
Untersuchungen der Kontakt- eigenschaften beim Testen von integrierten Schaltungen

Markus Reinl



Cuvillier Verlag Göttingen
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag

UNIVERSITÄT DER BUNDESWEHR MÜNCHEN
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

Untersuchungen der Kontakteigenschaften beim Testen von integrierten Schaltungen

Markus Reinl

Vorsitzender des Promotionsausschusses: Prof. Dr.-Ing. C. Jungemann
1. Berichterstatter: Prof. Dr. rer. nat. I. Eisele
2. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. habil. H. Baumgärtner

Tag der Einreichung: 23.06.2008
Tag der Prüfung: 04.12.2008

Mit der Promotion erlangter akademischer Grad:
Doktor-Ingenieur
(Dr.-Ing.)

München, 13. Januar 2009

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2009

Zugl.: München, Univ. der Bundeswehr, Diss., 2009

978-3-86727-867-6

Der Druck der Arbeit wurde durch Haushaltsmittel der Universität der Bundeswehr München gefördert.

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2009

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2009

Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-86727-867-6

Meinen Eltern

Zusammenfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit den Kontakteigenschaften beim Testen von integrierten Schaltungen. Der Schwerpunkt liegt darauf, ein besseres Verständnis für die Mechanismen und physikalischen Eigenschaften des elektrischen und mechanischen Kontaktes zwischen den Probing-Nadeln und den Pads zu erhalten. Entscheidend dabei ist der Zusammenhang zwischen elektrischem Kontaktwiderstand und den auftretenden mechanischen Kräften. Um die einwirkenden Kräfte, in normaler und lateraler Richtung, und den elektrischen Widerstand in situ und unter Echtzeitbedingungen zu messen, ist ein spezieller Messplatz entwickelt und aufgebaut worden.

Durch die stetige Erhöhung der Integrationsdichte werden bei aktuellen Produkttechnologien die Probing Pads über aktives Schaltungsgebiet gelegt, um weitere Chipfläche einzusparen. Dadurch kommt es vermehrt zu Ausfällen der getesteten Schaltungen, da die Isolationsschichten zwischen den Metallisierungsebenen aufgrund des Kräfteintrages durch die Probing-Nadeln mechanisch zerstört werden. Eine Reduzierung der einwirkenden Kräfte bedingt in der Regel eine Verschlechterung des elektrischen Kontaktwiderstandes. Mit dem in dieser Arbeit entwickelten Messplatz wird der Zusammenhang zwischen mechanischen und elektrischen Kontakteigenschaften untersucht. Dabei hat sich herausgestellt, dass das natürliche Aluminiumoxid auf den Probing Pads nicht den alleinigen Grund für eine Verschlechterung des Kontaktwiderstandes darstellt, wie häufig in Veröffentlichungen nachzulesen. Die Messungen haben gezeigt, dass auf Aluminium ein vergleichbarer elektrischer Kontaktwiderstand wie auf Gold erreicht werden kann. Jedoch sind die auftretenden Kräfte bei gleichen Bedingungen auf Aluminium höher. Mit dem Ziel, den Kräfteintrag bei gleich bleibendem Widerstand zu reduzieren, sind verschiedene Reinigungsverfahren zur Entfernung der Aluminiumoxidschicht evaluiert worden. Dabei zeigte sich, dass eine Entfernung des Oxides mit den untersuchten Verfahren nur schwer möglich ist. Ferner haben Messungen gezeigt, dass durch eine Entfernung des Oxides und anschließende "saubere" Oxidation keine Verbesserung der Kontakteigenschaften erzielt werden kann.

Untersuchungen von Wafern aus der industriellen IC-Produktion haben verdeutlicht, dass aufgrund des Herstellungsprozesses mit zusätzlichen Kontaminationen auf der Padoberfläche zu rechnen ist. Entsprechende XPS-Analysen veranschaulichen, dass ein erheblicher Anteil an Fluorkontaminationen auf der Oberfläche zu finden ist. In Verbindung mit den durchgeführten Probing-Versuchen zur Bestimmung der Parameter, Kontaktwiderstand und Kraft, kann ein direkter Zusammenhang zwischen Fluorkontaminationen und elektrischem Kontaktwiderstand hergestellt werden. Durch die Kontaminationen bildet sich eine isolierende Schicht zwischen Probing-Nadel und Padoberfläche, was zu einem gravierenden Anstieg

des Widerstandes führt. Die Betrachtung der theoretischen Beschreibung des elektrischen Kontaktwiderstandes bestätigt die experimentell erzielten Ergebnisse. Der Widerstandswert wird hauptsächlich durch das Vorhandensein von Verunreinigungen auf der Oberfläche beeinflusst. Aus diesem Grund beschäftigt sich die Arbeit im Weiteren mit möglichen Verfahren zur Entfernung der Kontaminationen.

Ausgehend von den durchgeführten Untersuchungen werden sowohl trockenchemische Plasmaprozesse wie auch nasschemische Prozesse näher betrachtet. Eine Möglichkeit stellt die Zugabe von Wasserstoff direkt zu dem Fluorplasma dar, durch das die Verunreinigungen verursacht werden. Die Wafer werden praktisch während der Prozessierung einem in situ HF-Dip unterzogen, wodurch die Kontaminationen verringert werden und somit eine Verbesserung des Kontaktwiderstandes erzielt wird. Die nachträgliche Behandlung von verunreinigten Proben durch ein Sauerstoffplasma führt zu einer Verbesserung der Kontakteigenschaften, da die Fluorkontaminationen reduziert werden. Zusätzliche Experimente mit einem reinen Wasserstoffplasma zeigen ebenfalls gute Ergebnisse hinsichtlich einer Verbesserung der Probing-Eigenschaften. Durch die nasschemische Reinigung mit Tetrachlorethylen kann ebenfalls eine Verbesserung des Kontaktwiderstandes realisiert werden, jedoch bei ansteigenden Kräften.

Die in dieser Arbeit zusammengefassten Ergebnisse zeigen deutlich, dass ein direkter Zusammenhang zwischen Verschlechterung der Kontakteigenschaften und Fluorkontaminationen besteht. Mit den untersuchten Reinigungsverfahren können diese entfernt und eine Verbesserung der Performance beim Probing erzielt werden.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik	5
2.1	Testequipment	8
2.2	Testkartentechnologien	8
2.2.1	Cantilever-Karten	9
2.2.2	Vertikale Karten	10
2.2.3	Membran-Karten	11
2.3	Aufbau der Probing Pads	12
2.4	Probing	15
2.4.1	Oberflächenbeschädigungen beim Probing	17
2.5	Probing over active area	18
2.5.1	Mögliche Ausfälle bzw. Beschädigungen	19
2.6	Fazit	23
3	Aufbau Messplatz	25
3.1	Aktuelle Messplätze	26
3.2	Probe Force Investigation Tool	27
3.2.1	Mechanischer Aufbau	28
3.2.2	Auswahl der einzelnen Komponenten	29
3.2.3	Steuerung des Messplatzes	37
3.2.4	Standardmessnadel	38
4	Theorie des Kontaktwiderstandes	41
4.1	Der Engewiderstand	43
4.1.1	Mittlere freie Weglänge der Elektronen	46
4.2	Der Fremdschichtwiderstand	49
4.3	Der resultierende Kontaktwiderstand	49

5	Einfluss des natürlichen Metalloxides auf das Probing-Verhalten	55
5.1	Probenherstellung	55
5.1.1	Substratreinigung	55
5.1.2	Schichtabscheidung	56
5.2	Messungen auf unterschiedlichen Materialsystemen	57
5.2.1	Messung auf Gold	57
5.2.2	Messung auf Aluminium	65
5.2.3	Unterschiede zwischen den Materialsystemen	67
5.3	Untersuchungen zu mechanischen Beschädigungen der Pads	70
5.4	Verfahren zur Reinigung von Aluminiumoberflächen	73
5.4.1	Wasserstoffradikale	73
5.4.2	Argon/Wasserstoffplasma	76
5.4.3	Nasschemische Reinigung mit Kieselsäure	83
5.5	Fazit	87
6	Einfluss von Verunreinigungen	89
6.1	Prozessablauf der Padherstellung	89
6.2	Untersuchungen zu Fluorverunreinigungen	92
6.2.1	Aluminiumoberfläche	92
6.2.2	Nadelspitze	96
6.3	Mechanische und elektrische Unterschiede	99
6.4	Konsequenzen der Fluorverunreinigungen	101
6.4.1	Neudefinition des Problems	102
7	Reinigungsverfahren zur Entfernung von Fluor	103
7.1	Trockenchemische Reinigungsverfahren	103
7.1.1	Fluorplasma unter Zugabe von Wasserstoff	103
7.1.2	Wasserstoffplasma	108
7.1.3	Sauerstoffplasma	114
7.2	Nasschemische Reinigungsverfahren	117
7.2.1	Tetrachlorethylen (PER)	117
7.3	Fazit der Reinigungsverfahren	122
8	Zusammenfassung und Ausblick	125
A	Konstruktionszeichnungen	129

B	Prozessparameter	132
C	LabView Steuerung des Messplatzes	133
	C.1 Beispielhaftes LabView Macro	133
	C.2 Flussdiagramm einer Messung	135
	Abbildungsverzeichnis	143
	Literaturverzeichnis	152
	Publikationen	153
	Danksagung	155

Kapitel 1

Einleitung

Immer mehr elektronische Geräte kommen im täglichen Leben zum Einsatz. Die rasante Entwicklung lässt sich am Beispiel der Telekommunikation gut erkennen. Werden die ersten Generationen an mobilen Telefongeräten mit den heutigen Geräten verglichen, sind nicht nur bei Größe und Gewicht, sondern auch im Funktionsumfang erhebliche Unterschiede zu erkennen. Die Geräte werden mit jeder Generation immer leistungsfähiger. Diese Entwicklung ist auf dem gesamten Bereich der Anwenderelektronik zu erkennen. Die Ursache dafür ist, dass die integrierten Schaltkreise¹ immer komplexer werden und mehr Transistoren pro Schaltung zum Einsatz kommen. Um dabei die voranschreitende Verkleinerung der Geräte erreichen zu können, müssen die Strukturgrößen der einzelnen Transistoren kontinuierlich reduziert werden.

Bereits im Jahre 1965 machte *Gordon E. Moore*, Mitbegründer von Intel, die Beobachtung, dass sich die Anzahl der Transistoren pro Fläche seit Erfindung des integrierten Schaltkreises jährlich verdoppelt hat [1]. In seiner Veröffentlichung, die später als "Moore'sche Gesetz" bekannt wurde, machte er die Aussage, dass dieser Trend die nächsten zehn Jahre anhalten wird. Dieser Trend hat sich jedoch abgeschwächt und wurde 1975 auf eine Verdoppelung der Transistoren alle 24 Monate korrigiert. Das "Moore'sche Gesetz" wird aktuell in leicht abgeänderter Form ausgelegt. Heute wird von einer Verdoppelung der Integrationsdichte alle 18 Monate gesprochen. Diese Aussage stammt jedoch nicht von *Moore*, sondern von einem Intel-Mitarbeiter. Das "Moore'sche Gesetz" besitzt heute noch seine Gültigkeit und diese wird auch für die kommenden Jahre prognostiziert.

Basierend auf dem "Moore'schen Gesetz" wird die *International Technology Roadmap for Semiconductors*² von einem Gremium aus Experten der Halbleiterindustrie erstellt [2]. Diese gibt vor, welche Maßnahmen ergriffen werden müssen, um mit den kommenden Produkttechnologien das "Moore'sche Gesetz" einzuhalten. Sowohl Halbleiterhersteller, als auch die Hersteller von Produktionsanlagen der Halbleiterindustrie halten sich an diese Roadmap. Speziell bei den Strukturgrößen wird man in absehbarer Zeit an technologische, aber vor allem an physikalische Grenzen stoßen, ab denen eine weitere Strukturverkleinerung mit den jetzigen Transistor-konzepten nicht mehr sinnvoll ist.

¹engl. integrated circuit (IC)

²kurz: ITRS

Eine Verkleinerung der Strukturgrößen ist immer mit einem immensen Investitionsvolumen für neue Fertigungsanlagen, speziell in der Lithographie, verbunden. Aus diesem Grund wird bereits das Design der Chips dahingehend optimiert, dass die Fläche pro Chip möglichst minimiert und effektiv genutzt wird. Bei bisherigen Produkttechnologien wird die Fläche unter den sog. "Probing Pads" nicht für aktive Strukturen benutzt. Als "Probing" wird das Testen der einzelnen Chips mittels einer Testkarte³ bezeichnet. Die "Probing Pads" dienen als Kontaktflächen zur Testkarte und sind an den Rändern der Chipoberfläche angeordnet. Diese Positionierung der Pads bedeutet einen höheren Platzbedarf pro Chip und somit einen geringeren Gewinn, da die Kosten pro Fläche Silizium, unabhängig von der zum Einsatz gebrachten Wafergröße, als nahezu konstant angesehen werden können [3,4]. Um die benötigte Fläche bei aktuellen Technologien zu reduzieren, werden die Probing Pads direkt über aktiven Strukturen angeordnet.

Das Hauptproblem beim Testen über aktivem Schaltungsgebiet⁴ ist der Krafteintrag in die Schichten unter den Probing Pads. Durch diesen Krafteintrag können die Schichten darunter beschädigt werden, was zum sofortigen oder verzögerten Ausfall des ganzen Chips führen kann. Die Nadelkarten stellen die am häufigsten verwendete Testkartenart dar. Bei diesem Typ wird der elektrische Kontakt zur Padoberfläche mittels Testnadeln hergestellt. Dabei lässt sich eine starke mechanische Deformation der Oberfläche feststellen. In Abbildung 1.1 ist eine REM⁵-Aufnahme eines Abdrucks einer Nadelkarte, verursacht durch das Probing, zu sehen.

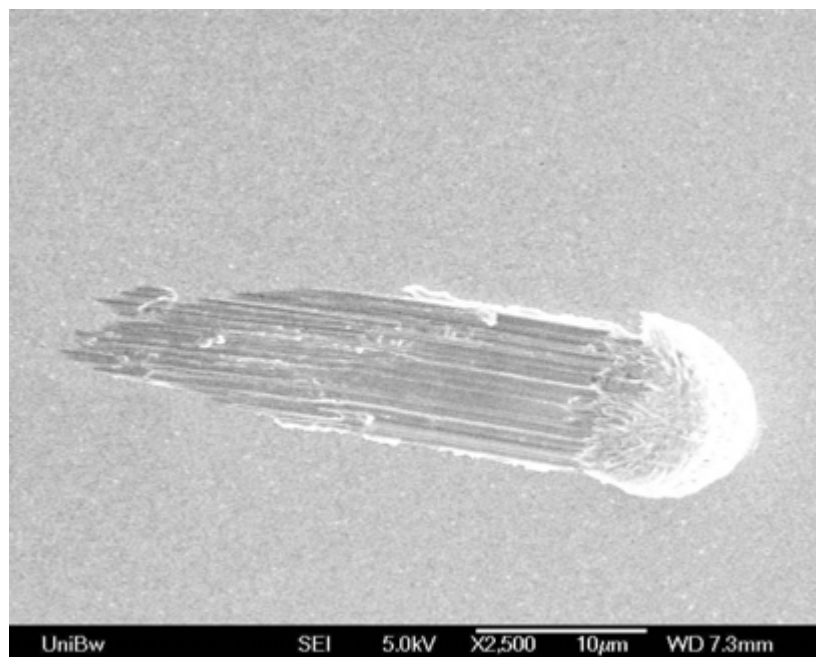


Abbildung 1.1: REM-Aufnahme des Abdrucks einer Nadelkarte auf einer Aluminiumoberfläche nach dem Probing.

Um den Mechanismus, der zum Ausfall der Chips beim POAA führt, zu verstehen, muss zuerst die Kontaktphysik zwischen Testnadel und Padoberfläche ver-

³engl. probe card

⁴engl. probing over active area (POAA)

⁵Abk. für Rasterelektronenmikroskop, engl. scanning electron microscopy (SEM)

standen werden. Zu diesem Zweck werden die einwirkenden mechanischen Kräfte zwischen Nadel und Padoberfläche in Abhängigkeit vom elektrischen Widerstand genauer untersucht.

Im Rahmen der vorgelegten Arbeit wird ein entsprechender Messplatz entwickelt, mit dessen Hilfe die relevanten Parameter, wie die Kontaktkräfte – lateral und normal – und der elektrische Widerstand, während des Probing mittels einer einzelnen Nadel gemessen werden können. Mit Hilfe dieses Messplatzes werden Messungen auf unterschiedlichen Materialsystemen angefertigt. Aus den Ergebnissen können Schlussfolgerungen bezüglich der Probleme beim Probing gezogen werden. Zusätzlich werden Reinigungsverfahren vorgestellt, die die Performance des Probing verbessern. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf der industriellen Nutzbarkeit dieser Reinigungsprozesse.

Kapitel 2 gibt zunächst einen Überblick über den Aufbau von Probing Pads und geht auf die möglichen Probleme und Ausfallmechanismen beim POAA ein und erläutert diese. Dabei wird die Notwendigkeit für einen eigenständigen Messplatz zur Messung der einwirkenden Kräfte und des elektrischen Widerstandes aufgezeigt.

Mit dem Aufbau des Messplatzes beschäftigt sich **Kapitel 3**. Die einzelnen Vorteile der entwickelten Variante im Vergleich zu bestehenden Messplätzen werden erläutert. Dadurch kann eine genauere Nachbildung des Probing – wie es in der Industrie vollzogen wird – erreicht werden.

In **Kapitel 4** wird auf die Theorie des elektrischen Kontaktwiderstandes eingegangen und dieser näher betrachtet. Dadurch lassen sich die Messergebnisse, vorgestellt in **Kapitel 5**, besser einordnen. Es werden Untersuchungen präsentiert, die den Einfluss des natürlichen Metalloxides auf den elektrischen Kontaktwiderstand verdeutlichen. Reinigungsverfahren mit Wasserstoff und deren Auswirkungen auf die Performance beim Probing werden näher erläutert. Durch die Untersuchungen zeigt sich, dass das natürliche Metalloxid nicht der alleinige Grund für einen schlechten Kontaktwiderstand ist. Deshalb wird in **Kapitel 6** der Einfluss von Verunreinigungen auf der Padoberfläche untersucht. Diese entstehen aufgrund des Prozessablaufs und haben einen höheren elektrischen Kontaktwiderstand und eine höhere mechanische Krafteinwirkung zur Folge.

In **Kapitel 7** werden mehrere mögliche Reinigungsverfahren hinsichtlich der Entfernung der Verunreinigungen auf der Padoberfläche untersucht. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Entfernung von Fluorkontaminationen und der Evaluierung eines möglichst industrietauglichen Reinigungsverfahrens.

Eine Zusammenfassung und ein Ausblick wird in **Kapitel 8** gegeben. Dabei wird auf mögliche weitere Untersuchungen eingegangen.

Kapitel 2

Stand der Technik

Die Produktion von integrierten Schaltungen für den Massenmarkt ist durch den großen Bedarf an Hightech-Fertigungsanlagen und der benötigten Infrastruktur sehr kostenintensiv. Um am Markt wirtschaftlich agieren zu können, versuchen die Halbleiterhersteller permanent die Produktionskosten möglichst gering zu halten bzw. durch Einführung neuer Technologien weiter zu reduzieren. Dies geschieht hauptsächlich im FEOL⁶ bzw. BEOL⁷, da es sich hierbei um die kostenintensivsten Bereiche bei der Herstellung von integrierten Schaltungen handelt. Als FEOL wird der Bereich der Produktion bezeichnet, in dem die unteren Strukturierungsebenen auf dem Wafer entstehen, welche die Funktionsblöcke aus Dioden, Transistoren und passiven Bauelementen der Schaltung enthalten. Im BEOL werden die einzelnen Verdrahtungsebenen der Schaltung erzeugt und somit die Bauelemente zu Funktionsblöcken miteinander verbunden. Das BEOL endet mit der Abscheidung einer Passivierungsschicht auf der Oberfläche des Wafers.

Der darauf folgende Teil der Herstellung wird als Back-end bezeichnet. Dieser beinhaltet das Testen der auf dem gesamten Wafer befindlichen Schaltungen, Sägen der Wafer in die einzelnen Rohchips⁸ und die Aufbau- und Verbindungstechnik⁹. Nach dem Packaging werden die fertigen Chips noch einmal geprüft, um mögliche Beschädigungen während des Prozesses zu entdecken und die fehlerhaften Chips auszusortieren. In diesem Bereich wird ebenfalls verstärkt versucht, Kosten einzusparen.

Einen wichtigen Schritt im Back-end stellt das Testen der vollständig prozessierten Wafer dar, das im Englischen als "Probing" bezeichnet wird. Wie sich an dem Auszug aus der IRTS in Abbildung 2.1 erkennen lässt, wird in den kommenden Jahren die Anzahl der Anschlüsse¹⁰ pro Chip weiter steigen. Die Kosten für das Packaging pro Pin werden demgegenüber im gleichen Maß fallen. Die Kosten pro Chip können folglich als konstant betrachtet werden. Da die Anzahl der Pins pro Chip immer weiter steigt, nimmt automatisch die Ausfallwahrscheinlichkeit aufgrund von Beschädigungen beim Testen zu. Daher ist es um so wichtiger, fehlerhafte Schal-

⁶engl. front-end-of-line

⁷engl. back-end-of-line

⁸engl. die

⁹engl. packaging

¹⁰engl. pin

tungen noch vor dem Vereinzeln der Wafer und dem Packaging zu identifizieren und auszusondern.

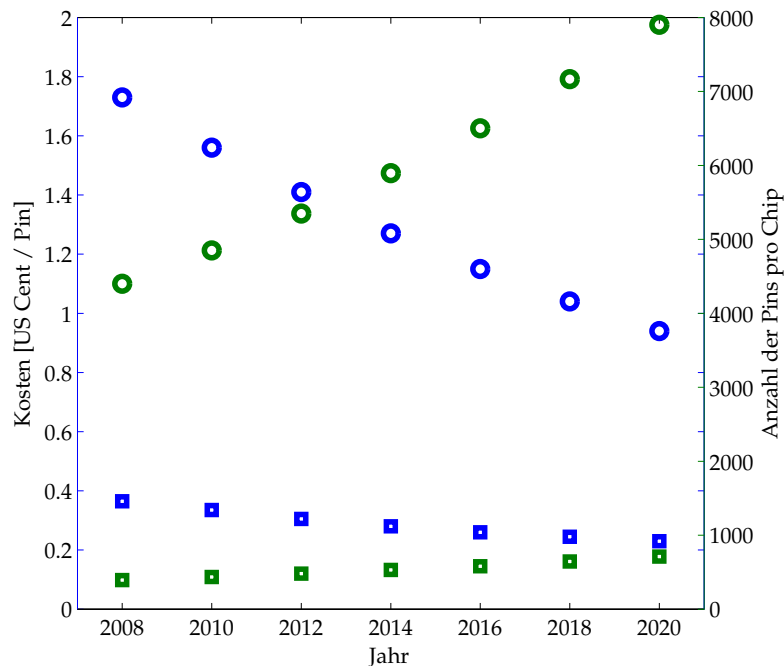


Abbildung 2.1: Daten aus der ITRS über die Kosten für das Packaging pro Pin (linke Skala - blau) bzw. die Anzahl der Pins pro Chip (rechte Skala - dunkelgrün). Exemplarisch sind die Daten für Low-cost Produkte (Quadrate) und für High-performance Produkte (Kreise) dargestellt [2].

Um die einzelnen Schaltungen zur Überprüfung ihrer Funktionsfähigkeit elektrisch kontaktieren zu können, werden sog. Testkarten¹¹ eingesetzt. Es gibt unterschiedliche Typen von Testkarten, die zum Einsatz kommen, beispielsweise Nadelkarten, Membran-Karten oder Microspring-Karten. Die einzelnen Kartentechnologien werden in Abschnitt 2.2 vorgestellt. Im Weiteren werden nur die Cantilever-Karten, die eine Variante der Nadelkarten darstellen, betrachtet. Dieser Kartentyp ist in der industriellen Produktion sehr weit verbreitet, da die Karten kostengünstig herzustellen und leicht zu warten sind [5,6]. Der elektrische Kontakt zwischen Testkarte und Chip wird erreicht, indem die Nadeln auf die Testpads¹² aufgesetzt werden. Dazu wird der Wafer von unten gegen die Probe Card gedrückt. Die Anordnung der Nadeln ist dem entsprechenden Layout der Probing Pads angepasst.

In Abbildung 2.2 ist die Oberfläche eines bereits getesteten Wafers zu sehen. Aktuell setzt die Industrie Nadelkarten ein, die mit bis zu 25.000 Nadeln bestückt sind. Mit diesen Karten ist es ausreichend, einen 300 mm-Wafer viermal zu kontaktieren, um alle Schaltungen überprüfen zu können [7]. Die Nadelkarten stellen zwar die am weitesten verbreitete Art dar, besitzen aber mit allen anderen Kartentypen eine Gemeinsamkeit. Der elektrische Kontakt wird durch eine mechanische Kontaktierung erreicht.

¹¹engl. probe card

¹²engl. probing pad

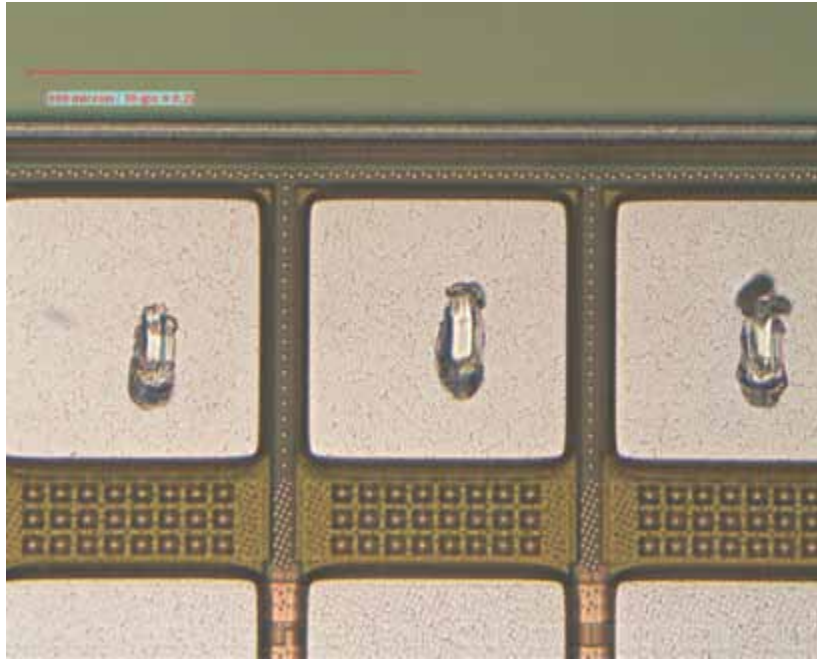


Abbildung 2.2: Lichtmikroskopische Aufnahme einzelner Probing Pads eines vollständig prozessierten Wafers.

Wie in Abbildung 2.2 zu erkennen ist, erzeugt das Probing eine Deformation der Padoberfläche, die im Englischen als “probe mark“ oder “scrub“ bezeichnet wird. Diese Verformung der Oberfläche wird durch den mechanischen Krafteintrag der Nadel erzeugt. Zusätzlich wird ein Teil dieser Kraft in die Materialschichten unter dem Pad eingeleitet und erzeugt dort mechanischen Stress. Dies kann zum Ausfall der getesteten Schaltung¹³ führen und reduziert somit die Ausbeute¹⁴ an funktionierenden Chips. Um Möglichkeiten zu finden dies zu vermeiden, müssen die Mechanismen, die hinter den Ausfällen stehen, verstanden werden. Aus diesem Grund wird in diesem Kapitel der Vorgang des Probing näher beschrieben und untersucht.

Mit der folgenden Abschätzung soll dargelegt werden, dass Probleme beim Probing nicht nur durch mechanische Belastungen verursacht werden. Eine Verschlechterung des Kontaktwiderstandes zwischen Kontaktnadel und Probing Pad kann dazu führen, dass die Schaltung nicht mehr mit einer ausreichenden Versorgungsspannung betrieben wird. Dadurch kann die getestete Schaltung den Funktionstest nicht erfolgreich absolvieren und wird als fehlerhaft aussortiert. Aktuelle ICs werden mit einer Versorgungsspannung von $V_{DD} = 1,2\text{ V}$ betrieben. Wird ein typischer Strom von $I = 100\text{ mA}$ angenommen, bedeutet ein Anstieg des Kontaktwiderstandes um $\Delta R = 1,0\ \Omega$, dass die Schaltung nur noch mit einer Spannung von $V = 1,1\text{ V}$ versorgt wird. Dies liegt außerhalb der Spezifikationen für die Variation der Versorgungsspannung, die mit $\Delta V_{DD} = +10\% / -5\%$ angegeben ist. Wie die späteren Messungen zeigen werden, ist ein Anstieg des Kontaktwiderstandes um $\Delta R = 1\ \Omega$ aufgrund von Verunreinigungen durchaus möglich. Daher ist es erfor-

¹³engl. device under test (DUT)

¹⁴engl. yield

derlich einen möglichst geringen Kontaktwiderstand zwischen Nadel und Pad zu erzielen.

Zunächst wird ein Überblick über die verwendeten Geräte beim Testen gegeben. Ferner werden der Schichtaufbau der Probing Pads näher betrachtet und mögliche Probleme aufgezeigt, die sich beim Testen über aktivem Schaltungsgebiet¹⁵ ergeben.

2.1 Testequipment

Ein vollständiges Testsystem besteht aus drei einzelnen Systemen – dem Wafer Prober, dem Testkopf und der eigentlichen Testeinheit. Häufig wird der Begriff Wafer Prober als Synonym für ein komplettes Testsystem verwendet.

- Der **Wafer Prober** übernimmt das komplette mechanische Handling der Wafer während des Testens. Dies beinhaltet den Transport der Wafer innerhalb der Testanlage auf den Wafer Chuck¹⁶, sowie dessen genaue Ausrichtung gegenüber der Testkarte, damit die Nadeln und Probing Pads genau deckungsgleich zueinander positioniert sind. Zum Testen wird der Chuck nach oben angehoben und gegen die Testkarte gedrückt, um den elektrischen Kontakt herzustellen.
- Der **Testkopf** stellt das Interface zur Testeinheit dar, in das die Testkarte eingesetzt wird. Die Aufnahme für die Karten ist dabei standardisiert, um einen einfachen Austausch der Karten zu ermöglichen. Der Testkopf dient also zur Kontaktierung der Wafer und als elektrisches Verbindungsglied zwischen Wafer und Testeinheit.
- Die **Testeinheit**¹⁷ stellt den eigentlichen Tester des Systems dar. Diese übernimmt die Ausführung der Testprogramme und die anschließende Auswertung der Messdaten bzw. -werte. Auf Grundlage dieser Messungen und der vorgegebenen Spezifikationen wird entschieden, ob eine Schaltung funktionsfähig ist oder nach dem Zersägen des Wafers aussortiert wird.

2.2 Testkartentechnologien

Testkarten werden in unterschiedlichen Varianten und Bauformen in der Industrie verwendet. Beispiele hierfür sind Cantilever- [8–11], vertikale [12–14], Membran- [15–17], MEMS- [18–20] oder Microspring-Karten [21–23]. Die Kartentypen unterscheiden sich dabei in ihren elektrischen und mechanischen Eigenschaften, wodurch sich jeweils andere Einsatzgebiete ergeben. Zusammenfassungen unterschiedlicher Testkartentechnologien sind bei *Weeden* [24] und *Mann* [25] zu finden.

¹⁵engl. probing over active area (POAA)

¹⁶Als Wafer Chuck wird eine planare Haltevorrichtung bezeichnet, die die Wafer mittels Unterdruck oder elektrostatischer Anziehung fixiert.

¹⁷engl. automatic test equipment (ATE)

Im folgenden Abschnitt wird nur eine kleine Auswahl an Kartentypen – Nadelkarten (Cantilever- & vertikale Karten) und Membran-Karten – näher beleuchtet. Der Grund ist, dass diese Typen in der Industrie am weitesten verbreitet sind und alle Untersuchungen dieser Arbeit mit Hilfe von Nadelkarten erfolgen. Speziell bei Nadelkarten ergeben sich die im Weiteren vorgestellten Probleme beim Probing over active area.

2.2.1 Cantilever-Karten

Cantilever-Karten stellen eine Variante der Nadelkarten dar. Bei diesem Kartentyp sind die Nadeln, mit denen die elektrische Kontaktierung erzielt wird, als selbsttragende Ausleger dimensioniert. Daher werden diese Karten im Englischen als "cantilever probe cards" bezeichnet. Eine Darstellung einer Cantilever-Nadel wird in Abbildung 2.3 aufgezeigt.

Diese Karten kommen hauptsächlich dann zum Einsatz, wenn eine sehr hohe Naddichte ebenso wie eine hohe Nadelanzahl erforderlich ist. Die Karten finden bei Messungen mit hohen Temperaturen oder geringem Verluststrom und mit Einschränkungen im Bereich der HF¹⁸-Messungen Verwendung.

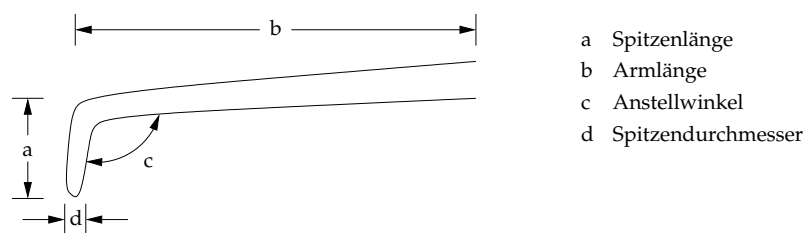


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung einer Cantilever-Nadel.

Das Grundmaterial dieses Kartentyps ist eine Leiterplatte¹⁹ aus FR4²⁰ oder einem vergleichbaren Material. Die Fixierung der Nadeln kann über einen Epoxid-Ring [10] oder über sog. Blades²¹ [24] erfolgen. In Abbildung 2.4 ist der Querschnitt einer Nadelkarte zu sehen, bei der die Befestigung der Nadeln mittels eines Epoxid-Rings erfolgt.

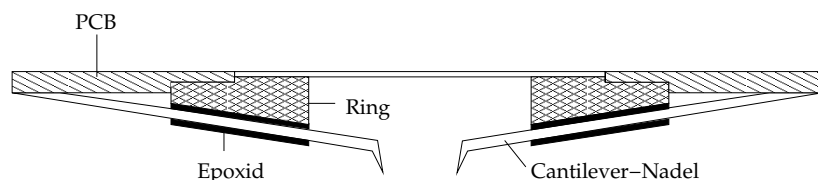


Abbildung 2.4: Querschnitt durch eine schematische Darstellung einer Epoxid-Ring-Nadelkarte.

¹⁸Abk. für Hochfrequenz

¹⁹engl. printed circuit board (PCB)

²⁰engl. flame retardant (FR), dt. flammenhämmernd, FR4 ist ein glasfaserverstärktes Epoxid

²¹dt. Schenkel, Auflageschiene

Zur Herstellung der Karten werden die einzelnen Nadeln in einem Hilfsrahmen so platziert, dass die Nadeln das Muster der Anordnung der Probing Pads der zu untersuchenden Schaltung nachbilden. Anschließend werden die Nadeln mittels Epoxidharz auf einem Keramikring oder einem Ring aus anodisiertem Aluminium befestigt. Dieser Epoxid-Ring wird anschließend in die dafür vorgesehene Aussparung in das PCB eingesetzt und dort verklebt. Die Nadelenden werden auf dem PCB angelötet, um die Kontaktierung nach außen zu ermöglichen. Bei diesem Aufbau ist ein Austausch beschädigter Nadeln sehr leicht möglich. Die Verbindung zur Testeinheit wird mittels standardisierter Stecker erreicht, um die Modularität des Gesamtsystems zu gewährleisten.

Die Nadeln der verwendeten Testkarten bestehen häufig aus einer Wolfram-Rhenium-Legierung [26]. Zur Veranschaulichung ist in Abbildung 6.8 ein EDX²²-Spektrum zu sehen, bei dem deutlich die Peaks für Wolfram und Rhenium erkennbar sind.

Blade-Karten sind eine Variante der Nadelkarten, bei denen die Fixierung der einzelnen Nadeln über Blades erfolgt. Hierbei werden die einzelnen Nadeln an einem L-förmigen Keramik-Schenkel montiert und nicht über einen Epoxid-Ring fixiert. Diese Technik kommt allerdings nur bei eher geringer Nadeldichte bzw. Nadelanzahl zum Einsatz. Abbildung 2.5 zeigt einen Querschnitt dieses Kartentyps.

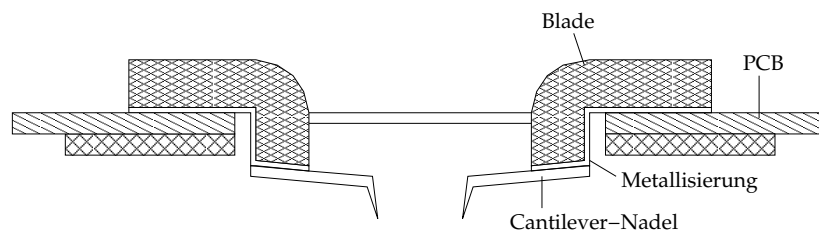


Abbildung 2.5: Schematischer Querschnitt durch eine Blade-Nadelkarte.

2.2.2 Vertikale Karten

Vertikale Karten²³ sind ebenfalls Nadelkarten und unterscheiden sich gegenüber Cantilever-Karten dadurch, dass die einzelnen Nadeln senkrecht zur Waferoberfläche angeordnet sind. Abbildung 2.6 zeigt den Aufbau der Karte. Als Grundmaterial wird hier ebenfalls ein PCB aus FR4 o. ä. eingesetzt. Die Anordnung der Nadeln im gewünschten Layout erfolgt über die beiden Führungsplatten aus Keramik. Die Nadelenden werden für die elektrische Kontaktierung zur Testeinheit mit dem PCB verlötet und mit Epoxidharz mechanisch fixiert. Zwischen den beiden Führungsebenen können sich die Nadeln beim Aufsetzen verbiegen. Die Nadelspitzen werden dadurch gleichzeitig an einer horizontalen Bewegung gehindert. Eine Abwandlung stellen vertikale Karten dar, bei denen die einzelnen Nadeln eine federartige Struktur zwischen den Führungsebenen ausweisen, um somit eine reproduzierbare Verbiegung der Nadeln zu erreichen [12]. Reparaturen sind dabei durch den Austausch der beschädigten Nadel sehr leicht möglich.

²²Abk. für engl. energy dispersive x-ray analysis, dt. energiedispersive Röntgenspektroskopie

²³engl. vertical-contact probe card (VCPC)

Der Vorteil dieser Karten im Vergleich zu Cantilever-Karten besteht darin, dass die Nadelspitze sich nur normal in das Padmaterial bohrt und keine Seitwärtsbewegung durchführt. Daraus resultieren erheblich kleinere Probe Marks, woraus sich Vorteile für die Aufbau- und Verbindungstechnik ergeben.

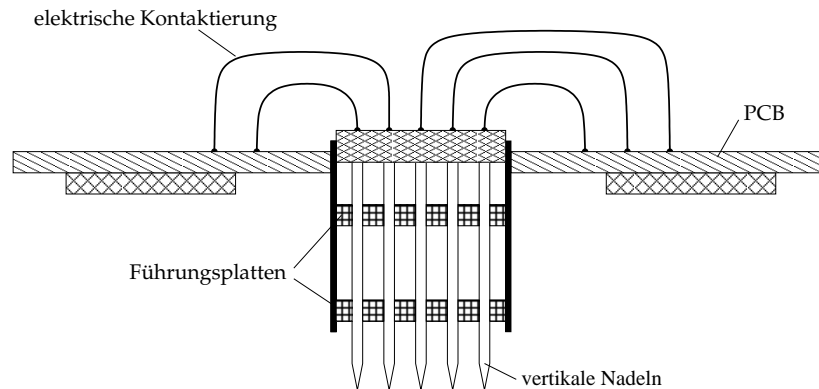


Abbildung 2.6: Schematischer Aufbau einer vertikalen Karte.

2.2.3 Membran-Karten

Nadelkarten haben gerade im Bereich der Hochfrequenzmessungen Nachteile, da es zu elektrischem Übersprechen zwischen den einzelnen Nadeln kommen kann. Außerdem sind die Nadeln sehr empfindlich, sodass insbesondere nach Reinigungsschritten Probleme der Positionsstabilität der Nadelspitzen auftreten können. Eine mögliche Alternative stellen die Membran-Karten dar, die diese Nachteile nicht aufweisen. Der schematische Aufbau einer Membran-Karte ist in Abbildung 2.7 zu sehen.

Die Membran besteht aus einem flexiblen, dielektrischen Material. Auf der Rückseite werden die Leiterbahnen für die Verbindung zum Testsystem abgeschieden. Die Vorderseite wird an den gleichen Stellen ebenfalls mit Leiterbahnen versehen, die als Massepotential und somit der Abschirmung dienen. Um die Kontaktierung des DUT zu erreichen, werden an den Enden der Leiterbahnen Durchkontaktierungen²⁴ in die Membran geätzt und so mit Leitermaterial aufgefüllt, dass auf der Vorderseite eine kleine Erhebung²⁵ entsteht. Diese Bumps sind entsprechend der Anordnung der Probing Pads platziert und kontaktieren diese während des Probing.

Da die Membran aus einem flexiblen Material besteht, das beim Kontaktieren der Pads zu stark nachgeben würde, sind verschiedene Möglichkeiten der Stabilisierung publiziert. *Leslie et al.* bringen dazu die Membran auf einen Sockel auf, der die Form eines Pyramidenstumpfes aufweist [15]. Die Variante von *Leung et al.* sieht vor, die Membran in einen Rahmen einzuspannen und von der Rückseite mittels Druckluft zu stabilisieren [27]. Um die Kompatibilität zu Standard-Probern zu gewährleisten, wird die Membran in ein PCB eingebettet.

²⁴engl. via

²⁵engl. bump

Ein großer Nachteil dieser Art von Testkarten ist, dass Reparaturen nicht möglich sind. Zusätzlich sind durch den hohen prozesstechnischen Aufwand die Herstellungskosten im Verhältnis zu Nadelkarten sehr hoch. Obwohl bereits 1992 davon ausgegangen wurde, dass die Membran-Karten die Nadelkarten ersetzen werden, kommen diese bisher nur für spezielle Anwendungen, wie HF-Messungen, zum Einsatz [5].

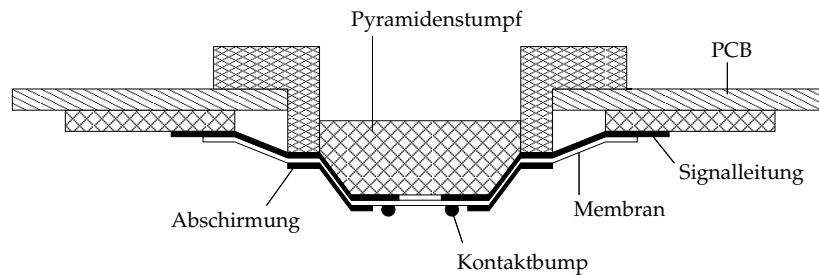


Abbildung 2.7: Querschnitt durch den Aufbau einer Membran-Karte.

2.3 Aufbau der Probing Pads

Zusätzlich zu dem bereits vorgestellten Testequipment spielt der technologische Schichtaufbau der Pads für die Probleme beim POAA eine entscheidende Rolle. Daher wird dieser im Folgenden vorgestellt und erläutert. In Abbildung 2.8 (a) ist der schematische Querschnitt durch den Schichtstapel einer aktuellen Schaltung dargestellt. Die einzelnen Prozessschritte zur Herstellung des abgebildeten Schichtstapels werden nicht genauer erläutert [28]. Das Augenmerk liegt auf den eingesetzten Materialien und deren Eigenschaften.

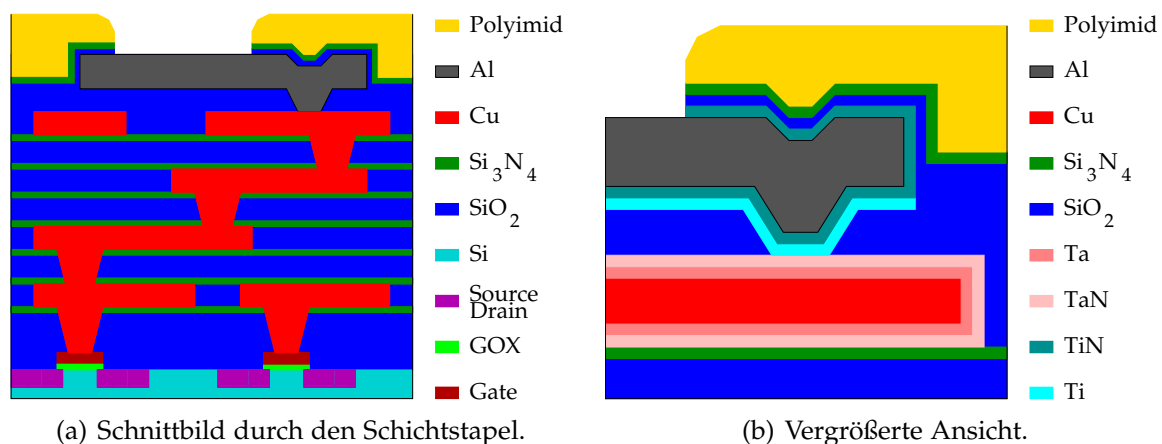


Abbildung 2.8: Schnittbild durch den schematischen Schichtstapel einer aktuellen integrierten Schaltung.

Die einzelnen Lagen sind in der Abbildung sehr vereinfacht dargestellt, da für die weitere Betrachtung nur die oberflächennahen Schichten von Relevanz sind. Zur besseren Übersicht sind in Abbildung 2.8 (b) die beiden obersten Metalllagen

vergrößert dargestellt. In aktuellen Schaltungen hat Kupfer das Aluminium als Metallisierung verdrängt. In der 65 nm-Technologie von Intel kommen beispielsweise bis zu acht Metallisierungslagen aus Kupfer zum Einsatz [29]. Aluminium wird aber nach wie vor als abschließende Metallschicht oder auch als Deckschicht für die letzte Kupferlage eingesetzt [30–32]. Die Gründe hierfür und warum für die unteren Metalllagen Kupfer verwendet wird, zeigen die nachfolgend aufgeführten Vorteile dieses Materials.

- Der spezifische Widerstand von Kupfer ($\rho_{\text{Cu}} = 1,7 \mu\Omega\text{cm}$) ist kleiner gegenüber Aluminium ($\rho_{\text{Al}} = 2,655 \mu\Omega\text{cm}$), wodurch die Verlustleistung bei gleichen geometrischen Ausmaßen und somit die abzuführende Wärme geringer ist [33, S. 152f].
- Kupfer weist eine höhere Elektromigrationsfestigkeit auf. Übersteigt in einer Leiterbahn die Stromdichte einen kritischen Wert, entsteht ein Materialtransport (Elektromigration), der zu einer Veränderung der Geometrie der Leiterbahn führt. Dadurch kann es zum Ausfall einzelner Bereiche oder sogar der ganzen Schaltung kommen. Die kritische Stromdichte von Kupfer beträgt $j_{\text{kritCu}} = 1000 \text{ kA/cm}^2$ bei Raumtemperatur. Aluminium wird deshalb 0,5 % Kupfer beigemischt, um die Elektromigrationsfestigkeit zu erhöhen und dadurch eine kritische Stromdichte von $j_{\text{kritAlCu}} = 200 \text{ kA/cm}^2$ bei Raumtemperatur zu erreichen. Die Elektromigration steigt exponentiell mit der Temperatur, wodurch höhere Betriebstemperaturen durch aufwändige Kühlsysteme verhindert werden müssen [33, S. 152f].
- Mit der Verwendung von Kupfer als Metallisierung können sowohl die Leiterbahnen als auch die Durchkontaktierungen in einem Prozess hergestellt werden. Die Vias dienen zur Verbindung der einzelnen Verdrahtungsebenen untereinander. Hierfür kommt der Dual Damascene Prozess zum Einsatz [33, S. 156]. Dadurch kann auf Wolfram als Via-Material verzichtet werden, wodurch Prozessschritte eingespart werden.

Die Vorteile von Kupfer gegenüber Aluminium sprechen für eine vollständige Substitution von Aluminium durch Kupfer. Allerdings weist Kupfer auch diverse Nachteile für den Einsatz in der Halbleiterherstellung auf, die im Folgenden dargestellt werden.

- Kupfer lässt sich nur sehr schwer anisotrop ätzen, was dazu führt, dass die Strukturierung von Kupfer durch ein aufwändiges chemisch-mechanisches Polieren²⁶ erfolgen muss. Dabei wird der rotierende Wafer an einen gegenläufig rotierenden Poliertisch gedrückt, auf dessen Oberfläche sich eine elastische, durchlässige Auflage befindet [34, S. 183f]. Mittels einer entsprechenden Chemikalie (Salpetersäure²⁷) wird die Kupferoberfläche anoxidiert und anschließend die Oxidschicht durch ein Poliermittel²⁸ (Aluminiumoxid²⁹-Partikel) mechanisch abgetragen. Mit den angegebenen Materialien ist dieser

²⁶engl. chemical mechanical polishing (CMP)

²⁷chemisches Formelzeichen: HNO_3

²⁸engl. slurry

²⁹chemisches Formelzeichen: Al_2O_3

Prozess gegenüber Tantal relativ selektiv, wodurch ein definierter Ätzstopp erreicht wird [28].

- Kupfer weist eine sehr hohe Diffusionslänge auf. Dadurch ist eine Diffusion bis in das Kanalgebiet der Transistoren möglich. Dort werden tiefe Störstellen generiert, die zum direkten Ausfall der Transistoren führen können. Daher bedarf es einer Diffusionsbarriere, um die Ausdiffusion von Kupfer zu verhindern. Tantalnitrid³⁰ hat sich als gute Diffusionsbarriere erwiesen, die zusammen mit Tantal, das als Adhäsionsschicht für das TaN dient, verwendet wird [30,35], [33, S. 155].
- Kupferoxid³¹ ist, im Gegensatz zu Aluminiumoxid, für Sauerstoff durchlässig, was zu einer kompletten Korrosion der Kupferschicht führen kann. Die Oxidation ist somit nicht selbst limitierend, was zusätzlich für eine Kapselung des Kupfers gegenüber dem SiO₂ spricht.
- Bei aktuellen Technologien werden die Probing Pads zusätzlich als Bonding Pads in der Aufbau- und Verbindungstechnik verwendet, um weiter Platz bzw. Kosten zu sparen. Die Bondtechnik für Aluminium, wie sie aktuell zum Einsatz kommt, ist nicht kompatibel zu Kupfer, sodass ein Wechsel zu Kupferpads einen kompletten Austausch der Bonder bedeuten würde. Ferner steht zur Zeit kein Bondverfahren für Kupfer zur Verfügung, das zuverlässige und kostengünstige Ergebnisse liefert [30,31].

Durch die genannten Vor- und Nachteile lässt sich der Schichtaufbau in Abbildung 2.8 (b) nachvollziehen. Das Siliziumdioxid³² dient zur Isolierung zwischen den einzelnen Metalllagen und wird mittels eines PECVD³³-Verfahrens abgeschieden. Bei der Dicke der SiO₂-Schichten muss ein Optimum gefunden werden. Eine dicke Schicht reduziert die parasitären Kapazitäten zwischen den Leiterbahnen. In die Isolationsschicht werden die Durchkontaktierungen, die zur elektrischen Verbindung der einzelnen Verdrahtungsebenen dienen, geätzt. Daraus ergibt sich ein hohes Aspektverhältnis (Via-Tiefe zu Via-Durchmesser), was zu einer immensen Steigerung des prozesstechnischen Aufwandes führt. Daher muss ein Kompromiss für das SiO₂ zwischen parasitären Kapazitäten und Aspektverhältnis gefunden werden. Eine weitere Funktion des SiO₂ besteht darin, als Planarisierungsschicht im CMP-Prozess zu dienen.

Die Siliziumnitridschicht³⁴ zwischen dem SiO₂ wird beim Herstellungsprozess als Ätzstoppschicht benötigt, damit die Vias mit dem Dual Damascene Prozess eingebracht werden können [33, S. 156]. Um einen direkten Kontakt zwischen Kupfer und Silizium zu vermeiden, kommt eine Diffusionssperre aus Tantal und Tantalnitrid zum Einsatz. Das Tantal dient dabei als Haftvermittler für die Tantalnitridschicht, um Verspannungen in den Schichten durch zu große Unterschiede in den Gitterkonstanten zu reduzieren. Dadurch wird eine bessere Haftung erreicht. Das

³⁰chemisches Formelzeichen: TaN

³¹chemisches Formelzeichen: Cu₂O

³²Im Weiteren wird der Begriff Siliziumoxid gleichbedeutend verwendet. Chemisches Formelzeichen: SiO₂

³³Abk. für engl. plasma enhanced chemical vapour deposition (PECVD)

³⁴chemisches Formelzeichen: Si₃N₄

TaN, das die eigentliche Diffusionsbarriere darstellt, wird zusätzlich auf die Oberseite der Kupferschicht aufgebracht, um dort eine Ausdiffusion des Kupfers zu verhindern.

Mit Einführung der $0,5\ \mu\text{m}$ -Technologie wird Titan als Anpassungsschicht zwischen dem Aluminium und dem Siliziumdioxid eingesetzt. Dadurch wird eine Reduzierung der Verspannung aufgrund der unterschiedlichen Gitterkonstanten erreicht. Zusätzlich dient das Titan für das anschließend aufgebrachte Titannitrid als Haftvermittler, da TiN schlecht auf SiO_2 haftet. Das TiN wird als Diffusionssperre für das Aluminium benötigt, um eine Reaktion bzw. Diffusion des Aluminiums mit der Schicht darunter zu verhindern³⁵. Als Deckschicht auf dem Aluminium stellt das TiN wieder eine Diffusionssperre dar und wird gleichzeitig als Antireflexschicht³⁶ eingesetzt. Da Aluminium stark spiegelnd ist, würden sonst Probleme bei den nachfolgenden lithographischen Prozessschritten entstehen. Das verwendete Aluminium beinhaltet bei aktuellen Technologien einen Anteil von 0,5% Kupfer, um so die Elektromigrationsfestigkeit von reinem Aluminium zu erhöhen. Die Schichten darüber, bestehend aus Siliziumoxid und -nitrid sowie einer Polyimidschicht, dienen als Passivierungsschichten für die Chips. Diese Passivierungslagen werden ganzflächig abgeschieden und anschließend werden die Probing Pads mittels Fotolithographie und Trockenätzverfahren wieder freigelegt. Der genaue Prozessablauf hierzu beschreibt Abschnitt 6.1.

Die Oberfläche des Aluminiums passiviert sich durch das natürliche Oxid selbst. Das Oxid ist undurchlässig für Sauerstoff und beugt somit einer weiteren Korrosion der Metalloberfläche vor. Es stellt einen sehr guten Schutz der Padoberfläche gegenüber weiteren äußeren Einflüssen dar.

2.4 Probing

Um den eigentlichen Probing-Vorgang besser zu verstehen, ist dieser für eine Nadelkarte in Abbildung 2.9, in einzelne Schritte unterteilt, dargestellt. Die unterschiedlichen Schritte werden exemplarisch für eine Cantilever-Karte gezeigt. Für die Untersuchungen in dieser Arbeit kommen ebenfalls Cantilever-Karten zum Einsatz.

Der Wafer wird gegenüber der Nadelkarte so positioniert, dass die Nadelspitze sich direkt über dem Pad befindet. Anschließend wird der gesamte Wafer von unten gegen die Nadelkarte gedrückt. Dabei setzt die Spitze auf der Oberfläche des Pads auf. Der Wafer wird allerdings noch weiter gegen die Nadelkarte angehoben. Der Hub, der ab dem ersten Aufsetzen der Nadel auf der Oberfläche bis zum Erreichen der Endposition stattfindet, wird als "Overdrive" bezeichnet. Durch den Druck, den der Wafer von unten auf die Nadelspitze ausübt, verbiegt sich der Arm der Nadel und die Spitze gleicht diese Verbiegung durch eine Auslenkung nach vorne aus. Durch diesen Weg, den die Nadel auf der Padoberfläche beschreibt, findet eine mechanische Verformung der Padoberfläche statt und die Nadelspitze

³⁵Silizium reagiert mit der Aluminiumschicht und diffundiert in diese ein. Dadurch bilden sich an der Grenzfläche Gräben, die sich mit Aluminium auffüllen. Dieser Effekt wird auch als "spiking" bezeichnet [36, S. 129f].

³⁶engl. anti reflective coating (ARC)

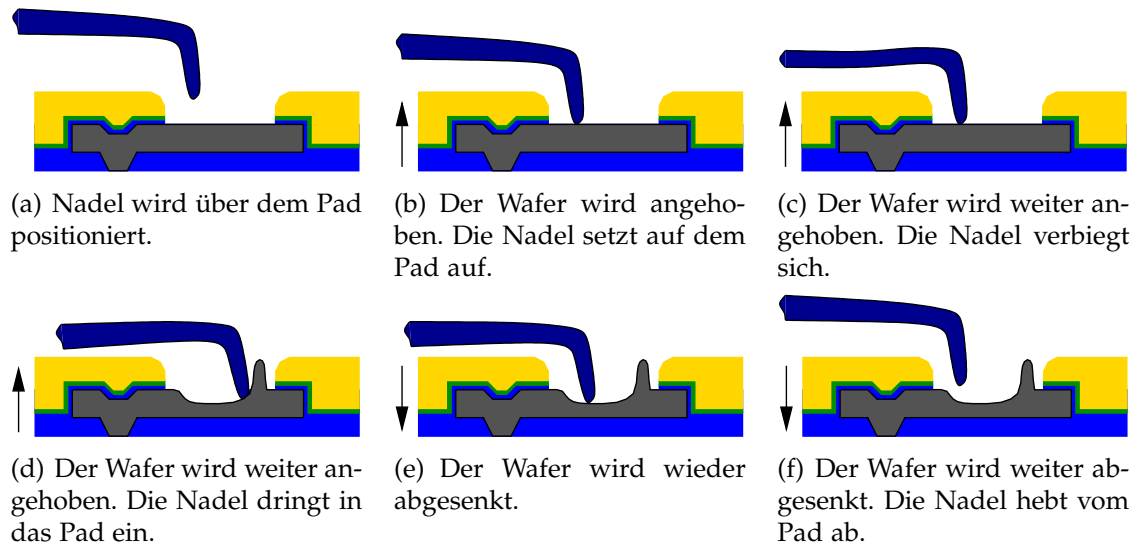


Abbildung 2.9: Schematische Darstellung des Probing-Vorgangs.

dringt in das Pad ein. In Abbildung 2.10 lässt sich ein Scrub in der REM-Aufnahme erkennen. Die Richtung der Nadelauslenkung aufgrund des Overdrives ist durch den Pfeil angegeben. Die Markierung "M1" bis "M3" sind für die in Abbildung 2.11 gezeigten Profilometermessungen relevant.

Durch die Verbiegung der Nadel und den Weg, den sie auf der Oberfläche beschreibt, wird nicht nur eine Kraft senkrecht zur Oberfläche, sondern auch in lateraler Richtung in den Wafer eingebracht. Dies führt einmal zu einem Druck auf die unteren Schichten und des Weiteren zu einer Scherwirkung zwischen den oberen Lagen. Dies kann zur Delaminierung bzw. zum Abplatzen der oberen Schicht führen [37].

Durch das Eintauchen der Nadelspitze in das Padmaterial schiebt die Nadel Material vor sich her. Dies führt zu einer Anhäufung des Padmaterials am Ende des Scrubs, die in Abbildung 2.10 zu erkennen ist. Sobald der Hub seine Endposition erreicht hat, kommt die Nadel zum Stillstand. Der gesamte Vorgang des Aufsetzens bis zu diesem Punkt, wird als "Touchdown" bezeichnet. Wenn diese Position erreicht ist, beginnt der Tester mit dem Abarbeiten der Testprogramme. Zu diesem Zeitpunkt hat der Kontaktwiderstand R_K sein Minimum erreicht. Der Kontaktwiderstand wird beim Probing häufig mit C_{res} abgekürzt, das sich aus dem Englischen "contact resistance" ableitet. In dieser Arbeit wird allerdings die Bezeichnung R_K für den Kontaktwiderstand verwendet. Die Zeit, in der die Nadel in dieser statischen Position verharrt, wird als "Hold-Time" bezeichnet.

Der "Lift-off" bezeichnet die Phase, in welcher der Wafer wieder abgesenkt wird und die Nadel aufgrund des geringer werdenden Anpressdrucks den gleichen Weg wie beim Touchdown, jetzt in umgekehrter Richtung, zurücklegt. Das angehäuften Padmaterial am Ende des Scrubs verbleibt, trotz des Entferns der Nadel, an der Endposition. Der Wafer wird nun soweit abgesenkt, dass die Nadel vollständig abhebt und er sich wieder in der Ausgangsposition befindet. Danach kann er vom Chuck entfernt und der nächste Wafer auf den Chuck geladen werden. Die Testprozedur beginnt von Neuem.

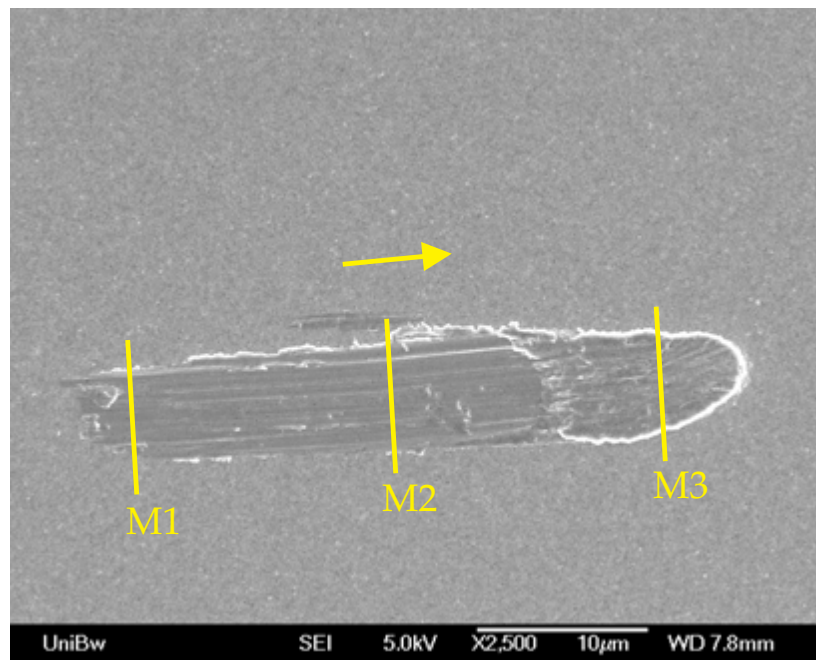


Abbildung 2.10: REM-Aufnahme für einen Scrub auf Aluminium (Probe: 27046/1).
Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel #11.

Im Folgenden wird der Begriff “Touchdown“ gleichbedeutend mit dem kompletten Probing-Vorgang, wie in Abbildung 2.9 zu sehen, verwendet.

2.4.1 Oberflächenbeschädigungen beim Probing

Die mechanischen Beschädigungen der Oberfläche stellen für das spätere Bonden der Dies ein Problem dar. Da die Probing Pads mittlerweile auch als Bonding Pads benutzt werden, führen die Deformationen der Oberfläche dazu, dass beim Bonden die Bonddrähte aus Gold nicht ausreichend haften und sich beim Gießen des Gehäusematerials wieder ablösen [38]. Aus diesem Grund ist ein minimaler mechanischer Krafteintrag erstrebenswert, um die Beschädigungen so gering wie möglich zu halten.

In Abbildung 2.10 ist ein Probe Mark zu sehen, der bei einem Touchdown mit einer Cantilever-Karte entstanden ist. Der Wafer wurde dabei durch die Nadel #11 mit einem Overdrive von $s_{OD} = 65 \mu\text{m}$ beaufschlagt. Der vollständige Parametersatz #3 kann in Anhang B nachgeschlagen werden. Wie sich an den Profilometermessungen dieses Probe Mark (Abbildung 2.11) erkennen lässt, beträgt die Eindringtiefe bis zu $s = 480 \text{ nm}$.

Bei einem Profilometer handelt es sich um ein Gerät zur Erstellung von Höhenprofilen einer Probe bzw. zur Bestimmung der Rauigkeit der Oberfläche. Zu diesem Zweck wird die Oberfläche mittels einer Diamantspitze abgetastet. Dabei wird die Nadel mit einer Kraft von $F = 10 \text{ mg} = 98,1 \text{ mN}$ aufgesetzt und über die Oberfläche bewegt. Das am Institut für Physik zur Verfügung stehende Profilometer der Firma *Veeco* weist unter den gegebenen Einsatzbedingungen eine Genauigkeit in normaler Richtung von $d \approx 5 \text{ nm}$ auf.

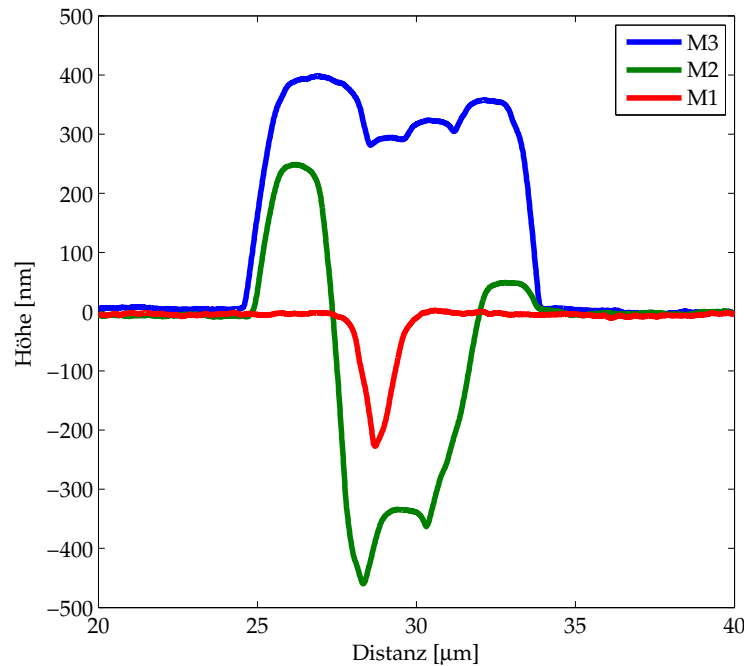


Abbildung 2.11: Profilometermessungen für den in Abbildung 2.10 dargestellten Scrub nahe des Aufsetzpunktes der Nadel (M1), in der Mitte (M2) und am Ende (M3) (Probe: 27046/1). Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel #11.

Es sind Messungen direkt nach dem Aufsetzen der Nadel (M1), in der Mitte des Probe Mark (M2) und am Ende des Abdrucks (M3) zu sehen. Dabei zeigt sich, dass kurz nach dem Aufsetzen die Nadel eine Eindringtiefe bis zu $s = 220$ nm erreicht. Dies stellt annähernd die Hälfte der maximalen Eindringtiefe von $s_{\max} = 480$ nm dar, die in der Mitte des Abdrucks gemessen wird. Es hat sich gezeigt, dass die maximale Eindringtiefe in etwa ab der Hälfte des Probe Mark erreicht ist. Es lässt sich erkennen, dass die Nadel nicht nur Padmaterial vor sich herschiebt, sondern durch das Eintauchen in das Pad auch Aluminium zur Seite verdrängt. Dies ist an den seitlichen Erhöhungen der zweiten Messung (M2) zu erkennen. Der Materialaufwurf am Ende des Probe Mark erreicht annähernd die Höhe von $h = 400$ nm, was annähernd der Eindringtiefe in das Pad entspricht.

Für weiterführende Untersuchungen zur Eindringtiefe in das Padmaterial bzw. den Beschädigungen der Oberfläche sei auf Abschnitt 5.3 verwiesen.

2.5 Probing over active area

In dem vorherigen Abschnitt ist auf den schematischen Schichtaufbau eines Probing Pads und der Materialien darunter eingegangen worden. In Abbildung 2.8 ist der Schichtaufbau dargestellt, bei dem die Probing Pads über aktivem Schaltungsgebiet angeordnet sind, d. h. unter den Pads verlaufen Leiterbahnen und auf Substratebene sind Bauelemente angeordnet. Abbildung 2.12 zeigt die Anordnung der Pads vor und nach der Verschiebung über aktivem Schaltungsgebiet. Durch

diese Maßnahme ist eine deutliche Flächenreduktion des Chips zu erreichen. Diese Möglichkeit der Platzeinsparung wurde bereits von *Mukai et al.* im Jahre 1981 vorgestellt und in diesem Zusammenhang darauf verwiesen, dass diese Art der Anordnung der Probing bzw. Bonding Pads zu mechanischen Beschädigungen der darunter liegenden Schichten führen kann [39].

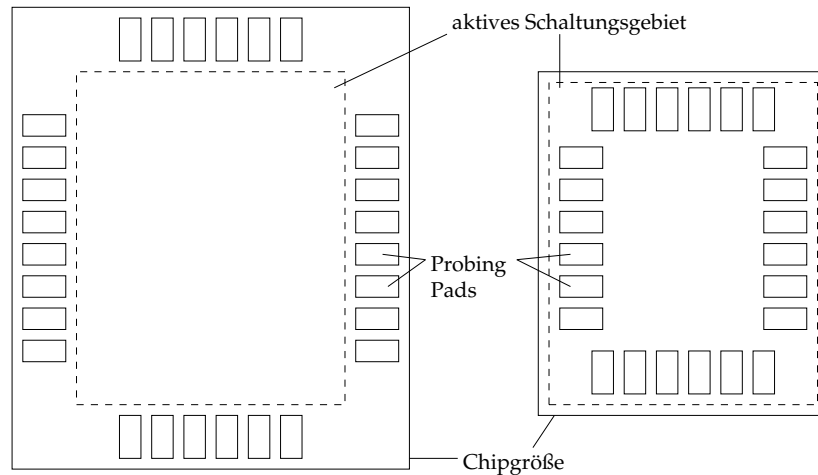


Abbildung 2.12: Reduzierung der Chipgröße durch die Verschiebung der Probing Pads über aktives Schaltungsgebiet.

2.5.1 Mögliche Ausfälle bzw. Beschädigungen

Wie sich bereits im vorherigen Abschnitt gezeigt hat, dringt die Nadel relativ weit in das Padmaterial ein. Zwischen der Nadelspitze und der TiN-Schicht darunter verbleiben allerdings noch $a = 520 \text{ nm}$ an Aluminium, das eine Gesamtdicke von $d = 1000 \text{ nm}$ aufweist. Ein Großteil der Kraft wird durch die plastische Verformung der Aluminiumoberfläche abgebaut. Die verbleibende Kraft übt die Nadelspitze während der Abarbeitung der Testroutinen auf das Restaluminium und die Schichten darunter aus.

Untersuchungen zu Ausfallursachen fertiger Chips von *Song et al.* haben gezeigt, dass es während des Probing zu Beschädigungen bzw. Brüchen³⁷ der dielektrischen Isolationsschichten zwischen den Metalllagen³⁸ kommen kann [40]. Dabei wurde der Einfluss des Probing in Bezug auf IMD-Cracks nachgewiesen. Die Cracks treten immer an den Stellen der Probing Pads auf, an denen sich der Probe Mark auf der Oberfläche abzeichnet. Dünnere Pads zeigten dabei eine höhere Neigung zu IMD-Cracks als dickere. Ab einer Dicke des Padmaterials von $d = 90 \mu\text{m}$ ist die Wahrscheinlichkeit eines Cracks davon fast unabhängig. Dies lässt sich mit der größeren Dämpfung der Nadel durch das dickere Padmaterial erklären, weil dadurch mehr Kraft durch die plastische Verformung abgebaut werden kann.

Untersuchungen von *Saran et al.* zu Ausfällen während des Bondens über aktivem Schaltungsgebiet haben ergeben, dass die IMD-Cracks hauptsächlich direkt unter den Bonddrähten auftreten, da dort der mechanische Krafteintrag am größten war

³⁷engl. crack

³⁸engl. inter-metal dielectric (IMD)

[37]. Allerdings ließ sich ebenso feststellen, dass die Cracks durchaus auch in tiefer liegenden Isolationsschichten auftreten können. FEM³⁹-Simulationen haben dabei belegt, dass die relativ steife Titannitridschicht verantwortlich für die Cracks in den IMD-Schichten ist. Diese Untersuchungen werden durch die Ergebnisse von *Van Hal et al.* bestätigt, wobei die Autoren speziell auf mögliche Delaminationen der Schichten unter den Bond Pads hinweisen [41] .

Die Versuche von *Song et al.* haben ferner verdeutlicht, dass sich ein starker Zusammenhang zwischen Crackhäufigkeit und Overdrive erkennen lässt. Dies ist auch verständlich, da ein größerer Overdrive eine höhere Kraft zur Folge hat. Weiterhin ließ sich feststellen, dass gehauste Chips eine höhere Ausfallwahrscheinlichkeit aufweisen, als Dies auf Wafer-Level. Da die Probing Pads auch als Bonding Pads genutzt werden, können durch das Bonden bereits vorhandene, kleinere Risse vergrößert werden und sich somit die Anzahl der Ausfälle erhöhen.

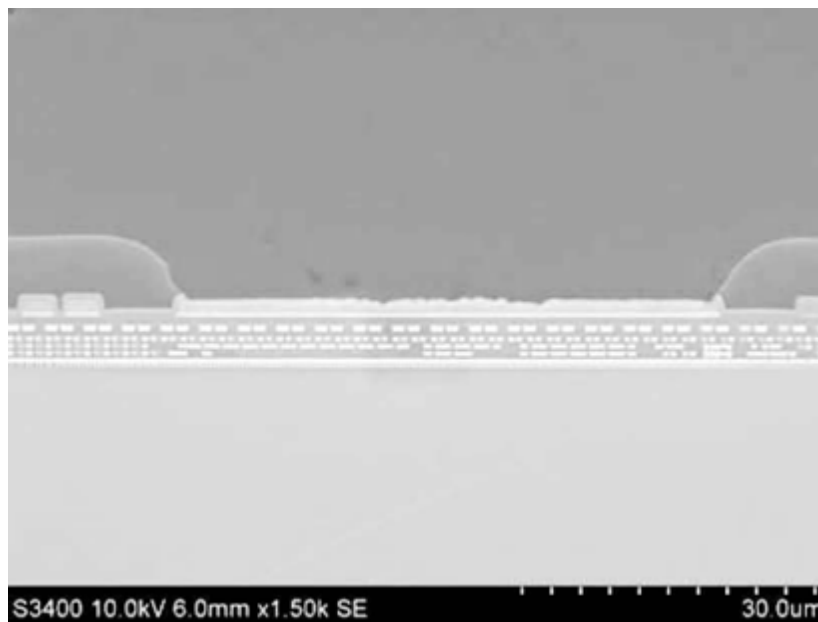


Abbildung 2.13: REM-Aufnahme eines Querschnitts durch den Schichtstapel einer aktuellen Schaltung.

Abbildung 2.13 zeigt die REM-Aufnahme eines Querschnitts durch den Schichtstapel einer aktuellen Schaltung. Zu sehen ist ein Probing Pads, das einen Probe Mark aufweist, über aktivem Schaltungsgebiet. Ein Ausfall der Schaltung kommt dadurch zu Stande, dass sich in der Isolationsschicht ein Spalt bzw. ein Riss ausbildet. Dadurch kann diese ihre Isolationswirkung nicht mehr vollständig erzielen und es kommt somit zu einem Kurzschluss der beiden Leiterbahnen. Die treibende Kraft dabei stellt die Diffusion des Leitermaterials in die Isolationsschicht dar. Dies kann letztendlich zur Zerstörung des Bauteils führen oder zumindest so weit, dass das Bauteil nicht mehr innerhalb der Spezifikationen funktioniert.

Die Defekte können sowohl zu einem sofortigen als auch einem verzögerten Ausfall der Schaltung führen. Es ist dabei zu beobachten, dass die Ausfälle aber fast immer im ersten Drittel des Lebenszykluses auftreten. Aus diesem Grund werden

³⁹Abk. für Finite-Elemente-Methode

diese Ausfälle auch als frühe Fehler⁴⁰ bezeichnet. In Abbildung 2.14 ist der Verlauf der Ausfallrate gegenüber dem Lebenszyklus einer Schaltung dargestellt. Die Funktion lässt sich in drei Abschnitte unterteilen und weist den typischen Badewannenverlauf auf. Der Verlauf wird deshalb so bezeichnet, da der Kurvenverlauf dem Schnittbild durch die kurze Seite einer Badewanne ähnelt. Den einzelnen Funktionsabschnitten lassen sich unterschiedliche Fehlertypen zuordnen:

- **Frühe Fehler** treten direkt zu Beginn des Lebenszyklus eines Bauteils auf. Die Abnahme dieser Art von Fehlern zeigt ein exponentielles Verhalten gegenüber der Zeit. Sie entstehen durch Prozessschwankungen während der Produktion oder Mängel der verwendeten Materialien.
- **Zufällige Fehler** treten über der Zeit gleichverteilt auf, was zu einer Geraden in der Abbildung 2.14 führt.
- **Späte Fehler** steigen mit der Zeit exponentiell an und treten zum Ende des Lebenszyklus eines Bauteils auf. Sie sind hauptsächlich auf Verschleiß und Abnutzung der Produkte zurückzuführen.

Durch Aufaddieren der einzelnen Kurvenverläufe für die entsprechenden Fehlerarten ergibt sich die resultierende Funktion.

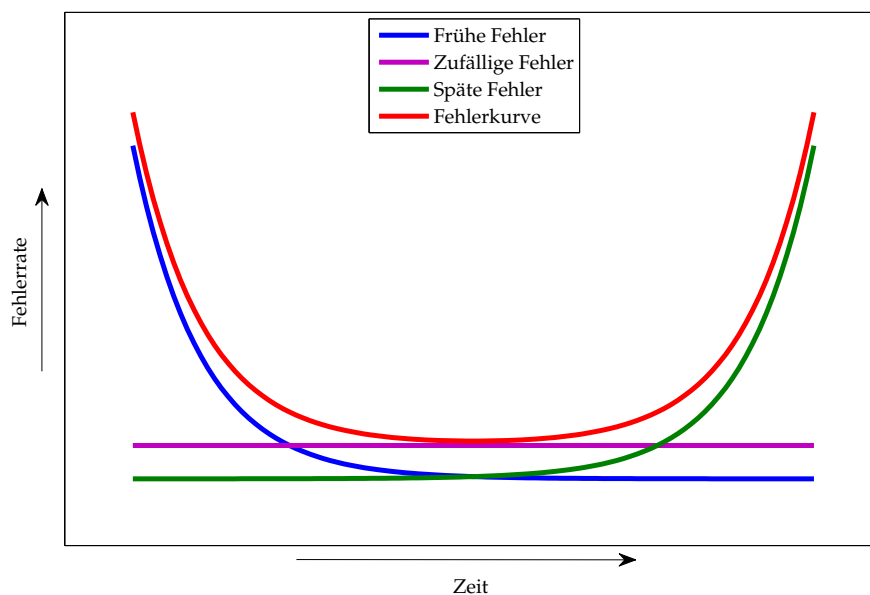


Abbildung 2.14: Die Kurvenverläufe der unterschiedlichen Fehlerarten aufgetragen über der Zeit.

2.5.1.1 Technologische Gegenmaßnahmen

Ausfälle aufgrund von IMD-Cracks sind nicht nur durch das Testen über aktivem Schaltungsgebiet bedingt, sondern entstehen ebenso beim Bonden der Dies. Daher

⁴⁰engl. infant mortality failure

haben verschiedene Forschergruppen mögliche technologische Gegenmaßnahmen untersucht, um die Ausfälle speziell beim Bonden über aktivem Schaltungsgebiet⁴¹ zu minimieren. Da es sich dabei um die gleichen Ausfallmechanismen handelt wie beim POAA, stellen die gezeigten Ergebnisse ebenso mögliche Lösungen für die Probleme beim POAA bereit.

Heinen et al. haben die Möglichkeit einer zusätzlichen Metalllage untersucht, die als oberste Metalllage auf eine Siliziumoxid- und Polyimidschicht aufgebracht wird [42]. Das Siliziumoxid dient dabei zur elektrischen Isolation gegenüber den unteren Metallisierungsebenen. Die Aufgabe des Polyimid besteht darin, als mechanische Pufferschicht zu fungieren, die den mechanischen Stress während des Bondens aufnimmt. Der Vorteil liegt darin, dass keine neuen Materialien zum Einsatz kommen. Dieser Schichtstapel kann also mit Standardprozessen erzeugt werden. Mit dieser Methode wurden ausreichend gute Ergebnisse in Bezug auf Ausfälle beim Bonden über aktivem Schaltungsgebiet erzielt.

Saran et al. untersuchten den Einfluss von verschiedenen geometrischen Strukturen unter den Pads auf die Wahrscheinlichkeit einer Beschädigung der Isolationschicht während des Bondens [37]. Die verwendeten Strukturen dienen zusätzlich dazu, die Pads mit der darunterliegenden Metalllage elektrisch zu verbinden, daher sind sie ebenfalls aus Aluminium hergestellt. Untersucht wurden sowohl eine Gitterstruktur, eine Kreuzstruktur, als auch eine Matrix von Vias⁴². Dabei zeigte sich, dass die Gitterstruktur die besten stabilisierenden Eigenschaften aufweist und diese nochmals gesteigert werden können, wenn die vorletzte Metallebene ebenso mit einer Gitterstruktur zur Kontaktierung versehen wird.

In der Veröffentlichung von *Shen et al.* wird der positive Einfluss einer Matrix von Vias unter den Pads auf die Crackwahrscheinlichkeit während des Bondens bestätigt [43]. Die Ergebnisse werden hier sowohl von experimentellen Untersuchungen als auch von FEM-Simulationen untermauert. Die Veröffentlichung von *Song et al.* hat allerdings gezeigt, dass sich eine Matrix von Vias direkt unter dem Pad im Vergleich zu der Anordnung der Vias am Rand der Pads eher nachteilig auswirkt [40].

Die Gruppe um *Anderson et al.* verzeichnete gute Ergebnisse, Cracks durch das Bonden zu verhindern, indem eine weitere Metallisierungsebene unter den Pads eingebracht wurde, die mit den Pads elektrisch verbunden ist [44]. Diese weitere Metallisierungsebene nutzt den Effekt aus, dass das Dielektrikum zwischen den einzelnen Metallisierungen hauptsächlich unter den Pads Risse ausbildet. Entsteht ein Crack und somit ein Kurzschluss zwischen dem Pad und der Metallisierung darunter, hat dies keine Auswirkungen auf das Schaltungsverhalten, da die beiden Ebenen bereits prozessbedingt auf dem gleichen Potential liegen.

Hess et al. hat mit seinen Untersuchungen zu unterschiedlichen Schichtstapeln gezeigt, dass es keinen Einfluss gibt, ob in den ersten drei Metalllagen unter den Pads Leiterbahnen angeordnet sind oder nicht [45].

⁴¹engl. bonding over active area (BOAA)

⁴²engl. sea-of-vias

2.5.1.2 FEM-Simulationen

Da der Zusammenhang zwischen einwirkenden Kräften beim Probing und den Oberflächenbeschädigungen ein sehr komplexes Thema ist, wird versucht, den Vorgang des Probing mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode zu beschreiben. *Chao et al.* haben ein Modell vorgestellt, das den Probing-Vorgang mittels einer einzelnen Nadel nachbildet [46]. Mit dem aufgestellten Modell konnten aussagekräftige Ergebnisse erzielt werden, die sich durch Versuche bestätigen ließen.

Liu et al. haben in ihrer Veröffentlichung zusätzlich die Problematik des Probing over active area berücksichtigt [47]. Sie haben gezeigt, dass die auftretenden IMD-Cracks beim Probing hauptsächlich vom Overdrive beeinflusst werden. Ferner zeigte sich, dass die möglichen Ausfälle vorrangig durch das Bonden und nicht das Proben über aktivem Schaltungsgebiet generiert werden.

Weiterführende Betrachtungen zur Finite-Elemente-Methode sind bei *Nagler* dokumentiert [48].

2.6 Fazit

Die beschriebenen technologischen Gegenmaßnahmen zur Vermeidung von Cracks zeigen mögliche Lösungsvorschläge auf. Allerdings ist zu erkennen, dass unterschiedliche Forschergruppen zu gegensätzlichen Aussagen kommen. Die vorgeschlagenen Maßnahmen tragen jedoch nur zur Bekämpfung der Ursachen bei und lösen nicht das eigentliche Problem beim POAA – den hohen mechanischen Krafteintrag. Daher besteht Interesse daran, die Mechanismen zwischen Kontaktkraft und Kontaktwiderstand zu verstehen. Um das zu erreichen, müssen diese Parameter unabhängig voneinander und parallel für eine einzelne Nadel gemessen werden können. Der Aufbau eines Messplatzes zur Ermittlung dieser Parameter wird im folgenden Kapitel näher beleuchtet.

Kapitel 3

Aufbau Messplatz

Speziell im Bereich der Produktion von Halbleiterspeichern werden ständig neue Produktionstechnologien eingeführt. Für die Herstellung von heutigen DRAM-Bauteilen⁴³ werden bereits 300 mm Wafer eingesetzt. Diese werden zur Bestimmung der funktionsfähigen Dies mit Nadelkarten getestet, die bis zu 25.000 Nadeln besitzen [7]. Eine solche Nadelkarte kontaktiert den Wafer viermal und hat somit alle auf dem Wafer befindlichen Dies getestet.

Zur Bestimmung des mechanischen Krafteintrags der Nadeln auf den Wafer kann die gesamte Belastung gemessen und dann über die einzelnen Nadeln gemittelt werden. Diese Methode ist allerdings für die ausgeübte Kraft einer einzelnen Nadel sehr ungenau. Dies liegt daran, dass Nadelkarte und Waferoberfläche eine minimale Verkipfung zueinander aufweisen können, was zur Folge hat, dass gewisse Nadeln früher auf der Oberfläche aufsetzen. Dadurch werden diese Nadeln auch stärker auf den Wafer aufgedrückt, um bei den restlichen Nadeln ebenfalls einen ausreichenden geringen elektrischen Widerstand zu erzeugen. Produktionstoleranzen und unterschiedliche Abnutzung der Nadeln führen ebenfalls dazu, dass die Spitzen der einzelnen Nadeln keine planare Fläche ausbilden. Generell ist eine Planarität von besser als $v = \pm 18 \mu\text{m}$ nicht erreichbar [20]. Da die Nadeln, welche die Pads in der Die-Ecke kontaktieren, kürzer sind als jene, welche die mittleren Pads kontaktieren, kommt es zusätzlich zu einer ungleichmäßigen Kraftverteilung über den Wafer. Aus diesem Grund ist die Mittelung der Kraft über alle Nadeln sehr ungenau und nicht aussagekräftig für eine einzelne Nadel. Um den mechanischen Krafteintrag einer einzelnen Nadel auf die Wafer- bzw. Padoberfläche exakt zu bestimmen, bedarf es einer Einzelnadelmessung. Daher werden in diesem Kapitel zunächst bereits erhältliche bzw. publizierte Geräte vorgestellt. Die einzelnen Vor- und Nachteile werden dabei gegenübergestellt und daraus die Schlussfolgerung gezogen, dass ein Messplatz, der die Anforderungen erfüllt, nicht erhältlich ist. Folglich muss eine entsprechende Messanordnung selbst entwickelt und aufgebaut werden. Der Aufbau des Messplatzes nimmt einen entscheidenden Anteil dieses Kapitels ein, bevor kurz auf industriell erhältliche Prober eingegangen wird.

⁴³Abk. für engl. dynamic random access memory (DRAM)

3.1 Aktuelle Messplätze

Die im nachfolgenden vorgestellten Messplätze bieten alle die Möglichkeit, Teile eines Wafers auf den mechanischen Krafteintrag durch eine Probing-Nadel und den elektrischen Widerstand zu untersuchen [49–51]. Zur Durchführung der einzelnen Messungen müssen die Wafer in einzelne Proben zerteilt werden.

Zur Messung der Kontaktkraft und des elektrischen Widerstandes einer einzelnen Nadel haben *Hernot et al.* einen speziellen Messplatz vorgestellt [50]. Dieser kann die Normalkraft und den elektrischen Widerstand während des Probing messen. Die Kraftmessung erfolgt über eine Kraftmessdose, an der die Nadel mit einer halbkugelförmigen Spitze (Durchmesser $d = 1 \text{ mm}$) befestigt ist. Aufgrund dieser Anordnung bzw. Befestigung der Nadel ergeben sich zwei entscheidende Nachteile. Die Kraftmessung erfolgt direkt an der Nadel und nicht an der Probe bzw. dem Wafer. Für die geplanten Untersuchungen ist allerdings die auftretende Kraft an der Probe und nicht die Kraft, die auf die Nadel bzw. die Einspannung einwirkt, von Interesse. Die Modularität kann bei dem aufgezeigten Messplatz ebenfalls nicht gewährleistet werden. Unterschiedliche Nadeltypen, wie Cantilever-Karten bzw. vertikale Karten, können mit einer solchen Anordnung nicht untersucht werden. Die verwendete Kraftmessdose kann die Kraft nur in normaler Richtung bestimmen. Somit ist eine Messung der lateralen Kraft, die sich aufgrund des Eintauchens der Nadelspitze in die Padoberfläche ergibt, nicht möglich. Bei dem vorliegenden Messplatz wird die Nadel auf die Oberfläche zubewegt und dadurch der elektrische Kontakt hergestellt. Bei Probern, die in der Industrie im Einsatz sind, wird jedoch der Wafer von unten gegen die Nadelkarte bzw. die Nadeln gedrückt. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, muss der Vorgang beim Probing durch den Messplatz möglichst genau nachgebildet werden.

In dem von *Jeema et al.* beschriebenen Messplatz erfolgt die Positionierung der Probe mittels dreier Schrittmotoren [49]. Mit Hilfe dieser Dreiachsenpositionierung der Probe wird diese während der Messung gegen die Nadel gedrückt. So kann das Verhalten eines industriellen Probers simuliert werden. Für die Kraftmessung kommen bei diesem Messplatz zwei Kraftsensoren zum Einsatz. Mittels der beiden Sensoren kann sowohl die Normal- als auch die Lateralkraft direkt an der Einspannung der Nadeln aufgenommen werden. Somit wird hier ebenfalls die Kraft nicht an der Probe gemessen. In lateraler Richtung erfolgt die Messung sogar indirekt über die Messanordnung. Die Auflösung der Sensoren beträgt $F = 0,01 \text{ N}$, was für die angestrebte Auflösung von Millinewton jedoch nicht ausreichend ist. Die Widerstandsmessung erfolgt nach dem Vierleiterprinzip, das den Einfluss von Störgrößen mindert. Eine Evaluierung unterschiedlicher Nadeltypen bzw. -geometrien ist mit diesem Messaufbau ebenfalls nicht möglich.

In der Dissertation von *Nagler*, die im Rahmen der Projektkooperation mit der *Infineon Technologies AG* entsteht, wird ferner ein Messgerät vorgestellt, mit dem spezielle Eindrückversuche mittels einer Diamantspitze erfolgen können. Hiermit können auch gezielt IMD-Cracks erzeugt und weiter untersucht werden. Die damit durchgeführten Versuche und erzielten Ergebnisse können bei *Nagler* nachgelesen werden [48].

3.2 Probe Force Investigation Tool

Wie in dem vorherigen Abschnitt gezeigt, steht kein adäquates Gerät mit dem gewünschten Funktionsumfang am Markt zur Verfügung. Daher wird zunächst ein Konzept zum Aufbau des Messplatzes erstellt, das die Nachteile der zuvor dargestellten Messplätze vermeidet. Ausgehend von der Prinzipskizze in Abbildung 3.1 lassen sich die Kriterien für den Aufbau des Messplatzes folgendermaßen zusammenfassen:

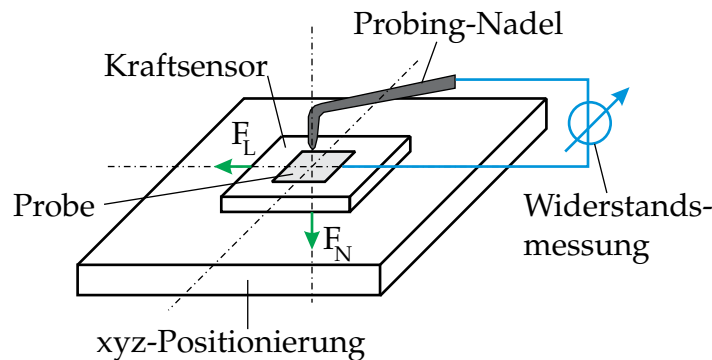


Abbildung 3.1: Prinzipskizze des Messplatzaufbaus.

- Messung der normalen (F_N) und lateralen (F_L) Kräfte, die auf die Probe einwirken
- Messung der Kräfte direkt an der Probe
- Messgenauigkeit der Kräfte im Millinewton-Bereich
- Positioniergenauigkeit der Probe in lateraler Richtung im Mikrometer-Bereich
- Minimale mechanische Auslenkung der Messgeräte, um eine Verfälschung durch die Messgeräte zu vermeiden bzw. auszuschließen
- Messung des elektrischen Widerstandes mittels Vierleitermessung, um Störeinflüsse auszuschließen bzw. zu minimieren
- Aufbau auf einem verwindungssteifen und gedämpften Unterbau, um die Störungen von außen minimal zu halten
- Definition eines einheitlichen Layouts der Nadelkarten, um unterschiedliche Nadelkartentypen untersuchen zu können
- Anbau eines Mikroskops mit Kamerafunktion zur besseren Positionierung der Nadelspitze gegenüber dem Pad und zur optischen Kontrolle während der Messung

Der Messplatz wird im Folgenden entsprechend seiner Funktion als PROFIT – PRObe Force Investigation Tool – bezeichnet.

3.2.1 Mechanischer Aufbau

Als Basis für den Messplatz dient ein bereits vorhandener manueller Prober der Firma *Cascade*, von dem nur die stabile Gesamtkonstruktion und das positionierbare Mikroskop-/Kamerasystem wiederverwendet werden. Die gesamte Konstruktion ist in den Abbildungen 3.2 und 3.3 dargestellt.

Die Positioniereinheit für die drei Raumachsen wird direkt mit der Bodenplatte des Probers verschraubt und dadurch eine stabile Befestigung der Messanordnung erreicht. Die Positionierung ist aus drei unterschiedlichen Stelleinheiten zusammengesetzt. Die oberste bildet ein Hubtisch zum Verfahren der Probe in z-Richtung. Darauf wird die Messeinheit, bestehend aus den Sensoren und dem Probenhalter, befestigt. Die Kräfte in normaler und lateraler Richtung werden durch zwei unterschiedliche Sensoren gemessen. Diese werden durch eine entsprechende Halterung so miteinander verbunden, dass die beiden Kräfte unabhängig voneinander gemessen werden können.

Durch die verwendete Positionierungseinheit muss die ursprüngliche Nadelkartenhalterung entfernt und durch eine neue ersetzt werden. Auf dem äußeren Rahmen des Probers wird eine Metallbrücke aufgesetzt, die Ausfräsungen aufweist, so dass die Nadelkarte aufgelegt werden kann und mittels einer Schraubklemmung fixiert wird. Um die elektrische Verbindung zwischen der Nadelkarte und dem Messgerät für die Widerstandsmessung zu erreichen, kommen ein standardisierter Sockelstecker und Büschelstecker zum Einsatz.

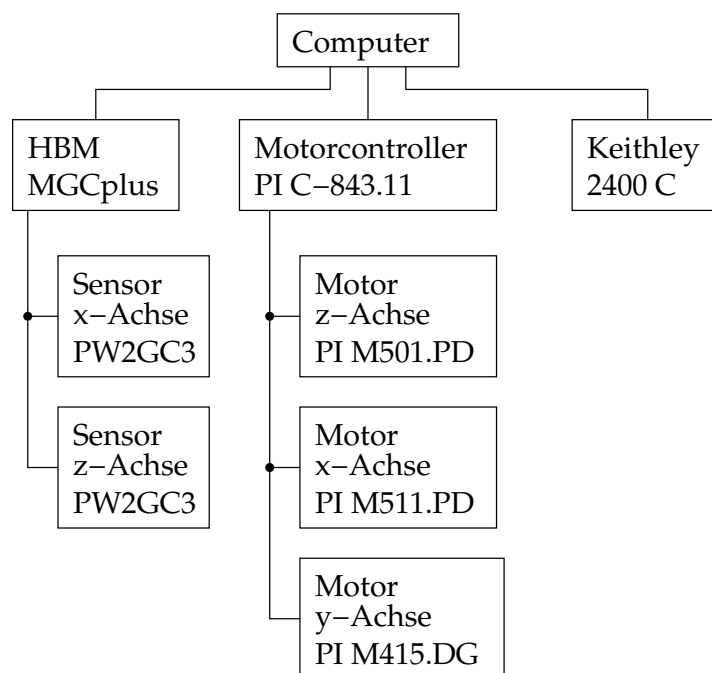


Abbildung 3.2: Schematischer Aufbau des Messplatzes.

Um mögliche Störungen, die über den Boden übertragen werden können, zu vermeiden bzw. zu minimieren, wird die gesamte Messanordnung auf einem schwingungsgedämpften optischen Tisch platziert. Dadurch können Schwingungen über den Boden weitgehend gedämpft werden.

Im folgenden Abschnitt sind die verwendeten Komponenten, die zu der kompletten Messanordnung zusammengefügt werden, näher dargestellt und erläutert.

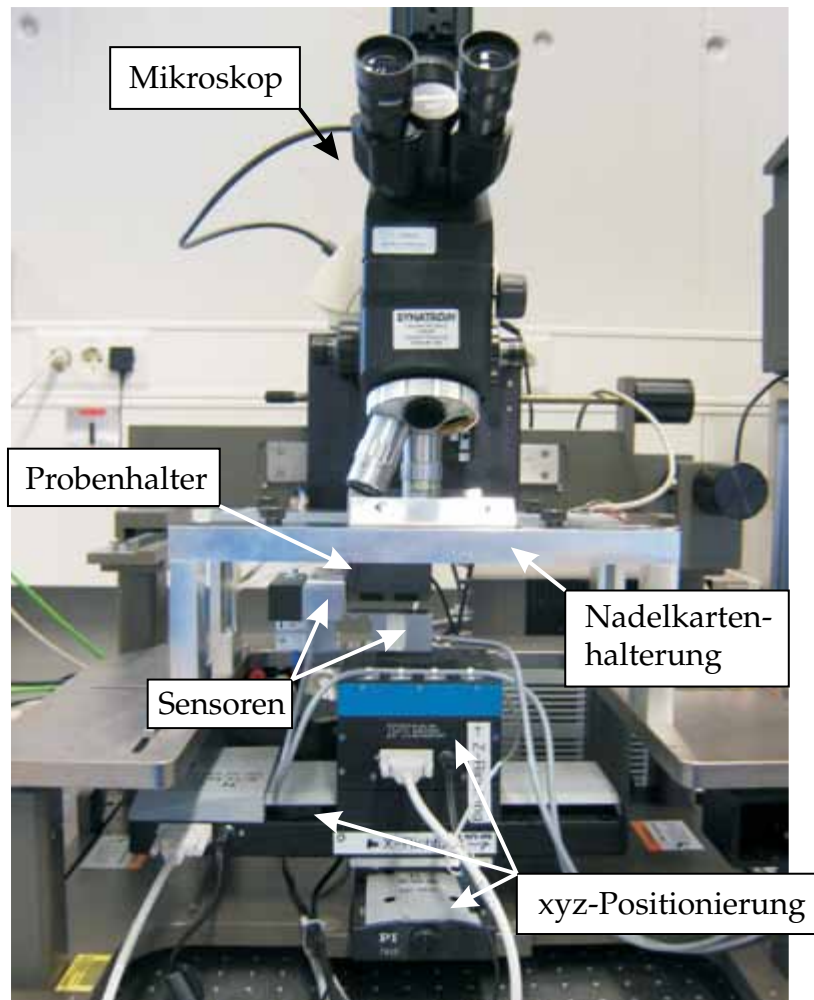


Abbildung 3.3: Foto vom Aufbau des Messplatzes.

3.2.2 Auswahl der einzelnen Komponenten

In diesem Abschnitt wird auf die Auswahl der einzelnen Komponenten für den Messplatz eingegangen. Da die Messung der auftretenden Kräfte beim Probing eine zentrale Rolle des Messplatzes einnimmt, wird mit der Auswahl der Sensoren begonnen. Basierend auf deren geometrischen Dimensionen bzw. deren Messprinzip muss der restliche Aufbau angepasst werden.

3.2.2.1 Kraftsensoren

Für die Kraftsensoren ist die Wahl auf Plattform-Wägezellen vom Typ *PW2GC3* der Firma *Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH*⁴⁴ gefallen. Die Sensoren bieten ein

⁴⁴kurz: HBM

entsprechendes Auflösungsvermögen bei gleichzeitiger Steifigkeit. Wie Tabelle 3.1 entnommen werden kann, bieten diese Sensoren eine akzeptable absolute Genauigkeit wohingegen die relative Genauigkeit sehr gut ist. Dies gewährleistet zum einen, dass die absoluten Fehler den Vorgaben entsprechen, und zum anderen, dass die Messungen durch die hohe relative Genauigkeit reproduzierbar und somit untereinander vergleichbar sind [52, S. 55f]. Durch den großen Messbereich und die hohe Steifigkeit der Sensoren ergibt sich für einen Kräfteintrag von $F = 100 \text{ mN}$ nur eine Auslenkung von

$$\Delta x = \frac{100 \text{ mN}}{0,36 \frac{\text{N}}{\mu\text{m}}} = 0,28 \mu\text{m} \quad (3.1)$$

in x -Richtung und

$$\Delta z = \frac{100 \text{ mN}}{0,52 \frac{\text{N}}{\mu\text{m}}} = 0,19 \mu\text{m} \quad (3.2)$$

in z -Richtung. Diese Auslenkungen sind so gering, dass eine Verbiegung der Sensoren aufgrund des bei den Messungen zu erwartenden Kräfteintrages vernachlässigt und eine dadurch verursachte Verfälschung der Ergebnisse ausgeschlossen werden kann.

		x -Richtung	z -Richtung
Messbereich	[N]	0 ... 72	0 ... 120
Absolute Genauigkeit	[mN]	21,6	36
Relative Genauigkeit	[mN]	0,36	0,6
Steifigkeit	$[\frac{\text{N}}{\mu\text{m}}]$	0,36	0,52

Tabelle 3.1: Auszug aus dem Datenblatt der Plattform-Wägezellen vom Typ PW2GC3 [52, S. 55f].

Die eingesetzten Wägezellen basieren auf dem Messprinzip von Dehnungsmessstreifen⁴⁵. Bei einem DMS wird die Widerstandsänderung eines elektrischen Leiters aufgrund der mechanischen Dehnung oder Stauchung detektiert. Durch die von außen eingebrachte mechanische Verformung des Leiters im DMS wird dessen Querschnitt, Länge und spezifischer Widerstand verändert. Daraus resultiert eine gesamte Widerstandsänderung, mit deren Hilfe, mittels der Geometrie des Sensors, auf den Kräfteintrag geschlossen werden kann [53, S. 268f].

Die Sensoren sind in Form einer Wheatstone-Messbrücke aufgebaut. Diese ist in Abbildung 3.4 dargestellt. Die Messbrücke besteht aus den Widerständen R_1 , R_2 , R_3 und R_4 und ist im vorliegenden Fall als Vollbrücke ausgelegt. Bei einer Vollbrücke sind alle Widerstände variabel, das bedeutet für die Sensoren, dass diese intern aus

⁴⁵kurz: DMS

vier, zu einer Wheatstone-Brücke verschalteten, DMS bestehen. Die Messspannung U_A ist von der Brückenspeisespannung U_B wie folgt abhängig:

$$U_A = U_B \cdot \frac{R_2 \cdot R_4 - R_1 \cdot R_3}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)} \quad (3.3)$$

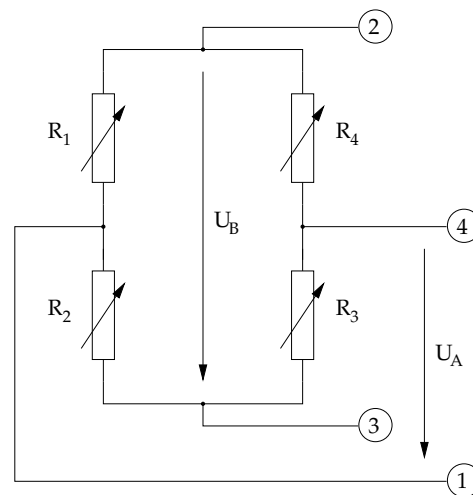


Abbildung 3.4: Wheatstone Messbrücke mit vier variablen Widerständen.

Der Anschluss der Sensoren an den Messverstärker erfolgt nach dem Prinzip der Sechsliterschaltung. Eine Darstellung des Schaltplans ist in Abbildung 3.5 zu sehen [54, S. 197f]. Dieses Schaltungsprinzip speziell auf den Anschluss von DMS-Vollbrückenschaltungen ausgelegt. Die regelbare Spannungsquelle Q stellt die Speisespannung U_G für die Vollbrücke zur Verfügung. Durch den Speisestrom I_B fallen über den Zuleitungswiderständen R_{K2} und R_{K3} die Spannungen U_{K2} und U_{K3} ab. Infolge dessen wird der Messaufnehmer mit der geringeren Spannung $U_B < U_G$ versorgt. Über die beiden Fühlerleitungen 6 und 7 wird die reduzierte Spannung U_B gemessen und mittels eines Komparators C mit der Referenzspannung U_{Ref} verglichen. Der Spannungsabfall über den Leitungswiderständen R_{K6} und R_{K7} kann vernachlässigt werden, da durch die Leitungen kein Strom fließt. Die Referenzspannung U_{Ref} entspricht der Sollspannung mit der die Brückenschaltung zu speisen ist. Der Komparator vergleicht die beiden Spannungen U_B und U_{Ref} miteinander und steuert die Spannungsquelle, bei einem Unterschied zwischen U_B und U_{Ref} , so, dass die beiden Spannungen identisch werden. Somit wird gewährleistet, dass am Aufnehmer immer die erforderliche Speisespannung anliegt. Durch diese automatische Regelung werden Spannungsschwankungen von U_B , beispielsweise durch Temperaturänderungen, vermieden und eine reproduzierbare Messung ist gewährleistet. Die Spannung U_A stellt das Messsignal des Sensors dar. Die Zuleitungswiderstände R_{K1} und R_{K4} können vernachlässigt werden, da die Messung stromlos erfolgt. Das Prinzip der Messsignalverstärkung wird in Abschnitt 3.2.2.5 näher betrachtet.

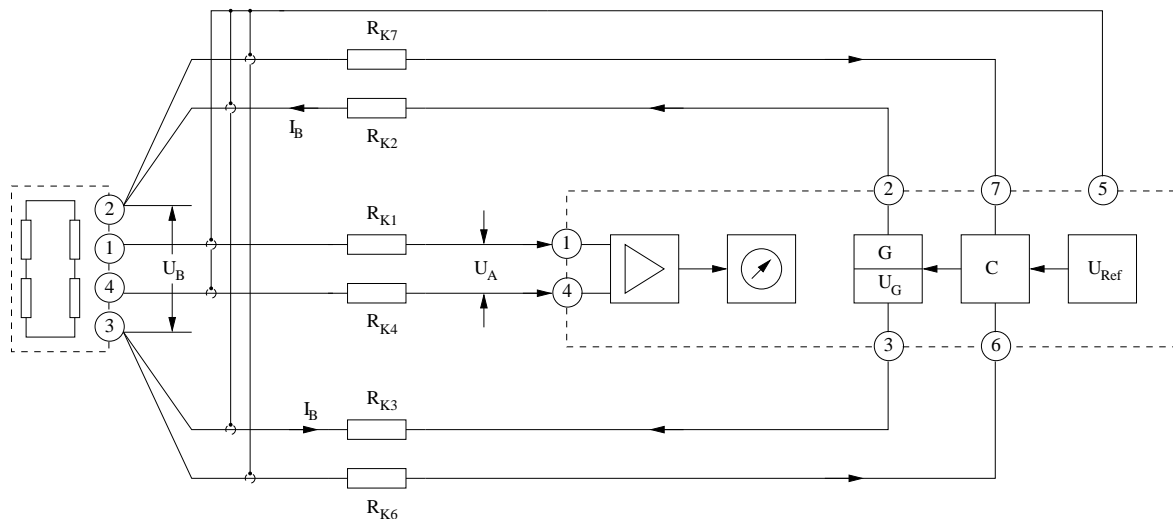


Abbildung 3.5: Verschaltung nach dem Prinzip der Sechseleitschaltung.

Es wird jeweils ein Sensor für die normale Messung (z -Richtung) und einer für die laterale Messung (x -Richtung) verwendet. Der Sensor für die z -Richtung ist für einen größeren Messbereich dimensioniert, da dieser mit dem Gewicht des Sensors für die x -Richtung, sowie des Probenhalters und des Verbindungsstücks zwischen den einzelnen Sensoren belastet wird.

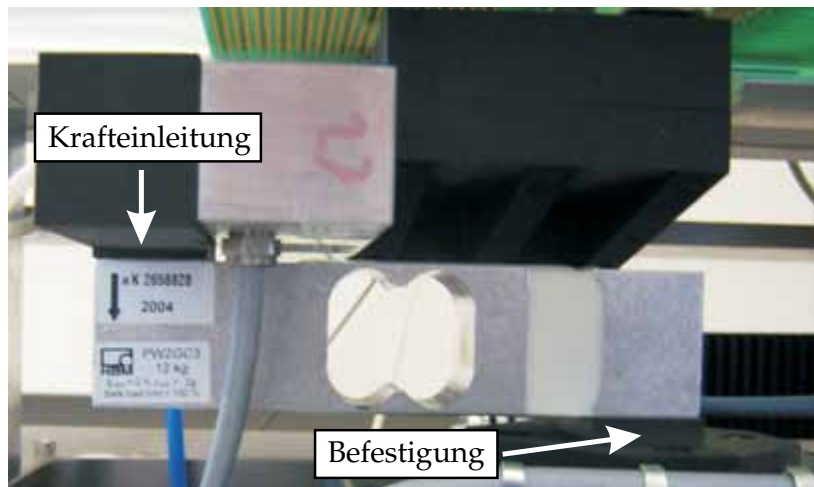
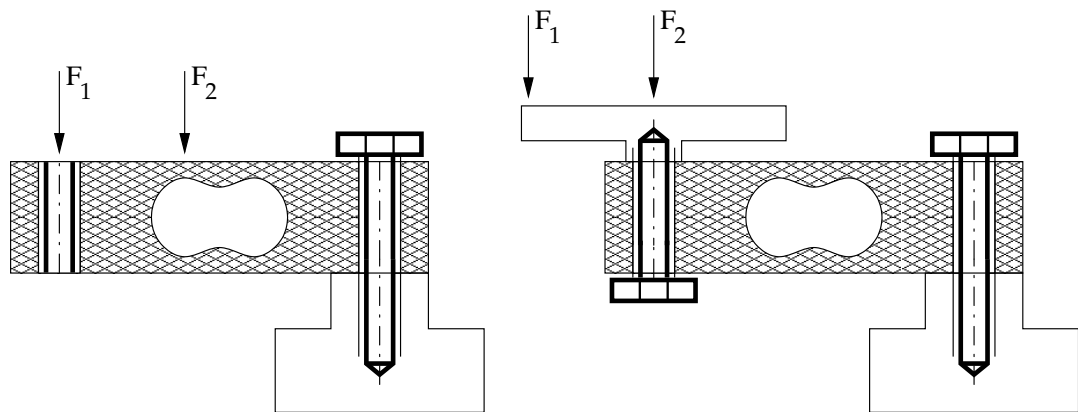


Abbildung 3.6: Foto des Sensors für die Kraft in z -Richtung (Normalkraft). Die Stellen zur Krafteinleitung und zur Befestigung sind markiert.

Eine Besonderheit dieser Sensoren stellt der kompensierte Eckenlastfehler dar. Wird die Kraft in einen Sensor nicht in den Aufnahmepunkt eingeleitet, kann es aufgrund des zusätzlichen Hebelarms zu einer Verfälschung der Messung kommen. Dies wird in Abbildung 3.7 deutlich. Die beiden Kräfte F_1 und F_2 sind betragsmäßig gleich, werden allerdings an verschiedenen Stellen des Hebelarms in den Sensor eingeleitet (Abbildung 3.7 (a)). Dies führt dazu, dass die Auslenkung, hervorgerufen durch die beiden Kräfte, unterschiedlich ist. Der Eckenlastfehler kann für eine Fläche von $A = 380 \times 380 \text{ mm}^2$ ausgeglichen werden, d.h. die Kraft kann an einem beliebigen Punkt der Fläche ausgeübt und trotzdem korrekt gemessen

werden (Abbildung 3.7 (b)). Dazu muss die Fläche bzw. Plattform jedoch mittig auf dem Krafteinleitungspunkt fixiert sein.



(a) Krafteinleitung an verschiedenen Stellen. (b) Krafteinleitung über eine mittig fixierte Plattform.

Abbildung 3.7: Schematische Darstellung des Sensors. Die beiden Kräfte F_1 und F_2 erzeugen aufgrund der unterschiedlichen Hebelarme verschiedene Drehmomente. Durch Verwendung einer Plattform und aufgrund des kompensierten Eckenlastfehlers kann eine Verfälschung der Messung verhindert werden.

3.2.2.2 Widerstandsmessung

Zur Fixierung der Probe und Kontaktierung wird ein Kupferklebeband eingesetzt. Das Klebeband wird zu einem Teil auf die Probenoberfläche und zum anderen Teil auf den Probenhalter geklebt. Somit stellt es einen elektrischen Kontakt zur Aluminiumoberfläche der zu untersuchenden Proben her und dient gleichzeitig als Fixierung der Probe auf dem Probenhalter, damit ein Verrutschen während des Probing verhindert wird. Über eine Abgreifklemme wird das Klebeband mit dem Messgerät elektrisch verbunden.

Für die Widerstandsmessung wird das *2400 C Source Meter* der Firma *Keithley* eingesetzt. Es handelt sich hierbei um ein Digitalmultimeter, in dem zusätzlich eine Strom- und Spannungsquelle integriert ist. Die Widerstandsmessung wird bei diesem Messgerät als Vierleitermessung durchgeführt und ist via *LabView*⁴⁶ fernsteuerbar.

Die Bestimmung des Widerstandes setzt sich aus einer Strom- und Spannungsmessung zusammen, bei der die Anordnung der Messgeräte entscheidend ist. Es wird in Spannungsfehlerschaltung, Stromfehlerschaltung und Vierleiterwiderstandsmessung unterschieden.

Bei der Spannungsfehlerschaltung wird zusätzlich zu der zu messenden Spannung über dem Widerstand R_L auch die Spannung U_A gemessen, die über dem Strommessgerät abfällt (Abbildung 3.8 (a)). Diese Messanordnung wird vornehmlich bei hochohmigen Lastwiderständen verwendet ($R_L > 1 \text{ M}\Omega$). Bei der Stromfehlerschaltung (Abbildung 3.8 (b)) wird nicht nur der Strom I_L durch den zu messenden Wi-

⁴⁶Für den Messplatz wird die Version 7.1 der Mess- und Steuersoftware *LabView* verwendet.

derstand, sondern auch der Strom I_V durch das Spannungsmessgerät berücksichtigt. Diese Art der Widerstandsmessung kommt hauptsächlich zur Bestimmung niederohmiger Widerstände zum Einsatz ($1\ \Omega < R_L < 1\ \text{M}\Omega$).

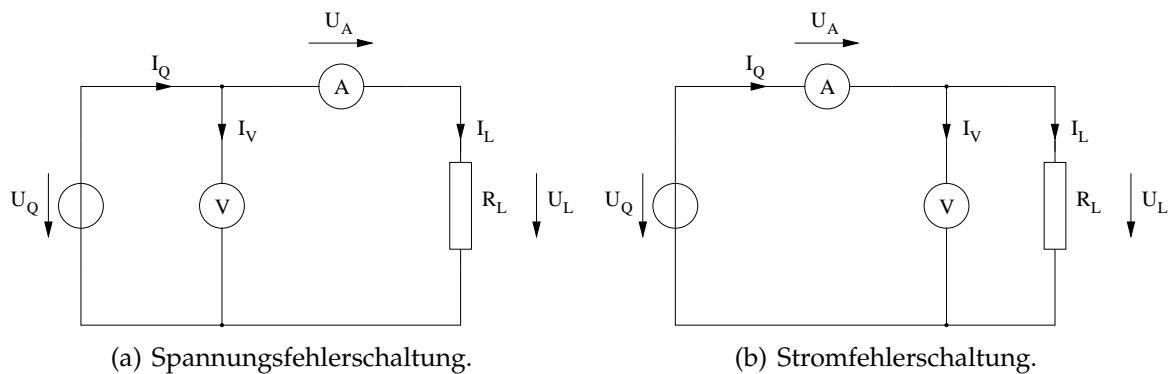


Abbildung 3.8: Unterschiedliche Varianten zur Widerstandsmessung.

Die Messung sehr niederohmiger Widerstände ($R_L < 1\ \Omega$) wird nach dem Prinzip der Vierleitermessung durchgeführt. Hierbei handelt es sich um eine Variation der Stromfehlermessung. Durch die Verwendung von vier Anschlussleitungen werden Strom und Spannung in separaten Leiterschleifen gemessen. Der Fehlerstrom durch das Spannungsmessgerät verfälscht daher das Messergebnis nicht. Bei Verwendung von kurzen Anschlussleitungen zur Messung des Spannungsabfalls über dem Widerstand kann der Leitungswiderstand vernachlässigt werden. Die Schaltung dieser Messanordnung ist in Abbildung 3.9 zu sehen.

Da es sich bei dem zu bestimmenden Kontaktwiderstand zwischen Nadel und Probing Pad um einen sehr niederohmigen Widerstand handelt, wird für den Messaufbau diese Art der Widerstandsmessung gewählt.

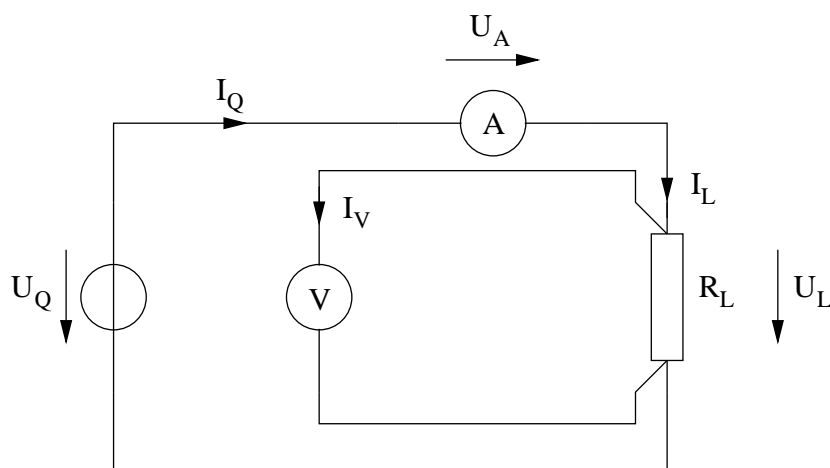


Abbildung 3.9: Schaltung der Vierleiterwiderstandsmessung.

3.2.2.3 Positionierung

Für die Positionierung in den drei Raumachsen dienen unterschiedliche Positionierungssysteme der Firma *Physik Instrumente (PI)*. Der unterste Stelltisch dient

zur Positionierung in y -Richtung. Der Stelltisch darüber bewegt den Probenhalter in x -Richtung und darauf ist der Hubtisch für die z -Richtung aufgesetzt. Die Anordnung der einzelnen Stellmotoren ist in Abbildung 3.10 zu sehen.

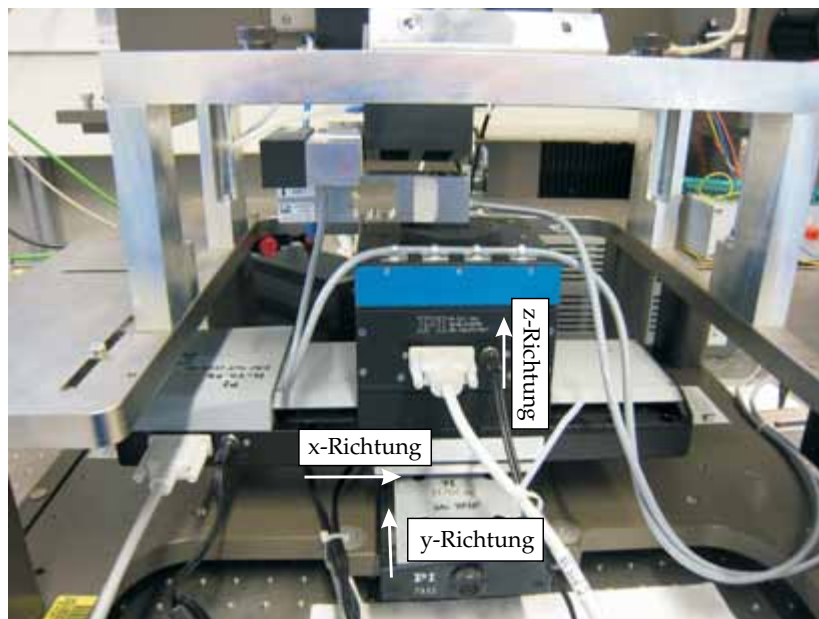


Abbildung 3.10: Foto der Positioniereinheit mit Beschriftung der Achsenrichtungen.

Im Folgenden ist die Auflistung der verwendeten Stellsysteme der Firma *Physik Instrumente (PI)* zu finden.

- In x -Richtung wird ein Stelltisch vom Typ *M511.PD* verwendet, der auf einem Gleichstrommotor basiert. Die minimale Schrittweite für diesen Motor beträgt $s = 0,5 \mu\text{m}$ [55].
- Für die y -Achse kommt ein Mikrostelltisch vom Typ *M415.DG* zum Einsatz. Als Antrieb dient ein Gleichstrom-Getriebemotor mit einer minimalen Schrittweite von $s = 0,1 \mu\text{m}$ [56].
- Der Hubtisch vom Typ *M501.1PD* wird für die Positionierung in z -Richtung eingesetzt. Der Hubmechanismus basiert ebenfalls auf einem Gleichstrommotor mit einer minimalen Schrittweite von $s < 0,1 \mu\text{m}$ [57].

Die Ansteuerung der einzelnen Motoren erfolgt über die Controllerkarte C-843.41 der Firma *PI* [58]. Diese Karte wird in den Computer eingebaut, der als Steuerrechner verwendet wird. Die komplette Steuerung der Messungen wird durch *LabView* übernommen. Eine ausführliche Beschreibung der Steuerung ist in Abschnitt 3.2.3 zu finden.

3.2.2.4 Probenhalter bzw. Zwischenkonstruktion

Um den geforderten Eigenschaften aus Steifigkeit und Gewicht Rechnung zu tragen, wird das glasfaserverstärkte Polyamid PA 66-GF30⁴⁷ gewählt. Dieser Kunst-

⁴⁷Handelsname: Ertalon 66-GF30

stoff weist eine geringe Dichte ($\rho_{\text{PA66}} = 1290 \text{ kg/m}^3$) bei gleichzeitig relativ hoher Steifigkeit bzw. Festigkeit ($E_{\text{PA66}} = 5,9 \text{ kN/mm}^2$) auf [59]. Ferner lässt sich das Material mit gängigen Zerspanungswerkzeugen bearbeiten.

An das Material für den Probenhalter bzw. für das Verbindungsstück der zwei Sensoren stellen sich besondere Anforderungen. Es muss eine geringere Dichte als Aluminium ($\rho_{\text{Al}} = 2700 \text{ kg/m}^3$, $E_{\text{Al}} = 70 \text{ kN/mm}^2$) besitzen, allerdings gleichzeitig ähnlich steif und verwindungsfest sein. Die Forderung nach einem geringen Gewicht ergibt sich daraus, dass die Belastung der Sensoren gering gehalten werden muss, um eine Auslenkung der Sensoren im Ruhezustand weitestgehend zu vermeiden. Eine zu große Belastung würde eine Verkippung des Probenhalters bedeuten, welche die Messung verfälschen könnte. Ferner ist der Hubmechanismus in z-Richtung auf eine gewisse Maximallast begrenzt.

Die Steifigkeit des Materials ergibt sich direkt aus einer der Vorgaben für die Sensoren. Das Material muss sehr biegesteif sein, damit es zu keiner Auslenkung aufgrund des Krafteintrages beim Probing kommt. Ein Nachgeben des Materials durch den Krafteintrag reduziert die Kraft der Nadel auf die Probe und macht die Messung somit unbrauchbar.

Durch die folgende Abschätzung wird dargelegt, wie stark das PA 66-GF30 bei einer Belastung von $F = 100 \text{ mN}$ nachgibt. Zur Bestimmung wird die Berechnungsformel für das Elastizitätsmodul E eines Materials herangezogen.

$$E = \frac{F \cdot L_0}{A \cdot \Delta L} \quad (3.4)$$

Es wird hierbei ein Zusammenhang zwischen der einwirkenden Kraft F auf einen Körper mit der Querschnittsfläche A sowie der Länge L_0 bezüglich der Längenänderung ΔL hergestellt. Für die Berechnung wird eine Fläche von $A = 780 \text{ mm}^2$ und eine Länge von $L_0 = 80 \text{ mm}$ verwendet, was den Dimensionen des Verbindungswinkels der beiden Sensoren entspricht. Wird Formel 3.4 nach der Längenänderung ΔL aufgelöst und die Zahlenwerte eingesetzt, ergibt sich folgender Wert:

$$\Delta L = \frac{F \cdot L_0}{A \cdot E} = \frac{100 \text{ mN} \cdot 80 \text{ mm}}{780 \text{ mm}^2 \cdot 5900 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 1,74 \mu\text{m} \quad (3.5)$$

Wird diese Auslenkung mit der Länge eines Scrub von $l = 30 \mu\text{m}$ verglichen, kann diese als akzeptabel angesehen werden. Dabei weist das Bauteil nur ein Gewicht von

$$m_{\text{PA66}} = \rho \cdot A \cdot L_0 = 1290 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 780 \text{ mm}^2 \cdot 80 \text{ mm} = 80 \text{ g} \quad (3.6)$$

auf. Aluminium hat bei diesen Ausmaßen ein Gewicht von:

$$m_{\text{Al}} = \rho \cdot A \cdot L_0 = 2700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 780 \text{ mm}^2 \cdot 80 \text{ mm} = 168 \text{ g} \quad (3.7)$$

Die Steifigkeit bei Aluminium ist im Gegensatz sehr viel höher. Da bei der Konstruktion das Gewicht allerdings den limitierenden Faktor darstellt, wird das PA 66-

GF30 für die einzelnen Elemente verwendet. Die für den Aufbau des Messplatzes benötigten Teile wie Probenhalter, Verbindungswinkel und Bodenplatte, werden aus dem Kunststoff hergestellt. Dabei kommen gängige Zerspanungstechniken zum Einsatz. Die Konstruktionszeichnungen zu den einzelnen Teilen befinden sich in Anhang A.

3.2.2.5 Messdatenaufbereitung

Für die Aufbereitung und Weiterleitung der Messsignale wird das modulare Messverstärkersystem *MGCplus* von *HBM* eingesetzt. Die Kommunikation des Systems mit dem Steuerrechner für den Messplatz erfolgt mit Hilfe des Kommunikationsprozessors. Dieser bildet den Grundbaustein des *MGCplus*-Systems und kann zusätzlich zur Messdatenspeicherung eingesetzt werden. Intern kann das Modul bis zu $5 \cdot 10^6$ Messwerte bei einer Messrate von bis zu 19.200 pro Sekunde speichern [60, S. 260]. Eine eingebaute Ethernet-Schnittstelle übermittelt die Daten an den Steuerrechner.

Als Messverstärker für die Sensorsignale dienen die Einkanal-Messverstärkerkarten vom Typ *ML30B* [60, S. 240]. Diese arbeiten mit einer Trägerfrequenz von $f_T = 600$ Hz und sind speziell für DMS-Aufnehmer ausgelegt. Der Aufnehmer wird mit einer symmetrischen, frequenzstabilen Wechselspannung, der Trägerfrequenz, gespeist. Wird der Aufnehmer mechanisch belastet, wird die Amplitude der Wechselspannung durch die Wheatstone-Brücke des Messaufnehmers moduliert. Die Verstärkung des Messsignals erfolgt mit einem Messverstärker mit Bandpassverhalten. Die maximale Messfrequenz liegt für die *ML30B* bei $f_M = 235$ Hz. Der Trägerfrequenzverstärker kann nur Frequenzen im Bereich von $f_T \pm f_{mod}$ übertragen, wie sie ein mit Wechselspannung gespeister Messaufnehmer abgibt. Dadurch können Störeinflüsse, wie beispielsweise Thermospannungen, elektrische bzw. magnetische Einstreuungen, galvanische Spannungen und Impulsstörungen des Stromnetzes, vermieden werden. Daher ermöglicht ein Trägerfrequenzverstärker eine stabile und nahezu fehlerfreie Messung. Der Nachteil besteht allerdings darin, dass keine dynamischen Messungen mit einer Frequenz von $f_M > 1$ kHz möglich sind. Dies ist im vorliegenden Fall jedoch nicht erforderlich. Die erreichte Messfrequenz des Verstärkers ist für die Durchführung der Versuche ausreichend.

3.2.3 Steuerung des Messplatzes

Die Steuerung von PROFIT erfolgt über die Mess- und Steuersoftware *LabView*. Mittels der verbauten Motorcontrollerkarte können die Motoren einzeln angesprochen und gesteuert werden. In Abbildung 3.11 ist die graphische Eingabemaske zur Steuerung zu sehen.

Die *LabView*-Steuerung bietet zusätzlich die Möglichkeit, Macros zu schreiben und dadurch den Probing-Vorgang zu automatisieren. Ein entsprechendes Beispiel ist in Anhang C zu finden. Dies ist zur Durchführung der Messungen als auch bei der Reinigung der Nadel von Vorteil.

Das Messgerät zur Widerstandsmessung ist ebenfalls an den Computer angeschlossen und kann über die Software ausgelesen werden. Die einzelnen Messwerte der

Sensoren, des Widerstandes, der Zeit und des Hubweges können direkt aus der Software heraus in einem ASCII-Format abgespeichert und anschließend mit einem entsprechenden Softwaretool ausgewertet werden. Die genaue Abfolge einer Messung ist als Flussdiagramm in Abbildung C.1 zu sehen.

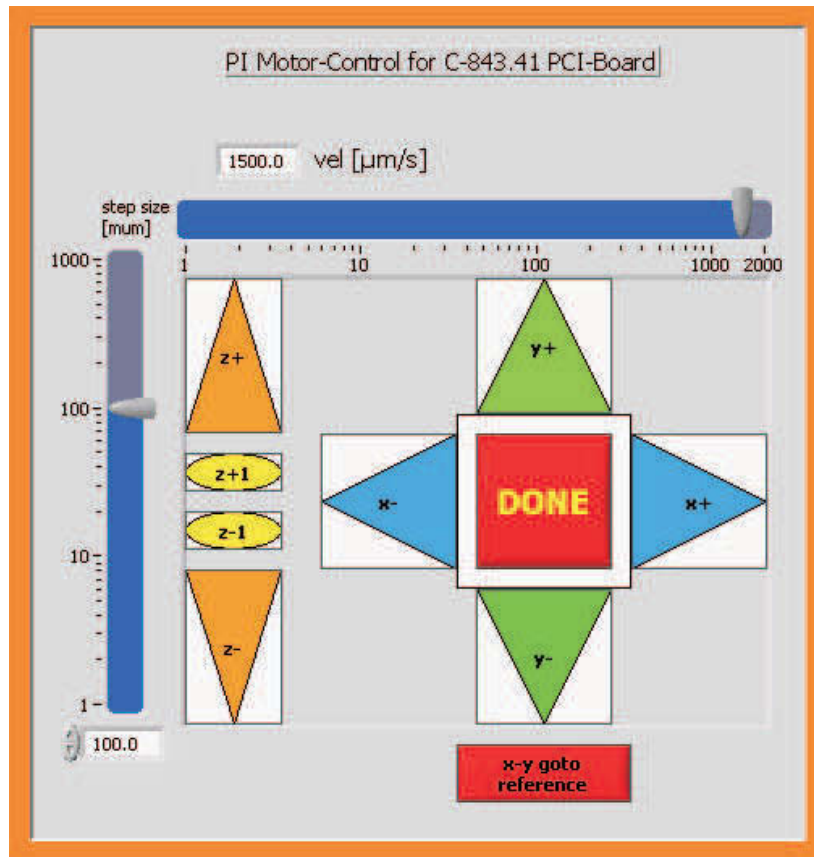


Abbildung 3.11: Screenshot der Eingabemaske zur Positionierung der Probe mittels LabView.

3.2.4 Standardmessnadel

Da die Messungen sehr stark von der Geometrie der Nadeln abhängig sind, ist für diese Arbeit ein Nadeltyp als Standard definiert, um die Messungen untereinander besser vergleichen zu können. Zum Einsatz kommen 4 Nadelkarten, die alle die gleiche Geometrie aufweisen. Diese werden im Weiteren als std #1, std #2, std #3 und std #4 bezeichnet. Die geometrischen Dimensionen sind in Abbildung 3.12 zu sehen. Die Nadelkarten werden alle von der Firma *MJC* hergestellt. Die Positionierung der Nadeln erfolgt dabei von Hand. Einzelne Messungen werden nicht mit den Standardnadelkarten untersucht. Die geometrischen Maße der Nadelkarten, die in dieser Arbeit verwendet werden, sind in Tabelle 3.2 aufgelistet und wie sich erkennen lässt, unterscheiden sich die Parameter der Standardkarten nur minimal von den weiteren Karten.

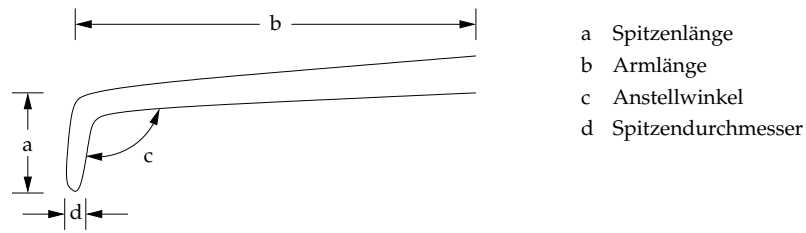


Abbildung 3.12: Schematische Darstellung einer Cantilever-Nadel.

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
std #1	400 μm	1450 μm	94°	10 μm
std #2	400 μm	1450 μm	94°	10 μm
std #3	400 μm	1450 μm	94°	10 μm
std #4	400 μm	1450 μm	94°	10 μm
#11	400 μm	1450 μm	96°	20 μm
#14	400 μm	1450 μm	96°	10 μm
#19	300 μm	1450 μm	94°	10 μm

Tabelle 3.2: Zusammenfassung der geometrischen Parameter (vgl. Abbildung 3.12) der in dieser Arbeit verwendeten Nadeln.

Kapitel 4

Theorie des Kontaktwiderstandes

Werden zwei Metalle unter äußerer Krafteinwirkung aufeinander gepresst, entsteht nicht nur ein mechanischer Kontakt, sondern auch ein elektrischer. Dieser elektrische Kontakt zwischen den beiden Metallen weist den Kontaktwiderstand R_K auf. Da reale Festkörper stets eine Rauigkeit ihrer Oberfläche aufweisen, ist die Fläche, auf der beide Metalle überlappen, nicht gleichbedeutend mit den Kontaktflächen in mechanischer und elektrischer Hinsicht. Die Oberflächenrauigkeit setzt sich aus Erhöhungen und Vertiefungen zusammen, die in der Varianz ihrer Höhe und der Abstände zueinander durch die Prozessierung bedingt sind. Eine graphische Darstellung zweier rauer Metalle, die in Kontakt zueinander gebracht werden, ist in Abbildung 4.1 zu sehen.

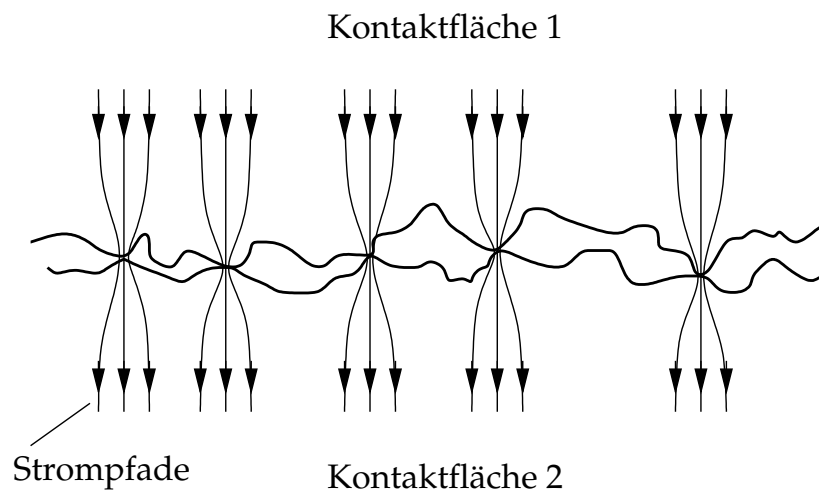


Abbildung 4.1: Darstellung der rauen Oberfläche zweier Metalle, die miteinander in Kontakt stehen.

Die sogenannte Kontaktfläche lässt sich aufgrund dieser Tatsache weiter unterteilen. Die *scheinbare Kontaktfläche* A_s stellt die Fläche dar, auf der die Metalle überlappen. Die *eigentliche Kontaktauflagefläche* A_a , setzt sich aus den mechanischen Kontaktflächen zusammen, auf denen die Materialien aufliegen. Diese mechanische Auflagefläche lässt sich hinsichtlich elektrischem Stromfluss in drei weitere Bereiche untergliedern:

- Bei metallischen Berührungsflächen⁴⁸ stehen die Metalle in direktem Kontakt zueinander und ein elektrischer Strom kann fließen.
- Quasimetallische Berührungsflächen weisen eine dünne, isolierende Fremdschicht zwischen den Metallen auf, durch die Elektronen aufgrund des Tunneleffektes ohne Verlust fließen können [61].
- Rein mechanisch tragende Kontaktflächen, die mit einer dicken Fremdschicht versehen sind, tragen aufgrund der Isolationswirkung der Fremdschicht nicht zum Stromfluss bei.

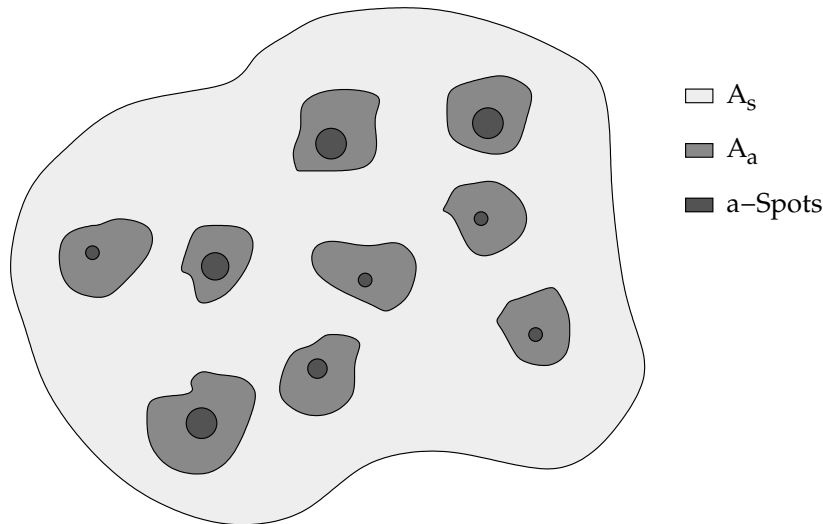


Abbildung 4.2: Schematische Darstellung der Kontaktfläche in der Draufsicht. Die Fläche A_a setzt sich aus den in Abbildung 4.1 dargestellten Berührungspunkten zusammen.

Somit lässt sich die eigentliche Kontaktauflagefläche A_a nochmals in elektrisch leitende und nicht leitende Bereiche unterteilen. Die metallischen und quasimetallischen Berührungsflächen bilden dabei die für den Stromfluss zur Verfügung stehende Fläche und werden zur *leitenden Kontaktfläche* A_l zusammengefasst.

In Abbildung 4.1 sind die Strompfade für den Stromfluss durch die a -Spots eingezeichnet. Durch die Einschnürung der Strompfade in den Kontaktflächen entsteht der sogenannte Engewiderstand R_E . Bei einem Kontaktpaar, das aus zwei unterschiedlichen Metallen besteht, muss der Engewiderstand für jedes Material einzeln bestimmt werden. Für die quasimetallischen Berührungsflächen entsteht aufgrund der Fremdschicht zwischen den Metallen der Fremdschichtwiderstand R_F . Damit kann der resultierende Kontaktwiderstand R_K , basierend auf dem hier beschriebenen Modell nach *Holm*, wie folgt angegeben werden [62, S. 9f]:

$$R_K = R_{E_1} + R_{E_2} + R_F \quad (4.1)$$

Die vorgestellte Beschreibung für den Kontaktwiderstand trifft allerdings nur für stationäre Kontakte zu. Bei dem verwendeten Hubmechanismus in z -Richtung handelt es sich um einen Schrittmotor, der für die durchzuführenden Messungen mit

⁴⁸engl. a-spots

einer Schrittweite von $s_{sw} = 1 \mu\text{m}$ verfahren wird. Nach jedem Schritt wird die Messung des elektrischen Widerstandes durchgeführt. Dadurch findet die Messung bei einem ruhenden Kontakt statt und somit kann von einer stationären Betrachtung ausgegangen werden, auf der die nachfolgenden Berechnungen beruhen.

4.1 Der Engewiderstand

Wie in Abbildung 4.2 schematisch dargestellt ist, werden die a-Spots als kreisförmige Kontaktflächen idealisiert. Wird für die einzelnen Flächen i ein Radius a_i angenommen und ist der spezifische Widerstand ρ des Kontaktmaterials gegeben, lässt sich der Engewiderstand jeweils für einen einzelnen a-Spot mit

$$R_{E1,i} = \frac{\rho_1}{4 \cdot a_i} \quad \text{und} \quad R_{E2,i} = \frac{\rho_2}{4 \cdot a_i} \quad (4.2)$$

angeben [62, S. 16]. Zusammenfassend lässt sich der gesamte Engewiderstand für die beiden Metalle mit

$$R_{E,i} = R_{E1,i} + R_{E2,i} = \frac{\rho_1 + \rho_2}{4 \cdot a_i} \quad (4.3)$$

angeben. Sind die zwei Metalle identisch ($\rho_1 = \rho_2 = \rho$), dann lässt sich die Gleichung 4.3 vereinfachen zu:

$$R_{E,i} = \frac{\rho}{2 \cdot a_i} \quad (4.4)$$

Der gesamte Engewiderstand R_E für den Kontakt ergibt sich aus der Parallelschaltung der Engewiderstände $R_{E,i}$ der einzelnen a-Spots:

$$R_E^{-1} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\rho}{2 \cdot a_i} \right)^{-1} \Rightarrow R_E = \frac{\rho}{2 \cdot \sum_{i=1}^n a_i} \quad (4.5)$$

Werden die Radien a_i über die Kontaktfläche gemittelt, dass für alle a-Spots der Radius

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n} \quad (4.6)$$

verwendet werden kann, vereinfacht sich Gleichung 4.5 zu:

$$R_E = \frac{\rho}{2 \cdot n \cdot a} \quad (4.7)$$

Wird die Kraft, mit der die beiden Kontaktmaterialien aufeinander gedrückt werden, stetig vergrößert, so findet die plastische Verformung der Materialoberfläche

statt. In diesem Fall kann die Kontaktauflagefläche A_a in Abhängigkeit von der ausgeübten Kraft F angegeben werden mit:

$$F = H \cdot A_a \quad (4.8)$$

Die Kontaktauflagefläche ist proportional zur einwirkenden Kraft. Als Proportionalitätskonstante dient die *Meyer'sche Härte* oder auch Kontakthärte H (Werte siehe Tabelle 4.1). Handelt es sich um zwei unterschiedliche Metalle, wird die Härte des weicheren Materials verwendet, da dieses durch den Krafteintrag zuerst verformt wird. Diese ideale Betrachtung kann so mittels Experimenten jedoch nicht vollständig bestätigt werden. Durch die wachsende Einkerbung des einen Kontaktmaterials in das andere können durch weitere Erhöhungen in der Oberfläche neue Kontaktflächen gebildet werden. Dadurch entstehen oberflächliche, elastische Verformungen, die zu einer Korrektur von Gleichung 4.8 führen:

$$F = \zeta \cdot H \cdot A_a \quad (4.9)$$

Der Korrekturfaktor ζ kann theoretisch Werte zwischen $0 < \zeta < 1$ annehmen. Allerdings haben Messungen von *Holm* gezeigt, dass Werte von $0,1 < \zeta < 0,3$ für Messungen mit ausreichendem Anpressdruck von

$$p = \frac{F}{A_s} > 10^3 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \quad (4.10)$$

erreicht werden [62, S. 30].

Die nachfolgende Abschätzung macht deutlich, dass diese Bedingung für die in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Messungen erfüllt ist. Eine typische Kontaktnadel weist einen Spitzenradius von $r = 10 \mu\text{m}$ auf und als Kontaktkraft wird $F = 1 \text{ mN}$ angenommen, was dem Auflösebereich des Messplatzes entspricht. Wird die Nadelspitze als Halbkugel idealisiert, ergibt sich für den Anpressdruck:

$$p = \frac{1 \text{ mN}}{\pi \cdot 100 \mu\text{m}^2} = 3,18 \cdot 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \quad (4.11)$$

Somit ist die Bedingung aus Gleichung 4.10 erfüllt und für die weiteren Betrachtungen wird für ζ ein Wert von $\zeta = 0,3$ gewählt.

Wird die Kontaktauflagefläche A_a als kreisförmig angesehen, kann Gleichung 4.9 geschrieben werden als:

$$F = \zeta \cdot H \cdot \pi \cdot r^2 \quad (4.12)$$

$$r = \sqrt{\frac{F}{\pi \cdot \zeta \cdot H}} \quad (4.13)$$

Werden die einzelnen a-Spots mit dem Radius a zu einer gesamten Kontaktfläche mit dem Radius $r = n \cdot a$ zusammengefasst, so kann mit den Gleichungen 4.7

und 4.13 der Engewiderstand in Abhängigkeit von der Kontaktkraft geschrieben werden:

$$R_E = \frac{\rho}{2 \cdot r} = \frac{\rho}{2} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot \zeta \cdot H}{F}} \quad (4.14)$$

Diese Betrachtungen sind allerdings nur dann gültig, solange die Radien a der a-Spots größer sind als die mittlere freie Weglänge λ der Elektronen. Es muss also gelten: $a > \lambda$. Für den umgekehrten Fall ($\lambda > a$), muss der Engewiderstand mittels des *Sharvin Mechanismus* für einen einzelnen a-Spot mit

$$R_{E,S,i} = \frac{\lambda \cdot (\rho_1 + \rho_2)}{2\pi \cdot a_i^2} \quad (4.15)$$

angegeben werden [63]. Für λ wird das arithmetische Mittel ($\lambda = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}$) aus den unterschiedlichen mittleren freien Weglängen der beiden Metalle verwendet. Da die Beschreibungen nach *Holm* (Gleichung 4.4) und *Sharvin* (Gleichung 4.15) nur für einen gewissen Bereich gültig sind, haben *Mikrajuddin et al.* diese zu einer einzigen Gleichung zusammengefasst [64]:

$$R_{E,M,i} = \frac{4\lambda \cdot (\rho_1 + \rho_2)}{9\pi \cdot a_i^2} + \frac{\rho_1 + \rho_2}{2\pi \cdot a_i} \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{\lambda}{a_i} \cdot x\right) \cdot \frac{\sin(\pi \cdot x)}{\pi \cdot x} dx \quad (4.16)$$

Für die beiden Grenzfälle $a > \lambda$ und $\lambda > a$ strebt die Gleichung 4.16 gegen den Engewiderstand nach *Holm* bzw. *Sharvin*. Mit Hilfe von einer Substitution der Integrationsvariablen x durch $y = \pi \cdot x$ und folglich $\frac{dy}{dx} = \pi$ in Gleichung 4.16 ergibt sich:

$$R_{E,M,i} = \frac{4\lambda \cdot (\rho_1 + \rho_2)}{9\pi a_i^2} + \frac{\rho_1 + \rho_2}{2\pi^2 a_i} \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{\lambda}{\pi a_i} y\right) \frac{\sin y}{y} dy. \quad (4.17)$$

Mit der Lösung

$$\int_0^{\infty} \exp(-bx) \frac{\sin x}{x} dx = \arctan \frac{1}{b} \quad \text{für } b > 0 \quad (4.18)$$

nach *Bronstein* [65, S. 1054] kann Gleichung 4.17 wie folgt geschrieben werden:

$$R_{E,M,i} = \frac{4\lambda \cdot (\rho_1 + \rho_2)}{9\pi a_i^2} + \frac{\rho_1 + \rho_2}{2\pi^2 a_i} \arctan \frac{\pi a_i}{\lambda} \quad (4.19)$$

In Abbildung 4.3 sind die Engewiderstände nach *Holm* (blau), *Sharvin* (rot) und *Mikrajuddin* (schwarz) gegenüber dem Verhältnis $v = \frac{2a_i}{\lambda}$ für die Kontaktkombination Aluminium - Wolfram aufgetragen.

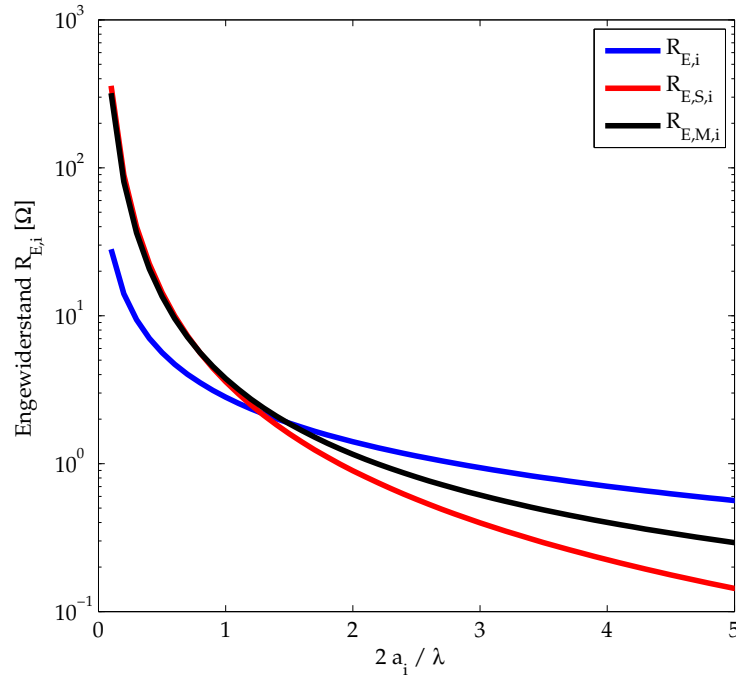


Abbildung 4.3: Engwiderstände $R_{E,i}$ nach Gleichung 4.4, $R_{E,S,i}$ nach Gleichung 4.15 und $R_{E,M,i}$ nach Gleichung 4.19 gegenüber dem Verhältnis $\frac{2a_i}{\lambda}$ für das Kontaktpaar Aluminium – Wolfram.

Speziell im Bereich $\frac{2a_i}{\lambda} > 1,3$ ist die Abweichung der beiden verschiedenen Modelle sichtbar. Um abschätzen zu können, ob der *Sharvin Mechanismus* für die hier durchgeführten Messungen relevant ist, wird im folgenden Abschnitt zunächst die mittlere freie Weglänge der Elektronen im Metall bestimmt.

4.1.1 Mittlere freie Weglänge der Elektronen

Allgemein wird die Stromdichte \vec{j} für einen mit dem Strom I durchflossenen Leiter mit der Querschnittsfläche A angegeben mit:

$$I = \iint_A \vec{j} \cdot d\vec{A} \quad (4.20)$$

Somit lässt sich die Stromdichte schreiben als:

$$\vec{j} = -n \cdot e \cdot \vec{v}_d \quad (4.21)$$

Wobei n die Anzahl der freien Elektronen pro Volumeneinheit, e die Elementarladung eines Elektrons und \vec{v}_d die mittlere Driftgeschwindigkeit der Elektronen darstellen. Zur Bestimmung der Driftgeschwindigkeit wird zunächst die Kraft \vec{F}_E auf ein freies Elektron im elektrischen Feld \vec{E} betrachtet:

$$\vec{F}_E = -e \cdot \vec{E} \quad (4.22)$$

Für die Trägheitskraft \vec{F}_a des Elektrons ergibt sich:

$$\vec{F}_a = m \cdot \vec{a} = m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (4.23)$$

Im Kräftegleichgewicht gilt:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -\frac{e}{m} \cdot \vec{E} \quad (4.24)$$

Wird nun eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung angenommen, ergibt die Integration:

$$\vec{v} = -\frac{e}{m} \cdot t \cdot \vec{E} \quad (4.25)$$

Die Geschwindigkeit setzt sich aus der thermischen Geschwindigkeit v_{th} , bedingt durch die Umgebungstemperatur, und der Driftgeschwindigkeit v_d zusammen. Da die thermische Geschwindigkeit über viele Stöße gemittelt zu Null wird, ist nur noch die Driftgeschwindigkeit relevant, wodurch $\vec{v} = \vec{v}_d$ gesetzt werden kann. Somit wird die Zeit t als mittlere Stoßzeit τ bezeichnet, nach der das Elektron einen Stoß ausführt. Dadurch kann die Driftgeschwindigkeit mit Gleichung 4.25 geschrieben werden:

$$\vec{v}_d = -\frac{e}{m} \cdot \tau \cdot \vec{E} \quad (4.26)$$

Die Stoßzeit τ kann geschrieben werden als

$$\tau = \frac{\lambda}{v_F}, \quad (4.27)$$

wobei λ die mittlere freie Weglänge der Elektronen und v_F die Fermi-Geschwindigkeit darstellen. Die Fermi-Geschwindigkeit kann in Abhängigkeit von der Fermi-Energie E_F und der Elektronenmasse m wie folgt bestimmt werden:

$$v_F = \sqrt{\frac{2 \cdot E_F}{m}} \quad (4.28)$$

Da die Stromdichte proportional mit der elektrischen Feldstärke \vec{E} durch den spezifischen Leitwert σ verknüpft ist, ergibt sich:

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E} = -n \cdot e \cdot \vec{v}_d \quad (4.29)$$

Folglich kann die mittlere freie Weglänge der Elektronen durch das Einsetzen der Gleichungen 4.26 und 4.27 in die Gleichung 4.29 mit

$$\lambda = \frac{\sigma \cdot m \cdot v_F}{n \cdot e^2} \quad (4.30)$$

angegeben werden. Die Anzahl der freien Elektronen n im Metall lässt sich durch

$$n = \frac{8 \cdot \sqrt{2} \cdot \pi \cdot m^{3/2}}{h^3} \left(\frac{2}{3} \cdot E_F^{3/2} \right) \quad (4.31)$$

bestimmen. Die berechneten Werte für Gold, Aluminium und Wolfram sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst.

	Gold	Aluminium	Wolfram
E_F [eV]	5,53	11,7	7,46
H [N/m ²]	$2 \cdot 10^8$	$1,8 \cdot 10^8$	$12 \cdot 10^8$
σ [$(\mu\Omega\text{cm})^{-1}$]	0,426	0,377	0,2
ρ [$\mu\Omega\text{cm}$]	2,35	2,655	5,0
v_F [m/s]	$1,39 \cdot 10^6$	$2,03 \cdot 10^6$	$1,62 \cdot 10^6$
λ [nm]	35,7	14,9	12,4
n [m^{-3}]	$5,91 \cdot 10^{28}$	$1,82 \cdot 10^{29}$	$9,25 \cdot 10^{28}$

Tabelle 4.1: Bei den Werten für E_F [66,67], H [62, S. 436] und ρ , respektive σ [68] handelt es sich um Literaturwerte. Die Werte für v_F (Gleichung 4.28), λ (Gleichung 4.30) und n (Gleichung 4.31) sind mit den angegebenen Gleichungen berechnet.

Mit der im folgenden Abschnitt berechneten mittleren freien Weglänge für die Elektronen wird abgeschätzt, inwieweit der Engewiderstand nach *Sharvin* für den vorliegenden Fall in dieser Arbeit relevant ist [63]. Für das Beispiel Aluminium wird eine mittlere freie Weglänge von $\lambda = 14,9$ nm berechnet. Resultierend daraus kann nach Gleichung 4.12 und $r < \lambda$ die Kontaktkraft berechnet werden, bis zu welcher der *Sharvin Mechanismus* berücksichtigt werden muss:

$$F < \xi \cdot H \cdot \pi \cdot \lambda^2 = 38 \text{ nN} \quad (4.32)$$

Da für die Messungen ein Kraftbereich in lateraler Richtung von $F_L = 50$ mN zu erwarten ist, stellt die berechnete Kraft nur $6,99 \cdot 10^{-5} \%$ von der Maximalkraft dar. Aus diesem Grund kann der Engewiderstand nach *Sharvin* für die hier durchgeführten Betrachtungen vernachlässigt und der Engewiderstand nach Gleichung 4.14 für die komplette Kontaktfläche mit

$$R_E = \frac{\rho}{2} \cdot \sqrt{\frac{\pi \xi H}{F}} \quad (4.33)$$

angegeben werden.

4.2 Der Fremdschichtwiderstand

Wie bereits erwähnt, wird der Fremdschichtwiderstand durch eine dünne, isolierende Schicht zwischen den beiden Metallen hervorgerufen. Bei diesen Schichten handelt es sich vornehmlich um die natürlichen Oxide der Metalle und um Kontaminationen aufgrund der Umgebungsbedingungen. Vereinfacht wird der Fremdschichtwiderstand R_F nach *Holm* wie folgt beschrieben [62, S. 42]:

$$R_F = \frac{\sigma_F}{A_l} = \frac{\sigma_F}{\pi \cdot r^2} \quad (4.34)$$

Die Fremdschicht ist dabei gleichförmig über die stromführende Fläche A_l verteilt, wobei σ_F den spezifischen Widerstand pro Fläche dieser Schicht darstellt. Der spezifische Flächenwiderstand σ_F wird auch als Tunnelwiderstand bezeichnet. Weist die Fremdschicht einen spezifischen Widerstand ρ_F auf und stellt d die Dicke der Schicht dar, kann σ_F bestimmt werden durch:

$$\sigma_F = \rho_F \cdot d \quad (4.35)$$

Für sehr geringe Schichtdicken d erzeugt der Tunneleffekt einen Stromfluss unabhängig von ρ_F , selbst wenn der spezifische Widerstand endlich ist. Für ausreichend dünne Schichten zwischen den beiden Metallen haben *Fisher et al.* gezeigt, dass ein Stromfluss aufgrund des Tunneleffekts möglich ist [61]. *Simmons* entwickelte daraus eine allgemein gültige Theorie für den elektrischen Tunneleffekt zwischen zwei gleichen Elektroden, die von einer dünnen isolierenden Schicht getrennt sind [69]. Aufgrund seiner theoretischen Betrachtung kann der spezifische Flächenwiderstand σ_F mit Hilfe der Stromdichte J und der angelegten Spannung U ermittelt werden:

$$\sigma_F = \frac{U}{J} \quad (4.36)$$

Für natürliches Aluminiumoxid wird der spezifische Flächenwiderstand mit $\sigma_F = 5 \cdot 10^{-10} \Omega\text{m}^2$ angegeben [70, 71]. Dabei wurde vorausgesetzt, dass das natürliche Aluminiumoxid eine Schichtdicke von $d = 1,7 \text{ nm} \dots 2,0 \text{ nm}$ aufweist [72, 73]. Für Gold, nach einer 14-tägigen Lagerung an Luft, wird der spezifische Flächenwiderstand mit $\sigma_F = 5 \cdot 10^{-13} \Omega\text{m}^2$ angegeben. Diese Werte beruhen auf Ergebnissen durchgeführter Versuche [74, S. 35]. Eine Berechnung des Flächenwiderstandes aufgrund der theoretischen Betrachtung erweist sich als sehr schwierig, da die Kraftabhängigkeit weit stärker von der Form der Kontaktpunkte und der Oberflächenbeschaffenheit der Kontakte, als auch der Dicke sowie den mechanischen und elektrischen Eigenschaften der Fremdschicht beeinflusst wird.

4.3 Der resultierende Kontaktwiderstand

Zusammenfassend kann der gesamte Kontaktwiderstand mit Hilfe der Gleichungen 4.1, 4.14 und 4.34 geschrieben werden als:

$$R_K = \frac{\rho}{2 \cdot r} + \frac{\sigma_F}{\pi \cdot r^2} \quad (4.37)$$

Wird der Kontaktwiderstand R_K nun mit Hilfe der Gleichung 4.13 in Abhängigkeit der Kontaktkraft ausgedrückt

$$R_K = \frac{\rho}{2} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot \zeta \cdot H}{F}} + \frac{\sigma_F \cdot \zeta \cdot H}{F}, \quad (4.38)$$

ergibt sich der in Abbildung 4.4 zu sehende Kurvenverlauf. Zusätzlich sind der Engewiderstand R_E und der Fremdschichtwiderstand R_F dargestellt für das Kontaktpaar Aluminium - Wolfram.

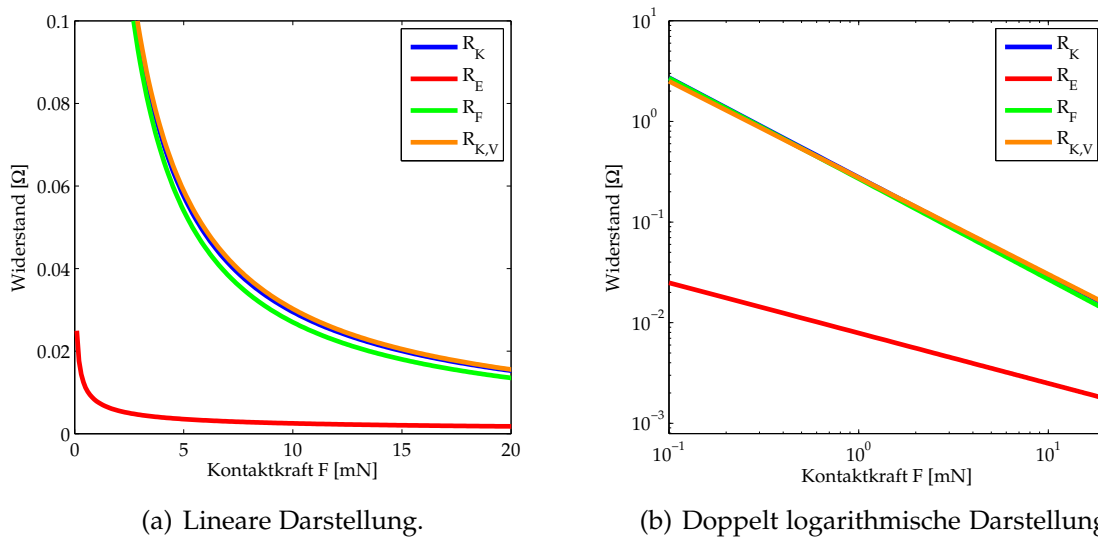


Abbildung 4.4: Kurvenverläufe der einzelnen Widerstände. R_E nach Gleichung 4.33, R_F nach Gleichung 4.34, R_K nach Gleichung 4.38 und $R_{K,V}$ nach Gleichung 4.39.

Hierbei wird deutlich, dass der resultierende Kontaktwiderstand hauptsächlich vom Fremdschichtwiderstand abhängig ist [75]. Für fremschichtbehaftete Kontaktwiderstände ist bei *Vinaricky* eine Abhängigkeit des Kontaktwiderstandes $R_{K,V}$ von der Kontaktkraft F durch

$$R_{K,V} = K \cdot \rho \cdot F^{-n} \quad (4.39)$$

gegeben [74, S. 37f]. K stellt dabei die Proportionalitätskonstante dar und für den Exponenten gilt $n \leq 0,9$. In Abbildung 4.4 ist ferner der Kontaktwiderstand $R_{K,V}$ nach Gleichung 4.39 und dem Exponenten $n = 0,9$ eingezeichnet, was das Kontaktwiderstandsverhalten nach Gleichung 4.37 sehr gut widerspiegelt.

In Abbildung 4.5 sind die Kontaktwiderstände für einen Wolfram-Kontakt auf einem Gold- bzw. Aluminium-Substrat gegen die Kontaktkraft aufgetragen. Hierbei wird deutlich, dass ein wesentlich kleinerer Kontaktwiderstand auf Gold erzielt wird als auf Aluminium. Dies ist hauptsächlich auf den größeren Flächenwiderstand von Aluminium zurückzuführen. Auf Gold zeigt der Kontaktwiderstand

einen eher rechteckigen Kurvenverlauf, der auf Aluminium ist deutlich abgerundeter.

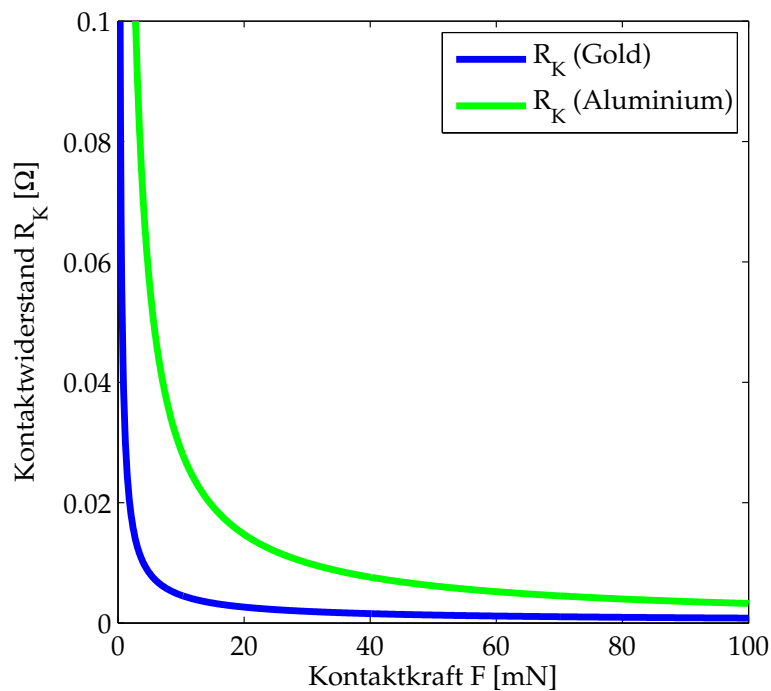
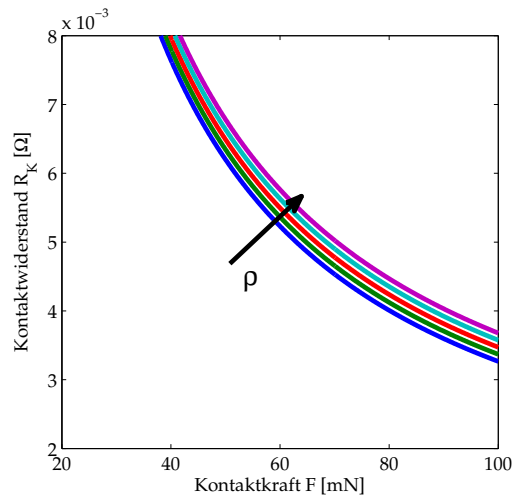


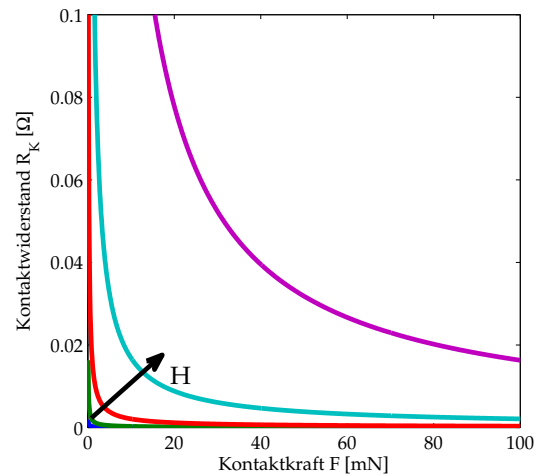
Abbildung 4.5: Kontaktwiderstände R_K nach Gleichung 4.38 gegenüber der Kontaktkraft für die Kontaktpaare Wolfram – Gold bzw. Wolfram – Aluminium.

Um den Einfluss einzelner Parameter der Gleichung 4.38 auf den Kurvenverlauf zu beleuchten, werden der Härtegrad, der spezifische Flächenwiderstand und der spezifische Widerstand innerhalb realistischer Grenzen variiert. Die Variationen der einzelnen Parameter sind in Tabelle 4.2 aufgelistet. Wie aus Abbildung 4.6 (a) ersichtlich ist, wirkt sich eine Änderung des spezifischen Widerstandes nur minimal auf das Kurvenverhalten aus. Da es sich bei Aluminium um einen elektrischen Leiter handelt, der bereits einen niedrigen Widerstand aufweist, kann durch einen Wechsel zu Kupfer ($\rho_{Cu} = 1,7 \mu\Omega\text{cm}$) als Padmaterial keine Verbesserung des Kontaktwiderstandes erzielt werden. Anders sieht das bereits beim Härtegrad des verwendeten Substrats aus (Abbildung 4.6 (b)). Hierbei zeigt sich, dass durch die Verwendung eines härteren Materials der Kontaktwiderstand höher wird und eine "Verrundung" des Kurvenverlaufes mit zunehmender Materialhärte einsetzt. Die gravierendsten Änderungen des Kontaktwiderstandsverhaltens sind aufgrund einer Variation des spezifischen Flächenwiderstandes zu verzeichnen (Abbildung 4.6 (c)). Je geringer dieser ist, desto geringer wird der Kontaktwiderstand. Zusätzlich strebt das Kurvenverhalten gegen einen nahezu rechteckigen Verlauf für geringe Werte des Flächenwiderstandes. Dies zeigt sich auch deutlich an Abbildung 4.5 bei der Gegenüberstellung des Kontaktwiderstandes von Gold und Aluminium. Die beiden Materialien weisen ähnliche Eigenschaften bzgl. der Härte und des spezifischen Widerstandes auf. Da Aluminium allerdings ein natürliches Oxid auf der Oberfläche bildet, ist der spezifische Flächenwiderstand um drei Größenordnungen höher, wodurch die Unterschiede in den Kurven begründet sind. Daher wird

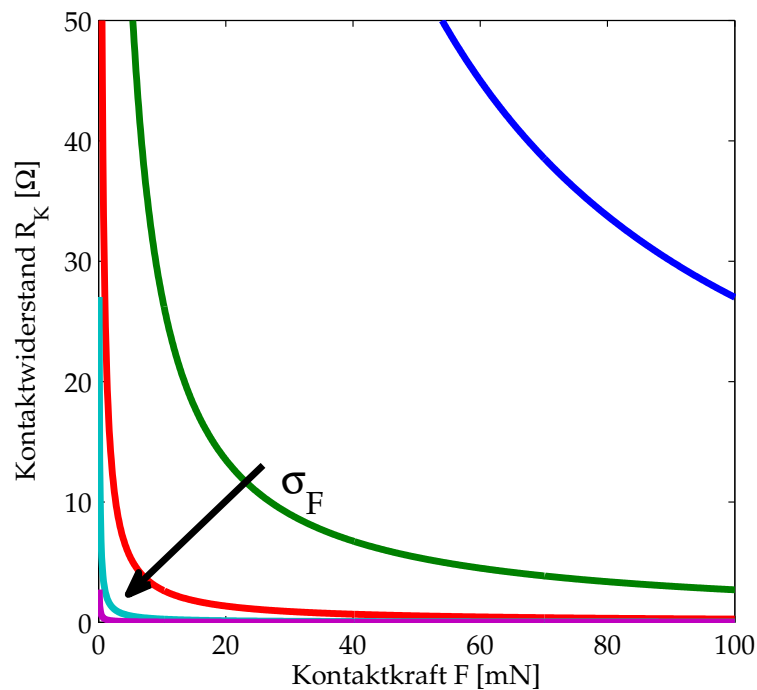
im folgenden Kapitel der Einfluss des natürlichen Metalloxides auf das Verhalten beim Probing mittels Messungen des in Kapitel 3 vorgestellten PROFIT überprüft und genauer untersucht.



(a) Variation des spezifischen Widerstandes ρ .



(b) Variation des Härtegrades H .



(c) Variation des Flächenwiderstandes σ_F .

Abbildung 4.6: Variation einzelner Parameter des Kontaktwiderstandes R_K nach Gleichung 4.38 aufgetragen gegenüber der Kraft. Variationen für das Kontaktpaar Wolfram – Aluminium.

	blau	grün	rot	türkis	lila
σ_F [Ωm^2]	$5 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{-12}$
ρ [$\mu\Omega\text{cm}$]	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5
H [N/m^2]	10^5	10^6	10^7	10^8	10^9

Tabelle 4.2: Werte für die Variation der einzelnen Parameter des Kontaktwiderstandes. Die zugehörigen Kurvenverläufe sind in Abbildung 4.6 dargestellt.

Kapitel 5

Einfluss des natürlichen Metalloxides auf das Probing-Verhalten

Um Untersuchungen auf unterschiedlichen Materialsystemen durchführen zu können bzw. um den Einfluss des natürlichen Metalloxides zu bestimmen, müssen zunächst Proben für die Messungen hergestellt werden. Es werden Messungen auf unterschiedlichen Materialsystemen durchgeführt und deren Unterschiede aufgezeigt. Danach wird auf die mechanischen Oberflächenbeschädigungen durch die Nadeln eingegangen und zusätzlich mögliche Reinigungsverfahren zur Entfernung der Oxidschicht auf den Probing Pads präsentiert.

5.1 Probenherstellung

5.1.1 Substratreinigung

Die Grundsubstrate werden zunächst nasschemisch gereinigt und von dem Siliziumdioxid auf der Oberfläche befreit, das nach der Herstellung der Wafer als Schutzschicht auf der Oberfläche erzeugt wird. Dies geschieht durch einen Ätzschritt mittels Flusssäure⁴⁹. In diesem Fall kommt gepufferte Flusssäure⁵⁰ zum Einsatz, die aus wässriger Lösung durch Zugabe von Ammoniumfluorid⁵¹ entsteht. Dabei stabilisiert das Ammoniumfluorid den pH-Wert der Lösung, wodurch eine Reduzierung der Ätzrate von Photolack erreicht wird. Dieser Effekt spielt bei der ganzflächigen Entfernung des Schutzoxides allerdings keine Rolle. Das Ende des Reinigungsschrittes kann durch eine optische Kontrolle erfolgen. Die SiO₂-Schicht weist ein hydrophiles Verhalten auf, sobald dieses nach hydrophob umschlägt, ist das Oxid vollständig entfernt. Der Ätzreaktion liegt folgende Reaktionsgleichung zu Grunde [76]:

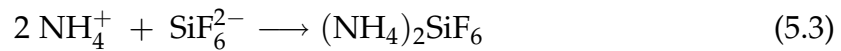
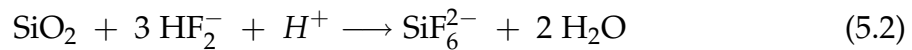


⁴⁹chemisches Formelzeichen: HF

⁵⁰engl. buffered HF, BHF

⁵¹chemisches Formelzeichen: NH₄F

Diese Reaktionsgleichung kann in die folgenden Schritte aufgeteilt werden:



Das Augenmerk dieser Arbeit liegt nicht auf der Substratreinigung. Hierfür wird auf eine grundlegende Übersicht zur Substratreinigung bei *Bayerstadler* hingewiesen [77, S. 24f]. Mit Hilfe der dort evaluierten Prozessparameter ist die Substratreinigung der verwendeten Proben durchgeführt worden. Diese Parameter können in Tabelle B.1 nachgeschlagen werden.

5.1.2 Schichtabscheidung

Die gereinigten Substrate werden anschließend in eine Magnetron-Sputteranlage der Firma *Leybold-Heraeus* eingeschleust und dort die Metallisierungsebenen aufgesputtert. Während des Sputterprozesses liegen die Substrate auf einer rotierenden Probenhalterung, die sich unter dem Sputtertarget hindurch bewegt. Eine ausführliche Beschreibung des Anlagenkonzeptes einer PVD⁵² Sputteranlage kann bei *Widmann* nachgeschlagen werden [34, S. 30f].

Als Metallisierungsebene wird der Standardschichtstapel aus Titan, Titannitrid und Aluminium verwendet. Die verwendeten Prozessparameter für die Abscheidung sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

	Titan	Titannitrid	Aluminium
Modus	DC	HF	DC
Spannung [V]	350	—	350
Leistung [W]	—	1500	—
Ar-Druck [mbar]	$8 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$
N ₂ -Druck [mbar]	—	$3 \cdot 10^{-3}$	—
Zeit [min]	2,5	45	4 × 60
Schichtdicke [nm]	45	100	1000

Tabelle 5.1: Parameter zur Herstellung der Metallisierung.

Wie bereits in Kapitel 2 gezeigt, hat reines Aluminium ein hohes Diffusionsverhalten in Silizium, was zu sog. "spiking" führt. Um dies zu unterbinden, wird zum einen eine Diffusionsbarriere aus Ti/TiN verwendet, zum anderen kann durch die Zugabe von 1 % Silizium zum Aluminium eine Legierung erzeugt werden, die das

⁵²Abk. für engl. physical vapour deposition (PVD)

Spiking verhindert. Bei diesem Verhältnis liegt der Silizium-Anteil über der Löslichkeitsgrenze im Aluminium, wodurch die Diffusion verhindert wird. Aufgrund der Diffusionsbarriere wäre der Einsatz von AlSi zwar nicht notwendig, wird aber am Institut für Physik trotzdem als Standardmetallisierungssystem verwendet.

In der Industrie werden mittlerweile AlCu-Legierungen mit einem Kupferanteil von 0,5 % eingesetzt, um die Elektromigrationsfestigkeit zu erhöhen. Da aber Kupfer tiefe Störstellen im Silizium generiert und nur eine Sputteranlage am Institut für Physik zur Verfügung steht, wird ausschließlich AlSi als Metallisierung eingesetzt, um eine Querkontamination innerhalb der Anlage durch Kupfer während anderer Sputterprozesse zu vermeiden.

Die in dieser Arbeit verwendeten Aluminiumproben sind alle mittels der oben beschriebenen Prozessschritte gereinigt und die einzelnen Schichten aufgewachsen worden. Die Metallisierung wird dabei ganzflächig auf dem Substrat aufgebracht und nicht weiter strukturiert. Die Proben für die Messungen auf Gold sind von der Firma *Infineon Technologies AG* zur Verfügung gestellt und weisen eine Schichtdicke des Goldes von $d = 550 \text{ nm}$ auf (Probe: 18065/1).

5.2 Messungen auf unterschiedlichen Materialsystemen

5.2.1 Messung auf Gold

Da es sich bei Gold um ein edles Metall handelt, das de facto kein natürliches Oxid ausbildet und der spezifische Widerstand ($\rho_{\text{Au}} = 2,35 \mu\Omega\text{cm}$) [68, S. 1509] im Bereich von Aluminium ($\rho_{\text{Al}} = 2,655 \mu\Omega\text{cm}$) [68, S. 277] liegt, dienen die Messungen auf Gold als Ausgangspunkt für weitere Untersuchungen. Gold wird in der Halbleiterproduktion vornehmlich im Back-end, beispielsweise für Bonddrähte, verwendet, da es ebenfalls wie Kupfer eine sehr hohe Diffusionsgeschwindigkeit in Silizium aufweist und somit für den Einsatz im Front-end der Produktion eher ungeeignet ist.

Der gute spezifische Widerstand und die Eigenschaften als Edelmetall lassen bei Gold auf einen sehr guten Kontakt zwischen Metalloberfläche und Nadelspitze schließen. Daher wird Gold häufig als Beschichtung für Kontaktflächen bei Schaltern oder Steckern verwendet [78]. Zur Bestätigung ist der Kontaktwiderstand gegenüber der Zeit in Abbildung 5.1 zu erkennen. Der Kurvenverlauf zeigt das typische Badewannenverhalten. Der Verlauf auf Gold zeigt einen annähernd rechteckigen Kurvenverlauf während Touchdown und Lift-off der Nadel. Bei den durchgeführten Messungen mit einem Overdrive von $s_{OD} = 65 \mu\text{m}$ ergibt sich ein minimaler Kontaktwiderstand von $R_K = 0,53 \Omega$. In der Industrie wird häufig ein Kontaktwiderstand von $R_K \leq 0,5 \Omega$ gefordert [22]. Der verwendete Probing-Parametersatz #3 ist im Anhang B zu finden.

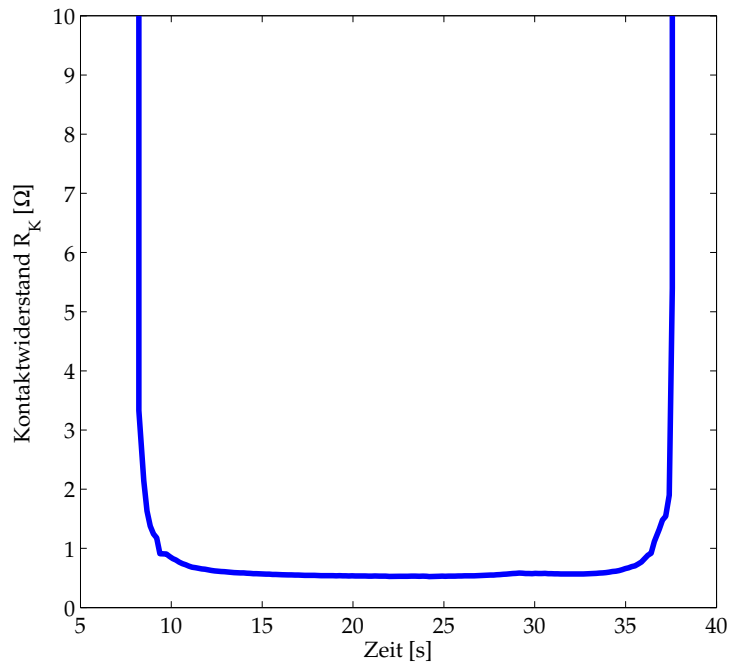


Abbildung 5.1: Messergebnis des Kontaktwiderstandes einer einzelnen Messung auf Gold gegenüber der Zeit (Probe: 18065/1). Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel std #4.

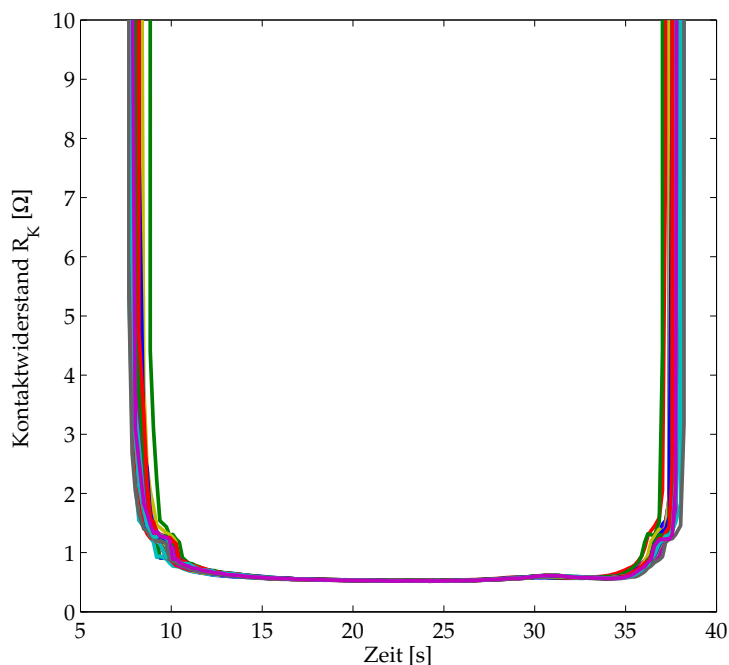


Abbildung 5.2: Messergebnisse für 40 Touchdowns des Kontaktwiderstandes auf Gold gegenüber der Zeit (Probe: 18065/1). Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel std #4.

In Abbildung 5.1 ist nur eine einzelne Messung dargestellt. Der Verlauf des minimalen Kontaktwiderstandes über 40 Messungen (Abbildung 5.2) zeigt keine nen-

nenswerte Steigerung des Widerstandes. Es ist ferner eine sehr geringe Varianz zwischen den einzelnen Messungen zu erkennen. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass der Kontaktwiderstand auf Gold als stabil beschrieben werden kann und eine Verunreinigung der Nadel nicht stattfindet.

Als Edelmetall bildet Gold auf der Oberfläche keine geschlossene Oxidschicht [68, S. 1504f]. Somit kann kein Isolationseffekt zwischen Nadel und Oberfläche erzeugt werden. Mögliche Verunreinigungen, welche die Nadel beim Probing aufnimmt, können nur aus reinem Gold bestehen, dies führt aber zu keiner Verschlechterung des Kontaktwiderstandes.

Die Darstellung der normalen Kräfte in Abbildung 5.3 zeigt ebenfalls einen sehr homogenen Verlauf über mehrere Messungen. Hier lässt sich leicht die Unterteilung der Messung in die drei Zustände – Touchdown (Bereich I), Hold-time (Bereich II) und Lift-off (Bereich III) – erkennen. Der maximale Wert für die Normalkraft bewegt sich in diesem Fall (Overdrive $s_{OD} = 65 \mu\text{m}$) in einem Intervall von $F = 41 \dots 44 \text{ mN}$.

Während des Touchdown zeigt der Kraftverlauf einen linearen Anstieg bis zum Erreichen der Endposition der Nadel. Beim Lift-off ist der Kraftverlauf durch einen Knick unterbrochen ($t = 30 \text{ s}$), der den Abfall der Kurve in zwei lineare Teilbereiche mit unterschiedlicher Steigung trennt. Zunächst fällt die Kurve mit einer größeren Steigung ($m_1 = -4,44$) und nach dem Knick mit einer kleineren Steigung ($m_2 = -2,33$) ab. Dieser Effekt lässt sich ebenfalls am Verlauf der lateralen Kraft in Abbildung 5.4 erkennen. Durch den dargestellten Kraftverlauf lässt sich direkt auf die Ursache des geänderten Verhaltens beim Lift-off schließen. Beim Abheben der Nadel, also beim Absenken der Probe, verharrt die Nadel für eine gewisse Zeit (bis $t = 30 \text{ s}$) an der Endposition des Probe Mark. Dabei verringert sich die laterale Kraft immer weiter, bis sie sogar in negative Werte umschlägt.

Dies lässt sich mit einem Verhaken der Nadelspitze an der Oberfläche der Endposition des Scrub erklären. Wie in den schematischen Darstellungen des Probing-Vorgangs zu sehen ist (Abbildung 2.9), verbiegt sich die Nadel beim Aufsetzen auf der Oberfläche und erzeugt dadurch den Scrub. Beim Absenken der Probe wird diese Verbiegung zunächst rückgängig gemacht und somit die ausgeübte Kraft reduziert. Dieser Bereich ist in der Abbildung 5.3 zwischen $t = 25 \text{ s}$ und $t = 30 \text{ s}$ zu erkennen. Durch das Verhaken der Nadelspitze an der Endposition wird eine negative Kraft in lateraler Richtung detektiert. Sobald sich die Nadel ($t = 30 \text{ s}$) in umgekehrter Richtung durch den Probe Mark bewegt, steigt die negative laterale Kraft wieder an und strebt gegen null. Der Knick im Verlauf der Normalkraft ist identisch mit dem Zeitpunkt, an dem die Steigung der lateralen Kraft sich von negativ nach positiv umkehrt ($t = 30 \text{ s}$).

Die Gleichmäßigkeit der Kraftverläufe über mehrere Touchdowns lässt sich hier ebenfalls erkennen. Dieses Verhalten korreliert mit dem konstanten Verhalten des Kontaktwiderstandes.

Werden die Kraftverläufe nicht über der Zeit, sondern über dem zurückgelegten Weg des Hubtisches aufgetragen (Abbildung 5.5 und 5.6), ergibt sich ein ähnliches Bild. Die Verläufe weisen nahezu keine Abweichungen voneinander auf und der Knick im Kraftverlauf beim Lift-off ist hier ebenfalls erkennbar.

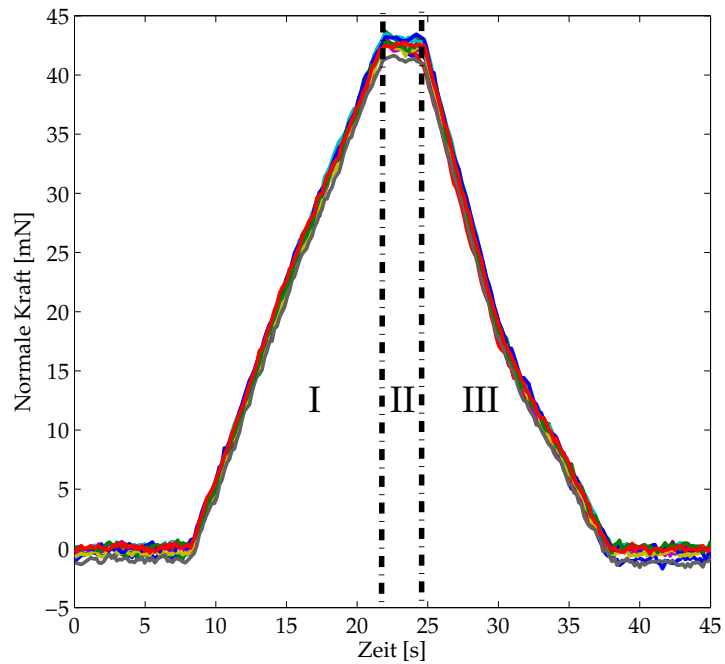


Abbildung 5.3: Messergebnisse für zehn Touchdowns der normalen Kraft auf Gold gegenüber der Zeit (Probe: 18065/1). Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel std #4.

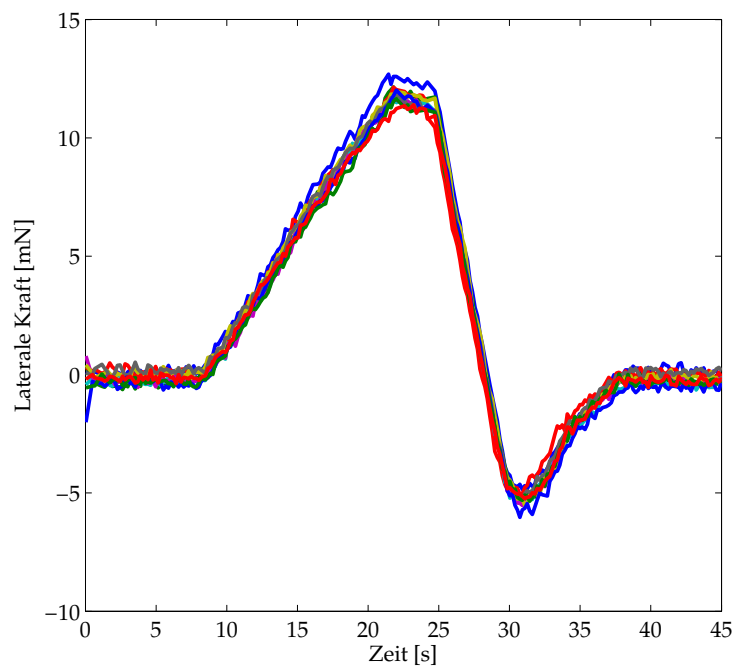


Abbildung 5.4: Messergebnisse für zehn Touchdowns der lateralen Kraft auf Gold gegenüber der Zeit (Probe: 18065/1). Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel std #4.

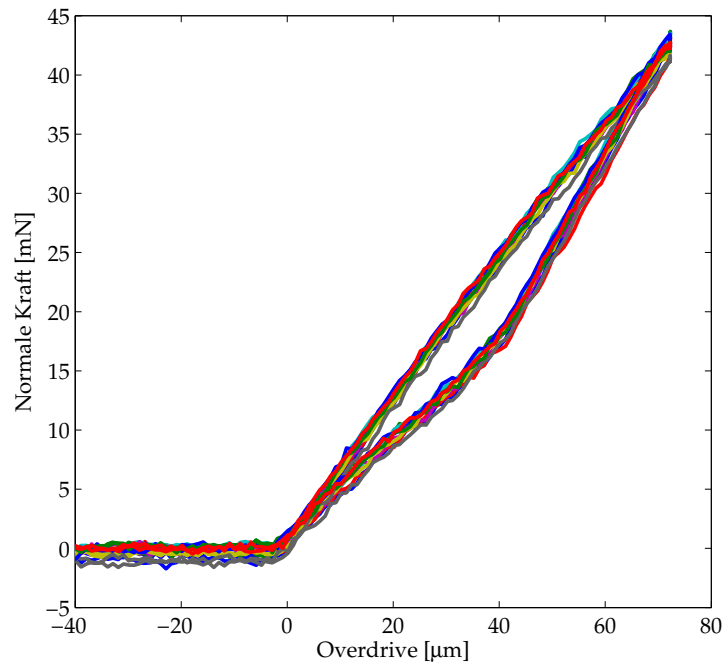


Abbildung 5.5: Messergebnisse für zehn Touchdowns der normalen Kraft auf Gold gegenüber dem Overdrive (Probe: 18065/1). Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel std #4.

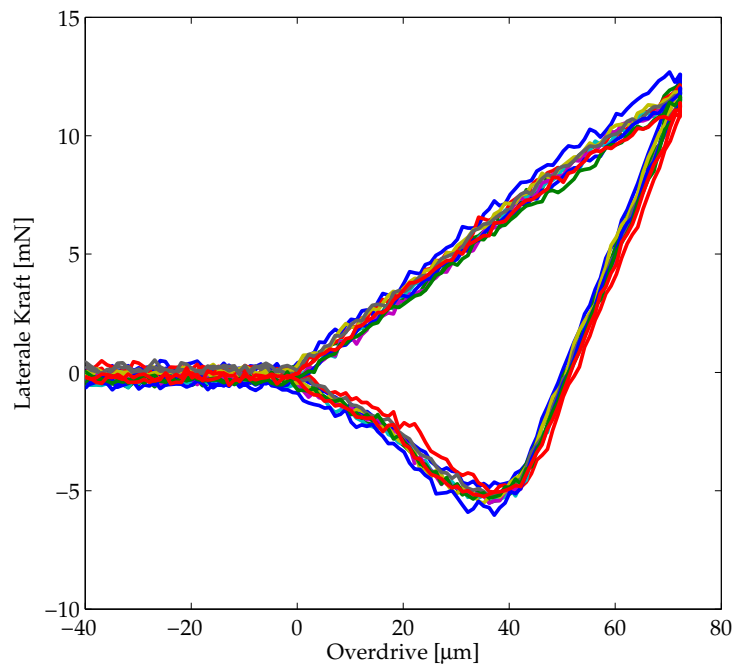


Abbildung 5.6: Messergebnisse für zehn Touchdowns der lateralen Kraft auf Gold gegenüber dem Overdrive (Probe: 18065/1). Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel std #4.

Mittels dieser Darstellung lässt sich der lineare Zusammenhang zwischen Kräfteintrag und Overdrive bestätigen, der sich bereits durch das Kraft-Zeit-Diagramm erkennen ließ. Die Nadel weist also innerhalb der Versuchsparameter eine lineare Verformung auf, was auf ein konstantes E-Modul schließen lässt. Es zeigt sich ferner, dass die Nadel nach jedem Touchdown in ihre Ursprungsform zurückkehrt – es findet eine rein elastische Verformung der Nadel aufgrund der durchgeführten Versuche statt.

5.2.1.1 Definition als Referenzmessung

Wie sich herausgestellt hat, liefern die Messungen auf Gold ein sehr gleichmäßiges Ergebnis. Somit wird die Messung auf Gold als Referenzmessung herangezogen. Dies ist vor allem daher von Interesse, um für jede Messung einen definierten bzw. gleichen Ausgangszustand zu haben. Die Referenzmessung wird dabei allerdings mit leicht modifizierten Probing-Parametern durchgeführt, als dies bei den "normalen" Messungen der Fall ist. Die Probe wird in diesem Fall wesentlich langsamer gegen die Nadelkarte angehoben und abgesenkt. Durch die geringere Geschwindigkeit lassen sich für den Kontaktwiderstand mehr Messpunkte aufnehmen, was besonders für die Bestimmung des minimalen Wertes von Vorteil ist. Die genauen Parameter für die Referenzmessung sind als Parametersatz #2 im Anhang B zu finden.

Zur Überprüfung, ob mit der Nadel Messungen durchgeführt werden können oder diese ein weiteres Mal gereinigt werden muss, dient der erreichte minimale Kontaktwiderstand. Zur besseren Bestimmung dieses Wertes wird für die Referenzmessungen der Widerstand gegenüber dem Weg des Hubtisches aufgetragen. Dies bietet den Vorteil, dass der minimale Wert sehr leicht grafisch bestimmt werden kann. In Abbildung 5.7 sind mehrere exemplarische Messungen zu sehen. Dabei zeigt sich, dass auch auf Gold eine hohe Streuung ($0,49 \Omega < R_K < 0,55 \Omega$) des minimalen Widerstandes entstehen kann. Diese relativ schlechten Werte entstehen durch Verunreinigungen an der Nadelspitze, die durch das Probing auf Aluminium entstehen (Vergleiche hierzu Kapitel 6.2.2).

Für diese Arbeit wird ein Limit für den Kontaktwiderstand von $R_K = 0,55 \Omega$ festgelegt. Hierbei wird allerdings nicht auf den Verlauf der Kennlinie, wie dieser minimale Wert erreicht wird, eingegangen. In Abbildung 5.7 lässt sich leicht erkennen, dass die Kurve der Messung #1 einen wesentlich "unruhigeren" Verlauf aufweist, als die Messung #2. Dabei wird im ersten Fall der bessere minimale Kontaktwiderstand erreicht. Da das Kurvenverhalten nur sehr schwer auszuwerten ist und somit die Entscheidung, ob mit einer Nadel Messungen durchgeführt werden können oder nicht, schwierig ist, wird als Entscheidungskriterium nur der minimal erreichbare Kontaktwiderstand herangezogen.

Erreicht die Nadel bei der Überprüfung den geforderten Wert für den Widerstand nicht, muss diese gereinigt werden. Dazu wird im folgenden Unterkapitel auf die Reinigung der Nadel eingegangen.

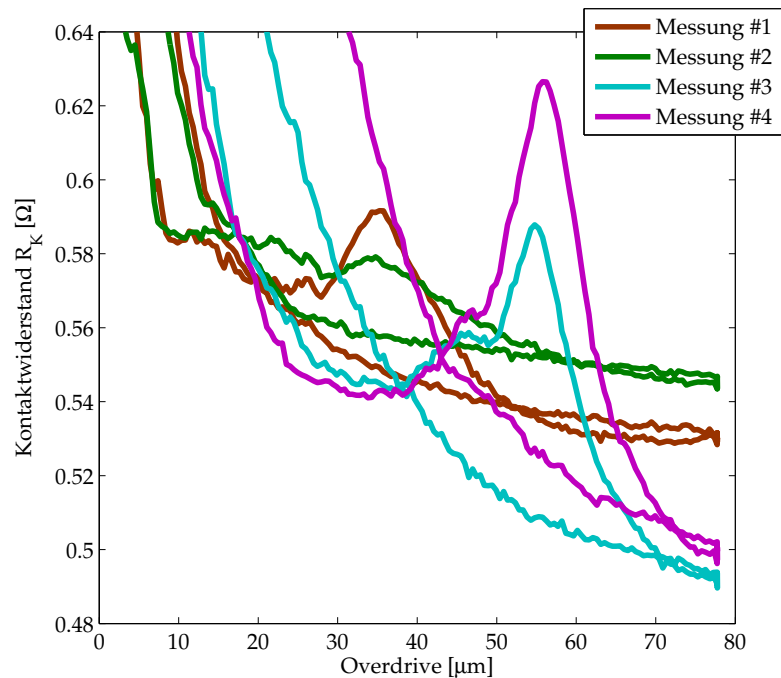


Abbildung 5.7: Verschiedene Referenzmessungen des Kontaktwiderstandes auf Gold (Probe: 18065/1). Messung #1 zeigt den geringeren Minimalwert im Vergleich zu Messung #2, bei gleichzeitig "unruhigerem" Kurvenverhalten. Die beiden anderen Kurven sind zur Veranschaulichung der Streuung dargestellt. Verwendeter Parametersatz: #2 mit der Nadel std #2.

5.2.1.2 Reinigung der Nadel

Um für jede Messung einen definierten Anfangszustand der Nadel zu garantieren, muss sie vor den Messungen gereinigt werden. Die Reinigung erfolgt durch ein abrasives Verfahren, bei dem die Nadel durch mehrere Touchdowns mit hoher Geschwindigkeit auf Schleifpapier von anhaftenden Verunreinigungen mechanisch gesäubert wird [79]. Diese Art der Reinigung verringert jedoch die Lebensdauer einer Nadelkarte, da auch Material der Nadel abgetragen wird. Ein weiteres Reinigungsverfahren stellt das von *Broz et al.* vorgestellte elektrohydrodynamische Reinigungsverfahren dar [79]. Dieses Verfahren bietet den Vorteil, dass die Lebensdauer durch Materialabtrag der Nadel nicht beeinflusst wird. Größere Partikel können damit jedoch nicht entfernt werden.

Für die Untersuchungen in dieser Arbeit ist ein abrasives Reinigungsverfahren jedoch völlig ausreichend. Das verwendete Schleifpapier besitzt eine Körnung von 8.000. Die Körnung ist dabei ein Indiz für die Größe der darauf befindlichen Körner. Diese werden mittels eines Siebverfahrens auf das Papier aufgebracht. Die Körnung gibt dabei an, wieviele Maschen pro Zoll das Sieb aufweist, durch das die Schleifpartikel gesiebt werden. In diesem Fall kommt folglich ein Sieb zum Einsatz, das 8.000 Maschen pro Zoll aufweist. Die maximale Korngröße der einzelnen Schleifpartikel lässt sich daraus auf $25,4 \text{ mm} / 8000 = 3,175 \mu\text{m}$ bestimmen. In diesem Fall werden Schleifpartikel aus Wolframcarbid verwendet.

Als sehr wirkungsvoll hat sich ein Reinigungsschritt aus 100 Touchdowns erwiesen, der in zwei parallelen Reihen zu je 50 Stück durchgeführt wird. Bei stärkeren Verunreinigungen der Nadel kann dieses Verfahren auf eine beliebige Anzahl von Touchdowns erweitert werden. Die verwendeten Parameter sind in Parametersatz #1 zusammengefasst und in Anhang B zu finden.

Um nochmals den Reinigungseffekt des abrasiven Verfahrens zu verdeutlichen, ist in Abbildung 5.8 der Verlauf des Widerstandes gegenüber der Zeit sowohl für eine gereinigte Nadel als auch für eine verschmutzte Nadel zu sehen. Dabei lässt sich deutlich erkennen, dass der minimale Widerstand bei der gereinigten Nadel erheblich niedriger ist. Ferner zeigt der Kurvenverlauf das typische Badewannenverhalten, was bei der ungereinigten Nadel nicht der Fall ist.

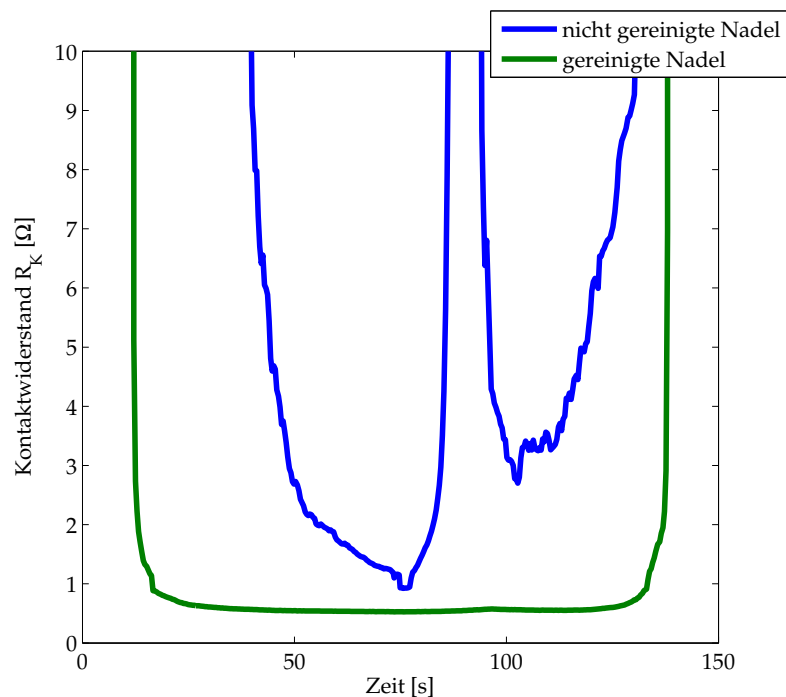


Abbildung 5.8: Unterschied des Kontaktwiderstandes zwischen einer verunreinigten Nadel und einer gereinigten Nadel auf Gold, aufgetragen gegenüber der Zeit (Probe: 18065/1). Verwendeter Parametersatz: #2 mit der Nadel std #4.

Selbstreinigungs-Effekt

In Abbildung 5.9 zeigt sich, dass eine Selbstreinigung⁵³ während des Probing auftritt. Dieser Effekt beruht auf dem gleichen Mechanismus, wie das abrasive Reinigungsverfahren [26]. Durch das Eintauchen der Nadelspitze in das Material werden die Verunreinigungen teilweise entfernt.

Werden die vier aufeinander folgenden Touchdowns #1 bis #4 miteinander verglichen, wird deutlich, dass der Touchdown #4 einen besseren Verlauf aufweist als beispielsweise Touchdown #1. Es lässt sich eine stetige Verbesserung des Kontaktwiderstandes mit jedem weiteren Touchdown, ausgehend von #1, feststellen. Dies

⁵³engl. self-cleaning effect

ist darin begründet, dass durch das mechanische Durchstoßen der Aluminiumoxidschicht die Nadel abrasiv gereinigt wird. Die Ablagerungen auf der Nadel werden durch das Eintauchen abgestreift und somit der Kontaktwiderstand verbessert.

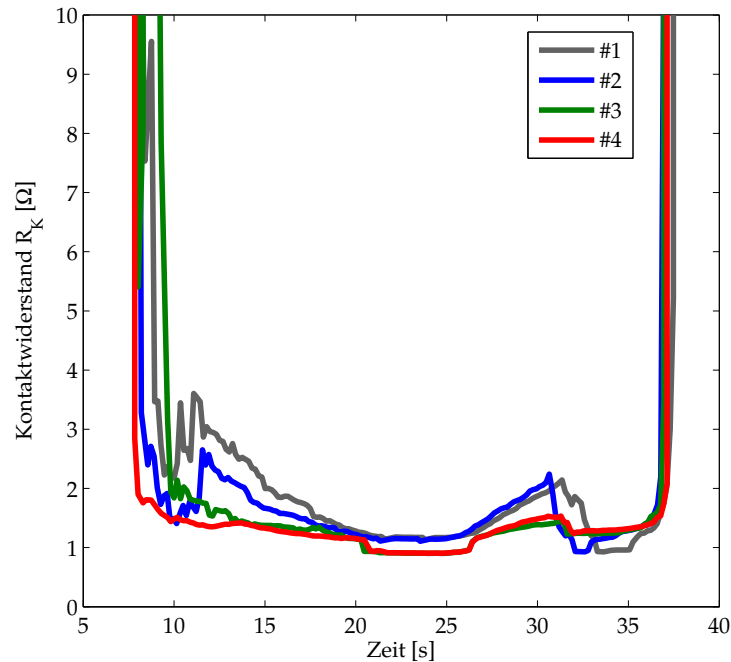


Abbildung 5.9: Messungen des Kontaktwiderstandes gegenüber der Zeit für vier aufeinander folgende Touchdowns. Es ist eine stetige Verbesserung des Kontaktwiderstandes aufgrund des Selbstreinigungseffektes der Nadel zu erkennen (Probe: 27046/4). Verwendeter Parametersatz: #3 mit der Nadel #11.

5.2.2 Messung auf Aluminium

Wie bereits erwähnt, wird Aluminium als Metallisierung der Probing Pads eingesetzt. Ein Grund dafür ist die passivierende Oxidschicht des Metalls. Das Oxid ist für Sauerstoff undurchlässig und die Oxidation des Metalls ist somit selbstlimitierend. Diese Oxidschicht, die als Schutzschicht für das Aluminium dient, muss allerdings beim Probing mittels der Nadel durchstoßen werden, da sie elektrisch isolierend wirkt [18,22,51,80,81]. Die dazu nötige Kraft beträgt $F = 30 - 100 \text{ mN}$ [51]. In diesem Abschnitt wird das Probing-Verhalten auf Aluminium untersucht und der Einfluss des Oxides dabei aufgezeigt.

Die Herstellung der Proben erfolgt wie bereits vorher ausgeführt. Für die Messungen auf Aluminium wird der Parametersatz #3 verwendet. Die genauen Werte dazu können in Anhang B nachgelesen werden. Diese Parameter werden auch im weiteren Verlauf als Standardwerte übernommen und finden für alle folgenden Messungen Anwendung, sofern nichts Gegenteiliges vermerkt ist. In Abbildung 5.10 sind die Verläufe des Kontaktwiderstandes für zehn Messungen zu sehen. Der minimal erreichte Widerstand beträgt auf Aluminium $R_K = 0,59 \Omega$. Die Kurvenverläufe zeigen auch hier die typische Badewannencharakteristik. Selbst über

mehrere Touchdowns lässt sich keine Verschlechterung des Verhaltens erkennen (Abbildung 5.11).

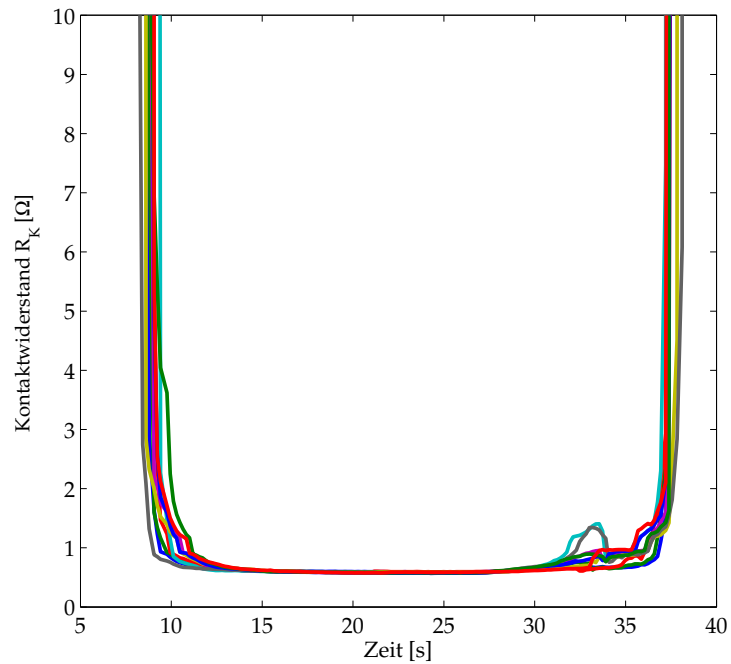


Abbildung 5.10: Kontaktwiderstand für zehn Touchdowns auf Aluminium gegenüber der Zeit (Probe: 08037/3). Verwendeter Parametersatz: #3 mit der Nadel std #3.

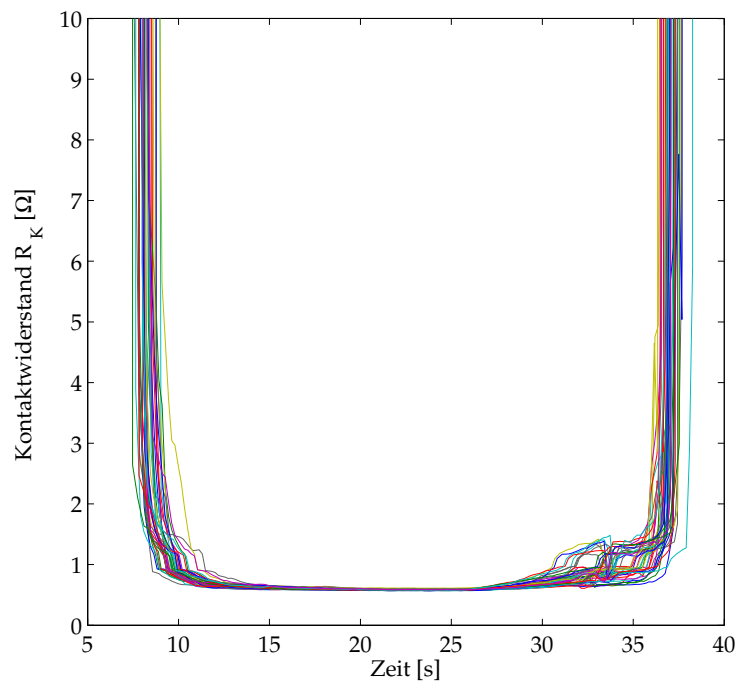


Abbildung 5.11: Kontaktwiderstand für 40 Touchdowns auf Aluminium gegenüber der Zeit (Probe: 08037/3). Verwendeter Parametersatz: #3 mit der Nadel std #3.

Dieses Verhalten ist zunächst nicht zu erwarten gewesen, da bisher davon ausgegangen worden ist, dass das Oxid für das schlechte Probing-Verhalten verantwortlich ist [18, 22, 51, 80, 81]. Die Kraftverläufe weisen ebenfalls keine direkten Veränderungen zu den zuvor gesehen Messungen auf Gold auf. Genauer wird auf die möglichen Unterschiede im Folgenden eingegangen.

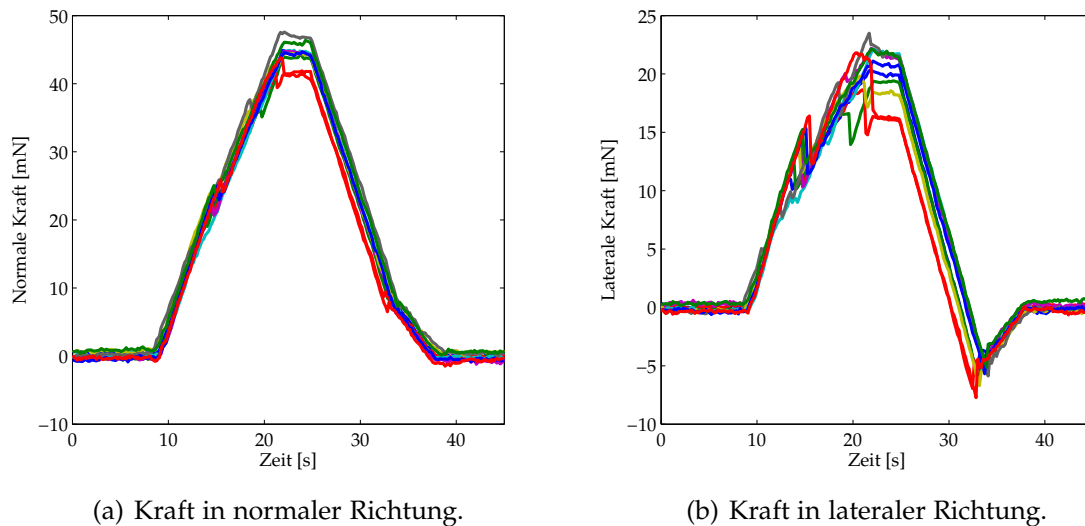


Abbildung 5.12: Kraftverläufe für je zehn Touchdowns auf Aluminium gegenüber der Zeit (Probe: 08037/3). Verwendeter Parametersatz: #3 mit der Nadel std #3.

5.2.3 Unterschiede zwischen den Materialsystemen

Werden die beiden Materialsysteme Gold und Aluminium nun direkt gegenüber gestellt, ergeben sich, zur bisher vorherrschenden Meinung, gegensätzliche Erkenntnisse. In Abbildung 5.13 ist exemplarisch eine Messung des Kontaktwiderstandes auf Gold einer Messung auf Aluminium gegenübergestellt. Wie bereits aus den vorherigen Abschnitten ersichtlich, sind diese beiden Messkurven über mehrere Touchdowns repräsentativ.

Es lässt sich leicht erkennen, dass der minimal erreichbare Kontaktwiderstand auf beiden Materialien nahezu identisch ist. Dies ist zunächst verwunderlich, da aufgrund des Aluminiumoxides ein schlechterer Kontaktwiderstand zu erwarten gewesen wäre. Da die beiden Materialien ähnliche spezifische Widerstände aufweisen, deutet dies darauf hin, dass das Oxid durch die Probing-Nadel komplett durchstoßen worden ist und ein direkter Kontakt zwischen Nadelspitze und Aluminium zustande gekommen ist.

Bei den Kraftverläufen ergeben sich Unterschiede. Werden die einwirkenden Kräfte in normaler Richtung gegenübergestellt (Abbildung 5.14), lässt sich bei Aluminium ein deutlich erhöhter Krafteintrag feststellen. Bei identischen Probing-Parametern und gleichem elektrischem Widerstand ist die Normalkraft auf Aluminium um annähernd 15 % größer als auf Gold. Wie an Abbildung 5.14 ersichtlich ist, zeigen beide Kurven einen ähnlichen Verlauf. Im Bereich I zeigt die Aluminiumprobe einen steileren Anstieg der Kraft, sowie im Bereich III einen betragsmäßig größeren Abfall.

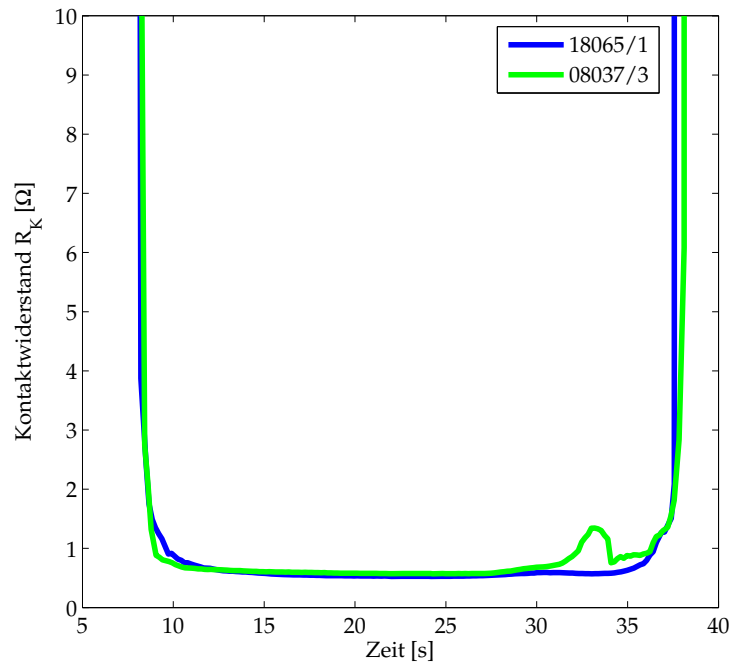


Abbildung 5.13: Gegenüberstellung des Kontaktwiderstandes auf Gold (Probe: 18065/1) und Aluminium (Probe: 08037/3) für den siebten Touchdown nach der Reinigung der Nadel. Verwendeter Parametersatz: #3 mit den Nadeln std #3 (Aluminium) und std #4 (Gold).

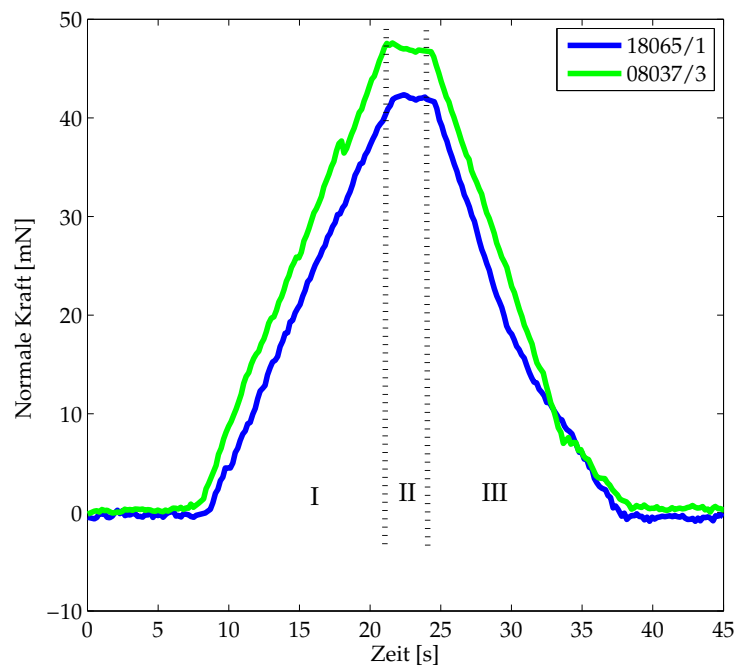


Abbildung 5.14: Gegenüberstellung der normalen Kraft auf Gold (Probe: 18065/1) und Aluminium (Probe: 08037/3) für den siebten Touchdown nach der Reinigung der Nadel. Verwendeter Parametersatz: #3 mit den Nadeln std #3 (Aluminium) und std #4 (Gold).

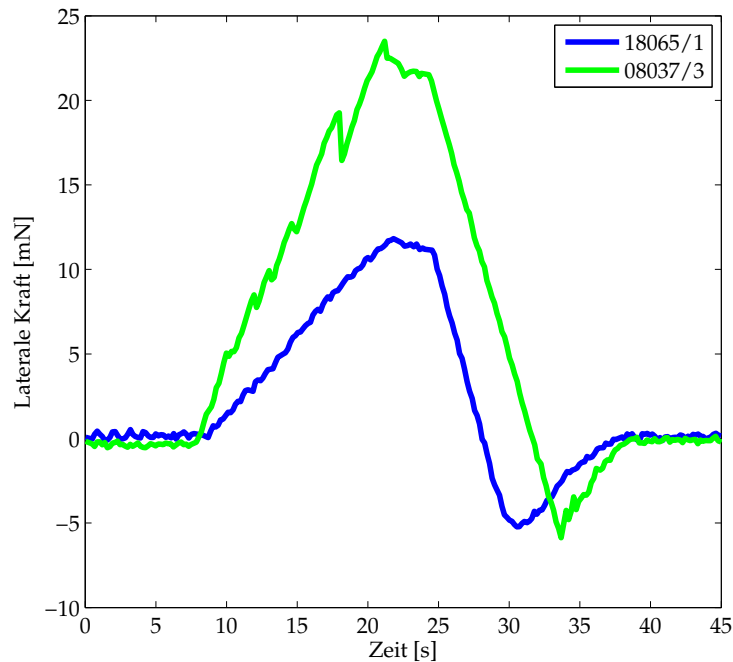


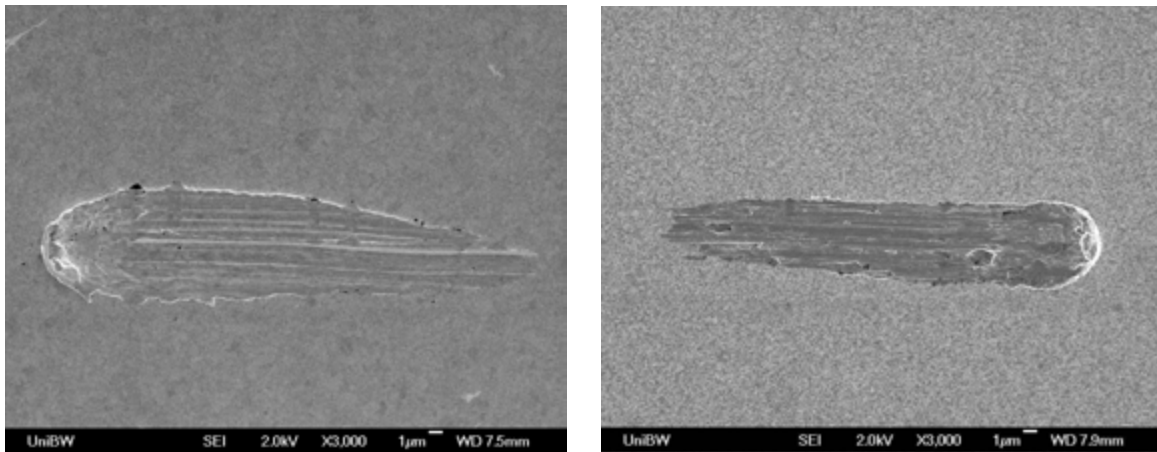
Abbildung 5.15: Gegenüberstellung der lateralen Kraft auf Gold (Probe: 18065/1) und Aluminium (Probe: 08037/3) für den siebten Touchdown nach der Reinigung der Nadel. Verwendeter Parametersatz: #3 mit den Nadeln std #3 (Aluminium) und std #4 (Gold).

Bei der lateralen Kraft sind die Unterschiede viel deutlicher erkennbar (Abbildung 5.15). Die beiden Messkurven zeigen hier ebenfalls einen ähnlichen Verlauf, wobei die Messung auf Aluminium den wesentlich höheren Kräfteintrag aufweist. Hierbei ist der prozentuale Anstieg der Kraft ca. 100% im Vergleich zu Gold. Wie sich am Kurvenverlauf zeigt, ist die Messung auf Aluminium auch viel stärker mit Störungen behaftet. Dies ist dadurch bedingt, dass die spröde Aluminiumoxidschicht durch das Eintauchen der Nadel in kleine Partikel zerfällt. Diese werden beim Scrub vor der Nadel hergeschoben und dabei auch teilweise unter die Nadel gedrückt. Dadurch entstehen die Störungen, die sich speziell am Verlauf der lateralen Kraft zeigen.

Eine Erklärung für den deutlich erhöhten Kräfteintrag liegt an den unterschiedlichen Härtegraden der beiden Materialien ($H_{\text{Au,Moh}} = 2,5$, $H_{\text{Al,Moh}} = 2,75$). Das Aluminium selbst ist zwar sehr weich, wogegen das Aluminiumoxid ($H_{\text{Al}_2\text{O}_3,\text{Moh}} = 9,0 \dots 9,5$) einen wesentlich höheren Härtegrad besitzt. Die unterschiedliche Härte der Materialien macht sich dabei auch durch veränderte Eindringtiefen bemerkbar. Um dies näher zu untersuchen, werden die Probe Marks mittels eines Profilometers untersucht. Diese Ergebnisse werden im nächsten Abschnitt vorgestellt.

5.3 Untersuchungen zu mechanischen Beschädigungen der Pads

Nicht nur die einwirkenden Kräfte sind für das Probing von Interesse, sondern auch die entsprechenden mechanischen Beschädigungen der Oberflächen in Abhängigkeit vom verwendeten Overdrive. In Abbildung 5.16 sind exemplarisch die REM-Aufnahmen von zwei Probe Marks zu erkennen, die mit einem Overdrive von $s_{OD} = 60 \mu\text{m}$ getestet sind.



(a) Gold (Probe: 18065/1).

(b) Aluminium (Probe: 22017/10 #2).

Abbildung 5.16: REM-Aufnahmen von Probe Marks auf unterschiedlichen Materialien bei einem Overdrive von $s_{OD} = 60 \mu\text{m}$. Verwendete Nadel: std #4.

In Abbildung 5.17 sind die zugehörigen Profilometermessungen auf Gold (Probe: 18065/1) und Aluminium (Probe: 22017/10 #2) zu sehen. Die Messungen sind in Längsrichtung der Probe Marks durchgeführt. Hier lässt sich erkennen, dass die Eindringtiefe auf Aluminium im Vergleich zu Gold höher ist. Zusätzlich ist die Materialanhäufung am Ende des Probe Mark erheblich größer. Die Messungen machen weiterhin deutlich, dass die Abdrücke auf Gold länger sind als auf Aluminium. Diese Punkte erklären sich aufgrund der unterschiedlichen Materialhärten. Beim weicheren Gold dringt die Nadel nicht so tief ein, da die auf die Nadel wirkende Kraft durch eine größere Kratzbewegung der Nadelspitze in lateraler Richtung abgebaut wird.

Diese Beobachtung wird auch durch die weiteren Ergebnisse bei variablem Overdrive bestätigt. In Abbildung 5.18 sind die Eindringtiefen der Nadel auf Gold (Probe: 18065/1) und Aluminium (Probe: 22017/10 #2) dargestellt. Der Overdrive wird in einem Bereich von $s_{OD} = 40 \mu\text{m} \dots 70 \mu\text{m}$ bei einer Schrittweite von $s_w = 5 \mu\text{m}$ variiert. Werden die Messwerte durch mathematische Kurven genähert, lässt sich eine lineare Abhängigkeit der Eindringtiefe h vom Overdrive s_{OD} erkennen.

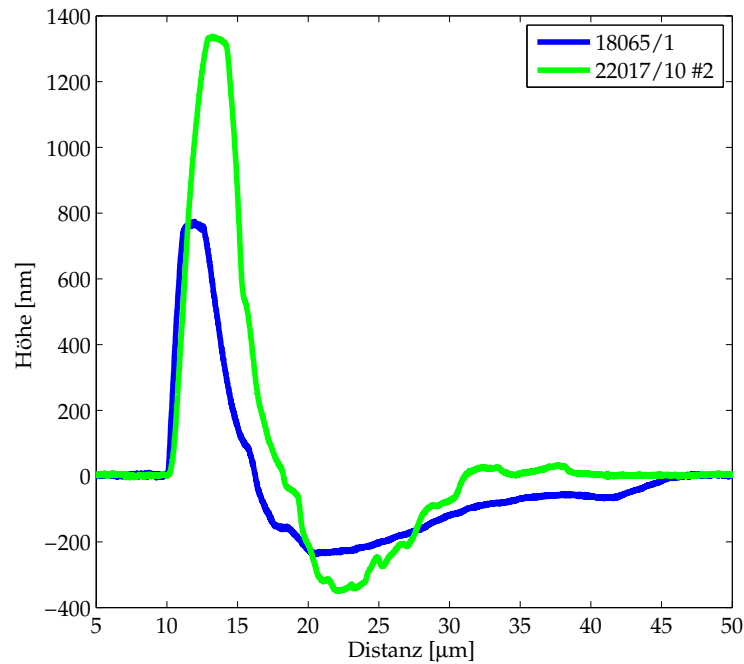


Abbildung 5.17: Profilometermessung in Längsrichtung für Probe Marks auf Gold (Probe: 18065/1) und Aluminium (Probe: 22017/10 #2) bei einem Overdrive von $s_{OD} = 60 \mu\text{m}$. Verwendete Nadel: std #4.

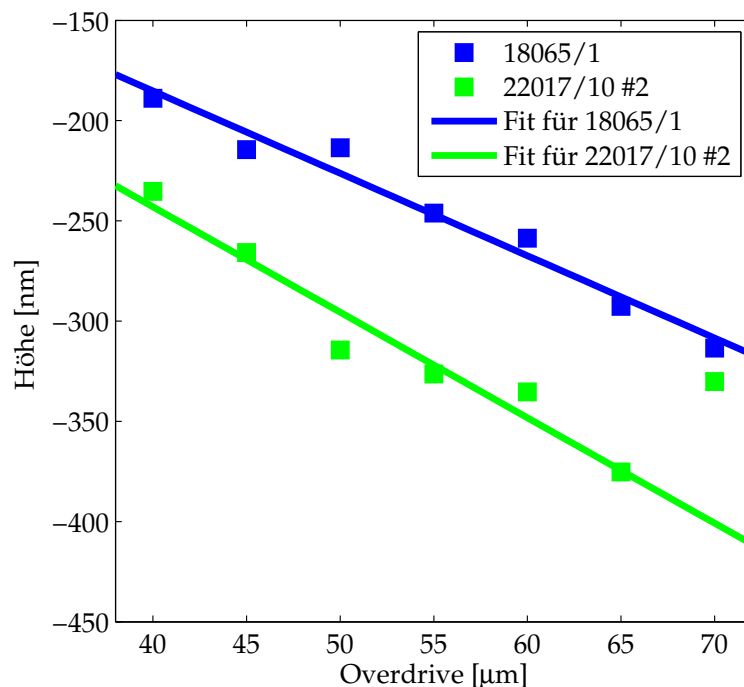


Abbildung 5.18: Auswertung der Profilometermessungen bezüglich der Eindringtiefe gegenüber dem Overdrive auf Gold (Probe: 18065/1) und Aluminium (Probe: 22017/10 #2). Die durchgezogenen Kurven stellen die mathematischen Näherungen an die Messwerte dar, die in den Gleichungen 5.4 und 5.5 beschrieben sind. Verwendete Nadel: std #4.

Die Näherungskurven in Abbildung 5.18 genügen den Gleichungen:

$$\text{Fit für 18065/1:} \quad h_{\text{Au}} = -4,1 \cdot 10^{-3} \cdot s_{\text{OD}} - 20,89 \text{ nm} \quad (5.4)$$

$$\text{Fit für 22017/10 \#2:} \quad h_{\text{Al}} = -5,3 \cdot 10^{-3} \cdot s_{\text{OD}} - 32,55 \text{ nm} \quad (5.5)$$

Mit Hilfe der REM-Aufnahmen sämtlicher Probe Marks können diese geometrisch vermessen werden. Die Ergebnisse bezüglich der Scrub Länge bei unterschiedlichem Overdrive sind in Abbildung 5.19 graphisch zusammengefasst. Hierbei ist ebenso ein linearer Zusammenhang zwischen Overdrive s_{OD} und der Länge l der Probe Marks zu erkennen.

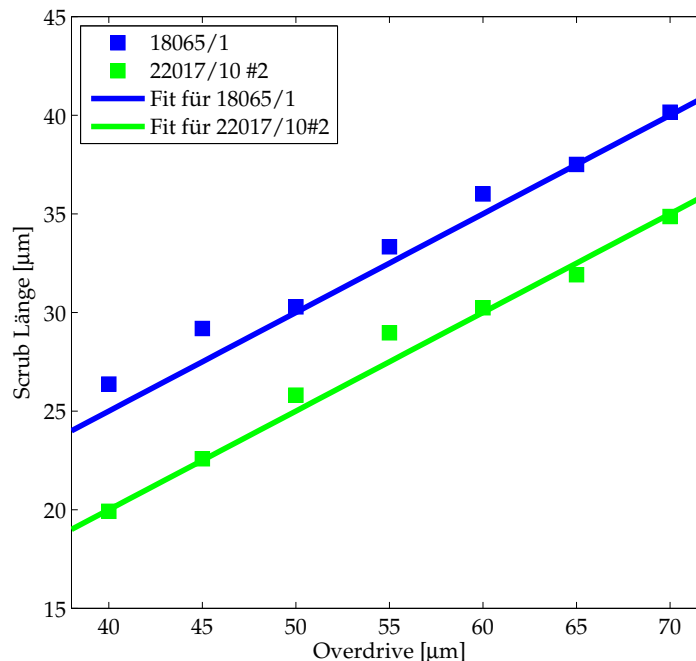


Abbildung 5.19: Messungen der Scrub Länge gegenüber dem Overdrive auf Gold (Probe: 18065/1) und Aluminium (Probe: 22017/10 #2). Die durchgezogenen Kurven stellen die mathematischen Näherungen an die Messwerte dar, die in den Gleichungen 5.6 und 5.7 beschrieben sind. Verwendete Nadel: std #4.

In diesem Fall können die Kurvenverläufe durch folgende Gleichungen ausgedrückt werden:

$$\text{Fit für 18065/1:} \quad l_{\text{Au}} = \frac{s_{\text{OD}}}{2} + 5 \mu\text{m} \quad (5.6)$$

$$\text{Fit für 22017/10 \#2:} \quad l_{\text{Al}} = \frac{s_{\text{OD}}}{2} \quad (5.7)$$

5.4 Verfahren zur Reinigung von Aluminiumoberflächen

Wie sich in den vorherigen Abschnitten gezeigt hat, ist zwar Aluminium vom erreichbaren Kontaktwiderstand nicht schlechter als Gold, dafür ist der Kraftertrag bei gleichem Overdrive deutlich größer. Der Hauptgrund dafür ist im Aluminiumoxid zu suchen. Daher wird nun in den folgenden Abschnitten auf mögliche Reinigungsverfahren zur Entfernung des Aluminiumoxides bzw. zur Verbesserung der Oberfläche von Aluminium eingegangen.

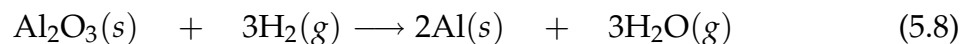
5.4.1 Wasserstoffradikale

Aluminium ist gegenüber diversen Ätzgasen resistent, deshalb kommen zur Strukturierung sehr häufig Chlor bzw. chlorhaltige Gase zum Einsatz. Chlor beansprucht bzw. greift allerdings die Prozessanlagen sehr stark an. Ferner kann sich im Zusammenhang mit Wasserdampf Salzsäure bilden. Die Verwendung von Chlor ist daher mit einem hohen technologischen Aufwand verbunden.

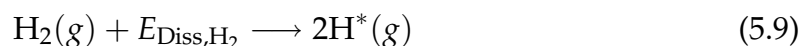
Wasserstoffplasmen werden sehr häufig zur Reinigung von Siliziumoberflächen vor Epitaxieschritten eingesetzt [82, 83]. Daher wird für die im Folgenden beschriebenen Reinigungsverfahren Wasserstoff und dessen Radikale auf eine mögliche Reinigungswirkung auf Aluminium untersucht.

5.4.1.1 Theoretische Betrachtung

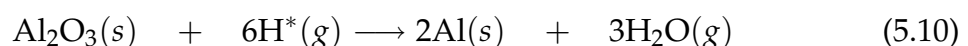
Ausgehend von der Reaktionsgleichung für die chemische Reaktion beim Ätzen von Aluminium mit Hilfe von Wasserstoffradikalen wird gezeigt, dass dies prinzipiell möglich ist.



Basierend auf dieser Reaktionsgleichung muss zunächst der Wasserstoff in seine Radikale zerlegt werden. Dazu wird dem System die entsprechende Dissoziationsenergie für Wasserstoff ($E_{\text{Diss},\text{H}_2} = 4,52 \text{ eV}$) zugeführt.



Folglich kann Reaktionsgleichung 5.8 wie nachstehend erweitert werden:



	Al ₂ O ₃ (s)	H* (g)	Al (s)	H ₂ O (g)
H^0	$-1675,69 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$	$218 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$	$0 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$	$-241,83 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
S^0	$50,92 \frac{\text{J}}{\text{mol K}}$	$114,72 \frac{\text{J}}{\text{mol K}}$	$28,27 \frac{\text{J}}{\text{mol K}}$	$188,84 \frac{\text{J}}{\text{mol K}}$

Tabelle 5.2: Standardbildungsenthalpien (H^0) und Standardreaktionsentropien (S^0) für die in Gleichung 5.10 angegebenen Moleküle [84].

Um diese chemische Reaktion besser zu verstehen, wird zuerst die Reaktionsenthalpie $\Delta H_{\text{Reaktion}}^0$ mit Hilfe des *Satz von Hess* bestimmt. Dazu werden die Standardbildungsenthalpien H^0 sowohl der Ausgangsstoffe der Gleichung (Edukte) als auch der Endstoffe der Gleichung (Produkte) benötigt. Diese sind bereits in Tabelle 5.2 angegeben.

$$\Delta H_{\text{Reaktion}}^0 = \sum H_{\text{Produkte}}^0 - \sum H_{\text{Edukte}}^0 \quad (5.11)$$

Mit den entsprechenden Werten unter Standardbedingungen ergibt sich aus Gleichung 5.11 eine Reaktionsenthalpie von $\Delta H_{\text{Reaktion}}^0 = -357,8 \text{ kJ}$. Dies bedeutet, dass es sich bei der angegebenen Reaktion um eine exotherme handelt, d.h. während der Reaktion wird vom System Energie in Form von Wärme abgegeben. Wird zusätzlich die Reaktionsentropie $\Delta S_{\text{Reaktion}}^0$ für das System mit Hilfe der Gleichung 5.12 berechnet, ergibt sich ein Wert von $\Delta S_{\text{Reaktion}}^0 = -116,18 \frac{\text{J}}{\text{K}}$. Daraus lässt sich schließen, dass sich die Entropie der Reaktion, bei angegebener Reaktionsrichtung, immer weiter verkleinert.

$$\Delta S_{\text{Reaktion}}^0 = \sum S_{\text{Produkte}}^0 - \sum S_{\text{Edukte}}^0 \quad (5.12)$$

Um nun allerdings bestimmen zu können, ob die Gleichung 5.10 das Gleichgewicht auf der Seite der Produkte hat, muss die *Freie Enthalpie* oder auch *Gibbs-Energie* nach folgender Formel berechnet werden:

$$\Delta G = \Delta H_{\text{Reaktion}}^0 - T \cdot \Delta S_{\text{Reaktion}}^0 \quad (5.13)$$

Mit den zuvor berechneten Werten und bei Raumtemperatur ergibt sich ein Wert von $\Delta G = -323 \text{ kJ}$. Da dieser Wert negativ ist, handelt es sich um eine exergonische Reaktion, die unter der angegebenen Richtung spontan ablaufen kann. Es kann allerdings weder eine Aussage über die Reaktionsgeschwindigkeit getroffen werden, noch ob die Reaktion auch wirklich abläuft, da häufig Reaktionen, trotz katalytischer Unterstützung, gehemmt sein können.

5.4.1.2 Experimenteller Aufbau

Um die theoretischen Untersuchungen experimentell nachzuweisen, werden entsprechende Versuche zur Reinigung von Aluminium mit Hilfe von Wasserstoffradikalen durchgeführt. Am Institut für Physik sind bereits ähnliche Untersuchungen

zur Reinigung von Silizium mit Hilfe von Wasserstoff durchgeführt worden [85]. Die dort beschriebene Versuchsanordnung wird auch für die Untersuchungen auf Aluminium verwendet.

Als Prozessanlage dient eine UHV⁵⁴-Kammer mit der Möglichkeit, eine in situ XPS⁵⁵- bzw. AES⁵⁶-Analyse durchzuführen [86, 87]. Die Radikalquelle besteht aus einem UHV-Flansch, der einen Gaseinlass in Form eines Tantal-Rohrs, durch das der molekulare Wasserstoff der Reinheit 5.0 in die Prozesskammer eingeleitet wird, besitzt. In Abbildung 5.20 ist die Radikalquelle dargestellt. Das Tantal-Rohr wird auf eine Temperatur von $T = 1900$ K aufgeheizt, wodurch dem an der Oberfläche adsorbierten Wasserstoff die nötigen Dissoziationsenergie zugeführt wird. Durch diese Anordnung kann eine Dissoziationsrate in Wasserstoffradikale von 90 % erreicht werden. Eine ausführlichere Beschreibung der Quelle ist bei *Eibl et al.* zu finden [88].

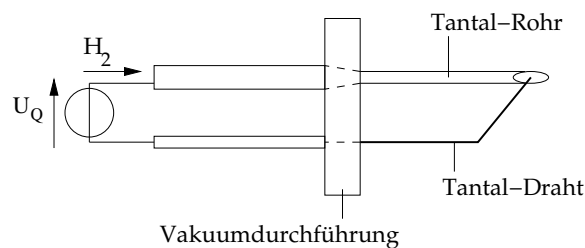


Abbildung 5.20: Schematische Darstellung der verwendeten Wasserstoffradikalquelle.

Die Versuche werden bei einem Prozessdruck von $p = 10^{-4}$ mbar und einer Prozesszeit von $t = 30$ min bei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt. In Abbildung 5.21 sind die XPS-Spektren der Untersuchungen zusammengefasst. Es sind dabei nur die Ausschnitte der Spektren zu sehen, die sich auf die beiden charakteristischen Peaks der Bindungsenergien für Aluminium ($E(2p) = 72,5$ eV und $E(2s) = 118,1$ eV) und Aluminiumoxid ($E(2p) = 75,5$ eV und $E(2s) = 121,8$ eV) beschränken [89].

Das Spektrum, das als Referenz gekennzeichnet ist, zeigt den Zustand der Probe vor den durchgeführten Versuchen. Daher sind die beiden typischen Al_2O_3 -Peaks sehr stark im Vergleich zu den Peaks für reines Aluminium ausgeprägt. Das Spektrum der Probe, die bei Raumtemperatur ($T = 297$ K) den Wasserstoffradikalen ausgesetzt war, weist nahezu keine Veränderungen im Vergleich zur Referenz auf. Somit kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass bei Raumtemperatur das Aluminiumoxid durch die Wasserstoffradikale nicht geätzt wird. Bei einer erhöhten Substrattemperatur von $T = 622$ K lässt sich ein Anstieg des Aluminiumpeaks erkennen, wobei eine Abnahme des Peaks für Al_2O_3 nicht erkennbar ist. Eine minimale Ätzwirkung bei dieser Temperatur kann folglich erreicht werden, allerdings ist diese sehr gering. Wird die Probe weiter erhitzt ($T = 722$ K) und den Wasserstoffradikalen ausgesetzt, lässt sich ein stärkerer Anstieg des Aluminiumpeaks erkennen, der gleichzeitig mit einer Reduzierung des Peaks von Aluminiumoxid einhergeht. Bei dieser Temperatur kann eine Entfernung des Aluminiumoxides

⁵⁴Abk. für Ultrahochvakuum

⁵⁵Abk. für engl. x-ray photoelectron spectroscopy (XPS), dt. Photoelektronenspektroskopie (PES)

⁵⁶Abk. für Auger-Elektronen-Spektroskopie

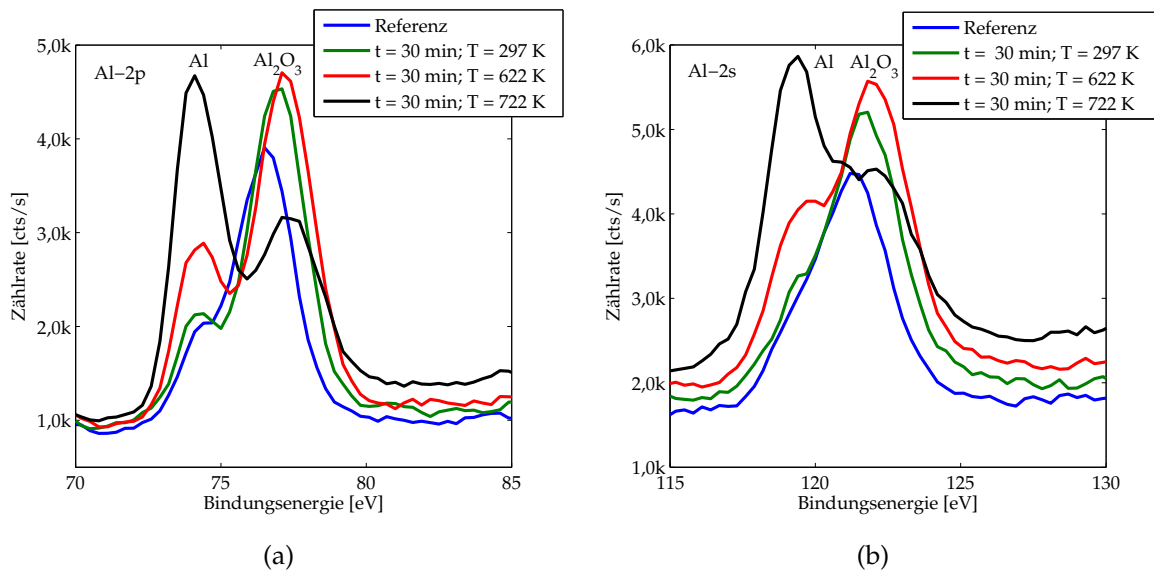


Abbildung 5.21: Ausschnitt der XPS-Spektren zur Untersuchung der Ätzwirkung von Wasserstoffradikalen auf eine Aluminiumoxidschicht bei unterschiedlichen Prozesstemperaturen (Probe: 22115/1).

sehr deutlich festgestellt werden. Allerdings kann das Oxid nicht vollständig von der Probe entfernt werden, da die Probe während der Messung thermisch zerstört wird. Der Schmelzpunkt von Aluminium liegt zwar erst bei $T = 932,37 \text{ K}$ [68, S. 277], allerdings ist die thermische Belastung der Probe so groß, dass sich optisch die Zersetzung der Probe feststellen lässt.

Fazit

Basierend auf der theoretischen Betrachtung ist eine Ätzwirkung mit Wasserstoffradikalen gegenüber Aluminiumoxid zu erwarten. Die Experimente zeigen allerdings, dass alleine mit Radikalen keine adäquate Ätzwirkung des Aluminiumoxides erreicht werden kann. Eine weitere Temperaturerhöhung über $T > 722 \text{ K}$ hinaus macht keinen Sinn, da sich die Probe schon darunter thermisch zersetzt. Wie schon von *Aßmuth* für Siliziumdioxid gezeigt, reichen reine Wasserstoffradikale zum Ätzen nicht aus, sondern eine unterstützende Sputterwirkung, beispielsweise durch Ionenbeschuss, ist von Nöten [90, S. 69f].

5.4.2 Argon/Wasserstoffplasma

Wie bereits dargestellt, sind Wasserstoffradikale alleine nicht ausreichend, um das Aluminiumoxid vollständig zu entfernen. Deshalb werden die Versuche in einem Argon/Wasserstoffplasma wiederholt, bei denen durch zusätzlichen Elektronenbeschuss auf die Probe die Ätzwirkung verbessert bzw. unterstützt wird. Plasmen aus Argon und Wasserstoff werden in vielen Bereichen zur Reinigung von Oberflächen eingesetzt.

Diese Versuche werden in einem modularen Ultrahochvakuum-Mehrkammersystem⁵⁷ der Firma *Balzers AG* durchgeführt. Die Anlage besteht aus fünf einzelnen Prozesskammern, die über einen Transportkanal miteinander verbunden sind, durch den bis zu fünf Zoll große Wafer unter UHV-Bedingungen von einer Kammer zur nächsten transferiert werden können. Der Restgasdruck, der im Transportsystem vorherrscht, liegt im Bereich von $p = 10^{-8}$ mbar. Die Bestückung der Anlage erfolgt über zwei Ladestationen, die unabhängig voneinander belüftet und je bis zu 25 Wafer aufnehmen können. Ein Restgasdruck im evakuierten Zustand von $p = 10^{-6}$ mbar kann für die Ladestationen erreicht werden. Das komplette Anlagenkonzept der MUM ist bereits in diversen Dissertationen des Instituts für Physik beschrieben [77, 86, 90–93]. In Abbildung 5.22 ist ein schematischer Aufbau der kompletten Anlage zu sehen.

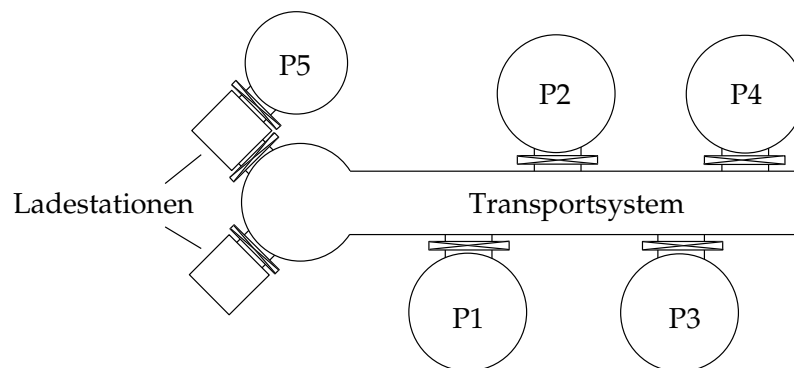


Abbildung 5.22: Schematischer Aufbau der MUM.

Für die Reinigungsprozesse mit Hilfe des Argon/Wasserstoffplasmas wird die Prozesskammer P5 verwendet. Auf den genauen Aufbau der Plasmakammer und der entsprechenden Versorgung wird nur kurz eingegangen, da dies bereits recht ausführlich bei *Bayerstadler* behandelt worden ist [77]. Die UHV-Kammer P5 besteht aus Edelstahl und weist einen Restgasdruck von $p = 10^{-9}$ mbar auf. Für die Reinigungsprozesse ist die Kammer mit einer Gleichstrom-Plasmaquelle⁵⁸ der Firma *Balzers* ausgestattet. Die DC-Plasmaquelle basiert auf dem Prinzip der Gasentladung [82]. Aus einem Filament werden, hervorgerufen durch den Filamentstrom ($I_{\text{Fil}} = 130 \text{ A} \dots 140 \text{ A}$), mittels Glühemission Elektronen emittiert. Da das Filament als Kathode dient und auf negativem Potential ($U_{\text{Fil}} = -18 \text{ V} \dots -30 \text{ V}$) gehalten wird, ebenso wie der Wehneltzylinder, treten die Elektronen fokussiert aus der Lochblende aus. Dabei treffen die Elektronen auf das Arbeitsgas Argon und zünden durch die stattfindende Stoßionisation das eigentliche Plasma. Das eigentliche Ätzgas, das durch das Plasma in Radikale zerlegt wird, wird weiter oben in die Kammer eingeleitet. Der Wafer liegt mit der Prozessseite nach unten auf der Probenhalterung aus Molybdän. Bei diesem Plasma kann eine Sputterwirkung ausgeschlossen werden, was häufig zu einer Rekontamination der Oberfläche führt [94]. Durch die Möglichkeit zum Anlegen einer Bias-Spannung an den Probenhalter kann eine Unterstützung der Ätzwirkung durch Elektronen- bzw. Ionenbeschuss erreicht werden. Zusätzlich wird der Ätzworgang durch die UV-Strahlung des Plasmas verbessert [94].

⁵⁷kurz: MUM

⁵⁸kurz: DC-Plasmaquelle

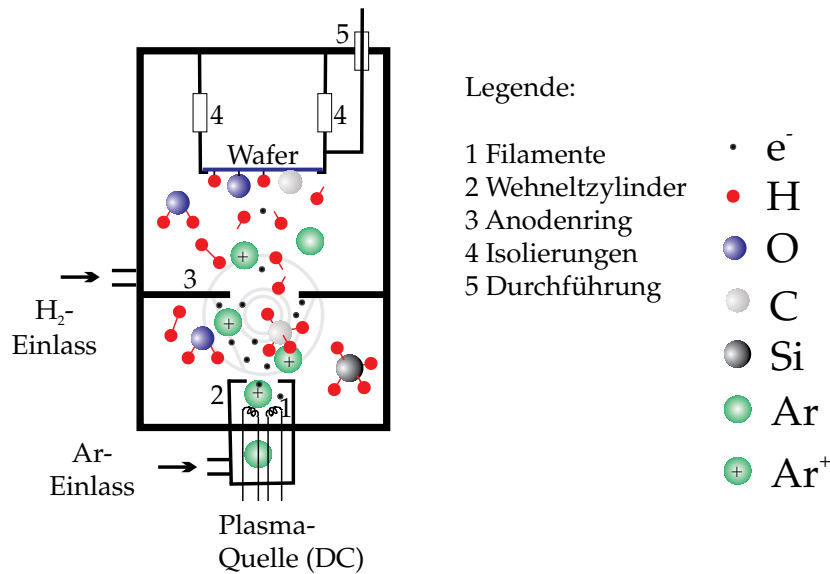


Abbildung 5.23: Schematische Darstellung der Plasmakammer P5, die für die Reinigung mit Hilfe des Argon/Wasserstoffplasmas verwendet wird [77]. Die im Plasma auftretenden Spezies (Elektronen, Gasmoleküle, Ionen) sind ebenfalls eingezeichnet.

Die im Plasma vorhandenen Elektronen weisen eine ausreichend hohe Energie auf, um den molekularen Wasserstoff nach Gleichung 5.9 in seine Radikale zu dissoziieren ($E_{\text{Diss},H_2} = 4,52 \text{ eV}$). Die Elektronen im Plasma haben allerdings nicht mehr ausreichend kinetische Energie $E_{\text{kin}} \leq 14 \text{ eV}$, um Argon $E_{\text{Ion},Ar} = 15,8 \text{ eV}$ oder Wasserstoff $E_{\text{Ion},H_2} = 15,48 \text{ eV}$ zu ionisieren. Dies hat bereits *Hansch et al.* mittels optischer Spektroskopie gezeigt. Es sind hauptsächlich ArH^+ und H_3^+ -Ionen innerhalb des Plasmas nachgewiesen worden. Mit der beschriebenen Anlage kann eine Dissoziationsrate der vorhandenen H_2 -Moleküle von 10^{-3} erreicht werden [83].

		27046/8	27046/9
Ar-Fluss	[sccm]	60	60
H_2 -Fluss	[sccm]	10	10
Prozess-Druck p_P	[mbar]	10^{-2}	10^{-2}
Basis-Druck p_B	[mbar]	$2,5 \cdot 10^{-9}$	$2,5 \cdot 10^{-9}$
Zeit t	[min]	60	60

Tabelle 5.3: Parameter für die Ar/H_2 -Plasma Prozesse.

Als Grundlage für die Prozessparameter zur Reinigung des Aluminiums (siehe Tabelle 5.3) dienen die Untersuchungen von *Bayerstadler* auf Silizium [77, S. 96]. Da innerhalb der MUM nicht die Möglichkeit einer in situ-Analyse der gereinigten Oberflächen besteht und Aluminium sehr schnell sein natürliches Oxid ($t < 1 \text{ min}$) vollständig ausbildet, bedarf es einer Kapselung der gereinigten Oberfläche. Zu diesem Zweck werden die gereinigten Wafer mittels des Transportsystems in die

Kammer P2 transferiert und dort mit einer Deckschicht aus Silizium versehen (Proben: 28095/1 - 28095/4 und 29016/4 - 29016/6). Diese Deckschicht aus Silizium wird mit Hilfe einer Effusionszelle erzeugt. Es hat sich allerdings gezeigt, dass bei dieser Prozesskonfiguration nicht ausgeschlossen werden kann, dass Sauerstoff mit in die Deckschicht eingebaut wird [90, S. 47f]. Daher werden die Ergebnisse dieser Reinigungsversuche verworfen und entsprechend neu durchgeführt. Bei der Wiederholung wird Aluminium als Deckschicht eingesetzt, das aus einem Elektronenstrahlverdampfer abgeschieden wird. Damit ergibt sich der in Abbildung 5.24 dargestellte Schichtstapel, wohingegen bei erfolgreicher Reinigung die Aluminiumoxidschicht zwischen den beiden Aluminiumschichten reduziert bzw. nahezu komplett entfernt ist.

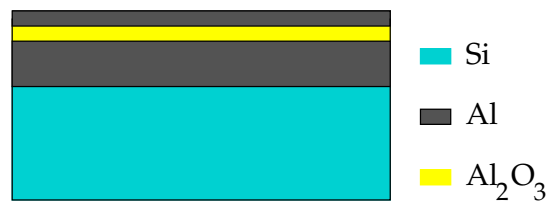


Abbildung 5.24: Darstellung des zu erwartenden Schichtstapels nach der Reinigung. Das natürliche Aluminiumoxid ist dabei allerdings durch den Reinigungsschritt in der Schichtdicke stark reduziert bzw. vollständig entfernt.

Nachfolgend sind die prozessierten Proben und die Prozessparameter, die dabei verwendet worden sind, aufgelistet. Nach der Ausschleusung aus der MUM werden die Proben direkt mittels einer SIMS⁵⁹-Analyse untersucht. Diese Messungen erfolgen differenziell, d.h. zu jeder plasmabehandelten Probe ist zusätzlich die Referenzprobe (Probe: 27046/7) mit eingebaut. Die Referenz kann dadurch ohne erneutes Öffnen der Analysekammer direkt gemessen werden. Hierdurch lassen sich identische Rahmenbedingungen für die beiden Messungen herstellen, die zu einer besseren Vergleichbarkeit der SIMS-Spektren führen. Da für die Proben von einer gleichen Sputterrate für das Aluminium ausgegangen werden kann, sind die Messungen auf die Schichtdicke der gesamten Aluminiumschichten von $d = 1050$ nm kalibriert.

- **27046/7:** Dient als Referenz gegenüber der plasmabehandelten Probe 27046/8, Schichtdicke der Deckschicht aus Aluminium: $d = 45$ nm.
- **27046/8:** Behandlung durch ein Argon/Wasserstoffplasma, Schichtdicke der Deckschicht aus Aluminium: $d = 37$ nm. Die verwendeten Prozessparameter können in Tabelle 5.3 nachgeschlagen werden.
- **27046/7 #2:** Diese Probe ist identisch mit Probe 27046/7, es handelt sich nur um ein anderes Teilstück der Probe. Dient als Referenz gegenüber der plasmabehandelten Probe 27048/9, Schichtdicke der Deckschicht aus Aluminium: $d = 45$ nm.
- **27046/9:** LACB⁶⁰-Reinigungsschritt [90, S. 52f] und anschließende Behandlung durch ein Argon/Wasserstoffplasma, Schichtdicke der Deckschicht aus Alu-

⁵⁹Abk. für Sekundärionenmassenspektroskopie

⁶⁰Abk. für laserunterstützte Kohlenstoffentfernung, engl. laser-assisted carbon burning (LACB)

minium: $d = 42$ nm. Die verwendeten Prozessparameter können in den Tabellen 5.3 und 5.4 nachgeschlagen werden.

		27046/9
O ₂ -Druck $p(\text{O}_2)$	[mbar]	10^{-4}
Plusenergie W_{Puls}	[mJ]	140
Repetitionsrate n	[Hz]	50
Zeit t	[min]	60

Tabelle 5.4: Prozessparameter für die LACB-Reinigung.

In Abbildung 5.25 sind die SIMS-Spektren für Sauerstoff und Aluminiumoxid der vier Messungen dargestellt. Es lässt sich ein paralleler Verlauf der Kurven für die einzelnen Proben bis ins Substrat erkennen. Am Kurvenverlauf für Aluminiumoxid lässt sich für die plasmabehandelten Proben feststellen, dass ein geringerer Abfall zum Substrat hin stattfindet. Somit kann festgehalten werden, dass durch das höhere Temperaturbudget der plasmabehandelten Scheiben, das Aluminiumoxid in Richtung des Substrates diffundiert. Zur Überprüfung des Reinigungseffektes ist dieser Ausschnitt allerdings zu groß und deshalb ist in Abbildung 5.26 eine Detailansicht der Spektren dargestellt. Dort wird auch näher auf diese steilere Flanke der Referenzprobe eingegangen.

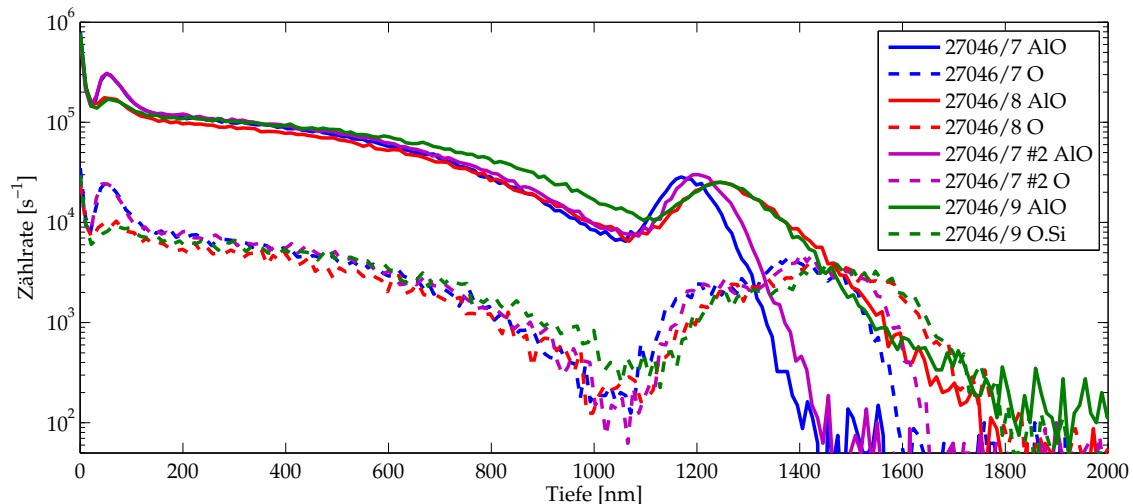
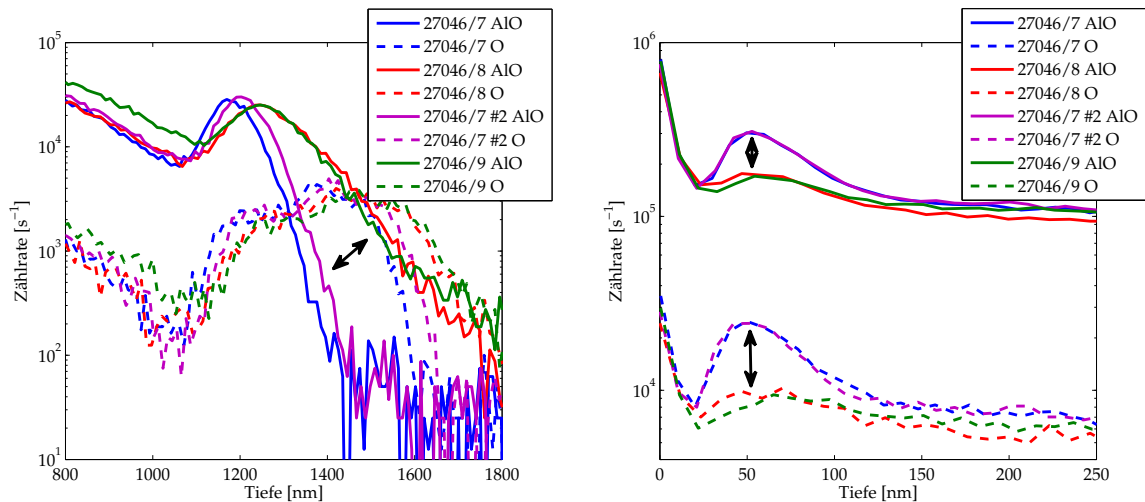


Abbildung 5.25: SIMS-Spektren für die im Ar/H₂-Plasma prozessierten Proben gegenüber den jeweiligen Referenzen.

Durch die Detailansicht in Abbildung 5.26 (a) wird die Diffusion von Aluminium in Richtung des Substrates noch einmal deutlich. In der zweiten Abbildung ist die Vergrößerung der Sauerstoff- und Aluminiumoxid-Spektren direkt an der Grenzfläche zwischen gereinigter Aluminiumschicht und aufgewachsener Deckschicht

dargestellt. Bei den beiden Messungen auf der Referenzprobe sind die Peaks sowohl beim Sauerstoff als auch beim Aluminiumoxid zwischen den beiden Aluminiumschichten zu erkennen. Bei den beiden plasmagereinigten Scheiben sind diese Peaks reduziert, was auf eine Entfernung der Oxidschicht schließen lässt. Eine gewisse "Restwelligkeit" ist an dieser Stelle erkennbar, weshalb eine komplette Entfernung der Oxidschicht nicht angenommen werden kann.



(a) Detailansicht des Übergangs zum Silizium-Substrat.

(b) Detailansicht des oberflächennahen Bereichs.

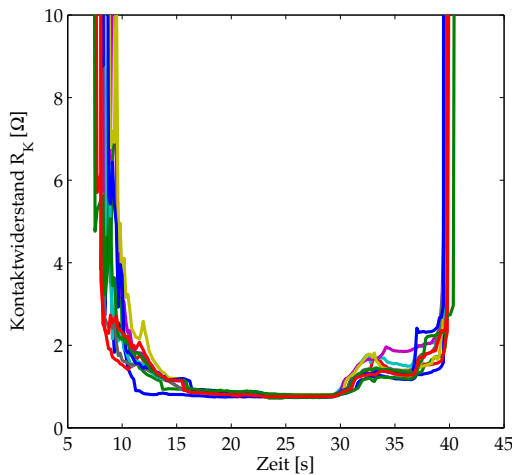
Abbildung 5.26: Detailansicht der in Abbildung 5.25 gezeigten SIMS-Spektren.

Es hat sich gezeigt, dass eine Entfernung des Aluminiumoxides mit Hilfe eines Wasserstoffplasmas möglich ist. Aluminium bildet unter normaler Atmosphäre sein natürliches Oxid innerhalb von $t < 1$ min vollständig aus. Bevor die gereinigte Oberfläche mittels PROFIT untersucht werden kann, entsteht das natürliche Oxid in seiner vollen Dicke. Aus diesem Grund wird die Probe 27046/11 nach der Plasmareinigung unter UHV-Bedingungen in die Kammer P2 der MUM transferiert. Dort wird die Probe einer reinen Sauerstoffatmosphäre ($p(O_2) = 10^{-1}$ mbar) ausgesetzt. Dadurch wird eine Oxidation der Oberfläche erreicht, bei der kein Kohlenstoff oder sonstige Verunreinigungen in die Oxidschicht eingebaut werden. Die verwendeten Prozessparameter sind im Folgenden zusammengefasst:

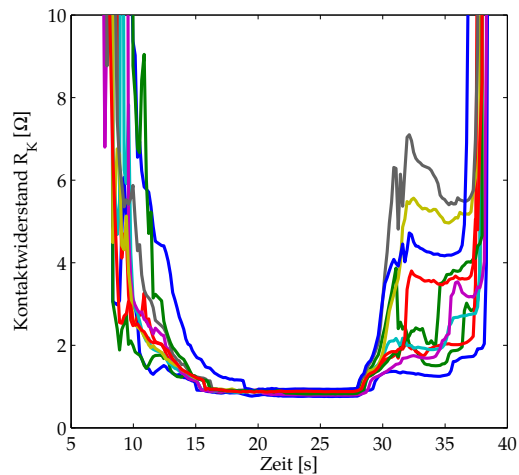
Ar/H ₂ -Plasma		27046/11	Oxidation		27046/11
Ar-Fluss	[sccm]	60	O ₂ -Druck $p(O_2)$	[mbar]	10^{-1}
H ₂ -Fluss	[sccm]	10	Basis-Druck p_B	[mbar]	$1,9 \cdot 10^{-9}$
Prozess-Druck p_P	[mbar]	10^{-2}	Zeit t	[min]	10
Basis-Druck p_B	[mbar]	$2,5 \cdot 10^{-9}$			
Zeit t	[min]	60			

Tabelle 5.5: Parameter für die Prozessierung der Probe 27046/11.

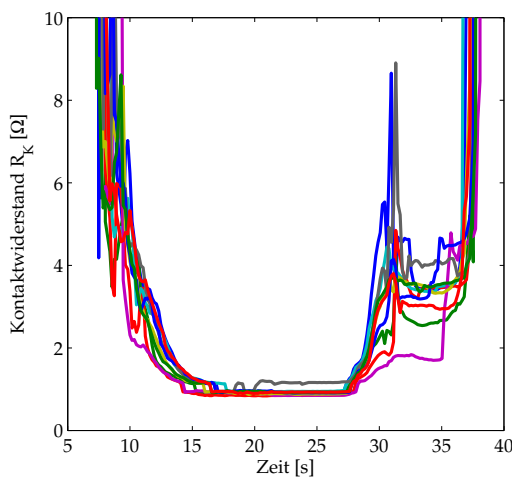
In Abbildung 5.27 sind die Messungen des Kontaktwiderstandes über insgesamt 40 Touchdowns dargestellt. Es zeigt sich, dass zu Beginn ein minimaler Widerstand von $R_K = 0,8 \Omega$ erreicht wird. Dieser verschlechtert sich im Rahmen der Messreihen und strebt bei den letzten zehn Messungen gegen $R_K = 1,2 \Omega$. Ferner ist eine "Verrundung" der Kurven im Bereich des Aufsetzens der Nadel zu verzeichnen. Beim Lift-off lässt sich erkennen, dass der Kontaktwiderstand starken Störungen unterworfen ist.



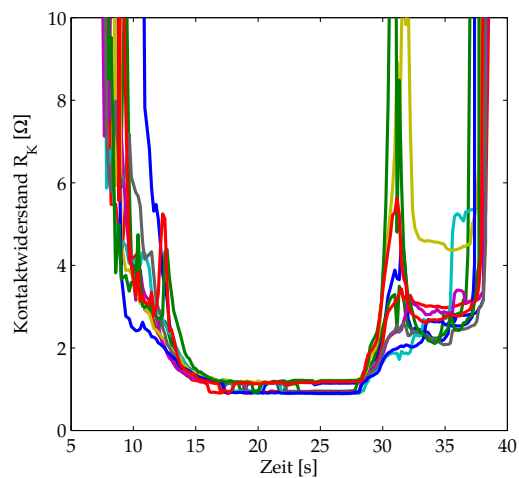
(a) Touchdown #1 - #10.



(b) Touchdown #11 - #20.



(c) Touchdown #21 - #30.



(d) Touchdown #31 - #40.

Abbildung 5.27: Kontaktwiderstandsmessungen über 40 Touchdowns einer mittels Ar/H₂-Plasma gereinigten Probe, die anschließend in reinem Sauerstoff reoxidiert worden ist (Probe: 27046/11). Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel std #1.

Die Messungen der Referenzprobe (Probe: 27046/1) sind in Abbildung 5.28 abgebildet. Der minimale Kontaktwiderstand liegt im Bereich von $R_K = 0,5 \Omega \dots 0,6 \Omega$. Die Kurvenverläufe zeigen die erwartete Badewannencharakteristik und weisen nur im Bereich des Touchdown für die ersten Messungen minimale Störungen auf. Diese reduzieren sich im weiteren Verlauf der Messungen.

Werden die beiden durchgeführten Messungen miteinander verglichen, kann festgestellt werden, dass die Oxidation in reinem Sauerstoff nach der Reinigung zu keiner Verbesserung des Kontaktwiderstandes beim Probing führt.

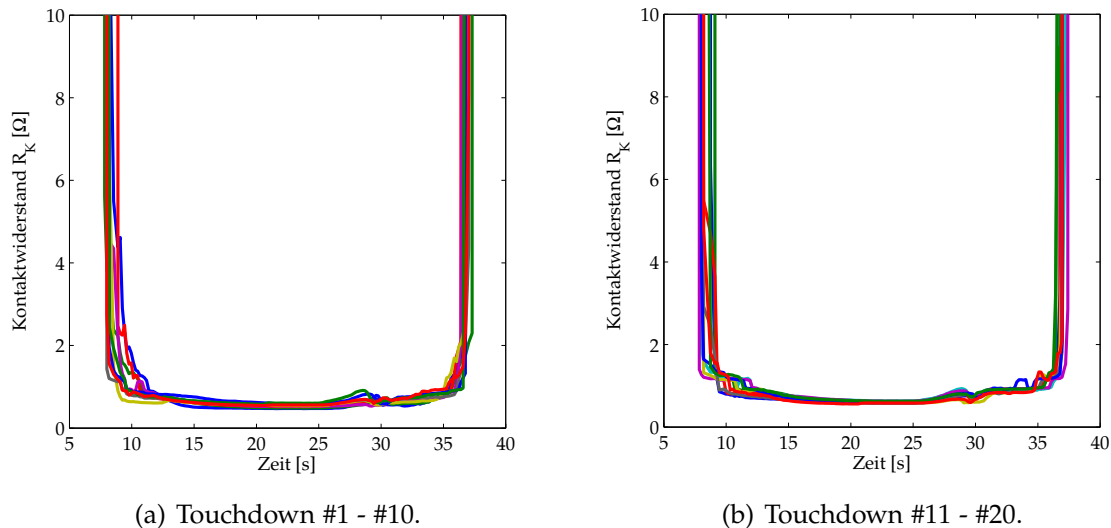


Abbildung 5.28: Kontaktwiderstandsmessungen über je zehn Touchdowns auf der Referenzprobe zu Abbildung 5.27 (Probe: 27046/1). Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel #19.

Fazit

Wie gezeigt, lässt sich mittels eines durch Ionenbeschuss unterstütztes Wasserstoffplasma eine Entfernung des Aluminiumoxides erreichen. Die Prozesszeit von $t = 60$ min ist für den industriellen Einsatz jedoch zu lang. Ferner kommt hinzu, dass die Wafer nur nacheinander prozessiert werden können, was die Produktionszeit zusätzlich enorm erhöht. Unabhängig davon ergeben sich durch die Plasmareinigung keine Vorteile beim Probing. Die Messungen der Proben 27046/11 und 27046/1 zeigen deutlich, dass durch eine Plasmareinigung und die anschließende "saubere" Oxidation eine Verschlechterung des Kontaktwiderstandverhaltens entsteht.

5.4.3 Nasschemische Reinigung mit Kieselsäure

Freitag zeigt in seiner Dissertation den erfolgreichen Einsatz von Kieselsäure⁶¹ zur Passivierung einer Aluminiumoberfläche. Die Behandlung mit Kieselsäure erzeugt eine Aluminiumsilikat-Schicht auf der Oberfläche, die das Aluminium bei nasschemischer Strukturierung schützt [95, S. 113].

Diese Passivierung wird auf eine Verbesserung des Probing-Verhaltens untersucht. Dazu werden die Proben mit einer Kieselsäurelösung behandelt, die als wässrige Lösung mit einer Konzentration von $c = 3$ g/l Kieselsäure angesetzt wird [95, S.

⁶¹chemisches Formelzeichen: H_4SiO_4 (Monokieselsäure)

113]. Die Proben werden für die Dauer von $t = 30\text{ s}$ in die Lösung getaucht, wonach eine vollständige Silizidierung der Oberfläche erfolgt ist. Die Einflüsse der erzeugten Passivierung werden mit Messungen des PROFIT überprüft. Exemplarisch werden die Messungen einer behandelten Probe 29085/4 und der Referenzprobe 29085/5 miteinander verglichen.

In Abbildung 5.29 sind die Messergebnisse für den Kontaktwiderstand der behandelten Probe über zehn Touchdowns dargestellt. Bereits ab der ersten Messung (blauer Verlauf) zeigt die Probe einen zu hohen Wert ($R_K \approx 2\ \Omega$) für den elektrischen Kontaktwiderstand. Dieser ist im Vergleich zur Messung auf der Referenzprobe ($R_{K,Ref} = 0,6\ \Omega \dots 0,7\ \Omega$) fast dreimal so groß. Die Messungen für die Referenzprobe zeigt Abbildung 5.30. Für die mit Kieselsäure behandelte Probe lässt sich feststellen, dass der minimale Wert für den Kontaktwiderstand sich über die zehn Messungen weiter verschlechtert. Im Bereich des Touchdown und des Lift-off der Nadel sind mit zunehmender Messanzahl erhebliche Störungen zu verzeichnen. Das erwartete Badewannenverhalten der Messkurven ist nicht mehr erkennbar.

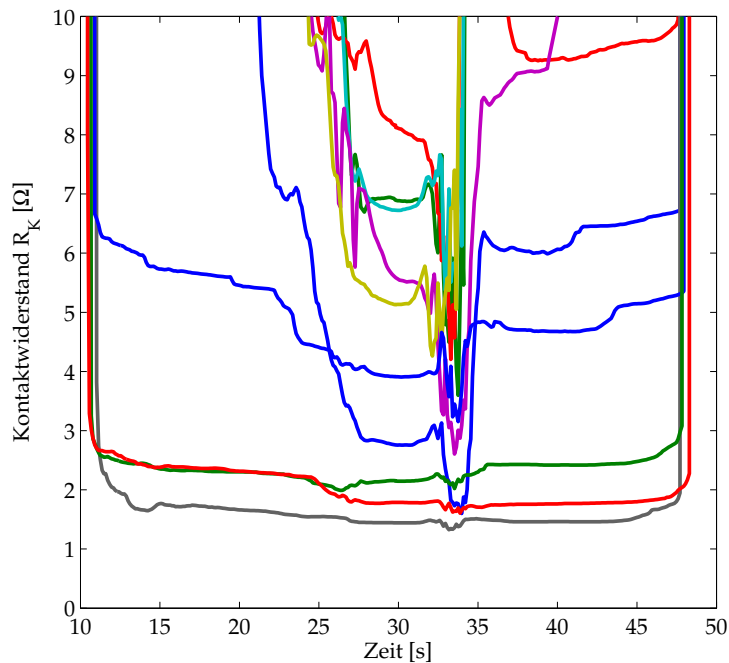


Abbildung 5.29: Messungen des Kontaktwiderstandes von zehn Touchdowns gegenüber der Zeit für die mit Kieselsäure gereinigte Probe 29085/4. Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel #14.

Die in diesem Abschnitt gezeigten PROFIT-Messungen sind mit der Nadel #14 durchgeführt. Dieser Nadeltyp weicht von den geometrischen Maßen der Standardnadel ab. Die genauen Dimensionen der einzelnen Nadelkarten sind in Abschnitt 3.2.4 zusammengefasst.

Die Ergebnisse der Referenzmessung (Abbildung 5.30) zeigen nicht das nahezu rechteckige Kurvenverhalten, das aufgrund von Abbildung 5.10 für reines Aluminium zu erwarten ist. Für die dargestellten Messungen lässt sich bereits eine größere Varianz der Messungen untereinander feststellen. Der minimale Kontaktwiderstand wird mit $R_{K,Ref} = 0,6\ \Omega \dots 0,7\ \Omega$ erreicht. Diese Unterschiede in den

Messergebnissen auf der Referenzprobe sind rein durch die unterschiedlichen Geometrien der Nadeln bedingt.

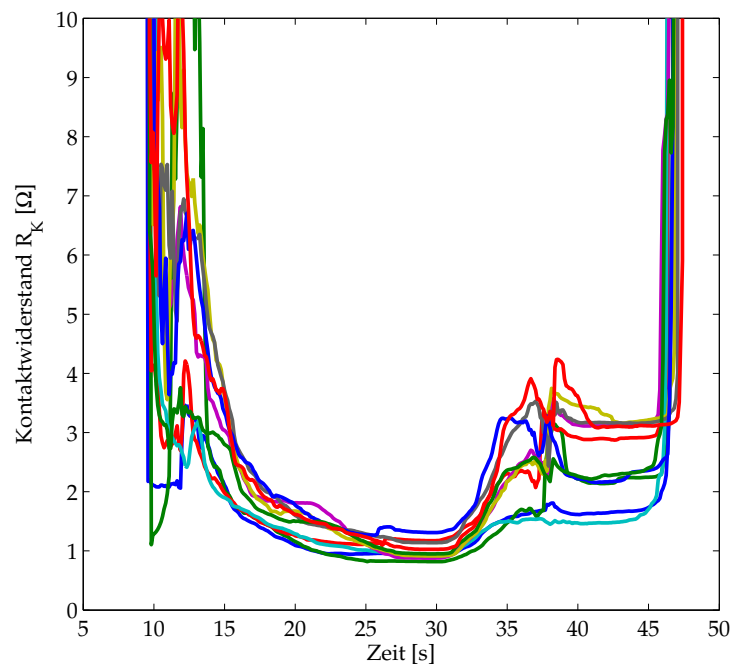


Abbildung 5.30: Kontaktwiderstand für zehn Touchdowns gegenüber der Zeit (Probe: 29085/5). Die Messungen dienen als Referenz für die Messungen auf Probe 29058/4 in Abbildung 5.29. Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel #14.

Werden die Ergebnisse der Referenzprobe (Abbildung 5.30) und der behandelten Probe (Abbildung 5.29) verglichen, wird offensichtlich, dass eine Passivierung der Aluminiumoberfläche mit Kieselsäure zu keiner Verbesserung des elektrischen Widerstandes beim Probing führt. Die Silizidierung der Oberfläche erhöht hingegen den Widerstand und führt zu extremen Störungen. Aus diesem Grund wird von einer genaueren Betrachtung der Kontaktkräfte abgesehen.

Die Versuche mit Kieselsäure werden parallel mit Testwafern, hergestellt von der *Infineon Technologies AG*, durchgeführt. Bei diesen Wafern handelt es sich um ganzflächig metallisierte Substrate, bei denen Aluminium mit einem Anteil von 0,5 % Kupfer als Metallisierung zum Einsatz kommt. Unter der Aluminiumschicht wird der Schichtstapel aus Ti/TiN als Diffusionsbarriere verwendet. Das Aluminium wird zusätzlich mit einer Passivierung, bestehend aus SiO_2 und Si_3N_4 , versehen. Diese wird durch Photolithographie und einem Plasmaätzprozess strukturiert. Ein Querschnitt durch den sich ergebenden Schichtstapel ist in Abbildung 5.31 zu sehen.

Die Behandlung mit Kieselsäure zeigt bei diesen Proben vergleichbare Ergebnisse, wie sie bereits in Abbildung 5.29 zu sehen sind. Eine Probe bleibt ebenfalls unbehandelt und dient als Referenzprobe für den Kontaktwiderstand (siehe Abbildung 5.32). Dabei wird deutlich, dass bereits die Messungen der Referenz schlechte Ergebnisse für den Widerstand liefert. Im Bereich des Touchdown lässt sich eine "Verrundung" des Kurvenverlaufs erkennen. Ein minimaler Widerstand von nur

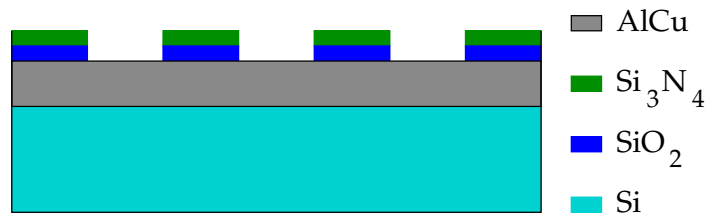


Abbildung 5.31: Schichtstapel der von *Infineon* hergestellten Testwafer.

$R_K \geq 1 \Omega$ wird erreicht. Beim Lift-off der Nadel erhöht sich der Widerstand auf einen Wert zwischen $2 \Omega < R_K < 4 \Omega$, der bis zum Abheben der Nadel gehalten wird. Die Messungen zeigen generell ein von Störungen stark beeinflusstes Verhalten.

Die Messungen auf der *Infineon*-Referenz 12026/1 lassen sich mit den bisherigen Messungen auf Aluminium nicht in Korrelation bringen. Ein derartig gravierender Einfluss der Nadel #14 kann durch den Vergleich mit den in Abbildung 5.30 dargestellten Messungen ausgeschlossen werden. Ferner liegt die Schlussfolgerung nahe, dass die Aluminiumoberfläche aufgrund der Prozessschritte passiviert bzw. verunreinigt ist.

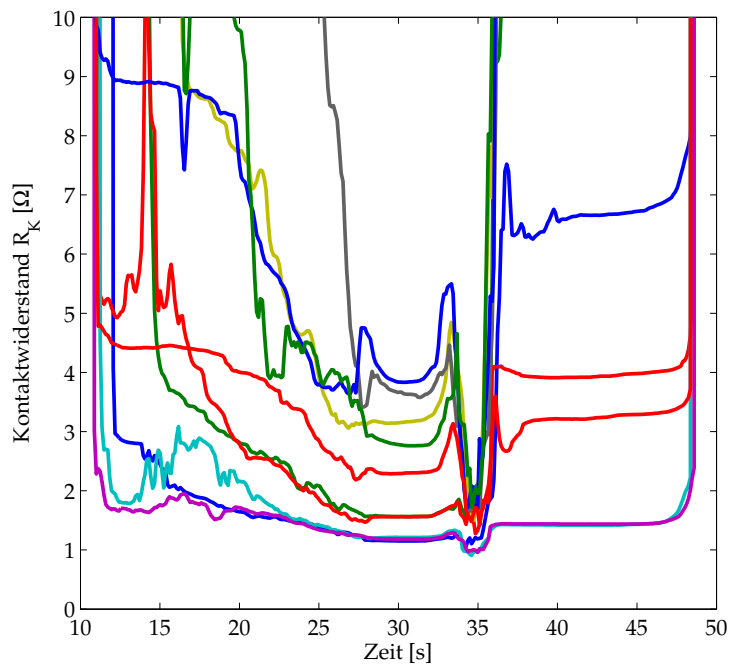


Abbildung 5.32: Kontaktwiderstand für zehn Touchdowns gegenüber der Zeit auf der unbehandelten Referenz von *Infineon* (Probe: 12026/1). Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel #14.

5.5 Fazit

Die Untersuchungen haben ergeben, dass auf sauberem Aluminium ein vergleichbarer Kontaktwiderstand wie auf Gold erreicht werden kann. Durch das Aluminiumoxid ist allerdings ein erhöhter Kraftertrag in die Probe zu verzeichnen. Die vorgestellten Reinigungsverfahren zur Entfernung des Aluminiumoxides liefern unterschiedliche Ergebnisse. Die Ätzwirkung durch ausschließlich Wasserstoffradikale ist nicht ausreichend, um das Oxid zu entfernen. Nur durch die Unterstützung von Ionen- bzw. Elektronenbeschuss kann eine signifikante Ätzrate erreicht werden. Die Passivierung der Oberfläche durch Kieselsäure stellt sich als kontraproduktiv heraus. Der Kontaktwiderstand hat sich dadurch erheblich verschlechtert.

Durch die schnelle Reoxidation der Aluminiumoberfläche macht eine Entfernung des Oxides nur dann Sinn, wenn die Oberfläche anschließend durch ein "sauberes" Oxid wieder geschützt wird. Diese Versuche bringen allerdings keine Verbesserung der Probing-Performance. Somit kann das Al_2O_3 nicht das Hauptproblem für einen schlechten Kontaktwiderstand sein.

Speziell die Versuche mit Kieselsäure belegen, dass Verunreinigungen auf der Oxidschicht zu einer erheblichen Verschlechterung des Kontaktwiderstandes führen. Daher werden im nächsten Kapitel weitere mögliche Ursachen für ein schlechtes Probing-Verhalten untersucht.

Kapitel 6

Einfluss von Verunreinigungen

Wie im vorherigen Kapitel festgestellt, ist das Aluminiumoxid für einen schlechten Kontaktwiderstand nicht alleine verantwortlich. Durch die Verunreinigungen der Oxidoberfläche wird eine nicht zu vernachlässigende Verschlechterung des Widerstandverhaltens beim Probing verursacht.

Zunächst wird auf den Prozessablauf bei der Herstellung von integrierten Schaltungen eingegangen. Anschließend werden die Herstellungsschritte zur Fertigung der Probing Pads und der darauf folgenden Schichten genauer beleuchtet. Mögliche Oberflächenverunreinigungen, die aufgrund der einzelnen Prozessschritte verursacht werden können, werden dabei aufgezeigt. Zur Feststellung, welche Prozessschritte Verunreinigungen auf der Padoberfläche hinterlassen, werden EDX-Untersuchungen der Oberflächen und Nadeln gezeigt, die beim Probing durch einen schlechten Kontaktwiderstand aufgefallen sind. Die mechanischen und elektrischen Unterschiede, die sich aufgrund der Verunreinigungen gegenüber reinem Aluminiumoxid ergeben, werden deutlich gemacht. Aus diesen Differenzen lässt sich direkt auf eine geänderte Definition für die Ursachen eines schlechten Kontaktwiderstandes beim Probing schließen.

6.1 Prozessablauf der Padherstellung

Der Schichtaufbau der Probing Pads ist in Abbildung 2.8 dargestellt. Im Weiteren werden die einzelnen Prozessschritte näher betrachtet, die nach Abscheidung der letzten Metallebene – der Probing Pads – zum Einsatz kommen. In Abbildung 6.1 sind diese graphisch zusammengefasst.

Auf das Aluminium wird eine Schicht TiN abgeschieden. Diese dient als Antireflectionsschicht für den nachfolgenden photolithographischen Schritt. Durch die TiN-Schicht kommt der Fotolack nicht mit dem Aluminium in Berührung und kann somit als mögliche Quelle einer Kohlenstoffverunreinigung ausgeschlossen werden. Die Strukturierung des Aluminiums erfolgt mittels eines trockenchemischen Prozesses, bei dem Chlor bzw. chlorhaltige Verbindungen als Ätzgas verwendet werden. Typische Vertreter sind dabei Bortrichlorid⁶², Siliziumtetrachlorid⁶³ oder

⁶²chemisches Formelzeichen: BCl₃

⁶³chemisches Formelzeichen: SiCl₄

ein Gemisch aus Siliziumtetrachlorid und Chlor ($\text{SiCl}_4/\text{Cl}_2$). Der Fotolack wird im Anschluss durch ein sauerstoffhaltiges Plasma verascht oder durch eine nasschemische Behandlung entfernt [34, S. 108]. Zum Schutz der Waferoberfläche für die weitere Prozessierung im Back-end wird eine Passivierung aufgebracht. Diese besteht aus einem Schichtstapel – Siliziumdioxid, Siliziumnitrid und Polyimid – der ganzflächig abgeschieden wird. Zur Kontaktierung der Probing Pads muss die Passivierung dort wieder geöffnet werden. Dazu folgt ein weiterer Lithographieschritt, gefolgt von einem trockenchemischen Ätzschritt. Die Polyimidschicht wird mit Hilfe eines sauerstoffhaltigen Plasmas entfernt. Als Folge wird der Fotolack ebenfalls angegriffen. Daher kommt häufig statt dem Polyimid Fotoimid zum Einsatz, das genauso wie Fotolack lithographisch strukturiert werden kann. Dadurch kann auf den Prozessschritt zum Aufbringen des Fotolacks verzichtet und Kosten eingespart werden. Zur Entfernung der TiN-, SiO_2 - und Si_3N_4 -Schicht wird ein trockenchemischer Plasmaätzprozess verwendet. Als Ätzgase werden fluorhaltige Verbindungen, wie Schwefelhexafluorid⁶⁴, Tetrafluormethan⁶⁵, Trifluormethan⁶⁶ oder Octafluorpropan⁶⁷ verwendet [96–98]. Bei *Widmann* ist eine ausführliche Auflistung der bei der Herstellung von integrierten Schaltungen verwendeten Ätzgase zu finden [34, S. 201f].

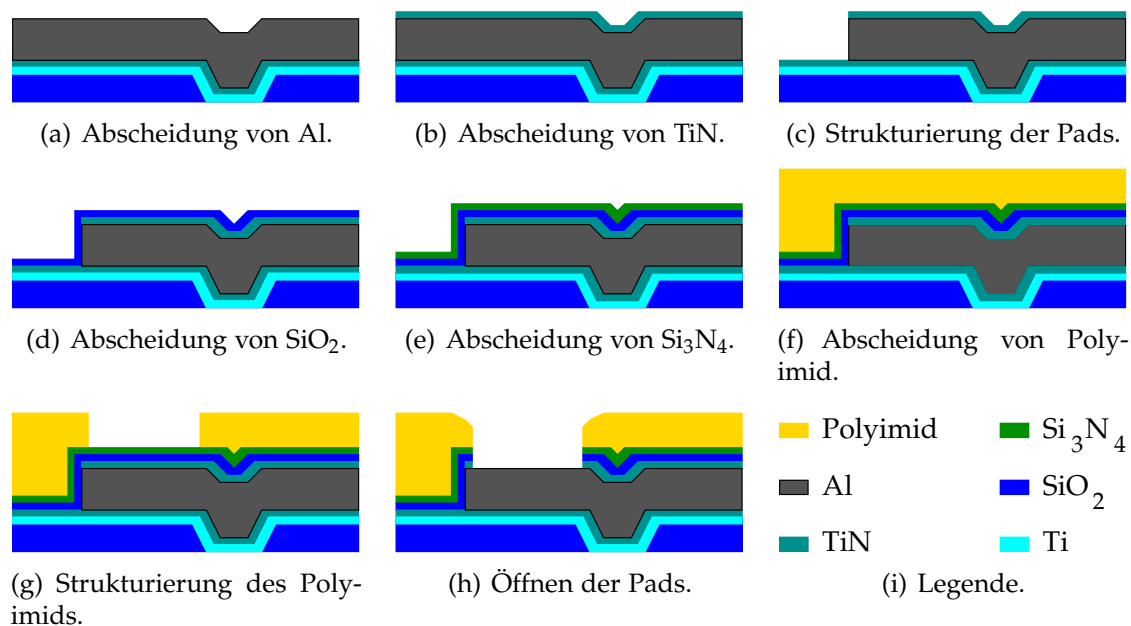


Abbildung 6.1: Vereinfachte Darstellung der Prozessschritte zur Herstellung der obersten Lagen eines ICs.

Da das Probing der Wafer unter Atmosphäre stattfindet, ergibt sich automatisch eine Verunreinigung der Oberfläche durch Kohlenstoff. Wie sich später in Abbildung 6.6 zeigt, weist die Referenzprobe sogar den größten Anteil an Kohlenstoffverbindungen an der Oberfläche auf. Bei späteren Messungen wird festgestellt, dass sich

⁶⁴chemisches Formelzeichen: SF_6

⁶⁵chemisches Formelzeichen: CF_4

⁶⁶chemisches Formelzeichen: CHF_3

⁶⁷chemisches Formelzeichen: C_3F_8

keine negativen Einflüsse ergeben und somit wird Kohlenstoff als mögliche Ursache der Verschlechterung des Kontaktwiderstandes ausgeschlossen.

Durch den Prozessablauf zeigt sich, dass Aluminium, respektive Aluminiumoxid, durch den trockenchemischen Ätzprozess zur Öffnung der Passivierung verunreinigt werden kann. Als mögliche Verunreinigungen ergeben sich dabei Fluor bzw. fluorhaltige Verbindungen. Weitere mögliche Kontaminationen stellen Kohlenstoff und Sauerstoff dar. Kohlenstoff, wie bereits vorher ausgeführt, kann dabei jedoch vernachlässigt werden. Da Aluminiumoxid auf der Oberfläche ab der natürlichen Dicke für Sauerstoff undurchlässig ist, kann Sauerstoff ebenfalls für eine Verschlechterung des Kontaktwiderstandes ausgeschlossen werden.

Bei Fluor bzw. fluorhaltigen Verbindungen besteht die Möglichkeit einer chemischen Reaktion mit Aluminium, denn Fluor weist eine sehr hohe Elektronegativität auf. Diesen Effekt beschreiben *Baek et al.* in ihrer Veröffentlichung [99]. Sie zeigen auf, dass Fluor zur Passivierung einer Aluminiumoberfläche gegenüber Chlor eingesetzt werden kann. Dabei wird ausgenutzt, dass Fluor mit Aluminium eine stabile chemische Verbindung eingeht. Es wird gezeigt, dass nach einem fluorhaltigen Plasma die Oberfläche bis zu 43 % Fluor aufweist.

Die Untersuchungen von *Linn et al.* zeigen ebenfalls, dass es möglich ist, die Aluminiumoberfläche durch ein fluorhaltiges Plasma vor weiterer Korrosion durch Chlor zu schützen [100]. Nach dem Ätzen von Aluminium durch Chlor befinden sich noch Reste von Aluminiumchlorid⁶⁸ auf der Oberfläche, die in Verbindung mit Wasser⁶⁹ eine Korrosion der Aluminiumschicht zur Folge haben. Durch ein anschließendes fluorhaltiges Plasma bildet sich mit dem Aluminium der Oberfläche Aluminiumfluorid⁷⁰, das eine weitere Korrosion durch Chlor verhindert.

Aluminiumfluorid wird allerdings auch als Lack für die Elektronenstrahlolithographie eingesetzt. Hierzu haben *Chen et al.* das Kristallisationsverhalten einer AlF₃-Schicht untersucht [101]. Es zeigte sich dabei, dass amorphes Aluminiumfluorid eine poröse Schicht bildet, die sehr leicht Wasser absorbiert. Dabei wurde gezeigt, dass in Verbindung mit Wasser das Aluminiumfluorid zu Aluminiumoxid und Flusssäure chemisch reagieren kann.

Fazit

Aufgrund des vorgestellten Prozessablaufs ist Fluor die wahrscheinlichste Verunreinigung der Aluminiumoberfläche. Diese Vermutung wird durch mehrere Veröffentlichungen zur Bildung von Aluminiumfluorid durch ein fluorhaltiges Plasma bekräftigt. Das Fluor geht dabei eine feste chemische Bindung mit dem Aluminium ein. Daher werden im weiteren Verlauf des Kapitels Oberflächenanalysen präsentiert, die diese Behauptung bestätigen werden.

⁶⁸chemisches Formelzeichen: AlCl₃

⁶⁹chemisches Formelzeichen: H₂O

⁷⁰chemisches Formelzeichen: AlF₃

6.2 Untersuchungen zu Fluorverunreinigungen

6.2.1 Aluminiumoberfläche

Baek et al. belegen in ihrer Veröffentlichung, dass Aluminium mit Fluor eine stabile chemische Verbindung eingeht [99]. Diese Ergebnisse werden mit eigenen Proben verifiziert. Dazu werden die Aluminiumproben (27046/2 bis 27046/6) fluorhaltigen Plasmen ausgesetzt, bei denen die Prozessparameter variiert werden. Als Arbeitsgas für das Plasma wird Argon verwendet, welche das Schwefelhexafluorid in die Fluorradikale zerlegt. Dem Plasma werden zusätzlich geringe Mengen an Sauerstoff zugeführt, um den frei werdenden Schwefel chemisch zu binden und somit eine Ablagerung in der Prozesskammer zu verhindern. Für die Versuche wird der Plasmaätzer *Silicon Star 12 M* der Firma *Asyntis*⁷¹ verwendet. Es handelt sich hierbei um eine Anlage, die auch in der industriellen Produktion von ICs zum Einsatz kommt. In der Anlage ist eine Remote-Plasma-Quelle der Firma *R³T* verbaut. Der Vorteil dabei ist, dass durch das Remote-Plasma so gut wie kein Ionenbeschuss auf die Probenoberfläche stattfindet und somit die typischen Plasmaschäden nicht auftreten [102].

Als Referenz dient die Probe 27046/1, die keinem Plasma ausgesetzt wird. Die einzelnen Prozessparameter, mit denen die jeweiligen Proben prozessiert werden, können in Tabelle 6.1 nachgelesen werden. Die Probe 27046/6 wird zusätzlich einem weiteren, sauerstofflastigen Plasma ausgesetzt.

	27046/2	27046/3	27046/4	27046/5	27046/6	
Ar-Fluss [sccm]	150	150	150	500	150	500
O ₂ -Fluss [sccm]	300	300	300	1000	300	1000
SF ₆ -Fluss [sccm]	1200	1200	1200	40	1200	40
Druck p [mbar]	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Zeit t [s]	180	360	540	180	180	180

Tabelle 6.1: Prozessparameter zur Erzeugung von Fluorkontaminationen auf der Probenoberfläche.

Im Anschluss wird eine XPS-Analyse durchgeführt. In Abbildung 6.2 sind die Spektren der Analyse für die sechs Proben dargestellt. Zur besseren Veranschaulichung der Ergebnisse werden im Folgenden einzelne Ausschnitte vergrößert betrachtet.

In Abbildung 6.3 ist der Bereich für die Energie der F-1s-Bindung ($E = 688$ eV) dargestellt. Es lässt sich erkennen, dass die plasmabehandelten Proben diesen Peak sehr deutlich aufweisen, wogegen die Referenzprobe an dieser Stelle keinen Peak

⁷¹Die Firma Asyntis ist mittlerweile ein Tochterunternehmen der PVA Tepla und ist in *Plasma Systems* umbenannt worden.

aufweist. Da die Peaks eine erhebliche Zählrate von $c \approx 10^5 \text{ s}^{-1}$ aufweisen, muss von einer Bedeckung der Oberfläche mit Fluor ausgegangen werden. Dies wird durch die weiteren Ergebnisse bestätigt.

Wird der Bereich der Al-2p-Bindung näher betrachtet (Abbildung 6.4), zeigt sich für die Referenzprobe der Peak für reines Aluminium ($E = 72,5 \text{ eV}$) und Aluminiumoxid ($E = 75,5 \text{ eV}$). Für die plasmabehandelten Proben ist der Peak für Aluminium ebenfalls erkennbar. Allerdings zeigt sich eine Verschiebung des Al_2O_3 -Peaks hin zu einer größeren Bindungsenergie ($E = 76,7 \text{ eV}$). Diese Verschiebung deutet darauf hin, dass Fluor nicht nur an der Aluminiumoberfläche physisorbiert wird, sondern chemisorbiert. Da Fluor eine höhere Elektronegativität aufweist als Sauerstoff, bedeutet eine Aluminiumfluoridverbindung eine Verschiebung der Bindungsenergie, im Vergleich zu einer Aluminiumoxidverbindung, zu einem betragsmäßig höheren Wert. Dies wird durch die Untersuchungen von *Strohmeier* bestätigt und die Bindungsenergie von $E = 76,7 \text{ eV}$ wird der Verbindung Aluminiumfluorid zugeordnet [103].

Das deckt sich auch mit den Spektren in Abbildung 6.5. Hier ist der O-2s-Peak ($E = 25,1 \text{ eV}$) für die Referenz zu erkennen. Die Spektren der plasmabehandelten Proben zeigen den F-2s-Peak ($E = 33,3 \text{ eV}$), der bei der Referenz nicht erkennbar ist. Die behandelten Scheiben weisen ferner eine leichte Verschiebung der O-2s-Peaks auf, was darauf hindeutet, dass Fluor nicht nur zu reinem AlF_3 reagiert, sondern auch Verbindungen aus Fluor, Sauerstoff und Aluminium auf der Oberfläche vorhanden sind.

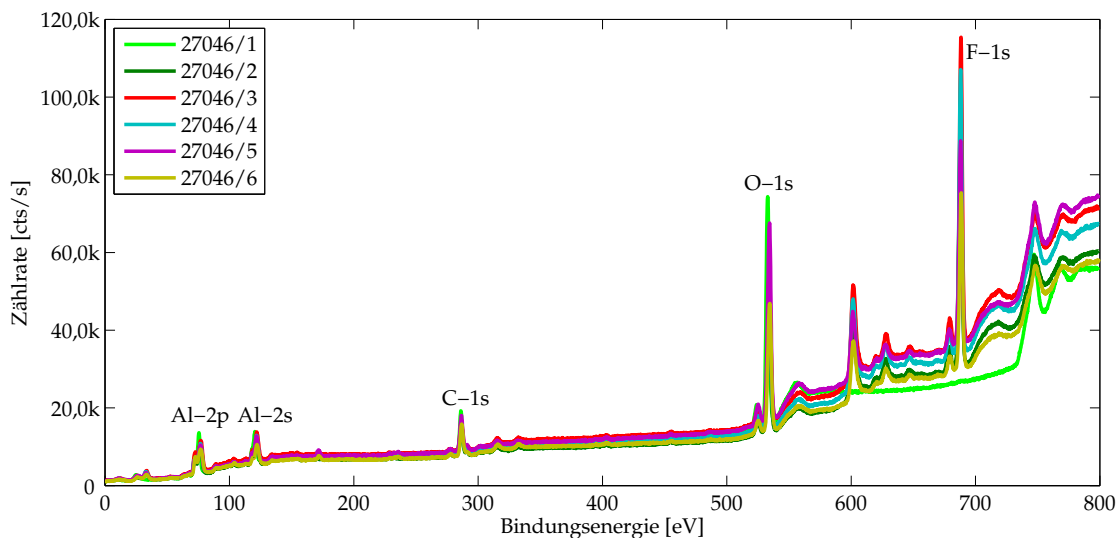


Abbildung 6.2: Gegenüberstellung der XPS-Spektren der Probenserie 27046.

Mit den gezeigten Spektren kann zweifelsfrei nachgewiesen werden, dass Fluor auf der Oberfläche nicht nur physisorbiert wird, sondern chemisch mit der Oberfläche reagiert und fluorhaltige Verbindungen entstehen. Aus den XPS-Daten kann der prozentuale Anteil ermittelt werden. Das Ergebnis der Auswertung ist in Abbildung 6.6 dargestellt. Es zeigt sich, dass durch die Plasmabehandlung ein Fluoranteil von ca. 25 % (Proben: 27046/2 - 27046/4) auf der Oberfläche erzeugt wird.

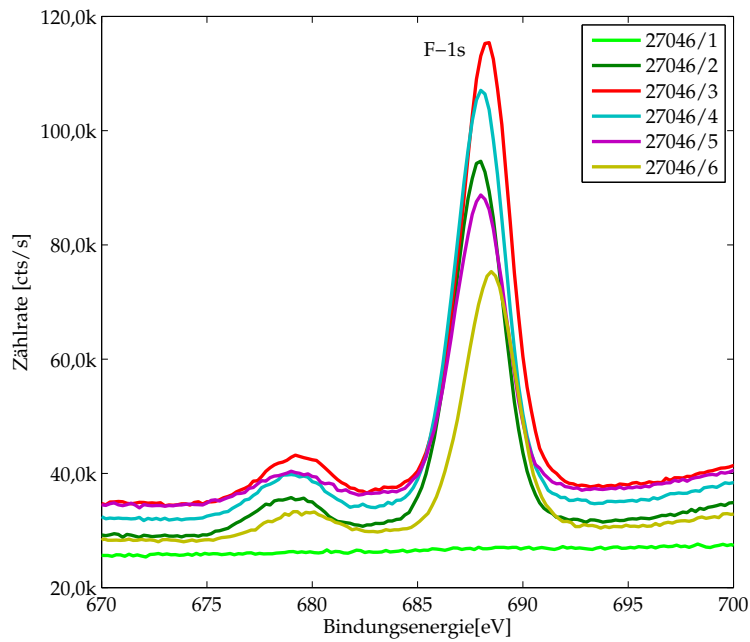


Abbildung 6.3: Vergrößerte Darstellung der Abbildung 6.2 für den F-1s-Peak.

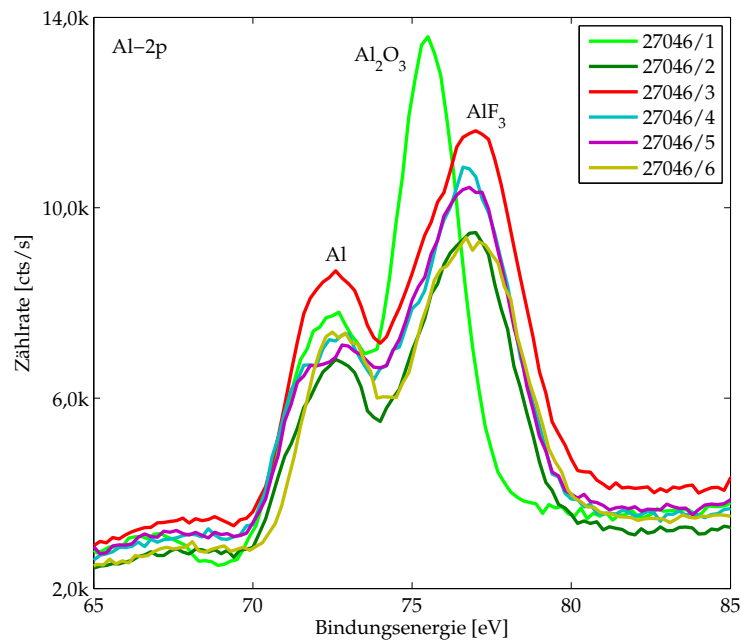


Abbildung 6.4: Vergrößerte Darstellung der Abbildung 6.2 für den Al-2p-Peak.

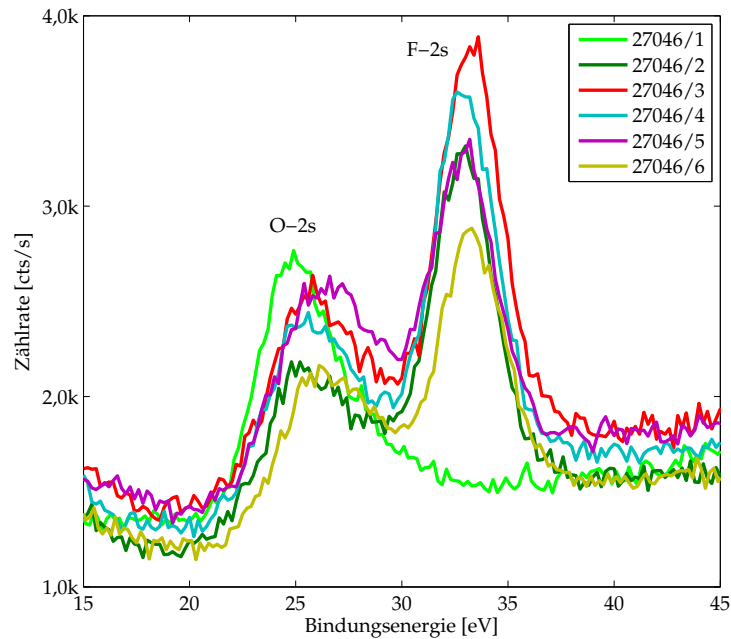


Abbildung 6.5: Vergrößerte Darstellung der Abbildung 6.2 für den O-2s- und F-2s-Peak.

Sogar die Probe 27046/5, die nur mit einem im Verhältnis gesehen geringeren SF_6 -Fluss prozessiert worden ist, zeigt einen Anteil an Fluor von ca. 17 %. Ein nachträgliches, sauerstofflastiges Plasma (27046/6) kann den Fluoranteil reduzieren, allerdings bleibt ein Anteil von ca. 20 % zurück. Der Anstieg des Fluors geht mit einer gleichzeitigen Reduzierung des Sauerstoffanteils auf der Oberfläche einher. Dieses Ergebnis wird durch die Untersuchungen von *Baek et al.* bestätigt [99]. Da der Anteil des reinen Aluminiums nahezu konstant bleibt, muss das Aluminium für die AlF_3 -Verbindung aus dem Al_2O_3 stammen. Dies wird durch den starken Abfall des prozentualen Anteils der Al-2p-Bindung ($E = 75,5 \text{ eV}$) deutlich. Folglich wird das Aluminiumoxid, unterstützt durch das Plasma, in Aluminiumfluorid umgewandelt.

Da die Prozesszeit für das fluorhaltige Plasma nur eine minimale Auswirkung auf den Fluoranteil auf der Probe hat, wird der Prozess der Probe 27046/2 als Standard zur Erzeugung von Fluorverunreinigungen auf dem Aluminium definiert. Diese Prozessparameter werden für die weiteren Versuche verwendet, um eine definierte Fluorverunreinigung auf der Oberfläche zu erzeugen.

Die sich daraus ergebenden möglichen Unterschiede der mechanischen Belastungen und des Kontaktwiderstandes beim Probing werden in einem nachfolgenden Abschnitt näher beleuchtet. Nicht nur für das Probing ergeben sich Nachteile durch das Aluminiumfluorid, sondern auch das Bonding wird erheblich beeinflusst. Dazu sind bereits diverse Veröffentlichungen vorhanden.

Hauert hat gezeigt, dass sich aufgrund des Prozessablaufs Aluminiumfluorid-Verbindungen auf den Bonding Pads bilden, die das Bondverhalten negativ beeinflussen [72]. Es zeigt sich, dass durch das Fluor das natürliche Oxid chemisch verändert wird und dadurch eine weitere Oxidation stattfindet, wodurch ein dickeres

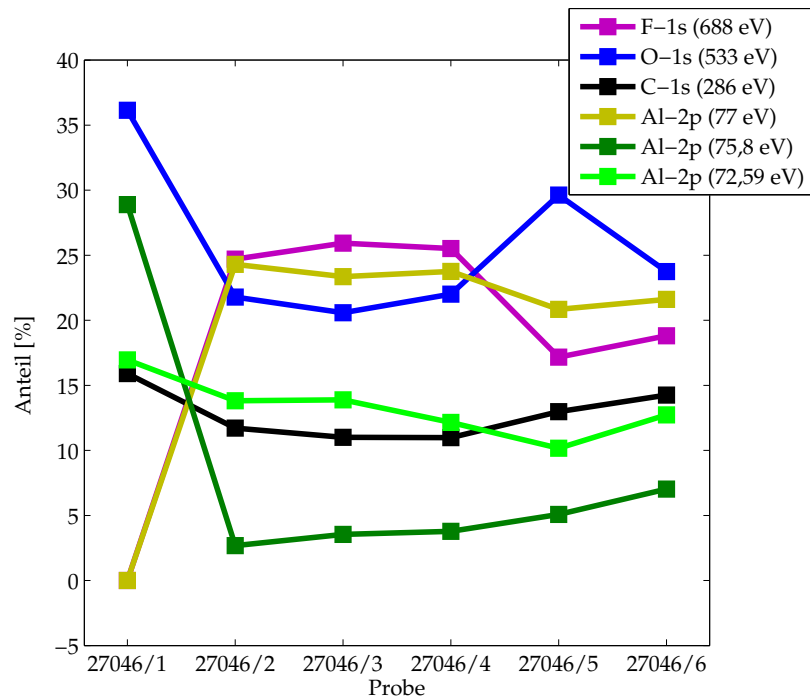


Abbildung 6.6: Prozentuale Anteile der vorkommenden Bindungen für die jeweilige Probe.

Oxid entsteht. Dadurch wird es aufwändiger, eine zuverlässige Verbindung zwischen Bonddraht und Pad zu erreichen. Diese Beobachtungen werden durch die Untersuchungen von *Ernst et al.* [104] und *Schnuewly et al.* [73] bestätigt.

Die Untersuchungen von *Hua et al.* bestätigen das erhöhte Aluminiumoxidwachstum bedingt durch Fluor [105]. REM-Untersuchungen haben ergeben, dass sich blumenartige Defekte auf der Aluminiumoberfläche bilden. An diesen Stellen kann das Al_2O_3 bis zu einer Dicke von $d = 50$ nm aufwachsen. Untersuchungen haben gezeigt, dass in diesem Fall das Fluor hauptsächlich durch die Transportboxen der Wafer auf die Oberfläche gelangt und nicht durch ein fluorhaltiges Plasma. XPS-Untersuchungen haben verdeutlicht, dass es sich bei den Defekten um $(\text{AlF}_6)^{3-}$ handelt, die in Verbindung mit $(\text{NH}_4)^+$ -Ionen zu einer weiterführenden Korrosion führen. Der zugrunde liegende Mechanismus zur Bildung von $(\text{NH}_4)_3(\text{AlF}_6)$ wird in einer weiteren Veröffentlichung von *Hua et al.* beschrieben [106]. Durch diese Defekte der Aluminiumoberfläche kommt es zu nicht haftenden Bonddrähten auf dem Aluminium.

Es zeigt sich also, dass die Kontaminationen von Fluor auf der Oberfläche der Bondig Pads zu erheblichen Problemen führt. Untersuchungen zu dem Einfluss des Fluors auf das Probing werden in Abschnitt 6.3 präsentiert.

6.2.2 Nadelspitze

Das Aluminium wird von der Nadelspitze während des Probing aufgenommen und verschlechtert den elektrischen Kontakt zum Pad [10]. Grund für diesen Effekt ist hauptsächlich die raue Oberfläche der Nadel, wodurch die Abnahme des Pad-

materials begünstigt wird. Das reine Aluminium würde keine Verschlechterung des Widerstandes bewirken. Vielmehr ist dies durch die sich sehr schnell bildende isolierende Oxidschicht bedingt. Es wurde gezeigt, dass sich der Kontaktwiderstand sehr schnell von $R_K = 200 \text{ m}\Omega$ auf $R_K > 10 \Omega$ steigern kann [10]. Aus diesem Grund muss die Nadel in kontinuierlichen Abständen gereinigt werden [79].

Durch den Plasmaprozess zum Öffnen der Probing Pads reagiert das Fluor mit dem Aluminium zu einer stabilen chemischen Verbindung. In diesem Abschnitt wird untersucht, ob das Aluminiumfluorid ebenfalls durch den Probing-Prozess von der Nadelspitze aufgenommen wird und sich dort ablagert. Daher wird eine Nadel mittels EDX untersucht, mit der 100 Touchdowns auf einer plasmabehandelten Scheibe durchgeführt werden. In Abbildung 6.7 ist eine REM-Aufnahme der Nadelspitze zu sehen. Es handelt sich hierbei um die Standardnadel #2. In der Aufnahme sind die Messbereiche für die EDX-Untersuchungen markiert.

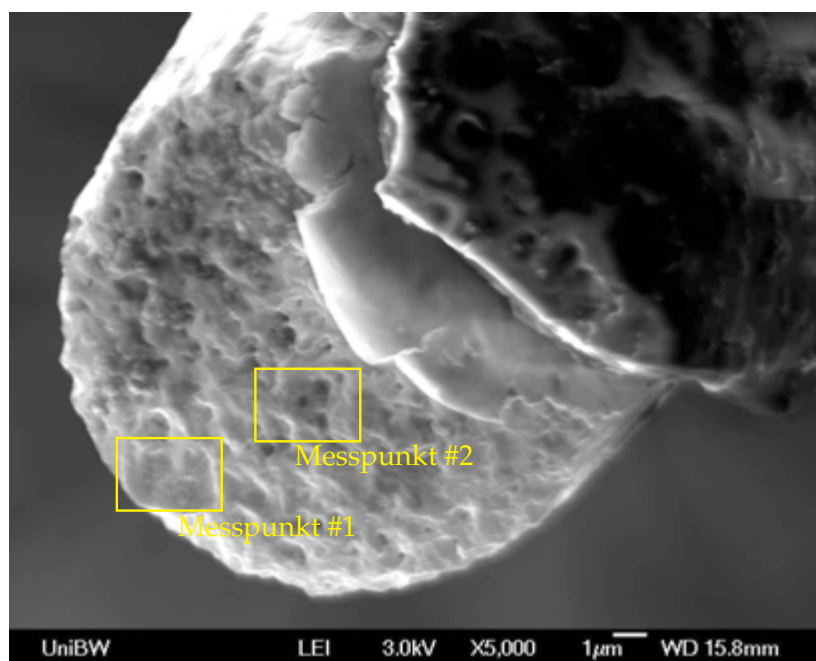
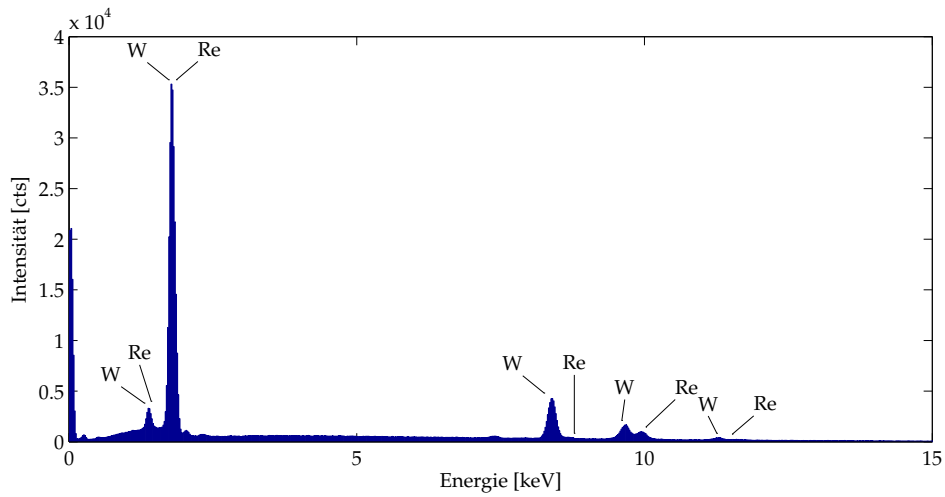


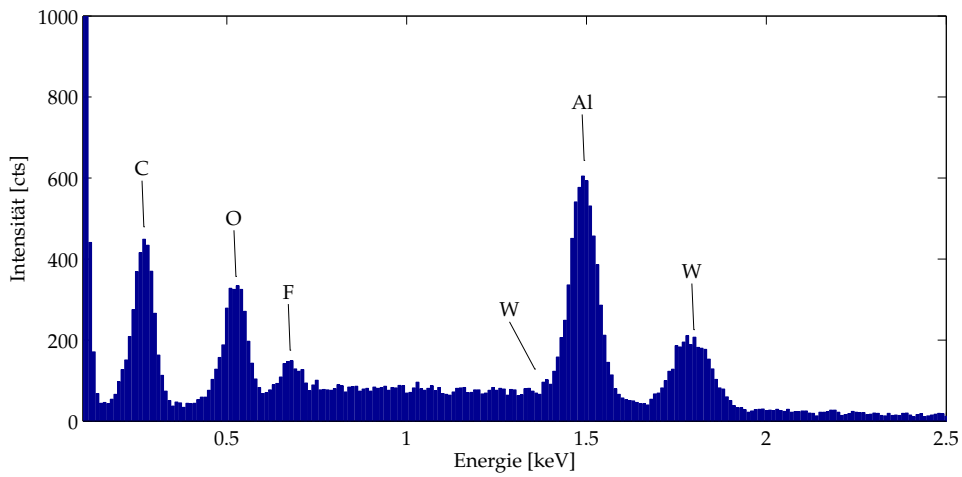
Abbildung 6.7: REM-Aufnahme der Probing-Nadel std #2. Zusätzlich sind die Messbereiche für die EDX-Untersuchungen aus Abbildung 6.8 markiert.

In Abbildung 6.8 sind die Ergebnisse der EDX-Analyse dargestellt. In Abbildung 6.8 (a) lässt sich die metallurgische Zusammensetzung der Nadel aus Wolfram und Rhenium erkennen. Dieser Messpunkt ist in Abbildung 6.7 nicht eingezeichnet. Die Messung erfolgt auf dem "Arm" der Nadel. Die restlichen Graphiken zeigen ähnliche Resultate. Auf der Nadelspitze sind die Elemente Kohlenstoff, Sauerstoff, Aluminium und Fluor zu finden. Die Wolfram-Peaks sind bedingt durch das Material der Nadel. Mit EDX kann leider nur eine Elementanalyse durchgeführt werden. Für eine Analyse der chemischen Zusammensetzung mittels XPS sind die Nadelspitzen jedoch zu klein, so dass keine verlässlichen Ergebnisse zu erwarten sind.

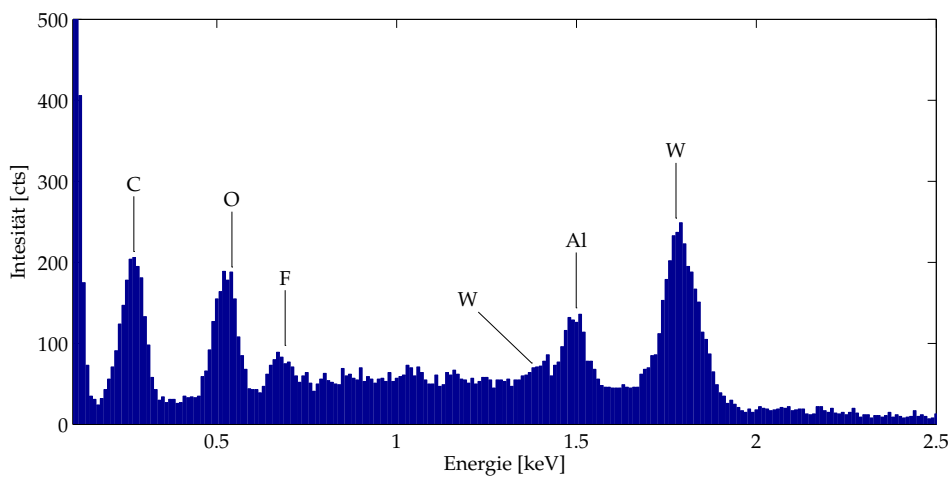
Kohlenstoff ist eine typische Verunreinigung. Durch den Transport und den Einbau der Probe unter Atmosphärenbedingungen ergeben sich Kohlenstoffablagerungen aus der Luft. An der Nadelspitze haften Aluminium, Sauerstoff, Fluor und Kohlenstoff, wie die entsprechenden Peaks belegen. Dies war zu erwarten, da die Nadel



(a) Messpunkt zur Bestimmung der Legierung der Nadel.



(b) Messpunkt #1.



(c) Messpunkt #2.

Abbildung 6.8: EDX-Messungen zur Elementanalyse der Oberfläche der in Abbildung 6.7 dargestellten Probing-Nadel.

beim Probing Verunreinigungen an der Nadelspitze aufnimmt und diese durch einen abrasiven Reinigungsschritt entfernt werden müssen.

Die Messungen an den unterschiedlichen Stellen der Nadel verdeutlichen, dass es keine lokale Verunreinigung ist, sondern sich um eine flächige Belegung der Nadel handelt. Die Ablagerungen lassen sich in der REM-Aufnahme nicht erkennen (vgl. Abbildung 6.7).

6.3 Mechanische und elektrische Unterschiede

Mit den gezeigten Analysen können sowohl auf der Padoberfläche als auch auf der Nadel Verunreinigungen aus Fluor nachgewiesen werden. Der direkte Einfluss dieser Fluorverbindungen auf das Probing-Verhalten wird im Folgenden näher betrachtet. Zu diesem Zweck werden PROFIT-Messungen einer plasmabehandelten Probe (27046/4) und der Referenzprobe (27046/1) einander gegenüber gestellt und verglichen. In Abbildung 6.9 ist jeweils eine repräsentative Messung für den Kontaktwiderstand dargestellt. Die Referenzprobe zeigt den erwarteten Badewannenverlauf, die fluorbehandelte Probe einen mit Störungen behafteten Verlauf. Speziell im Bereich des Aufsetzens der Nadel weicht die Kurve stark von der Referenz ab. Zu Beginn der Hold-time wird jedoch der minimale Kontaktwiderstand von $R_K = 0,5 \Omega$ erreicht, vergleichbar mit der Referenzprobe. Für die Referenz zeigt sich, dass bereits nach wenigen Sekunden des Touchdowns ein Widerstand von $R_K < 1 \Omega$ erreicht wird. Dieser Wert kann bei der Messung auf der plasmabehandelten Probe erst kurz vor dem Stillstand der Nadel ($t = 21$ s) unterschritten werden.

Das Fluor bildet während des Scrubs der Nadel eine isolierende Schicht zwischen Aluminium und Nadelspitze. Dadurch resultiert der hohe Kontaktwiderstand, der erst mit Stillstand der Nadel einen akzeptablen Wert erreicht. In der statischen Position reicht der Anpressdruck der Nadel aus, um einen vergleichbaren Widerstand wie die Referenz zu erzielen.

Werden die auftretenden Kräfte bei den Messungen verglichen, zeigt sich, dass das Fluor auch Auswirkungen auf die Kraftverläufe hat. In Abbildung 6.10 sind die zugehörigen Messungen der lateralen Kraft dargestellt. Es lässt sich erkennen, dass die Referenzprobe 27046/1 einen Kräfteintrag von $F_L = 27$ mN aufweist, wogegen die fluorbehandelte Probe eine laterale Kraft von $F_L = 32$ mN aufnehmen muss. Dies bedeutet einen Anstieg von ca. 20 % in lateraler Richtung, um einen vergleichbaren Kontaktwiderstand wie auf sauberem Aluminium zu erzielen. Diese erhöhte laterale Kraft begünstigt die Delamination des Pads von den Schichten darunter (Siehe Kapitel 2.5.1).

In Abbildung 6.11 sind die entsprechenden Verläufe für die Normalkraft dargestellt. Beide Kurven zeigen ein ähnliches Verhalten. Der Kräfteintrag in normaler Richtung ist in diesem Fall für die Referenzprobe ebenfalls geringer. Die plasmabehandelte Probe zeigt beim Aufsetzen der Nadel bis zu dem Zeitpunkt $t = 19$ s einen nahezu identischen Anstieg der Kraft. An diesem Punkt lässt sich ein Knick im Kurvenverlauf erkennen, der zu einer Vergrößerung der Steigung, mit der die Kurve wächst, führt.

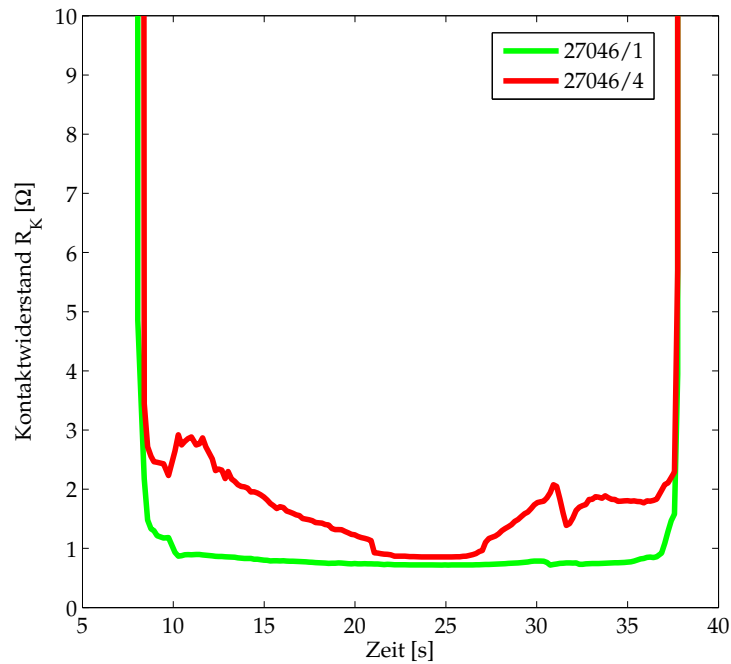


Abbildung 6.9: Vergleich des Kontaktwiderstandes der mit einem Fluorplasma behandelten Probe 27046/4 zur Referenzprobe 27046/1. Dargestellt ist jeweils exemplarisch der Touchdown #10 nach der Reinigung der Nadel. Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel #11.

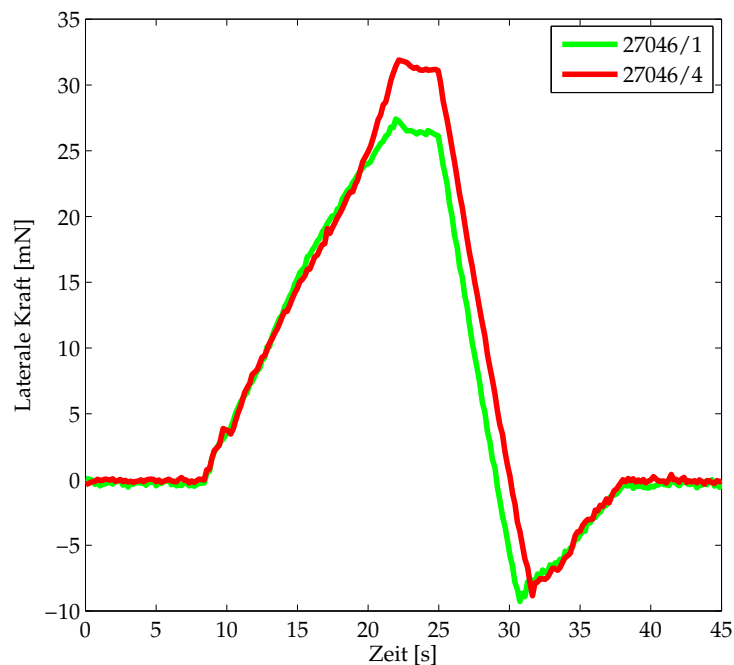


Abbildung 6.10: Vergleich der lateralen Kraft der mit einem Fluorplasma behandelten Probe 27046/4 zur Referenzprobe 27046/1. Dargestellt ist jeweils exemplarisch der Touchdown #10 nach der Reinigung der Nadel. Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel #11.

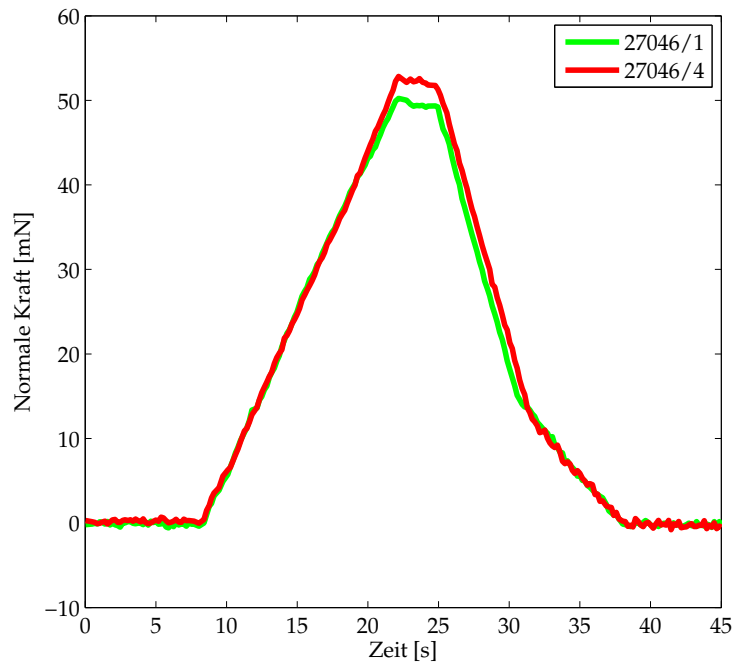


Abbildung 6.11: Vergleich der normalen Kraft der mit einem Fluorplasma behandelten Probe 27046/4 zur Referenzprobe 27046/1. Dargestellt ist jeweils exemplarisch der Touchdown #10 nach der Reinigung der Nadel. Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel #11.

Der maximale normale Kräfteintrag bei der Referenz liegt bei $F_N = 50$ mN und für die plasmabehandelte Probe bei $F_N = 55$ mN. Dies ist ein Anstieg von 10 % im Vergleich zur Referenz. Für die laterale Kraft ist ein Anstieg von $F_L = 27$ mN der Referenz auf $F_L = 32$ mN zu verzeichnen. Dies entspricht einer Steigerung von annähernd 20 %. Die Auswirkungen in normaler Richtung sind nicht ganz so gravierend wie lateral, jedoch ist ein erhöhter Kräfteintrag gleichzusetzen mit einer erhöhten Ausfallwahrscheinlichkeit der Chips.

6.4 Konsequenzen der Fluorverunreinigungen

Es zeigt sich, dass der Verlauf des Kontaktwiderstandes bei fluorbehandelten Proben stärker von Störungen beeinflusst wird als der der Referenzprobe. Ein minimaler Kontaktwiderstand, der vergleichbar mit dem Wert für sauberes Aluminium ist, kann erreicht werden. Allerdings wird dieser Wert erst zu einem wesentlich späteren Zeitpunkt des Messzykluses erreicht. Der Kräfteintrag in lateraler als auch in normaler Richtung wird durch das Aluminiumfluorid in erheblichem Maß gesteigert. Es wird deutlich, dass das Aluminiumfluorid die Performance beim Probing wesentlich stärker beeinflusst als das Aluminiumoxid.

6.4.1 Neudefinition des Problems

Werden diese Ergebnisse ins Verhältnis zu den Messungen auf Gold gesetzt, ergibt sich eine noch gravierendere Verschlechterung der Eigenschaften beim Probing. Somit kann die bisherige Annahme, dass das Aluminiumoxid hauptsächlich für einen schlechten Kontaktwiderstand verantwortlich ist, widerlegt werden. Die Messungen haben gezeigt, dass Verunreinigungen aus Fluor auf der Oberfläche eine entscheidende Rolle bei der Verschlechterung der Probing-Eigenschaften spielen. Der prozentuale Anteil des Fluors übertrifft sogar den des Sauerstoffs auf der Oberfläche der Probing Pads. Die daraus resultierenden schlechten Probing-Eigenschaften sind verdeutlicht worden. In dem folgenden Kapitel wird auf mögliche Reinigungsverfahren, mit denen das Fluor von der Oberfläche entfernt werden kann, eingegangen.

Eine Änderung des Prozessablaufs stellt eine mögliche Alternative dar, um die Verunreinigungen durch Fluor zu verhindern. Die Strukturierung der SiO_2 - bzw. der Si_3N_4 -Schicht kann auch durch einen nasschemischen Prozess erfolgen. Ein nasschemischer Schritt bedeutet allerdings einen erhöhten produktionstechnischen Aufwand, da die Wafer in DI-Wasser⁷² gespült und die flüssigen Chemikalien aufwändig entsorgt werden müssen. Dies zieht erhöhte Produktionskosten nach sich, die möglichst vermieden werden sollen. Ein in situ Reinigungsprozess im Anschluss an das fluorhaltige Plasma stellt somit die bevorzugte Lösungsvariante dar.

⁷²Abk. für deionisiertes Wasser

Kapitel 7

Reinigungsverfahren zur Entfernung von Fluor

In diesem Kapitel wird auf die Entfernung der Fluorverunreinigungen näher eingegangen. Dabei werden unterschiedliche nass- und trockenchemische Verfahren untersucht und auf ihre Tauglichkeit für den industriellen Einsatz bewertet. Es werden zwei Ansätze zur Reinigung der Oberfläche mit Wasserstoff vorgestellt. Zunächst wird der Einfluss der Zugabe von Wasserstoff bereits bei dem Prozessschritt zur Öffnung der Passivierung näher betrachtet. Anschließend werden die Reinigungswirkung eines reinen Wasserstoffplasmas untersucht sowie die Möglichkeit zur Entfernung der fluorhaltigen Verunreinigungen mit Hilfe eines sauerstoffhaltigen Plasmas untersucht. Abschließend wird eine nasschemische Prozessierung der Proben vorgestellt, welche ebenfalls hinsichtlich der Auswirkungen auf die Probing-Performance untersucht wird.

7.1 Trockenchemische Reinigungsverfahren

7.1.1 Fluorplasma unter Zugabe von Wasserstoff

Es hat sich gezeigt, dass die Fluorverunreinigungen aufgrund des Plasmaprozesses zur Öffnung der Passivierung entstehen. Daher wird versucht, diese Fluorablagerung durch eine Anpassung bzw. Veränderung des Prozesses zu reduzieren bzw. gänzlich zu verhindern. Aus diesem Grund wird für das Plasma nicht reines Argon als Arbeitsgas verwendet, sondern ein Gemisch aus Argon und Wasserstoff (5%). Als Prozessanlage dient in diesem Fall der *Asyntis Silicon Star 12 M* Plasmaätzer [102], der für die Durchführung dieser Versuche mit einer zusätzlichen Versorgungsleitung für das Arbeitsgas versehen wird. Über ein Ventil kann entweder reines Argon oder das Argon/Wasserstoff-Gemisch als Arbeitsgas in die Prozesskammer eingeleitet werden. Bei normalen Prozessen wird Sauerstoff mit eingeleitet, um den frei werdenden Schwefel chemisch zu binden. Dadurch wird die Ablagerung von Schwefel auf den Kammerwänden verhindert, da das Schwefeloxid zusammen mit der Prozessabluft abgesaugt wird. Auf die Zugabe des Sauerstoffs wird bei diesen Prozessen allerdings aus Sicherheitsgründen verzichtet, um

die Möglichkeit einer Knallgasreaktion zu verhindern. Dies hat allerdings zur Folge, dass die Prozesskammer häufiger einem Reinigungsschritt unterzogen werden muss, um die Schwefelablagerungen zu entfernen, die zu einer Kontamination der Probe führen könnten. Die genauen Prozessparameter für diese Versuche sind in Tabelle 7.1 zu finden.

		27046/12 # 2	27046/12 # 3
Ar/H ₂ -Fluss	[sccm]	150	150
O ₂ -Fluss	[sccm]	0	0
SF ₆ -Fluss	[sccm]	1000	1000
Druck p	[mbar]	1,0	0,5
Zeit t	[s]	60	60

Tabelle 7.1: Prozessparameter für die Versuche bei Zugabe von Wasserstoff zum Arbeitsgas Argon.

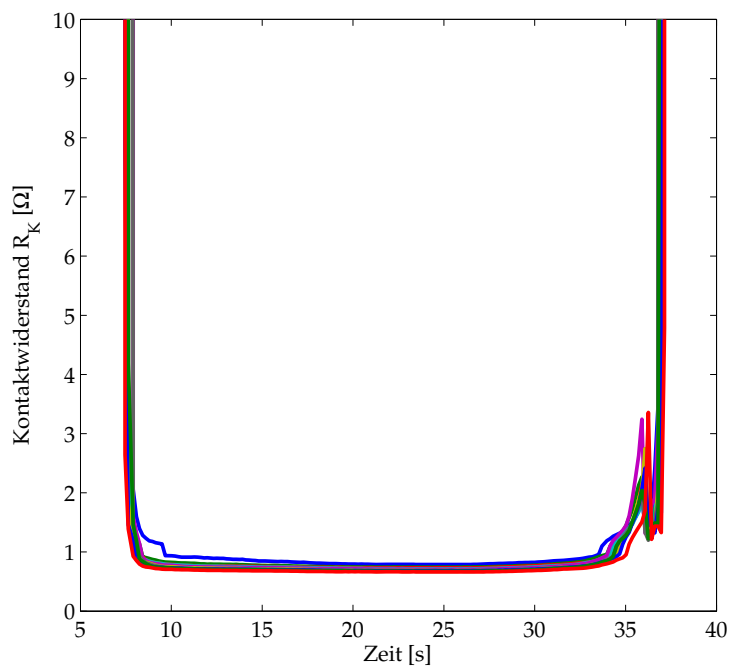


Abbildung 7.1: Messungen des Kontaktwiderstandes für zehn Touchdowns gegenüber der Zeit für die Probe 27046/12 #3. Die Probe ist einem in situ HF-Dip ausgesetzt worden. Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel std #1.

Zur Überprüfung der geänderten Prozessparameter auf das Probing werden Messungen mit Hilfe des PROFIT durchgeführt. Die Ergebnisse werden exemplarisch an der Probe 27046/12 #3 gezeigt. Diese sind repräsentativ für die durchgeführten Versuche. Für den Kontaktwiderstand (Abbildung 7.1) lässt sich erkennen, dass

das Verhalten annähernd dem von sauberem Aluminium entspricht. Es zeigt sich auch ein nahezu rechteckiges Verhalten der Kurven beim Aufsetzen der Nadel. Minimale Störungen sind im Bereich des Lift-offs der Nadel zu erkennen. Diese sind allerdings nicht kritisch, da beim Lift-off der Nadel die Funktionstests der einzelnen DUTs bereits absolviert sind. Für die Kraftverläufe ergeben sich allerdings einige interessante Aspekte. Die Verläufe für die normale und laterale Kraft sind in Abbildung 7.3 respektive Abbildung 7.4 zu finden. Hierbei zeigt sich, dass sich die maximalen Kräfte nur minimal von denen von sauberem Aluminium unterscheiden (vgl. hierzu Abbildungen 5.14 und 5.15). Im Bereich der normalen Kraft lässt sich eine leichte Reduzierung der maximalen Kraft von $F_N = 48 \text{ mN}$ der sauberen Aluminiumoberfläche auf $F_N = 45 \text{ mN}$ bei den hier vorgestellten Prozessparametern erreichen. Die laterale Kraft auf die Probe steigt jedoch von $F_L = 22,5 \text{ mN}$ der Referenz auf $F_L = 28 \text{ mN}$ an. Dies bedeutet in normaler Richtung eine Reduzierung von knapp 10% und in lateraler eine Steigerung von 20%. Absolut gesehen bleibt der gesamte Krafteintrag in die Probe konstant. Bemerkenswerter ist jedoch die Tatsache, dass die Normalkraft mit einer konstanten Steigung auf null abfällt. Der typische Knick in dem Kurvenverlauf zeigt sich bei diesen Proben nicht. Die Erklärung hierfür kann direkt aus dem Verlauf der lateralen Kraft (Abbildung 7.4) abgelesen werden. Für die laterale Kraft ist keine Umkehrung der Kraft in den negativen Bereich zu erkennen. Dies bedeutet, dass sich die Nadel beim Lift-off nicht an der Endposition der Scrubs verhakt. Somit entsteht ein symmetrisches Bild für das Aufsetzen und Abheben der Nadel.

Ein Erklärung für die abweichenden Kraftverläufe liefert die REM-Aufnahme eines Probe Mark der Probe 27046/12 #3 (Abbildung 7.2). Es zeigt sich, dass die Nadel keinen wirklichen Scrub in lateraler Richtung auf der Oberfläche vollzieht. Die Probe Marks können als punktförmig betrachtet werden. Daher ergeben sich die oben beschriebenen Änderungen der Kraftverläufe.

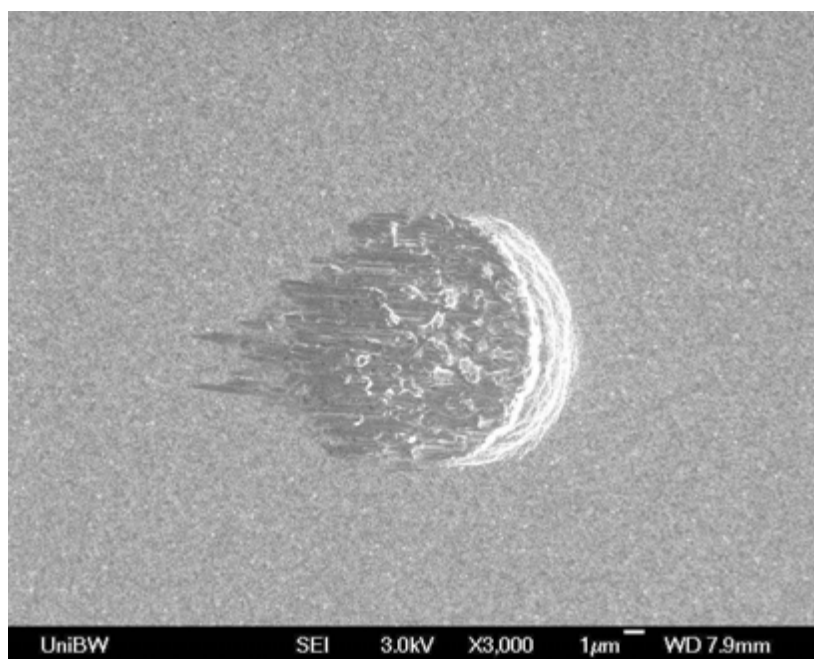


Abbildung 7.2: REM-Aufnahme eines Probe Mark der Probe 27046/12 #3.

Zur Verdeutlichung der Verbesserung des Kontaktwiderstandes sind die beiden prozessierten Proben 27046/12 #2 und #3 den zwei Proben 27046/1 und 27046/2 direkt gegenübergestellt (Abbildung 7.5). Hierbei handelt es sich erstens um die Referenzprobe 27046/1 mit sauberem Aluminium und zweitens um eine mit dem Standardprozess verunreinigte Fluorprobe 27046/2. Die Kurven stellen hierbei jeweils das arithmetische Mittel über zehn einzelne Messungen dar. Es zeigt sich, dass die Referenz aufgrund der Mittelung im Bereich des Touchdowns ($10\text{ s} < t < 14\text{ s}$) eine Welligkeit aufweist. Die fluorverunreinigte Probe weist in diesem Bereich ein, wie zu erwartendes, schlechteres Verhalten auf und erreicht erst zum Zeitpunkt $t = 17\text{ s}$ den gleichen Kontaktwiderstand wie die Referenz. Die Probe 27046/13 #2 zeigt beim Aufsetzen ein Verhalten, das zwischen der Referenz und der fluorverunreinigten Probe liegt. Die Probe 27046/12 #3 weist einen störungsfreien Verlauf des Kontaktwiderstandes auf, der bereits ab $t = 12\text{ s}$ seinen minimalen Wert erreicht. Die Kurve lässt auch den wie bereits auf Gold gesehenen Badewannenverlauf mit nahezu rechteckigem Verhalten beim Aufsetzen und Abheben der Nadel erkennen.

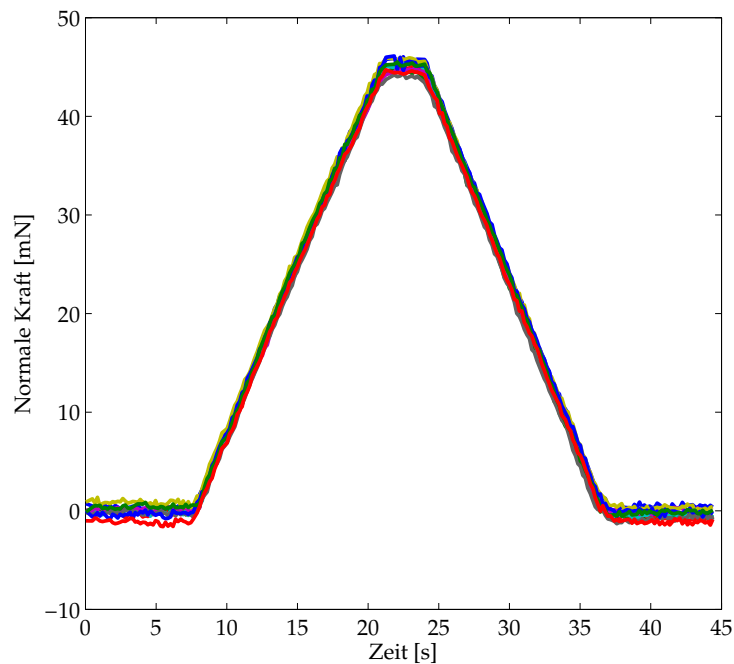


Abbildung 7.3: Messungen des normalen Kräfteintrages für zehn Touchdowns gegenüber der Zeit für die Probe 27046/12 #3. Die Probe ist einem in situ HF-Dip ausgesetzt worden. Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel std #1.

Fazit

Es wird deutlich, dass sich durch die Verwendung von Argon/Wasserstoff anstatt von reinem Argon als Arbeitgas die Probing-Performance verbessern lässt. Die entstehenden Wasserstoffradikale reagieren mit den Fluorradikalen und bilden dadurch einen in situ HF Dip während des Prozesses. Weiter zu untersuchen sind die Auswirkungen des Wasserstoffs auf die Ätzrate zur Entfernung der Passivierung. Ferner sind die Verträglichkeit für die industrielle Verwendbarkeit und die möglichen Ablagerungen des Schwefels noch genauer zu untersuchen. Eine minimale

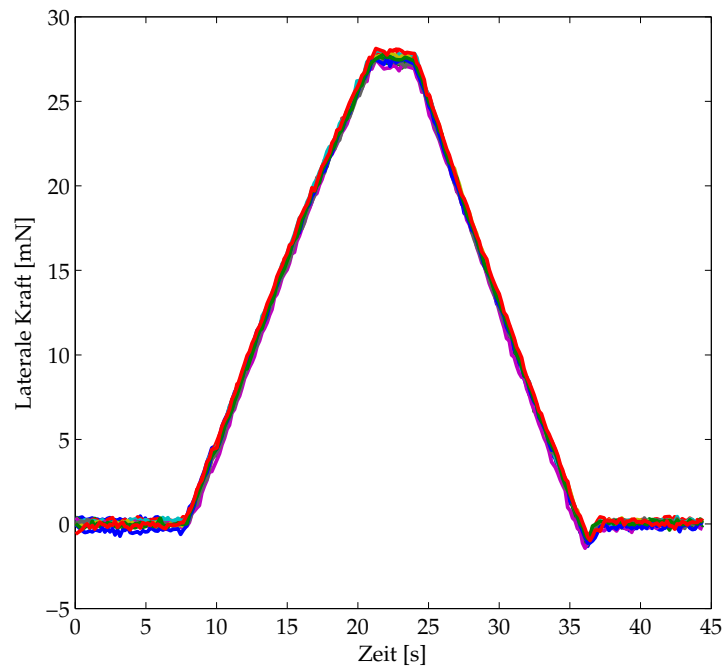


Abbildung 7.4: Messungen des lateralen Kräfteintrages für zehn Touchdowns gegenüber der Zeit für die Probe 27046/12 #3. Die Probe ist einem in situ HF-Dip ausgesetzt worden. Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel std #1.

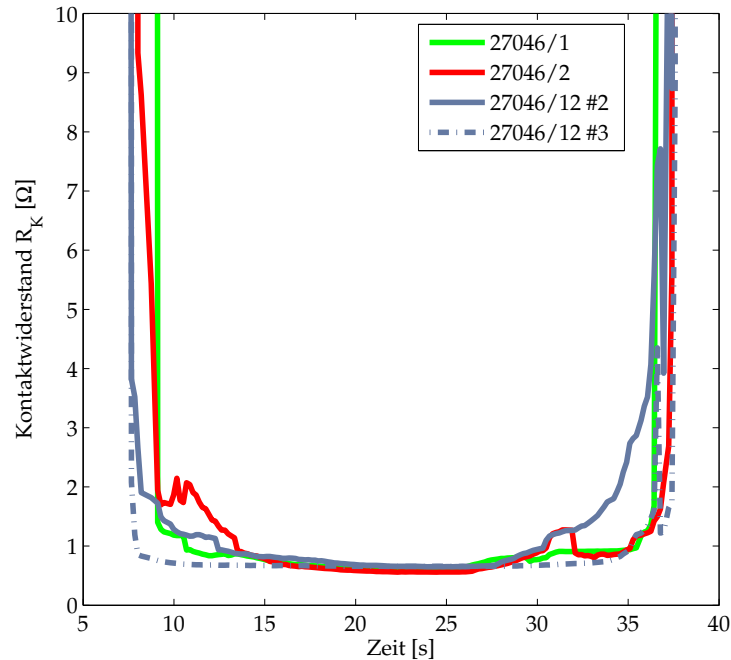


Abbildung 7.5: Vergleich des Kontaktwiderstandes für eine unbehandelte Probe 27046/1 und eine durch Fluor kontaminierte Probe 27046/2. Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel #19. Dem gegenübergestellt sind die Verläufe der Kontaktwiderstände der zwei Proben 27046/12 #2 & 27046/12 #3, die dem veränderten Fluorplasma ausgesetzt worden sind. Dargestellt ist jeweils das arithmetische Mittel aus zehn Touchdowns. Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel std #1.

Zugabe von Sauerstoff, so dass die untere Explosionsgrenze des Wasserstoffs nicht erreicht wird, stellt eine Möglichkeit dar, die Schwefelablagerung zu minimieren. Weitere Untersuchungen in diesem Bereich sind daher erforderlich.

7.1.2 Wasserstoffplasma

Reine Wasserstoffplasmen werden im Bereich der Aufbau- und Verbindungstechnik als Reinigungsplasmen für die Leadframes⁷³ vor der Befestigung der einzelnen Dies verwendet. Mit den im Folgenden gezeigten Ergebnissen wird auf die Möglichkeit der Entfernung der Fluorverunreinigungen mit Hilfe eines reinen Wasserstoffplasmas eingegangen. Für die Versuche wird eine Versuchsanlage vom Typ *Microwave Plasma System 400* der *PVA Tepla* verwendet [107]. Die Anlage ist mit einem Mikrowellengenerator für eine Frequenz von $f = 2,54$ GHz ausgestattet. Die Mikrowellen werden durch ein entsprechendes Eintrittsfenster an der Seitenwand in die Prozesskammer eingeleitet und erzeugen in der Kammer ein ausgedehntes Plasma. Die Reinigungswirkung wird rein durch chemisches Ätzen erreicht. Das Plasma zerlegt das eingeleitete Gas in seine Radikale, welche die Probenoberflächen reinigen. Die Leistung der eingekoppelten Mikrowellen kann variabel von $P = 0 \dots 1000$ W eingestellt werden.

Für die hier vorgestellten Versuche wird die Kammer mit einem speziellen Probenhalter ausgestattet (Abbildung 7.6). Die einzelnen Wafer werden horizontal mit einem Abstand von $d \approx 3$ cm zueinander in den Probenhalter gelegt. In den Halter sind spezielle Permanentmagnete so eingearbeitet, dass über jedem Wafer ein Magnet angeordnet ist. Durch die Magnetfelder zündet das Plasma direkt im Bereich dieser Felder, wodurch ein lokales Plasma in unmittelbarer Nähe der Waferoberfläche erreicht wird. Als Plasmagas wird in die Kammer reiner Wasserstoff eingeleitet. Auf die Zugabe eines zusätzlichen Arbeitsgases, wie beispielsweise Argon, wird in diesem Fall völlig verzichtet. Somit werden durch das Plasma ausschließlich Wasserstoffradikale erzeugt, die eine Ätzwirkung der Oberfläche erzielen können.

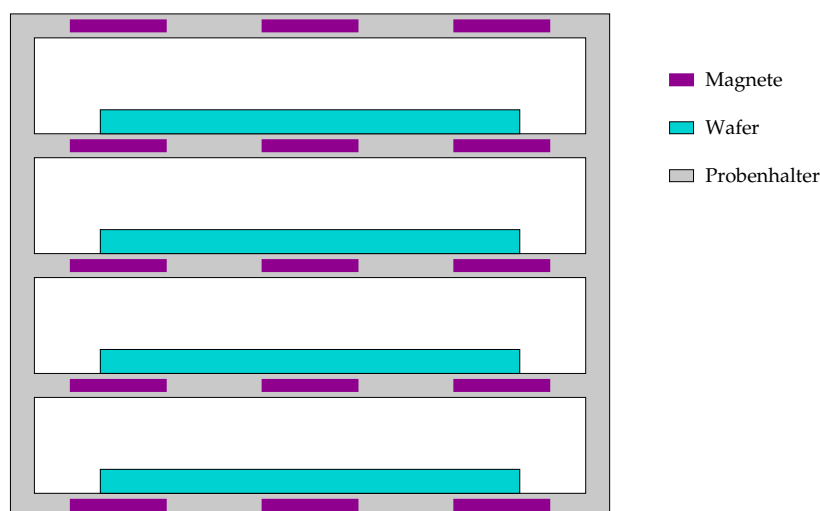


Abbildung 7.6: Querschnitt durch den schematischen Aufbau des Probenhalters mit eingelassenen Permanentmagneten.

⁷³engl. für Trägerstreifen

Die Wafer werden zunächst einem fluorhaltigen Standardplasma ausgesetzt, um eine entsprechende Fluorverunreinigung auf der Waferoberfläche zu erzeugen. Anschließend werden die Wafer in der vorgestellten Plasmaanlage einem reinen Wasserstoffplasma zur Reinigung bzw. Entfernung des Fluors ausgesetzt. Die genauen Prozessparameter für die einzelnen Proben können der Tabelle 7.2 entnommen werden.

	22017/4	22017/5
H ₂ -Fluss [sccm]	200	200
Leistung [W]	300	300
Zeit <i>t</i> [min]	8	12

Tabelle 7.2: Prozessparameter für die Versuche mit einem reinen Wasserstoffplasma.

Die anschließend durchgeführten PROFIT-Messungen sind zusammengefasst in den folgenden Abbildungen 7.7 - 7.9 zu sehen. Die Kurven stellen dabei jeweils das arithmetische Mittel über zehn Touchdowns der Nadel dar.

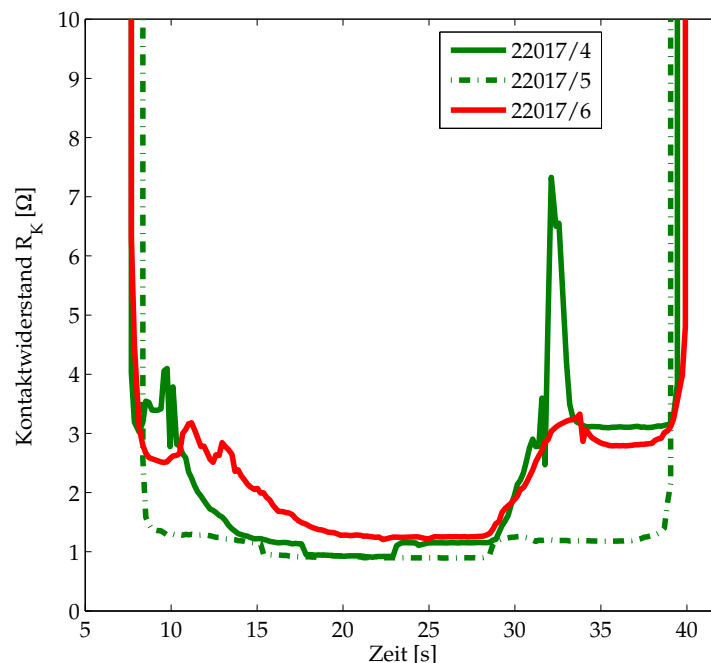


Abbildung 7.7: Gegenüberstellung des Kontaktwiderstandes der zwei Proben 22017/4 & 22017/5, die einem reinen H₂-Plasma ausgesetzt worden sind und der mit Fluor kontaminierten Probe 22017/6. Es ist jeweils das arithmetische Mittel aus den Touchdowns #21 bis #30 dargestellt. Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel std #1.

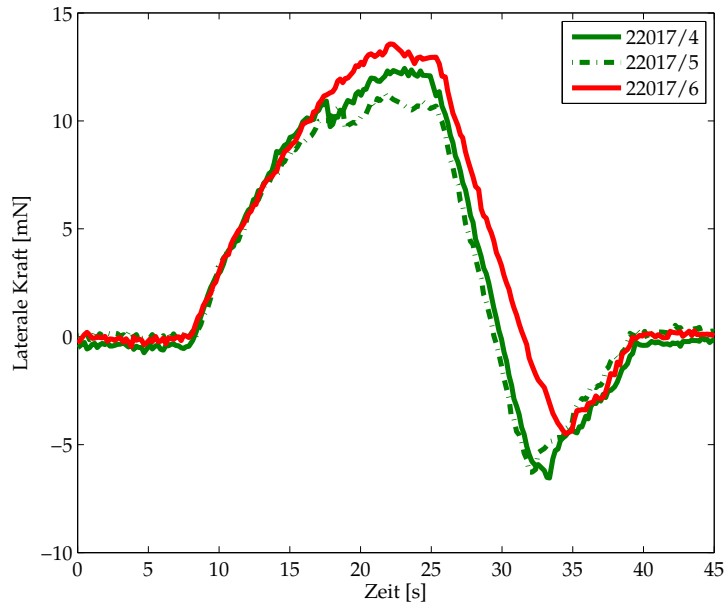


Abbildung 7.8: Entsprechende Gegenüberstellung der lateralen Kräfte zu Abbildung 7.7. Es ist jeweils das arithmetische Mittel aus den Touchdowns #21 bis #30 dargestellt. Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel std #1.

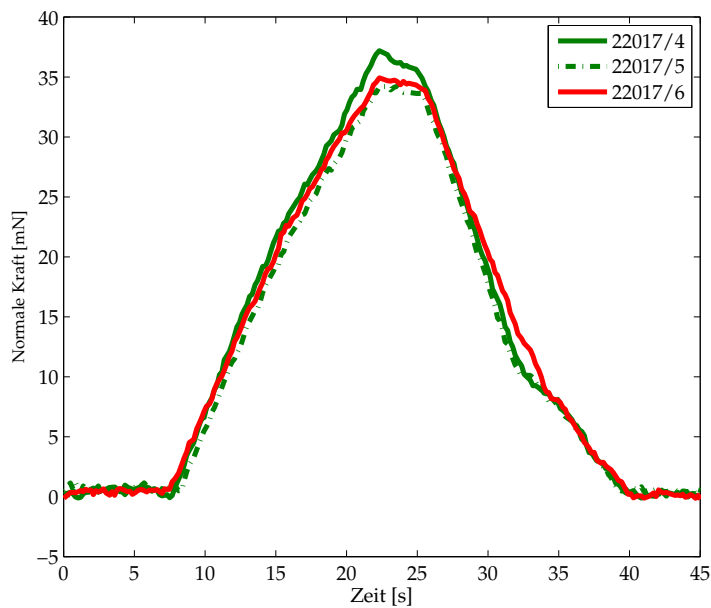


Abbildung 7.9: Darstellung der normalen Kräfte zu den in Abbildung 7.7 präsentierten Kontaktwiderstandsmessungen. Es ist jeweils das arithmetische Mittel aus den Touchdowns #21 bis #30 dargestellt. Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel std #1.

Die Probe 22017/6 dient für die Untersuchungen als Referenz. Dieser Wafer wird nur dem fluorhaltigen Plasma ausgesetzt und nicht gereinigt. Dies lässt sich am Verlauf des Kontaktwiderstandes der Probe in Abbildung 7.7 erkennen. Die ungeereinigte Probe weist den schlechtesten Verlauf für den Kontaktwiderstand auf. Die

Prozessierung der anderen Proben (22017/4 & 22017/5) weist eine Verbesserung des Verhaltens für den Kontaktwiderstand auf. Die Probe 22017/4, die nur einer Wasserstoffbehandlung von $t = 8$ min ausgesetzt wird, lässt ein ähnliches Verhalten erkennen wie die Referenzscheibe. Dies lässt auf einen relativ geringen Einfluss des Wasserstoffplasmas für diese Prozesszeit schließen. Die Probe 22017/5, die für $t = 12$ min dem H_2 -Plasma ausgesetzt ist, zeigt annähernd das Badewannenverhalten für den Kontaktwiderstand, wie es für sauberes Aluminium erwartet wird. Die Prozesszeit von $t = 12$ min ist ausreichend, um die Probenoberfläche so zu reinigen, dass sich der Kontaktwiderstand für das Probing verbessert.

Diese Schlussfolgerungen werden durch die Ergebnisse der Kraftmessungen (Abbildung 7.8 und 7.9) während des Probing bestätigt. Die Plasmabehandlung erreicht eine Reduzierung der lateralen Kraft von $F_L = 13$ mN auf $F_L = 10,5$ mN. Die absolute Reduzierung der lateralen Kraft für eine einzelne Nadel ist nicht sehr hoch. Wird allerdings die prozentuale Reduzierung betrachtet, die ca. 20 % entspricht, wird ersichtlich, dass dies ebenfalls eine enorme Absolutkraftreduzierung, umgerechnet auf eine Nadelkarte mit mehreren tausend Nadeln, bedeutet. Für die normale Kraft (Abbildung 7.9) ist dieser Effekt nicht zu erkennen. Die Normalkraft steigt sogar für die Probe 22017/4 an. Die zeigt, wie bereits für den Verlauf des Kontaktwiderstandes, dass eine Prozesszeit von $t = 8$ min nicht ausreichend ist. Die Probe 22017/5 zeigt nur ein minimal besseres Verhalten als die Referenzprobe.

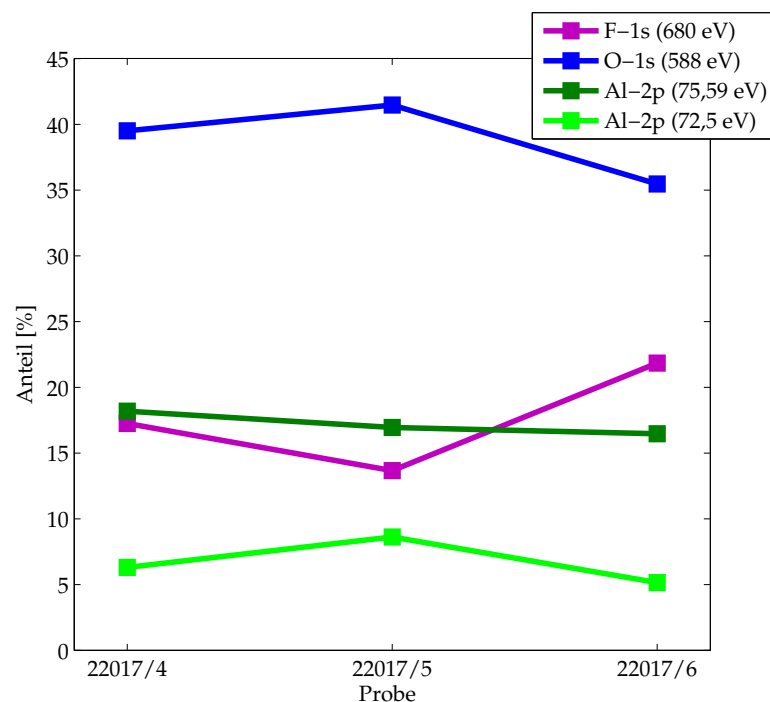


Abbildung 7.10: Prozentuale Auswertung der XPS-Untersuchungen zur Oberflächenzusammensetzung.

Die Messungen werden durch die XPS-Analyse von Oberflächen der einzelnen Proben in Abbildung 7.11 bekräftigt. An den F-1s-Peaks lässt sich erkennen, dass die Referenzprobe den höchsten Anteil an Fluor aufweist und dieser durch die Plasmabehandlung reduziert werden kann. Durch die Auswertung der XPS-Messungen ergibt sich die in Abbildung 7.10 dargestellte prozentuale Zusammensetzung der

Probenoberfläche. Hier wird nochmals deutlich, dass die Referenzprobe den größten Fluoranteil auf der Oberfläche aufweist. Umgekehrt verhält es sich mit dem Anteil des Sauerstoffs auf der Oberfläche. Dieser ist bei der Referenzscheibe am geringsten. Diese Untersuchungen zeigen erneut, dass eine Verschlechterung der Probing-Eigenschaften direkt mit dem Anteil des Fluors auf der Oberfläche in Verbindung steht.

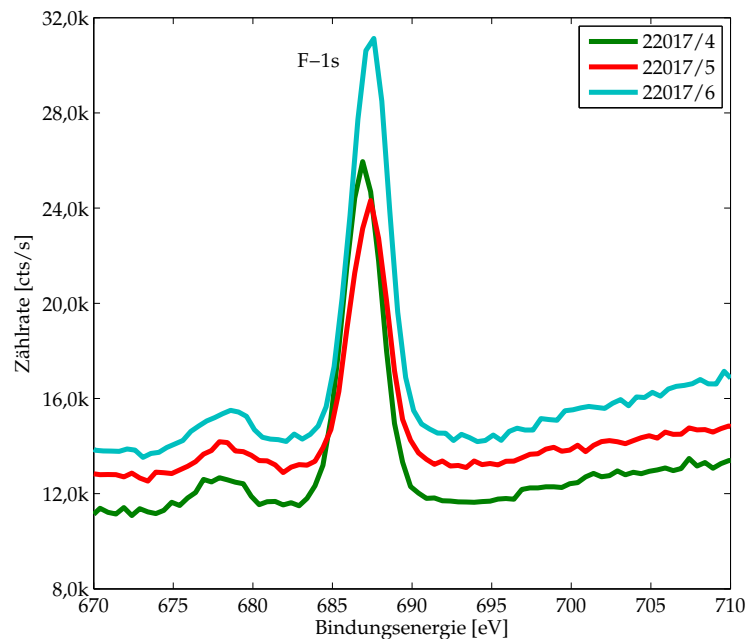


Abbildung 7.11: Ergebnisse von XPS-Untersuchungen an Oberflächen der angegebenen Proben. Dargestellt ist der Bereich des Fluor-1s-Peaks ($E = 688 \text{ eV}$).

Um festzustellen, ob die Fluorverunreinigungen nur oberflächennah zu finden sind, oder sich diese durch die komplette Aluminiumoxidschicht ziehen, wird ein Tiefenprofil für die Referenzprobe erstellt. Das Ergebnis der prozentualen Schichtzusammensetzung ist in Abbildung 7.12 dargestellt. Dazu wird die Probe mit Hilfe von Argon gesputtert und nach jedem Sputterschritt, deren Dauer $t = 5 \text{ min}$ beträgt, wird die Oberfläche mittels einer XPS-Messung untersucht. Die Analyse zeigt, dass das Fluor nur in oberflächennahen Schichten, etwa bis zu einer Sputterzeit von $t = 15 \text{ min}$, zu finden ist. In diesem Bereich ist das Fluor nicht nur physisorbiert, sondern liegt in der Schicht chemisch gebunden vor. Dies ist an der Verschiebung des Al-2p-Peaks zu erkennen. Dieser ist in Abbildung 7.13 (a) deutlich von Al_2O_3 in Richtung von AlF_3 verschoben. Diese Verschiebung bildet sich mit fortschreitender Sputterzeit in Richtung Al_2O_3 zurück. Zusätzlich lässt sich in Abbildung 7.13 (b) erkennen, dass sich der Fluoranteil mit ansteigender Sputterzeit reduziert. Da selbst nach einer Sputterzeit von $t = 30 \text{ min}$ kein signifikanter Abfall des Sauerstoffanteils zu verzeichnen ist und der Anteil des Fluors unter 3% gefallen ist, kann festgestellt werden, dass die Oxidschicht noch vorhanden und das Fluor nahezu gänzlich entfernt ist. Dies bedeutet, dass das Fluor sich nicht durch die komplette Oxidschicht hindurchzieht, sondern nur im oberflächennahen Bereich zu finden ist. Eine genaue Tiefenangabe kann hierbei allerdings nicht mit

einer vertretbaren Genauigkeit angegeben werden, da keine verlässlichen Angaben über die Sputterrate vorliegen.

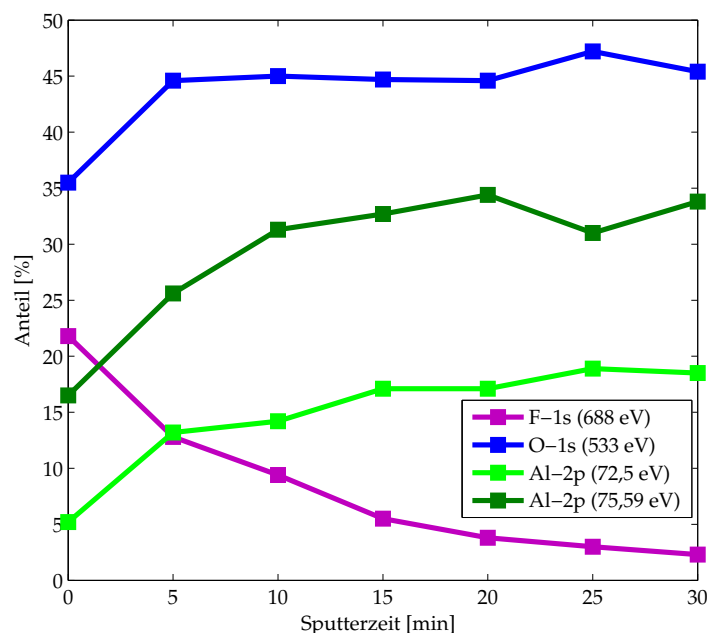
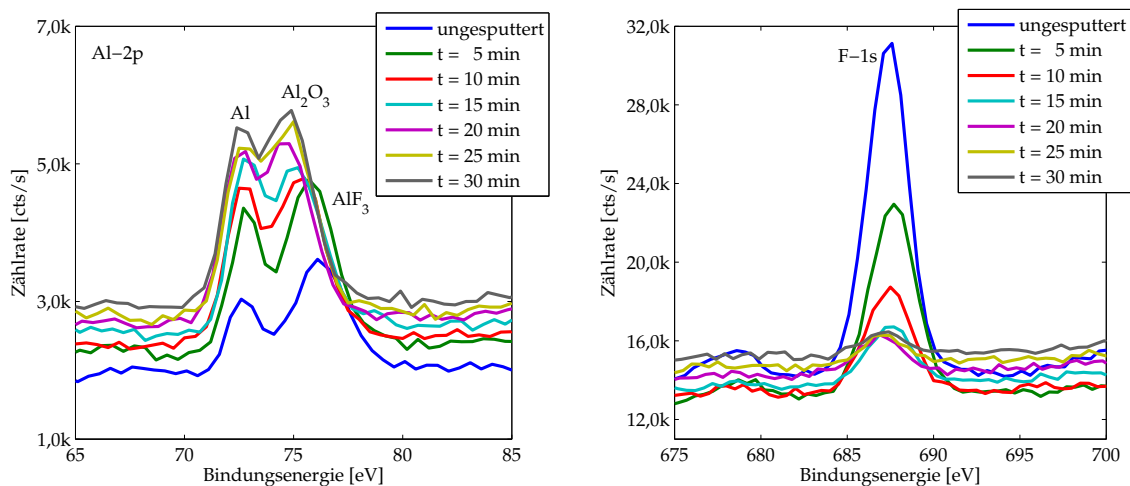


Abbildung 7.12: Darstellung der prozentualen Zusammensetzung in Abhängigkeit der Sputterzeit für das Tiefenprofil der Probe 22017/6.



(a) Al-2p-Peaks ($E = 72,5 \text{ eV}$ & $E = 75,59 \text{ eV}$).

(b) F-1s-Peak ($E = 688 \text{ eV}$).

Abbildung 7.13: Vergrößerte Bereiche des XPS-Spektrums der Probe 22017/6, für die ein Tiefenprofil erstellt worden ist.

Fazit

Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Behandlung mit einem H_2 -Plasma die Probeneigenschaften verbessert werden können. Die Kontaktkräfte verhalten sich in etwa konstant im Vergleich zu einer fluorverunreinigten Probe. Der Kontaktwiderstand kann allerdings in erheblichem Maß verbessert werden.

Hiermit ergibt sich ein weiterer Beweis, dass ein guter Kontaktwiderstand direkt mit der Fluorverunreinigung auf der Oberfläche zusammenhängt. Durch das H₂-Plasma kann der Fluoranteil auf der Oberfläche annähernd halbiert werden. Dies macht sich direkt durch einen verbesserten Widerstand bemerkbar. Diese Reinigung bietet zusätzlich die Möglichkeit, in den Produktionsablauf integriert zu werden, da entsprechende industrielle Produktionsanlagen zur Verfügung stehen.

7.1.3 Sauerstoffplasma

Wie in Kapitel 6.2.1 gezeigt worden ist, kann der Fluoranteil durch einen erneuten Plasmaschritt nach dem Fluorplasma auf der Oberfläche reduziert werden (Probe 27046/6). Jedoch führen schon geringste Mengen an SF₆ im Plasma zu einer nicht zu vernachlässigenden Kontamination durch Fluor.

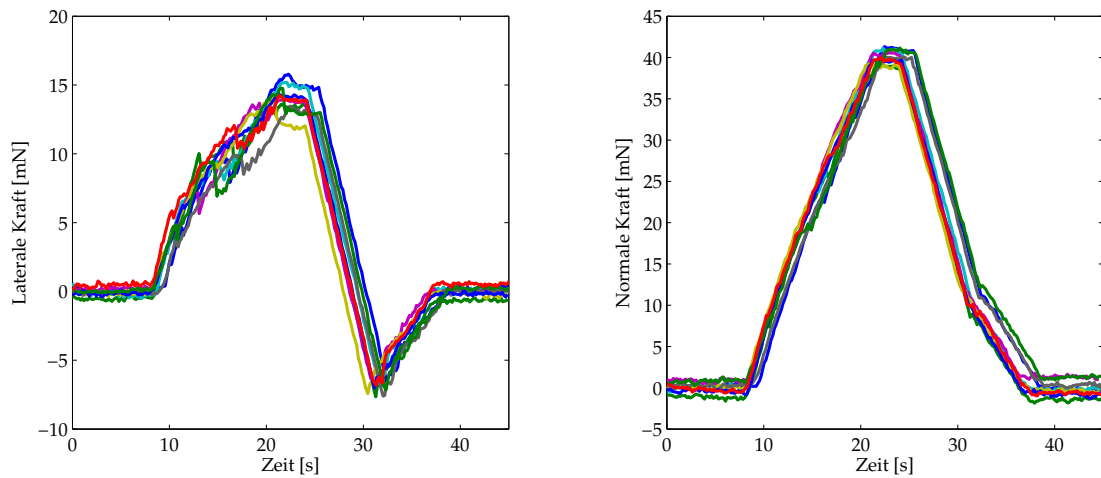
Daher wird im Weiteren der Einfluss eines reinen Sauerstoffplasmas ohne die Zugabe von SF₆ auf seine Reinigungswirkung untersucht. Die Versuche werden direkt im Anschluss an die Fluorplasmabehandlung im *Silicon Star 12 M* durchgeführt. Um die Fluorverunreinigungen zu erzeugen, wird der Standardprozess verwendet. Argon kommt als Arbeitsgas für das Sauerstoffplasma zum Einsatz und der Sauerstoff dient als eigentliches Ätzgas. In Tabelle 7.3 sind die Prozessparameter der prozessierten Wafer zusammengefasst.

		08037/4	08037/5
Ar-Fluss	[sccm]	1000	1000
O ₂ -Fluss	[sccm]	1000	1000
SF ₆ -Fluss	[sccm]	0	0
Druck p	[mbar]	3,0	3,0
Zeit t	[s]	180	360

Tabelle 7.3: Prozessparameter für die Sauerstoffplasmaversuche.

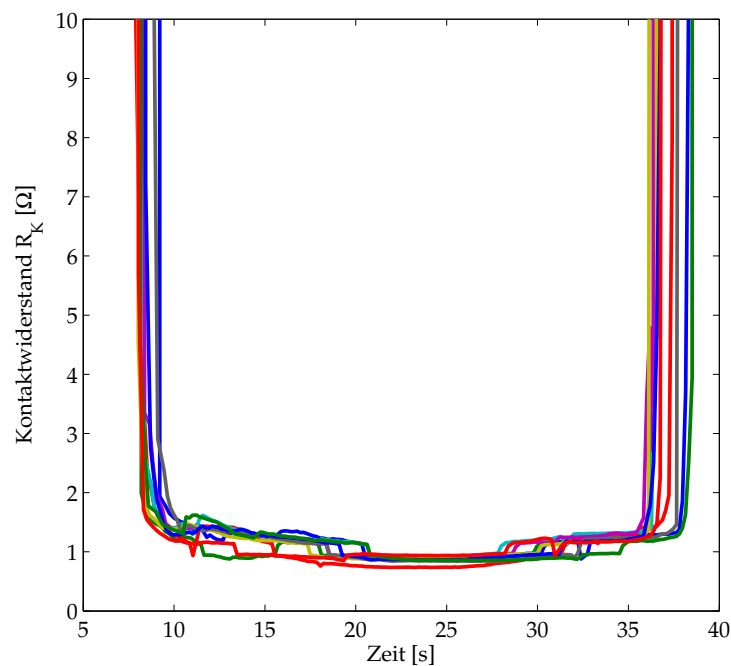
In Abbildung 7.14 sind die Messungen der Probe zu sehen, die nach der Fluorverunreinigung mit Hilfe eines Sauerstoffplasmas gereinigt wird. Die Ergebnisse für die Probe 08037/5 sind vergleichbar und werden daher nicht näher betrachtet. Die Messungen zeigen ein sehr reproduzierbares Verhalten. Die laterale Kraft (Abbildung 7.14 (a)) weist beim Aufsetzen der Nadel einen durch leichte Störungen verrauschten Kurvenverlauf. Für das Abheben der Nadel ist allerdings wieder ein annähernd linearer Verlauf zu beobachten. Der Kontaktwiderstand erreicht einen minimalen Wert von $R_K = 1 \Omega$. Der gesamte Kurvenverlauf ähnelt dem einer Probe mit sauberem Aluminium an der Oberfläche, jedoch zeigen sich im ersten Drittel leichte Störungen. Das typische Rechteckverhalten ist zu erkennen, allerdings sind die Kurven um $R = 0,5 \Omega$, im Vergleich zu sauberem Aluminium, nach oben verschoben. Um eine Aussage über die mögliche Reinigungswirkung bzw. einer

Verbesserung der Probing-Eigenschaften treffen zu können, müssen die Ergebnisse mit einer nicht gereinigten, fluorverunreinigten Probe verglichen werden.



(a) Laterale Kraft.

(b) Normale Kraft.

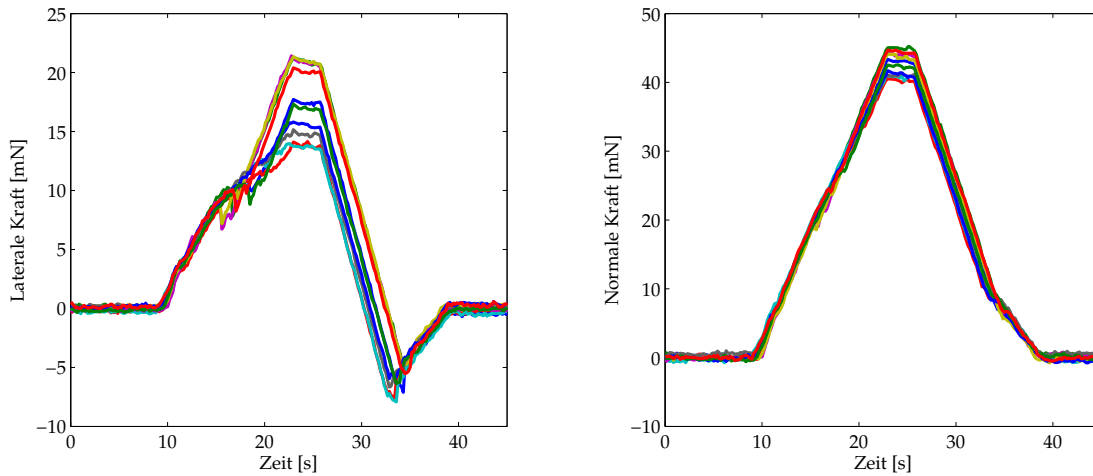


(c) Kontaktwiderstand.

Abbildung 7.14: Darstellung der Messergebnisse für die Probe 08037/4, die einem Sauerstoffplasma ausgesetzt worden ist. Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel std #3.

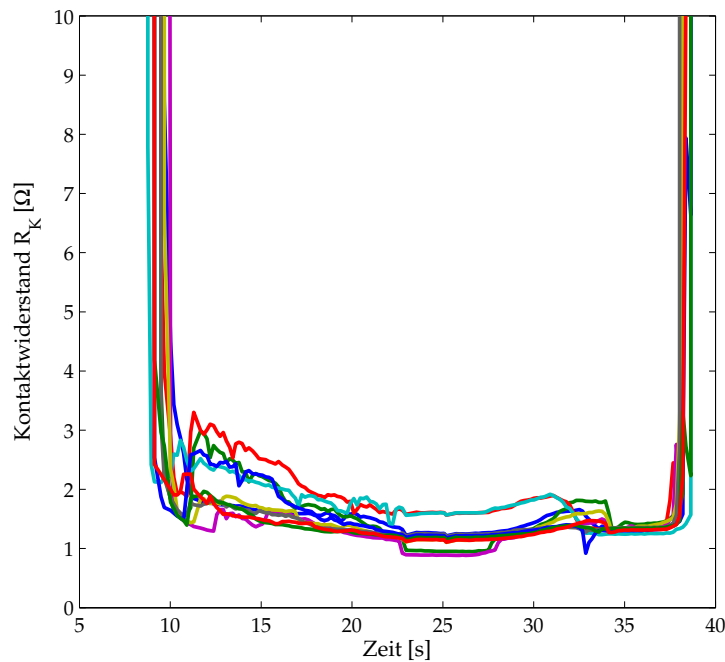
Hierzu sind die Messergebnisse der zu dieser Messerie gehörigen fluorverunreinigten Probe in Abbildung 7.15 zu finden. Dabei wird deutlich, dass bereits bei den Kraftverläufen für die mechanischen Kräfte eine höhere Varianz bei den Messkurven zu verzeichnen ist. Gerade im Bereich der lateralen Kraft gibt es mehrere Ausreißer, die einen höheren lateralen Kräfteintrag aufweisen. Beim Kontaktwiderstand sind ebenfalls größere Störungen im Bereich des Aufsetzens der Nadel zu

verzeichnen. Als minimaler Kontaktwiderstand wird ein Wert von $R_K = 1,2 \Omega$ erreicht. Ferner ist gerade im ersten Drittel der Kurven eine Verrundung der Verläufe zu erkennen. Dies sind die typischen Ergebnisse für eine fluorverunreinigte Probe.



(a) Laterale Kraft.

(b) Normale Kraft.



(c) Kontaktwiderstand.

Abbildung 7.15: Messergebnisse für die fluorverunreinigte Probe 08037/6, welche die Referenz zu den Messungen der Probe 08037/4 in Abbildung 7.14 bildet. Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel std #3.

Im Vergleich zu der gereinigten Probe kann festgehalten werden, dass die Kräfteinträge annähernd gleich sind. Bei der verunreinigten Probe lässt sich jedoch eine leichte Verschiebung des Maximalwerts für die laterale Kraft in Richtung von $F_L = 20 \text{ mN}$ erkennen. In normaler Richtung sind die Kräfte nahezu identisch. Bei

dem Kontaktwiderstand sieht dies anders aus. Die Reinigung bewirkt eine Verbesserung des Kontaktwiderstandes im absoluten Wert. Zusätzlich sind die Störungen im Bereich des Aufsetzens der Nadel geringer. Bewegen diese sich bei der verunreinigten Probe im Bereich von $3\Omega > R_K > 1,2\Omega$ ist das für die gereinigte Probe nur ein Bereich von $1,6\Omega > R_K > 1,0\Omega$.

Fazit

Die Reinigung durch ein Sauerstoffplasma zeigt eine Verbesserung des Kontaktwiderstandes bei gleichem Kraftertrag. Dadurch kann der Overdrive reduziert und mit einem kleineren Kraftertrag ein vergleichbarer Kontaktwiderstand, wie auf einer fluorverunreinigten Probe, erzielt werden.

Genauere Untersuchungen in diesem Bereich sind noch durchzuführen. Wie hoch der Einfluss des Sauerstoffs auf die chemische Zusammensetzung der Oberfläche ist, muss noch mittels eines geeigneten Analysetools, wie beispielsweise XPS, untersucht werden. Ferner müssen die Auswirkungen des Sauerstoffplasmas auf das Fotoimid bzw. den Fotolack zur Maskierung geklärt werden, da diese meistens mit einem solchen Plasma entfernt werden.

7.2 Nasschemische Reinigungsverfahren

Eine nasschemische Reinigung von Wafern zieht immer einen anschließenden Spül- und Trockenschritt nach sich. Durch das Spülen mit DI-Wasser wird die verwendete Chemikalie wieder abgewaschen und der Wafer schließlich mit Stickstoff getrocknet. Dies bedeutet erstens einen erhöhten Materialaufwand und zweitens einen erhöhten Zeitaufwand. Da allerdings Tetrachlorethylen⁷⁴ bereits erfolgreich zur Entfernung von Verunreinigungen auf der Waferoberfläche eingesetzt worden ist, wird in dem folgenden Abschnitt die Reinigung mit PER näher untersucht [78,108].

7.2.1 Tetrachlorethylen (PER)

Die Versuche werden mit unterschiedlichen Prozessparametern auf fluorverunreinigten Proben durchgeführt. Die Proben werden für die angegebenen Zeiten in unverdünntes Tetrachlorethylen getaucht. Nach Ablauf der Prozesszeit werden die Proben mit DI-Wasser abgespült und mit Stickstoff getrocknet. Die verwendeten Parameter sind im Folgenden zusammengefasst:

- **29016/2 #1:** Mit Fluor verunreinigte Probe, die als Fluorreferenz für die Probenserie 29016 dient.
- **29016/2 #3:** Mit PER behandelte Probe, Temperatur $T = 292\text{ K}$ und Zeit $t = 60\text{ s}$.
- **29016/3 #4:** Komplette unbehandelte Aluminiumprobe, die als Referenz für die Probenserie 29016 dient.

⁷⁴chemisches Formelzeichen: C_2Cl_4 – auch Perchlorethylen (PER) genannt

- **08037/3:** Komplette unbehandelte Aluminiumprobe, die als Referenz für die Probenserie 08037 dient.
- **08037/6:** Mit Fluor verunreinigte Probe, die als Fluorreferenz für die Probenserie 08037 dient.
- **08037/11:** Mit PER behandelte Probe, Temperatur $T = 322$ K und Zeit $t = 20$ s.
- **08037/12:** Mit PER behandelte Probe, Temperatur $T = 322$ K und Zeit $t = 60$ s.

Zunächst werden die Proben der Serie 29016 betrachtet. Die unterschiedlichen Serien – 29016 und 08037 – sind zwar mit den gleichen Prozessparametern hergestellt. Um jedoch Prozessschwankungen unterschiedlicher Probenserien aufzufangen, sind für jede Serie Referenzscheiben, sowohl mit Fluorkontaminationen als auch ohne, aufgeführt.

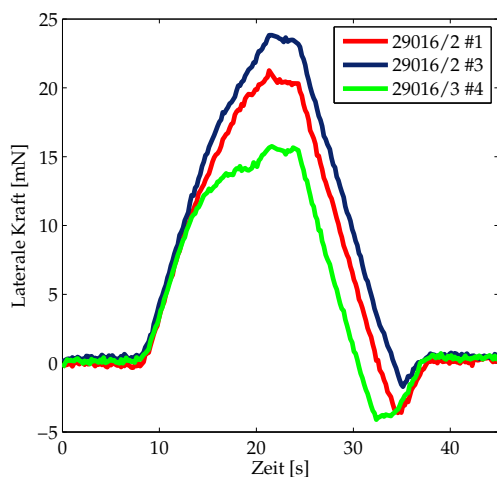
In Abbildung 7.16 sind die PROFIT Messungen exemplarisch für Probe 29016/2 #3 zu sehen. Wie sich für den Kontaktwiderstand erkennen lässt, ist durch die Behandlung mit PER eine Verbesserung möglich. Die mit PER behandelte Probe zeigt im Bereich des Touchdowns und der Hold-time ein ähnliches Verhalten wie die Referenz. Der Kurvenverlauf ist fast rechteckig ausgebildet und als minimaler Kontaktwiderstand wird ein Wert von $R_K = 0,6 \Omega$ erreicht. Die Fluorreferenz zeigt den erwarteten, schlechten Verlauf für den Kontaktwiderstand. Die Behandlung mit PER führt folglich zu einer Reduzierung der negativen Einflüsse des Fluors auf das Widerstandsverhalten.

Für die einwirkenden Kräfte wird erkennbar, dass durch den PER-Prozess der Krafteintrag in die Probe nochmals ansteigt. Die Kräfte übersteigen sogar die der Fluorreferenz. In normaler Richtung beträgt der Zuwachs knapp 15 % und in lateraler Richtung in etwa 50 % im Vergleich zu einer sauberen Aluminiumprobe. Dies stellt einen erheblichen Nachteil dieses Reinigungsverfahrens dar.

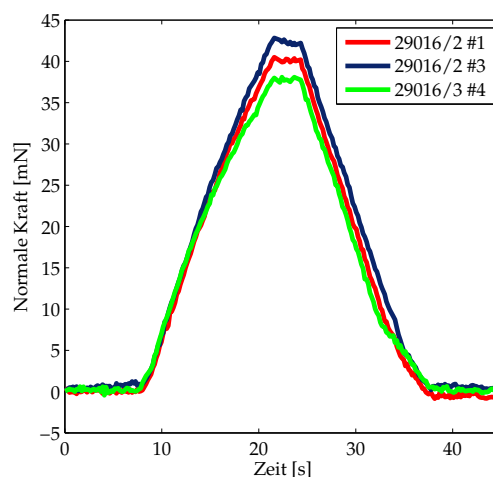
Wird für die gereinigten Proben jedoch ein minimaler Kontaktwiderstand im Bereich der Fluorreferenz ($R_K < 1,0 \Omega$) akzeptiert, kann der Overdrive für die gereinigten Proben erheblich gesenkt werden. Durch die Reduzierung des Overdrives wird auch automatisch eine Reduzierung der Kontaktkräfte erreicht und somit kann der gesamte Krafteintrag unter den der Fluorreferenz verkleinert werden. Dies ist an Abbildung 7.16 (c) zu erkennen. Ein zur Referenz vergleichbarer R_K ist spätestens nach $t = 15$ s erreicht. Wird der Overdrive an dieser Stelle gestoppt, lässt sich an den Abbildungen 7.16 (a) und (b) erkennen, dass der maximale Krafteintrag sogar geringer ist, als bei der sauberen Referenzprobe.

Um den Einfluss des Tetrachlorethylens auf die Oberfläche zu untersuchen, werden XPS-Messungen zur Oberflächenanalyse durchgeführt. Abbildung 7.17 zeigt das XPS-Spektrum für die fluorbehandelte Probe 29016/2 #1 und gereinigte Probe 29016/2 #4. Es sind hierbei keinerlei Unterschiede erkennbar. Die genauere Betrachtung des F-1s-Peaks in Abbildung 7.18 zeigt keine Reduzierung des Fluoranteils auf der Probe. Durch das PER wird das Fluor nicht von der Oberfläche entfernt, sondern die Struktur der Fluorbindung muss sich insoweit ändern, dass ein besserer Kontaktwiderstand zustande kommt. In Abbildung 7.19 ist der Ausschnitt für den Al-2p-Peak vergrößert. Auch hier lässt sich keine Veränderung zu der fluorverunreinigten Probe erkennen. Die Erwartung wird nicht bestätigt, denn es wäre

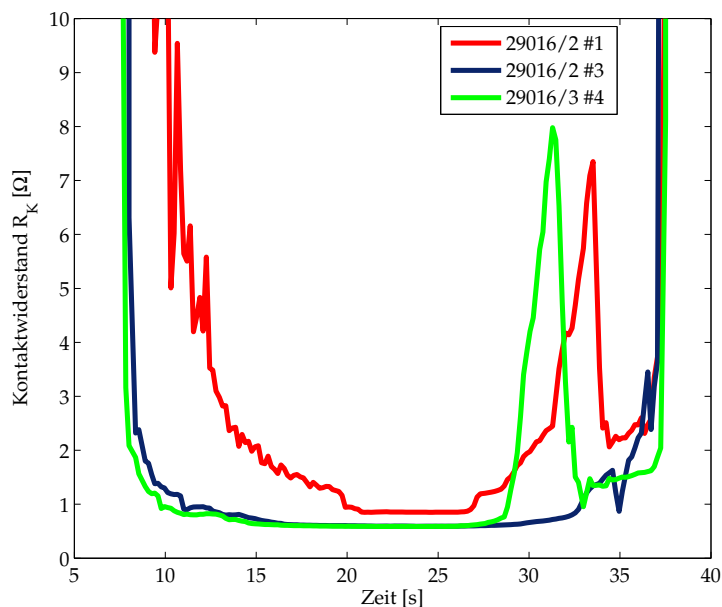
zu erwarten gewesen, dass sich hier eine Peak-Verschiebung zeigt, wodurch der bessere Kontaktwiderstand erklärt werden könnte. Die minimalen Unterschiede in den Peak-Höhen sind messtechnisch bedingt und können nicht als Verringerung des jeweiligen Anteils gesehen werden. Eine genaue Aussage darüber, wie das PER mit den Fluorverunreinigungen auf der Oberfläche chemisch reagiert, kann nicht gegeben werden.



(a) Laterale Kraft.



(b) Normale Kraft.



(c) Kontaktwiderstand.

Abbildung 7.16: Messergebnisse der mit Hilfe von Tetrachlorethylen gereinigten Probe 29016/2 #3, der Fluorreferenz 29016/2 #1 und der Referenz 29016/3 #4 für nicht kontaminiertes Aluminium. Dargestellt sind jeweils das arithmetische Mittel der ersten zehn Touchdowns nach der Reinigung der Nadel. Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel std #1.

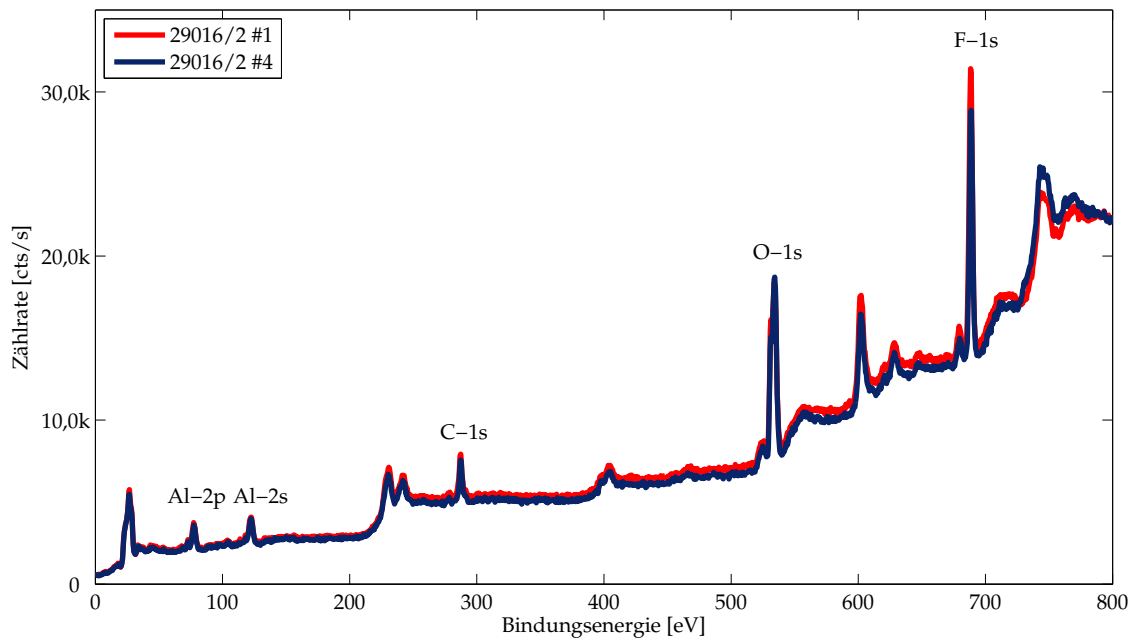


Abbildung 7.17: XPS-Spektren der mit PER gereinigten Probe 29016/2 #4 im Gegensatz zu einer ungereinigten Probe 29016/2 #1.

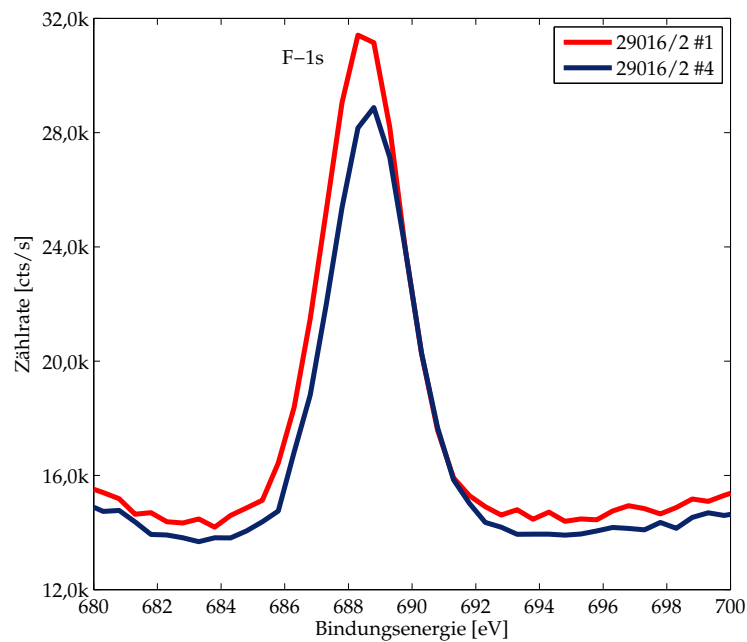


Abbildung 7.18: Ausschnitt der XPS-Spektren aus Abbildung 7.17, welcher den Bereich des F-1s-Peaks zeigt.

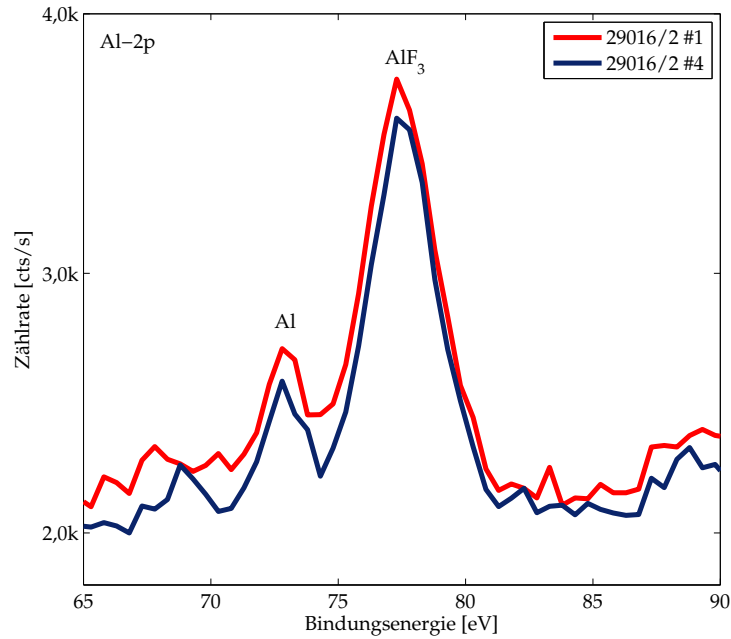


Abbildung 7.19: Ausschnitt der XPS-Spektren aus Abbildung 7.17, welcher den Bereich des Al-2p-Peaks zeigt.

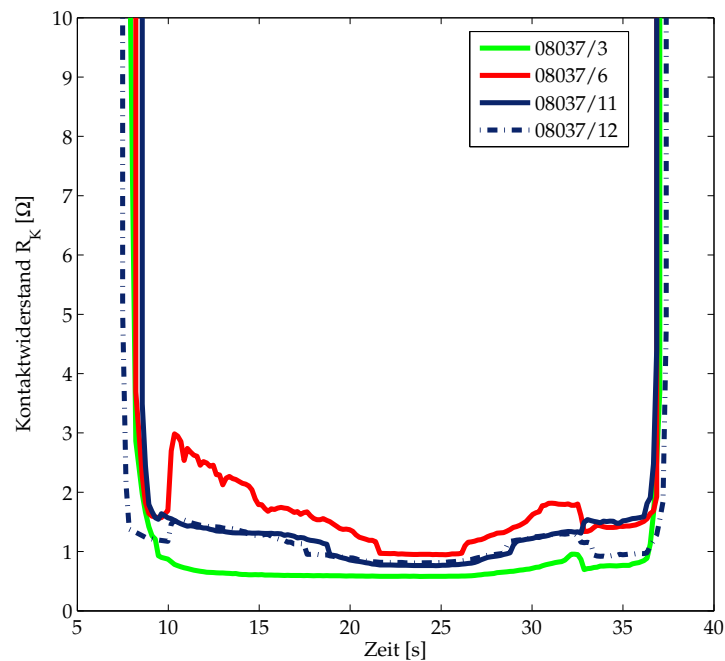


Abbildung 7.20: Messergebnisse des Kontaktwiderstandes gegenüber der Zeit für die Reinigungsversuche mit PER der Probenserie 08037. Dargestellt sind die arithmetischen Mittel für die Touchdowns #21 - #30. Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel std #1.

Für die Probenserie 08037 ist nur der Kontaktwiderstand in Abbildung 7.20 dargestellt. Durch die Reinigung der Proben mit auf $T = 322\text{ K}$ erwärmtes PER wird der Kontaktwiderstand ebenfalls verbessert. Hier zeigt sich allerdings ein leicht verändertes Bild. Ein Unterschied für die verschieden lange behandelten Proben ist dabei nicht feststellbar. Durch diesen PER-Prozess kann der minimale Wert von $R_K = 0,6\ \Omega$ der Referenz nicht erreicht werden. Ein minimaler Wert von $R_K = 0,75\ \Omega$ ist möglich. Der Widerstand ist zwar besser als für die Fluorreferenz ($R_K = 0,95\ \Omega$), jedoch zeigt sich eine stärkere Verrundung der Kurve im Bereich des Touchdowns als bei der Probenserie 29016. Ferner wird der Wert von $R_K < 1,0\ \Omega$ erst bei $t = 18\text{ s}$, kurz vor dem Stillstand der Nadel, unterschritten. Da dies eine Verschlechterung der Ergebnisse im Vergleich zu den Versuchen bei Raumtemperatur darstellt, wird durch die Erwärmung von PER keine Verbesserung der Reinigungswirkung erzielt. Aus diesem Grund wird auch auf die Darstellung der Kontaktkräfte verzichtet, da diese keine weiteren Erkenntnisse im Vergleich zu den vorherigen Messungen liefern.

Fazit

Die Reinigung der Proben mit Tetrachlorethylen zeigt, dass eine Verbesserung des Kontaktwiderstandes erreicht werden kann. Die Prozesszeit hat auf die Ergebnisse für die durchgeführten Versuche keinen erkennbaren Einfluss. Ferner zeigt sich, dass durch eine Erwärmung des PER eine Verschlechterung der Reinigungswirkung erreicht wird. Die Reinigungsmethode weist jedoch den Nachteil auf, dass der Kraftertrag in die Probe nochmals gesteigert wird. Dies lässt sich allerdings durch eine Reduzierung des Overdrives umgehen.

7.3 Fazit der Reinigungsverfahren

Diverse Reinigungsverfahren sind aufgezeigt und auf ihre Reinigungswirkung hinsichtlich der Fluorverunreinigungen auf der Aluminiumoberfläche untersucht worden. Die Verfahren haben gezeigt, dass es möglich ist, den Fluoranteil auf der Oberfläche zu minimieren und somit einen besseren elektrischen Kontaktwiderstand zu erreichen. Ferner ist dabei deutlich geworden, dass ein direkter Zusammenhang zwischen Fluorverunreinigung auf der Oberfläche und Kontaktwiderstand besteht. Dies wird im Fall der Reinigung mit PER allerdings nicht bestätigt, hier muss ein anderer Mechanismus zu Grunde liegen. Mit der Verbesserung ging jeweils eine Reduzierung der Kontaktkräfte einher. Eine Ausnahme stellt dabei das Reinigungsverfahren mit PER dar, bei dem die Verbesserung des Kontaktwiderstandes auf Kosten eines höheren Kraftertrages in die Probe erzielt wird. Durch eine Reduzierung des Overdrives kann dieser Nachteil umgangen werden und somit eine gesamte Verbesserung der Probing-Eigenschaften erzielt werden.

Diese Methode der Kraftreduzierung durch Verringerung des Overdrives kann natürlich auch für die anderen Reinigungsverfahren angewendet werden. Dies wird exemplarisch an den Proben der Serie 22017 demonstriert. Bei der Kurve für den Kontaktwiderstand (Abbildung 7.21) zeigt sich, dass die gereinigten Proben einen vergleichbaren Wert wie die Fluorreferenz wesentlich früher erreichen. Die beiden

gereinigten Proben unterschreiten den Wert des minimalen Widerstandes spätestens nach $t = 15$ s. Die Fluorreferenz erreicht ihren Minimalwert erst nach $t = 22$ s. Wird ab dem Zeitpunkt $t = 15$ s der Overdrive gestoppt, ergibt sich ein viel geringerer Kräfteintrag in die Probe, wie sich an Abbildung 7.22 erkennen lässt.

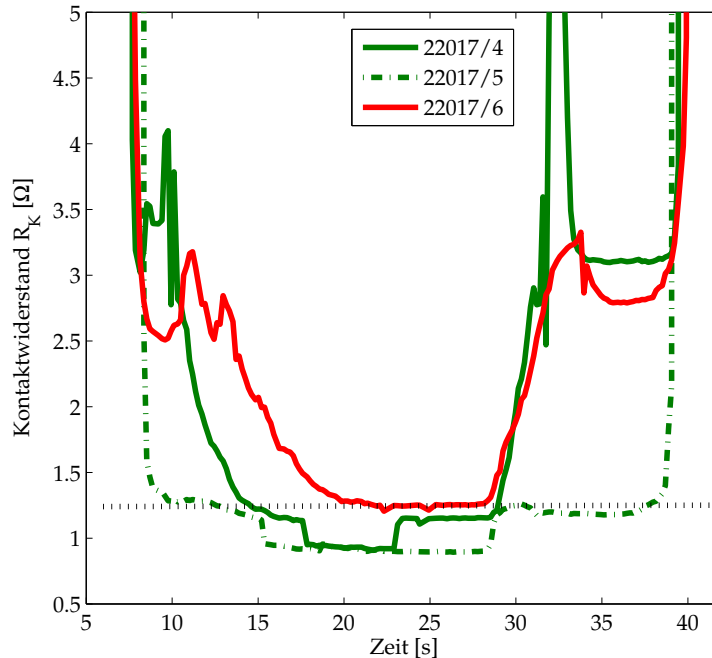
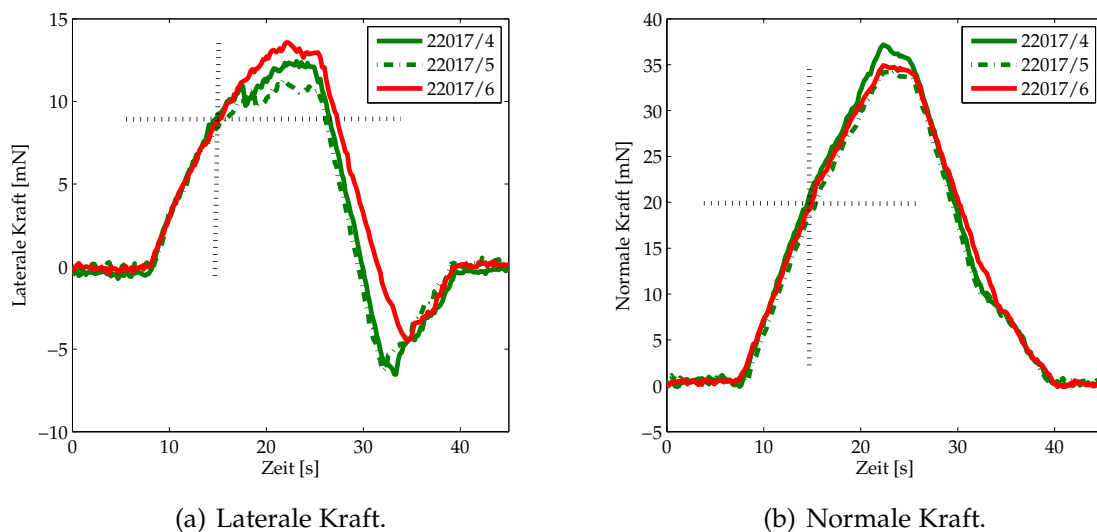


Abbildung 7.21: Vergrößerte Darstellung der Abbildung 7.7. Die beiden gereinigten Proben (22017/4 & 22017/5) erreichen den minimalen Kontaktwiderstand der Fluorreferenz 22017/6 spätestens nach $t = 15$ s.



(a) Laterale Kraft.

(b) Normale Kraft.

Abbildung 7.22: Darstellung der Abbildung 7.8 und 7.9 zur Bestimmung des reduzierten Kräfteintrages aufgrund des verbesserten Kontaktwiderstandes.

Durch diese Vorgehensweise kann für die hier gezeigten Proben eine Reduzierung der lateralen Kraft von ca. 44 % und für die normale von ca. 75 % erreicht werden. In diesem Fall ist der Widerstandswert der Fluorreferenz als Ausgangspunkt gewählt. Für die industrielle Produktion muss ein geringerer Wert gewählt werden, so dass die Einsparungen folglich geringer ausfallen.

Mit den gezeigten Reinigungsverfahren ist deutlich geworden, dass das Fluor durchaus wieder von der Oberfläche entfernt bzw. direkt bei der Prozessierung verhindert werden kann. Resultierend daraus kann ein wesentlich besserer Kontaktwiderstand bei gleichbleibendem Krafteintrag erreicht werden, jedoch kann dies auch genutzt werden, um den Krafteintrag aufgrund des guten Widerstandes zu reduzieren.

Kapitel 8

Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es, das Testen von integrierten Schaltungen näher zu untersuchen und daraus Lösungen für eine Verbesserung des elektrischen Kontaktwiderstandes bei gleich bleibendem Kraftertrag zu entwickeln. Daher wurde zunächst ein Messplatz aufgebaut, mit dem alle für das Probing relevanten Parameter – Kontaktwiderstand und einwirkende Kräfte – gemessen werden können. Der entwickelte Messplatz (PROFIT) bietet die Möglichkeit, alle auf die Probe einwirkenden Kräfte, in lateraler und normaler Richtung zur Probenoberfläche, messen zu können. Gleichzeitig ist es möglich, den Kontaktwiderstand zwischen Kontaktpad und Testnadel zu bestimmen. Der Messplatz ist modular aufgebaut, so dass unterschiedliche Probe Card-Technologien untersucht und evaluiert werden können.

Mit Hilfe des Messplatzes wurden Messungen auf Gold und Aluminium präsentiert. Die Messungen auf Gold mit Cantilever-Karten, deren Nadeln aus einer Wolfram-Rhenium-Legierung bestehen, dienten dabei als Referenz. Das Augenmerk lag jedoch auf den Untersuchungen von Aluminium, das weiterhin in der Halbleiterindustrie als Material für die Kontaktpads eingesetzt wird. Die Untersuchungen haben dabei gezeigt, dass auf Aluminium ein vergleichbarer Kontaktwiderstand wie auf Gold erreicht werden kann und das mit den gleichen Testparametern. Dies ist theoretisch betrachtet ungewöhnlich, da aufgrund des natürlichen Aluminiumoxides ein höherer Kontaktwiderstand zu erwarten wäre. Durch die Messungen konnte allerdings gezeigt werden, dass ein erhöhter Kraftertrag in die Probe aus Aluminium bei gleichem Overdrive eingeleitet wird. Dies bedeutet einen höheren mechanischen Stress für die Schichten unterhalb der Probing Pads und somit eine erhöhte Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls des Schaltkreises.

Mögliche Reinigungsverfahren zur Entfernung des natürlichen Aluminiumoxides sind untersucht worden. Dabei zeigte sich deutlich, dass das Al_2O_3 nicht das eigentliche Problem eines schlechten Kontaktwiderstandes darstellt. Bei genauer Betrachtung des Herstellungsprozesses von ICs wird deutlich, dass Fluor die Ursache für Kontaminationen der Oberfläche ist und sich daraus ein schlechter Kontaktwiderstand ergibt. Das Fluor wird in einem Plasmaprozess eingesetzt, um die Passivierungsschichten über den Kontaktpads wieder zu entfernen. Diesbezügliche Untersuchungen haben verdeutlicht, dass Fluorkontaminationen auf der Aluminiumoberfläche zu einer erheblichen Verschlechterung der Probing-Eigenschaften führen. Dies bedeutet, dass nicht nur der Kontaktwiderstand erhöht wird, sondern zusätzlich ein erhöhter Kraftertrag in die Probe generiert wird.

Um die Fluorkontaminationen wieder zu entfernen, sind mehrere Reinigungsverfahren näher beleuchtet worden. Durch Zugabe von Wasserstoff bereits bei der Entfernung der Passivierung ergibt sich eine deutliche Verbesserung des Kontaktwiderstandes und eine Reduzierung der eingeleiteten Kräfte in die Probe. Der Wafer wird praktisch während des Ätzprozesses einem in situ HF-Dip unterzogen. Dabei ist noch näher zu untersuchen, welchen Einfluss die Zugabe von Wasserstoff auf die Passivierung hat. Das Fluor wird dem Plasma häufig in Form von SF_6 zugeführt, das zur Folge hat, dass Sauerstoff dem Prozess beigemischt werden muss, um den frei werdenden Schwefel chemisch zu binden. Daher ist zu klären, wie sich die Reduzierung des Sauerstoffanteils bei der Zusammensetzung der Prozessgase auf einen möglichen Niederschlag von Schwefel auswirkt. Als weitere Möglichkeit zur Entfernung des Fluors wurde ein reines H_2 -Plasma untersucht. Mittels dieser Methode kann der Fluoranteil auf dem Wafer reduziert und daraus resultierend ein geringerer Kontaktwiderstand erzielt werden. Die Kontaktkräfte hingegen bleiben im Vergleich zu einer fluorverunreinigten Probe unverändert. Als Alternative können die Wafer im Anschluss an die Entfernung der Passivierung einem Sauerstoffplasma ausgesetzt werden. Dies führt zu einer Verbesserung des Kontaktwiderstandes bei gleich bleibenden Kontaktkräften. Da Sauerstoff-Plasmen hauptsächlich zur Entfernung von Fotolack oder Fotoimid benutzt werden, welche im jetzigen Prozessablauf die obersten Passivierungsschichten darstellen, ist diese Methode eher ungeeignet. Zu den bereits zusammengefassten trockenchemischen Reinigungsverfahren wurde auch die nasschemische Reinigung durch Tetrachlorethylen näher untersucht. Eine Reduzierung des Kontaktwiderstandes konnte bei ansteigenden Kräften realisiert werden. Allerdings ist keine Reduzierung des Fluoranteils auf der Probenoberfläche feststellbar.

Weiterführende Untersuchungen im Bereich der Auswirkungen des Stromflusses auf die Fluorkontaminationen sind anzustellen. Hierbei ist besonders zu analysieren, inwieweit sich das Fluor auf die Durchbruchspannung beim "Fritting" auswirkt. Für das Fritting wird eine ausreichend hohe Spannung an einem stark isolierenden Kontakt angelegt, so dass durch einen elektrischen Durchbruch der Isolationsschicht eine Reduzierung des Kontaktwiderstandes erreicht wird. Ferner ist der Einfluss des Temperaturanstiegs, der sich aufgrund des Stromflusses ergibt, näher zu beleuchten. Durch die Erhöhung der Temperatur besteht die Möglichkeit der beschleunigten Oxidation der Kontaktflächen und somit einer Erhöhung des Kontaktwiderstandes.

Die bisher durchgeführten Untersuchungen sind alle mit sehr geringen Geschwindigkeiten ausgeführt worden. Daher konnte der elektrische Kontaktwiderstand als quasistatisch angesehen werden. Da in der Industrie die Wafer mit einer um Größenordnungen höheren Geschwindigkeit getestet werden, müssen speziell die theoretischen Betrachtungen dahingehend erweitert werden. Weiterführende Messungen in diesem Bereich sind notwendig, um den Einfluss von Kontaminationen auf den Kontaktflächen genauer zu beschreiben.

Die vorgestellten Untersuchungen haben verdeutlicht, dass Fluorkontaminationen auf der Aluminiumoberfläche zu einer Erhöhung des Kontaktwiderstandes und der Kontaktkräfte führen. Die vorgestellten Reinigungsversuche haben bestätigt, dass durch die Reduzierung des Fluoranteils ebenso eine Reduzierung des Kontaktwiderstandes einhergeht. Dabei stellt das Reinigungsverfahren durch ein reines

Wasserstoffplasma die beste Möglichkeit zur Verbesserung der Probing-Eigenschaften dar. Hierbei muss allerdings noch untersucht werden, wie stark sich mögliche Plasmaschäden auswirken und diese die Funktionalität der integrierten Schaltungen beeinflussen.

Anhang A

Konstruktionszeichnungen

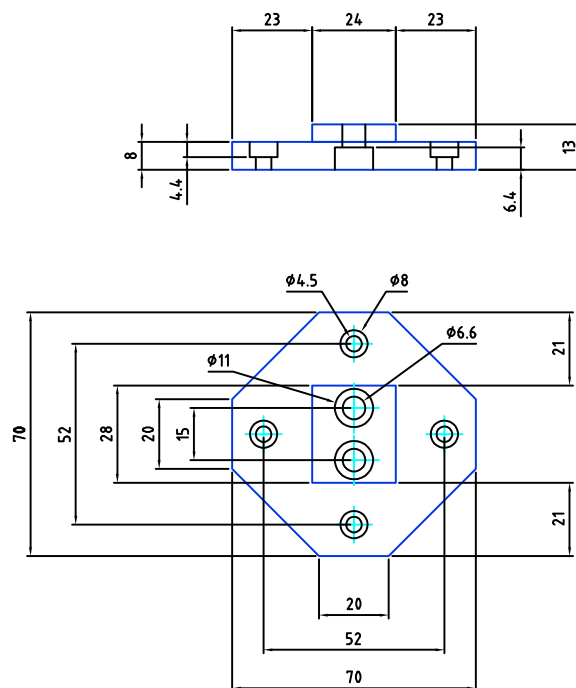


Abbildung A.1: Konstruktionszeichnung der Bodenplatte. Die Einheit der angegebenen Bemaßungen ist Millimeter und die Darstellung ist nicht maßstabgetreu.

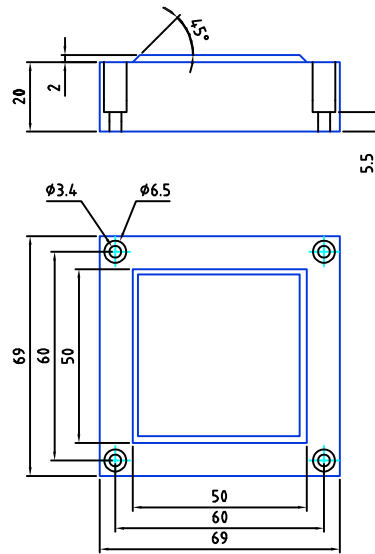


Abbildung A.4: Konstruktionszeichnung des 2. Teils des Probenhalters. Die Einheit der angegebenen Bemaßungen ist Millimeter und die Darstellung ist nicht maßstabsgetreu.

Anhang B

Prozessparameter

Teile	Chemikalie	Temperatur	Ätzrate
44	NH ₄ F (40 %)	RT	40 $\frac{\text{nm}}{\text{min}}$... 50 $\frac{\text{nm}}{\text{min}}$
4	HF (49 %)		
26	H ₂ O		

Tabelle B.1: Zusammensetzung der verwendeten BHF-Lösung zur Entfernung des natürlichen Siliziumoxides.

			#1	#2	#3
Geschwindigkeit	v	$[\mu\text{m}/\text{s}]$	1000	2	20
Schrittweite	s_{sw}	$[\mu\text{m}]$	1	0,5	1
Overdrive	s_{OD}	$[\mu\text{m}]$	50	75	65

Tabelle B.2: Parametersätze für das Probing.

Nachfolgend sind die Erläuterungen zu den einzelnen Parametersätzen aufgelistet:

- #1:** Parametersatz für den Reinigungsschritt der Nadel
- #2:** Parametersatz für die Referenzmessungen auf Gold
- #3:** Standard-Parametersatz

Anhang C

LabView Steuerung des Messplatzes

C.1 Beispielhaftes LabView Macro

Nachfolgend ist zur Veranschaulichung ein Testmacro dargestellt, bei dem vier Testreihen zu je zehn Touchdowns mit den Standardparametern durchgeführt werden.

```
# start loop for multiple series
repeat 4

# init of internal constants
cleardatahistory
clearfilename
resettddcounter

# start of the loop
repeat 10

# first zero cal for contact search
hbmlowpass 5
wait 100
hbmzerocal 1
wait 100
hbmzerocal 2
wait 100
vel 1 100
vel 2 100
findcontact 1000 1 5
mvr 1 -50
mvr 2 -50
vel 1 20
wait 100

# second zero cal for meas cycle
hbmlowpass 2.5
wait 200
hbmzerocal 1
wait 200
hbmzerocal 2

# meas cycle
inctdcounter
resettdtimer
zcycle 115 1 200
plotlasttd
waitcycle 2000 100
plotlasttd
zcycle 115 -1 999
plotlasttd
```



```
savelasttd

# step to next position
mvr 2 -50

end repeat

# next series
mvr 1 -200
mvr 2 1000
mvr 3 -100

end repeat
```

C.2 Flussdiagramm einer Messung

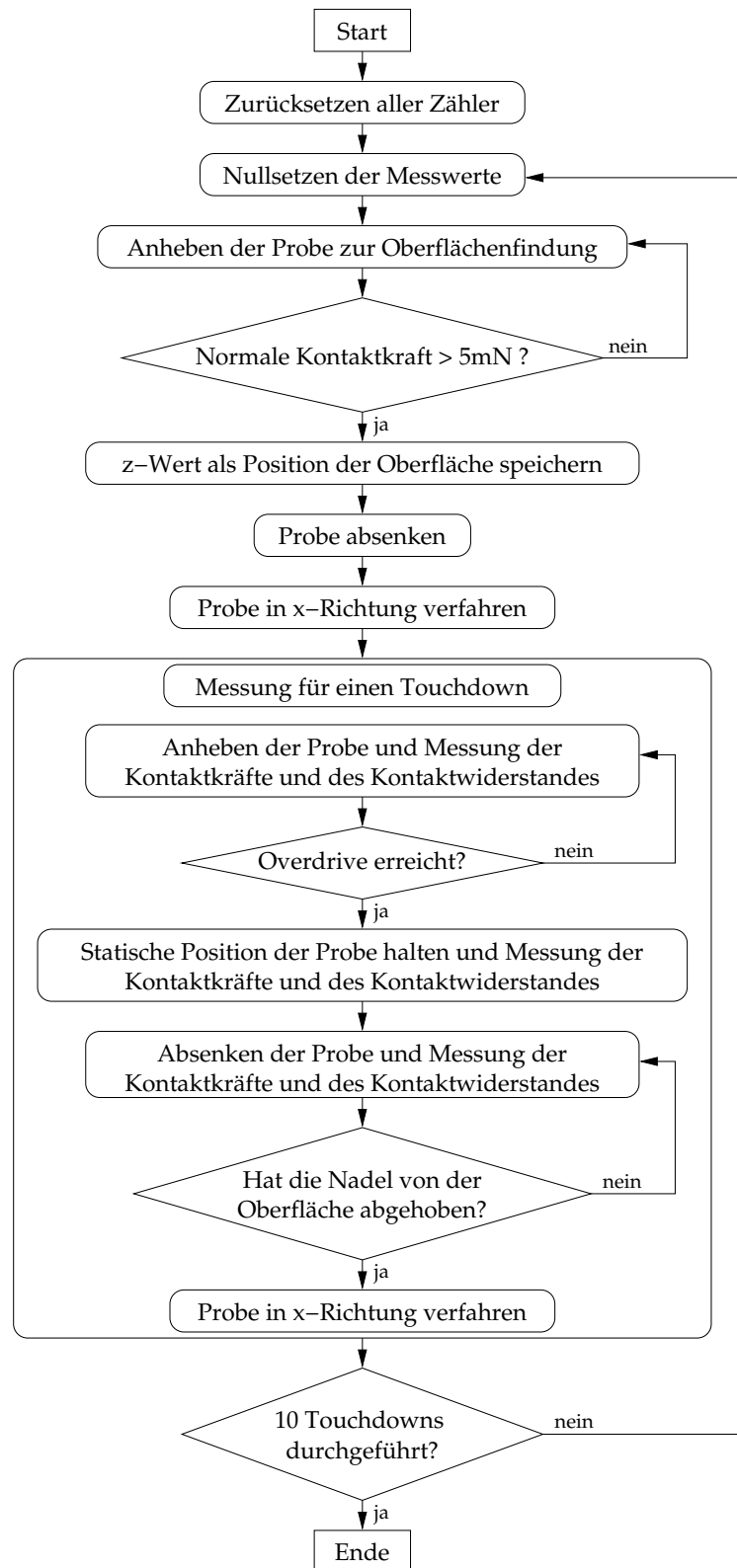


Abbildung C.1: Flussdiagramm einer Messung über zehn Touchdowns. Für eine größere Anzahl an Touchdowns werden weitere Messreihen zu je zehn Touchdowns durchgeführt.

Abbildungsverzeichnis

1.1	REM-Aufnahme des Abdrucks einer Nadelkarte auf einer Aluminiumoberfläche nach dem Probing.	2
2.1	Daten aus der ITRS über die Kosten für das Packaging pro Pin (linke Skala - blau) bzw. die Anzahl der Pins pro Chip (rechte Skala - dunkelgrün). Exemplarisch sind die Daten für Low-cost Produkte (Quadrat) und für High-performance Produkte (Kreise) dargestellt [2]. .	6
2.2	Lichtmikroskopische Aufnahme einzelner Probing Pads eines vollständig prozessierten Wafers.	7
2.3	Schematische Darstellung einer Cantilever-Nadel.	9
2.4	Querschnitt durch eine schematische Darstellung einer Epoxid-Ring-Nadelkarte.	9
2.5	Schematischer Querschnitt durch eine Blade-Nadelkarte.	10
2.6	Schematischer Aufbau einer vertikalen Karte.	11
2.7	Querschnitt durch den Aufbau einer Membran-Karte.	12
2.8	Schnittbild durch den schematischen Schichtstapel einer aktuellen integrierten Schaltung.	12
2.9	Schematische Darstellung des Probing-Vorgangs.	16
2.10	REM-Aufnahme für einen Scrub auf Aluminium (Probe: 27046/1). Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel #11.	17
2.11	Profilometermessungen für den in Abbildung 2.10 dargestellten Scrub nahe des Aufsetzpunktes der Nadel (M1), in der Mitte (M2) und am Ende (M3) (Probe: 27046/1). Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel #11.	18
2.12	Reduzierung der Chipgröße durch die Verschiebung der Probing Pads über aktives Schaltungsgebiet.	19
2.13	REM-Aufnahme eines Querschnitts durch den Schichtstapel einer aktuellen Schaltung.	20
2.14	Die Kurvenverläufe der unterschiedlichen Fehlerarten aufgetragen über der Zeit.	21
3.1	Prinzipskizze des Messplatzaufbaus.	27

3.2	Schematischer Aufbau des Messplatzes.	28
3.3	Foto vom Aufbau des Messplatzes.	29
3.4	Wheatstone Messbrücke mit vier variablen Widerständen.	31
3.5	Verschaltung nach dem Prinzip der Sechselekterschaltung.	32
3.6	Foto des Sensors für die Kraft in z-Richtung (Normalkraft). Die Stellen zur Krafteinleitung und zur Befestigung sind markiert.	32
3.7	Schematische Darstellung des Sensors. Die beiden Kräfte F_1 und F_2 erzeugen aufgrund der unterschiedlichen Hebelarme verschiedene Drehmomente. Durch Verwendung einer Plattform und aufgrund des kompensierten Eckenlastfehlers kann eine Verfälschung der Messung verhindert werden.	33
3.8	Unterschiedliche Varianten zur Widerstandsmessung.	34
3.9	Schaltung der Vierleiterwiderstandsmessung.	34
3.10	Foto der Positioniereinheit mit Beschriftung der Achsenrichtungen.	35
3.11	Screenshot der Eingabemaske zur Positionierung der Probe mittels LabView.	38
3.12	Schematische Darstellung einer Cantilever-Nadel.	39
4.1	Darstellung der rauen Oberfläche zweier Metalle, die miteinander in Kontakt stehen.	41
4.2	Schematische Darstellung der Kontaktfläche in der Draufsicht. Die Fläche A_a setzt sich aus den in Abbildung 4.1 dargestellten Berührungspunkten zusammen.	42
4.3	Engewiderstände $R_{E,i}$ nach Gleichung 4.4, $R_{E,S,i}$ nach Gleichung 4.15 und $R_{E,M,i}$ nach Gleichung 4.19 gegenüber dem Verhältnis $\frac{2a_i}{\lambda}$ für das Kontaktpaar Aluminium – Wolfram.	46
4.4	Kurvenverläufe der einzelnen Widerstände. R_E nach Gleichung 4.33, R_F nach Gleichung 4.34, R_K nach Gleichung 4.38 und $R_{K,V}$ nach Gleichung 4.39.	50
4.5	Kontaktwiderstände R_K nach Gleichung 4.38 gegenüber der Kontaktkraft für die Kontaktpaare Wolfram – Gold bzw. Wolfram – Aluminium.	51
4.6	Variation einzelner Parameter des Kontaktwiderstandes R_K nach Gleichung 4.38 aufgetragen gegenüber der Kraft. Variationen für das Kontaktpaar Wolfram – Aluminium.	52
5.1	Messergebnis des Kontaktwiderstandes einer einzelnen Messung auf Gold gegenüber der Zeit (Probe: 18065/1). Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel std #4.	58
5.2	Messergebnisse für 40 Touchdowns des Kontaktwiderstandes auf Gold gegenüber der Zeit (Probe: 18065/1). Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel std #4.	58

5.3	Messergebnisse für zehn Touchdowns der normalen Kraft auf Gold gegenüber der Zeit (Probe: 18065/1). Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel std #4.	60
5.4	Messergebnisse für zehn Touchdowns der lateralen Kraft auf Gold gegenüber der Zeit (Probe: 18065/1). Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel std #4.	60
5.5	Messergebnisse für zehn Touchdowns der normalen Kraft auf Gold gegenüber dem Overdrive (Probe: 18065/1). Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel std #4.	61
5.6	Messergebnisse für zehn Touchdowns der lateralen Kraft auf Gold gegenüber dem Overdrive (Probe: 18065/1). Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel std #4.	61
5.7	Verschiedene Referenzmessungen des Kontaktwiderstandes auf Gold (Probe: 18065/1). Messung #1 zeigt den geringeren Minimalwert im Vergleich zu Messung #2, bei gleichzeitig "unruhigerem" Kurvenverhalten. Die beiden anderen Kurven sind zur Veranschaulichung der Streuung dargestellt. Verwendeter Parametersatz: #2 mit der Nadel std #2.	63
5.8	Unterschied des Kontaktwiderstandes zwischen einer verunreinigten Nadel und einer gereinigten Nadel auf Gold, aufgetragen gegenüber der Zeit (Probe: 18065/1). Verwendeter Parametersatz: #2 mit der Nadel std #4.	64
5.9	Messungen des Kontaktwiderstandes gegenüber der Zeit für vier aufeinander folgende Touchdowns. Es ist eine stetige Verbesserung des Kontaktwiderstandes aufgrund des Selbstreinigungseffektes der Nadel zu erkennen (Probe: 27046/4). Verwendeter Parametersatz: #3 mit der Nadel #11.	65
5.10	Kontaktwiderstand für zehn Touchdowns auf Aluminium gegenüber der Zeit (Probe: 08037/3). Verwendeter Parametersatz: #3 mit der Nadel std #3.	66
5.11	Kontaktwiderstand für 40 Touchdowns auf Aluminium gegenüber der Zeit (Probe: 08037/3). Verwendeter Parametersatz: #3 mit der Nadel std #3.	66
5.12	Kraftverläufe für je zehn Touchdowns auf Aluminium gegenüber der Zeit (Probe: 08037/3). Verwendeter Parametersatz: #3 mit der Nadel std #3.	67
5.13	Gegenüberstellung des Kontaktwiderstandes auf Gold (Probe: 18065/1) und Aluminium (Probe: 08037/3) für den siebten Touchdown nach der Reinigung der Nadel. Verwendeter Parametersatz: #3 mit den Nadeln std #3 (Aluminium) und std #4 (Gold).	68
5.14	Gegenüberstellung der normalen Kraft auf Gold (Probe: 18065/1) und Aluminium (Probe: 08037/3) für den siebten Touchdown nach der Reinigung der Nadel. Verwendeter Parametersatz: #3 mit den Nadeln std #3 (Aluminium) und std #4 (Gold).	68

5.15	Gegenüberstellung der lateralen Kraft auf Gold (Probe: 18065/1) und Aluminium (Probe: 08037/3) für den siebten Touchdown nach der Reinigung der Nadel. Verwendeter Parametersatz: #3 mit den Nadeln std #3 (Aluminium) und std #4 (Gold).	69
5.16	REM-Aufnahmen von Probe Marks auf unterschiedlichen Materialien bei einem Overdrive von $s_{OD} = 60 \mu\text{m}$. Verwendete Nadel: std #4.	70
5.17	Profilometermessung in Längsrichtung für Probe Marks auf Gold (Probe: 18065/1) und Aluminium (Probe: 22017/10 #2) bei einem Overdrive von $s_{OD} = 60 \mu\text{m}$. Verwendete Nadel: std #4.	71
5.18	Auswertung der Profilometermessungen bezüglich der Eindringtiefe gegenüber dem Overdrive auf Gold (Probe: 18065/1) und Aluminium (Probe: 22017/10 #2). Die durchgezogenen Kurven stellen die mathematischen Näherungen an die Messwerte dar, die in den Gleichungen 5.4 und 5.5 beschrieben sind. Verwendete Nadel: std #4. . .	71
5.19	Messungen der Scrub Länge gegenüber dem Overdrive auf Gold (Probe: 18065/1) und Aluminium (Probe: 22017/10 #2). Die durchgezogenen Kurven stellen die mathematischen Näherungen an die Messwerte dar, die in den Gleichungen 5.6 und 5.7 beschrieben sind. Verwendete Nadel: std #4.	72
5.20	Schematische Darstellung der verwendeten Wasserstoffradikalquelle.	75
5.21	Ausschnitt der XPS-Spektren zur Untersuchung der Ätzwirkung von Wasserstoffradikalen auf eine Aluminiumoxidschicht bei unterschiedlichen Prozesstemperaturen (Probe: 22115/1).	76
5.22	Schematischer Aufbau der MUM.	77
5.23	Schematische Darstellung der Plasmakammer P5, die für die Reinigung mit Hilfe des Argon/Wasserstoffplasmas verwendet wird [77]. Die im Plasma auftretenden Spezies (Elektronen, Gasmoleküle, Ionen) sind ebenfalls eingezeichnet.	78
5.24	Darstellung des zu erwartenden Schichtstapels nach der Reinigung. Das natürliche Aluminiumoxid ist dabei allerdings durch den Reinigungsschritt in der Schichtdicke stark reduziert bzw. vollständig entfernt.	79
5.25	SIMS-Spektren für die im Ar/H ₂ -Plasma prozessierten Proben gegenüber den jeweiligen Referenzen.	80
5.26	Detailansicht der in Abbildung 5.25 gezeigten SIMS-Spektren.	81
5.27	Kontaktwiderstandsmessungen über 40 Touchdowns einer mittels Ar/H ₂ -Plasma gereinigten Probe, die anschließend in reinem Sauerstoff reoxidiert worden ist (Probe: 27046/11). Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel std #1.	82
5.28	Kontaktwiderstandsmessungen über je zehn Touchdowns auf der Referenzprobe zu Abbildung 5.27 (Probe: 27046/1). Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel #19.	83

5.29	Messungen des Kontaktwiderstandes von zehn Touchdowns gegenüber der Zeit für die mit Kieselsäure gereinigte Probe 29085/4. Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel #14.	84
5.30	Kontaktwiderstand für zehn Touchdowns gegenüber der Zeit (Probe: 29085/5). Die Messungen dienen als Referenz für die Messungen auf Probe 29058/4 in Abbildung 5.29. Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel #14.	85
5.31	Schichtstapel der von <i>Infineon</i> hergestellten Testwafer.	86
5.32	Kontaktwiderstand für zehn Touchdowns gegenüber der Zeit auf der unbehandelten Referenz von <i>Infineon</i> (Probe: 12026/1). Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel #14.	86
6.1	Vereinfachte Darstellung der Prozessschritte zur Herstellung der obersten Lagen eines ICs.	90
6.2	Gegenüberstellung der XPS-Spektren der Probenserie 27046.	93
6.3	Vergrößerte Darstellung der Abbildung 6.2 für den F-1s-Peak.	94
6.4	Vergrößerte Darstellung der Abbildung 6.2 für den Al-2p-Peak.	94
6.5	Vergrößerte Darstellung der Abbildung 6.2 für den O-2s- und F-2s-Peak.	95
6.6	Prozentuale Anteile der vorkommenden Bindungen für die jeweilige Probe.	96
6.7	REM-Aufnahme der Probing-Nadel std #2. Zusätzlich sind die Messbereiche für die EDX-Untersuchungen aus Abbildung 6.8 markiert.	97
6.8	EDX-Messungen zur Elementanalyse der Oberfläche der in Abbildung 6.7 dargestellten Probing-Nadel.	98
6.9	Vergleich des Kontaktwiderstandes der mit einem Fluorplasma behandelten Probe 27046/4 zur Referenzprobe 27046/1. Dargestellt ist jeweils exemplarisch der Touchdown #10 nach der Reinigung der Nadel. Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel #11.	100
6.10	Vergleich der lateralen Kraft der mit einem Fluorplasma behandelten Probe 27046/4 zur Referenzprobe 27046/1. Dargestellt ist jeweils exemplarisch der Touchdown #10 nach der Reinigung der Nadel. Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel #11.	100
6.11	Vergleich der normalen Kraft der mit einem Fluorplasma behandelten Probe 27046/4 zur Referenzprobe 27046/1. Dargestellt ist jeweils exemplarisch der Touchdown #10 nach der Reinigung der Nadel. Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel #11.	101
7.1	Messungen des Kontaktwiderstandes für zehn Touchdowns gegenüber der Zeit für die Probe 27046/12 #3. Die Probe ist einem in situ HF-Dip ausgesetzt worden. Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel std #1.	104
7.2	REM-Aufnahme eines Probe Mark der Probe 27046/12 #3.	105

7.3	Messungen des normalen Kräfteintrages für zehn Touchdowns gegenüber der Zeit für die Probe 27046/12 #3. Die Probe ist einem in situ HF-Dip ausgesetzt worden. Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel std #1.	106
7.4	Messungen des lateralen Kräfteintrages für zehn Touchdowns gegenüber der Zeit für die Probe 27046/12 #3. Die Probe ist einem in situ HF-Dip ausgesetzt worden. Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel std #1.	107
7.5	Vergleich des Kontaktwiderstandes für eine unbehandelte Probe 27046/1 und eine durch Fluor kontaminierte Probe 27046/2. Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel #19. Dem gegenübergestellt sind die Verläufe der Kontaktwiderstände der zwei Proben 27046/12 #2 & 27046/12 #3, die dem veränderten Fluorplasma ausgesetzt worden sind. Dargestellt ist jeweils das arithmetische Mittel aus zehn Touchdowns. Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel std #1.	107
7.6	Querschnitt durch den schematischen Aufbau des Probenhalters mit eingelassenen Permanentmagneten.	108
7.7	Gegenüberstellung des Kontaktwiderstandes der zwei Proben 22017/4 & 22017/5, die einem reinen H ₂ -Plasma ausgesetzt worden sind und der mit Fluor kontaminierten Probe 22017/6. Es ist jeweils das arithmetische Mittel aus den Touchdowns #21 bis #30 dargestellt. Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel std #1.	109
7.8	Entsprechende Gegenüberstellung der lateralen Kräfte zu Abbildung 7.7. Es ist jeweils das arithmetische Mittel aus den Touchdowns #21 bis #30 dargestellt. Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel std #1.	110
7.9	Darstellung der normalen Kräfte zu den in Abbildung 7.7 präsentierten Kontaktwiderstandesmessungen. Es ist jeweils das arithmetische Mittel aus den Touchdowns #21 bis #30 dargestellt. Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel std #1.	110
7.10	Prozentuale Auswertung der XPS-Untersuchungen zur Oberflächenzusammensetzung.	111
7.11	Ergebnisse von XPS-Untersuchungen an Oberflächen der angegebenen Proben. Dargestellt ist der Bereich des Fluor-1s-Peaks ($E = 688$ eV).	112
7.12	Darstellung der prozentualen Zusammensetzung in Abhängigkeit der Sputterzeit für das Tiefenprofil der Probe 22017/6.	113
7.13	Vergrößerte Bereiche des XPS-Spektrums der Probe 22017/6, für die ein Tiefenprofil erstellt worden ist.	113
7.14	Darstellung der Messergebnisse für die Probe 08037/4, die einem Sauerstoffplasma ausgesetzt worden ist. Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel std #3.	115
7.15	Messergebnisse für die fluorverunreinigte Probe 08037/6, welche die Referenz zu den Messungen der Probe 08037/4 in Abbildung 7.14 bildet. Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel std #3.	116

7.16	Messergebnisse der mit Hilfe von Tetrachlorethylen gereinigten Probe 29016/2 #3, der Fluorreferenz 29016/2 #1 und der Referenz 29016/3 #4 für nicht kontaminiertes Aluminium. Dargestellt sind jeweils das arithmetische Mittel der ersten zehn Touchdowns nach der Reinigung der Nadel. Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel std #1.	119
7.17	XPS-Spektren der mit PER gereinigten Probe 29016/2 #4 im Gegensatz zu einer ungereinigten Probe 29016/2 #1.	120
7.18	Ausschnitt der XPS-Spektren aus Abbildung 7.17, welcher den Bereich des F-1s-Peaks zeigt.	120
7.19	Ausschnitt der XPS-Spektren aus Abbildung 7.17, welcher den Bereich des Al-2p-Peaks zeigt.	121
7.20	Messergebnisse des Kontaktwiderstandes gegenüber der Zeit für die Reinigungsversuche mit PER der Probenserie 08037. Dargestellt sind die arithmetischen Mittel für die Touchdowns #21 - #30. Verwendeter Parametersatz: #3 mit Nadel std #1.	121
7.21	Vergrößerte Darstellung der Abbildung 7.7. Die beiden gereinigten Proben (22017/4 & 22017/5) erreichen den minimalen Kontaktwiderstand der Fluorreferenz 22017/6 spätestens nach $t = 15$ s.	123
7.22	Darstellung der Abbildung 7.8 und 7.9 zur Bestimmung des reduzierten Krafteintrages aufgrund des verbesserten Kontaktwiderstandes.	123
A.1	Konstruktionszeichnung der Bodenplatte. Die Einheit der angegebenen Bemaßungen ist Millimeter und die Darstellung ist nicht maßstabsgetreu.	129
A.2	Konstruktionszeichnung des Verbindungswinkels. Die Einheit der angegebenen Bemaßungen ist Millimeter und die Darstellung ist nicht maßstabsgetreu.	130
A.3	Konstruktionszeichnung des 1. Teils des Probenhalters. Die Einheit der angegebenen Bemaßungen ist Millimeter und die Darstellung ist nicht maßstabsgetreu.	130
A.4	Konstruktionszeichnung des 2. Teils des Probenhalters. Die Einheit der angegebenen Bemaßungen ist Millimeter und die Darstellung ist nicht maßstabsgetreu.	131
C.1	Flussdiagramm einer Messung über zehn Touchdowns. Für eine größere Anzahl an Touchdowns werden weitere Messreihen zu je zehn Touchdowns durchgeführt.	135

Literaturverzeichnis

- [1] MOORE, GORDON E.: *Cramming More Components onto Integrated Circuits*. Electronics, 38(8):114 – 117, 1965.
- [2] *The International Technology Roadmap for Semiconductors*. <http://www.itrs.net/>, 2007.
- [3] JONES, SCOTTEN W.: *A Simulation Study of the Cost and Economics of 450 mm Wafers*. Semiconductor International, 2005.
- [4] HAHN, PETER O.: *The 300 mm silicon wafer - a cost and technology challenge*. Microelectronic Engineering, 56(1-2):3–13, 2001.
- [5] NEWBOE, BETTY: *The Probe Card Dilemma*. Semiconductor International, Seiten 64–66, 1992.
- [6] ISCOFF, RON: *What's in the cards for wafer probing?* Semiconductor International, Seiten 76–82, 1994.
- [7] FORMFACTOR INC.: *FormFactor Unveils PH150XP Probe Solution for DRAM Wafer Testing*. <http://www.formfactor.com/FormFactor%20online/Downloadables/PH150XP.pdf>, 2007.
- [8] EVANS, ARTHUR: *Multi-level test probe assembly for IC chips*. Patent number: 4719417, 1986.
- [9] BATES, R.D.: *The search for the universal probe card solution*. Proceedings of the International Test Conference 1997, Seiten 533–538, 1997.
- [10] MAEKAWA, S., M. TAKEMOTO, Y. KASHIBA, Y. DEGUCHI, K. MIKI und T. NAGATA: *Highly reliable probe card for wafer testing*. Proceedings of the 50th Electronic Components and Technology Conference 2000, Seiten 1152–1156, 2000.
- [11] IWAI, H., A. NAKAYAMA, N. ITOGA und K. OMATA: *Cantilever type probe card for at-speed memory test on wafer*. Proceedings of the 23rd IEEE VLSI Test Symposium 2005, Seiten 85–89, 2005.
- [12] SASHO, S. und T. SAKATA: *Four multi probing test for 16 bit DAC with vertical contact probe card*. Proceedings of the International Test Conference 1996, Seiten 86–91, 1996.
- [13] CHEN, HSING-HSIN und HOWARD HSU: *Vertical probe card and method for using the same*. Patent number: 6861858, 2003.

- [14] OKUBO, MASAO, KAZUMASA OKUBO und HIROSHI IWATA: *Vertical probe card*. Patent number: 6853208, 2001.
- [15] LESLIE, B. und F. MATTA: *Membrane probe card technology (the future for higher performance wafer test)*. Proceedings of the International Test Conference 1988, Seiten 601–607, 1988.
- [16] BEILEY, M., F. ICHISHITA, C. NGUYEN und S. WONG: *Array probe card*. Proceedings of the IEEE Multi-Chip Module Conference 1992, MCMC-92, Seiten 28–31, 1992.
- [17] KASUKABE, S., T. MORI, T. WATANABE, H. SHIGI, Y. WADA und A. A. ARIGA: *Membrane probe with pyramidal tips for a bare chip testing*. Proceedings of the International Conference on Multichip Modules and High Density Packaging 1998, Seiten 383–387, 1998.
- [18] KIM, BONG-HWAN, SANGJUN PARK, BYEUNGLEUL LEE, JONG-HO LEE, BONG-GI MIN, SOON-DON CHOI, DONG IL CHO und KUKJIN CHUN: *A novel MEMS silicon probe card*. The Fifteenth IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems 2002, Seiten 368–371, 2002.
- [19] ZHANG, Y., D. WORSHAM, D. MORROW und R.B. MARCUS: *A new MEMS wafer probe card*. Proceedings of the 10th Annual IEEE International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems 1997, MEMS '97, Seiten 395–399, 1997.
- [20] ZHANG, YANWEI, YONGXIA ZHANG und R.B. MARCUS: *Thermally actuated micro-probes for a new wafer probe card*. Journal of Microelectromechanical Systems, 8(1):43–49, 1999.
- [21] HIRANO, T., A. KIMURA und S. MORI: *Silicon microprobing array for testing and burn-in*. Proceedings of the IEEE Multi-Chip Module Conference 1994, MCMC-94, Seiten 89–94, 1994.
- [22] ITO, T., R. SAWADA und E. HIGURASHI: *Micro IC probe for LSI testing*. Twelfth IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems 1999, MEMS '99., Seiten 263–266, 1999.
- [23] LEE, DONG-SEOK, JEONG-YONG PARK, DONG-KWON KIM und JONG-HYUN LEE: *Fabrication of a bump-type Si probe card*. International Microprocesses and Nanotechnology Conference 2000, Seiten 76–77, 2000.
- [24] WEEDEN, OTTO: *Probe Card Tutorial*. Technischer Bericht, Keithley Instruments Inc., 2003.
- [25] MANN, WILLIAM R., FREDERICK L. TABER, PHILIP W. SEITZER und JERRY J. BROZ: *The Leading Edge of Production Wafer Probe Test Technology*. Proceedings of the International Test Conference 2004, Seiten 1168–1195, 2004.
- [26] BROZ, J.J. und R.M. RINCON: *Probe contact resistance variations during elevated temperature wafer test*. Proceedings of the International Test Conference 1999, Seiten 396–405, 1999.

- [27] LEUNG, J., M. ZARGARI, B.A. WOOLEY und S.S. WONG: *Active substrate membrane probe card*. International Electron Devices Meeting 1995, Seiten 709–712, 1995.
- [28] EISELE, IGNAZ: *Grundlagen der Silizium-Halbleitertechnologie*. Institut für Physik, Universität der Bundeswehr, 2007.
- [29] BAI, P., C. AUTH, S. BALAKRISHNAN, M. BOST, R. BRAIN, V. CHIKARMANE, R. HEUSSNER, M. HUSSEIN, J. HWANG, D. INGERLY, R. JAMES, J. JEONG, C. KENYON, E. LEE, S-H. LEE, N. LINDERT, M. LIU, Z. MA, T. MARIEB, A. MURTHY, R. NAGISETTY, S. NATARAJAN, J. NEIRYNCK, A. OTT, C. PARKER, J. SEBASTIAN, R. SHAHEED, S. SIVAKUMAR, J. STEIGERWALD, S. TYAGI, C. WEBER, B. WOOLERY, A. YEOH, K. ZHANG und M. BOHR: *A 65nm logic technology featuring 35 nm gate lengths, enhanced channel strain, 8 Cu interconnect layers, low-k ILD and 0.57 μm^2 SRAM cell*. Technical Digest of the IEEE International Electron Devices Meeting 2004, IEDM 2004, Seiten 657–660, 2004.
- [30] TRAN, T.A., L. YONG, B. WILLIAMS, S. CHEN und A. CHEN: *Fine pitch probing and wirebonding and reliability of aluminum capped copper bond pads*. Proceedings of the 50th Electronic Components and Technology Conference 2000, Seiten 1674–1680, 2000.
- [31] HOTCHKISS, G., J. ARONOFF, J. BROZ, C. HARTFIELD, R. JAMESAND L. STARK, W. SUBIDO, V. SUNDARARAMAN und H. TEST: *Probing and wire bonding of aluminum capped copper pads*. Proceedings of the 40th Annual Reliability Physics Symposium 2002, Seiten 140–143, 2002.
- [32] HARMAN, G.G. und C.E. JOHNSON: *Wire bonding to advanced copper, low-K integrated circuits, the metal/dielectric stacks, and materials considerations*. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies 2002, 25(4):677–683, 2002.
- [33] HILLERINGMANN, ULRICH: *Silizium-Halbleitertechnologie*. B.G. Teubner Stuttgart, 4. Auflage, 2004.
- [34] WIDMANN, DIETRICH, HERMANN MADER und HANS FRIEDRICH: *Technologie hochintegrierter Schaltungen*. Springer-Verlag Berlin, 2. Auflage, 1996.
- [35] RYU, CHANGSUP, HAEBUM LEE, KEE-WON KWON, ALVIN L.S. LOKE und S. SIMON WONG: *Barriers for copper interconnections*. Solide State Technology, 42:53–56, 1999.
- [36] HILLERINGMANN, ULRICH: *Silizium-Halbleitertechnologie*. B.G. Teubner Stuttgart, 2. Auflage, 1996.
- [37] SARAN, M., R. COX, C. MARTIN, G. RYAN, T. KUDOH, M. KANASUGI, J. HORTALEZA, M. IBNABDELJALIL, M. MURTUZA, D. CAPISTRANO, R. RODEROS und R. MACARAEG: *Elimination of bond-pad damage through structural reinforcement of intermetal dielectrics*. Proceedings of the 36th Annual IEEE International Reliability Physics Symposium 1998, Seiten 225–231, 1998.

- [38] SAUTER, WOLFGANG, TOYOHIRO AOKI, TAKASHI HISADA, HIRUMITSU MIYA, KEVIN PETRAREA, FREDERIC BEAULIED, STEPHANIE ALLARD, JENNIFER POWER und MICHAEL AGBES: *Problems with wirebonding on probe marks and possible solutions*. Proceedings of the 47th Electronic Components and Technology Conference 2003, (53):1350–1358, 2003.
- [39] MUKAI, K., A. HIRAIWA, S. MURAMATSU, I. YOSHIDA und S. HARADA: *A new integration technology that enables forming bonding pads on active areas*. International Electron Devices Meeting 1981, 27:62–65, 1981.
- [40] SONG, Z., T. TUN, C.K. OH, S. REDKAR, B.H. ER, C.P. SOO und C.H. GOO: *Investigation of Bond-Pad Related Inter-Metal Dielectric Crack*. International Symposium for Testing and Failure Analysis 2003, Seiten 82–85, 2003.
- [41] HAL, B.A.E. VAN, G.Q. ZHANG, M.A.J. VAN GILS und R.H.J. PEERLINGS: *Delamination prediction in stacked back-end structure underneath bond pads*. 6th International Conference on Electronic Packaging Technology 2005, Seiten 670–675, 2005.
- [42] HEINEN, G., R.J. STIERMAN, D. EDWARDS und L. NYE: *Wire bonds over active circuits*. Proceedings of the 44th Electronic Components and Technology Conference 1994, Seiten 922–928, 1994.
- [43] SHEN, L., V. GUMASTE, A. PODDAR und L. NGUYEN: *Effect of pad stacks on dielectric layer failure during wire bonding*. Proceedings of the 56th Electronic Components and Technology Conference 2006, Seiten 6 pp.–, 2006.
- [44] ANDERSON, W.R., W.M. GONZALEZ, S.S. KNECHT und W. FOWLER: *ESD protection under wire bonding pads*. Proceedings of the Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium 1999, Seiten 88–94, 1999.
- [45] HESS, K.J., S.H. DOWNEY, G.B. HALT, T. LEE, L.L. MERCADO, J.W. MITER, W.C. NG und D.G. WONTOR: *Reliability of bond over active pad structures for 0.13 μm CMOS technology*. Proceedings of the 53rd Electronic Components and Technology Conference 2003, Seiten 1344–1349, 2003.
- [46] CHAO, Y.C., Y.J. LEE, J. LIU, G.S. SHEN, F.J. TSAI, D.S. LIU und M.K. SHIH: *Development of probing mark analysis model [IC testing]*. Proceedings of the 5th International Conference on Electronic Packaging Technology 2003, ICEPT 2003, (5):40–43, 2003.
- [47] LIU, YONG, D. DESBIENS, S. IRVING, T. LUK, S. EDBORG und D. HAHNAND S. PARK: *Probe test failure analysis of bond pad over active structure by modeling and experiment*. Proceedings of the Electronic Components and Technology Conference 2005, 1(55):861–866, 2005.
- [48] NAGLER, OLIVER: *Probing-induzierte Defekte bei Halbleitern mit Kontaktpads über aktiven Strukturen*. Doktorarbeit, Universität der Bundeswehr, 2008. In Bearbeitung.
- [49] JEEMA, N. B., J. L. QUEFFELEC und D. TRAVERS: *Apparatus and methods for electrical contact resistance study of cleaned and corroded materials*. Measurement Science and Technology, 1(3):282–286, 1990.

- [50] HERNOT, XAVIER, ABDELHAK SENOUC, ABDELAZIZ EL MANFALOUT, NUOREDINE BEN JEMAA und ROCHI EL ABDI: *Contact Resistance Law for Elasto.-Plastic Domains in the Force Range (1 mN - 10 mN)*. IEICE Transactions on Electronics 2003, E86 C(6):874–879, 2003.
- [51] KATAOKA, K., T. ITOH und T.SUGA: *Mechanism of ultra low force probing on Al electrodes*. Proceedings of the 52nd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts 2006, Seiten 21–25, 2006.
- [52] *Komponenten für die Wägetechnik*. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 2004.
- [53] SCHRÜFER, ELMAR: *Elektrische Messtechnik*. Carl Hanser Verlag München, 5. durchgesehene Auflage, 1992.
- [54] HOFFMANN, KARL: *Eine Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsmessstreifen*. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH.
- [55] PHYSIK INSTRUMENTE (PI) GMBH & Co. KG: *Datasheet M511 M521 M531*. http://www.physikinstrumente.com/en/pdf/M511_Datasheet.pdf.
- [56] PHYSIK INSTRUMENTE (PI) GMBH & Co. KG: *Datasheet M405 M410 M415*. http://www.physikinstrumente.com/en/pdf/M405_Datasheet.pdf.
- [57] PHYSIK INSTRUMENTE (PI) GMBH & Co. KG: *Datasheet M501*. http://www.physikinstrumente.com/en/pdf/M501_Datasheet.pdf.
- [58] PHYSIK INSTRUMENTE (PI) GMBH & Co. KG: *Datasheet C843*. http://www.physikinstrumente.com/en/pdf/C843_Datasheet.pdf.
- [59] QUADRANT ENGINEERING PLASTIC PRODUCTS: *Ertalon 66-GF30*. http://epp.quadrantplastics.com/assets/newfolder/eu/de/productAssets/Ertalon_Nylatron/PDS%20ERTALON66GF30%20DU.pdf.
- [60] *Messtechnische Systemlösungen ... vom Sensor bis zur Software*. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 2004.
- [61] FISHER, J. C. und I. GIAEVER: *Tunneling Through Thin Insulating Layers*. Journal of Applied Physics, 32(2):172–177, 1961.
- [62] HOLM, RAGNAR: *Electric Contacts*. Springer-Verlag Berlin, 4. Auflage, 1979.
- [63] SHARVIN, Y.V. *Soviet Physics, JETP*, 21:655, 1965.
- [64] MIKRAJUDDIN, A., F. G. SHI, H. K. KIM und K. OKUYAMA: *Size-dependent electrical constriction resistance for contacts of arbitrary size: from Sharvin to Holm limits*. Materials Science in Semiconductor Processing, 2:321–327, 1999.
- [65] BRONSTEIN, I.N., K.A. SEMENDJAJEW, G. MUSIOL und H. MÜHLIG: *Taschenbuch der Mathematik*. Harri Deutsch Verlag, 1999.
- [66] ASHCROFT, N.W. und N.D. MERMIN: *Solid State Physics*. W. B. Saunders Company, 1976.

- [67] LOUCKS, T.L.: *Fermi Surfaces of Cr, Mo, and W by the Augmented-Plane-Wave Method*. Physical Review, 139(4A):A1181–A1188, 1965.
- [68] GREENWOOD, N.N. und A. EARNSHAW: *Chemie der Elemente*. VCH Verlagsgesellschaft mbH, 1. korrigierter Nachdruck der 1. Auflage, 1990.
- [69] SIMMONS, JOHN G.: *Generalized Formula for the Electric Tunnel Effect between Similar Electrodes Separated by a Thin Insulating Film*. Journal of Applied Physics, 34(6):1793–1803, 1963.
- [70] KISTER, JANUARY: *Introduction to physics of contact resistance*. SouthWest Test Workshop 1998, 1998.
- [71] SCHOFT, S.: *Joint resistance depending on joint force of high current aluminum joints*. Proceedings of the 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts and the 22nd International Conference on Electrical Contacts 2004, Seiten 502–510, 2004.
- [72] HAUERT, R.: *Interface analysis for problem solving in industry and research*. Thin Solid Films, 206:323–326, 1991.
- [73] SCHNEUWLY, A., P. GRÖNING, L. SCHLAPBACH und V. P. JAECKLIN: *Influence of surface contamination on metal/metal bond contact quality*. Journal of Electronical Materials, 27(8):990–997, 1998.
- [74] VINARICKY, E.: *Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen*. Springer-Verlag Berlin, 2. Auflage, 2002.
- [75] KOGUT, L. und K. KOMVOPOULOS: *Electrical contact resistance theory for conductive rough surfaces separated by a thin insulating film*. Journal of Applied Physics, 95(2):576–585, 2004.
- [76] KIKYUAMA, H., N. MIKI, K. SAKA, J. TAKANO, I. KAWANABE, M. MIYASHITA und T. OHMI: *Principles of wet chemical processing in ULSI microfabrication*. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing 1991, 4(1):26–35, 1991.
- [77] BAYERSTADLER, ANTON: *Reinigung und Gasphasenepitaxie in einem Ultrahochvakuum-Mehrkammerensystem für zukünftige CMOS-Technologien*. Doktorarbeit, Universität der Bundeswehr, 2006.
- [78] HYMAN, D. und M. MEHREGANY: *Contact physics of gold microcontacts for MEMS switches*. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies 1999, 22(3):357–364, 1999.
- [79] BROZ, J.J., J.C. ANDERSEN und R.M. RINCON: *Reducing device yield fallout at wafer level test with electrohydrodynamic (EHD) cleaning*. Proceedings of the International Test Conference 2000, Seiten 477–484, 2000.
- [80] KATAOKA, K., T. ITOH, K. OKUMURA und T. SUGA: *Low contact force probing on copper electrodes*. Proceedings of the International Test Conference 2002, Seiten 424–429, 2002.

- [81] TIMSIT, R.: *Some Fundamental Properties of Aluminum-Aluminum Electrical Contacts*. IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology 1980, 3(1):71–79, 1980.
- [82] RAMM, J., E. BECK, A. ZUGER, A. DOMMANN und R. E. PIXLEY: *Low-temperature in situ cleaning of silicon wafers with an ultra high vacuum compatible plasma source*. Thin Solid Films, 222:126–131, 1992.
- [83] HANSCH, W., E. HAMMERL, W. KIUNKE, I. EISELE, J. RAMM und E. BECK: *Silicon Molecular Beam Epitaxy on Hydrogen-Plasma-Cleaned Substrates*. Japanese Journal of Applied Physics, 33:2263–2267, 1994.
- [84] NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY: *NIST Chemistry Web-Book*. <http://webbook.nist.gov/chemistry/>, June 2005.
- [85] ASSMUTH, A., T. STIMPEL-LINDNER, O. SENFTLEBEN, A. BAYERSTADLER, T. SULIMA, H. BAUMGÄRTNER und I. EISELE: *The role of atomic hydrogen in pre-epitaxial silicon substrate cleaning*. Applied Surface Science, 25:8389–8393, 2007.
- [86] SULIMA, TORSTEN: *Modifikationen von Silizium-Grenzflächen für die MOS-Technologie*. Doktorarbeit, Universität der Bundeswehr, 2003.
- [87] STIMPEL, TANJA: *Selbstorganisiertes Wachstum von C 60-Fullerenen auf rekonstruierten Silizium-Oberflächen*. Doktorarbeit, Universität der Bundeswehr, 2003.
- [88] EIBL, C., G. LACKNER und A. WINKLER: *Quantitative characterization of a highly effective atomic hydrogen doser*. Journal of Vacuum Science Technology, 16:2979–2989, 1998.
- [89] NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY: *NIST X-ray Photoelectron Spectroscopy Database*. <http://srdata.nist.gov/xps/Default.aspx>, August 2007.
- [90] ASSMUTH, ANDREAS: *Photonenaktivierte Reinigungs- und Oxidationsprozesse für die Nanoelektronik*. Doktorarbeit, Universität der Bundeswehr, 2007.
- [91] FEHLAUER, GERD: *Gitterangepasstes ternäres Silizid für die Silizium-Technologie*. Doktorarbeit, Universität der Bundeswehr, 1997.
- [92] STRASS, ACHIM: *Plasmaunterstützte Substratreinigung und Schichtherstellung für die Silizium-Nanoelektronik*. Doktorarbeit, Universität der Bundeswehr, 1998.
- [93] SCHULZE, JÖRG: *Bor-Oberflächenphasen in vertikalen Si- und SiGe-Schichtstrukturen*. Doktorarbeit, Universität der Bundeswehr, 2000.
- [94] KORNER, N., E. BECK, A. DOMMANN, N. ONDA und J. RAMM: *Hydrogen plasma chemical cleaning of metallic substrates and silicon wafers*. International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films 1995, 76-77:731–737, 1995.
- [95] FREITAG, GUNTER: *Entwicklung eines neuen Feldeffekt-Gassensors mit hybridem Gate-Aufbau und vertikalem Transistordesign*. Doktorarbeit, Universität der Bundeswehr, 2005.

- [96] ROSLI, SITI AZLINA, AZLAN ABDUL AZIZ und HASLINDA ABDUL HAMID: *Characteristics of RIE SF₆/O₂/Ar Plasmas on n-Silicon Etching*. IEEE International Conference on Semiconductor Electronics 2006, ICSE '06, Seiten 851–855, 2006.
- [97] ANDERSON, H. M., J. A. MERSON und R. W. LIGHT: *A Kinetic Model for Plasma Etching Silicon in a SF₆/O₂ RF Discharge*. IEEE Transactions on Plasma Science 1986, 14(2):156–164, 1986.
- [98] ROSLI, SITI AZLINA, AZLAN ABDUL AZIZ und HASLINDA ABDUL HAMID: *Highly Chemical Reactive Ion Etching of Silicon in CF₄ Containing Plasmas*. IEEE International Conference on Semiconductor Electronics 2006, ICSE '06, Seiten 856–860, 2006.
- [99] BAEK, KYU-HA, CHANG-IL KIM, KWANG-HO KWON, TAE-HYUNG KIM, EUI-GOO CHANG, SUN JIN YUN, YONG-SUN YOON, SANG-GI KIM und KEE-SOO NAM: *Passivation role of fluorine on anticorrosion of AlCu films after plasma etching*. Journal of Vacuum Science and Technology A, 16(3):1469–1472, 1998.
- [100] LINN, J.H. und W.E.SWARTZ: *An XPS Study of the Plasma Etching of Aluminum with CCl₄*. Spectroscopy Letters, 18(5):335–352, 1985.
- [101] CHEN, G. S., C. B. BOOTHROYD und C. J. HUMPHREYS: *Electron-beam induced crystallization transition in self-developing amorphous AlF₃ resists*. Applied Physics Letters, 69(2):170–172, 1996.
- [102] *Benutzerhandbuch – Silicon Star 12 M*. Version 2.0. Asyntis GmbH.
- [103] STROHMEIER, BRIAN R.: *Surface characterization of aluminum foil annealed in the presence of ammonium fluoborate*. Applied Surface Science, 40:249–263, 1989.
- [104] ERNST, K.-H., D. GRMAN, R. HAUERT und E. HOLLÄNDER: *Fluorine-Induced corrosion of aluminium microchip bond pads: An XPS and AES analysis*. Surface and Interface Analysis, 21(10):691–696, 1994.
- [105] HUA, Y. N., S. REDKAR, C.K. LAU und Z.Q. Mo: *A Study on Non-Stick Aluminium Bondpads due to Fluorine Contamination using SEM, EDX, TEM, IC, AUGER, XPS and TOF-SIMS Techniques*. 28th International Symposium for Testing and Failure Analysis 2002, ISTFA 2002, Seiten 495–504, 2002.
- [106] HUA, Y. N., S. REDKAR, RON DICKINSON und SHIRLEY S.L. PEH: *A Study on Fluorine-Induced Corrosion on Microchip Aluminium Bondpads*. 29th International Symposium for Testing and Failure Analysis 2003, ISTFA 2003, Seiten 249–255, 2003.
- [107] PVA TEPLA AG: *Microwave Plasma System 400 and 660 Series*. http://www.pvatepla.com/englisch_site/produkte_leistungsspektrum_dateien/plasma_dateien/datenblaetter/400-660.pdf, 2008.
- [108] TAMAI, T.: *Surface Contamination – Genesis, Detection, and Control*, Kapitel Electrical Conduction Mechanisms of Electric Contact Covered with Contaminant Films, Seiten 967–981. Plenum Press, 1979.

Publikationen

St. Henzler, J. Berthold, M. Koban, **M. Reinl**, G. Georgakos, D. Schmitt-Landsiedel, "Impact of Level-Converter on Power-Saving Capability of Clustered Voltage Scaling", *Advances in Radio Science*, Vol. 3, Issue 14, pp. 311-317, 2005

F. Ansorge, J. Wolter, H. Hanisch, B. Hoffschmidt, **M. Reinl**, "Device for Concentrating Light, Particularly Sunlight", WO/2006/005303, PCT/DE2005/001171, International Patent, 2006

O. Nagler, **M. Reinl**, I. Eisele, "An Advanced Probe Characterization Tool for On-line Contact Basics Measurements", *15th IEEE Southwest Test Workshop SWTW*, Session 6, 2005

M. Reinl, I. Eisele, O. Nagler, "Advanced Probe Characterization of Probing Methodology", *8th European Manufacturing Test Conference EMTC*, Session I, Munich, Germany, 2006

O. Nagler, **M. Reinl**, F. Kaesen, I. Eisele, "Advanced Characterization of Semiconductor Wafer Probing Methodology", *23rd International Conference on Electrical Contacts ICEC*, Sendai, Japan, 2006

M. Reinl, T. Sulima, I. Eisele, O. Nagler, F. Kaesen, "Influence of fluorine contamination on semiconductor wafer probing", *71. Jahrestagung der DPG*, DS 28.4, Regensburg, 2007

H. Lochner, M. Amberger, T. Chabert, M. Sterkel, W. Hansch, **M. Reinl**, I. Eisele, "Remote plasma process with independent control of physical and chemical etching of Si / Ge", *72. Jahrestagung der DPG*, HL 54.10, Berlin, 2008

M. Reinl, A. Aßmuth, R. Nüssl, T. Stimpel-Lindner, T. Sulima, H. Baumgärtner, I. Eisele, "Aluminum oxide etching with hydrogen", *72. Jahrestagung der DPG*, O 18.19, Berlin, 2008

U. Abelein, A. Aßmuth, P. Iskra, **M. Reinl**, M. Schlosser, T. Sulima, I. Eisele, "Vertical 40 nm Impact Ionization MOSFET (I-MOS) for High Temperature Applications", *26th International Conference on Microelectronics MIEL*, Nîs, Serbia, 2008

M. Reinl, T. Stimpel-Lindner, T. Sulima, I. Eisele, O. Nagler, F. Kaesen, "Influence of Fluorine Contamination on Semiconductor Wafer Probing", *26th International Conference on Microelectronics MIEL*, Nîs, Serbia, 2008

Danksagung

An dieser Stelle gilt mein Dank allen, die zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen haben.

An erster Stelle danke ich **Herrn Prof. Dr. Ignaz Eisele** für die Vergabe des interessanten Promotionsthemas und die Möglichkeit, diese Arbeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter des Instituts für Physik anzufertigen. Seine stets hilfreichen Anregungen und seine Diskussionsbereitschaft ließen diese Arbeit erst zustande kommen.

Herrn Prof. Dr. Hermann Baumgärtner danke ich für die interessanten Diskussionen und die Einblicke in die elektrische Charakterisierung.

Unseren Projektpartnern bei der Infineon Technologies AG – namentlich **Herrn Dipl.-Ing. Oliver Nagler, Herrn Peter Thaller, Herrn Dr. Christian Degen** und **Herrn Dr. Florian Kaesen** – danke ich für die Zusammenarbeit und die Finanzierung des Projektes.

Frau M.Phys. Therese Chabert, Herrn Dipl.-Phys. Martin Amberger und **Herrn Dipl.-Phys. Wolfgang Petasch** danke ich für die gute Zusammenarbeit und die technische Unterstützung bei dem zur Verfügung gestellten Plasmaätzer.

Dank an **Herrn Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Ulrich Abelein** dafür, dass er mich erst auf diese Stelle hier am Institut für Physik aufmerksam gemacht hat. Aufgrund seines Fachwissens war er häufig erste Anlaufstelle für konstruktive Kritik und hilfreiche Diskussionen, gerade bei Veröffentlichungen.

Bei **Herrn Dr. Torsten Sulima** bedanke ich mich für die hilfreichen und anregenden Diskussionen gerade hinsichtlich der SIMS-Analysen. Ein großer Dank für die gute Zusammenarbeit bei der Administration des Computernetzwerkes am Institut. Ferner konnte durch seinen steten Beitrag zu meiner "speziellen" Schublade ein Versiegen des Zuckernachschubs erfolgreich verhindert werden.

Herrn Dipl.-Phys. Oliver Senftleben danke ich für das stets offene Ohr hinsichtlich physikalischer Probleme und die sich daraus ergebenden Diskussionen, die neue Aspekte für meine Arbeit lieferten. Ebenso gilt ein Dank für seine Unterstützung bei den EDX-Messungen und REM-Aufnahmen.

Bei **Frau Dr. Tanja Stimpel-Lindner** möchte ich mich für die Durchführung der XPS-Analysen und der Versuche mittels Wasserstoff-Radikalen bedanken. Ferner danke ich für die interessanten Diskussionen zu den Messergebnissen, die häufig neue Ideen für weitere Untersuchungen lieferten.

Den Kollegen im Reinraum, **Herrn Dipl.-Phys. Lothar Höllt, Herrn Dipl.-Phys. Peter Iskra, Herrn Dipl.-Ing. Helmut Lochner, Herrn Dipl.-Phys. Thomas Zilbauer, Herrn Dr. Markus Schindler, Herrn Michael Meyer, Herrn Dr. Florian Wiest,**

Herrn Torsten Bötzwow und **Frau Anke Heller**, gilt mein Dank für das konstante gleich bleibende Arbeitsklima.

Bei der "MUM-Crew", bestehend aus **Herrn Hans Messarosch**, **Herrn Dr. Andreas Aßmuth** und **Herrn Dipl.-Ing. Rudolf Nüssl**, bedanke ich mich für die Unterstützung bei den Versuchen an der MUM.

Ein spezieller Dank gilt **Herrn Dipl.-Ing. Peter Ciecierski**, der gerade in verwaltungstechnischen Angelegenheiten eine unersetzliche Informationsquelle darstellte. Ferner bedanke ich mich bei ihm und seiner Frau Andrea für die Abende zur Pflege des bayrischen Brauchtums.

Herrn Dr. Gerhard Dorda danke ich für die Aufnahme in seinem Büro und die anregenden Unterhaltungen. Dadurch habe ich einen Einblick auf neue Ansichten zu den Problemen der Physik gewonnen.

Die Mitarbeiter der Werkstatt – namentlich **Herr Walter Funke**, **Herr Peter Sitter**, **Herr Hans Bergauer** und **Herr Andreas Rippler** – hatten stets einen guten Ratsschlag in technischer Hinsicht parat.

Den Sekretärinnen **Frau Karin Bächle**, **Frau Cornelia Budach** und **Frau Elena Grüner** möchte ich für ihre Unterstützung im Institutsalltag danken.

Frau Dipl.-Phys. Dorota Kulaga-Egger und **Herrn Dipl.-Phys. Martin Schlosser** danke ich für die Durchführung der SIMS-Messungen.

Außerdem danke ich allen übrigen Kollegen, **Herrn Dipl.-Phys. Christoph Senft**, **Herrn Dipl.-Ing. Soeren Klemm**, **Herrn Dipl.-Geol. Thomas Galonska**, **Herrn Dipl.-Inf. Jan Bartelsen**, **Herrn Prof. Dr. Jörg Schulze**, **Herrn Dr. Mathias Born**, **Herrn Dr. Matthias Schmidt**, **Frau Dr. Alexandra Ludsteck-Pechloff**, **Herrn Dr. Wahyu Widarnato** und allen die ich vergessen habe, für das hervorragende Betriebsklima und die unvergessliche Zeit am Institut für Physik.

Abschließend möchte ich mich bedanken bei meinem Bruder **Michael Reinl** und seiner Freundin **Karin Wittstock**, die mir jederzeit hilfreich zur Seite standen und mit deren Unterstützung ich immer rechnen konnte.

Meiner Freundin **Tatjana Sonnenberg** gilt mein besonderer Dank. Sie hat mich in der anstrengenden Zeit der Mehrfachbelastungen durch ihre Liebe, Verständnis und Geduld gestärkt und unterstützt. Ich danke Dir ganz besonders dafür.

Meinen Eltern **Christa und Günter Reinl** gebührt aber mein größter Dank. Ihre Unterstützung, Ermunterung und ihr Vertrauen in mich haben mir diese Arbeit wesentlich erleichtert. Besonders hervorzuheben ist dabei der beharrliche und unermüdliche Einsatz meines Vaters bei der Durchsicht und dem Korrekturlesen meiner Arbeit.

