Eberle-Preis „Special Award of the Innovation Award of the State of Baden-Württemberg“ im Jahr 2008.

Mikrovibrationssensoren werden mittlerweile in den verschiedensten Anwendungen eingesetzt. Ursprünglich für Fahrradrückleuchten konzipiert, findet man sie heute in Freisprecheinrichtungen, GPS-Trackingsystemen aber auch in Anwendungen wie Lötkolben, Rasierapparaten und beleuchteten Hundehalsbändern. Durch die Weiterentwicklung

der Technologie können aber auch ganz anderer Sensoren wie Neigungssensoren realisiert werden.

Das Bestreben, funktionelle Schichten und Komponenten in die Leiterplatten zu integrieren, wird zukünftig deutlich an Relevanz gewinnen. Ein besonders interessantes Anwendungsfeld dieser Technologie ergibt sich aus der Hybridisierung und der Elektrifizierung des Antriebsstranges von

Kraftfahrzeugen. Durch fehlende Bauräume sowie den hohen Betriebstemperaturen bietet sich die Integration der leistungselektronischen Komponenten in die Leiterplatte als Alternative zu teuren keramischen Schaltungsträgern an. Im Inneren der Leiterplatte können die leistungselektronischen Bauteile effektiv von der Ober- und Unterseite gekühlt werden. Die für diese Systeme erforderlichen keramischen Filterkondensatoren können mit den Verfahren dieser Arbeit in die Leiterplatte integriert werden. Andere Herstellprozesse, die auf den im Projekt „hermes“ entwickelten Verfahren basieren, sind hierfür weniger geeignet. Der mechanische Stress beschädigt die Kondensatoren bereits beim Einbau oder nach kurzer Betriebsdauer.

Es besteht jedoch noch erheblicher Forschungsbedarf, bis die Einbettung von funktionalen Elementen und Schichten in Leiterplatten als etablierte Standardtechnologie bezeichnet werden kann.

Anhang A

A.1 Symmetrischer Schmitt-Trigger

Zur Herleitung der Schalthysterese und der Umschaltspannungen am Eingang wird die in Bild 2-45 rechts dargestellte Beschaltung des Operationsverstärkers untersucht. In der Schmitt-Trigger Anordnung gilt für Spannung am positiven Eingang des Operationsverstärkers V_+ :

$$V_+ = V_H \cdot R_1 / (R_1 + R_2) \quad (\text{A.1})$$

In Gleichung (A.1) wird davon ausgegangen, dass die Ausgangsspannung des Operationsverstärkers den Wert $V_o = V_H$ (positiv angesteuert) angenommen hat. Mit der Beziehung $V_o = A(V_+ - V_-)$ gilt

$$V_o = A \cdot [V_H \cdot R_1 / (R_1 + R_2) - V_{in}] \quad (\text{A.2})$$

Solange in Gleichung (A.2) die Eingangsspannung V_{in} kleiner als die obere Grenzspannung V_{TU} ist und $V_{TU} := V_H \cdot R_1 / (R_1 + R_2) > V_{in}$ gilt, bleibt die Ausgangsspannung $V_o = V_H$. Erst bei $V_{in} > V_{TU}$ wechselt die Ausgangsspannung von V_H nach V_L . Für die Spannung am Eingang des Operationsverstärkers gilt in diesem Fall analog zu (A.1) und (A.2)

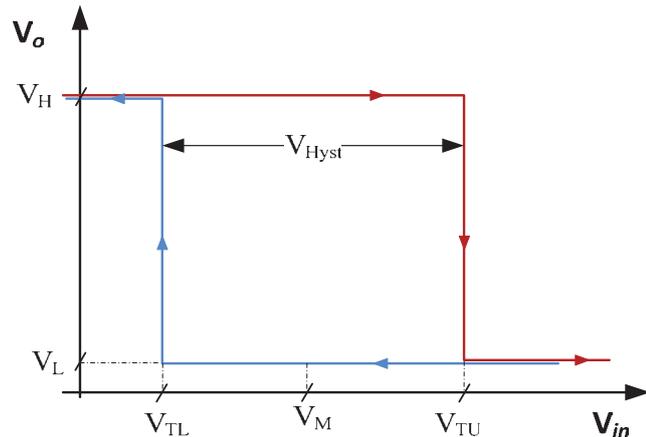
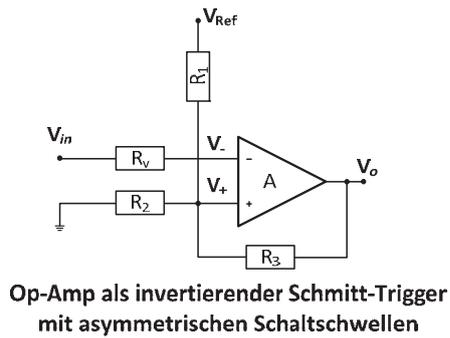
$$V_+ = V_L \cdot R_1 / (R_1 + R_2) \quad (\text{A.3}) \quad V_o = A \cdot [V_L \cdot R_1 / (R_1 + R_2) - V_{in}] \quad (\text{A.4})$$

Verringert sich die Eingangsspannung, so schaltet der Ausgang des Operationsverstärkers von V_L auf V_H um, sobald $V_{TL} := V_L \cdot R_1 / (R_1 + R_2) > V_{in}$ gilt.

Die Hysteresespannung V_{Hyst} ergibt sich aus der Differenz der oberen (V_{TU}) und der unteren (V_{TL}) Schwellwertspannung, die Mittenspannung aus deren arithmetischem Mittel:

$$V_{Hyst} = (V_{TU} - V_{TL}) \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (\text{A.5}) \quad V_M = \frac{(V_{TU} + V_{TL})}{2} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (\text{A.6})$$

A.2 Asymmetrischer Schmitt-Trigger



Für V_+ gilt:

$$V_+ = \frac{R_{12}}{R_{12} + R_3} \cdot V_0 + \frac{R_{23}}{R_{23} + R_1} \cdot V_{\text{Ref}} \quad (\text{A.7})$$

Annahme: $V_{\text{in}} < V_+ = V_{\text{TU}}$, dann gilt:

$$V_0 = A \cdot (V_+ - V_{\text{in}}) = V_{\text{H}} \quad (\text{A.8})$$

Und somit aus den Gleichungen (A.7) und (A.8)

$$V_{\text{TU}} = \frac{R_{12}}{R_{12} + R_3} \cdot V_{\text{H}} + \frac{R_{23}}{R_{23} + R_1} \cdot V_{\text{Ref}} \quad (\text{A.9})$$

Annahme: $V_{\text{in}} > V_+ = V_{\text{TL}}$, dann gilt:

$$V_0 = A \cdot (V_+ - V_{\text{in}}) = V_{\text{L}} \quad (\text{A.10})$$

Und somit aus den Gleichungen (A.7) und (A.8)

$$V_{\text{TL}} = \frac{R_{12}}{R_{12} + R_3} \cdot V_{\text{L}} + \frac{R_{23}}{R_{23} + R_1} \cdot V_{\text{Ref}} \quad (\text{A.11})$$

In den Gleichungen (A.11) steht R_{xy} für die Parallelschaltung der Widerstände R_x und R_y . Es gilt:

$$R_{xy} = \frac{R_x \cdot R_y}{R_x + R_y} \quad (\text{A.12})$$

Mit den Gleichungen (A.9) und (A.11) stehen zwei Gleichungen zur Verfügung, um die drei unbekannt Widerstände R_1 , R_2 , R_3 zu ermitteln. Die untere Umschaltspannung V_{TL} , die obere Grenzwertspannung V_{TU} sowie die Referenzspannung V_{Ref} sind gegeben. Damit ist das System unterbestimmt. Üblicherweise legt man den Widerstand R_2 fest und berechnet R_1 und R_3 . Bei der Festlegung des Widerstandes R_2 ist darauf zu achten, dass die Widerstände die Referenzspannung und den Ausgang des Operationsverstärkers nicht zu stark belasten. Dementsprechend sollte der Wert zwischen einem und zehn Kiloohm liegen ($1 \text{ k}\Omega < R_2 < 10 \text{ k}\Omega$).

Im besonderen Fall unipolar betriebener Rail-2-Rail Operationsverstärker gilt $V_{\text{L}} = 0$. Gleichung (A.11) vereinfacht sich zu:

$$V_{TL} = \frac{R_{23}}{R_{23} + R_1} \cdot V_{Ref} \quad (A.13)$$

$$\Rightarrow \underline{R_1 = R_{23} \cdot \Lambda}$$

mit $\Lambda = V_{Ref}/V_{TL} - 1$.

Setzt man (A.13) in (A.9) ein, erhält man:

$$V_{TU} = \frac{R_{12}}{R_{12} + R_3} \cdot V_H + V_{TL}$$

$$V_{TU} - V_{TL} = \frac{R_{12}}{R_{12} + R_3} \cdot V_H$$

$$V_{Hyst} = \frac{R_{12}}{R_{12} + R_3} \cdot V_H \quad (A.14)$$

$$\Rightarrow \underline{R_3 = \kappa \cdot R_{12}}$$

mit $\kappa = (V_H - V_{Hyst})/V_{Hyst}$.

Formt man (A.14) nach R_1 um, erhält man:

$$R_1 = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 \kappa - R_3} \quad (A.15)$$

Durch Einsetzen von (A.15) in (A.13) erhält man:

$$R_{23} \cdot \Lambda = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 \kappa - R_3}$$

$$\frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} \cdot \Lambda = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 \kappa - R_3} \quad (A.16)$$

$$\Rightarrow \underline{R_3 = \frac{R_2 \cdot (\Lambda \cdot \kappa - 1)}{\Lambda + 1}}$$

und schließlich ist R_1 mit bekanntem R_3 mit Gleichung (A.13) ermittelbar.

A.3 Erfassung von Bewegungssignalen

Eine besondere Art der Signaldiskretisierung besteht in der Quadratur-Encodierung. Ein quadraturencodierter⁴⁸ Signalsatz besteht aus zwei Signalen, die um 90° phasenversetzt sind. Dieser Signalsatz ermöglicht eine einfache Erfassung der Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit von mechanisch bewegten Komponenten. Die QEP-Signale einer Motorwelle werden beispielsweise mithilfe einer Inkrement-Glasscheibe, eines Abtastgitters und zwei Fotozellen erzeugt. Die Fotozellen sind um ¼ der Inkrementbreite der Glasscheibe zueinander versetzt (ifm electronic, 2013). Aus der

⁴⁸ Quadraturencodierte Signale oder Pulse werden mit QEP abgekürzt.

Phasenlage lässt sich die Umdrehungsrichtung der Welle ableiten. Die Frequenz der Signale ist proportional zur Umdrehungsgeschwindigkeit. Wird auf einer zusätzlichen Spur ein Indexsignal erzeugt, ist innerhalb der Quantisierungsgrenzen auch eine absolute Positionserfassung möglich.

Die Bewegungs- oder Drehrichtung lässt sich aus der Lage der beiden QEP-Signale (QEP_A und QEP_B) zueinander erfassen. Bei einer Drehung der Inkrementscheibe im Uhrzeigersinn eilt die steigende Flanke des QEP_A -Signals dem des QEP_B -Signals voraus (Bild A.3.1). Die Bestimmung der absoluten Position erfolgt mit der Indexmarke (QEP_I). Für die Auswertung wird das Indexsignal mit den QEP-Signalen des Kanals A und B „verundet“, sodass die Referenzposition genau ermittelt werden kann. Eine hochgenaue Referenzierung erfordert die Berücksichtigung der Flankenpolarität und der Drehrichtung, ansonsten ist die Position der Referenzmarke mit einem Fehler von $\frac{1}{4} T_0$ versehen. T_0 bezeichnet hierbei den Abstand zwischen zwei Öffnungen der Inkrementscheibe. Kommerziell verfügbare Scheiben verfügen zwischen 5 und 10.000 Öffnungen (ifm electronic, 2013). Mit Wegsensoren kann eine Auflösung unterhalb von $0,1 \mu\text{m}$ erreicht werden (Heidenhain GmbH, 2003).

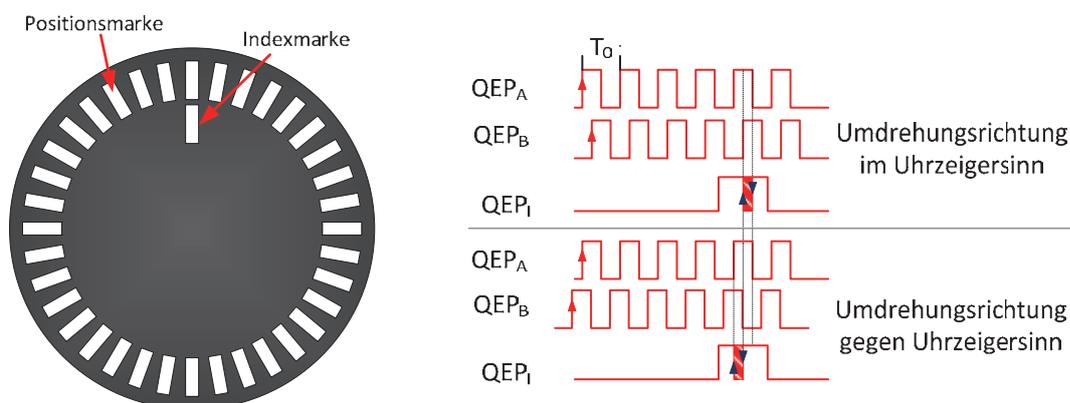


Bild A.3.1: Positionserfassung mit optischen Inkrementalgebern

Die Erfassung linearer Bewegungen erfolgt in ähnlicher Weise. Hierbei wird eine durchleuchtete Abtastplatte an einem optischen Maßstab vorbeigeführt. Auf der Abtastplatte und dem optischen Maßstab befinden sich Strichgitter, die ein Moiré-Muster erzeugen. Dieses wird von Fotozellen ausgewertet und in QEP-Signale umgesetzt werden (Heidenhain GmbH, 2003).

A.4 Pneumatische Positioniersysteme

Die Entwicklung neuer mikromechatronischer Komponenten ist ohne angemessene Testsysteme nicht möglich. Mikrotechnische Bewegungssensoren müssen dabei in der Bewegung elektronisch vermessen werden. Eine umfassende Prüfung erfordert deshalb die Bewegung des Sensors auf einer definierten Bahnkurve im Raum oder in der Ebene. Grundsätzlich kann die Bewegung mit verschiedenen Antriebskonzepten realisiert werden. In Bereich der industriellen Produktion werden häufig pneumatische oder elektronische Komponenten verwendet. Für beide Technologien existieren sowohl lineare wie auch rotatorische Antriebe. Mit diesen kann ein Prüfkörper an eine definierte Position im Raum bewegt werden.

In pneumatischen Systemen wird die Antriebs- und Arbeitskraft durch Druckluft aufgebracht. Sie wird über schalt- oder regelbare Ventile auf den Kolben des Aktors geleitet. Die Arbeitskraft F des Aktors ist nach Gleichung (A.17) proportional zur Kolbenfläche A_{Kolben} und dem Differenzdruck Δp auf den Kolben.

$$F = \Delta p \cdot A_{\text{Kolben}} \quad (\text{A.17})$$

Pneumatische Antriebssysteme sind in der Fabrikautomatisierung aufgrund ihrer Zuverlässigkeit, Robustheit und einfachen Steuerbarkeit weit verbreitet. Sie können zusammen mit geeigneten Druckluft-Proportionalventilen und weggebenden Sensoren auch genutzt werden, um die

Aufnahmeplatte innerhalb der Bewegungsgrenzen an jede beliebige Position zu bringen. Die Auflösung, die erreichbare Genauigkeit und die Dynamik sind jedoch begrenzt. Für hochgenaue Ansteuerungen verwendet man deswegen im Allgemeinen elektromotorische Positioniersysteme mit optischen Positionencodern.

In Bild A.3.2 ist der Aufbau eines doppelwirkenden Kompaktzylinders dargestellt. Er besteht aus einem Gehäuse (grün, aufgeschnitten), in das über zwei Anschlüsse (rot) Druckluft zu- oder abgeführt werden kann. Der Kolben (blau) ist der Aktor und bewegt sich innerhalb des Gehäuses in Abhängigkeit der Druckverhältnisse.

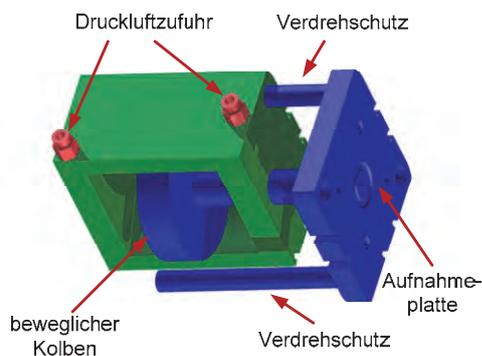


Bild A.3.2: Schnittbild eines doppelwirkenden Kompaktzylinders der Serie AGN (Festo AG)

Pneumatische Antriebskomponenten werden für den Aufbau des Prüfplatzes der Mikrovibrationssensoren verwendet. Sie werden in Kapitel 5.7 besprochen.

A.5 Elektromotorische Positioniersysteme

Neben den pneumatischen Aktoren werden elektromotorische Antriebssysteme für Positionieraufgaben in der Produktions- und Prüftechnik eingesetzt. Sie sind kompakt, emissionsfrei, weisen einen hohen Wirkungsgrad auf und lassen sich hochdynamisch und sehr genau regeln.

Mechanisch kommutierte DC-Maschinen

Elektromotoren und -generatoren basieren auf den Wechselwirkungen zwischen der Elektrizität und dem Magnetismus. Wenn sich eine Drahtschleife relativ zu einem Magnetfeld bewegt oder sich die Stärke des Magnetfeldes ändert, wird in der Drahtschleife nach dem Faradayschen Induktionsgesetz eine Spannung induziert (Echternkamp, 2011). Ferner wirkt auf bewegte Ladungsträger im Magnetfeld eine Kraft, die Lorentzkraft. Sie ist proportional zu ihrer Geschwindigkeit und der Flussdichte des magnetischen Feldes. Die Kraftwirkung wird im motorischen Betrieb der Elektromaschine genutzt, die Spannungsinduktion in Generatoren.

In Bild wird exemplarisch eine rechteckige Leiterschleife einer Motor- bzw. Generatorwicklung mit der Fläche A von einem Magnetfeld mit der Flussdichte \vec{B}_F durchsetzt. Wird die Drahtschleife in eine gleichförmige Rotation mit der mechanischen Winkelgeschwindigkeit Ω_m versetzt, ändert sich die magnetisch durchflutete Fläche abhängig vom Winkel ϑ zwischen der Flächennormalen \vec{e}_A und der Flussdichte \vec{B}_F . Diese Situation ist rechts in Bild A.5.1 dargestellt. Die Änderung des magnetischen Flusses verursacht eine Induktionsspannung u_p , die an den Spulenenden gemessen werden kann. Sie wird als Polradspannung bezeichnet. Zudem wirkt auf die beiden Leiterstücke mit der Länge ℓ die Lorentzkraft \vec{F}_L , die ein Drehmoment in Richtung \vec{e}_ϵ der Motorachse nach sich zieht.

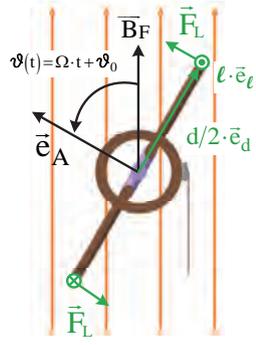
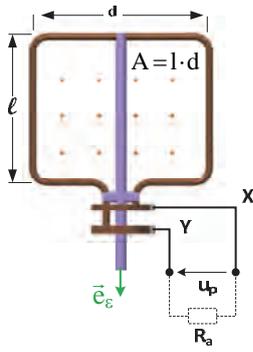


Bild A.5.1: Leiterschleife im Magnetfeld

Links ist die Leiterschleife mit einem Polradwinkel von 90° in Aufsicht dargestellt. Der magnetische Fluss durch die Fläche der Leiterschleife ist maximal. In der rechten Darstellung wurde die Leiterschleife um $\vartheta=60^\circ$ gegen das Magnetfeld gedreht. Die magnetisch durchflutete Fläche hat sich um $\cos(\vartheta)=0,5$ reduziert, wodurch sich auch die induzierte Spannung halbiert.

Ein technischer Generator entsteht, indem man N Leiterschleifen in das Magnetfeld einbringt. Durchdringt das Magnetfeld \vec{B}_F alle Windungen in gleichem Maß, ergibt sich der magnetischen Fluss Ψ nach (Pitka & et al., 2009) bei einem rechteckigem Wicklungspaket mit der Fläche $l \cdot d$ zu:

$$\begin{aligned}
 \Psi &= N \cdot \iint_A \vec{B}_F \cdot d\vec{A} \\
 &= N \cdot \underbrace{B_F \cdot l \cdot d}_{\hat{\phi}_F} \cdot \cos(\vartheta(t)) \\
 &= N \cdot \hat{\phi}_F \cdot \cos(\omega_{el} \cdot t + \vartheta_0) \\
 &= \hat{\Psi} \cdot \cos(\omega_{el} \cdot t + \vartheta_0)
 \end{aligned}
 \tag{A.18}$$

In realen Maschinen werden mehrere Wicklungspakete in das Magnetfeld eingebracht, die gleichförmig um die Maschinenachse verteilt werden. Jedes Wicklungspaket erzeugt ein Polpaar aus Nord- und Südpol. Die Zahl der Polpaare p verbindet die mechanische Achsendrehzahl Ω_m mit der elektrischen Winkelfrequenz ω_{el} der induzierten Spannung. Mit der mechanischen Drehzahl n gilt:

$$\omega_{el} = p \cdot \Omega_m = p \cdot 2 \cdot \pi \cdot n
 \tag{A.19}$$

Die entstehende Induktionsspannung u_{ind} ergibt sich aus der zeitlichen Änderung des magnetischen fremderregten Flusses Ψ durch die Leiterschleife:

$$u_{ind}(t) = -\frac{d\Psi}{dt} = \hat{\Psi} \cdot \omega_{el} \cdot \cos(\omega_{el} \cdot t + \vartheta_0 + \pi/2)
 \tag{A.20}$$

Die Leerlaufspannung $u_{ind}(t)$, die man zwischen den Punkten X und Y ermittelt (Bild A.5.1), ist die Leerlaufspannung eines Generators und wird als Polradspannung $u_p(t)$ mit der Scheitelspannung U_p bezeichnet. Der Winkel $\vartheta_0 + \pi/2$ kennzeichnet den Polradwinkel φ_p . Mit diesen Bezeichnungen wird aus Gleichung (A.20)

$$u_p(t) = U_p \cdot \cos(\omega_{el} \cdot t + \varphi_p)
 \tag{A.21}$$

Mit den Gleichungen (A.19), (A.20) und (A.21) erhält man für die Beziehung zwischen der Drehzahl n des Generators (Motors) und der Scheitelspannung der induzierten Spannung U_p :

$$n = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \hat{\Psi}} U_p = k_n \cdot U_p
 \tag{A.22}$$

Aus der Gleichung (A.22) geht hervor, dass die induzierte Spannung im generatorischen Betrieb proportional zur Umdrehungsgeschwindigkeit ist. Im motorischen Betrieb kann über die angelegte Spannung die mechanische Umdrehungsfrequenz des Motors gesteuert werden.

Betrieibt man die Maschine motorisch und legt eine äußere Spannung u_a mit der Amplitude U_a an die Leiterschleife an, fließt der Strom I_a . Der Strom und die fremderregte magnetische Flussdichte \vec{B}_F erzeugen in den beiden Leiterstücken l jeweils eine Kraftkomponente, die sich zur Gesamt-Lorenzkraft \vec{F}_L addieren:

$$\vec{F}_L = I_a \cdot \vec{\ell} \cdot \vec{B}_F \cdot \vec{e}_A \quad (\text{A.23})$$

Durch die geometrische Anordnung ist vorgegeben, dass die Richtung der Leiterschleife \vec{e}_ℓ immer senkrecht zur Flussdichte \vec{B}_F orientiert ist. Das Drehmoment \vec{M} einer Spule mit N-Wicklungen ergibt sich mit Gleichung (A.23) zu:

$$\vec{M} = N \cdot \vec{\ell} \cdot d \cdot \vec{B}_F \cdot I_a \cdot \vec{e}_\ell \quad (\text{A.24})$$

Für die Amplitude des Drehmomentes M erhält man (Schröder, 2009):

$$M = \hat{\Psi} \cdot I_a = k_M \cdot I_a, \quad (\text{A.25})$$

wobei k_M als Drehmomentkonstante bezeichnet wird. Wie die Drehzahlkonstante k_N hängt auch die Drehmomentkonstante lediglich vom geometrischen Aufbau des Motors ab. Ferner gilt für das Produkt der Drehmoment- und der Drehzahlkonstanten die Beziehung:

$$k_N \cdot k_M = 1/(2 \cdot \pi) \quad (\text{A.26})$$

Die für die Auswahl von Motoren meist benötigte Drehzahlkennlinie lässt sich aus der Leistungsbilanz ableiten, wobei die zugeführte elektrische Leistung P_{el} in mechanische Leistung P_{mech} und in Verlustleistung P_V umgesetzt wird:

$$P_{el} = P_{mech} + P_V \quad (\text{A.27})$$

Gleichung (A.27) ist äquivalent zu

$$U_a \cdot I_a = 2 \cdot \pi \cdot M \cdot n + R \cdot I_a^2, \quad (\text{A.28})$$

und lässt sich mit (A.26) in die Drehzahlkennlinie umformen:

$$n = U_a \cdot k_N - \frac{R}{2 \cdot \pi \cdot k_M^2} \cdot M \quad (\text{A.29})$$

Im Leerlauf, wenn kein Drehmoment oder nur die Lagerreibung überwunden werden muss, dreht sich der Motor bei der Nennspannung $U_a=U_N$ mit der Leerlaufdrehzahl $n=n_0$. Wenn der Motor angehalten wird, liefert er das Anhaltmoment M_H . Wenn die Motorspannung über die Nennspannung U_N hinaus erhöht wird, steigt auch die Drehzahl über die Nenndrehzahl n_0 . Ein kurzzeitiger Betrieb des Motors oberhalb der zulässigen Höchstdrehzahl ist meistens erlaubt. Diese Betriebsweise führt jedoch infolge der erhöhten thermischen Belastung zu einer frühzeitigen Alterung des Motors.

Die Drehzahlkennlinie, die Leerlaufdrehzahl n_0 , das Anhaltmoment M_H , die Drehzahl- und Drehmomentkonstanten k_N und k_M sind für die Charakterisierung des Motors zwingend erforderlich. Sie sind in den Datenblättern für DC-Motoren angegeben. In Bild A.5.2 ist die Drehzahl n über dem Drehmoment M aufgetragen. Da das Drehmoment direkt proportional zum Strom ist, kann auf der Abszisse auch der Strom aufgetragen werden. Der Strom im Haltepunkt wird auch als Haltestrom bezeichnet. Beschleunigt der Motor aus dem Stillstand, so können sehr hohe Ströme fließen, die zu Einbrüchen der Versorgungsspannung oder zu EMV-Problemen⁴⁹ führen können. Starke Motoren sind durch eine flache Kennlinie geprägt. Ihre Drehzahl ändert sich bei Laständerungen kaum.

⁴⁹ EMV steht für ElektroMagnetische Verträglichkeit

Die Regelung von DC-Motoren erfolgt üblicherweise mit PID-Reglern (Anhang A.6). Abhängig von der Regelgröße werden kaskadierte Regler verwendet. Eine typische Regelstruktur für einen kaskadierten Positionsregler mit unterlagerter Strom- und Drehzahlregelung ist in Bild A.5.4 dargestellt. Die innere Stromregelschleife ermöglicht den Betrieb des Motors bei konstantem Drehmoment. Zudem reduziert sie extreme Anfahrströme, die im Stillstand auftreten können. Selbst bei kleinen DC-Motoren mit einer Nennleistung von 150 Watt können die Anlaufströme bereits über 100 A betragen (maxon GmbH, 2012). Die Regelung der Drehzahl erfolgt mithilfe eines inkrementellen oder absoluten Lagegebers G am Motor. Er erfasst die Rotorposition, aus der die Rotationsgeschwindigkeit abgeleitet wird. Die Positionsregelung basiert direkt auf den Informationen des Lagesensors (Bild A.5.1, Bild A.5.3).

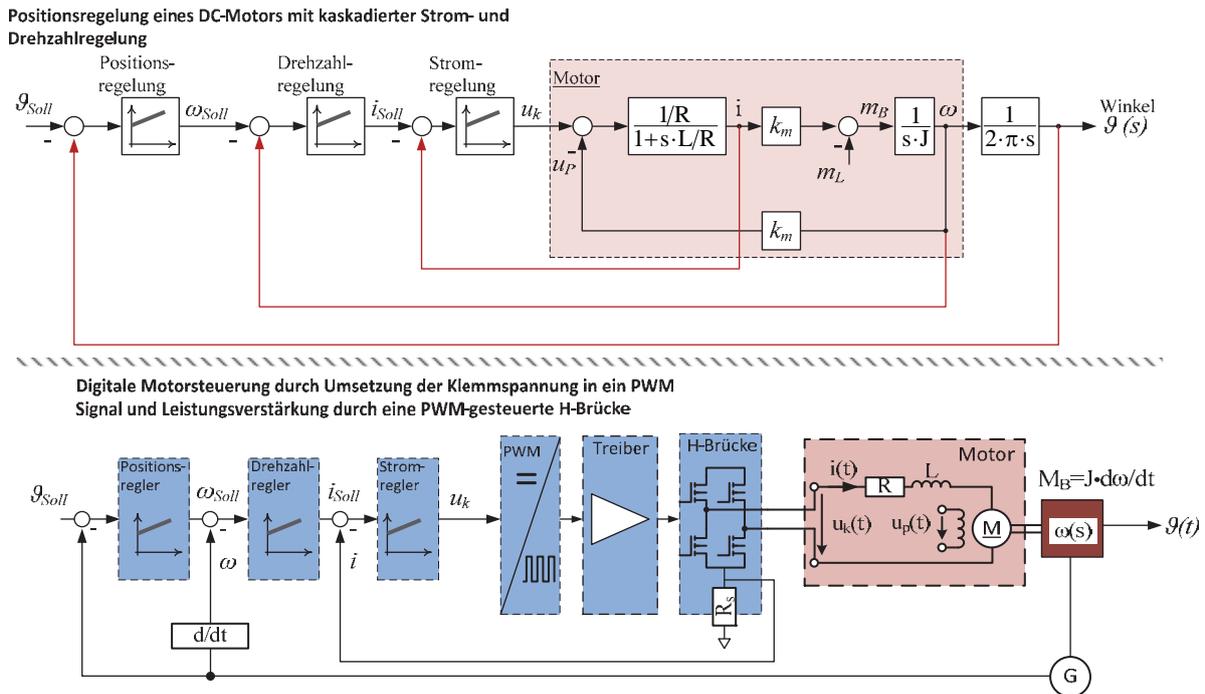


Bild A.5.4: Kaskadierte Positionsregelung mit unterlagerter Strom- und Drehzahlregelung
Oben ist die funktionale Beschreibung unten die abstrahierte elektrotechnische Darstellung gezeigt.

Die PID-Regelung kann analog erfolgen, heute werden jedoch meist digitale, auf Mikrocontrollern implementierte Regler verwendet. Der schnellste und innerste Regelkreis der Motorsteuerung ist der Stromregelkreis, der als Stellgröße die Klemmspannung des Motors u_k vorgibt. Diese wird aus energetischen Gründen durch den Mikrocontroller in ein pulswidenmoduliertes (PWM) Signal umgesetzt und über eine leistungsverstärkende H-Brücke direkt auf den Motor gegeben. Analoge Leistungsendstufen werden wegen ihrer hohen Verlustleistungen nur noch in besonderen Anwendungen eingesetzt, um beispielsweise besondere Anforderungen an elektromagnetische Störausstrahlungen zu erfüllen.

PID-Regler

Unter einer Regelung versteht man einen Vorgang, bei dem die Regelgröße kontinuierlich gemessen und mit der Führungsgröße verglichen wird. Mit dem Vergleichsergebnis wird das zu regelnde System so beeinflusst, dass die Regelgröße der Führungsgröße folgt (Wendt, 2010). Eine weitverbreitete Reglertopologie für Systeme mit stetigem Signalverhalten sind PID-Regler, die sowohl in analoger Form als auch digital in einem Mikrocontroller realisiert werden können.

Zu den stetigen Systemen zählen auch die Motorsteuerungssysteme, die für den Betrieb der Testplätze der Mikrovibrationssensoren entwickelt wurden. Sie können sehr gut über digitale PID-Regler

gesteuert werden, solange die Strecke nicht gestört wird und der Regler im linearen Bereich arbeitet. Wenn die Stellgröße außerhalb des Wertebereiches der Sensoren liegt, oder die Aktoren die Regelgröße nicht generieren können, wird das System nichtlinear. Durch die Rückkopplung kann das System instabil werden. Um die Stabilität von digitalen PID-Reglern zu erhöhen, kann man eine kaskadierte Regelung aus einem normalen PID Reglers und einem Anti-Windup-Regler verwenden (Tarbouriech & et al., 2009). Der klassische PID-Regler kontrolliert das System im linearen Bereich, der Anti-Windup-Regler im nichtlinearen Bereich. Dort begrenzt der Anti-Windup-Regler die Stellgröße, sodass die im I-Anteil integrierte Regeldifferenz nicht über die Maße wächst und zu einem instabilen Betrieb führt. Das Regelsystem wird nahe am linearen Bereich gehalten. Wenn die Störung der Strecke behoben ist und das System wieder in den linearen Bereich eintritt, übernimmt der normale PID Regler wieder die Kontrolle über das System. In Bild A.5.5 ist ein PI-Regler dargestellt, der mit einem kaskadierten Anti-Windup Regler kombiniert ist. Die Sättigungsfunktion begrenzt die Soll-Stellgröße u_{Soll} auf die Systemstellgröße u und führt die Differenz der beiden auf das I-Glied. Damit wird der durch die Sättigung eingeführte Regelfehler nicht in den integralen Teil des Reglers übernommen (Raisch, 2011).

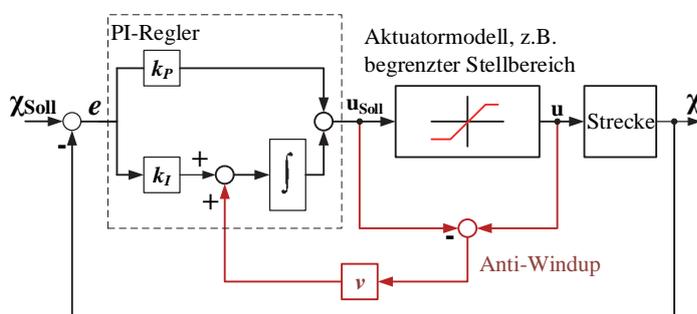


Bild A.5.5: Anti-Wind-Up-Regelung in einem PI-Regler (Raisch, 2011)

Aus dem Regelfehler e wird die Soll-Stellgröße u_{Soll} abgeleitet. Wenn die Soll-Stellgröße aufgrund der Sättigung des Aktuators nicht auf die Strecke gegeben werden kann, wächst der Fehler im Integrator rasch an. Durch die Einführung der Anti-Windup Funktion wird die Wirkung des Integrators unterdrückt, sofern die Sättigungsfunktion die Soll-Stellgröße beeinflusst.

Die programmatische Implementierung der PID-Regler erfordert nur wenige Mikrocontrollerressourcen. Sie sind bereits auf einfachen Mikrocontrollern umsetzbar.

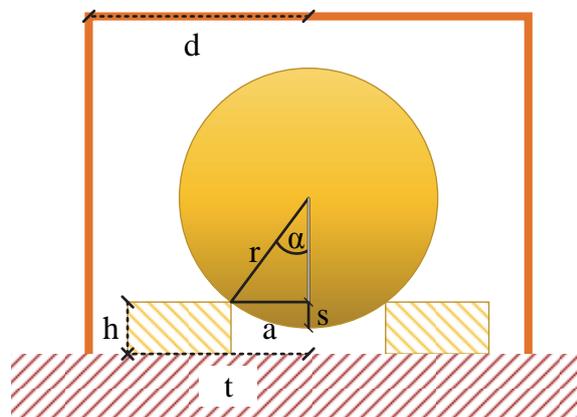
A.6 Ableitung für den Kippwinkel für bewegungsgehemmte Mikrovibrationssensoren

Der Kippwinkel α , unter dem die Kugel aus der Vertiefung des Bodenpads rollen kann, ergibt sich zu:

$$\alpha = \arcsin(a / r) \quad (\text{A.31})$$

Hierfür müssen die folgenden Nebenbedingungen erfüllt sein (Bild A.6.1):

- (1): $s < h$, das bedeutet, die Kugel kann nicht tiefer in die Öffnung des Pads einsinken als das Bodenpad hoch ist.
- (2) $d > r+a$; Der Kammradius muss größer sein als die Summe des Kugelradius und des Innenradius des Donuts. Nur so kann die Kugel die Vertiefung vollständig verlassen und auf der Restfläche des Pads rollen.
- (3) $t > r+a$; Der Außenradius des Bodenpads muss größer sein als die Summe des Kugelradius und des Innenradius des Donuts. Ansonsten verschwindet das Pad.



α - Kippwinkel
 s - Eindringtiefe
 a - Innenradius Bodenpad
 t - Außenradius Bodenpad
 r - Kugelradius
 d - Kammradius

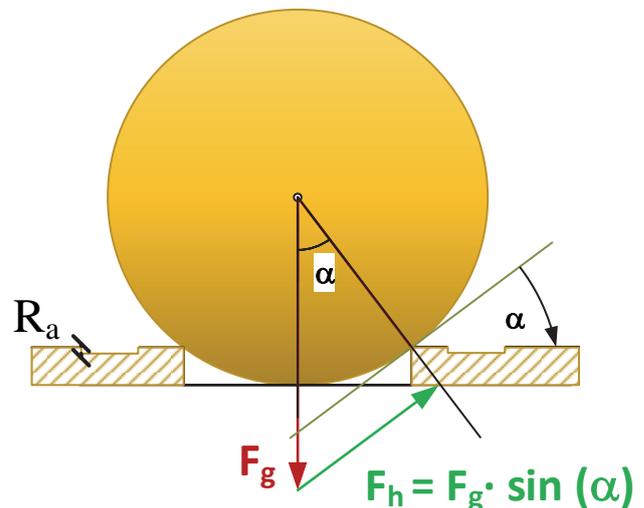


Bild A.6.1: Schematische Darstellung eines Sensors auf einem „donutförmigen“ Pad mit einer Vertiefung.

Bild A.6.2 Die Kugel liegt in der Vertiefung des Bodenpads. Unter dem Kippwinkel α kann die Kugel aus der Vertiefung herausrollen.

Unter diesen Bedingungen ergibt sich die Kraft F_{hD} für den „Donut-Sensor“, die das Kippmoment zum Verlassen der Kugel aus der Kavität verursacht, zu

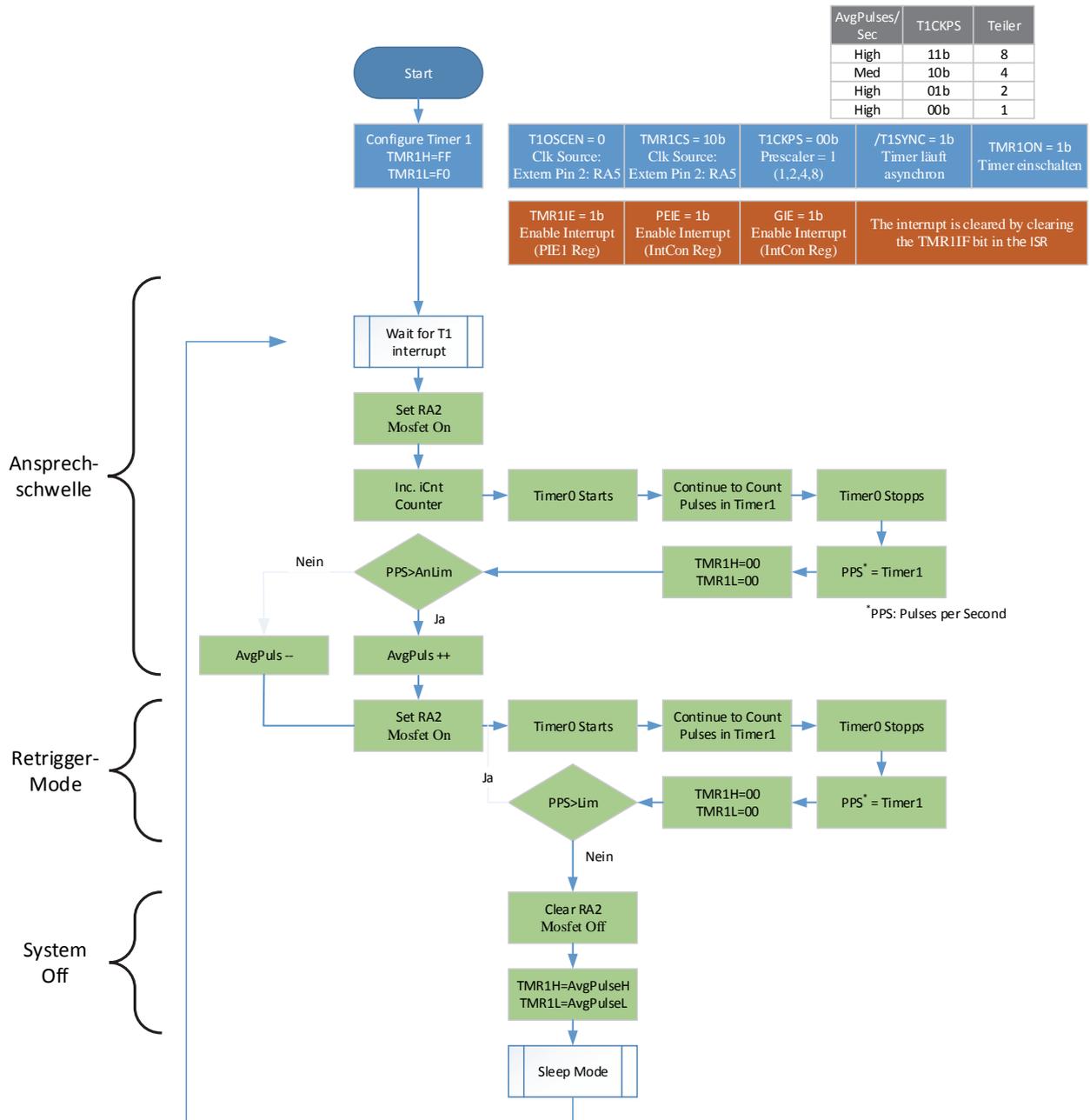
$$F_{hD} = F_g \cdot \sin(\alpha) \quad (\text{A.32})$$

Das Verhältnis der Kräfte, welche die Kugel eines Standardsensors im Vergleich zu einem „Donut“-Sensor in Bewegung versetzen, ergibt sich aus dem Verhältnis der Summe der Haltekraft F_{hS} eines Standardsensors und seiner Rollreibung F_{rS} zur Summe der Haltekraft F_{hD} und Rollreibung F_{rD} des „Donut“-Sensors.

$$\eta = \frac{F_{hD} + F_{rD} + F_{hS}}{F_{hS} + F_{rS}} = \frac{\sin(\alpha_D) \cdot F_g + \mu_r \cdot F_g + \sin(\alpha_S) \cdot F_g}{\sin(\alpha_S) \cdot F_g + \mu_r \cdot F_g} \quad (\text{A.33})$$

In Gleichung (A.33) steht α_D für den Kippwinkel des „Donut“-Sensors, α_S für den Kippwinkel des Standardsensors. Der Kippwinkel des Standardsensors ergibt sich aus der Oberflächenrauigkeit, die zu kleinen Vertiefungen in der Sensoroberfläche führt.

A.7 Adaptiver Filteralgorithmus für den PIC12LF1822



8 Literaturverzeichnis

- Abdul-Lettif, A. (Jan. 2007). Investigation of interdiffusion in copper–nickel bilayer thin films. *Physica B: Condensed Matter*, S. 107-111.
- Achternbosch, M., & Brune, D. (1996). *Stoffströme bei der Herstellung von Leiterplatten*. Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse. Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH.
- ADT Advances Dicing Technologies. (20. Nov. 2012). *Principles of Dicing*. Abgerufen am 12. Feb. 2013 von http://www.inseto.co.uk/documents/microequip/ADT-Principles_of_Dicing.pdf
- Analog Devices. (Jan. 2000). *ANF32-X17: Implementing Space Vector Modulation with the ADMCF32X*. Abgerufen am 23. Aug. 2012 von http://www.analog.com/static/imported-files/tech_docs/svpwm.pdf
- Analog Devices. (2012). *Datasheet: ADXL362-Micropower, 3-Axis Digital Output MEMS Accelerometer*. Von http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADXL362.pdf abgerufen
- Andresakis, J., & et al. (2006). Novel Substrate with Combined Embedded Capacitance and Resistance for Better Electrical Performance and Higher Integration. *IPC 3rd International Conference on Embedded Technology*. Chelmsford: IPC.
- Andus GmbH. (25. Sept. 2012). *Thermisches Management*. Abgerufen am 25. Sept. 2007 von <http://www.andus.de/leiterplatte/thermo.php>
- Antler, M. (1997). Gold plated contacts: effect of thermal aging on contact resistance. *Proceedings of the Forty-Third IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, (S. 121-131). Philadelphia.
- Apachitei, I., & Duszczyk, J. (07. Jan. 1999). Hydrogen evolution, incorporation and removal in electroless nickel composite coating on aluminium. (K. A. Publishers, Hrsg.) *Journal of Applied Electrochemistry*, Vol. 29, S. 837-843.
- Archard, J. (Aug. 1953). Contact and Rubbing of Flat Surfaces. *Journal of Applied Physics*, Vol. 24(No. 8), S. 981-988.
- Arlon. (2011). *Low-Flow Selector Guide Rev. 1.3*. Abgerufen am 08. Juli 2012 von <http://www.arlon-med.com/Low-FlowSelectorGuide.pdf>
- Aschbrenner, R., & et al. (2004). Process flow and manufacturing concept for embedded active devices. *Electronics Packaging Technology Conference, Proceedings of 6th* (S. 605 - 609). IEEE.
- Ashbey, M. (2005). *Materials Selection in Mechanical Design*. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann.
- ASSEMtech Europe Ltd. (1. May 1999). *Product Data Sheet Part Number MS 24*. Abgerufen am 14. Juni 2013 von <http://www.farnell.com/datasheets/1675213.pdf>
- Atlas Steels. (Juli 2010). *Atlas tech Note No. 11*. Abgerufen am 06. Jan. 2013 von MAGNETIC RESPONSE OF STAINLESS STEELS: http://www.atlassteels.com.au/documents/TN11-Magnetic_response_rev_July_2010.pdf
- ATSM Int'l. (2006). *ASTM E595 - 07*. Abgerufen am 7. Juli 2013 von E595-07 Standard Test Method for Total Mass Loss and Collected Volatile Condensable Materials from Outgassing in a Vacuum Environment: http://enterprise.astm.org/filtrexx40.cgi?+REDLINE_PAGES/E595.htm

- Audouin, L., & et al. (1995). "Close loop" Mechanistic Schemes for Hydrocarbon Polymer Oxidation. (W. O. LIBRARY, Hrsg.) *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, Vol. 33(6), S. 921-927.
- Bachmann, D. (Mai 2013). Reduktiv unterstützter Abscheidemechanismus des Immersion-Goldes in ENEPIG-Schichten. (T. Blank, Interviewer)
- Badet, B., & et al. (1980). *Patentnr. US 4,216,577*. US.
- Bagotsky, V. S. (2006). *Fundamentals of Electrochemistry* (2-te Ausg.). John Wiley & Sons, Inc.
- Bai Ling Electronics Co., LTD. (18. Feb. 2011). *Product Detail specification, Roll ball switch SW-300DA*. Von <http://www.beelee-switch.com/uploads/soft/120516/300da.pdf> abgerufen
- Barat Carbide GmbH. (Sept. 2006). *Hartmetallsorten*. Von http://www.hoppebaumdienst.de/Barat_Carbide_Group_Grades.pdf abgerufen
- Barbour, N. (2011). *Inertial Navigation Sensors*. Von [ftp://ftp.rta.nato.int/pubfulltext/RTO/EN/RTO-EN-SET-116-2011/EN-SET-116\(2011\)-02.pdf](ftp://ftp.rta.nato.int/pubfulltext/RTO/EN/RTO-EN-SET-116-2011/EN-SET-116(2011)-02.pdf) abgerufen
- Bedson, D., & et al. (1963). *Patentnr. US 03102213A*.
- Beine, H. (18. März 2012). *Eine kleine Geschichte der SMT*. (all-electronics.de, Hrsg.) Abgerufen am 30. Juli 2013 von <http://www.all-electronics.de/texte/anzeigen/45441/Eine-kleine-Geschichte-der-SMT>
- Belova, I., & Murch, G. (2006). Phenomenological Aspects of Grain Boundary Diffusion. *Defect and Diffusion Forum*, S. 483-490.
- Bergman, D. (1982). *NADC-82238-60; Removal of Hydrogene From Cadmium Plated High Strength Steel by Baking - A Statistically Designed Study*. Warminster, PA: Naval Air Development Center.
- Blank, T. (12. Dez. 2006). DE 10 2006 056 473 B4; Kugelschalter in einer Multi-Kugelschalter-Anordnung.
- Blank, T., & al., e. (17. Juli 2003). DE 101 58 416 C1; Multi-Kugelschalter-Anordnung in Schicht/Plattenbauweise.
- Blank, T., & et al. (2005). *Patentnr. WO2005050340 (A3)*. DE.
- Blank, T., & et al. (2012a). Pat. Pend.; Intelligente Multi-Lage- und Bewegungssensor-Anordnung in Plattenbauweise.
- Blank, T., & et al. (2012b). Pat. Pend.; Herstellungsverfahren für Laminatbauteile.
- Blank, T., & et al. (04. Dez. 2012c). Pat. Pending.: Elektrisch nicht leitendes Substrat enthaltend mindestens eine Kavität, deren Oberfläche elektrisch leitende Schichten aufweist. Karlsruhe: KIT.
- Blank, T., & et. al. (06. Juni 2012). DE 10 2011 052 612 A1; Bewegungs- und Lageerkennungssensor.
- Blank, T., & Hörhold, H. (2008). Telefongespräch zwischen T. Blank und A. Hörhold über das Verhalten des LF200 Klebers im Desmear Prozess.
- Blank, T., Berger, L., & Balzer, M. (2005). The relevance of test equipment and strategies for the development and commercialization of micro vibration switches. *COMS: 10th International Commercialization of Micro and Nano Systems Conference*. Baden-Baden: Micro- and Nanotechnology Commercialization Education Foundation.
- Blank, T., Leyrer, B., & Osswald, B. (Feb. 2013). Unveröffentlichte F&E-Arbeiten für die Fa. Anton Paar (Österreich): Aufbau und Charakterisierung von Dickfilm-Heizstrukturen in Siebdrucktechnik. KIT-IPE.

- Böckler, E. (07. April. 2013). *Vorlesung "Leiterplattentechnik" - Herstellverfahren*. Abgerufen am 7. Juni 2013 von <http://www.boeckeler.eu/index.php/download/category/7-ergaenzende-unterlagen-zur-vorlesung-2>
- Bogue, R. (27. Jan. 2007). MEMS sensors: past, present and future. *Sensor Review*, S. 7-13.
- Bolte, E. (2012). *Elektrische Maschinen: Grundlagen Magnetfelder, Wicklungen, Asynchronmaschinen, Synchronmaschinen, Elektronisch kommutierte Gleichstrommaschinen*. Heidelberg: Springer Verlag.
- Born, E. (12. Aug. 2001). *Patentnr. DE 10000834A1*.
- Bosch Sensortec GmbH. (Sept. 2012). *BMI055: 6-axis inertial sensor*. Von http://ae-bst.resource.bosch.com/media/products/dokumente/bmi055/bst-bmi055-fl000-01_v12_092012.pdf abgerufen
- Böttcher, L., & et al. (2008). Embedding of Chips for System in Package realization – Technology and Applications. *Microsystems, Packaging, Assembly & Circuits Technology Conference, 2008. IMPACT 2008. 3rd International* (S. 383 - 386). Taipei: IEEE.
- Bozzini, B., Giovannelli, G., & al., e. (2002). Crystallographic structure of gold films electrodeposited at low current densities. *Journal of Material Science*, Vol. 37, S. 3903-3913.
- Braunovic, M., & et al. (2007). *Electrical Contacts: Fundamentals, Applications and Technology* (ISBN-10: 1-57444-727-0 Ausg.). Boca Raton: CRC Press.
- Brockmann, W. (2005). *Klebertechnik*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH.
- Brümmer, H. (1980). *Elektronische Gerätetechnik. Systematische Entwicklung und Konstruktion*. Würzburg: Vogel-Verlag.
- Bruns, M., & Blank, T. (12. Nov. 2012). KIT internes Fachgespräch über das starke Ausgasungsverhalten von galvanisch vergoldeten Edelstahlkugeln vor der XPS Messung. Eggenstein-Leopoldshafen.
- Buck, T. (29. Jan. 2007). *Laminate Materials and Reliability Issues for Pb-free Electronics*. Abgerufen am 12. Juni 2013 von http://www.smta.org/files/SMTA_Boston_pbfree_ddi.pdf
- Büttner, G. (1987). *EP 0 271 692; A miniature hearing aid having a multilayer arrangement*.
- Carano, M. (23. Feb. 2010). *OMG Electronic Chemicals - Whats New in Solderable Finishes*. Von http://www.smta.org/files/UMW_solderablefinish_Carano_022310.pdf abgerufen
- Carano, M. (May 2012). Solderable Final Finishes: Urban Legends and State of the Art. *the pcb magazine*, S. 32-41.
- Chandrasekar, M., & et al. (10. März 2008). Pulse and pulse reverse plating—Conceptual, advantages and applications. *Electrochimica Acta*, Vol. 53(Issue 8), S. 3313-3322.
- Chou, T.-M. (2008). *Patentnr. 7,465,893 B2*. US.
- ck-components. (2011). *RB-Series, Rolling Ball Sensor Switch*. Abgerufen am 21. April 2013 von <http://www.ck-components.com/rolling-ball-sensor-switch/tilt,75105,en.html>
- Clariant International AG. (18. Dez. 2012). *Flammschutz Online*. Von <http://www.flameretardants-online.com/web/de/impressum/index.htm> abgerufen
- Combs, C. (2008). *Printed Circuits Handbook* (6. Auflage Ausg.). New York: McGraw-Hill.
- Comus Intl. (Jan. 2008a). *Non Mercury Switches*. Abgerufen am 20. April 2013 von <http://www.comus-intl.com/productpages/folders/NonMercurySwitches.pdf>

- Cuthrell, R. E., & Jones, L. (1978). Surface Contaminant Characterization Using Potential-Current Curves. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, Vol. 1, Issue 2, S. 167-171.
- Cwiek, J. (01. Nov. 2010). Prevention methods against hydrogen degradation of steel. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 43(Issue 1), S. 214-221.
- Dambrowski, N. (2007). *Goldgalvanik in der Mikrosystemtechnik*. Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtzgemeinschaft.
- Dapeng, Q. (2008). A new PCB-based low-cost accelerometer for human motion sensing. *Automation and Logistics* (S. 56-60). Qingdao: IEEE.
- Degen, C., & et al. (2006). *Parametric Study of Contact Fritting for improved CRes Stability*. (I. S. Workshop, Hrsg.) Von http://www.swtest.org/swtw_library/2006proc/PDF/S04_02_Degen.pdf abgerufen
- Delo GmbH. (Nov. 2011). *DELO-DUALBOND AD761 Technische Informationen*. Von [http://www.delo.de/fileadmin/datasheet/DELO-DUALBOND_AD761_\(TIDB-D\).pdf](http://www.delo.de/fileadmin/datasheet/DELO-DUALBOND_AD761_(TIDB-D).pdf) abgerufen
- Delo GmbH. (Sept. 2011). *Delomonopox NU355*. Von [http://www.delo.de/fileadmin/datasheet/DELOMONOPOX_NU355_\(TIDB-D\).pdf](http://www.delo.de/fileadmin/datasheet/DELOMONOPOX_NU355_(TIDB-D).pdf) abgerufen
- Delo GmbH. (Juli 2011a). *DELOMONOPOX MK096 Rev.37*. Von [http://www.delo.de/fileadmin/datasheet/DELOMONOPOX_MK096_\(TIDB-D\).pdf](http://www.delo.de/fileadmin/datasheet/DELOMONOPOX_MK096_(TIDB-D).pdf) abgerufen
- Delo GmbH. (Mai 2013). *Delomonopox AC365*. Von [http://www.delo.de/fileadmin/datasheet/DELOMONOPOX_AC365_\(TIDB-D\).pdf](http://www.delo.de/fileadmin/datasheet/DELOMONOPOX_AC365_(TIDB-D).pdf) abgerufen
- Deutsches Kupferinstitut. (30. Nov. 2012). *Diffusionsdichtheit (Permeabilität) von Kupferwerkstoffen*. Von http://www.kupferinstitut.de/front_frame/fenster.php?ziel=front_content.php%3F%26client%3D1%26lang%3D1%26parent%3D13%26subid%3D%26idcat%3D139%26idside%3D345 abgerufen
- Diener electronic GmbH. (2008). *Plasmatechnik*. Von http://www.plasmasurfacetchnology.eu/media/Plasmatechnik_de_2_low.pdf abgerufen
- Ding, Y., & et al. (kein Datum). *Use of Carbon Nanoparticles for the Flexible Circuits Industry*. (I. McDermid, Hrsg.) Abgerufen am 18. Mai 2013 von <http://electronics.macdermid.com/documents/resources/Use%20of%20Carbon%20Nanoparticles%20for%20the%20Flexible%20Circuits%20Industry%20Ding%20Retallick.pdf>
- Dini, J. (1993). *Electrodeposition*. New Jersey: Noyes Publication.
- Disco Technologies. (20. Nov. 2012). *Electroformed Bond Blades, NBC-Z Series*. Von <http://www.disco.co.jp/eg/products/catalog/pdf/nbcz.pdf> abgerufen
- Disco Technologies. (18. Nov. 2012). *Fully Automatic Dicing Saw DFD6340*. Abgerufen am 18. Nov. 2012 von <http://www.disco.co.jp/eg/products/catalog/pdf/dfd6340.pdf>
- DIT Holland B.V. (27. Dez. 2012). *Materials*. Von <http://www.ditholland.nl/modules.php?name=Materials> abgerufen
- Döring, M., & Diederichs, J. (2009). *Innovative Flame Retardands in E&E Applications*. Abgerufen am 10. April 2013 von http://www.flammschutz-online.com/images/userdata/pdf/236_DE.pdf
- Dörr, M. (2011). *Scriptum - Vakuumphysik und -technik*. (TU-Dresden, Hrsg.) Abgerufen am Aug. 2013 von <http://tu->

- dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_mathematik_und_naturwissenschaften/fachrichtung_physik/ifp/lehre/lehrveranstaltungen_ifp_ws2011_2012/script_vac.pdf
- DuPont. (Juli 2007). *Riston Etch Master EM213 Data Sheet & Processing Information*. Von DS98-44 Rev.08:
http://www2.dupont.com/Imaging_Materials/en_US/assets/downloads/datasheets/em213.pdf
 abgerufen
- DuPont. (Juni 2012). *DuPont-Pyralux LF Sheet Adhesive*. Von
http://www2.dupont.com/Pyralux/en_US/assets/downloads/pdf/LFadhesive_H-73246.pdf
 abgerufen
- Ebnesajjad, S. (2010). *Applied Handbook of Adhesives Technology and Surface Preparation: Technology, Applications & Manufacturing*. Amsterdam: Elsevier.
- Echternkamp, K. (2011). *Faradaysches Induktionsgesetz*. Abgerufen am 12. März 2013 von
<http://lp.uni-goettingen.de/get/text/3686>
- Eisler, P., & Strong, H. (1943). *Patentnr. GB 639,178*. Großbritannien.
- El-Sheimy, N. (2009). Emerging MEMS IMU and Its Impact on Mapping Application. *Photogrammetric Week 2009* (S. 203-216). Stuttgart Germany: Wichmann.
- Eltroplan. (23. April 2009). *Technologietag Eltroplan - Spezielle Leiterplatten Technologien*. Abgerufen am 17. Nov. 2012 von http://www.eltroplan.com/assets/files/news/0906_tag-der-offenen-tuer-nachlese/vortraege/Vortrag-05-Etter.pdf
- Endler, S. (2012). Ultradünne Chips in flexibler Elektronik. *Elektronische Baugruppen und Leiterplatten - EBL 2012 - Hochentwickelte Baugruppen in Europa - 6. DVS/GMM-Tagung*. Stuttgart: VDE Verlag.
- Endres, B. (Aug. 2011). Verhalten phenolisch härtender Epoxide in galvanischen Bädern, Gespräch zwischen Hr. Endress (Fa. Gramm) und T. Blank (KIT).
- Endres, B. (12. Juli 2012). Elektrochemische Abscheidung von Nickel und Palladium aus schwach sauren Bädern. *Erörterung der stromlosen Abscheidung von Ni-P, Pd-P zur Herstellung von Leiterplatten*. (T. Blank, Interviewer)
- Endres, B. (22. Feb. 2012). Prozessführung zur Abscheidung von ENEPIG-Schichten auf Leiterplatten. (T. Blank, Interviewer)
- ESS Technology. (2011). *Audio ADC Solutions - SABRE 32 Ultra ADC Series*. Abgerufen am 09. Febr. 2013 von http://www.esstech.com/index.php?p=products_ADC
- ETHZ-CCI. (2006). *Grundlagen der chemischen Thermodynamik*. Abgerufen am 18. Mai 2012 von www.cci.ethz.ch/uebungen/SS2006/Chemie_II/Skript_Thermodynamik_1:
www.cci.ethz.ch/uebungen/SS2006/Chemie_II/Skript_Thermodynamik_1
- EU-RoHS. (08. 06 2011). *DIRECTIVE 2011/65/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 8 June 2011 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment*. Von <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:174:0088:0110:EN:PDF> abgerufen
- Fa. DiscoEurope Technologies. (19. Nov. 2012). Firmeninternes Datenblatt zum Blatt BR904 und Diskussion mit H. Hintermaier.
- Fasching, G. (2005). *Werkstoffe für die Elektrotechnik* (4. Auflage Ausg.). Wien: Springer.
- Fechner Schulte Leiterplattentechnik. (17. Nov. 2012). *Materialien + Verfahren – Bohren*. Abgerufen am 17. 11 2012 von <http://www.fs-leiterplatten.de/technik/materialien/bohren/>

- Feinmetall GmbH. (2012). *Federkontaktstifte - Gesamtkatalog 2012*. Von http://www.feinmetall.de/fileadmin/user_upload/feinmetall/pdf/Downloads/de/FKS_2012_de.pdf abgerufen
- Fermond, H. (2006). Measurements and FE-Simulations of Moisture Distribution in FR4 based Printed Circuit Boards. *EuroSime 2006*, (S. 1-6). Como.
- Flinders, R. (26. Aug. 2008). Halogen-Free Electronics An Overview. (O. C. Meeting, Hrsg.) Irvine, CA: IEEE-PSES.
- Foley, R. (2010). Technology roadmapping for Power Supply in Package (PSiP) and Power Supply on Chip (PwrSoC). In IEEE (Hrsg.), *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, (S. 525 - 532). Palm Springs, CA.
- Frühau, S., & et al. (2012). Zuverlässigkeitsbewertung neuer Leiterplattentechnologien auf Basis der Online-Widerstandsmessung im Temperaturwechseltest. In VDE-Verlag (Hrsg.), *Elektronische Baugruppen und Leiterplatten - EBL 2012 (GMM-FB 71)*. Stuttgart: VDE-Verlag.
- FTD.de. (16. Mai 2012). *Stückzahlen und Marktanteile nach Betriebssystemen*. (F. T. Deutschland, Herausgeber) Abgerufen am 25. Sept. 2012 von <http://www.ftd.de/politik/konjunktur/:smartphones-stueckzahlen-und-marktanteile-nach-betriebssystemen/60130150.html>
- Fujimoto, D., & et. al. (2011). New Fine Line Fabrication Technology on Glass-cloth Prepreg without Insulating Films for PKG Substrate. *IEEE Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, (S. 387-391).
- Gaida, B. (1999). *Einführung in die Galvanotechnik*. Saulgau: Eugen G. Leuze Verlag.
- Gamburg, Y., & Zangari, G. (2011). *Theory and Practice of Metal Electrodeposition* (1. te Auflage Ausg.). New York: Springer.
- Ganesh, V., & Lee, C. (2006). Blade wear and wafer chipping in dicing. *8th Electronics Packaging Technology Conference, 2006. EPTC '06* (S. 15-21). IEEE.
- Garrison, S. (April 2013). *DXF Conversion Secrets for Gerber, GDS-II, ODB++, etc.* Abgerufen am 15. 04 2013 von <http://www.numericalinnovations.com/pages/dxf-dwg-conversion-secrets-for-gerber-gds-ii-odb-etc>
- Gassmann, S. (2009). Differential pressure flow sensor in PCB-technology. *IECON '09, Industrial Electronics 2009* (S. 4024 - 4028). Porto: IEEE.
- Gausemeier, J., Ebbesmeyer, P., & Kallmeyer, F. (2001). *Produktinnovation*. Carl Hanser Verlag.
- Goosey, M. (2007). Implementation of the RoHS directive and compliance implications for the PCB sector. *Circuit World, Vol. 33*(Iss. 1), S. 47-55.
- Goschnik, J., & et. al. (2003). *FZKA 6893; ELMINA Elektronische Mikronasen für Überwachungs- und Regelaufgaben in Gebäuden und Produktionsanlagen*. Forschungszentrum Karlsruhe.
- Gotou, H. (April 2011). The Trend of Microdrills for Printed Circuit Boards. *SEI TECHNICAL REVIEW, NUMBER 72*, S. 50-56.
- Greenwood, J. (1966). Constriction Resistance and the Real Area of Contact. *British Journal of Applied Physics*, S. 1621-1632.
- Habenicht, G. (2009). *Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendungen*. Berlin: Springer Verlag.
- Hager, M. (2006). Entwicklung einer motorisierten Prüfeinrichtung für Mikrovibrationssensoren. *Diplomarbeit*. Karlsruhe: KIT.

- Hamann, C. H., & Vielstich, W. (2005). *Elektrochemie* (4. Auflage Ausg.). Weinheim: WILEY-VCH.
- Hanna, F., & et. al. (2003). Controlling factors affecting the stability and rate of electroless copper plating. (Elsevier, Hrsg.) *Material Letters* 58, S. 104-109.
- Harsch, M., & et al. (2007). Influence of fillers and additives on the cure kinetics of an epoxy/anhydride resin. *European Polymer Journal*, 43, 1168–1178.
- Heidenhain GmbH. (2003). *Längrmessgeräte*. Von http://www.heidenhain.de/de_DE/php/dokumentation-und-information/dokumentation/prospekte/popup/media/media/file/view/file-0240/file.pdf abgerufen
- Heitz, S. (2012). Diplomarbeit. *Bump-Bonding-Technologie für das Upgrade des CMS-Pixeldetektors*. Karlsruhe: KIT.
- hermes. (2008). *Hermes-High density integration by embedding chips for reduced size modules and electronic systems*. Abgerufen am 25. Sept. 2012 von <http://www.hermes-ect.net/en/index.php>
- Heubner, U. (26. Dez. 2012). *Merkblatt 914: Nichtrostender Stahl - Wenn die Gesundheit zählt*. (E. Inox, Hrsg.) Abgerufen am 26. Dez. 2012 von http://www.edelstahl-rostoffrei.de/downloads/iser/MB_914.pdf
- Hitachi Chemicals. (22. Dez. 2012). *MCL-E-679FG, Datasheet*. Von http://www.hitachi-chem.co.jp/english/products/bm/b02/files/bm_b02_004.pdf abgerufen
- Hofmann Leiterplatten. (2012). *AML-Aktiver Multilayer*. Abgerufen am 12. Sept. 2012 von http://www.hofmannlp.de/fileadmin/dokumente/Hofmann_AML.pdf
- Holleck, G. (5. Feb. 1970). Diffusion and Solubility of Hydrogen in Palladium and Palladium-Silver Alloys. *The Journal of Physical Chemistry, Vol. 74*(No. 3), S. 503-511.
- Holm, R. (2000). *Electrical Contacts Handbook - Theory and Application* (3. Auflage Ausg.). Berlin: Springer.
- Holze, R. (1998). *Leitfaden der Elektrochemie*. Stuttgart: Teubner.
- Hoover, D. (18. Sep. 2003). *Materials Discussion (Including Low Loss Substrates)*. Von http://dcchapters.ipc.org/assets/pnw/presentations/20030925_Materials.pdf abgerufen
- Hörhold, A. (01. Aug. 2008). Konzentration der Fremdionen im Feingoldbad für die Herstellung von Leiterplatten. (T. Blank, Interviewer)
- Hörhold, A. (Aug. 2008). Zulässige Fremdionenkonzentration in galvanischen Goldbädern für die Leiterplattenproduktion. (T. Blank, Interviewer)
- Hörhold, A. (12. Juni 2009). Abtrag von Kupfer bei der Entfernung des Graphits im Black Hole Verfahren. (T. Blank, Interviewer)
- Hörhold, A. (13. Mai 2012). Diskussion mit T. Blank über die Verringerung des freien Phenolgehaltes in Leiterplatten vor chemischen Metallisierungsprozessen.
- Hörhold, A. (19. Juli 2013). Schrumpfung von Leiterplattenmaterialien bei der Verarbeitung. (T. Blank, Interviewer)
- Hosaka, H., & et al. (Jan. 1994). Electromagnetic microrelays: Concepts and fundamental characteristics. *Sensors and Actuators A: Physical*, S. 41-47.
- Hu, Z., & Ritzdorf, T. (2007). Cyanide- and Thiourea-Free Electrochemical Etching of Gold for Microelectronics Applications. *J. Electrochem. Soc.* 2007, Volume 154, Issue 10, Pages D543-D549, doi: 10.1149/1.2768901, S. Pages D543-D549.
- Hultsch, G., & et al. (1990). *Patentnr. DE 3915278 A1*. DE.

- Huntley, D. (09. Juni 1999). Maps, Maps Everywhere - A Unified Approach. *SEMI Standards Briefing Southwest Test Workshop 99*. San Diego, CA: IEEE. Von http://www.swtest.org/swtw_library/1999proc/PDF/S22_DH.pdf abgerufen
- Hymann, D. (Sept. 1999). Contact Physics of Gold Microcontacts for MEMS Switches. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technology*, Vol. 22(No. 3), S. 357-364.
- ifm electronic. (2013). *Drehgeber - inkrementales Verfahren*. Abgerufen am 03. Febr. 2013 von [http://www.ifm.com/ifmweb/downcont.nsf/files/ifm_PT_Drehgeber_Inkremental_DE_V43/\\$file/ifm_PT_Drehgeber_Inkremental_DE_V43.pdf](http://www.ifm.com/ifmweb/downcont.nsf/files/ifm_PT_Drehgeber_Inkremental_DE_V43/$file/ifm_PT_Drehgeber_Inkremental_DE_V43.pdf)
- Ihmels, C. (2012). Highly Reliable Substrates and CCL with Aluminium Monohydrate as a Halogen Free Co-Flame Retardant. In PINFA (Hrsg.), *4. pinfa - E&E Workshop*. Tokyo.
- IMOA . (2008). *Metallurgy of Mo in Stainless Steel*. Abgerufen am 01. Juni 2013 von International Molybdenum Association: http://www.imoa.info/moly_uses/moly_grade_stainless_steels/metallurgy_of_Mo_in_stainless_steel.php
- Intel. (2012). *Manufacturing Process; Design for manufacturability*. Abgerufen am 30. Okt. 2012 von <http://www.intel.com/content/www/us/en/quality/design-for-manufacturability.html>
- IPC. (04 2006). *IPC-TM-650 Section 2.4.24.6, Decompositionen Temperature (Td) of Laminate Material using TGA*. Von http://www.ipc.org/4.0_Knowledge/4.1_Standards/test/2-4_2-4-24-6.pdf abgerufen
- IPC-2152. (Aug. 2009). *IPC-2152*. Von <http://www.ipc.org/TOC/IPC-2152.pdf> abgerufen
- IPC-4104. (May 1999). *IPC-4104*. Von <http://www.ipc.org/TOC/IPC-JPCA-4104.pdf> abgerufen
- IPC-TM-650-2.3.17.2. (Aug. 1997). *Resin Flow of "No Flow" Prepreg*. Von http://www.ipc.org/4.0_Knowledge/4.1_Standards/test/2.3.17.2.pdf abgerufen
- IPC-TM-650-No. 2.3.17.1. (Mai 1998). *IPC-TM-650, Number 2.3.17.1 - Resin Flow of Adhesive Coated Films and Unsupported Adhesive Films*. Abgerufen am 23. Dez. 2012 von http://www.ipc.org/4.0_Knowledge/4.1_Standards/test/2.3.17.1b.pdf#xml=http://localhost/texts/searchipc/pdfhi.txt?query=2.3.17.1&pr=IPC-NonMember&prox=page&rorder=500&rprox=500&rdfreq=0&rwfreq=1000&rlead=750&rdepth=31&sufs=1&order=r&cq=&sr=-1&id=50d5219a37
- Jacobson, B., & Holbom, G. (1988). Nucleation and Initial Growth of Pulse-Plated Gold on Crystalline and Amorphous Substrates. (ECS, Hrsg.) *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 135(Iss. 11), S. 2720-2725.
- Janson, M. (15. Jun. 2013). IPE Bachelor-Thesis: LED-Lighting Module Development with Integrated Driver Electronics. (KIT, Hrsg.) KIT-IPE.
- Janssens, E. (Oct. 2005). *AGFA Idealine_1_03_general_presentation.ppt*. Abgerufen am 07. Juli 2013 von <http://www.agfa.com/sp/global/en/internet/main/solutions/phototooling/idealine/index.jsp>
- Jedec. (Oct. 1995). *Thin Matrix Mini Tray for Shipping and Handling. Item 11.5-427, CO-030-A*. Abgerufen am 04. Nov. 2012 von <http://www.jedec.org/standards-documents/results/CO-030>
- Job, G., & Ruffler, R. (2011). *Physikalische Chemie* (1. Auflage Ausg.). Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag.
- Johansson, M., & et al. (2010). Hydrogen adsorption on palladium and palladium hydride at 1 bar. *Surface Science*, S. 718-729.
- Jung, M. (Juni 2002). *Dynamik und Löslichkeit von Wasserstoff in nanokristallinen Metallen. Dissertation*. Technische Universität Darmstadt.

- Kaesche, H. (1990). *Die Korrosion der Metalle*. Berlin: Springer.
- Kanani, N. (2009). *Galvanotechnik - Grundlagen, Verfahren und Praxis einer Schlüsseltechnologie*. München: Carl Hanser Verlag.
- Kasper, C. (1940). The Theory of the Potential and the Technical Practice of Electrodeposition, III . Linear Polarization on Some Line-Plane Systems. *J. Electrochem. Soc.* 1940 volume 78, issue 1, , Vol. 78(Issue 1).
- Kastner, G. (2013). *Kompaktwissen Elektromotoren*. Abgerufen am 28. 02 2013 von http://www.prof-kastner.de/index.php?option=com_phocadownload&view=category&id=11:technik-elektrische-antriebe&Itemid=66
- Kataoka, K., & et al. (2003). Low contact-force fritting probe card using buckling microcantilevers . *ITC International Test Conference* (S. 1008-1013). IEEE.
- Kempe, V. (2012). Inertial MEMS - ein Streifzug. *Sensorsysteme* (S. 1-44). Lichtenwalde: Leibnitz-Institut.
- Khan, C., & et al. (1991). Effects of thermal treatment on the mechanical and structural properties of thin films. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, Vol. 9, S. 3329-3332.
- Khandpur, R. (2006). *Printed Circuit Boards*. New York: McGraw-Hill.
- KIT. (2004). *Wissenschaftliche Berichte FZKA 6990, 5. Statuskolloquium des Programmes Mikrosystemtechnik*. Forschungszentrum Karlsruhe.
- Koidl, H., & et al. (1999). Influence of Physical/Chemical Characteristics of Organic Vapors and Gas Mixtures on their Contact Compatibility. *IEEE TRANSACTIONS ON COMPONENTS AND PACKAGING TECHNOLOGY*. Vol. 22, No.3, S. 439-445. IEEE.
- Koidl, H., & et al. (2000). Influence of Contact Material Parameters on Contact Compatibility of Organic Vapors. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, Vol. 23, No. 2, S. 222-226.
- Koidl, H., Rieder, W., & Salzmann, Q. (1997). Kontaktgefährdung durch Ausgasung organischer Werkstoffe. *VDE Seminar "Kontaktverhalten und Schalten"*. 51, S. 29-39. Karlsruhe: VDE.
- Kondos, P. (Okt. 2009). ENEPIG: The "Universal" Finish? *AREA Consortium Meeting*.
- Kostka, C., & Kostka, S. (2008). *Der Kontinuierliche Verbesserungsprozess: Methoden des KVP*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG.
- Kritzer, P. (1998). *FZKA 6168 - Die Korrosion der Nickel-Basis-Legierung 625 unter hydrothermalen Bedingungen*. (F. Karlsruhe, Hrsg.) Eggenstein-Leopoldshafen.
- Kuch, B., & et al. (Mai 2005). Polybromierte Diphenylether und Tetrabrombisphenol A: Untersuchungen zum Abbau und Metabolismus, Bestimmung in Nahrungsmitteln. Programm Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung (BWPLUS). Abgerufen am 18. Dez. 2012 von <http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/40239/BWB21019Sber.pdf?command=downloadContent&filename=BWB21019Sber.pdf&FIS=203>
- Kurowski, A. (09. Juli 2003). *Elektrochemische und oberflächenanalytische Untersuchungen zur galvanischen und chemischen Nickel-Phosphor Schichtbildung* . Von <http://docserv.uni-duesseldorf.de/servlets/DerivateServlet/Derivate-2566/566.pdf> abgerufen
- Kurtz, O., & Barthelmes, J. (Juni 2010). *Gold-Cobalt High Speed Electrolyte for the Deposition of Hard Gold Layers*. Von http://www.atotech.com/fileadmin/GMF/FEC_Publications/Atotech_Gold-Cobalt_High_Speed_Electrolyte_for_the_Depositon_of_Hard_Gold_Layers.pdf abgerufen

- Kurtz, O., & et al. (Mai 2011). *Thermal Aging of Technical Hard Gold Deposits*. (A. D. GmbH, Hrsg.) Abgerufen am 18. Jan. 2013 von http://www.atotech.com/fileadmin/GMF/FEC_Publications/Atotech_Thermal_Aging_of_Technical_Hard_Gold_Deposits.pdf
- Lackwerke Peters GmbH. (2003). *AI 2/29-Auswahlkriterien und Verarbeitungshinweise für die abziehbaren Lötstopplacke der Reihe SD 2950*. Von http://www.peters.de/images/download/Service/ai/ai2-29d_003.pdf abgerufen
- Lal, S., & Smith, G. (1992). *Patentnr. EP 0517445 B1*.
- Lanza, G., Blank, T., & Haefner, B. (2013). Design for Testability for Micro-Mechatronic Systems. *to be published on the 23rd CIRP Design conference* (S. 283-292). Bochum: Springer Berlin Heidelberg.
- Lau, J. (2011). Evolution, challenge, and outlook of TSV, 3D IC integration and 3d silicon integration. *Advanced Packaging Materials (APM)*, (S. 462-488). Xiamen.
- LEL Diamond Tools International, Inc. (2009). *NICKEL BOND (electroformed) Hubless - DIAMOND / CBN DICING BLADES*. Von http://www.ukam.com/nickelbond_dicing_blades_.htm abgerufen
- Lerch, R. (2007). *Elektrische Messtechnik: Analoge, digitale und computergestützte Verfahren*. Berlin: Springer.
- Liker, J., & Franz, J. (2011). *The Toyota Way to Continuous Improvement*. Mcgraw-Hill Professional.
- Lili, M. (2011). Effect of Moisture on Thermal Properties of Halogen-Free and Halogenated Printed-Circuit-Board Laminates. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability* (S. 66 - 75). IEEE.
- Lintec Coop. (18. Nov. 2012). *Datasheet Adwill D-628*. Von <http://www.lintec-usa.com/datasheet/D-628.pdf> abgerufen
- Lintec of America, Inc. (kein Datum). *Wafer mount tape Adwill D-series specification*. Abgerufen im Aug. 2013 von <http://www.lintec-usa.com/Contents/Products/Tape/Dtable.htm>
- Loadpoint. (2012). *Dicing and Grinding of Electro-Ceramics*. (Loadpoint Ltd., Hrsg.) Abgerufen am 19. Nov. 2012 von http://loadpoint.co.uk/documents/Dicing_Grinding_Aug_05.pdf
- Lu, N., Xu, L., & Lin, J. (2010). The Design of a Fretting Contact Resistance Testing System . *2010 Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts (HOLM)* (S. 1-5). Charleston, SC: IEEE.
- Lu, S.-Y., & Hamerton, I. (01. Okt. 2002). Recent developments in the chemistry of halogen-free flame retardant polymers. (ELSEVIER, Hrsg.) *Progress in Polymer Science, Vol. 27*(Issue 8), S. 1661–1712.
- Lucefin S.p.A. (28. Dez. 2012). *Rostfreie Edelmehle*. Von http://www.lucefin.com/wp-content/files_mf/acciaiinossidabilideu.pdf abgerufen
- Lunau, S., & al., e. (2012). *Six Sigma+Lean Toolset*. Heidelberg: Springer.
- Malleroy, G., & Hajdu, J. (2009). *Electroless Plating-Fundamentals and Applications*. Orlando: AESF.
- Manchester, F., & et al. (1994). The H-Pd (Hydrogen-Palladium) System. *Journal of Phase Equilibria, Vol. 15*(No. 1).
- Manassis, D., & et. al. (2007). Technical Understanding of Resin-Coated-Copper (RCC) Lamination Processes for Realization of Reliable Chip Embedding Technologies. *Electronic Components and Technology Conference, 2007. ECTC '07*, (S. 278-285). Reno.

- Marek, J. (April 2007). MEMS-Sensoren im Überblick. *Automobil-Elektronik*, S. 16-18.
- Markgraf, D. (Juli 2013). *Gabler Wirtschaftslexikon, Stichwort Qualität*. Von <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/55799/qualitaet-v6.html> abgerufen
- maxon GmbH. (April 2008). *maxon DC motor und maxon EC motor - Das Wichtigste*. Abgerufen am 01. März 2013 von http://test.maxonmotor.com/docsx/Download/catalog_2008/Pdf/08_wichtiges_dc_ec_motoren_d.pdf
- maxon GmbH. (April 2012). *Datenblatt: RE 40, Graphitbürsten, 150 Watt*. Von http://www.maxonmotor.de/medias/sys_master/8800326713374/12_082_DE.pdf abgerufen
- Maxon Motor GmbH. (März 2013). *Planetengetriebe GP42 C*. Von http://www.maxonmotor.de/medias/sys_master/8806558302238/13_270-271_DE.pdf abgerufen
- McBride, J., & et al. (2009). Gold Coated Multi-Walled Carbon Nanotube Surfaces As Low Force Electrical Contacts for MEMS Devices: Part 1. *Electrical Contacts, 2009 Proceedings of the 55th IEEE Holm Conference on* (S. 281-287). Vancouver: IEEE.
- McCluskey, E. (1981). Design for Autonomous Test. *IEEE Transactions On Computers, Vol. c-30, No. 11*, S. 866-875.
- McHugh, M., & et al. (Juni 2013). *The Tips Project*. Von <http://www.tips-project.eu/default.asp> abgerufen
- Mentor Graphics. (18. März 2010). *Mentor Graphics Acquires Valor Computerized Systems, Ltd*. Von <http://www.mentor.com/company/news/valor-acquisition> abgerufen
- Merchant, B. (2009). MEMS Applications in Seismology. *Seismic Instrumentation Technology Symposium*. Palm Springs, USA.
- Michalovic, M., & et al. (18. Dez. 2012). *The Macrogalleria - Making Epoxy Resins*. Von <http://pslc.ws/macrog/level4.htm> abgerufen
- Microchip Tech. Inc. (2011). DS41582A. *PIC12F1822 DIE - Microcontroller Die Specification Sheet*.
- Microchip Tech. Inc. (2012). DS41413C - *Datenblatt des Cotrollers PIC12LF1822*. Von <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/41413C.pdf> abgerufen
- Microchip Tech. Inc. (2012). *PIC12(L)F1822/PIC16(L)F1823 Datasheet - DS41413C*. Von <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/41413C.pdf> abgerufen
- MICRO-EPSILON GmbH . (2013). *confocalDT*. Von <http://www.micro-epsilon.de/download/products/cat--confocalDT--de.pdf> abgerufen
- Milad, G., & Walsh, D. (Juni 2013). New Developments in ENIG and ENEPIG. *the pcb magazine*, S. 22-29.
- Minges, M., & et al. (1989). *Electronic Materials Handbook - Volume 1 Packaging*. ASM International.
- Möhringer, S. (09. Mai 2003). *Die neue Richtlinie VDI 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*. Von mechatronics-net.de/gerworkgroup/sitzung6/moehringer-vdi.pdf abgerufen
- Moitzi, H. (04.-05. September 2007). Aktuelle Entwicklungen im Technologiebereich. 5. *AT&S Technologieforum*. München.
- Moore, G. (19. April 1965). Cramming More Components onto Integrated Circuits. *Electronics Magazin, Vol. 38, No. 8* .

- Panasonic Corporation. (Oct. 08). *Process Guidelines Laminate R-1566*. Abgerufen am 12. Juni 2013 von R-1566W Rev1.02:
http://www3.panasonic.biz/em/pcb/en/product/r1566w/4_process_guideline/R1566W_Process_Guideline_Rev1_02.pdf
- Pauliukait, R., & et al. (Nov. 2006). Effect of Cu(II) ligands on electroless copper deposition rate in formaldehyde solutions: An EQCM study. (S. Link, Hrsg.) *Journal of Applied Electrochemistry*, Vol. 36(No. 11), S. 1261-1269.
- Paunovic, M., & Schlesinger, M. (2006). *Fundamentals of Electrochemical Deposition* (2.te Ausg.). Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.
- Pecht M. G., & et. al. (1999). Moisture Ingress Into Organic Laminates. *IEEE Transaction on Components ans Packaging Technology*, (S. 104-110).
- Peters GmbH. (2003). *Verarbeitungshinweise für fotostrukturierbare ELPEMER Lötstopplacke*. Abgerufen am 15. Juni 2013 von ai2-1d_003:
http://www.peters.de/images/download/Service/ai/ai2-1d_003.pdf
- PI GmbH. (2006). *PI - Geschichte der Innovation*. Von <http://www.physikinstrumente.de/de/about/geschichte.php> abgerufen
- Piasecki, T., & et al. (Dec. 2012). Electrical properties of dielectric foil for embedded PCB capacitors. (S. Link, Hrsg.) *Materials Science-Poland*, S. 335-341.
- Piest, S. (2005). *Regenerierung von ammoniakalischer Ätzlösung - Geschäftszeichen Bundesministerium : Z II 4 – 42155-5/203*. Berlin: Bundesministerium für Umweltschutz, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- Pinnel, M. (Juni 1979). Diffusion-Related Behaviour of Gold in Thiin Film Systems. (Springer, Hrsg.) *Gold Bulletin*, Vol. 12, S. 62-71.
- Pitka, R., & et al. (2009). *Physik - Der Grundkurs*. Frankfurt am Main: Harri Deutsch.
- Poate, J. (März 1981). Diffusion and Reactions in Gold Films - A Review of Fundamental Aspects. *Gold Bulletin*, Vol. 14(Issue 1), S. 2-11.
- Pohlmann, L. (2005). PC III - Elektrochemie.
- Popov, V. (2010). *Kontaktmechanik und Reibung*. Berlin: Springer.
- ProPower. (2012). *ProPower, Kompakte Elektronikmodule mit hoher Leistung für Elektromobilität, Antriebs- und Beleuchtungstechnik*. Von <http://www.projekt-propower.de/> abgerufen
- Purschel, M. (2011). Diffusion soldering for automotive power MOSFETs offers the first 100% lead free die attach. *Proceedings of the 2011-14th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2011)*. Birmingham: IEEEExplore Digital Library.
- Raisch, J. (2011). *Praktikum Grundlagen der Regelungstechnik-Sommersemester 2011*. Von Versuch 2: Drehzahlregelung eines Gleichstrommotors: http://www.control.tu-berlin.de/images/b/b1/PR_Grundlagen_1b.pdf abgerufen
- Rao, C., & Trivedi, D. (2005). Chemical and electrochemical depositions of platinum group metals and their application. *Coordination Chemistry Reviews* 249, S. 613–631.
- Revisto, K., & et al. (25. April 2013). *More Smartphones Were Shipped in Q1 2013 Than Feature Phones, An Industry First According to IDC*. Von <http://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS24085413> abgerufen
- Rolyance, L., & Angell, J. (Dec. 1979). A batch-fabricated silicon acceleromometer. *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 26(No. 12), S. 1911-1917.

- Romankiw, L., & et al. (2000). *Electrochemical Technology Applications in Electronics III. 196th Meeting of The Electrochemical Society, Inc* (S. 132-138). Honolulu, Hawaii: Electrochemical Society, Inc.
- SANMINA - SCI. (2006). *PCB Fabrication - Buried Capacitance Technology*. Von http://www.sanmina.com/pdf/solutions/pcbres/buried_capacitance_technical_0106.pdf abgerufen
- Sato, T., & et al. (März 1981). Palladium with a Thin Gold Layer as a Sliding Contact Material. *Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, IEEE*, S. 10-14.
- Schindler-Saefkow, F., & et al. (2006). Thermal Management in a 3D-PCB-Package with Water Cooling. *Electronics Systemintegration Technology Conference* (S. 107-110). Dresden: IEEE.
- Schlesinger, M., & Paunovic, M. (2010). *Modern Electroplating*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.
- Schmidt, V. (2003). *Elektrochemische Verfahrenstechnik, Grundlagen, Reaktionstechnik, Prozessoptimierung*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Schmikat, J. (1998). Contact materials for microrelays. *The Eleventh Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, MEMS '98* (S. 190-194). Heidelberg: IEEE.
- Schneider, C. (1971). *Patentnr. 3,773,447*. US.
- Schneider, M., Kühner, T., & et al. (2010). Fibers in Printed Circuit Boards With Passively Aligned Coupling. *Journal of Lightwave Technology, Vol. 28, Issue 15*, S. 2121 - 2128.
- Schröder, D. (2009). *Elektrische Antriebe - Grundlagen*. Heidelberg: Springer Verlag.
- Schweizer Electronic AG. (Jan. 2009). *Das Schweizer Water Board*. Abgerufen am 01. Aug. 2013 von http://www.schweizer.ag/tl_files/products/datasheets/2009_WaterBoard.pdf
- Schweizer Electronic AG. (Juni 2013). *Auf einen Blick: Widerstandsdruck*. Von http://www.schweizer.ag/de/produkteundloesungen/systemkostenreduktion/gedruckte_Widerstaende.html abgerufen
- Schwenk, A. (2008). *AiF Abschlussbericht FV-NR.: 14742 N, Untersuchungen zu kapazitiven Low Cost Neigungssensoren aus metallbeschichtetem Kunststoff (MID-Neigungssensor)*. HSG-IMAT.
- Seidel, M. (2005). *Methodische Produktplanung; Grundlagen, Systematik und Anwendung im Produktentstehungsprozess* (Bde. Band 1 - 2005). Karlsruhe: universitätsverlag karlsruhe.
- Seki, A. (März 2011). PCBs With Embedded Components - Emerge for Capacitors. (D. Publishing, Hrsg.) *AEI*, S. 24-25.
- SemiLEDs Optoelectronics Co.,Ltd. (2013). *EA-40UVDatasheet Rev.1.1*. Abgerufen am 11. Juli 2013 von <http://www.semileds.com/system/files/EV-U40A.pdf>
- Sensolute GmbH. (25. März 2013). *DATASHEET - Micro Vibration Sensor MVS1006.01, Rev. 02*. Von http://www.sensolute.com/asset/media/PDFs/MVS1006_01-Datasheet%20Rev2_0.pdf abgerufen
- SignalQuest. (2012). *SQ-MIN-200, Datasheet*. Abgerufen am 04. Nov. 2012 von <http://signalquest.com/download/SQ-MIN-200%20Omnidirectional%20Tilt%20and%20Vibration%20Sensor%20Datasheet.pdf>
- Slade, P. (1999). *Electrical Contacts - Principles and Applications*. New York: Marcel Dekker.
- Smith, C. (April 1954). Piezoresistive effects in silicon and germanium. *Physical Review, Vol. 94*(No. 1), S. 42-49.

- sofia, S. I. (Hrsg.). (Juli 2012). *Branchenanalyse der deutschen Galvano- und Oberflächentechnik*. Abgerufen am 23. Juli 2012 von REACH-Projekt: <http://www.reach-helpdesk.info/fileadmin/reach/dokumente/Anhang01Branchenanalyse.pdf>
- Somadossi, S. (2002). Investigation on Diffusion Soldering in Cu/In/Cu and Cu/In-48Sn/Cu Systems. *Dissertation*. Stuttgart.
- Sood, B., & al., e. (kein Datum). *Controlling Moisture in Printed Circuit boards*. Von IPC Printed Circuit Expo: http://www.ipcoutcome.org/pdf/best_practices_controlling_moisture_ipc.pdf abgerufen
- ST. (03 2007). *AN2290-Flux control simulink and software library of a PMSM*. Abgerufen am 19. März 2013 von Flux control simulink and software library of a PMSM: http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/application_note/CD00085782.pdf
- Stark, W. (07. Sept. 2012). *Reaktoren und Kinetik - Vorlesungsteil 1-6*. Zürich.
- Stefener, M. (2012). *Skriptum Praktikum Brennstoffzellen*. TUM, Departement für Physik E19, München.
- Stroecker, K. (Juni 2011). Entwicklung und Programmierung einer Motorsteuerung für Linearmotoren. Eggenstein-Leopoldshafen: KIT.
- Sudha, V. (2005). Underpotential deposition of metals - Progress and prospects in modelling. *J. Chem. Sci., Vol. 117, No. 3*, S. 207-218.
- Suh, N. (Juli 1973). The delamination theory of wear. *Wear, Vol. 25*(No. 1), S. 111-124.
- Takahashi, A., & et al. (2000). High density substrate for semiconductor packages using newly developed low CTE build-up materials. *International Symposium on Advanced Packaging Materials: Processes, Properties and Interfaces, 2000*. (S. 216 - 220). Braselton: IEEE.
- Takano, M. (2011). Evaluation of the Ni Diffusion to the Surface of Au Plating for Soldering Process Control. *Journal of Surface Analysis, Vol. 18, No. 1*, S. 2-6.
- Tarbouriech, S., & et al. (2009). Anti-windup design: an overview of some recent advances and open problems. (T. I. 2009, Hrsg.) *IET Control Theory and Applications, Vol. 3*(No. 1), S. 1-19.
- Texas Instruments. (Juni 2007). *SPRS439M, Data Manual for the TMS320F28335*. Von <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tms320f28335.pdf> abgerufen
- Thermo Scientific. (2003). *Direct Determination of Metal Cyanides by Ion Chromatography with UV Adsorbance Detection*. Abgerufen am 28. Sept. 2012 von http://www.dionex.com/en-us/webdocs/6760-AU147_LPN1570.pdf
- Timsit, S. (1998). Electrical contact resistance: properties of stationary interfaces. *IEEE Holm Conference on Electrical Contacts* (S. 1-19). Arlington, VA, USA: IEEE.
- Tostmann, K. (2001). *Korrosion - Ursachen und Vermeidung*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH.
- Turbini, L. (2006). Conductive anodic filament (CAF) formation: an historic perspective. *Circuit World, Vol. 32*(Iss.: 3), S. 19-24.
- Tyco Electronics. (Dez. 2000). *Relay Contact Life*. Von http://relays.te.com/appnotes/app_pdfs/13c3236.pdf abgerufen
- Tyco Electronics Ltd. (Sept. 2001). *Relay Products - Automotive Application Notes, Diagnostics of Relays*. Von http://relays.te.com/appnotes/app_pdfs/diagnostics.pdf abgerufen
- Ucamco. (Jan. 2012). *The Gerber Format Specification; RS-274X or Extended Gerber*. Von http://www.ucamco.com/Portals/0/Documents/Ucamco/RS-274X_Extended_Gerber_Format_Specification_201201.pdf abgerufen

- Umicore GmbH. (03. Jan. 2013). *Auruna 530 Gold-Kobalt-Elektrolyt*. Abgerufen am 24. April 2013 von http://www.umicore-galvano.com/images/stories/downloads/de/Umicore_AURUNA_530_DE.pdf
- umicore Lieferprogramm. (2012). *Lieferprogramm*. Abgerufen am 05. Febr. 2012 von http://www.umicore-galvano.com/images/stories/downloads/de/Lp_d_Juni2011.pdf: http://www.umicore-galvano.com/images/stories/downloads/de/Lp_d_Juni2011.pdf
- Van den Meerakker, J. (1981). On the mechanism of electroless plating. II. One mechanism for different reductants. (S. Link, Hrsg.) *Journal of Applied Electrochemistry*, No. 3, S. 395-400.
- VDE/VDI. (Mai 1999). *VDE/VDI-SCHULUNGSBLÄTTER FÜR DIE LEITERPLATTENFERTIGUNG*. Von <http://www.peters.de/de/service/technische-druckschriften/122-schulungsblaetter-fuer-die-leiterplattenfertigung> abgerufen
- VDI/VDE. (Mai 1999). *VDE/VDI-SCHULUNGSBLÄTTER FÜR DIE LEITERPLATTENFERTIGUNG 3711, Blatt 3.1*. Abgerufen am 15. Nov. 2012 von <http://www.peters.de/de/service/technische-druckschriften/122-schulungsblaetter-fuer-die-leiterplattenfertigung>
- Vinaricky, E. (2002). *Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen* (2. Auflage Ausg.). Berlin: Springer.
- Wacker, M., Trawiel, P., & Ehrenstein, G. (29. April 2010). *Härtung von Reaktionsharzen, Time-Temperature-Transition-Diagramm*. Abgerufen am 17. Dez. 2012 von <http://www.lkt.uni-erlangen.de/publikationen/online-aufsaezte/haertung.shtml>
- Waffenschmidt, E. (2005). Design method and material technologies for passives in printed circuit Board Embedded circuits. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 20, Issue: 3, S. 576 - 584.
- Wallenberger, F., & Bingham, P. (2010). *Fiberglass and Glass Technology*. New York: Springer.
- Walsh, F., & Herron, M. (1991). Electrocrystallization and electrochemical control of crystal growth: fundamental considerations and electrodeposition of metals. *Applied Physics*, 24, S. 217-225.
- Wang, L. (07. 04 2011). *Chapter_13_MEMS_slides_110407*. Von http://www.elsevierdirect.com/companions/9780123739735/casestudies/Chapter_13_MEMS_slides_110407.pdf abgerufen
- Webber, L., & Wallace, M. (2008). *Qualitätssicherung für DUMMIES*. Weinheim: WILEY-VCH.
- Wegerer, G. (2011). *Beitrag zur Ursachenfindung des „Black Pad“-Effekts bei der chemischen Nickel-Gold-Abscheidung mit einem Vorschlag zur fertigungstechnischen Prüfung*. Berlin: Technische Universität Berlin.
- Wei, I., & Brewer, J. (June 1996). Desorption of Hydrogen from Palladium Plating. *AMP Journal of Technology* (Vol. 5).
- Wendt, L. (2010). *Taschenbuch der Regelungstechnik*. Frankfurt am Main: Wissenschaftlicher Verlag Harri Deutsch.
- Wicke, E., & Nernst, G. (April 1964). Zustandsdiagramm und thermodynamisches Verhalten der Systeme Pd/H₂ und Pd/D₂ bei normalen Temperaturen; H/D-Trenneffekte. *Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie*, S. 224-235.
- Williamson, J., & Hunt, T. (07. März 1972). Asperity Persistance and Real Area of Contact Between Rough Surfaces. *Proc. R. Soc. Lond. A*, S. 147-157.
- Willis, B. (17. Sept. 2011). *Testing PCBs for Outgassing "bob Willis How to Do It"*. Von <http://www.youtube.com/watch?v=xaauETZkBP> abgerufen
- Wojnarowski, R., & et al. (1994). *Patentnr. EP 0611129 A2*. EP.

- Wolkenstein, H. (2008). *HERMES - High density integration by embedding chips for reduced size modules and electronic systems*. Von ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/fp7/ict/docs/micro-nanosystems/g2-microsystems-proj-portfolio-07-08-29-hermes_en.pdf abgerufen
- Wollnack, D. h. (13. Dez. 2008). *Gleichstrommotor*. Abgerufen am 09. 03 2013 von <http://www.tuhh.de/ft2/wo/Vorlesungen/WZMI/ElektrischeMotoren.pdf>
- Wundt, K. (20xx). *Betrachtungen zum Registrieren von HDI-Leiterplatten*. Abgerufen am 07. Juli 2013 von http://www.microcirtec.de/_DE/Ect_Pdf_Zip/00_registration_hdiD.pdf
- Würth Elektronik GmbH. (Dez. 2009). *TecReport*. Abgerufen am 30. Juli 2013 von FLATcomp: http://www.we-online.de/web/de/index.php/show/media/05_intelligente_systeme/produkte_6/flatcomp_1/downloads/TecReport_07_FLATcomp_Impulswiderstaende.pdf
- Würth Elektronik GmbH. (2012). *Application Note 25 - Embedded Multilayer Inductances*. Abgerufen am 17. Juli 2013 von http://www.we-online.de/web/de/index.php/show/media/04_leiterplatte/2012_2/emi/Application_Note25_DE.pdf
- Xu, J., & et al. (15. Okt. 2008). Calorimetric Studies on an Anhydride-Cured Epoxy Resin from Diglycidyl Ether of Bisphenol-A and Diglycidyl Ether of Poly(propylene glycol). I. Onset of Diffusion Control During Isothermal Polymerization. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 46 (20), 2155-2165.
- Xu, P. (2010). Deformation analysis of Multilayer Board in the lamination process. *Electronic Packaging Technology & High Density Packaging (ICEPT-HDP)*, (S. 612-615). Xi'an.
- Zanger, U. (01. April 2010). *SCiBO*. Abgerufen am 2013 von KMU-Innovativ: Entwicklung der Prozesstechnik zum Aufbau eines intelligenten Mikro-Vibrationssensors für den Einsatz in niedrigen Spannungsbereichen mit integrierter Auswertelektronik: http://www.produktionsforschung.de/kmu-innovativ/kmuprojekte/vpkmui/index.htm?KMU_ID=98&VP_ID=3074
- Zhao, J. (2007). Mechanism of Adhesive Film Popcorn in Electronic Packaging. *ECTC 2007, Proceedings, 57th* (S. 487 - 493). Reno: IEEE.
- Zheng, L., & et al. (2012). Characteristics of chip formation in the micro-drilling of multi-material sheets. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* (S. 40-49). Elsevier.
- Zhuqing, Z. (2001). Study of curing mechanism of epoxy-phenolic system for underfill applications. *International Symposium on Advanced Packaging Materials: Processes, Properties and Interfaces, 2001* (S. 257-260). Braselton: IEEE.
- Zilbert, G. (Jan. 2012). *Design for Testability - The True Story*. Abgerufen am 30. März 2013 von <http://www.infoq.com/articles/Testability>

9 Bildverzeichnis

Bild 1-1: Einsparpotenzial an AA-Zellen bei optischen Computermäuse mit Bewegungserkennung	3
Bild 2-1: Produktentstehungsprozess für Mikrovibrationssensoren.....	6
Bild 2-2: Schliff durch eine etwa 200 µm starke FR4-Leiterplatte	10
Bild 2-3: Reaktionsmechanismus zur Bildung von difunktionalem Epoxidharz	11
Bild 2-4 :Festlegung des Koordinatensystems in Leiterplatten.....	12
Bild 2-5: Zersetzungstemperaturen T_{D1} , T_{D2} verschiedener Leiterplattenarten.....	12
Bild 2-6: Additionspolymerisation bei Epoxiden nach (Brockmann, 2005).....	13
Bild 2-7: Strukturformel von Tetrabrombisphenol.....	14
Bild 2-8: Härtung von Epoxidharzen (Wacker, Trawiel, & Ehrenstein, 2010).....	15
Bild 2-9: Bestimmung der Flussrate von NoFlow-Prepregs	17
Bild 2-10: Schematische Darstellung der Diffusion von Cu, Ni, Au	20
Bild 2-11: Darstellung eines Kontakts zwischen einer rauen und ideal glatten Fläche.....	21
Bild 2-12: Einschnürung des Stromflusses durch die wirksame Kontaktfläche.....	22
Bild 2-13: Kontaktspannung in mV über der Stromstärke in A für einen frittenden Kontakt	24
Bild 2-14: Widerstandsverhalten elektrischer Kontakte in organikhaltigen Atmosphären	25
Bild 2-15: Oberflächen-Mikrorauheit nach mechanischer Belastung (Williamson & Hunt, 1972).....	25
Bild 2-16: REM Aufnahme der Oberfläche eines galvanisch beschichteten Kontaktpads	26
Bild 2-17: FIB-Schnitt durch eine chemische Ni-Pd-Au Schicht.....	26
Bild 2-18: Bildung einer isolierenden Schicht infolge von Reibverschleiß („Fretting“)	27
Bild 2-19: Poren in einer vergoldeten Edelstahlkugel nach der Kaltverformung	28
Bild 2-20: Übergangswiderstände für Au und Pd Kontakte.....	29
Bild 2-21: Übersicht über elektrochemische Verfahren	30
Bild 2-22: Aufbau einer galvanischen Zelle und Messung der elektromotorischen Kraft	32
Bild 2-23: Stern-Graham-Modell der elektrolytischen Doppelschicht (Bagotsky, 2006).....	34
Bild 2-24: schematische Darstellung der Butler-Volmer Gleichung	36
Bild 2-25: Veranschaulichung der Reaktionshemmnisse	36
Bild 2-26: Konzentrationsprofil an der Phasengrenze zwischen Elektrode und Elektrolyt	37
Bild 2-27: Stromdichte-Spannungskurve einer Oberfläche mit hohem Bedeckungsgrad.....	38
Bild 2-28: modellhafte Darstellung des Schichtwachstums auf der Elektrode	39
Bild 2-29: Einfluss der Abscheideparameter auf die Gefügestruktur einer galvanischer Schicht.....	40
Bild 2-30: Abscheidung einer kugelförmigen Ausblüfung.....	40
Bild 2-31: Stromverteilung in galvanischen Zellen.....	41
Bild 2-32: Abscheiderate als Funktion der Temperatur und des ph-Wertes	44
Bild 2-33: Exemplarische Darstellung des Korrosionsverhaltens von passivierbaren Metallen.....	46
Bild 2-34: Schaubild zur Erläuterung der Unterätzung bei der Strukturierung von Leiterplatten	47
Bild 2-35: Pressen der Rohkugel aus einem Drahtstück	48
Bild 2-36: Grob- und Feinschliff der Kugeln zwischen zwei Schleiftellern.	48
Bild 2-37: Vereinfachte Darstellung des Produktionsablaufes für die Leiterplattenherstellung	49
Bild 2-38: Entwickelter Negativ-Trockenresist auf der Innenlage der Mikrovibrationssensoren.....	50
Bild 2-39: Durchkontaktierungen in verschiedenen Ausführungen.....	51
Bild 2-40: Qualitätsmerkmale von Bohrungen in Leiterplatten	52
Bild 2-41: Galvanisch hergestellte Sägeblätter nach der Produktion	53
Bild 2-42: Ermittlung der Startposition des Sägeschnittes	54
Bild 2-43: Aufbau eines Pin-Lam Pressstapels im Querschnitt (oben) und der Aufsicht (unten).....	55
Bild 2-44: Darstellung eines Kiss-Laminierzyklus nach (Combs, 2008).....	56
Bild 2-45: Funktionsweise eines Operationsverstärker in Schmitt-Trigger-Konfiguration	57
Bild 2-46: Schmitt-Trigger-Schaltung mit asymmetrischen Schaltgrenzen.....	57
Bild 2-47: Pegelgesteuerte Digitalisierung eines Eingangssignals mit Abtastfenster	58

Bild 2-48: Schaltbild zur Erkennung steigender Flanken und Signalverläufe	58
Bild 2-49: MEMS-Beschleunigungssensoren mit differenzieller, kapazitiver Auswertung.....	59
Bild 2-50: Beschleunigungssignale beim Gehen.....	60
Bild 2-51: Beschleunigungssignale beim Fahrradfahren.....	60
Bild 2-52: Beschleunigungssignale bei einer Autofahrt.....	60
Bild 2-53: Beschleunigungssignale beim Springen auf dem Trampolin.....	60
Bild 2-54: Funktionsweise eines Kugelsensors im geschlossenen, niederohmschen Zustand	62
Bild 2-55: Funktionsweise eines Kugelsensors im offenen, hochohmigen Zustand	62
Bild 2-56: Darstellung der Gewichtskraft in μN über dem Kugeldurchmesser in mm	62
Bild 2-57: Zeit in ms über der Beschleunigung in g für das Zurücklegen einer Distanz von 200 μm ..	62
Bild 2-58: Bauform und Schnitt durch einen Becher- Kugelsensor	63
Bild 2-59: Aufbaumethode der Kugelschalter der Fa. SignalQuest	63
Bild 2-60: Funktionsweise des Kugelschalters der Firma SignalQuest (Chou, 2008)	63
Bild 2-61: präventive und detektierende Qualitätssicherungsmaßnahmen	64
Bild 3-1: Designüberlegungen für planare Sensorkonzepte	67
Bild 3-2: Explosionszeichnung eines Mikrovibrationsschalters in Plattenbauweise	67
Bild 3-3: Schematische Darstellung eines „Donut“-Sensors.....	68
Bild 3-4: Darstellung des Kippwinkels eines „Donut“-Sensors	68
Bild 3-5: Verhältnis der Rollkraft eines "Donut"-Sensors zu einem Standardsensor.....	69
Bild 3-6: Aufbau der Bodenplatte eines intelligenten Mikrovibrationssensors.....	70
Bild 3-7: Aufbaumethode zur Herstellung intelligenter Mikrovibrationssensoren	70
Bild 3-8: Intelligenter und herkömmlicher Mikrovibrationssensor (unten)	71
Bild 3-9: Ermittlung der Empfindlichkeit von Mikrovibrationssensoren.....	72
Bild 3-10: Sensorsignal eines „Standard-Sensors bei leichter Anregung.....	72
Bild 3-11: Sensorsignal eines „Donut-Sensors“ bei leichter Anregung	72
Bild 3-12: Bestromung eines Mikrovibrationssensors mit zwei Ampere.....	73
Bild 3-13: Schaltbild eines Mikrovibrationssensorsystems mit Mosfet.....	74
Bild 3-14: Steuer- und Ausgangssignal eines Mikrovibrationssensorsystems mit Mosfet	74
Bild 3-15: Mikrovibrationssensorsystem mit retriggerbarem Multivibrator	75
Bild 3-16: Mikrovibrationssensorsystem mit einem PIC12LF1822-Mikrocontroller.....	76
Bild 3-17: Optimiertes elektronisches Auswertekonzept für Testsysteme	77
Bild 3-18: Gemittelte Pulszahl über 20.000 Entwicklungssensoren	78
Bild 3-19: Verteilung der On_{Ratio} über 20.000 Entwicklungssensoren (gemittelt)	78
Bild 3-20: Klassifizierung der Sensoren mithilfe einer Beurteilungsmatrix	78
Bild 4-1: Entwurfsmethodik für die Produktionsdatenerzeugung	80
Bild 4-2: Schnittbild des Lagenaufbaus eines Vibrationssensors.....	82
Bild 4-3: Anordnung der Sensoren im Wafer und Nutzen	82
Bild 4-4: Einbaulage eines stehenden, 90° um die Längsachse gedrehten Sensors	83
Bild 4-5: Bilderkennung eines Vibrationssensors auf der DataCon-Evo	83
Bild 4-6: Leiterbild der Kammerunterseite und der Bodenplatte	84
Bild 4-7: Ausdehnungsverhalten für verschiedene Basismaterialien über der Temperatur	86
Bild 4-8: Mikroskopaufnahmen von Sensoren, die mit Noflow-Prepregs aufgebaut wurden.....	87
Bild 4-9: Darstellung einer schwachen Nagelkopfbildung.....	89
Bild 4-10: Faserausriss in einer Durchkontaktierung mit einer unkritischen Tiefe von 18 μm	89
Bild 4-11: Montageautomat zum Auflaminieren der Wafer auf die Sägefolie	90
Bild 4-12: Mikroskopaufnahme von Sensoren nach dem Sägen auf der Sägefolie	91
Bild 4-13: Effekt des Dressens eines Sägeblattes.....	91
Bild 4-14: Vollständig aufgebauter und gesägter Wafer auf der Folie im Waferring	91
Bild 4-15: UV-LED Lichtquelle mit digital regelbarer Stromquelle (20-100 Watt).....	92
Bild 4-16: Graphitbedeckung der Leiterplatte vor der Herstellung der Durchkontaktierung.....	93
Bild 4-17: Graphitbedeckung der Leiterplatte nach dem Mikroätzschritt.....	93

Bild 4-18: Unterätzung einer Leiterplatte mit Ni-Au Schichten nach dem Mikroätzschritt	94
Bild 4-19: Simulierte Stromdichte für die galvanische Verkupferung der Kammern.....	95
Bild 4-20: Delamination der Kammer- und Deckelplatte	95
Bild 4-21: Schnitt durch eine Kammerbohrung mit homogenem Kupferaufbau	96
Bild 4-22: Galvanische Beschichtung von Mikrokugeln in einem sulfidischen Goldbad	97
Bild 4-23: Darstellung des Schaltverhaltens von Mikrokugeln aus neuen Goldbädern.....	97
Bild 4-24: Galvanoresist zum Schutz der Kupfers vor der chemischen Metallisierung.....	99
Bild 4-25: Metallspan auf Bodenpad.....	100
Bild 4-26: Spülverschleppung in der Kammer	100
Bild 4-27: Kunststoffpartikel auf Bodenpad	100
Bild 4-28: Spülverschleppung auf Deckelpad.....	100
Bild 4-29: VE-Druckspülautomat zur Entfernung von Partikeln von den Leiterplatten	101
Bild 4-30: Vakuum-Trockenschrank mit 30 Einlegeböden und Temperaturregelung	101
Bild 4-31: Schematische Darstellung des Reaktionsablaufs im Sauerstoffplasma	101
Bild 4-32: Niederdruck-Plasmareinigungsanlage mit vier Prozessgasen O ₂ , CF ₄ , Ar-H ₂ , N ₂	102
Bild 4-33: Ungleichmäßiger Klebstoffaufdruck infolge defekter und schlecht tarierter Rakel	103
Bild 4-34: Versatz der Boden- zur Kammerplatte.....	104
Bild 4-35: Aufbau des Pressstapels für das Laminieren der Vibrationssensoren.....	104
Bild 4-36: Laminierprozess für die Vibrationssensoren mit acrylatischem Kleber	105
Bild 4-37: Befüllung der Kugeln im Schütt- und Rakelprozess	105
Bild 4-38: Prozess zur Anbindung der sensorischen Flächen an die Außenkontakte	106
Bild 4-39: Versatz der äußeren Durchkontaktierungen zur Kammerbohrung.....	106
Bild 4-40: Verpackung der Sensoren im Gurt auf der Rolle	107
Bild 4-41: Konstruktionszeichnung des Trays zur Aufnahme der um 90° gedrehten Sensoren	107
Bild 4-42: Reale Umsetzung des Trays	107
Bild 4-43: Bodengruppe vor der Bestückung der Mikrocontroller in ungehäuseter Chipform.....	108
Bild 4-44: Gold-Stud-Bumps, auf einem PIC12LF1822-Mikrocontroller	109
Bild 4-45: Ausbildung einer leitfähigen Brücke mit anisotropem Klebstoff	109
Bild 4-46: Röntgenbild der Chip-Trägerplatte mit Flip-Chip	110
Bild 5-1: Ablauf der Herstellprozesse für Mikrovibrationssensoren.....	113
Bild 5-2: Lötprofil für bleifreie Lote mit einer Liquidustemperatur von 220 °C	113
Bild 5-3: Testkompatible Sensoranordnungen auf dem Wafer	117
Bild 5-4: Auswertekonzept (VT-I) für den elektrischen Funktionstest.....	118
Bild 5-5: Konstruktionsdarstellung des elektrischen Funktionstestplatzes <i>ElFuTe</i>	120
Bild 5-6: Erläuterung des Testkonzepts - Ausrichtung des Wafers im Raum.....	120
Bild 5-7: mechatronische Implementierung des Testplatzes der dritten Generation.....	121
Bild 5-8: Vereinfachter Ablaufplan des sektoriellen Tests der Sensoren.....	121
Bild 5-9: Antriebselektronik für die Steuerung des Testplatzes <i>ElFuTe</i>	122
Bild 5-10: Blockschaltbild des Ansteuersystems für den Testplatz <i>ElFuTe</i>	122
Bild 5-11: Nadeladapter zur gleichzeitigen Kontaktierung aller Sensoren auf dem Wafer	123
Bild 5-12: Auswertekonzept <i>ElFuTe</i> zur parallelen Prüfung der Sensoren auf dem Wafer.....	123
Bild 5-13: Oszilloskopaufnahme des Schaltverhaltens eines Vibrationssensors	124
Bild 5-14: Schematische Darstellung des Datenbankenkonzeptes.....	124
Bild 5-15: Bestückautomat zum Sortieren von Dies bzw. der Mikrovibrationssensoren.....	125
Bild 5-16: Testplatz zur Überprüfung der mechanischen Belastbarkeit der Vibrationssensoren.....	125
Bild 5-17: Mechanische Belastbarkeit von Mikrovibrationssensoren.....	126
Bild 5-18: Konstruktionsdarstellung des Kugel-Platten-Testplatzes <i>KuPlaTe</i>	127
Bild 5-19: Kugel in der Schnelltesteinrichtung <i>KuPlaTe</i>	127
Bild 5-20: Signal der Feingoldkugel	127
Bild 5-21: Signal der Hartgoldkugel.	127
Bild 6-1: Flüssigkeitsreste in der Kammer.....	128

Bild 6-2: Dendritenwachstum	128
Bild 6-3: Darstellung der Blackbox für den Fehlerfall „elektrisch funktionsunfähiger Sensor“.....	129
Bild 6-4: Fertigungsablauf für Mikrovibrationssensoren mit Halbzeugprüfung „Kugel-Plattentest“.	131
Bild 6-5: Fehlerhafte Durchkontaktierung	131
Bild 6-6: Restgasanalyse einer getemperten Leiterplatte, die im UHV auf 240°C erhitzt wurde	133
Bild 6-7: Restgasanalyse des Klebers LF200.....	134
Bild 6-8: Mikroskopaufnahme von einem Schliff einer Kammer.....	135
Bild 6-9: FIB-SEM-Aufnahme durch eine ENEPIG-beschichtete Kammer.....	135
Bild 6-10: Teststreifen zur Charakterisierung galvanisch abgeschiedener Hartgoldschichten	136
Bild 6-11: Darstellung der atomaren Konzentration über der Abtragszeit nach der Herstellung.....	136
Bild 6-12: Darstellung der atomaren Konzentration nach fünfminütiger Lagerung bei 300 °C	136
Bild 6-13: Schaltverhaltens von Sensoren mit einer Hartgoldschicht nach thermischer Lagerung	137
Bild 6-14: REM-Bild einer thermisch ausgelagerten Kugel mit EDX-Analyse.....	138
Bild 6-15: Wildabscheidungen aus einem ENEPIG-Prozess	138
Bild 6-16: REM-Aufnahme einer ENEPIG-Schicht mit Poren- und Rissbildung	139
Bild 6-17: Edelmetallschicht auf der Kugel.....	139
Bild 6-18: ENEPIG-Schicht mit gestörtem Ni-Aufbau und Immersionsgold.....	139
Bild 6-19: ENEPIG Schicht mit reduktiv unterstützter Goldabscheidung.....	139
Bild 6-20: REM und optische Aufnahme eines Bodenkontaktes mit gestörter ENEPIG-Schicht	140
Bild 6-21: REM und überlagerte EDX-Analyse der Schicht - Sauerstoff.....	140
Bild 6-22: REM-Aufnahme und überlagerte EDX-Analyse der Schicht - Palladium.....	140
Bild 6-23: XPS-Übersichtsspektrum der Oberfläche	140
Bild 6-24: XPS-Tiefenprofil.....	140

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1: Forschungsaktivitäten zur Einbettung funktionaler Schichten in Leiterplatten	2
Tabelle 2-1: Materialien und Grenzwerte der in der RoHS erfassten Substanzen (EU-RoHS, 2011)	8
Tabelle 2-2: Kenndaten von Stählen für Mikrokugeln (DIT Holland B.V., 2012)	10
Tabelle 2-3: Übersicht über gängige Leiterplattenmaterialien	11
Tabelle 2-4: Glasgewebearten für die Leiterplattenherstellung (Nittobo, 2011).....	15
Tabelle 2-5: NoFlow-Prepregs und Kleber	17
Tabelle 2-6: Auflagefläche einer Edelmetallkugel mit Stahlkern auf einer ideal glatten Fläche	21
Tabelle 2-7: Engwiderstand für verschiedene Materialien und Kontaktradien	23
Tabelle 2-8: Übersicht über die Standardpotenziale einiger Metalle (Gaida, 1999)	32
Tabelle 2-9: Stabilitätskonstanten komplex gebundener Metalle (Thermo Scientific, 2003).	42
Tabelle 2-10: Kugelspezifikationen für den Aufbau von Mikrovibrationssensoren	47
Tabelle 2-11: Sägeblattempfehlung (LEL Diamond Tools International, Inc., 2009)	52
Tabelle 2-12: Genauigkeitsanforderungen an Bewegungssensoren.....	59
Tabelle 2-13: Marktübersicht über einige Kugelsensoren und spezifischer Eigenschaften	64
Tabelle 3-1: Stromtragfähigkeit elektrischer Kontakte (Brümmer, 1980)	73
Tabelle 4-1: Methodik zur Herstellung der Produktionsdaten für Mikrovibrationssensoren.....	80
Tabelle 4-2: Evaluerte Leiterplattenmaterialien zum Aufbau von Mikrovibrationssensoren	86
Tabelle 4-3: Evaluierten Folientypen (Lintec of America, Inc.)	90
Tabelle 4-4: Lagerbedingungen bei verschiedenen MSL-Stufen	108
Tabelle 5-1: Klimaprüfvorschriften für den Test von Vibrationssensoren.....	115
Tabelle 5-2: Mechanischen Prüfvorschriften für die Mikrovibrationssensoren	116
Tabelle 5-3: Anforderungskatalog an den verbesserten elektrischen Funktionstest	119
Tabelle 6-1: Übersicht über externe Prozesse und Risikobeurteilung.....	130

Tabelle 6-2: Methoden der Oberflächenanalytik zur Optimierung der Vibrationssensoren	132
Tabelle 6-3: Testbedingungen und Materialien der im Restgasanalysator geprüften Proben	133