

UNIVERSITÄT DER BUNDESWEHR  
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

# Probing-induzierte Defekte bei Halbleitern mit Kontaktpads über aktiven Strukturen

Oliver Nagler

Vorsitzender des Promotionsausschusses: Prof. Dr.-Ing. Christoph Jungemann

1. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Ignaz Eisele

2. Berichterstatter: Prof. Dr. Hermann Baumgärtner

Tag der Prüfung: 9. Dezember 2008

Mit der Promotion erlangter akademischer Grad:

Doktor-Ingenieur

(Dr.-Ing.)

München, im März 2009



## Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde der Einfluss des mechanischen Kontaktes von Nadeln auf Pads, die über bruchempfindlichen Schichten von Halbleiter-Bauelementen angeordnet sind, untersucht. Getrieben durch den hohen Kostendruck schreitet die Miniaturisierung in der Halbleitertechnologie weiter fort. Dadurch bekommen Zuverlässigkeitsaspekte von mikroelektronischen Bauelementen wachsende Bedeutung. Um zusätzliche Chipfläche zu sparen, sind die Kontaktpads bei heutigen Chips oft direkt über dem Schaltungs- und Verdrahtungsbereich angeordnet. Diese Konfiguration wird als Pad-over-active-Area (Abk. POAA) bezeichnet. Die Chips werden vor der Weiterverarbeitung auf dem Wafer im industriellen Maßstab auf die Einhaltung der Spezifikation elektrisch getestet, wobei die Nadelkarte das Verbindungsglied zwischen Schaltung und Tester darstellt. Der Schichtverbund, der aus mehrlagigen Metallbahnen und Oxid-Füllstrukturen besteht, weist dabei Schichtdicken im Sub-Mikrometerbereich auf. Die zulässigen Kontaktkräfte und Spitzengrößen der Kontaktiernadel, die erforderlich sind, um noch einen zuverlässigen elektrischen Kontakt zu gewährleisten, sind daher hinreichend genau zu bestimmen, um keine Beschädigung des Schichtverbundes zu generieren.

Die Zielsetzung dieser Arbeit ist es, die wesentlichen Einflussgrößen, die zum Versagen (Bruch) der Schichten führen kann, zu bestimmen. Weiterhin werden Methoden und Geräte, die für die Bestimmung der Bruchhäufigkeit erforderlich sind, entwickelt. Der Schwerpunkt der Forschung bei Werkstoffen der Halbleitertechnologie lag in der Vergangenheit in der Untersuchung der elektrischen und physikalischen Eigenschaften und Prozesstechnologien. Erst durch die steigende Zahl von mikromechanischen Sensoren speziell für die Automobilsicherheitstechnik wurde in den letzten 5-10 Jahren auch dieser Aspekt der Halbleitertechnologie zunehmend Gegenstand der Forschung. Diese Arbeit soll einen neuen Beitrag zum Verständnis der Versagensmechanismen durch das Probing und zur Optimierung des Schichtverbundes bei Pads über aktiven Bereichen leisten. Außerdem kann den Nadelkarten-Herstellern damit die für die Zuverlässigkeit und Kontaktstabilität relevanten Parameter für einen optimalen Entwurf geliefert werden.

## Zusammenfassung

Ausgangspunkt ist eine analytische Beschreibung des elektrischen Kontaktes und die Messmethodik. Der elektrische Kontakt kann in die Komponenten Engewiderstand und Fremdschichtwiderstand zerlegt werden, wobei sowohl die Kontaktkraft als auch die Geometrie, die Topographie und das Material der Kontaktpaare sowie Umgebungsbedingungen eine Rolle spielen. Maßgeblich für die Höhe des Kontaktwiderstands sind Fremdschichten, die beim Kontaktieren überwunden werden müssen. Das kann sowohl durch eine schleifende Bewegung als auch elektrisch durch Fritting erfolgen.

Für die Beschreibung des mechanischen Kontaktes ist es zunächst wichtig, die Grundlagen der Festkörpermechanik und der Stoffgesetze zu erörtern. Da bei Schichtverbänden von Halbleitern sowohl duktile (metallische) als auch spröde (keramische) Materialien verwendet werden, wurde auf deren Eigenschaften und Unterschiede im Materialverhalten ausführlich eingegangen. Der elektrische Kontaktwiderstand als auch die Bruchhäufigkeit werden im Wesentlichen von den Werkstoffeigenschaften Härte und Elastizitätsmoduls bestimmt. Für dünne Schichten sind die klassischen Methoden zur Bestimmung der Materialwerte nicht allgemein anwendbar, weshalb Indenter-Messungen an speziellen Proben durchgeführt wurden. Für den Fall von sprödem Materialverhalten werden statistische Lösungsansätze nach *Weibull* vorgestellt, mit der Bruchwahrscheinlichkeit von POAA-Strukturen ermittelt werden.

Die Form der Nadelspitzen, die für das Probing zum Einsatz kommen, ist üblicherweise sphärisch oder flach. Die Verformungen und Spannungen werden gemäß den Theorien der Hertzschen Pressung zunächst für den linear-elastischen Fall eines Kontaktes einer Kugel und eines kreisförmigen Stempels auf einem homogenen Material berechnet. Wie sich zeigte, werden bei der Verwendung von runden Spitzen mit Radien von 5-20µm schon bei sehr geringen Kontaktkräften von weniger als 5mN die zulässigen Spannungen überschritten, so dass Risse im Material zu erwarten sind. Dahingegen fallen die Spannungen schon bei einigen hundert Nanometern unter der Oberfläche stark ab. Tiefer liegende Schichten sind beim Kontaktieren daher weniger stark belastet.

Der Kontakt wird beim Probing durch federnde Kontaktelemente realisiert. Deshalb wurde in dieser Arbeit die Charakteristik von sog. Cantilever-Nadeln analytisch beschrieben. Wie später im experimentellen Teil nachgewiesen wurde, sind die Bewegungsrichtung und der Betrag des Kraftvektors der Nadel wesentliche Faktoren, welche die elektrische Kontaktqualität bestimmen. Außerdem kommt es zu Interaktionen zwischen den Kontaktpaaren.

Aufgehend von theoretischen Überlegungen des elektrischen und mechanischen Kontaktes war es erforderlich, die relevanten Größen Kontaktwiderstand und –kraft während des Kontaktierens zu messen. Deshalb wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Gerät entwickelt, das die Messung dieser Parameter unter möglichst realen Bedingungen bei Variation der Kontaktmaterialien und Nadelgeometrien erlaubt. Die Messungen resultierten in der Entwicklung und Herstellung eines optimierten Nadeldesigns, das in Zusammenarbeit mit dem Nadelkarten-Hersteller *MJC* realisiert wurde. Diese Nadelkarten-Technologie ist bereits heute bei der Fa. *Infineon Technologies AG* produktiv beim Wafertest im Einsatz. Mit Hilfe des Einzelnadelmessplatzes konnte auch der Nachweis über den Einfluss auf den elektrischen Kontakt von Fluor-Kontaminationen, die beim Prozess der Passivierungsöffnung von Aluminium-Pads entstehen, erbracht werden. Diese Thematik wurde in der Dissertation von Markus Reinl ausführlich erörtert.

Mit einem rein analytischen Ansatz ist es bei nichtlinearen Materialverhalten und Strukturen im Schichtverbund nicht mehr möglich, die Spannungen und Verformungen von Kontaktpaaren eindeutig zu beschreiben. Dies gilt umso mehr, wenn zum vertikalen Kraftkomponente auch noch eine tangentielle Komponente, die über den Reibungskoeffizienten miteinander verknüpft sind, hinzukommt. Aus diesem Grund wurden FEM-Simulationen mit der Software *ANSYS 10.0* durchgeführt und verschiedene Geometrie- und Lastfälle berechnet. Durch eine parametrisierte Modellierung ist es möglich, beliebige Schichtaufbauten und Probing-Parameter abzubilden. Wie sich zeigte, treten bei einer lateralen Bewegung der Spitze zusätzlich Zugspannungen auf, die bei spröden Materialien früher zum Bruch führen können als bei einer reinen Druckbelastung. Außerdem konnte gezeigt werden, dass die Spannungen im Oxid deutlich verringert werden können, wenn noch eine dünne Aluminiumschicht zwischen Spitze und Oxid nach dem plastischen Eindringen der Nadel in das Material verbleibt.

## Zusammenfassung

Die mit Hilfe der Analytik und FEM-Simulationen gewonnenen Erkenntnisse werden mit einem Indenter messtechnisch überprüft. Dabei wird der Probing-Vorgang entsprechend den vorher berechneten und gemessenen Kräften und Bewegungen mit einer Diamantspitze abgebildet. Neben klassischen Anwendungsgebieten wie Härtemessungen von dünnen Schichten nach dem Kraft-Eindringtiefe-Verfahren oder Rauigkeitsmessungen im Tastschnittverfahren, wird der Indenter durch das Aufbringen von definierten Lasten und Bewegungen mit Diamantspitzen dazu verwendet, gezielt Oxid-Risse an Teststrukturen mit verschiedenen POAA-Schichtaufbau zu erzeugen.

Die Bruchhäufigkeit bei steigender Belastung von verschiedenen Schichtdicken und – topographien wurden mit dem gezeigten Verfahren der linearen Regression ausgewertet. Dabei zeigte sich entgegen der Theorie der Festkörpermechanik bei vergleichbarer Belastung eine deutlich geringere Bruchhäufigkeit bei dickeren Oxidschichten. Da die Mikrorisse im Oxid aufgrund deren geringen Größe nur indirekt durch ein Präparationsverfahren durch Anätzungen der Metallebene unter dem Isolator sichtbar gemacht werden können, konnte ein Zusammenhang mit den experimentellen Ergebnissen erkannt werden. Obwohl Risse im Oxid unabhängig von den Schichtdicken vorhanden sein müssen, kommt es nur zu einer Anätzung der Metallbahnen, wenn gleichzeitig die darüber liegende Nitrid-Schicht gebrochen ist. Da die Spannungen aber bereits in einer Tiefe ab ca.  $1\mu\text{m}$  deutlich geringer sind, wird die kritische Bruchspannung im Nitrid bei dickerem Oxid erst bei höheren Kontaktkräften überschritten. Es konnte außerdem ein Unterschied in der Rissanzahl zwischen plattenförmigen (mehr Risse) oder gitterförmigen Strukturen in der obersten Metalllage beobachtet werden. Eine Erklärung hierfür liefert die Tatsache, dass der Rissverlauf nicht notwendigerweise über der gitterförmigen Metallstruktur endet und somit eine geringere Bruchhäufigkeit zu beobachten ist.

# Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	iii
Inhaltsverzeichnis .....	vii
Vorwort .....	1
1 Grundlagen der elektrischen und mechanischen Kontakteigenschaften .....	5
1.1 Elektrischer Kontaktwiderstand .....	5
1.2 Grundlagen der Festkörpermechanik .....	14
1.3 Der mechanische Kontakt von Kugel und Stempel.....	24
1.4 Spannungen beim Schichtverbund .....	32
1.5 Bruchverhalten duktiler und spröder Materialien .....	33
1.6 Probabilistische Bruchmechanik .....	37
1.7 Weibull-Verteilung.....	41
2 Analytische Charakterisierung von Kontaktelementen .....	44
2.1 Kontaktierung durch Federkontakte .....	44
2.2 Reinigungsverfahren von Kontaktnadeln .....	47
2.3 Beschreibung einer idealisierten Cantilever-Nadel .....	49
3 Beschreibung von Pads über aktiven Strukturen.....	54
3.1 Schichtaufbau und Metallisierung.....	54
3.2 Versagensmechanismus durch Risse im Dielektrikum .....	57
3.3 Analyse der Pad-Oberfläche.....	60
3.4 Einfluss der Fluor-Kontamination.....	63
4 Pad-Charakterisierung durch Nanoindentierung .....	66
4.1 Beschreibung des Indenters.....	66
4.2 Messung der Universal-Härte und E-Modul .....	68
5 Kontakt-Messungen an Einzelnadeln .....	72
5.1 Entwicklung eines Messtools zur Kontaktkraft und –widerstandsmessung .....	72
5.2 Messdatenerfassung in Echtzeit .....	74
5.3 Engewiderstandsmessung auf Gold-Beschichtung .....	76
5.4 Variation von Kontaktmaterial und Nadelgeometrie .....	77
5.5 Optimierung eines Nadeldesign für Probing-over-Active-Area .....	80
6 FEM-Simulation der Kontaktkräfte und Spannungen.....	84
6.1 Elastischer Kontakt auf homogenem Material .....	85
6.2 Elastischer Kontakt auf geschichteten Material .....	95
6.3 Simulation des plastischen Kontaktes .....	98

7	Messtechnische Ermittlung der Bruchwahrscheinlichkeit .....	99
7.1	Testchip-Beschreibung .....	99
7.2	Ermittlung der kritischen Bruchlast durch Nanoindentation.....	102
7.3	Lineare Regression der Bruchhäufigkeit.....	107
7.4	Interpretation der Indenter-Versuche .....	109
8	Ausblick.....	111
	Literaturverzeichnis.....	114
	Eigene Veröffentlichungen.....	119
	Anhang .....	120
	Abkürzungsverzeichnis .....	127
	Danksagung .....	129



## **Vorwort**

Das Entscheidende am Wissen ist,  
dass man es beherzigt und anwendet.

Konfuzius, chinesischer Philosoph  
(551 - 479 v. Chr.)

### **Stand der Technik**

Einkristallines Silizium und dessen chemische Bindungsformen mit weiteren Elementen, welche die Grundlage für die meisten heute produzierten Halbleiter-Bauelemente, wie z.B. Transistoren, Widerstände und Kondensatoren, bilden, sind hinsichtlich ihren elektrischen, chemischen und physikalischen Eigenschaften umfangreich untersucht. Die elektronischen Schaltkreise (engl. chips oder IC's) werden auf einem gemeinsamen Substrat (engl. wafer), die heute eine Scheibengröße von 200mm und 300mm haben, in Fertigungsschritten parallel erzeugt, wobei die zunehmende Integrationsdichte und Miniaturisierung von Halbleiterschaltungen zu komplexen Strukturen im Nanometerbereich führt. Der Halbleiterfertigungsprozess unterscheidet dabei die Erzeugung von Funktionsblöcken (engl. „front-end-of-line“, FEOL) als auch die Verdrahtung und abschließende Oberflächen-Passivierung zur Umgebung (engl. „back-end-of-line“, BEOL).

Neben den bekannten Halbleitereigenschaften von Silizium hat dieses Material auch eine mechanische Funktion als Trägermaterial. Besondere Bedeutung in der Halbleitertechnik haben die chemischen Verbindungen von Silizium mit Sauerstoff (Siliziumdioxid) oder Stickstoff (Siliziumnitrid), welche als Isolatoren und Füllstrukturen zwischen den mehrlagigen Metallbahnen, die heute meist mit Aluminium oder Kupfer realisiert sind, dienen. Oxid und Nitrid sind sehr harte und spröde Werkstoffe, die bei mechanischer Belastung Risse bilden können. Die Bruchmechanik von dünnen Schichten, wie sie in der Halbleitertechnik vorkommen, wurden bisher noch wenig untersucht.

Im Anschluss an die Fertigung der Chips werden diese typischerweise funktionell auf Scheibenebene getestet (engl. probing). Während dieses Vorganges wird geprüft, ob der Chip seine vorher festgelegte Spezifikation einhält. Das beinhaltet die Verifikation von Spannungen, Strömen, Taktvorgabe und Funktionalität innerhalb eines bestimmten Temperaturbereichs. Bei Nichterfüllung der Spezifikation besteht der Chip den Test nicht und wird als „fail“ aussortiert.

Dadurch wird einerseits sichergestellt, dass aus Kostengründen nur „gute“ Chips vereinzelt zum Aufbau in ein Gehäuse weiterverarbeitet werden. Andererseits erhält die Front-End- (FE-) Fertigung durch den Scheibentest die Information bzgl. Ausbeute (engl. yield) des Halbleiterfertigungsprozesses und kann damit eine schnellere Optimierung erzielen, wodurch sich ebenfalls erhebliche Kostenvorteile erzielen lassen. Die wesentlichen Gründe, warum in der Halbleitertechnologie die IC's getestet werden sind:

- **Validierung des Schaltungsentwurfs** (Sicherstellung, dass der Chip alle logischen Funktionen korrekt ausführt)
- **Baustein-Charakterisierung** (Qualifizierung eines neuen Design vor dem Produktionsanlauf)
- **Wafertest** (Aussortierung von schlechten Chips vor der Weiterverarbeitung)
- **Packagetest** (auch „Final-Test“; Überprüfung der Designspezifikation nach dem Assembly)
- **Qualitätssicherungstest** (Stichprobenartiger Test von gehäuteten Chips)
- **Pre/Post Burn-In Test** (Überprüfung von Driften physikalischer Parameter vor/nach künstlichen Alterungsprozessen)
- **Fehleranalyse** (Auffinden von Fehlerursachen zur Erhöhung der Bausteinzuverlässigkeit)

Der Wafertest wird auf Testsystemen mit Hilfe von Automaten (engl. Prober) durchgeführt. Der Prober führt die Hantierung, die Positionierung und das Aufheizen bzw. Abkühlen des Wafers aus. Das elektrische Verbindungsglied zwischen der Testzelle und den Anschluss pads auf dem Chip stellt die Nadelkarte (engl. probe card) dar, die Messpunktabstände von heute bis zu 40µm auflösen und mehrere tausend Einzelnadeln besitzen kann. Um Testzeiten zu minimieren, ist die Indexzeit, welche durch die Verfahrdauer zweier nebeneinander liegender Chips und den Kontaktvorgang mit der Nadelkarte bestimmt wird, ein bestimmender Parameter. Neben der Schnelligkeit kommt es dabei auch auf eine mikrometergenaue Positionierung in allen drei Koordinatenrichtungen an, wobei schwere Massen in kürzester Zeit beschleunigt und abgebremst werden müssen. Dadurch treten Schwingungen und Fehlpositionierungen aufgrund Trägheitseffekten der Massen auf. Heute gibt es zur Kontaktierung verschiedene Nadel-Adapterformen, die jeweils hinsichtlich Parallelisierung, Temperaturbereich, elektrischen Parametern oder Kontaktkraft entsprechende Eigenschaften aufweisen.

### **Problemstellung und Motivation**

Die durch den Kostendruck motivierte, weiter fortschreitende Miniaturisierung in der Halbleitertechnologie führt dazu, dass die von der Schaltungsverdrahtung herausgeführten Kontakt-Pads nicht mehr wie in der Vergangenheit außerhalb des aktiven Bereichs des Chips angeordnet sind, sondern, um zusätzliche Chipfläche einzusparen, beliebig über dem Schaltungsbereich platziert werden. Dabei besteht nun die Gefahr, dass der Schichtaufbau der Metallbahnen und der Isolationslagen aufgrund des Anpressdrucks der Nadel, der für die Sicherstellung eines guten elektrischen Kontaktes notwendig ist, beschädigt wird und zu Zuverlässigkeitsproblemen, Leckströmen und Kurzschlüssen führt.

### **Fragestellung und Zielsetzung**

Die Herausforderung beim Probing besteht also darin, einerseits einen zuverlässigen und stabilen elektrischen Kontakt vieler Einzelnadeln im Mikrometerbereich über einen großen Temperaturbereich sicherzustellen, andererseits die für die Pad-Beschädigung und des BEOL-Schichtaufbaus maßgeblichen Größen zu minimieren und zu kontrollieren. Dabei sind insbesondere die Kenntnis der chemisch-physikalischen Materialparameter, die zu einem guten elektrischen Kontakt beitragen, wichtig, als auch die Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von dünnen Schichten, wie sie typischerweise in der heutigen Halbleitertechnologie verwendet werden. Des Weiteren ist auch ein exaktes Verständnis der Probingprozesse und -technologien von Bedeutung, um die Herausforderungen hinsichtlich Effektivität und Zuverlässigkeit beim Wafertest zu meistern. Zielsetzung dieser Arbeit sind die Prozess- und Funktionsbeschreibung der Systemkomponenten, der Einfluss von Störfaktoren, die analytische und experimentelle Untersuchung sowie die Optimierung der mechanischen und elektrischen Interaktion beim Probing moderner IC's mit Kontakten über aktiver Schaltungskomponenten (engl. „pads over active area“, POAA).

### **Methodisches Vorgehen**

Der industrielle Wafertest ist weitgehend automatisiert und zielt auf hohen Durchsatz. Die dafür zum Einsatz kommenden Maschinen und Messmittel sind für Grundlagenuntersuchungen meist nur bedingt geeignet. Die applikationsspezifischen IC's sind außerdem dafür oft zu komplex und eine Trennung von Designeinflüssen ist beim Probing oft nicht möglich.

## Vorwort

Zur Untersuchung der kritischen Größen, die zum Versagen eines Bauteils beitragen, müssen also zuerst geeignete Teststrukturen ohne Schaltungsfunktionalität, die auf wenige Metall-Lagen reduziert sind, entworfen und gefertigt werden. Die elektrische Kontaktqualität wird mit Hilfe von Trägersubstraten mit leitender Metalloberfläche bestimmt, wobei verschiedene Metalle und Legierungen, die typischerweise in der Halbleitertechnologie vorkommen, untersucht werden. Prozessbedingte Kontaminationen, wie Fluor oder organische Substanzen auf der Pad-Oberfläche werden dabei gezielt mittels spezieller Verfahren aufgebracht. Die bis dahin ermittelten Ergebnisse werden auf produktionstauglichen Proben mit realen Nadelkarten verschiedener Konstruktionsart verifiziert.

Das Kontaktverhalten wird zuerst durch analytische Modelle beschrieben und danach durch computergestützte Simulationen mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) untersucht. Die Simulationsergebnisse dienen als Grundlage, um später mit den Ergebnissen der Messungen verglichen und korreliert zu werden und damit in Zukunft den Messaufwand bei der Qualifikation neuer Technologien und Designs zu reduzieren.

Im Weiteren besteht die Aufgabe dieser Arbeit darin, geeignete Methoden und Werkzeuge zu entwickeln und zu adaptieren. Durch Messungen mit Hilfe eines eigens für diese Untersuchungen entwickelten Gerätes mit Einzelnadeln, die konstruktiv bereits identisch zu realen Probecards sind, werden die wesentlichen Parameter der Systemkomponenten Nadel und Kontaktmaterial hinsichtlich elektrischer und mechanischer Kontaktqualität analysiert und bewertet. Dabei spielen sowohl Materialeigenschaften, Spitzengeometrien sowie prozessrelevante und physikalische Größen eine entscheidende Rolle. Die Erkenntnisse resultieren in der Weiterentwicklung einer bisher nur eingeschränkt verwendeten Probing-Technologie, die durch diese Arbeit nun auch für POAA-Chips industriell eingesetzt werden kann.

Anschließend wird der rein mechanische Kontakt mit einem Indenter auf Einzelpads an verschiedenen Teststrukturen hinsichtlich der Versagenswahrscheinlichkeit ausführlich evaluiert. Eine zusätzliche Komplikation stellt dabei die Tatsache dar, dass ein durch Oxidrisse verursachter elektrischer Ausfall (Leckstrom) nur unter bestimmten Randbedingungen aktiviert wird. Dieser Effekt ist beim normalen Wafertest (Oh-Test) nicht sichtbar, sondern wird erst nach einer gewissen Betriebsdauer des Bausteins durch Fehlfunktion oder Ausfall erkennbar.

# 1 Grundlagen der elektrischen und mechanischen Kontakteigenschaften

Um die Problematik der Probing-Technologie besser verstehen zu können, wird in Kapitel 1 zunächst ausführlich auf die physikalischen Grundlagen der Kontaktphysik der lösbaren und schaltenden Kontakte bei kugelförmiger Punktbelastung eingegangen. Unter einem elektrischen Kontakt ist im eigentlichen Sinn eine stromführende Berührung durch Krafteinwirkung zwischen den Verbindungsparen zu verstehen. Die Aufgabe von Kontakten ist zum einen, einen Stromkreis zu öffnen und zu schließen sowie elektrische Energie und Informationen möglichst verlust- und verzerrungsfrei zu übertragen [Vin01].

## 1.1 Elektrischer Kontaktwiderstand

Ein elektrischer Kontakt [Rie01] dient in der Elektrotechnik und Elektronik dazu, zwischen Bauelementen, zwischen oder innerhalb von Stromkreisen oder innerhalb von Bauteilen eine stromleitende Verbindung herzustellen. Bei Stromfluss entsteht über ein Kontaktpaar ein Spannungsabfall nach dem Ohmschen Gesetz [Lin87] entsprechend dem Durchgangswiderstand  $R_D$ . Der Durchgangswiderstand, der äußerlich messbar ist, setzt sich seinerseits aus dem Kontaktwiderstand  $R_K$  und dem Bahnwiderstand  $R_B$  zusammen.

$$\text{Gl. (1)} \quad \frac{U}{I} = R_D = R_K + R_B$$

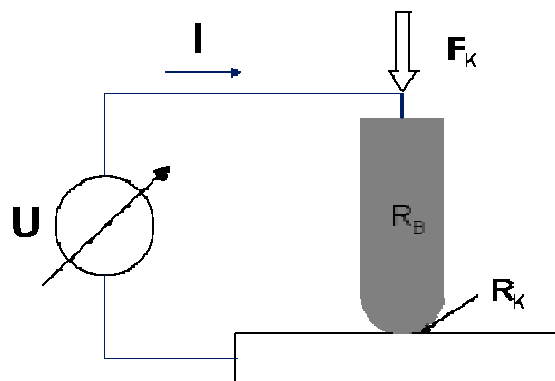


Abb. 1.1: Schaltbild zur Definition des Kontaktwiderstandes

Der bestimmende Faktor eines elektrischen Kontaktes ist der Kontaktwiderstand zwischen den geschlossenen Verbindungsparen. Der Kontaktwiderstand wird durch die gemessene Differenz zwischen dem inneren Widerstandes eines homogenen Leiters und dem eines geschlossen Kontaktpaares definiert. Dieser ist bei einem idealen Kontakt gleich null.

## 1.1 Elektrischer Kontaktwiderstand

Wie in Abb. 1.3 gezeigt wird, ist in der Realität allerdings durch Oxidschichten, Kontamination, Spaltbildung aufgrund Unebenheiten der Oberflächen, Vibrationen, usw. immer ein gewisser Kontaktwiderstand vorhanden.

Der Kontaktwiderstand wird von dem Engewiderstand  $R_E$  und zusätzlich vom Widerstand der Fremdschichten  $R_F$  bestimmt. Es gilt:

$$\text{Gl. (2)} \quad R_K = R_E + R_F$$

In Abb. 1.2 sind die wesentlichen Einflussgrößen des Kontaktwiderstandes und deren Abhängigkeiten schematisch dargestellt. Neben Umgebungsbedingungen, Materialeigenschaften und Designparameter ist hier auch die messtechnisch bisher nur schwierig zu erfassende Kontaktkraft eine maßgebliche Einflussgröße. In Kap.5.1 wird dafür ein neuartiges Messgerät speziell für beim Wafertest typische Kräfte im mN-Bereich vorgestellt.

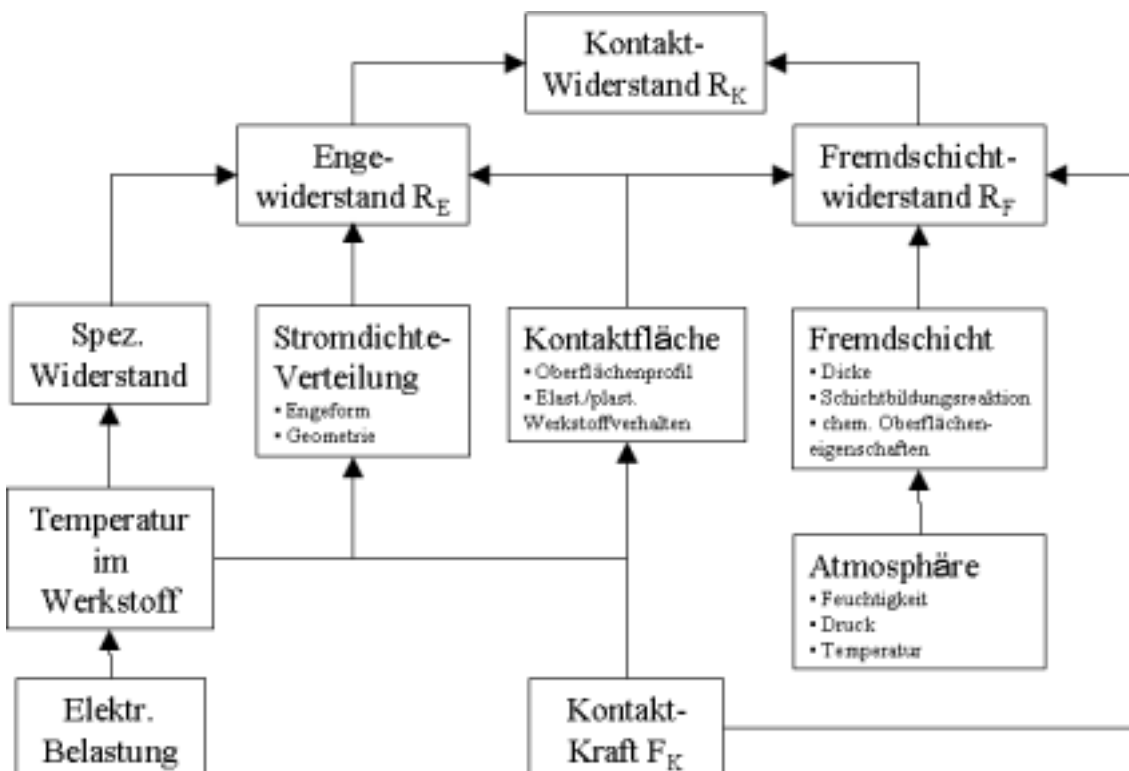


Abb. 1.2: Einflussgrößen des Kontaktwiderstandes

### 1.1.1 Engewiderstand

Mikroskopisch kleine Unebenheiten (Mikrorauigkeit) der Oberfläche führen dazu, dass die wirksame Berührungsfläche auch zwischen parallelen Verbindungen nicht 100-prozentig vollständig, sondern eine Summe von vielen Einzelflächen ist.

Durch eine elastische und plastische Verformung der Oberflächen durch eine Kontaktkraft  $F_k$  werden die Zahl und die Größe der Einzelflächen erhöht. Diese mikroskopisch kleinen Einzelflächen, die in Abb. 1.4 schematisch dargestellt sind, die zum elektrischen Stromfluss beitragen und zusammen die wirksame Kontaktfläche  $A_w$  bilden, nennt man  $\alpha$ -spots [Glo93].

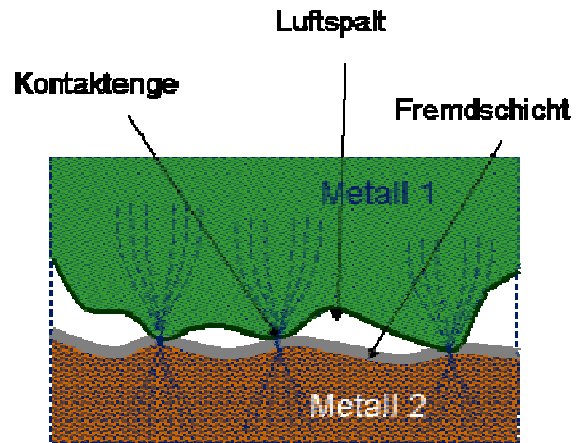


Abb. 1.3: Morphologie der Kontaktfläche mit Fremdschicht

Der Engewiderstand  $R_E$  wird dadurch verursacht, dass die Strombahnen im Bereich der  $\alpha$ -spots zusammengeschnürt werden (Abb. 1.3). Für das Ellipsoidenmodell nach [Hol63] und [Gre66] wurde gezeigt, dass für  $R_E$  eines einzelnen  $\alpha$ -spots  $i$ , dessen Radius  $a$  und dem spezifische Widerstand  $\rho_M$  des metallischen Kontaktwerkstoffes folgender Zusammenhang gilt:

$$\text{Gl. (3)} \quad R_{E,i} = \frac{\rho_M}{2 \cdot a_i}$$

Für den tatsächlichen Engewiderstand  $R_E$  gilt bei der Gesamtzahl  $n$  der  $\alpha$ -spots (vgl. Abb. 1.4):

$$\text{Gl. (4)} \quad R_E = \frac{\rho_M}{2 \cdot \sum_i^n a_i}$$

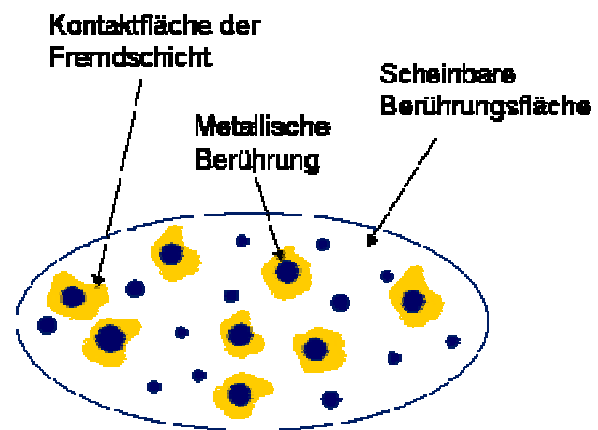


Abb. 1.4: Wirksame Kontaktfläche durch  $\alpha$ -Spots

## 1.1 Elektrischer Kontaktwiderstand

Der spezifische elektrische Widerstand  $\rho$  kann durch einen von der Temperatur abhängigen Anteil des reinen Metalls und einen von der Temperatur unabhängigen Anteil, der von der Störstellen- bzw. Fremdatomkonzentration abhängt, beschrieben werden. Bei allen Leitern ändert sich der spezifische Widerstand mit der Temperatur in einem jeweils begrenzten Temperaturbereich näherungsweise linear.

$$\text{Gl. (5)} \quad \rho(T) = \rho(T_0) \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T), \quad \Delta T = (T - T_0)$$

wobei  $\alpha$  der Temperaturkoeffizient,  $T$  die Temperatur und  $T_0$  eine beliebige Temperatur, bei der der spezifische elektrische Widerstand  $\rho(T_0)$  bekannt ist. Unter realen Bedingungen kann der Temperatureinfluss ( $\alpha \Delta T \ll 1$ ) aber meist vernachlässigt werden.

Mit zunehmender Kontaktkraft  $F_K$  wird die Unterlage mit der Kontakthärte  $H_K$  durch Überschreiten der Fließgrenze solange plastisch verformt, bis ein Gleichgewicht entsteht. Die wirksame Berührungsfläche  $A$  kann durch die Formel

$$\text{Gl. (6)} \quad F_K = A \cdot H_K$$

beschrieben werden. Mit der Gleichung nach einer plastisch verformten Kontaktfläche einer Halbkugel mit dem Radius  $r_p$  auf einer glatten Oberfläche folgt:

$$\text{Gl. (7)} \quad F_K = r_p^2 \cdot \pi \cdot H_K$$

$$\text{Gl. (8)} \quad r_p = \sqrt{\frac{F_K}{\pi \cdot H_K}}$$

Mit Gl. (3) und der Annahme von metallisch reinen Oberflächen ( $r_p = n \cdot a$ ) folgt für den Engewiderstand  $R_E$

$$\text{Gl. (9)} \quad R_E = \frac{\rho_M}{2} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot H_K}{F_K}}$$



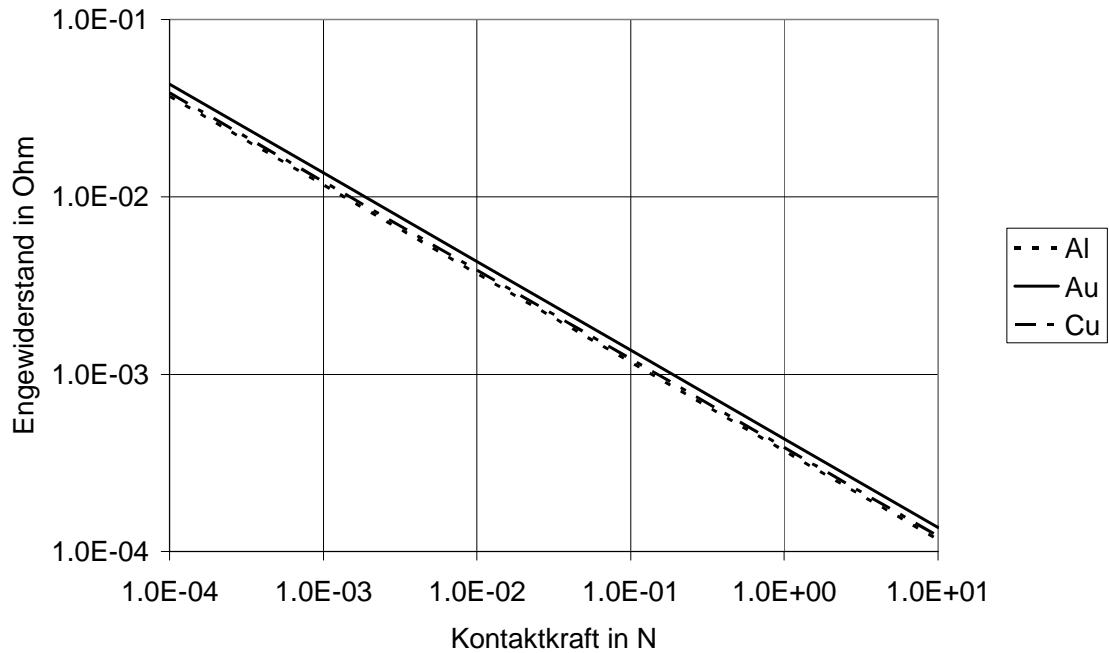


Abb. 1.5: Engewiderstand verschiedener Metalle in Abhängigkeit der Kontaktkraft

Der Engewiderstand wird also durch folgende Einflussgrößen bestimmt:

- elektrische Leitfähigkeit der Kontaktmaterialien
- thermische Leitfähigkeit der Materialien
- Geometrie und Oberflächenstruktur der Kontaktstelle
- Kontaktkraft und deren Wirkrichtung

### 1.1.2 Fremdschichtwiderstand

Der Fremdschichtwiderstand  $R_F$  berücksichtigt Widerstandsanteile, die durch hauchdünne Oberflächenschichten, z. B. Oxid- oder Korrosionshäute, verursacht werden [Kog04] und bestimmt im Wesentlichen die Höhe des Kontaktwiderstands. Die Schwankungen können dabei erheblich sein und sind vom Werkstoff, Umwelteinflüssen und den Schaltbedingungen abhängig. Reine metallische Oberflächen werden schon nach wenigen Sekunden durch molekulare Fremdschichten mit Schichtdicken  $< 5\text{nm}$  meist durch Oxidationsprozesse bedeckt [Bon77].

## 1.1 Elektrischer Kontaktwiderstand

Diese chemischen Reaktionen kommen meist nach Verbrauch der absorbierten Moleküle zum Stillstand („beschränktes“ Fremdschichtwachstum), während es bei bestimmten Kontaktwerkstoffen zu einer zeitlich unbegrenzten Adsorption („unbeschränktes“ Fremdschichtwachstum), kommt.

Durch Temperaturerhöhung tritt zum Teil ein erhöhtes Fremdschichtwachstum auf. Edelmetalle, wie Gold, Silber oder Platin, bilden die geringsten Fremdschichtdicken. Im Fall von unedlem Aluminium bildet sich nach kurzem Kontakt mit der umgebenden Atmosphäre eine transparente nichtleitende Oxidschicht aus amorphen  $\text{Al}_2\text{O}_3$  mit einer Dicke von 5 – 10nm. Mit zunehmender Oxidschichtdicke wird die Reaktion zwischen Sauerstoff und Aluminium in ihrem Ablauf gehemmt. Im Vergleich zu trockener Atmosphäre werden in Abhängigkeit von Feuchtigkeit und Temperatur Oxidschichten (Aluminiumhydroxid,  $\text{Al}(\text{OH}_3)$ ) gebildet, deren Dicke um bis das 10-fache erhöht ist.

Durch eine tangentielle Bewegung wird die Fremdschicht durch eine Art Selbstreinigungseffekt aufgrund Reibung zwischen den Kontaktpaaren meist zuverlässig entfernt [Bro04], der resultierende Widerstand ist näherungsweise 2- bis 3-mal höher als der Engewiderstand aus Gl. (9). Wenn keine Tangentialbewegung beim Schaltvorgang vorhanden ist, wird die Fremdschicht erst bei der plastischen Verformung des Kontaktmaterials aufgebrochen und Metall in die Risse gedrückt. Diese metallischen  $\alpha$ -Spots variieren in Größe und Anzahl und decken nur einen Bruchteil der gesamten Kontaktfläche ab, weshalb der resultierende Kontaktwiderstand nur schwer vorherzusagen ist.

Bei einem spezifischen Widerstand  $\rho_F$  ( $\rho_F \gg \rho_M$ ) der Fremdschicht mit einer Dicke  $d$  und einer wahren Berührungsfläche  $A$  gilt folgende Beziehung:

$$\text{Gl. (10)} \quad R_F = \rho_F \cdot \frac{d}{A}$$

Zusammen mit Gl. (9) und Gl. (10) gilt damit für den Kontaktwiderstand:

$$\text{Gl. (11)} \quad R_K = \frac{\rho_M}{2} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot H_K}{F_K}} + \rho_F \cdot d \cdot \frac{H_K}{F_K}$$

### 1.1.3 Fritting

Dünne Schichten  $< 2\text{nm}$  werden vom Laststrom getunnelt ( $\implies$  Tunnelwiderstand), dickere Schichten haben einen sehr hohen Widerstand und müssen mechanisch oder elektrisch zerstört werden, um einen guten Kontakt zu gewährleisten. Legt man an einen Fremdschichtbehafteten Kontakt eine kleine Spannung an, so erhält man zunächst sehr hohe Widerstandswerte. Steigert man diese Spannung langsam, so nimmt der Kontaktwiderstand langsam ab. Bei einer bestimmten Spannung, die von Art und Dicke der Fremdschicht abhängig ist, bricht der Widerstand jedoch plötzlich auf einen konstanten Restwert zusammen [Deg06]. Diesen Vorgang wird als Fritting bezeichnet.

A-Fritting entsteht beim Anlegen einer Frittspannung  $U_F$  zwischen den Kontaktpartnern, die durch eine Fremdschicht getrennt sind. Beim Erreichen einer kritischen Feldstärke setzt Feldemission und Tunneln in der isolierenden Schicht ein. Am Ort mit der höchsten elektrischen Feldstärke wird ein leitender Pfad erzeugt. Es entsteht so ein metallisch leitender  $\alpha$ -spot mit reversibler R-U-Charakteristik (Abb. 1.6). Sind bei einem Kontakt schon metallische Berührflächen vorhanden, so können diese Mikroflächen infolge der Temperaturerhöhung in der Stromenge erweitert werden. Dadurch sinkt bei steigendem Strom der Kontaktwiderstand, so dass die Frittspannung erhalten bleibt. Diesen Vorgang bezeichnet man als B-Fritting. Bei wieder fallender Stromstärke bleibt der Wert des Kontaktwiderstandes bestehen.

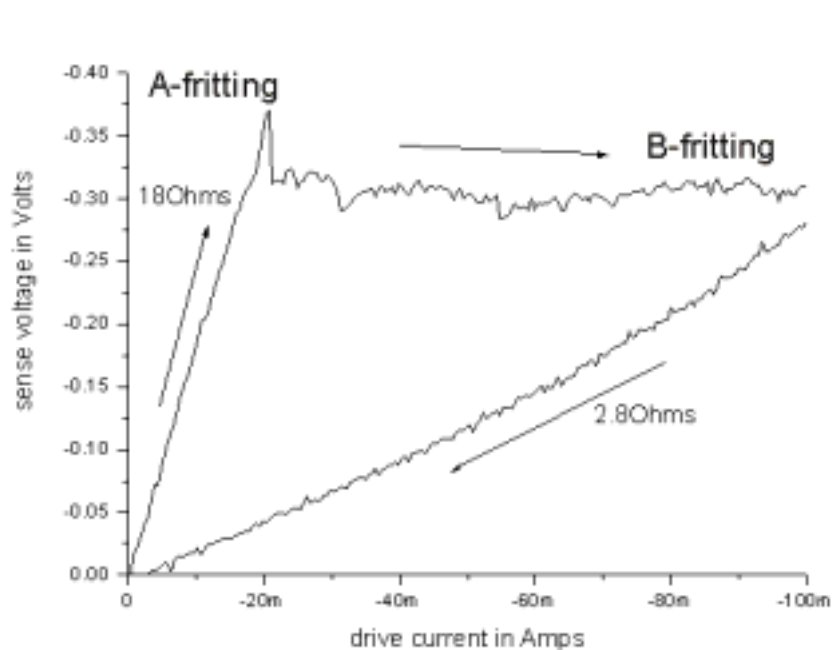


Abb. 1.6: A- und B-Fritting beim Kontaktieren auf Aluminium

### 1.1.4 Messung kleiner Widerstände durch Vierpunktmessung

Die Messung von Widerständen im Bereich  $10^{-5}$  bis  $1 \Omega$  erfordert besondere Methoden. Ein geeignetes Messverfahren stellt hier z. B. die *Thomsonbrücke* dar. Hierbei werden Strom und Spannung getrennt über Strom- und Spannungs- (Potential-) Klemmen zugeführt, um den Einfluss der Zuleitungswiderstände auf die Messung zu eliminieren (Vierpunkt-Messung). Bezeichnungen dieser Anschlussart sind auch Kelvin-Anschluss oder Kelvin-Kontaktierung.

Die Zuleitungswiderstände spielen bei dieser Methode keine Rolle, da die Spannungsabfälle an diesen Widerständen im Versorgungskreis ( $I_0$ ,  $I_x$ ,  $R_{k1}$ ,  $R_x$  und  $R_{k2}$ ) bei der Messung nicht berücksichtigt werden.

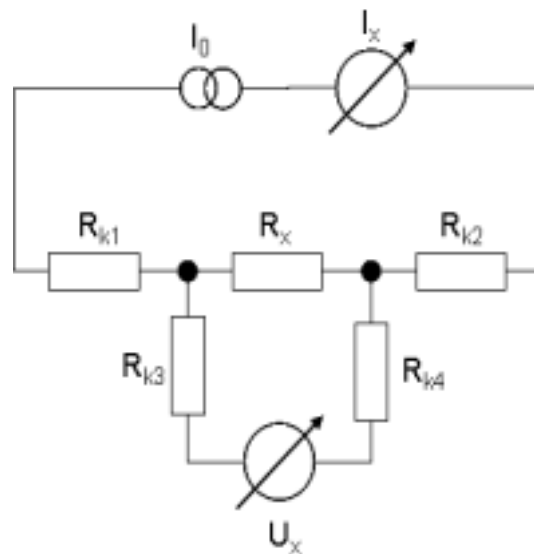


Abb. 1.7: Ersatzschaltbild einer Vierpunkt-Schaltung

Im Spannungsmesskreis ( $R_{k3}$ ,  $U_x$  und  $R_{k4}$ ) wiederum spielen die Widerstände der Kabel keine Rolle, da der Innenwiderstand des Spannungsmessgeräts hoch ist und somit nahezu kein Strom in diesem Kreis fließt, also auch kein Spannungsabfall an diesen Widerständen auftritt. Die Messspannung  $U_x$  ist direkt proportional dem zu messenden Widerstand  $R_x$ . Genauigkeiten bis 0,01% sind erreichbar. Es gilt:

$$\text{Gl. (12)} \quad R_x = R_B + R_E + R_F = \frac{U_x}{I_x}$$

Je näher die Messpunkte zur Kontaktstelle hin verlegt werden, umso kleiner ist der Widerstandsanteil  $R_B$  der Kontaktkörper.

Die Vierspitzenmessung ist ein Verfahren, um den Flächenwiderstand  $R_F$ , also den elektrischen Widerstand einer Oberfläche oder dünnen Schicht der Dicke  $d$  zu ermitteln [Sho06]. Vier Messspitzen werden in einer Reihe in gleichem Abstand  $s$  auf die Oberfläche gebracht (Abb. 1.8), wobei über die beiden äußeren ein bekannter Strom  $I$  eingepreßt wird und mit den beiden inneren der Potentialunterschied  $U$ , d.h. die elektrische Spannung zwischen diesen Spitzen gemessen wird. Da das Verfahren auf dem Prinzip der Vierpunktmessung beruht, ist es weitgehend unabhängig vom Übergangswiderstand zwischen den Messspitzen und der Oberfläche.

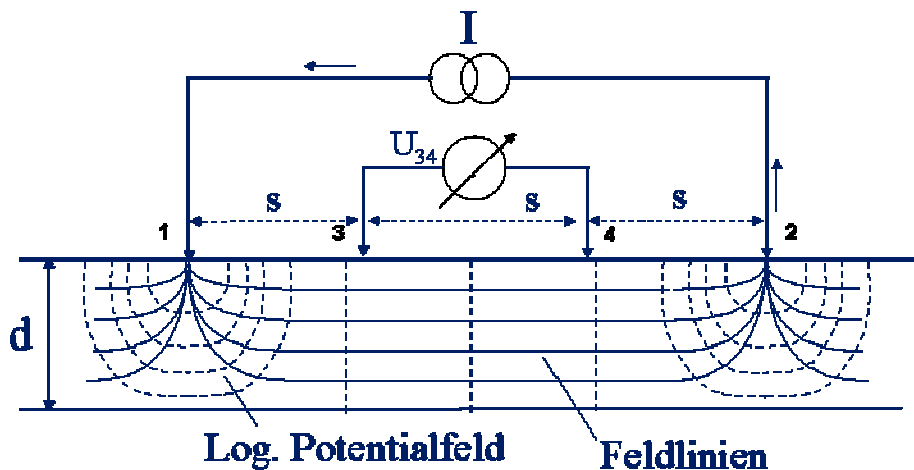


Abb. 1.8: Vierspitzenmessung zur Bestimmung des spez. Schichtwiderstandes

Für die elektrische Feldstärke  $E_r$  gilt:

$$\text{Gl. (13)} \quad E_r = \rho \cdot \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot d}$$

Für die Spannung  $U$  zwischen Punkt 3 und 4 gilt der Zusammenhang:

$$\text{Gl. (14)} \quad U_{34} = \int_3^4 E_r dr = \frac{\rho_F \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot d} \cdot \int_s^{2s} \frac{1}{r} dr$$

Den spezifischen Flächenwiderstand  $\rho_F$  erhält man aus der gemessenen Spannung  $U_{34}$  und dem Strom  $I$  mittels der Beziehung

$$\text{Gl. (15)} \quad \rho_F = \frac{U_{34}}{I} \cdot \frac{\pi \cdot d}{\ln(2)}$$

Der wesentliche Vorteil dieser sogenannten „Van-der-Pauw“-Methode [Pau58] ist die Möglichkeit weitgehend unabhängig von der Geometrie der Probe sowie ohne Kenntnis der Abstände der Elektroden die Leitfähigkeit tatsächlich über eine definierte Fläche bestimmen zu können.

## 1.2 Grundlagen der Festkörpermechanik

Die Festkörpermechanik verfolgt das Ziel, das mechanische Verhalten von festen Körpern zu untersuchen und Kräfteverteilungen, Verschiebungen und Bewegungen zu analysieren. Dabei werden in der Realität diskontinuierliche Materialien (Gitterstrukturen von Kristallen) idealisiert und als Kontinuum betrachtet (Kontinuumsmechanik). Eine grundlegende Einteilung der Kontinuumsmechanik basiert auf der Unterscheidung zwischen elastischer (reversibler) und plastischer (irreversibler) Deformation oder Verformung. Bei Überschreitung des plastischen Fließvermögens kommt es zum Bruch des Festkörpers.

### 1.2.1 Der Spannungs- und Verformungszustand

Wirken auf einen Körper äußere Kräfte, so werden hierdurch verteilte innere Kräfte – Spannungen – hervorgerufen [Mag84]. Dafür wird ein Körper im deformierten Zustand gedanklich aufgeschnitten (Abb. 1.9). In einem kleinen Flächenelement  $\Delta A$  wird über die beiden Teilkörper die Kraft  $\Delta F$  übertragen.

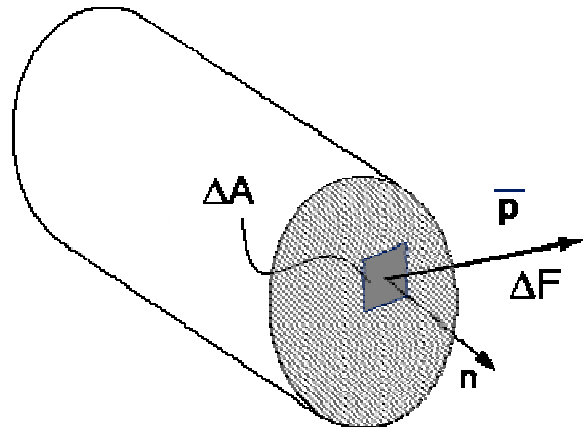


Abb. 1.9: Definition des mechanischen Spannungsvektors

Nach *Cauchy* (1789 – 1857) gilt für den Grenzwert der mittleren Flächenbelastung  $\vec{p}$ :

$$\text{Gl. (16)} \quad \vec{p} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} = \frac{dF}{dA}$$

Der Spannungsvektor  $\vec{p}$ , der in der Regel nicht senkrecht auf der Schnittfläche steht, wird in die Komponenten Normalspannung  $\sigma$  senkrecht zur Schnittfläche und der Schubspannung  $\tau$  tangential zum Flächenelement  $\Delta A$  zerlegt. Für den in Abb. 1.10 a skizzierten Fall gilt für den Spannungsvektor  $\vec{p}_x = [\sigma_x, \tau_{xy}, \tau_{xz}]$ . Der Spannungszustand in einem Punkt ist wegen der Abhängigkeit von der Schnittfläche (beschrieben durch deren Normalenvektor  $\vec{n}$ ) durch den Spannungsvektor nicht eindeutig beschrieben.

Zur eindeutigen Beschreibung wird wie in Abb. 1.10 b ein kartesisches Koordinatensystem zugrunde gelegt und ein infinitesimales Volumenelement mit den Kantenlängen  $dx$ ,  $dy$  und  $dz$  freigeschnitten. Der erste Index kennzeichnet die Lage der Schnittebene, der zweite die Richtung der Spannungskomponente. Spannungen haben die Dimension Kraft/Fläche und werden zweckmäßigerweise in  $\text{N/mm}^2$  ( $= 1 \text{ MPa}$ ) gemessen.

Im allgemeinen räumlichen Spannungszustand gilt unter Bezug auf die Koordinaten  $x$ ,  $y$ ,  $z$  für die Spannungsvektoren  $\mathbf{p}_i$ :

$$\mathbf{p}_x = [\sigma_x, \tau_{xy}, \tau_{xz}]$$

$$\mathbf{p}_y = [\tau_{yx}, \sigma_y, \tau_{yz}]$$

$$\mathbf{p}_z = [\tau_{zx}, \tau_{zy}, \sigma_z]$$

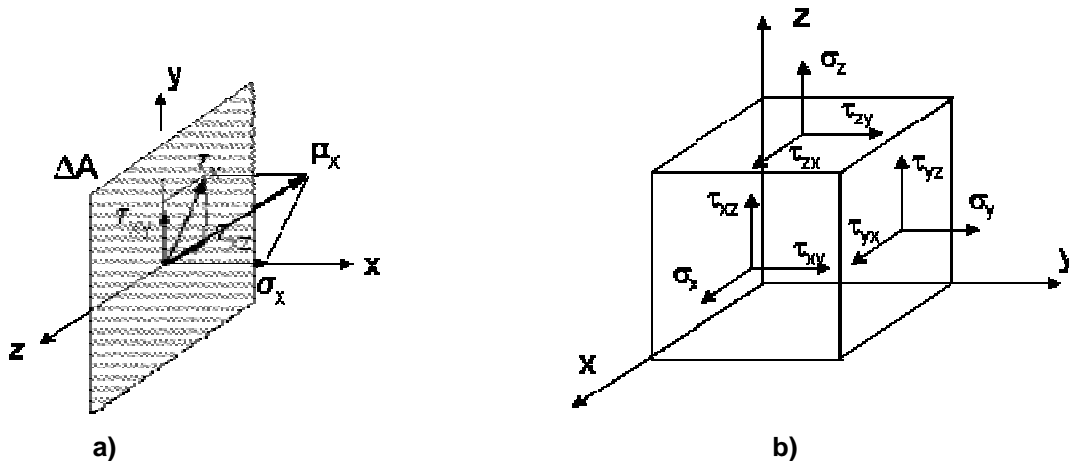


Abb. 1.10: Komponenten des Spannungsvektors  $\mathbf{p}_x$

Nach dem von *Cauchy* aufgestellten Symmetriegesetz (Schubspannungen sind paarweise gleich) gilt in der klassischen Elastomechanik für den Spannungstensor  $\sigma_{ij}$ :

$$\text{Gl. (17) } \bar{\sigma}_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix}$$

Die Verformung eines Körpers kann durch die Änderung von Längenabmessungen und durch die Änderung von Winkeln  $\gamma$  (Gleitung) beschrieben werden. Als Dehnung wird das Verhältnis  $\epsilon$  von Längenänderung  $\Delta L$  und ursprünglicher Länge  $L$  bezeichnet, wobei hier nur der Sonderfall kleiner Verformungen ( $\epsilon = \Delta L/L \ll 1$ ,  $\gamma \ll 1$ ) betrachtet wird.

## 1.2 Grundlagen der Festkörpermechanik

Man kann auch hier unter der Annahme der Symmetrie einen Verzerrungstensor  $\underline{\epsilon}_{ij}$  bilden:

$$\text{Gl. (18) } \underline{\epsilon}_{ij} = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & \frac{\gamma_{xy}}{2} & \frac{\gamma_{xz}}{2} \\ \frac{\gamma_{yx}}{2} & \epsilon_{yy} & \frac{\gamma_{yz}}{2} \\ \frac{\gamma_{zx}}{2} & \frac{\gamma_{zy}}{2} & \epsilon_{zz} \end{bmatrix}$$

Für die Spannungs- und Verzerrungstensoren gibt es jeweils ein Hauptachsensystem, bei dem die Normalspannungen bzw. die Dehnungen Extremwerte annehmen und die Schubspannungen bzw. die Gleitungen verschwinden. Der Spannungstensor  $\underline{\sigma}_{ij}$  nimmt dabei die Diagonalform an:

$$\text{Gl. (19) } \underline{\sigma}_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix}$$

Die Spannungen  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  bilden Maximum, Minimum und Sattelwert und heißen Hauptspannungen.

### 1.2.2 Mechanische Versagenshypothesen

Bei mehrachsigen überlagerten Spannungszuständen ist es schwierig, die vom Bauteil zu erwartende Festigkeit genügend sicher zu beurteilen. Normalerweise kennt man von einem Werkstoff nur die bei einem einachsigen Zugversuch aufgenommene Spannungs-Dehnungskurve mit den Größen Fließgrenze  $\sigma_F$  und Zugfestigkeit  $\sigma_B$ . Um nun einen zwei- oder dreiachsigen Spannungszustand mit diesen Werkstoffkennwerten vergleichen zu können, wurden die Vergleichsspannungen eingeführt. Die Beanspruchungskombination von Normal und Schubspannungen muss also so zusammengefasst werden, daß eine Vergleichsgröße entsteht, die dem Ergebnis aus dem einachsigen Versuch gegenübergestellt werden kann. Für unterschiedliche Werkstoffe und Belastungsfälle haben sich verschiedene Festigkeitshypothesen bewährt. Es werden nur 2 von mehreren Hypothesen für den 2-achsigen Spannungszustand betrachtet.



## 1.2.2.1 Normalspannungshypothese

Sie geht davon aus, daß für das Versagen des Materials die größte Normalspannung maßgeblich ist. Bruch tritt dann ein, wenn die größte vorhandene Normalspannung einen bestimmten Wert erreicht hat.

Es gilt:

$$\text{Gl. (20)} \quad \sigma_v^{N.S} = \sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

Diese Hypothese, die auf Galilei (1564-1642) zurückgeht, liefert besonders für spröde Materialien zutreffende Ergebnisse.

## 1.2.2.2 Gestaltänderungsenergie-Hypothese

Diese Hypothese geht davon aus, daß die Energie, die zur Änderung der Gestalt eines Körpers aufgewendet werden muss, für die Zerstörung seines Gefüges maßgebend ist. Diese Vergleichsspannung, die meist als *von-Mises* Spannung bezeichnet wird, ist besonders für zähe Werkstoffe geeignet.

Hat man bereits die Hauptspannungen vorliegen wird sie berechnet nach:

$$\text{Gl. (21)} \quad \sigma_v^{v.M} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$$

### 1.2.3 Stoffgesetze

Spannungen und Dehnungen sind über das Stoffgesetz miteinander verknüpft. Die physikalische Verknüpfung zwischen Spannungen und Dehnungen nennt man Stoffgesetz. Dieses Stoffgesetz ist eine Materialeigenschaft, die üblicherweise durch Versuche mit Zug- bzw. Druckstäben ermittelt werden muss. Hiermit kann man für zahlreiche Werkstoffe die Abhängigkeit von Spannungen und Dehnungen  $\sigma(\epsilon)$  bestimmen.

Beim Zugversuch nach DIN EN 10 002 [Bar88] wird ein Probekörper gleichmäßig und stoßfrei gedehnt, bis er zerreißt. Dabei kann das Verhalten des Werkstoffs bei stetig zunehmender Zugbeanspruchung, die gleichmäßig über den Probenquerschnitt der belasteten Probe verteilt ist, beobachtet werden. Beim Zugversuch wird die Zugprobe an den Probenköpfen fest eingespannt und mit einer konstanten Querhauptgeschwindigkeit bis zum Bruch gedehnt. Dabei wird die Kraft  $F$  als Funktion der Probenverlängerung  $\Delta L$  aufgezeichnet. Bezieht man  $F$  auf den Ausgangsquerschnitt  $S_0$  und  $\Delta L$  auf die Ausgangslänge  $L_0$ , so erhält man die technische Spannung  $\sigma$  und die technische Dehnung  $\epsilon$ :

$$\text{Gl. (22)} \quad \sigma = \frac{F}{S_0}$$

$$\text{Gl. (23)} \quad \epsilon = \frac{(L - L_0)}{L_0}$$

Solange man eine gewisse Grenzlast nicht überschreitet, nimmt ein Festkörper nach Wegnahme der Last wieder seine ursprüngliche Form ein. Die Verformung ist in einem solchen Fall also reversibel. Man nennt diese Art der Verformung elastisch. Für die meisten Materialien findet man weiterhin, dass im elastischen Bereich ein linearer Zusammenhang zwischen der angelegten Last und der Verformung besteht. Es gilt das Hooksche Gesetz: "Elastische Spannungen und Verformungen sind einander proportional" und man kann ein Elastizitätsmodul oder kurz E-Modul  $E$  definieren:

$$\text{Gl. (24)} \quad E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

Ebenso kann man die Abhängigkeit von Schubspannung und Gleitung  $\tau(\gamma)$  experimentell bestimmen. Hier gilt mit dem Schubmodul  $G$  der Zusammenhang:

$$\text{Gl. (25)} \quad G = \frac{\tau}{\gamma}$$

Diese Proportionalität gilt für kleine Winkel  $\gamma$ . Zu beachten ist hierbei, dass der Schubmodul  $G$  nicht den gleichen Betrag hat wie der Elastizitätsmodul  $E$  desselben Werkstoffs. Bei der Verlängerung eines Zug-Stabes (siehe unten) nimmt dessen Querschnittsfläche  $A$  ab. Dieses Verhalten nennt man Querkontraktion. Das Verhältnis von Quer- zu Längsdehnungen heißt Querkontraktionszahl oder Poissonzahl  $\mu$ . Sie ist eine experimentell zu bestimmende Materialkonstante. Es besteht der Zusammenhang:

$$\text{Gl. (26)} \quad E = 2 \cdot \frac{1 + \mu}{G}$$

Das Spannungs-Dehnungs-Diagramm für metallische (duktile) Werkstoffe (Abb. 1.11) weist typische Punkte auf: Den Bereich zwischen 0 und  $R_p$  bezeichnet man als Hooksche Gerade. In diesem Bereich ist die Spannung proportional zur Dehnung. Wird ein Werkstoff in diesem Bereich belastet, treten keine bleibenden Verformungen auf.

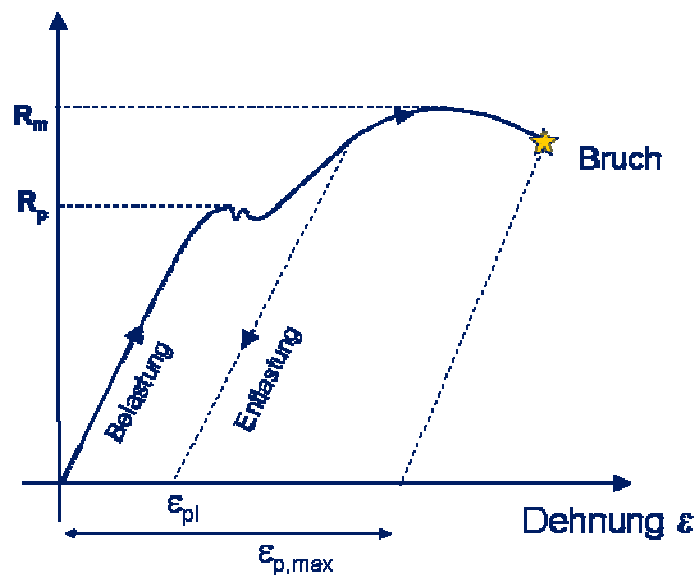


Abb. 1.11: Spannungs-Dehnungs-Diagramm im Zugversuch für duktile Werkstoffe

Wird der Werkstoff größeren Spannungen ausgesetzt, so kommt es zu plastischen Verformungen und schließlich zum Bruch. Bei Erreichen der Fließspannung  $\sigma_F$  (Streckgrenze  $R_p$ ) nimmt die Dehnung zu, ohne dass sich die Spannung nennenswert erhöht.

Bei Belastung oberhalb der Fließspannung fallen Belastungs- und Entlastungslinie nicht zusammen, liegen aber parallel. Nach vollständiger Entlastung bleibt eine plastische Dehnung  $\epsilon_{pl}$ . Man spricht dann von plastischem Werkstoffverhalten. Anschließend steigt die Kurve im Verfestigungsbereich wieder an. Die Zugfestigkeit  $R_m$  ist die Spannung, die sich aus der Höchstkraft  $F_m$  und dem Anfangsquerschnitt  $S_0$  ergibt. Die Bruchdehnung  $A$  (Angabe in Prozent) ist die auf die Anfangslänge  $L_0$  bezogene Längenänderung  $\Delta L$  nach dem Bruch.

### 1.2.4 Härteprüfverfahren

Die Härte eines Werkstoffs ist eine Oberflächeneigenschaft und hat daher nur bedingt etwas mit der Festigkeit des Werkstoffs zu tun, auch wenn diese die Prüfverfahren zur Härtemessung, die auf der Eindringtiefe verschiedener Prüfkörper beruhen, beeinflusst. Der Einfluss der Festigkeit kann durch die Messung auf dünnen Filmen zwar reduziert, aber nicht völlig vermieden werden.

In der Werkstoffkunde, speziell bei den Metallen, werden vor allem Prüfverfahren eingesetzt, welche die Eindringhärte messen. Dabei werden genormte Prüfkörper unter festgelegten Bedingungen in das Werkstück gedrückt. Im Anschluss wird die Oberfläche oder Tiefe des bleibenden Eindruckes gemessen. Prinzipiell unterscheidet man statische und dynamische Härteprüfverfahren. Die dynamischen Prüfverfahren bringen die Belastung des zu prüfenden Teiles schlagartig auf; bei den statischen Verfahren ist die Belastung gleich bleibend oder allmählich zunehmend.

Bei den statischen Verfahren wird die Prüfkraft stoßfrei aufgebracht und wirkt auf die Probe eine vorbestimmte Zeit ruhend ein. Nach dem Entlasten wird der bleibende Eindruck ausgemessen. Die Ermittlung der Härtewerte beruht dabei auf 2 Messprinzipien:

- Es wird die Fläche gemessen und der Quotient aus Prüfkraft und Eindruckfläche errechnet
- Es wird bei vorgegebener Prüfkraft die Eindringtiefe gemessen und unmittelbar in entsprechende Härtewerte umgewandelt

Die verschiedenen Härteprüfverfahren unterscheiden sich in der Form der Eindringkörper (Kugel, Pyramide, Kegel, u. a.), im Werkstoff der Eindringkörper (gehärteter Stahl, Hartmetall, Diamant), in der Größe der aufgebrachten Kraft (Makrohärte, Kleinlasthärte, Mikrohart) sowie in der Art der Ermittlung des Härte-Kennwertes. Deshalb muss die Angabe eines Härtewertes (ohne Maßeinheit) stets mit der genauen Bezeichnung des angewendeten Verfahrens verbunden werden, also etwa HV, HB oder HRc. Die bekanntesten Härte-Definitionen sind jene nach den Normen EN ISO 6506 (Brinell), EN ISO 6507 (Vickers) oder und EN ISO 6508 (Rockwell).

### 1.2.5 Härteprüfung dünner Schichten durch Nanoindentation

Neben den klassischen Härteprüfverfahren, auf die im Detail in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen wird, gibt es die instrumentierte Eindringprüfung (Universalhärteprüfung), bei der die Eindringung als Funktion der Druckkraft gemessen wird [Din14]. Ein Eindringkörper aus Diamant in Form einer geraden Pyramide mit quadratischer (*Vickers*) oder 3-seitiger (*Berkovich*) Grundfläche wird in die Oberfläche einer Probe eingedrückt. Die Universalhärte ist der Quotient aus der Prüfkraft und der aus der Eindringtiefe berechneten Fläche unter wirkender Prüfkraft, dabei wird sowohl die plastische als auch die elastische Deformation berücksichtigt. Ein Vorteil dieses Verfahrens gegenüber denen mit optischer Auswertung des Eindrucks ist die direkte Messung der Eindringtiefe, die vollautomatisch ausgeführt werden kann. Damit entfällt im Vergleich zur visuellen Auswertung der subjektive Einfluss auf die Auswertung. Da über den gesamten Kraft bzw. Tiefenbereich die Wertepaare Kraft/Eindringtiefe bestimmt werden, können neben dem Härtewert weitere Informationen aus der Kraft-Eindringtiefe-Kurve gewonnen werden. Plastischer und elastischer Anteil der Eindringarbeit sowie der elastische Eindringmodul (kann mit dem Elastizitätsmodul des Probenwerkstoffs verglichen werden). Da in Abhängigkeit von den eingesetzten Prüfmaschinen die aufgebrachte Prüfkraft und damit auch die Eindringtiefe sehr klein sein können, ist das Verfahren auch zur Prüfung von dünnen metallischen und nichtmetallischen Schichten geeignet [Oli92].

Während des Eindringens des Prüfkörpers (Indenter) werden kontinuierlich die Prüfkraft  $F$  und die dazugehörige Eindringtiefe  $h$  aufgezeichnet. Es wird ein Kraft-Eindringtiefe-Verlauf ermittelt (Abb. 1.12). Weiterhin kann die Entlastung aufgezeichnet werden.

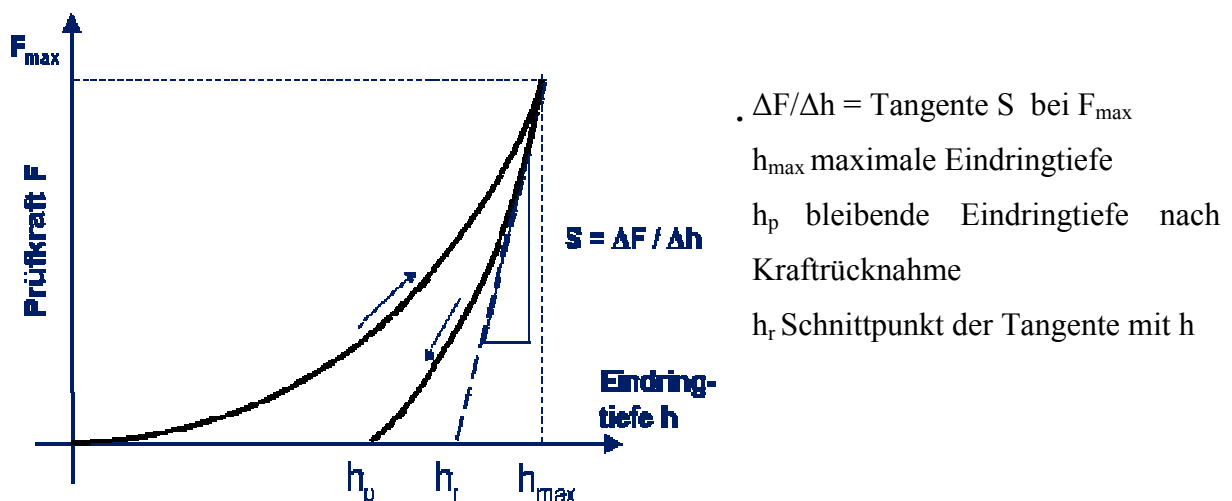


Abb. 1.12: Last-Eindringtiefe Kurve beim Indentieren

## 1.2 Grundlagen der Festkörpermechanik

Der primäre Kennwert ist die Universalhärte  $HU$ , die nach DIN ISO 14577 als der Quotient aus Kraft  $F$  und Oberfläche  $A_s$  des Eindrucks definiert ist, wobei letztere rechnerisch aus der Eindringtiefe bestimmt wird. Es gilt die Gleichung:

$$\text{Gl. (27)} \quad HU = \frac{F}{A_s(h)}$$

$A_s(h)$  ist die Oberfläche des Eindringkörpers bis zum Abstand  $h$  von der Spitze und  $a$  die Kantenlänge des Indenters. Man beachte, dass die gemessene Eindringtiefe  $h$  auch den elastischen Anteil enthält. Die Oberfläche  $A_s(h)$  ist daher größer als die reale Kontaktfläche  $A_s(h_c)$ .

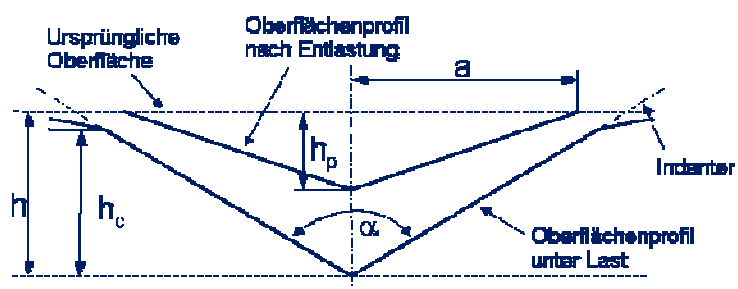


Abb. 1.13: Schematische Darstellung der Vickers Eindringprüfung

Die Umrechnung der Eindringtiefe zur Kontaktoberfläche muss für jede Eindringkörperform bestimmt werden. Die Kontaktfläche wird für die Vickers- und Berkovich-Pyramide durch das Produkt aus dem Quadrat der Eindringtiefe und der Konstanten 26,43 errechnet.

Damit gilt für einen Eindruckkörper nach *Vickers*:

$$\text{Gl. (28)} \quad HU = \frac{F}{26.43 \cdot h^2}$$

Unter Verwendung des Anfangsentlastungsanstieges  $S$  kann ein Werkstoffparameter berechnet werden, der das elastische Verhalten der Oberfläche beim Eindringvorgang beschreibt. Er steht in enger Korrelation zum Elastizitätsmodul, ist aber nicht mit diesem identisch und wird daher als Eindringmodul  $E_{IT}$  bezeichnet.

Nach [Nix02] gilt für  $E_{IT}$ :

$$\text{Gl. (29)} \quad E_{IT} = \frac{(1 - \mu_s^2)}{\frac{1}{E_r} - \frac{(1 - \mu_i^2)}{E_i}}$$

wobei  $\mu_i$  die Poissonzahl des Indenters (= 0.07 für Diamant),  $\mu_s$  die Poissonzahl der Probe und  $E_i$  das E-Modul des Indenters (1141 GPa für Diamant) angibt. Das reduzierte E-Modul  $E_r$  wird aus den Indentierungsdaten berechnet.

Ist die Schichtdicke für eine Härtemessung am Querschliff nicht ausreichend, dann müssen die Schichten von der Oberfläche aus gemessen werden. Auf Grund der Ausbildung einer Verformungszone unter dem Indenter wird dabei der Substratwerkstoff mit erfasst [Sch97]. Man erhält eine so genannte Verbundhärte. Wie groß der Einfluss des Substrates ist, hängt sowohl von der Schichtdicke, der Eindringtiefe des Indenters als auch von der Ausbildung der Verformungszone unter dem Indenter ab. Bei weichen Substraten ist diese Zone wesentlich größer als bei sehr harten Substraten. Aus diesem Grunde ist die so genannte *Bückle*-Regel [Bük65], die besagt, dass die Eindringtiefe des Indenters maximal 1/10 der Schichtdicke betragen soll, um den Substrateinfluss auszuschließen, nicht für jede Schicht/Substratkombination geeignet. Weiterhin kommt hinzu, dass bei Schichtdicken  $< 1\mu\text{m}$  eine Eindringtiefe von  $0,1\mu\text{m}$  in den Bereich der Oberflächenrauheit kommt.

Zum Vergleichen von Härtewerten unterschiedlich beschichteter Materialien kann man sich so helfen, dass man Härtewerte für ein konstantes Verhältnis Schichtdicke / Eindringtiefe angibt. Damit wird der Substrateinfluss nicht eliminiert, aber er ist für alle Proben näherungsweise konstant.

### 1.3 Der mechanische Kontakt von Kugel und Stempel

Werden zwei Festkörper mit einer Kraft  $F$  aufeinandergedrückt, so stellt sich in der Berührungsfläche zwischen den Körpern eine Normallastverteilung ein, die als Flächenpressung bezeichnet wird. Die Flächenpressung ist im Gegensatz zum Druck nicht isotrop, das heißt, sie hat eine Richtung, und sie ist über die Kontaktfläche nicht notwendigerweise konstant; neben der Höhe der Kraft  $F$  und den Materialeigenschaften sind die Oberflächenkonturen der beteiligten Körper für die Lastverteilung über der Kontaktfläche und für die Größe und Form der Kontaktfläche ausschlaggebend.

#### 1.3.1 Hertzische Pressung (Kugeleindruck)

Berühren sich zwei Kugeln mit den Radien  $R_1$  und  $R_2$ , so entsteht eine Berührellipse (mit dem Sonderfall Kreis). Nach den Theorien des deutschen Physikers Heinrich Hertz [Her81] können Größe und Form der Berührflächen sowie die Höhe und Verteilung der mechanischen Spannungen unter den Berührflächen berechnet werden. Nach Hertz wird die höchste Spannung, die in der Mitte der Kontaktfläche herrscht, auch *Hertzische Pressung* genannt. Die Höhe der Hertzischen Pressung hängt ab von der Kraft  $F$ , mit der die beiden Körper aufeinander gepresst werden, von ihren Krümmungsradien und von ihren Elastizitätsmoduln. Es wird hier nur der Sonderfall Kugel auf ebener Fläche betrachtet, bei der einer der Radien als unendlich groß angenommen wird, um einen ebenen elastischen Halbraum in Kontakt mit einer normal zu seiner Oberfläche mit der Kraft  $F$  belasteten elastischen Kugel zu erhalten.

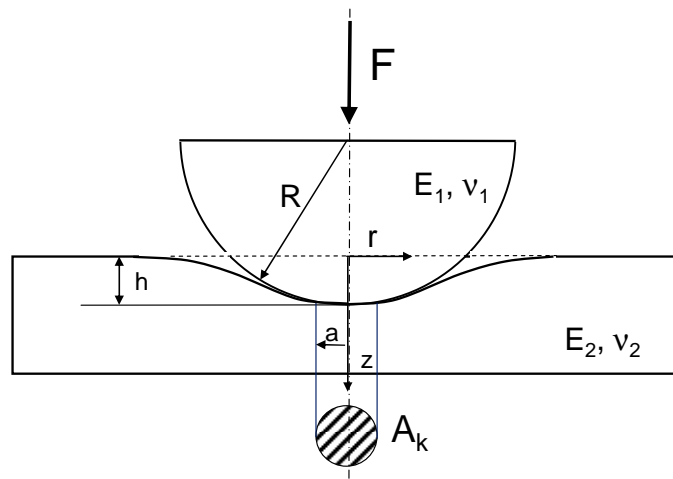


Abb. 1.14: Hertzischer Kugeleindruck auf ebener Fläche

Es gelten außerdem die folgenden Randbedingungen der elastischen Kontakttheorie:

- die Abmessungen des Körpers  $R$  sind groß gegenüber den Dimensionen des Kontaktradius  $a$  und damit sind die Linearitätsbedingungen für den Hookschen Bereich erfüllt ( $a \ll R$ )



### 1.3 Der mechanische Kontakt von Kugel und Stempel

- die Kontaktspannungen sind auf den Kontaktbereich konzentriert; außerhalb der Kontaktzone fallen sie in ihrer Intensität exponentiell ab,
- die Kontaktspannungen hängen selbst nicht von der Form der Körper außerhalb der Kontaktzone ab.
- Die gegenseitige Verschiebung der sich berührenden Kontaktflächen ist reibungsfrei, d.h. es treten keine Scherspannungen durch Reibung in der Kontaktzone auf

Damit ergibt sich mit einem maximalen Kontaktdruck  $p_0$  folgende Druckverteilung  $p(r)$  in der Kontaktfläche  $z = 0$ :

$$\text{Gl. (30)} \quad p(r) = p_0 \sqrt{1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2}$$

Durch Integration von Gl. (30) erhält man die wirkende Normalkraft  $F_N = p_m \cdot \pi \cdot a^2$ :

$$\text{Gl. (31)} \quad F_N = \pi \cdot a^2 \int_0^a p(r) dr = 1.5 \cdot p_0 \cdot \pi \cdot a^2$$

d.h. der Maximaldruck  $p_0$  ist das 1.5-fache des mittleren Kontaktdrucks  $p_m$ .

Der Druck, der auf eine Kugel mit dem Radius  $R_1$  wirkt, ist gleich dem Druck auf die Kugel mit dem Radius  $R_2$ . Damit gilt nach [Joh85] für den sog. reduzierten E-Modul:

$$\text{Gl. (32)} \quad \frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2}$$

und man erhält damit einen Kontaktradius  $a$  gemäß der Gleichung

$$\text{Gl. (33)} \quad a = \frac{\pi \cdot p_0 R}{2E^*} = \left( \frac{3}{4} \cdot \frac{F_N \cdot R}{E^*} \right)^{1/3}$$

### 1.3 Der mechanische Kontakt von Kugel und Stempel

Für den hier betrachteten Fall einer Kugel auf einer unendlichen Halbebene ( $R_2 \rightarrow \infty$ ) gilt für die Eindringtiefe  $h$ :

$$\text{Gl. (34)} \quad h = \frac{a^2}{R} = \left( \frac{9}{16} \cdot \frac{F_N^2}{R \cdot E^{*2}} \right)^{1/3}$$

In der Praxis ist es zweckmäßig, den maximalen Druck bei einer gegebenen Last und Geometrie wie folgt anzugeben:

$$\text{Gl. (35)} \quad p_0 = \left( \frac{6 \cdot F \cdot E^{*2}}{\pi^3 \cdot R^2} \right)^{1/3}$$

Für die Spannungen an der Oberfläche ( $z=0$ ) gelten innerhalb der Kontaktfläche ( $r < a$ ) die Beziehungen

$$\text{Gl. (36)} \quad \bar{\sigma}_r = p_0 \cdot \left( \frac{1-2\nu}{3} \left( \frac{a^2}{r^2} \right) \cdot \left\{ 1 - \left( 1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{3/2} \right\} - \left( 1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{1/2} \right)$$

$$\text{Gl. (37)} \quad \bar{\sigma}_z = -p_0 \cdot \sqrt{\left( 1 - \frac{r^2}{a^2} \right)}$$

und außerhalb der Kontaktfläche gilt für die Radialspannung

$$\text{Gl. (38)} \quad \bar{\sigma}_r = p_0 \cdot \frac{1-2\nu}{3} \left( \frac{a^2}{r^2} \right).$$

Das bedeutet, dass die Radialspannung außerhalb der Kontaktfläche eine Zugbelastung darstellt und ihr Maximum am Kreisrand der Kontaktfläche bei  $r = a$  erreicht.

Für die Spannungen entlang der  $z$ -Achse bei  $r = 0$  gelten die Gleichungen

$$\text{Gl. (39)} \quad \sigma_r = p_0 \cdot \left( - (1+\nu) \cdot \left\{ 1 - \left( \frac{z}{a} \right) \cdot \arctan\left( \frac{a}{z} \right) \right\} + \frac{1}{2 \cdot \left( 1 + \left( \frac{z}{a} \right)^2 \right)} \right)$$

$$\text{Gl. (40)} \quad \sigma_z = -p_0 \cdot \frac{1}{1 + \left( \frac{z}{a} \right)^2}$$

### 1.3 Der mechanische Kontakt von Kugel und Stempel

Hierbei sind  $\sigma_r$  und  $\sigma_z$  Hauptspannungen (Kap. 1.2.1). Die Haupt-Schubspannung  $\tau_1$  hat ihr Maximum in einer Tiefe von  $z = 0.57 \cdot a$  unter der Oberfläche und hat dabei einen Wert von  $0.31 \cdot p_0$ .

In Abb. 1.15 ist der rechnerische Maximaldruck  $p_0$  mit den Parametern Spitzenradius  $R_i$  in Abhängigkeit der Kontaktkraft  $F_K$  nach Gl. (35) dargestellt. Als Beispiel wurde eine Kontaktpaarung „Diamantkugel auf SiO<sub>2</sub>-Fläche“ gewählt. Das Material wird als homogen und linear-elastisch betrachtet.

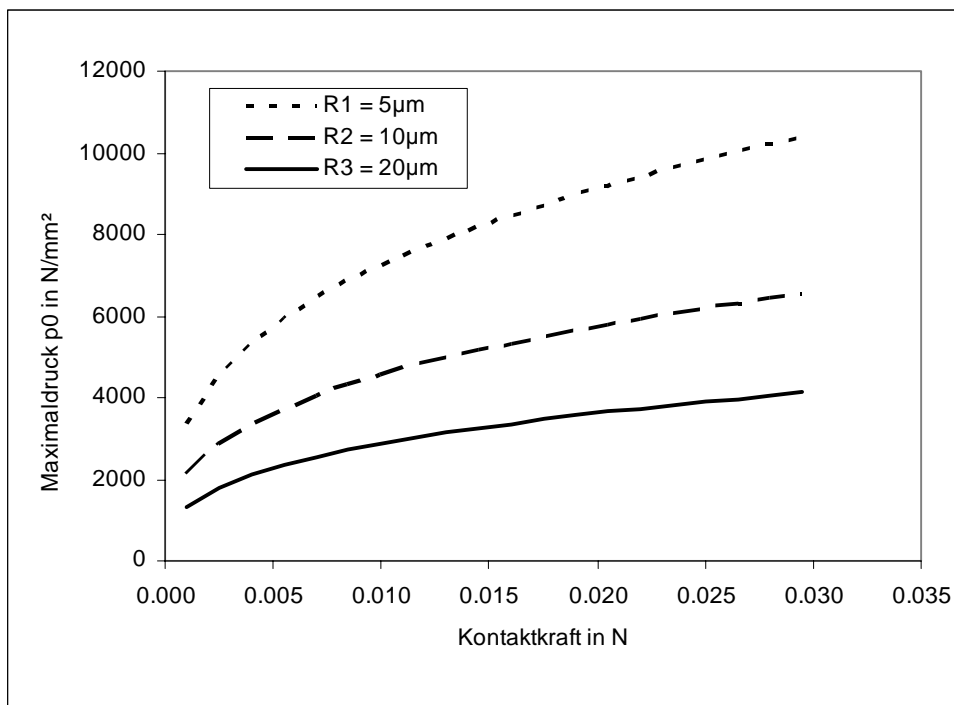
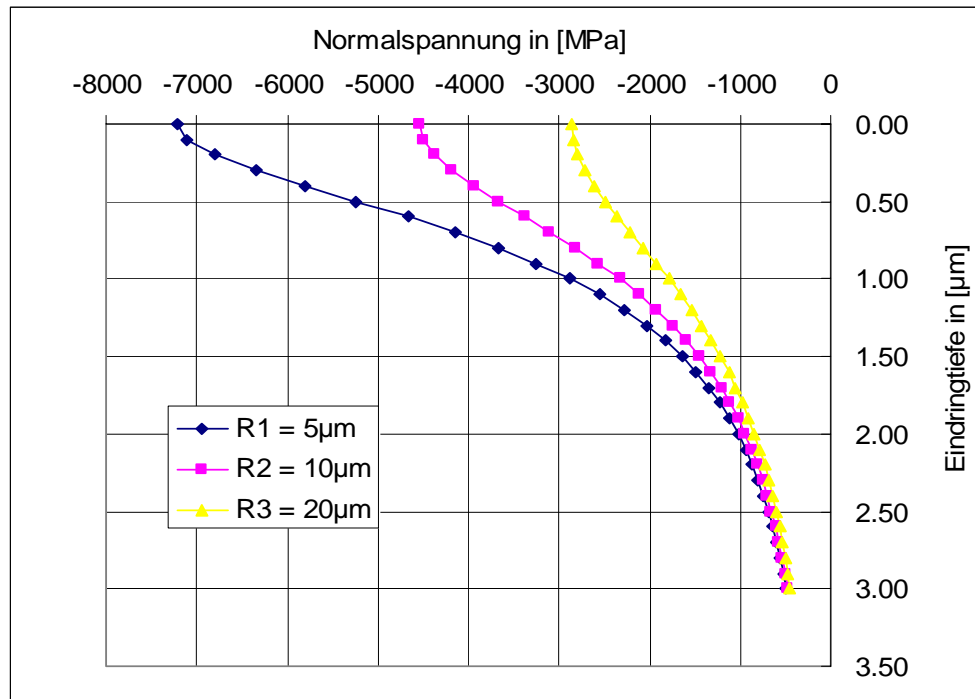


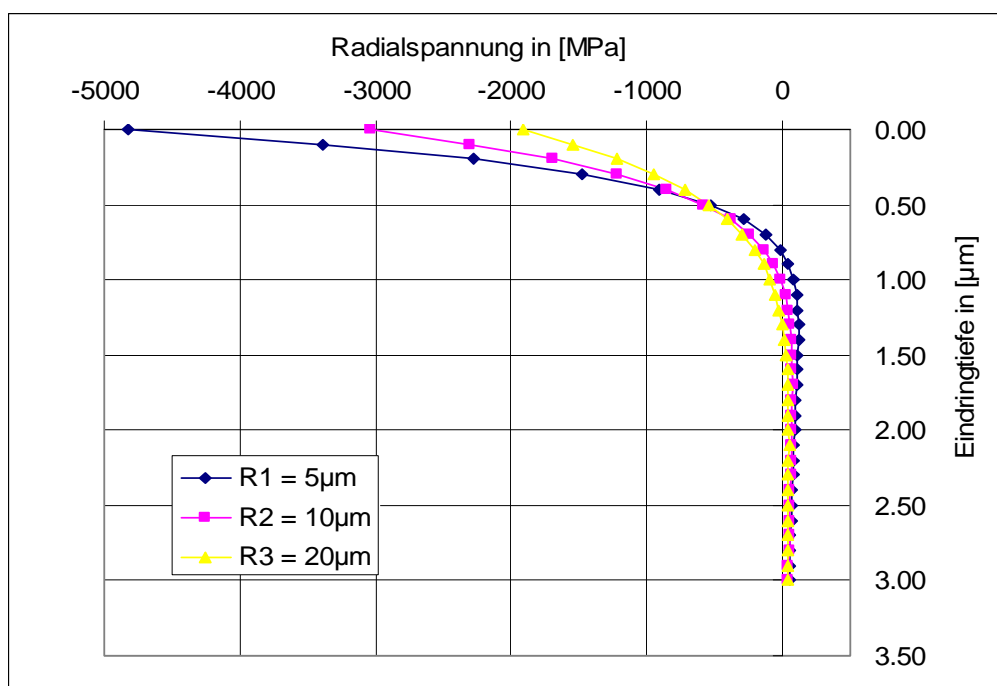
Abb. 1.15: Maximaldruck  $p_0$  in Abh. der Kontaktkraft  $F_K$  für verschiedene Kugelradien  $R$

### 1.3 Der mechanische Kontakt von Kugel und Stempel

In Abb. 1.16 ist die Normalspannung  $\sigma_z(z)$  und in Abb. 1.17 die Radialspannung  $\sigma_r(z)$  mit den Parametern Spitzenradius in Abhängigkeit vom Abstand  $z$  zur Oberfläche ( $z=0$ ) für die Kontaktpaarung (Diamant-) Kugel auf ebener (Siliziumoxid-) Fläche bei einer Kontaktkraft von 5mN entsprechend Gl. (39) und Gl. (40) dargestellt.



**Abb. 1.16: Normalspannungsverlauf  $\sigma_z(z)$  unter der Kontaktfläche bei elastischem Kugeleindruck für verschiedene Kugelradien R**



**Abb. 1.17: Radialspannungsverlauf  $\sigma_r(z)$  unter der Kontaktfläche bei elastischem Kugeleindruck für verschiedene Kugelradien R**

### 1.3 Der mechanische Kontakt von Kugel und Stempel

Wie man erkennt, steigen die maximalen Normal- und Radialspannungen bei Reduktion des Spitzenradius und fallen jeweils mit zunehmender Eindringtiefe stark ab. Bereits bei der geringen Kontaktkraft von nur 5mN würde hier die Bruchspannung des spröden Materials überschritten (siehe Anhang, Tab. 10) werden und Risse ausgehend von der Oberfläche auftreten. Der Spannungsverlauf an der Oberfläche ( $z=0$ ) ist in Abb. 1.19 dargestellt. Die Normalspannung ist nur innerhalb der Berührfläche der Kugel aufgetragen.

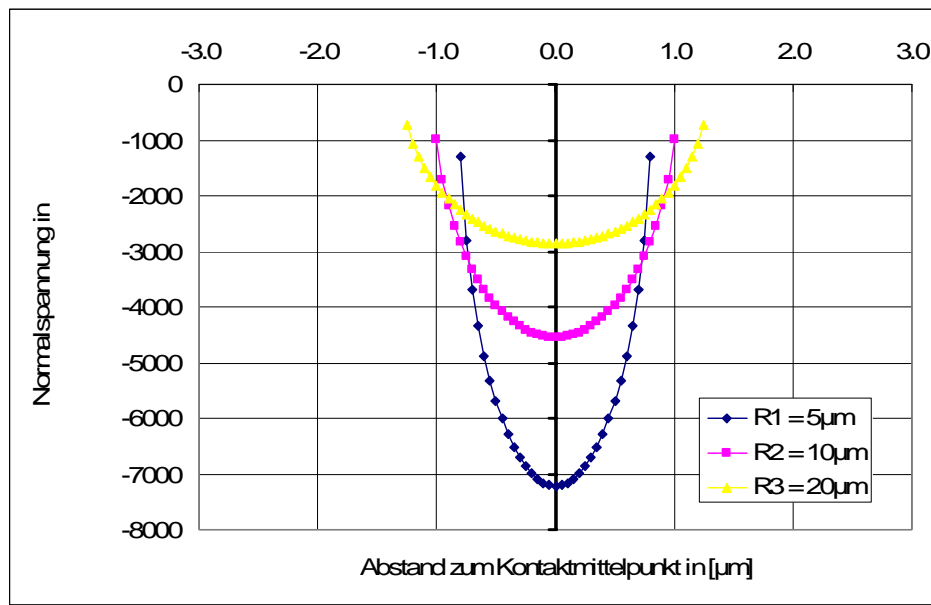


Abb. 1.18: : Normalspannungsverlauf  $\sigma_z(r)$  an der Kontaktfläche bei elastischem Kugeleindruck für verschiedene Kugelradien R

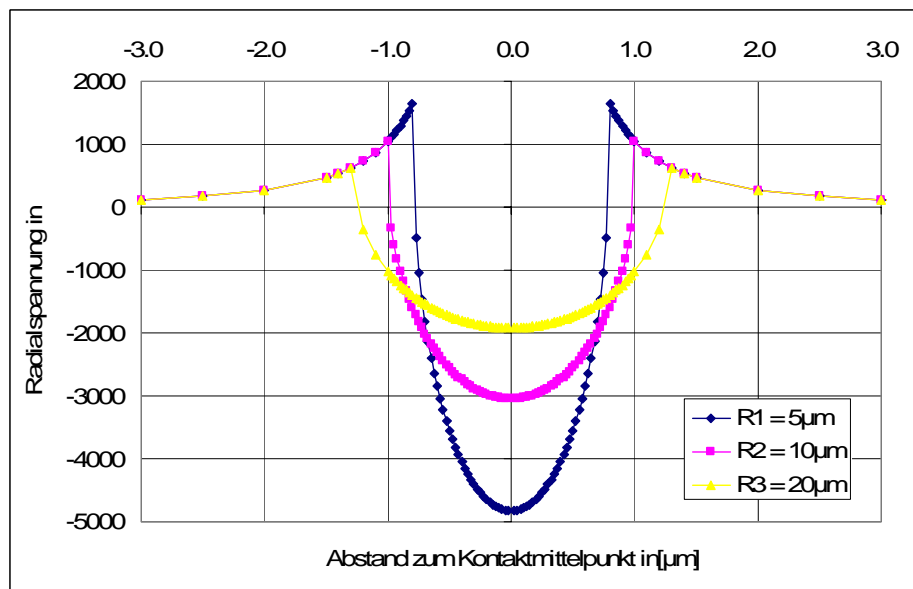


Abb. 1.19: Radialspannungsverlauf  $\sigma_r(r)$  an der Kontaktfläche bei elastischem Kugeleindruck für verschiedene Kugelradien R

Zu beachten ist hier, dass die Radialspannung unmittelbar außerhalb der Kontaktfläche positiv ist, das heißt es liegt eine Zugbelastung vor.

## 1.3 Der mechanische Kontakt von Kugel und Stempel

### 1.3.2 Kontaktpaarung Zylinder - ebene Fläche

Nun betrachten wir die Spannungen bei einem kreisförmigen Stempel, der auf einen elastischen Halbraum mit der Kraft  $F$  gedrückt wird [Ric04]. Der Stempel hat dabei eine flache Grundfläche mit dem Durchmesser  $2a$  und scharfe Kanten ( $r_k=0$ ). Der Stempel wird als unendlich starr betrachtet, womit die Kontaktfläche des elastischen Körpers darunter eben bleibt ( $u_z(r) = \text{const.}$ ). Außerdem wird keine Verkipfung des Stempels angenommen, so dass die Kontaktflächen der Körper als koplanar angesehen werden können. Weiterhin wird hier nur der reibungslose Fall betrachtet, damit sind die Querkraft  $q(r)$  und die Verschiebung  $u_r(r)$  jeweils gleich null.

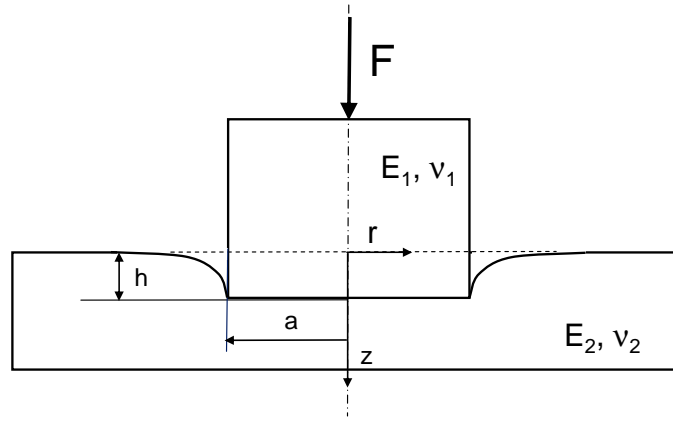


Abb. 1.20: Elastischer Stempelleindruck auf ebener Fläche

Der Maximaldruck  $p_0$  ist innerhalb der Kontaktfläche konstant und es gilt:

$$\text{Gl. (41)} \quad p_0 = \frac{F}{2 \cdot \pi \cdot a^2}$$

Für die maximale Verschiebung  $h$  innerhalb der Kontaktfläche gilt nach [Joh85]:

$$\text{Gl. (42)} \quad h = \frac{(1-\nu^2)}{2 \cdot E} \cdot \frac{F}{a}$$

Außerhalb der Kontaktfläche gilt für die radiale Verschiebung:

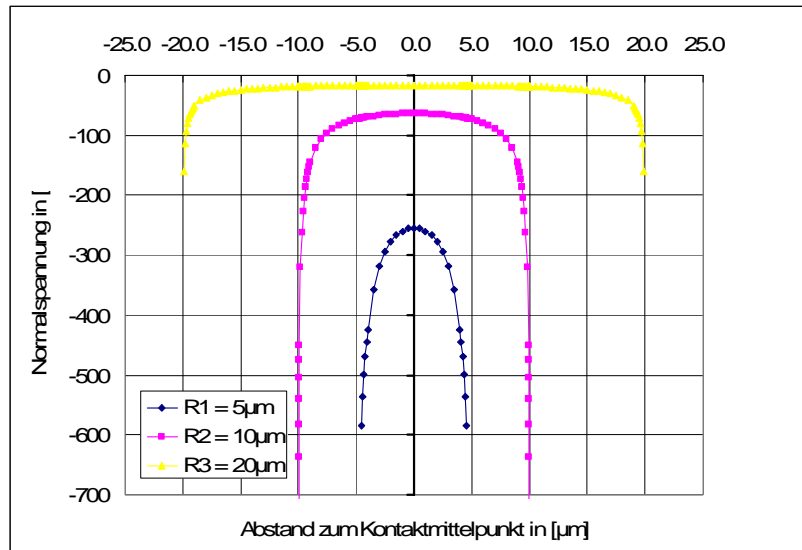
$$\text{Gl. (43)} \quad \bar{u}_z(r) = \frac{(1-\nu^2) \cdot F}{\pi \cdot E \cdot a} \cdot \arcsin\left(\frac{a}{r}\right)$$

Für die Spannungen entlang der  $z$ -Achse gilt nach [Sne65] die Beziehung

$$\text{Gl. (44)} \quad \sigma_z(r) = -\frac{2 \cdot p_0}{\sqrt{1 - \frac{r^2}{a^2}}}$$

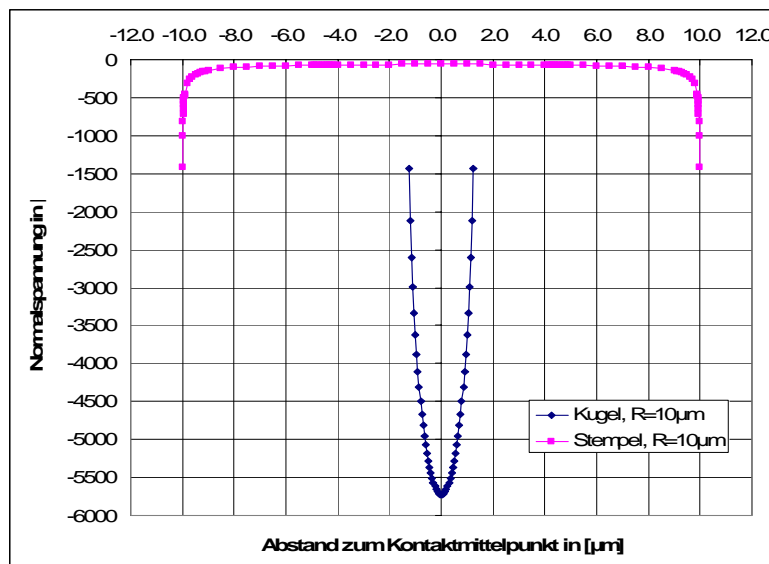
Theoretisch wird die Spannung an den Kanten unendlich groß, was im realen Fall durch eine plastische Verformung der Kontaktkörper in dieser Stelle verhindert wird.

### 1.3 Der mechanische Kontakt von Kugel und Stempel



**Abb. 1.21: Normalspannungsverlauf  $\sigma_z(z)$  beim elastischem Stempeldruck an der Kontaktfläche für verschiedene Radien  $R$**

In Abb. 1.22 sind jeweils die Normalspannungen für Kugel- und Stempeldruck bei gleicher Kontaktkraft für den Indenter-Radius  $R = 10\mu\text{m}$  dargestellt. Wie man sieht, ist beim Stempeldruck der Wert der Druckspannung in der Symmetrieachse wesentlich geringer, allerdings treten am Rand der Kontaktfläche Spannungsspitzen auf, die bei Überschreitung der zulässigen Spannung zum Versagen (Bruch) des Materials führen können.

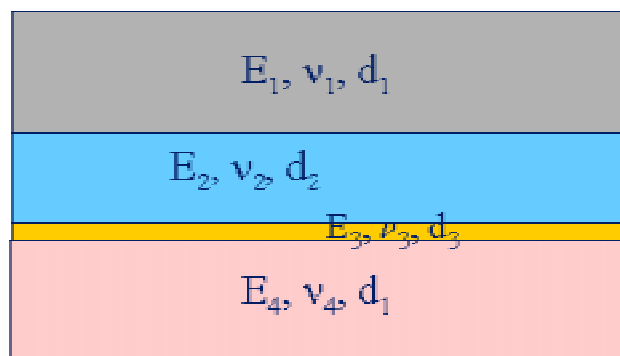


**Abb. 1.22: Vergleich der Normalspannungen an der Kontaktfläche beim elastischen Kugel- und Stempeldruck**

Wie in der Einleitung erwähnt, werden die analytischen Ergebnisse in Kapitel 6 mit Hilfe der FEM verglichen und verschiedene Lastfälle betrachtet.

### 1.4 Spannungen beim Schichtverbund

Wird auf die Oberfläche einer geschichteten Struktur eine Kontaktkraft ausgeübt, tritt durch die zusätzliche Biegung der Schichten ein Biegespannungsanteil zur Kontaktspannung hinzu [Joh85]. Der Anteil der Biegespannung kann bei dünnen Schichten (Schichtdicke  $d \leq$  Kugelradius  $a$ ) dominant werden [Sch97], insbesondere wenn sich die Steifigkeit und das Materialverhalten (elastisch/plastisch) der Schichten stark unterscheiden.



**Abb. 1.23: Heterogener Schichtverbund verschiedener Dicken mit Materialparameter E-Modul  $E$  und Querkontraktionszahl  $\nu$**

Der Spannungsverlauf lässt sich allerdings analytisch nicht mehr eindeutig beschreiben und würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Deshalb wird hier auf die FEM-Simulationen in Kap. 6 verwiesen, die eine numerische Lösung des Problems liefern.



## 1.5 Bruchverhalten duktiler und spröder Materialien

Die Festigkeit ist eine Werkstoffgröße, die den Widerstand eines Festkörpers gegenüber äußeren Kräften und Momenten beschreibt, ohne dass dabei eine plastische Verformung oder ein Riss ausgelöst wird. Während für duktile Materialien zur Bestimmung der (Zug-) Festigkeit der Zugversuch zur Anwendung kommt, wird die Biegefestigkeit von spröden Materialien üblicherweise durch den Biegeversuch ermittelt [Mun99].

Ein Festkörper verformt sich unter einer von außen angelegten mechanischen Spannung zunächst nach dem Hookschen Gesetz. Bei Überschreiten einer Grenzspannung sind generell zwei Verhaltensweisen zu unterscheiden (Abb. 1.24):

- Der Festkörper versagt duktil (duktiler Bruch), d.h. die gespeicherte Energie wird durch plastische Verformung und Wärme freigesetzt.
- Der Festkörper versagt spröde (Sprödbbruch), d.h. die während der Verformung angesammelte Verformungsenergie kann nicht durch plastisches Verformen abgebaut werden. Der Körper bricht katastrophal, und die gespeicherte Energie wird in Form von neuen Oberflächen, Wärme und kinetischer Energie frei.

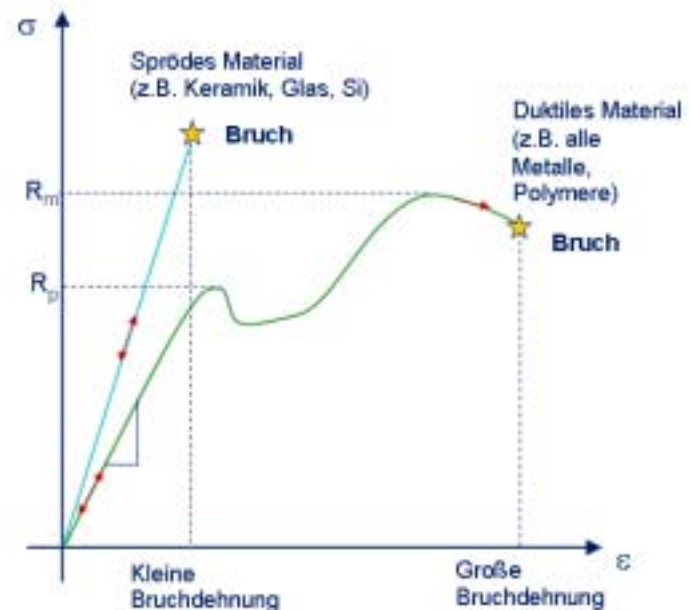


Abb. 1.24: Spannungs-Dehnungsdiagramm für duktile und spröde Werkstoffe

## 1.5 Bruchverhalten duktiler und spröder Materialien

Im Gegensatz zu den in der Regel duktilen Metallen verhalten sich Keramiken bei Raumtemperatur spröde. Aufgrund ihrer Struktur- und Bindungsverhältnisse kann erst bei hohen Temperaturen (z.B.  $T > 1300^\circ\text{C}$  für  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) merkliche plastische Verformung eintreten. Die Ursachen für dieses Verhalten sind auf Unterschiede in Struktur und interatomaren Bindungen von Metallen und Keramiken zurückzuführen.

### 1.5.1 Deterministische Bruchmechanik

Die Bruchmechanik [Gro01] befasst sich mit dem Versagen rissbehafteter Bauteile unter statischen und dynamischen Belastungen. Mit ihrer Hilfe können bereits rissbehaftete Bauteile bewertet werden, was mit sonst üblichen Methoden der Statik nicht mehr gelingt. Auch die Ausbreitung von Rissen kann vorhergesagt werden. Dabei ist eine besonders wichtige Werkstoffeigenschaft die Zähigkeit. Sie beschreibt den Widerstand eines Werkstoffes gegen die Ausbreitung eines Risses. Spröde Werkstoffe wie Glas besitzen eine niedrige Zähigkeit. Sie versagen schlagartig und ohne nennenswerte bleibende Verformung, sodass sich auch das Bruchereignis nicht durch Formänderungen ankündigt. Duktile Werkstoffe hingegen besitzen eine hohe Zähigkeit. Bei ihnen wird das Risswachstum von großen, bleibenden Verformungen begleitet. Gewünscht ist, dass sich ein Werkstoff duktil verhält, damit sich ein Riss nur langsam und unter großen Bauteilverformungen ausbreitet, sodass sich das Versagen deutlich ankündigt.

Die Bruchart wird nach der Beanspruchungsart (siehe rechte Abb.; Spaltbruch I, Gleitbruch II, Torsionsbruch III), nach dem kristallographischen Verhalten (transkristalliner, interkristalliner Bruch, Korngrenzenbruch) und dem Materialverhalten (duktiler, spröder Bruch) unterteilt.

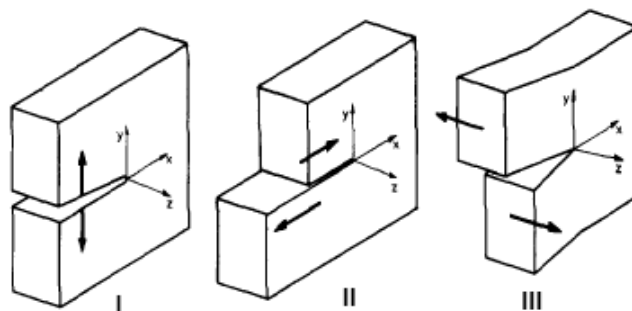
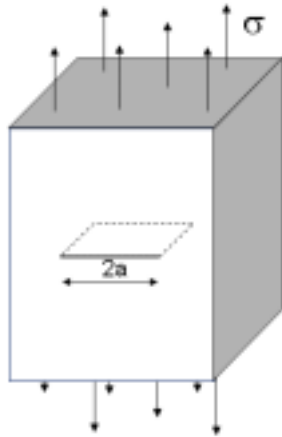


Abb. 1.25: Bruchbeanspruchungsarten zur Rissbildung

## 1.5 Bruchverhalten duktiler und spröder Materialien

Die Bruchart ist weiterhin abhängig vom Material, von der Geometrie, von der Temperatur und von der Belastungsart des Festkörpers.



Zur Illustration des Bruchkriteriums betrachten wir in eine unendlich große Platte, die in der Mitte einen Riss der Länge  $2a$  enthält und rechtwinkelig zur Rissfläche durch eine Normalspannung  $\sigma$  belastet wird. Nach *Irwin* besteht Spröbruchgefahr, wenn der Ausdruck  $a \cdot \sigma^2$  einen kritischen Wert erreicht. Deshalb wird der Spannungsintensitätsfaktor  $K$  eingeführt, für den für den Fall I (Spaltbruch) gilt:

$$\text{Gl. (45)} \quad K_I = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$$

**Abb. 1.26: Kritische Faktoren für den Einsatz von spröden Materialien**

Der Spannungsintensitätsfaktor  $K$  ist ein Maß für die Intensität des Spannungsfeldes in der Nähe der Risspitze. Er ist eine skalare Größe, die von der Geometrie des Risses, von der äußeren Belastung und von der Bauteilgeometrie abhängt. Für jede Rissöffnungsart lässt sich ein Spannungsintensitätsfaktor  $K_i$  ermitteln. Der Spannungsintensitätsfaktor ist nur bei einer unendlich großen Platte unabhängig von den Abmessungen. Zur Ermittlung des kritischen Wertes mit endlichen Proben muss  $K_I$  entsprechend der Probengeometrie korrigiert werden.

Da die Spannung unter der Annahme eines ideal spröden Werkstoffes, der sich bis zum Bruch elastisch verformt, unendlich groß werden würde, müssen beim realen Werkstoff in der Risspitze plastische Verformungen auftreten. Für die Berechnung des Spannungsintensitätsfaktors wird die Rißlänge um den Betrag korrigiert, welcher die plastisch verformte Zone berücksichtigt. Damit lautet die Formel des um einen dimensionslosen Geometriefaktor  $f$  korrigierten Spannungsintensitätsfaktors [Gre98]:

$$\text{Gl. (46)} \quad K_I = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot f$$

## 1.5 Bruchverhalten duktiler und spröder Materialien

Der *kritische Spannungsintensitätsfaktor*  $K_{Ic}$  (Einheit  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ) wird auch Bruchzähigkeit oder Risszähigkeit genannt.  $K_{Ic}$  ist ein Werkstoffkennwert und unabhängig von der Probengeometrie. Dies gilt allerdings nur, wenn die plastisch verformte Zone klein gegenüber den Probenabmessungen ist. Bei bekanntem  $K_{Ic}$  - Wert kann bei ebenfalls bekannter Rissgröße die Bruchspannung errechnet werden.

Bei spröden Werkstoffen (Glas, Keramik) kann plastisches Fließen nicht auftreten. Eine Möglichkeit Spannungen abzubauen, ist die Ausbildung einer Schädigungszone unmittelbar vor der Risspitze. In dieser Schädigungszone sorgen zahlreiche Mikrorisse für lokale Entlastungen und Spannungsumlagerungen. Spröde Materialien zeigen auch häufig eine signifikante Abnahme der Festigkeit mit zunehmenden Volumen eines Körpers und umgekehrt. Der  $K_{Ic}$ -Wert steigt mit zunehmender Temperatur und fällt mit zunehmender Verformungsgeschwindigkeit. Ein bei hoher Verformungsgeschwindigkeit ermittelter dynamischer  $K_{Ic}$  -Wert kann weniger als 50% des statischen Wertes betragen [Jon75].

## 1.6 Probabilistische Bruchmechanik

Nach dem Bruchkriterium  $K_I = K_{Ic}$  (Gl. 45) tritt kein Versagen für  $K_I < K_{Ic}$  auf. Wendet man diese Versagensbedingung im deterministischen Sinn an, so muss vorausgesetzt werden, dass alle erforderlichen Größen genau bekannt sind. Das ist aber im Allgemeinen nicht der Fall [Ang06]. Ein reales Bauteil hat nicht **einen** Riss der Länge  $2a$ , sondern zahlreiche Risse verschiedener Lage, Größe und Orientierung in statistischer Verteilung. Die Streuung der mechanischen Eigenschaften ist die Folge dieser Verteilung. Das Bauteil wird dort brechen, wo die „gefährlichste“ Rissverteilung vorliegt, so wie eine Kette am schwächsten Glied reißt (Weakest-Link-Modell, [Sal82]). Im Unterschied zum deterministischen Vorgehen wird bei einer statistischen Betrachtungsweise angenommen, dass die in Bruchkriterien eingehenden Größen in Form von Wahrscheinlichkeitsverteilungen vorliegen. Dies führt dann zu Aussagen über die Bruchwahrscheinlichkeit.

### 1.6.1 Statistik-Grundlagen

Statistische Aspekte spielen auch eine Rolle, wenn man die bruchmechanisch relevanten Mikrostruktureigenschaften eines Materials erfassen will. So befinden sich in einem realen Material im Allgemeinen sehr viele Defekte, wodurch der Bruchprozess wesentlich bestimmt wird. Aufgrund ihrer Vielzahl lassen sich diese Defekte in ihrer Auswirkung auf das makroskopische Verhalten zweckmäßig mit statistischen Methoden beschreiben. In der probabilistischen Auslegung wird versucht, das gesamte Streuverhalten insbesondere für keramische Werkstoffe durch eine geeignete statistische Verteilungsfunktion zu erfassen. Dies hat den Vorteil, dass das Restrisiko in Form einer Ausfallwahrscheinlichkeit  $P$  quantifiziert werden kann.

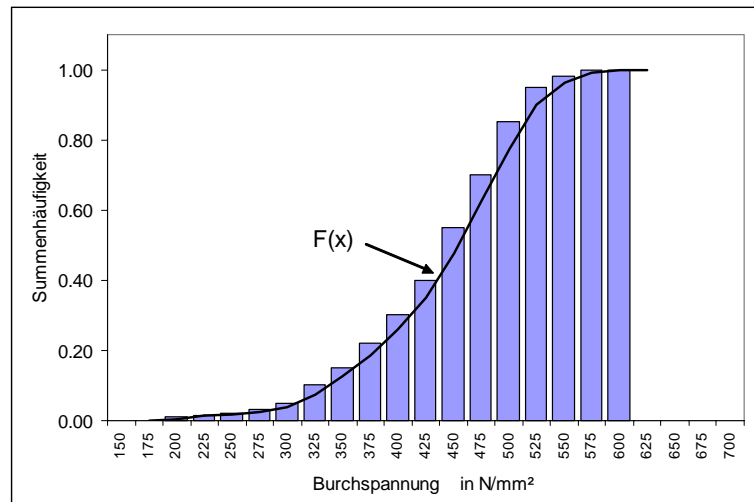
Diese Wahrscheinlichkeit  $P$  lässt sich im Prinzip dadurch bestimmen, indem beliebig viele Realisierungen der Zufallsgröße  $X$  betrachtet werden. Im allgemeinen Fall bezeichnet man die Tatsache, dass eine Zufallsgröße  $X$  einen vorgegebenen Wert  $x_0$  annimmt, auch als Treffer. Die Wahrscheinlichkeit, dass  $X = x_0$  ist bestimmt sich nach

$$\text{Gl. (47)} \quad P(X = x_0) = \frac{\text{Anzahl Treffer}}{\text{Anzahl Versuche}}$$

## 1.6 Probabilistische Bruchmechanik

Dabei muss die Anzahl der Versuche ausreichend hoch sein. Bei kontinuierlichen Zufallsgrößen ist es nicht sinnvoll einen genauen Wert anzugeben, den eine Zufallsgröße annehmen soll, da eine Übereinstimmung bis auf beliebig viele Dezimalstellen im Zweifelsfall gar nicht nachgeprüft werden kann. Stattdessen wird die Wahrscheinlichkeit betrachtet, dass eine Realisierung einer Zufallsgröße in einem Intervall  $[a, b]$  liegt.

Eine zweckmäßig Darstellung aller Messwerte  $x_1, x_2, \dots, x_n$  (mit  $x_1 < x_2 < \dots < x_n$ ) einer Stichprobe ist die Summenhäufigkeit. Dabei wird jedem Messwert eine Wahrscheinlichkeit zugeordnet.



**Abb. 1.27: Relative Summenhäufigkeit bei Bruchvorgängen**

Daraus folgt, dass die Messgröße  $X$  genau  $i$ -mal einen Wert  $X = x_i$  annimmt. Die graphische Darstellung der Summenhäufigkeit ergibt eine Treppenfunktion (siehe Beispiel in Abb. 1.27), die Werte zwischen 0 und 1 annimmt. Die Höhe der Stufen ist gerade  $i/n$ , falls  $n$  Messungen vorliegen. Wird der Stichprobenumfang (=Anzahl der Messwerte) erhöht, so nähert sich die Treppenkurve der Summenhäufigkeit einer glatten Kurve an, der sog. statistischen Verteilungsfunktion  $F(x)$ .

Die Häufigkeit des Auftretens einer Größe  $x$  wird durch die Wahrscheinlichkeitsdichte  $f(x)$  beschrieben, Die Wahrscheinlichkeitsverteilung ist durch

$$\text{Gl. (48)} \quad F(x) = \int_0^x f(x) dx, \quad \text{für } x > 0$$

gegeben. Durch sie ist die Wahrscheinlichkeit  $P$  festgelegt, dass eine Zufallsgröße  $X$  im Intervall  $0 \leq X \leq x$  liegt:

$$\text{Gl. (49)} \quad P(X \leq x) = F(x)$$

Dabei kann  $P$  nur Werte zwischen 0 und 1 annehmen und mit wachsenden  $x$  nicht abnehmen. Damit gelten die Beziehungen:

$$\text{Gl. (50)} \quad P(X < \infty) = 1$$

$$\text{Gl. (51)} \quad P(X \geq x) = 1 - F(x)$$

$$\text{Gl. (52)} \quad P(a \leq X \leq b) = \int_a^b f(x) dx = F(b) - F(a)$$

Der Mittelwert oder Median  $\langle X \rangle$  einer Zufallsgröße sowie die Varianz oder Streuung  $\text{Var}[X]$  (auch mittlere quadratische Abweichung vom Mittelwert  $\langle X \rangle$ ) sind definiert als

$$\text{Gl. (53)} \quad \langle X \rangle = \int_0^{\infty} x \cdot f(x) dx = \int_0^{\infty} [1 - F(x)] dx$$

$$\text{Gl. (54)} \quad \text{Var}[X] = \int_0^{\infty} [x - \langle X \rangle]^2 f(x) dx$$

Die Varianz ist in der Statistik ein Streuungsmaß, d.h. ein Maß für die Abweichung der Zufallsgröße  $X$  von ihrem Mittelwert.

Die Wurzel aus Varianz heißt Standardabweichung:

$$\text{Gl. (55)} \quad \sigma = \sqrt{\text{Var}[X]}$$

### 1.6.2 Verteilungsfunktionen

Es gibt in der mathematischen Statistik eine Reihe von typischen Verteilungsfunktionen, die bei bestimmten mathematischen Systemen auftreten. Die Auswahl einer geeigneten Verteilungsfunktion hängt also von der Natur des physikalischen Prozesses ab, der die Streuung verursacht. Bekannte Modelle sind:

#### 1.6.2.1 Normalverteilung (auch Gaußsche Glockenkurve)

Die Streuung entsteht in diesem Fall durch das Zusammenwirken mehrerer Einflüsse. Diese statistische Verteilungsfunktion wird typischerweise zur Beschreibung der Messgenauigkeit verwendet. Es gilt:

## 1.6 Probabilistische Bruchmechanik

$$\text{Verteilungsdichte} \quad f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

$$\text{Verteilungsfunktion} \quad F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) dx$$

$$\text{Varianz} \quad \text{Var}[X] = \sigma^2$$

Darin sind  $\mu$  der Mittelwert und  $\sigma$  die Standardabweichung.

### 1.6.2.2 Log-Normalverteilung

Die Log-Normalverteilung ist eine einseitig schiefe Verteilung, die nur positive Werte aufweist. Eine anschauliche Erklärung dafür, dass sich ein Merkmal nicht symmetrisch verteilt, ist, dass das Merkmal einen bestimmten Schrankenwert nicht unter- bzw. überschreiten kann. Diese Verteilung wird in vielen Fällen zur Beschreibung von Belastungen, Rißlängen- und Defektverteilungen verwendet. Die Entstehung einer Log-Normalverteilung kann auch darauf zurückgeführt werden, dass viele Zufallsgrößen multiplikativ zusammenwirken.

$$\text{Verteilungsdichte} \quad f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi x}} \cdot \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

$$\text{Verteilungsfunktion} \quad F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^x \frac{1}{x} \cdot \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) dx$$

### 1.6.2.3 Exponentialverteilung

Diese statistische Verteilung wird häufig bei Lebensdauerproblemen oder beim radioaktiven Zerfall von Atomen benutzt. Die Exponentialverteilung beschreibt also die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Ereignisses unabhängig vom Zeitpunkt.

$$\text{Verteilungsdichte} \quad f(x) = \lambda \cdot \exp(-\lambda x)$$

$$\text{Verteilungsfunktion} \quad F(x) = 1 - \exp(-\lambda x)$$



## 1.7 Weibull-Verteilung

Besondere Bedeutung in Zusammenhang mit dieser Arbeit hat die Weibull-Verteilung. Ermittelt man die Bruchspannungen  $\sigma_b$  an  $n$  Proben des gleichen keramischen Materials, stellt man fest, dass die Messwerte stark streuen. Diese Streuung der Festigkeit ist die Folge der Streuung der Rißlängen, die über die Probengesamtheit statistisch verteilt sind.

Diese Verteilung wird besonders häufig bei Ermüdungsvorgängen und bei der Erfassung von Rissgrößenverteilungen verwendet. Hier wird die Streuung bestimmt durch das Verhalten des schwächsten Gliedes. Das klassische Beispiel ist das Versagen von spröden Werkstoffen, wo der größte Fehler die ertragbare Last bestimmt.

Die Streuungen der Bruchspannungen kann mit der Verteilungsdichte  $f(\sigma_b)$  oder der Verteilungsfunktion  $F(\sigma_b)$  beschrieben werden. Während die Verteilungsdichte die Häufigkeit der von den Proben erreichten Bruchspannungen wiedergibt, entspricht die Verteilungsfunktion den über  $\sigma_b$  kumulativen Häufigkeiten (Summenhäufigkeit) der einzelnen Bruchspannungen. Nach dem schwedischen Ingenieur *Walodi Weibull* (1887 – 1979) gelten für die Verteilungsdichte und -funktion:

$$\text{Verteilungsdichte} \quad f(x) = \frac{m}{b} \left(\frac{x}{b}\right)^{m-1} \cdot \exp\left(-\left(\frac{x}{b}\right)^m\right), \quad x, m, b > 0$$

$$\text{Verteilungsfunktion} \quad F(\sigma_b) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{\sigma_b}{\sigma_0}\right)^m\right)$$

Diese Verteilung ist durch 2 Parameter (sog. Weibull-Parameter) gekennzeichnet. Der Formparameter  $m$  wird *Weibull-Modul* genannt und ist ein Maß für die Streuung der Festigkeitswerte. Je größer  $m$  ist, desto enger liegen die gemessenen Festigkeiten zusammen oder desto zuverlässiger ist das Material. Andere Verteilungen, wie die Exponentialverteilung ( $m=1$ ), Lognormalverteilung ( $m=2$ ) und Normalverteilung ( $m=3.4$ ) können hinreichend genau durch die Weibull-Verteilung angenähert werden.

## 1.7 Weibull-Verteilung

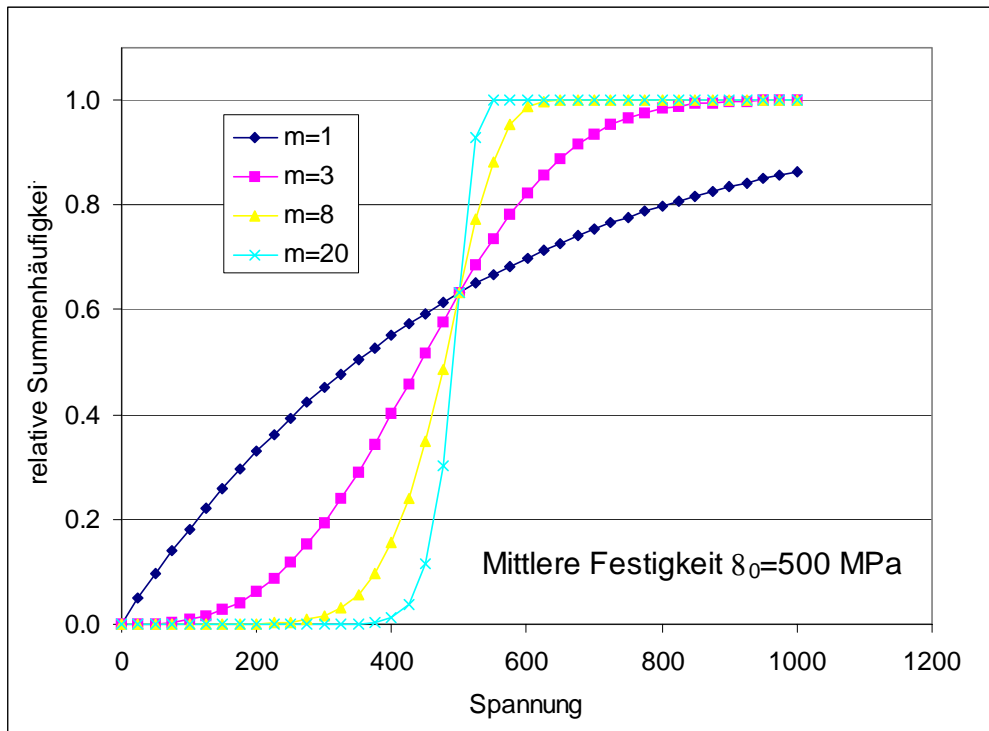


Abb. 1.28: Verteilungsfunktion bei Weibverteilung mit unterschiedlichen Weibull-Modul

Der Parameter  $\sigma_0$  bezeichnet näherungsweise den Wendepunkt der Verteilungsfunktion und steuert die Lage des zentralen Teils der Kurve.  $\sigma_0$  ist der  $\sigma_b$ -Wert, bei dem 63,2% der untersuchten Proben versagen und wird *mittlere Festigkeit* genannt. Der Parameter hängt von der Bruchzähigkeit  $K_{Ic}$  (vgl. Gl. (46)) und vom Volumen ab und es gilt der Zusammenhang:

$$\text{Gl. (56)} \quad \sigma_0 \sim \frac{K_{Ic}}{V^{1/m}}$$

Da Proben mit größeren Volumen eine erhöhte Wahrscheinlichkeit haben einen Defekt oder Riss zu enthalten, weisen diese eine geringere Festigkeit als kleinere Proben auf.

Will man den in Bruchversuchen an  $n$  Proben gemessenen Bruchspannungen eine Wahrscheinlichkeitsverteilung zuschreiben, muss man zuerst den einzelnen Messwerten eine Bruchwahrscheinlichkeit  $F_i$  zuordnen. Dazu wird die Messreihe nach steigenden Festigkeitswerten geordnet und von  $i=1$  bis  $n$  nummeriert. Die Zuordnung kann z.B. nach [DIN84] erfolgen. Durch die Zuordnung wird aus den gemessenen Bruchspannungen  $\sigma_c$  die Verteilung  $F(\sigma_c)$  erzeugt, aus der die Bruchwahrscheinlichkeit bestimmt werden kann, ohne die zugrundeliegende Fehlverteilung  $F(\sigma_c)$  zu kennen.

Die linearisierte Form der Weibull-Verteilung entsprechend  $y = m \cdot x + n$  erhält man durch eine logarithmische Darstellung, wobei der Weibull-Modul  $m$  die Steigung der Geraden ist. Es gelten die Beziehungen

$$\text{Gl. (57)} \quad x = \ln \sigma$$

$$\text{Gl. (58)} \quad y = \ln \left\{ \ln \left( \frac{1}{1-F} \right) \right\}$$

Für die mittlere Festigkeit  $\sigma_0$  bei  $y = 0$  und negative  $n$  folgt aus der Geradengleichung:

$$\text{Gl. (59)} \quad \sigma_0 = \exp \left( \frac{n}{m} \right)$$

Führt man mit den Wertepaaren  $(\sigma_{bi}; F_i)$  eine lineare Regression (Anpassung der Messwerte an eine Gerade) durch, erhält man den Weibullparameter  $m$  und die mittlere Festigkeit  $\sigma_0$ . Der  $x$ -Wert der Geraden bei  $\ln(\ln(1/(1-F))) = 0$  ist der Wert  $\ln(\sigma_0)$ . Die Gerade und dessen Steigung  $m$  kann man z.B. mit Hilfe des Programms von *MS-EXCEL* durch die Funktion „Lineare Trendlinie“ ermitteln.

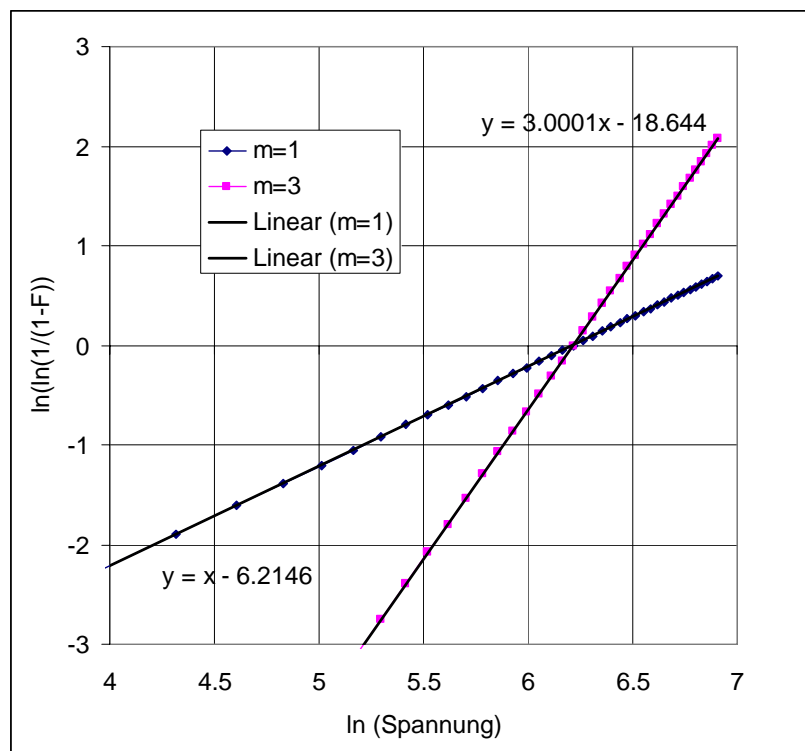


Abb. 1.29: Lineare Regression der logarithmierten Wahrscheinlichkeiten

## 2 Analytische Charakterisierung von Kontaktelementen

Um eine Abschätzung der im vorherigen Kapitel beschriebenen Faktoren hinsichtlich Bruchwahrscheinlichkeit von spröden Schichtsystemen und der dafür erforderlichen Optimierung des elektrischen Widerstandes zu ermöglichen, muss man den Probing-Vorgang und des physikalischen Aufbaus der zu kontaktierenden Schichtsysteme genauer verstehen. Deshalb werden in diesem Kapitel das Funktionsprinzip einer federnden Einzelnadel, wie sie üblicherweise auch für den industriellen Einsatz verwendet wird, analytisch beschreiben und auf die Grundlagen der Halbleitertechnologie und hier insbesondere auf die Oxid- und Metallschichtstruktur näher eingegangen.

### 2.1 Kontaktierung durch Federkontakte

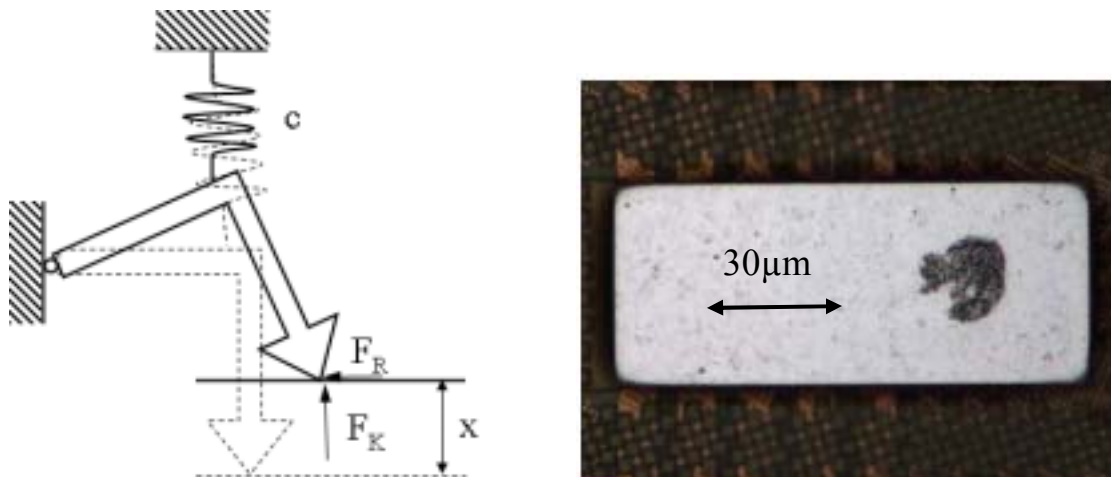
Wie in der Einleitung beschrieben, wird für die Gewährleistung eines guten elektrischen Kontaktes ein Kontaktelement benötigt, das die besonderen Erfordernisse beim Halbleitertest erfüllt. Diese sind geringe Baugröße, hohe elektrische Leitfähigkeit, hohe Anzahl der Kontakte bei kleinen Abständen, geringe Kontaktkräfte, hohe Zuverlässigkeit, usw. In der Tab. 1 sind einige typische Anforderungen an Nadelkarten aufgelistet:

Parameter	Einheit	Wert
Anzahl der Kontakte	-	10 – 10'000
Abstand Nadel-Nadel („Pitch“)	µm	50 - 100
Kontaktkraft pro Nadel	mN	30 – 150
Kontaktwiderstand	mOhm	100 - 500
Lastzyklen	-	> 1 Mio.
Kontaktmaterialien	-	W, Ni, Rh, Pd, Cu (und Legierungen)
Spitzenformen		Sphärisch, flach, Pyramidenstumpf Kegelstumpf
Spitzendurchmesser	µm	5 – 25

Tab. 1: Typische Parameter von Nadelkarten

## 2.1 Kontaktierung durch Federkontakte

Beim Kontaktieren der elektrischen Anschlüsse („Pads“) kommt nahezu bei allen Probingtechnologien das gleiche Prinzip zum Einsatz. Ein Träger mit dem strukturierten Wafer wird durch einen mechanischen Mechanismus vertikal nach oben gegen die Nadelkarte (engl. „Probe card“) gefahren (Abb. 16). Durch die Kontaktierung und Vertikalbewegung werden die Nadeln bzw. Kontaktelemente mechanisch ausgelenkt und die Kontaktkraft steigt gemäß ihrer typischen Federkennlinie an. Außer einer vertikalen Auslenkung der Spitze erzeugen die meisten Kontaktelemente durch eine geeignete Kinematik der Nadelgeometrie auch noch eine laterale Bewegung, die meist zu einem geringeren Kontaktwiderstand führt [Bro04]. Entsprechend der Reibung zwischen Oberfläche und Nadelspitze wirkt dabei eine Reibungskraft  $F_R$ . Wie später noch gezeigt wird, spielt bei der Ermittlung der Bruchwahrscheinlichkeit die Länge der Tangentialbewegung und die Größe der Reibung eine nicht unbedeutende Rolle. Aufgrund der geringen Dimensionen sind die Masse  $m$  des Feder-elementes und damit Trägheitseffekte zu vernachlässigen.



**Abb. 2.1: Mechanisches Ersatzschaltbild einer Cantilever-Nadel und Nadelabdruck auf einem Alu-Pad**

Es gibt eine große Anzahl von verschiedenen Probingtechnologien im industriellen Einsatz [Man04], auf die im Einzelnen nicht weiter eingegangen werden soll. Um das generelle Prinzip zu verstehen, konzentriert sich diese Arbeit auf die Beschreibung von sog. Cantilever-Nadeln (Abb. 2.2). In Abb. 2.7 ist die Nadelgeometrie mit den wichtigsten Variablen zur Bestimmung der Kontaktkraft und Lateralbewegung der Spitze („scrub“) beim Verbiegen dargestellt.

## 2.1 Kontaktierung durch Federkontakte

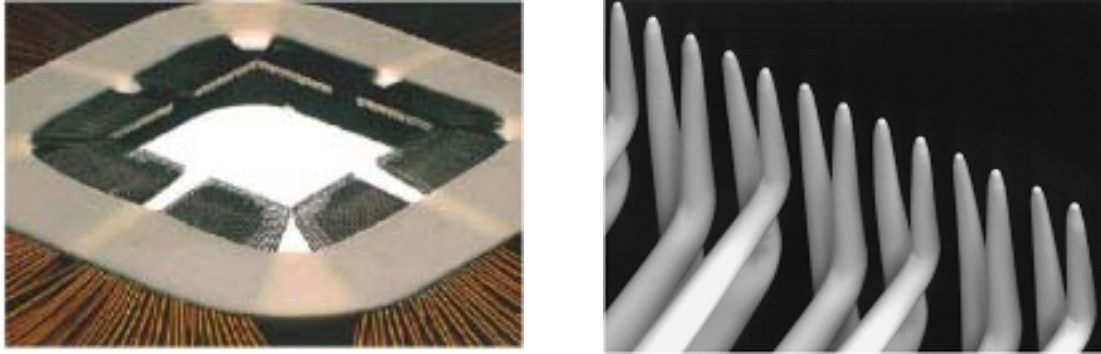


Abb. 2.2: Detailansichten von realen Cantilever-Nadeln

In Abb. 2.3 ist ein Querschnitt durch einer typischen Cantilever-Prüfkarte mit englischer Beschriftung schematisch dargestellt. Auf einen Ring aus Keramik oder eloxierten Aluminium werden die Nadeln mit Epoxydharz fixiert und zusammen auf eine Leiterplatte (PCB) montiert. Die Nadeln werden anschließend an das PCB angelötet, um mit dem Tester und dem zu kontaktierenden Chip eine elektrische Verbindung zu ermöglichen.

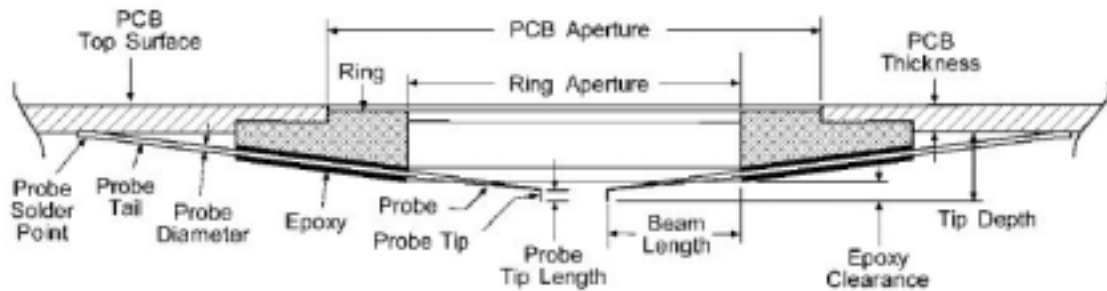


Abb. 2.3: Schematischer Querschnitt durch eine Cantilever-Prüfkarte

In Abb. 2.4 ist eine REM-Aufnahme von typischen Cantilever-Nadelabdrücken auf Aluminium-Kupfer-Pads zu erkennen. Die Abdrücke sind typischerweise ca. 20-30µm lang und in Abhängigkeit des Spitzendurchmessers ca. 15-30µm breit.

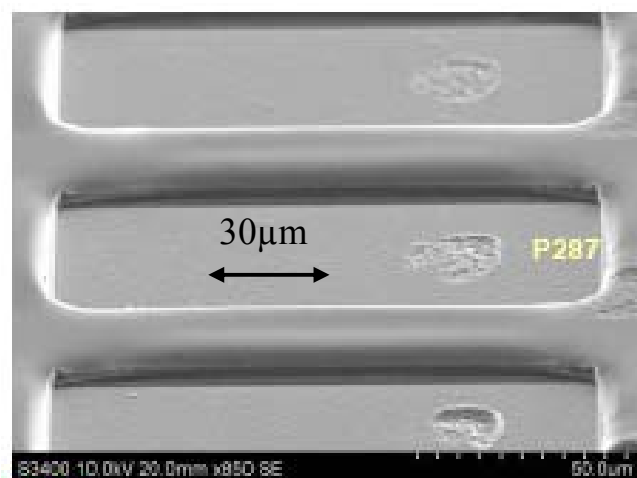


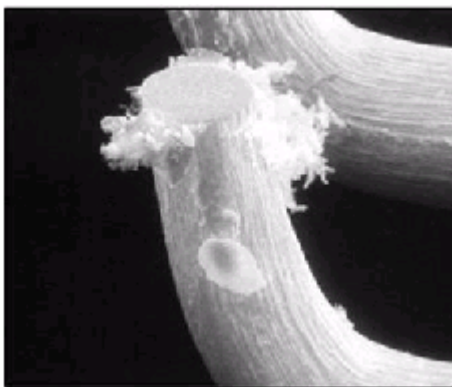
Abb. 2.4: REM-Aufnahme von Nadelabdrücken auf AlCu-Pads

## 2.2 Reinigungsverfahren von Kontaktnadeln

Der Kontaktwiderstand  $R_K$  (engl. contact resistance, Abk. CRes) ist ein wesentlicher Faktor beim Wafertest (engl. yield), der die Ausbeute von als gut getesteter Chips bestimmt. Durch oxidierende Materialablagerungen vom Kontaktpad (z. B. Aluminium, Kupfer) auf der Nadelspitze und durch Ansammlung von Verschmutzungen durch Fremdschichten (Polymere, Fluoride, etc.) nach zum Teil schon wenigen Kontaktierungen ( $< 100$ ) kann  $R_K$  stark ansteigen. Zur Erzielung eines kleinen und stabilen Kontaktwiderstands werden die Kontaktnadeln deshalb periodisch gereinigt. In der Produktion finden die Reinigungszyklen sowohl während des Wafertest automatisch am Prober („online cleaning“) oder manuell im ausgebauten Zustand („offline cleaning“) der Nadelkarte statt.

Es ist vorteilhaft, Ablagerungen auf der Nadel durch präventives Reinigen erst gar nicht entstehen zu lassen. Obwohl die Nadelspitze durch Verschmutzungen selbst meist nicht beschädigt werden, steigt der Fremdschichtwiderstand  $R_F$ , aber auch der Engewiderstand  $R_E$  aufgrund von Änderungen der Oberflächenrauigkeit und –Topographie an (vgl. Kap 1.1).

Kontaminationen sind meist im Lichtmikroskop durch Verfärbungen der Nadelspitze zu erkennen. Die losen und festen Ablagerungen müssen durch Reinigung entfernt werden, da es dadurch ansonsten zu einem Ausfall von kontaktsensitiven Tests oder zu Kurzschlüssen durch leitende Partikel zwischen den Nadeln kommt. Bei jedem Reinigungsschritt, bei dem die Nadel auf ein abrasives Material kontaktiert oder in diese eintaucht, werden lose Partikel und fest haftende Fremdschichten von der Kontaktfläche entfernt.



*vor der Reinigung*



*nach der Reinigung*

**Abb. 2.5: REM-Aufnahme einer Nadelspitze vor und nach der Reinigung**

## 2.2 Reinigungsverfahren von Kontaktnadeln

Dabei werden die Nadelspitzen aber auch aufgrund Materialabtrags abgerundet und der Durchmesser nimmt ab. Dadurch steigt wiederum das Risiko von Brüchen im Oxid.

Die Reinigung durch Kontaktierung auf abrasivem Material ist neben anderen Verfahren (z.B. Antioxidationssprays, Partikelbeschuss, Laser) die effektivste Methode die Nadel zu säubern und damit den Kontaktwiderstand zu kontrollieren. Als Reinigungssubstrate werden meist harte Werkstoffe als Wolfram-Karbid- oder Aluminiumoxid-Platten verwendet. Außerdem sind poröse Folien, in den Diamant- oder Aluminiumoxid-Partikel eingebettet sind, erhältlich.

In Abb. 2.6 ist eine Nadel, die einen Reinigungssubstrat, das meist auf Wafer oder einem speziellen Trägersubstrat („Cleaning-Unit“) am Prober aufgebracht ist, schematisch dargestellt. Üblicherweise werden 10 – 30 Kontaktierungen pro Reinigungs-Zyklus, versetzt um mindestens den Spitzendurchmesser, durchgeführt, um ein gutes Ergebnis zu erhalten.



**Abb. 2.6:** Schematische Darstellung und REM-Aufnahme eines typ. Reinigungssubstrats im Querschnitt



### 2.3 Beschreibung einer idealisierten Cantilever-Nadel

Die Berechnung der zu erwartenden Kontaktkraft bei einer gegebenen Nadelgeometrie kann näherungsweise mit Hilfe den Regeln der Elastostatik [Mag84] für einen Biegebalken kreisförmigem Querschnitt durchgeführt werden. In Abb. 2.7 ist eine Cantilever-Nadel schematisch dargestellt. Die Geometrie der Nadel wird durch die Balkenlänge  $L$ , die Spitzenlänge  $t$ , den Anstellwinkel  $\phi$  sowie durch den Spitzenwinkel  $\alpha$  eindeutig beschrieben. Die Spitze der Nadel liegt auf einer idealen Oberfläche (Reibung = 0) zum Zeitpunkt  $t = 0$  auf und die Kontaktkraft  $F(t=0)$  ist null. Wird die Nadel durch eine Bewegung in  $z = d$  verschoben, wird der horizontale Abschnitt der Nadel elastisch verbogen und der Anstellwinkel ändert sich in einen Wert  $\phi'$ . Durch die geänderte Geometrie wird die Spitze auf der Oberfläche um einen Wert  $s$  in  $x$ -Richtung verschoben. Der Spitzenwinkel  $\alpha$  und der Balkenabschnitt mit der Spitzenlänge  $t$  werden näherungsweise als starr angesehen. Die Auslenkung  $d$  wird üblicherweise mit dem englischen Ausdruck *Overdrive* (Abk. OD) bezeichnet.

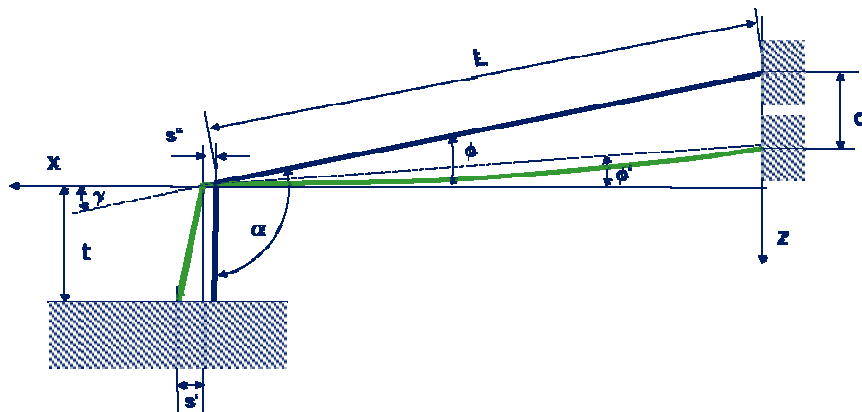


Abb. 2.7: Schematische Darstellung einer Cantilever-Nadel

#### 2.3.1 Kräfte und Scrub-Längen im Fall Reibung = 0

Die Nadel wird für die Bestimmung der Kontaktkraft gedanklich freigeschnitten und die Kräfte und Momente an den Schnittgrenzen entsprechend den Lagerbedingungen angebracht.

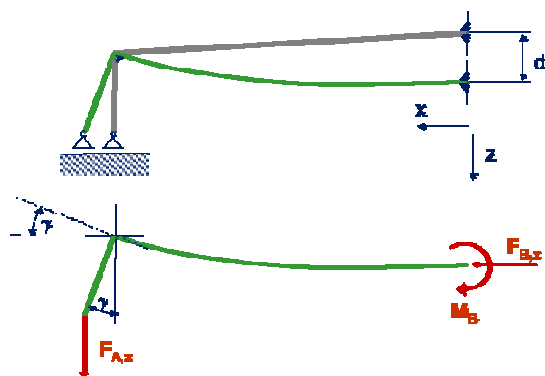


Abb. 2.8: „Freigeschnittene“ Nadel (Reibung = 0)

## 2.3 Beschreibung einer idealisierten Cantilever-Nadel

Es gelten außerdem die folgenden Annahmen:

- Kräfte wirken nur in der  $x,z$ -Ebene des Balkens (*gerade* Biegung)
- Querschnittsflächen bleiben eben (*Bernoullische* Hypothese)
- Es gilt das *Hooksche* Gesetz ( $d \ll L, z \ll 1$ )
- Der Balkenquerschnitt  $D$  ist über die Länge  $L$  konstant

Nun kann das Momentengleichgewicht aufgestellt werden. Es lautet mit der Annahme kleiner Winkel  $\alpha$  und  $\phi$  (vgl. Abb. 18):

$$\text{Gl. (60)} \quad M(x) = -F_{A,z} \cdot (L - x)$$

Mit der Differentialgleichung der Biegelinie erhält man das Biegemoment  $M(x)$

$$\text{Gl. (61)} \quad M(x) = w''(x) \cdot E \cdot I_y$$

Dabei ist  $E$  der Elastizitätsmodul des Balken,  $w''$  die Krümmung der Biegelinie und  $I_y$  das Flächenträgheitsmoment. für einen Kreisquerschnitt mit dem Durchmesser  $D$  entsprechend der Gleichung

$$\text{Gl. (62)} \quad I_y = \frac{\pi D^4}{64}$$

durch Integration der Gl. (61) erhält man zusammen mit Gl. (62) das Ergebnis

$$\text{Gl. (63)} \quad E \cdot I_y \cdot w(x) = F_{A,z} \cdot \left( \frac{Lx^2}{2} - \frac{x^3}{6} \right) + C_1 x + C_2$$

Aus den Randbedingungen werden die Konstanten bestimmt:

$$\begin{aligned} w''(L) &= d \\ \text{Gl. (64)} \quad w'(0) &= 0 \\ w(0) &= 0 \end{aligned}$$

Damit folgt für die Kontaktkraft  $F_K = F_{A,z}$  einer Cantilever-Nadel mit kreisförmigen Nadelquerschnitt:

$$\text{Gl. (65)} \quad F_K = \frac{3}{64} \cdot \frac{\pi \cdot E \cdot d \cdot D^4}{L^3}$$

### 2.3 Beschreibung einer idealisierten Cantilever-Nadel

Für die Berechnung der Scrublänge  $s$  gilt entsprechend Abb. 2.7 folgender kinematischer Zusammenhang:

$$\text{Gl. (66)} \quad s = s' + s'' = t \cdot w'(L) + d \cdot \tan(\phi)$$

Mit Gl. (65) kann bei gegebener Nadelgeometrie und Material die Kontaktkraft und mit Gl. (66) die Scrublänge für den reibungslosen Fall berechnet werden. In der Abb. 2.9 ist die Kontaktkräfte für eine Cantilever-Nadel mit einem Nadeldurchmesser  $D = 150\mu\text{m}$  und dem E-Modul für Wolfram (siehe Tab. 10) bei Variation der Nadellänge  $L$  als Funktion der vertikalen Verbiegung  $d$  (= Overdrive) grafisch dargestellt.

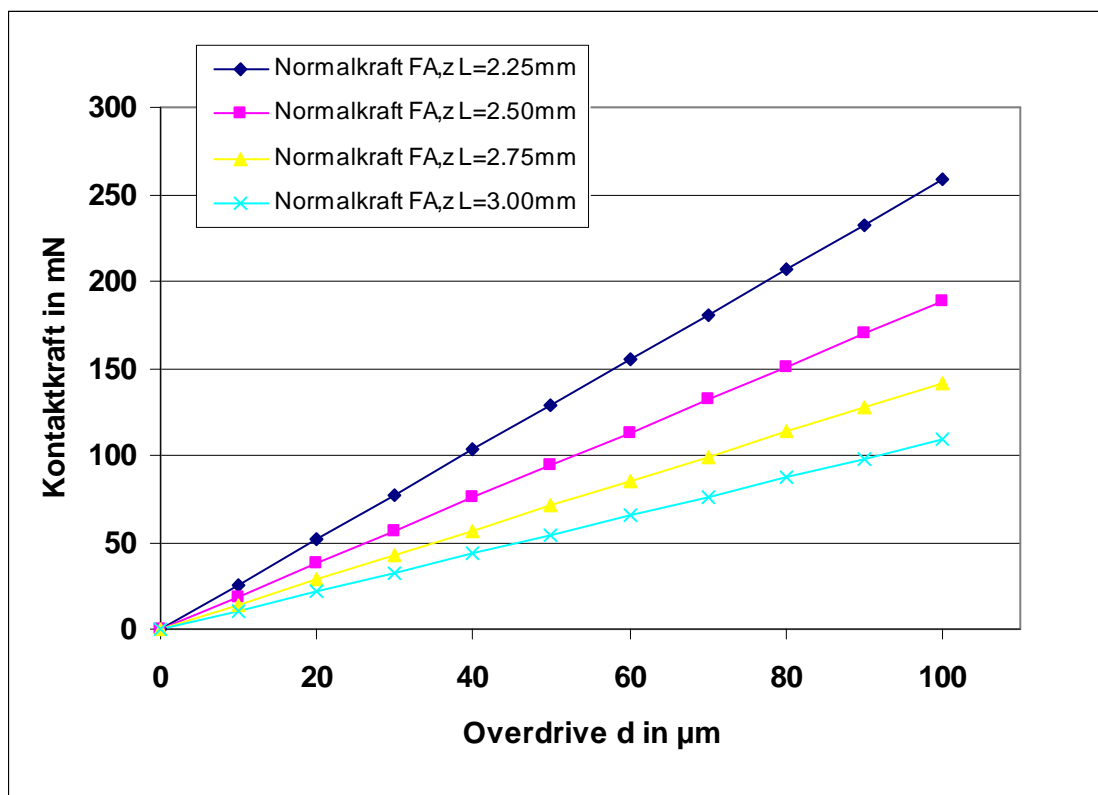


Abb. 2.9: Kontaktkraft einer Cantilever-Nadel mit Variation der Nadellänge

Wie man erkennt, sind der Kraftverlauf linear abhängig vom Overdrive  $d$ . Der Vorteil dieser Probing-Technologie besteht daher darin, dass der Anpressdruck und die Scrublänge durch einen geeigneten Zustellweg des Chucks kontrolliert werden kann. Während die Kontaktkraft in 1.Ordnung von der Nadellänge bestimmt wird, wird die Scrublänge wesentlich von der Spitzenlänge bestimmt.

## 2.3 Beschreibung einer idealisierten Cantilever-Nadel

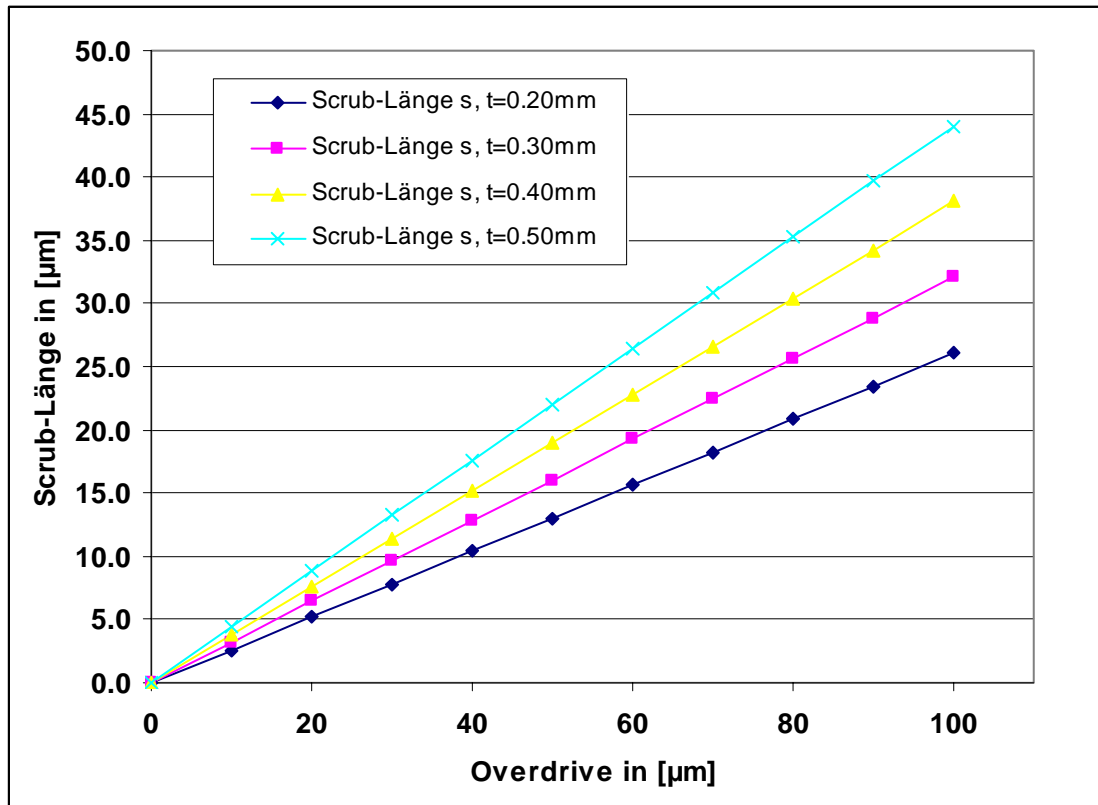
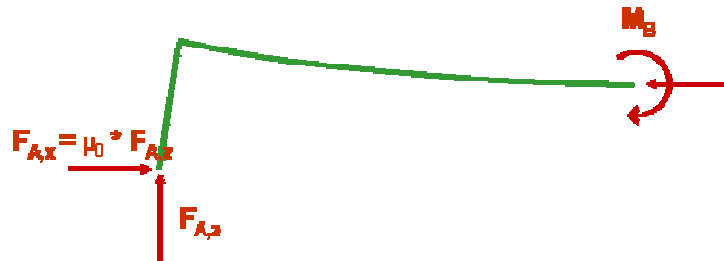


Abb. 2.10: Scrublänge einer Cantilever-Nadel bei Variation der Spitzenlänge

Die Hersteller der Nadelkarten müssen durch ein geeignetes Design der Nadel die Vorgaben beim Probing erfüllen. Aufgrund der immer geringeren Pad-Abständen, steigender Anzahl der Pads pro Chip, extremer Testtemperaturen ist es daher immer schwieriger, die Konstruktion des komplexen Nadelrings bei gleichzeitiger Kontrolle von Kontaktkraft und –widerstand zu bewerkstelligen.

### 2.3.2 Kräfte und Scrub-Längen im Fall Reibung $\neq 0$



In der Realität ist natürlich zwischen Nadelspitze und Kontaktpad immer eine Reibung ungleich null vorhanden. Gründe hierfür sind, wie später noch gezeigt wird, die Oberflächenbeschaffenheit und die elasto-plastischen Materialeigenschaften der Kontaktpaare.

Abb. 2.11 Freigeschnittene“ Nadel (Reibung  $\neq 0$ )

Unter Berücksichtigung des Reibungsgesetzes  $F_R = \mu \cdot F_N$  ( $\mu$  = Reibungskoeffizient) und eines modifizierten Momentengleichgewichts erhält man die Gleichung für die Kontaktkraft mit Reibung  $F_{A,z}$ , mit

$$\text{Gl. (67)} \quad F_{K,R} = \frac{1}{32} \cdot \frac{\pi \cdot E \cdot d \cdot D^4}{L^3 \cdot \left( \frac{2}{3} - \mu_0 \cdot \frac{t}{L} \right)}$$

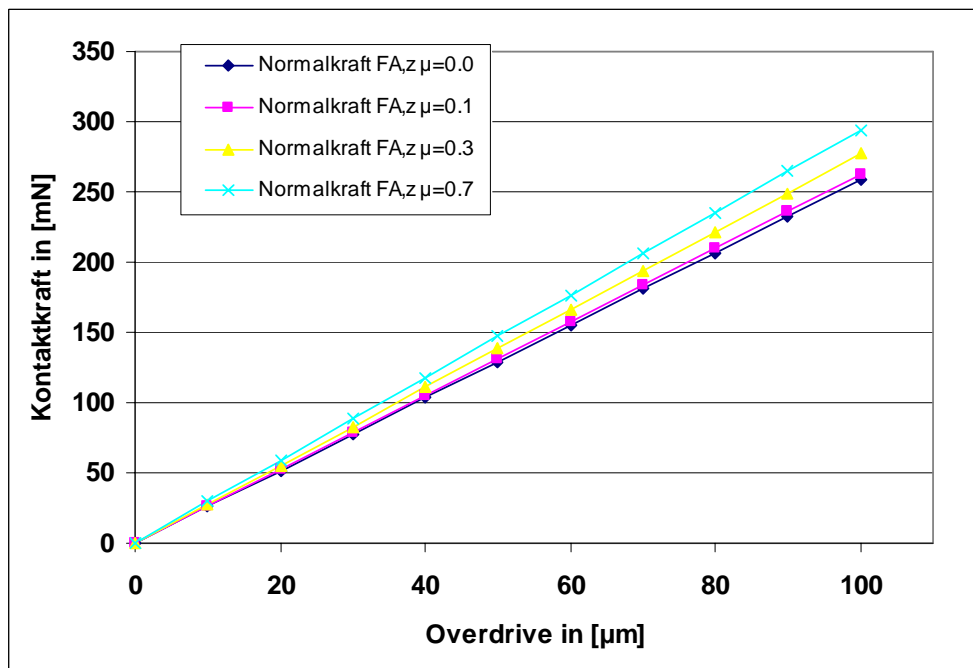


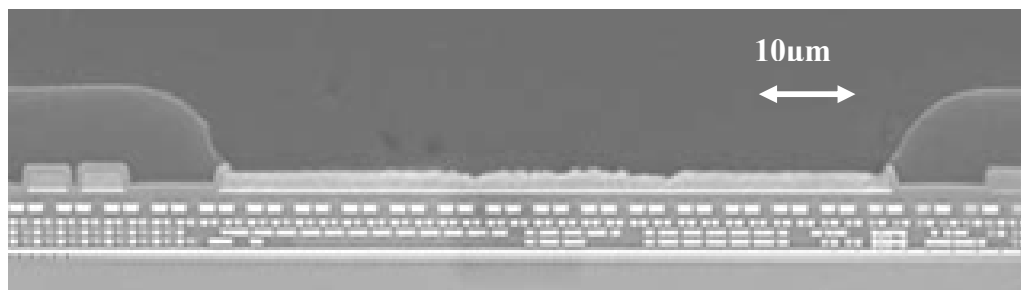
Abb. 2.12: Kontaktkraft bei unterschiedlichen Reibungskoeffizienten

## 3 Beschreibung von Pads über aktiven Strukturen

Elementar wichtig für die Halbleitertechnologie ist die Erzeugung von Schichten. Beispiele hierfür sind z. B. das Gateoxid oder das Polysilizium-Gate eines MOS-Transistors, aber auch von Kontaktpads. Es lassen sich grundsätzlich 2 Verfahren der Schichterzeugung unterscheiden [Eis06]. Das sind zum einen Abscheidungsverfahren wie CVD oder PVD, zum anderen das Aufwachsen einer Schicht beispielsweise durch Diffusion oder Ionenimplantation. Materialien, die abgeschieden werden, sind typischerweise Dielektrika, wie z. B. Siliziumdioxid (chem.  $\text{SiO}_2$ ) oder Siliziumnitrid (chem.  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) oder leitfähige Stoffe, wie Metalle oder Polysilizium.

### 3.1 Schichtaufbau und Metallisierung

Die Verdrahtung der Schaltungselemente einer integrierten Schaltung kann bis zu 80% der Chipfläche einnehmen. Zur Reduktion des Flächenbedarfs sind daher Techniken zur Verdrahtung in mehreren Ebenen entwickelt worden [Sau01]. Die verschiedenen Ebenen sind jeweils durch dielektrische Isolationen getrennt und über Kontaktöffnungen („Vias“) verbunden. Es sind 1 bzw. 2 Polysiliziumebenen und viele (1-16) Metallebenen (Aluminium oder Kupfer) üblich.



**Abb. 3.1: REM-Aufnahme im Querschnitt von Pads über Metallbahnen**

Die Metallisierung stellt den elektrischen Kontakt zu den dotierten Gebieten der integrierten Schaltungselemente her und verbindet die Anschlüsse über weitere Leiterbahnen zum Rand des Chips und wird dort zu Kontaktflächen („Pads“) aufgeweitet (Abb. 3.2). Die Metallisierung muss eine hohe Leitfähigkeit aufweisen, um auch bei minimalen Abmessungen der Leiterbahnen einen hohen Stromfluss und damit hohe Schaltgeschwindigkeiten bei geringer Verlustleistung zu ermöglichen. Aus dem gleichen Grund ist ein niedriger Kontaktwiderstand zwischen dem Metall und dem dotierten Silizium notwendig. Materialien für Kontakte und Leiterbahnen sind Aluminium, Kupfer und teilweise auch Polysilizium.

Wegen seiner Eigenschaften wurden in der Vergangenheit Aluminium und Legierungen dieses Metalls sehr häufig an der Oberfläche der Chips zur Verdrahtung eingesetzt: Die Vorteile sind insbesondere

- gute Haftung auf  $\text{SiO}_2$  und Zwischenoxiden
- gute Kontaktierbarkeit bei der Verdrahtung zum Gehäuse (z.B. mit Gold- und Aludrähten)
- niedriger spezifischer Widerstand
- sehr gut in Trockenätzverfahren strukturierbar

Aluminium erfüllt allerdings die Anforderung an elektrische Belastbarkeit und Korrosionsbeständigkeit nur teilweise. Metalle wie Silber oder Kupfer weisen hier bessere Eigenschaften auf, sind jedoch teuer und mit Trockenätzverfahren nur schwer strukturierbar. Anstelle des reinen Aluminiums können auch Aluminium-Silizium- oder Aluminium-Kupfer-Legierungen (Verringerung der Elektromigration) verwendet werden. Für hochwertige Kontakte ist eine Trennung zwischen Aluminium und Silizium erforderlich. Dazu bringt man auf dem Siliciumoxid eine Barriere aus verschiedenen Stoffen, wie z.B. Titan, Titanitrid oder Wolfram auf.

Kupfer bietet gegenüber Aluminium wesentliche Vorteile, und löst das Leichtmetall bei kleinen Strukturen ab [Hil08]. So bietet das Metall einen wesentlich geringeren spezifischen Widerstand ( $1,7\mu\Omega\text{cm}$ ) als Aluminium ( $2,7\mu\Omega\text{cm}$ ), bei dem gut 50% der zugeführten Leistung in Wärme umgewandelt werden. Da die Integration von Bauteilen ständig steigt, müssen auch die Leiterbahnen kleiner werden. Aluminium erfüllt dabei nicht mehr die benötigten elektrischen Anforderungen. Die Elektromigration ist bei Kupfer dagegen kaum vorhanden. Ein Umstieg auf Kupfer ist somit notwendig, wenn die Strukturgrößen weiter abnehmen.

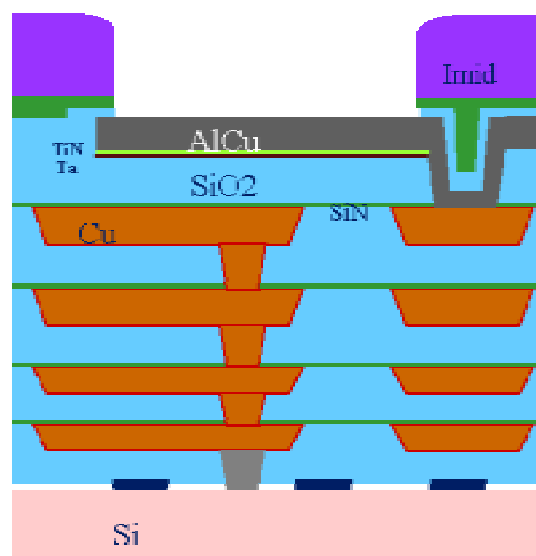


Abb. 3.2: Typ. Schichtaufbau mit Cu-Technologie

### 3.1 Schichtaufbau und Metallisierung

Jedoch lässt sich Kupfer im Vergleich zu Aluminium nur schlecht strukturieren. Beim Kupfer kommt deshalb das sog. Damaszener-Verfahren für Durchkontaktierungen (Vias) und Gräben (Trenches) zum Einsatz, um elektrische Verbindungen zu erstellen.

Ausgehend von Wafern mit fertig prozessierten Halbleiterelementen und Kontaktierungen, auf die eine Schicht Siliziumnitrid als Ätzstopper aufgebracht ist, wird im zweiten Schritt eine Lage Oxid und eine dünne Schicht Siliziumnitrid ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) aufgebracht. Nach einer Photolackstrukturierung mit Ätzschritt zur Erzeugung des Kontaktloches werden die Prozesse zur Strukturierung des Grabens wiederholt. Daran schließt sich das Aufputtern einer Diffusionsbarriere und einer dünnen Kupferstartschicht an. Die Diffusionsbarriere besteht häufig aus Titan/Titannitrid oder Tantal/Tantalnitrid (circa 30 nm/70 nm) und verhindert, dass Kupfer in das Silizium eindiffundiert. Beim anschließenden galvanischen Prozess müssen, ausgehend von einer allseitig leitenden Kupferstartschicht mit etwa 100 nm Dicke, Gräben (die späteren Leitbahnen) und Durchkontaktierungen vollständig mit Kupfer gefüllt werden. Nach dem Kupferfüllen sind alle Leitbahnen elektrisch verbunden. Ihre Trennung erfolgt im folgenden Schritt durch chemisch mechanisches Polieren (CMP). Die oben beschriebene Prozessfolge wird so oft wiederholt, bis die Zahl der benötigten Verdrahtungsebenen (typ. 3 - 6) erreicht ist.

Für eine weitere Strukturverkleinerung von kleiner als 130nm wird die Verwendung von  $\text{SiO}_2$ -Schichten immer kritischer und alternative Materialien müssen entwickelt werden. Deshalb haben sich so genannte low-k Materialien durchgesetzt.

Low-k Material wird in der heutigen Halbleitertechnologie für mehrschichtige Verbindungen, für Zwischenschichtdielektrika (ILDs), Passivierungsschichten, Isolation flacher Gräben und Maskierung tiefer Gräben eingesetzt. Low-k Materialien können in Gruppen von dotierten Oxiden, organische Materialien, fluoriniertem Silikatglas (FSG) und poröse Materialien oder Kombinationen davon eingeteilt werden. Die Gruppe der porösen Materialien kombiniert Mikroporen mit den anderen aufgezählten Materialien. Herkömmlich eingesetztes Siliziumdioxid besitzt eine relative Dielektrizitätskonstante  $\epsilon_r$  von 3,9. Luft wird als idealer Isolator angesehen und besitzt eine Dielektrizitätskonstante von 1. Poröse Materialien können daher generell niedrigere Dielektrizitätskonstanten erreichen als die entsprechenden massiven Stoffe. Diese neuen Materialien werden für ICs mit Strukturen  $<0,10 \mu\text{m}$  entwickelt, wobei Dielektrizitätskonstanten von 2-3 können erreicht werden können.



### 3.2 Versagensmechanismus durch Risse im Dielektrikum

Durch die weitere Miniaturisierung der Chipfläche werden die Kontaktpads heute zunehmend über den aktiven Strukturen angebracht [Hes03], [Cho02], [Hei94]. Dies führt dazu, dass direkt unter den Pads Metallbahnen verlaufen können, die nur durch eine Isolationsschicht voneinander getrennt sind. Wird eine mechanische Belastung z.B. durch eine Prüfnadel beim Wafertest (Abb. 3.3) oder anschließend beim Bonden und Packaging des Chips auf die Oberfläche ausgeübt, kann das zu Rissen im Dielektrikum führen, wenn die kritische Bruchlast (siehe Kap.1.5) überschritten wird.

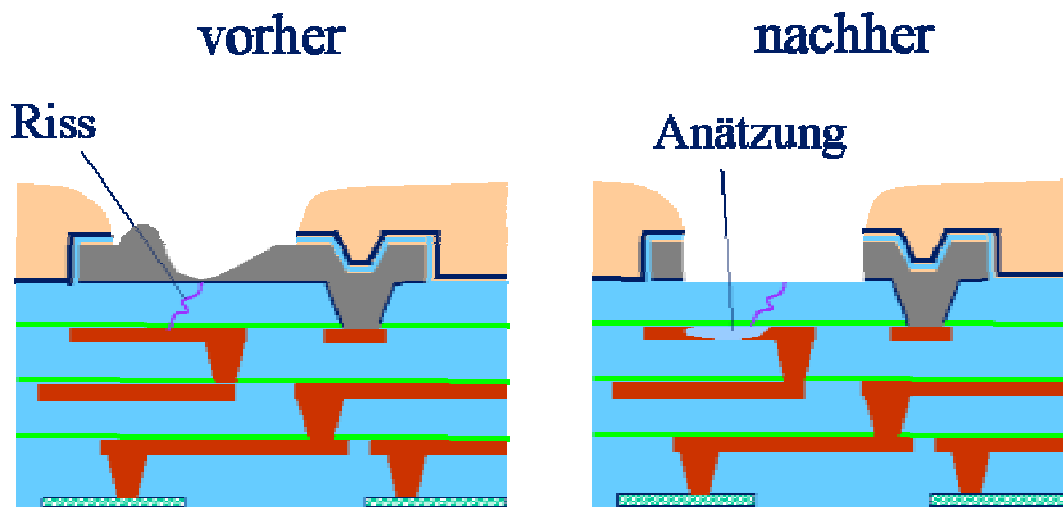


Abb. 3.3: Präparation von Oxid-Rissen

Die Risse im Oxid unter der Pad-Metallisierung sind so klein, dass sie im Lichtmikroskop selbst nach der Entfernung des Metalls und der Haftsicht (Liner) durch stark oxidierendes Königswasser („aqua regia“, 65%  $\text{HNO}_3$  und  $\text{HCl}$ , Mischungsverhältnis 1:3, Ätzzeit = 4min. bei  $40^\circ\text{C}$ ) schwer zu erkennen wären. Nur durch eine REM-Aufnahme kann man die Risse direkt sichtbar machen (Abb. 3.4, rechts), wobei die genaue Lage bekannt sein muss, was allerdings meist nicht der Fall ist. Deshalb wird in einem zweiten Arbeitsschritt die oberste Cu-Metallbahn angeätzt, indem die Säure durch den Riss an das Metall dringt und dadurch einen Riss im Dielektrikum indirekt durch eine im Lichtmikroskop sichtbare Verfärbung anzeigt (Abb. 3.4, links).

### 3.2 Versagensmechanismus durch Risse im Dielektrikum

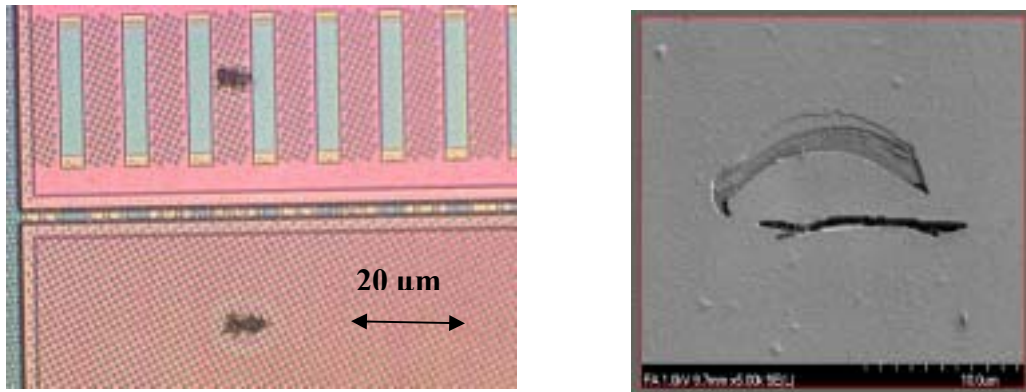


Abb. 3.4: Mikroskopaufnahmen von Oxid-Rissen verursacht durch Probing

Wird durch die Metallbahn ein elektrischer Strom geführt, so wirkt aufgrund von Kollisionen von Elektronen mit Ionen (und in geringerem Maße das elektrische Feld) eine kleine Kraft auf die Ionen, was zu einer systematischen Bewegung gegen die Stromrichtung führt [Bla69]. Nach einiger Zeit kommt es zu einem makroskopischen Materialtransport, der wesentlich zur Schädigung von Leiterbahnen in integrierten Schaltkreisen beiträgt. Die mittlere Lebensdauer bis zum Ausfall (MTTF) beträgt nach *Black*:

$$\text{Gl. (68)} \quad MTTF = \frac{A}{J^2} \cdot \exp\left(\frac{E_a}{k \cdot T}\right)$$

Die Konstante  $A$  ist dabei eine Materialkonstante,  $J$  die Stromdichte,  $E_a$  die Aktivierungsenergie für den Schädigungseffekt der Elektromigration,  $k$  die Boltzmannkonstante und  $T$  die Temperatur in der Leiterbahn.

Für freistehende Leitbahnstrukturen sowie vergrabene Leiterbahnen ohne Passivierung ist z. B. die Oberflächendiffusion von wesentlicher Bedeutung. Dem folgen die Grenzflächendiffusion, Korngrenzendiffusion und Volumendiffusion mit jeweils abnehmender Intensität. Welcher dieser Mechanismen vorherrschend ist, ergibt sich aus den Materialeigenschaften der Leitbahnmetallisierung und der applizierten Temperatur. Zudem spielen geometrische Schichtparameter wie die mittlere Korngröße und die Leitbahnstruktur eine entscheidende Rolle [Hau04]. Zur Diffusion ist es notwendig, daß der Energiezustand des diffundierenden Atoms vorübergehend angehoben wird. Dieser Energiebedarf wird Aktivierungsenergie genannt. Im Allgemeinen laufen deshalb Diffusionsvorgänge bei höheren Temperaturen schneller ab.

### 3.2 Versagensmechanismus durch Risse im Dielektrikum

Im Weiteren wird in dieser Arbeit auf die genauen Mechanismen und Einflüsse zur Oberflächendiffusion nicht weiter eingegangen. Entscheidend für die Ausbildung eines Leckstrompfades durch Oberflächendiffusion zwischen dem Alu-Pad und einer Cu-Metallbahn entlang der Rissoberfläche ist aber, dass die Diffusion durch Anlegen einer Potentialdifferenz zwischen den Leiterbahnen beschleunigt wird [Gon00].

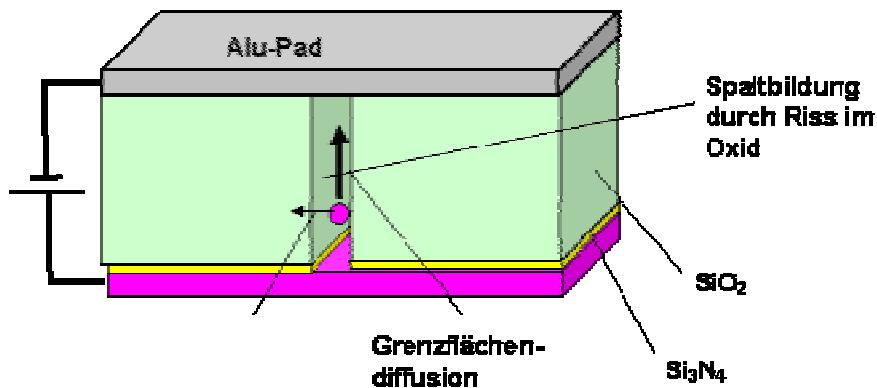


Abb. 3.5: Leckstrompfad-Ausbildung durch Oberflächendiffusion

An Teststrukturen, bei denen vorher durch hohe Kontaktkräfte gezielte Oxidrisse erzeugt wurden, konnte gezeigt werden, dass durch Anlegen eines positiven Spannungsfeldes ( $U_{\max}=200\text{V}$ ) bei erhöhter Temperatur ( $T=130^\circ\text{C}$ ) zwischen Aluminum-Pad und Kupfermetallbahn (Abb. 3.6) die Entstehung von Leckströmen beschleunigt wird [Hub05].

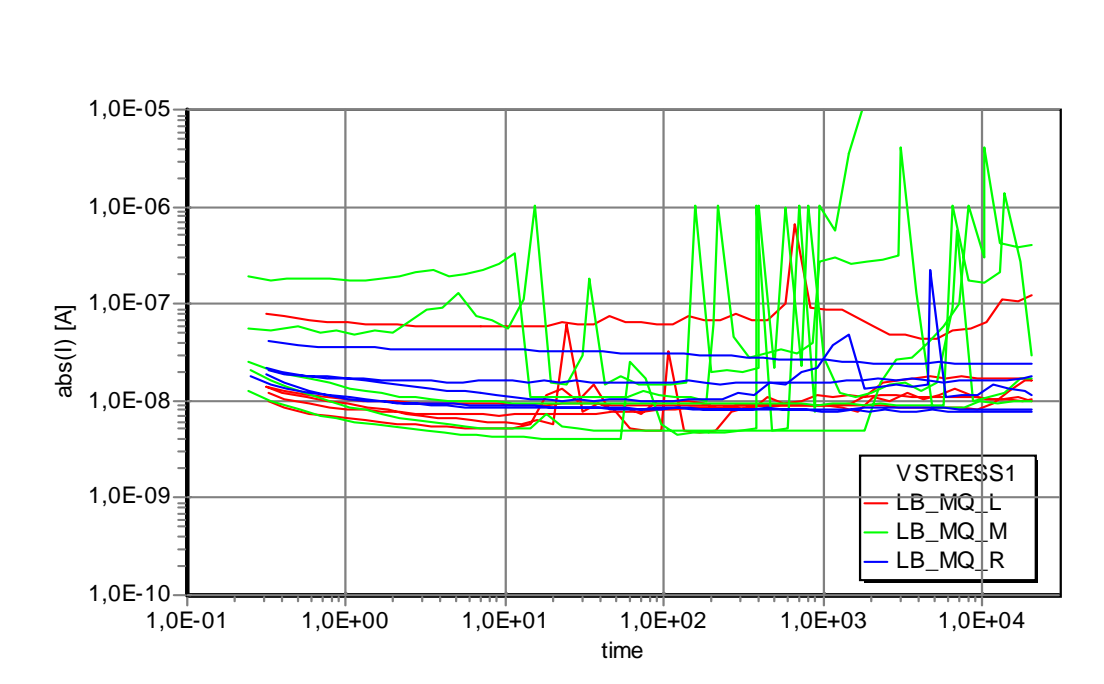
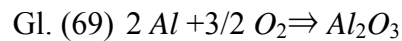


Abb. 3.6: Elektrische Aktivierung von Leckströmen an POAA-Strukturen

#### 3.3 Analyse der Pad-Oberfläche

Wie in Abschnitt 2.1.1 erläutert wurde, werden die Kontakt-Pads nach der Prozessierung der Mehrlagenverdrahtung als letzte Metallisierungsebene hergestellt und anschließend der Chip durch eine SiN-Passivierungsschicht und einen Polyimidschicht gegenüber der Umgebung und der Mold-Masse geschützt. Als letzter Prozessschritt wird das Pad wieder geöffnet, damit der Chip getestet (Probing) und gebondet werden kann. Die Oberflächen von Aluminium und Aluminiumlegierungen überziehen sich danach an der Umgebungsluft rasch (in  $\ll 1$  s) mit einem sehr dünnen, amorphen Oxidfilm durch Oxidation und Passivierung [Wef87]:



Die Oxidschichtdicke erreicht dabei Werte von 2 - 3 nm. Auch nach sehr langer (Jahre) Lagerzeit (bei Raumtemperatur, keine erhöhte Luftfeuchtigkeit) liegt sie unter 4 - 6 nm. Die Oxidschicht folgt meist perfekt der Oberflächenrauigkeit.

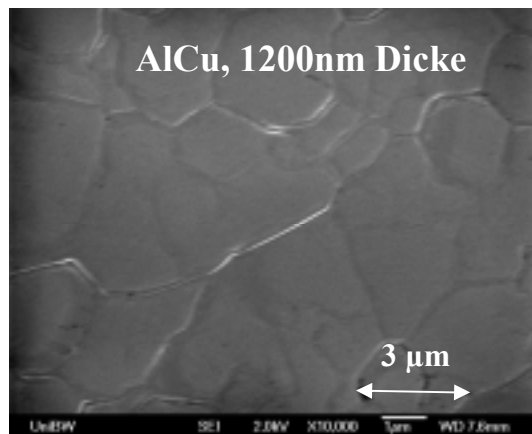


Abb. 3.7: REM-Aufnahme der AlCu-Padoberfläche

Auf einer realen Oberfläche mit ausgebildeten Korngrenzen (Abb. 3.7.) ist die Oxidschicht allerdings nie perfekt. Sie enthält Fehlstellen (Poren, Risse, etc.), gestörte Oxidbezirke oberhalb von Ausscheidungen (intermetallische Phasen) oder Einschlüsse sowie Oberflächenkontaminationen in physisorbierter (Adsorption durch physikalische Effekte, z.B. van-der-Waals-Kräfte) und chemisorbierter (Adsorption durch chemische Bindung) Form. Zudem geht man davon aus, dass die Oxidschicht nicht rein oxidisch ist, sondern vor allem in den äußeren Bereichen auch hydroxidischen Charakter hat. Immer ist aber eine innere, dichte Sperr-Oxidschicht vorhanden, die der Oberfläche die Passivität gegen unkontrollierte Oxidation und Korrosion verleiht.

### 3.3.1 Rauigkeitsmessung mit einem Indenter

Mit Hilfe eines Indenters, der in Kap. 4.1 ausführlich beschrieben wird, wurde die Rauigkeit von mit Aluminium beschichteten Proben nach dem normierten Tastschnittverfahren [DIN42] bestimmt. Bei der Rauheitsmessung mit dem Indenter wird eine Tastspitze aus Diamant mit konstanter Geschwindigkeit über die Oberfläche der Probe verfahren. Das Messprofil ergibt sich aus der vertikalen Lageverschiebung der Spitze. Zur messtechnischen Beschreibung der Oberfläche werden aus dem Messprofil genormte Rauheitskenngrößen gewonnen. Das Messprofil enthält die kurzwelligen Anteile der Oberflächenrauheit, die von langwelligen Merkmalen, der Welligkeit und, bei hinreichend langer Messstrecke, der Formabweichung, überlagert wird.

Es wurden folgende Messbedingungen gewählt:

- Abtastgeschwindigkeit  $1\mu\text{m/s}$
- Abtastkraft  $1\text{mN}$
- Tastspitzenradius  $5\mu\text{m}$
- Verfahrensweg  $100\mu\text{m}$

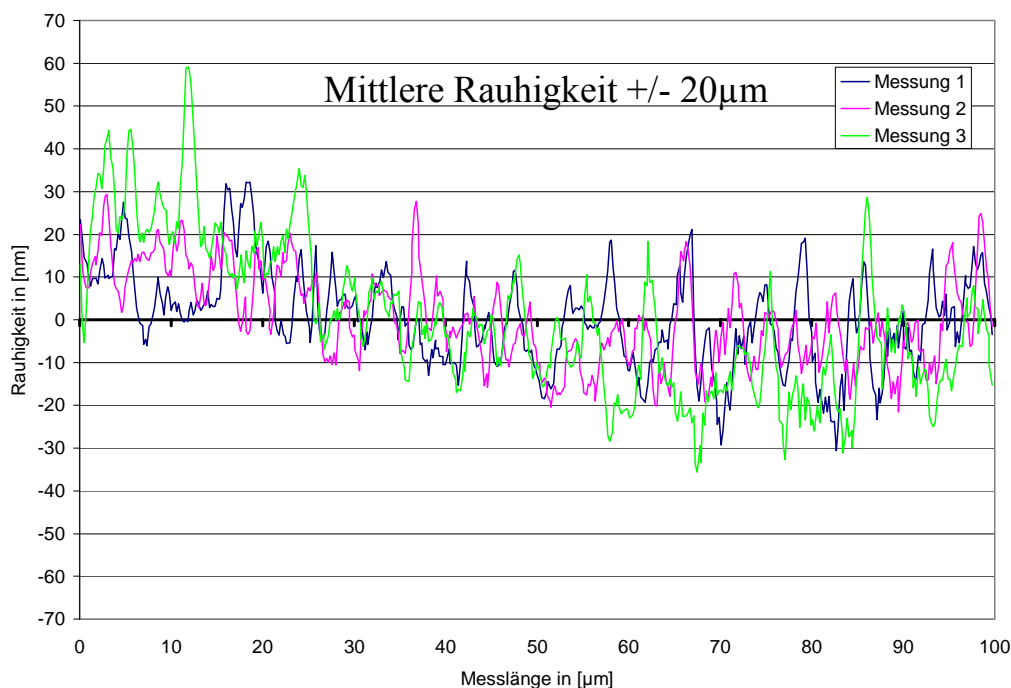
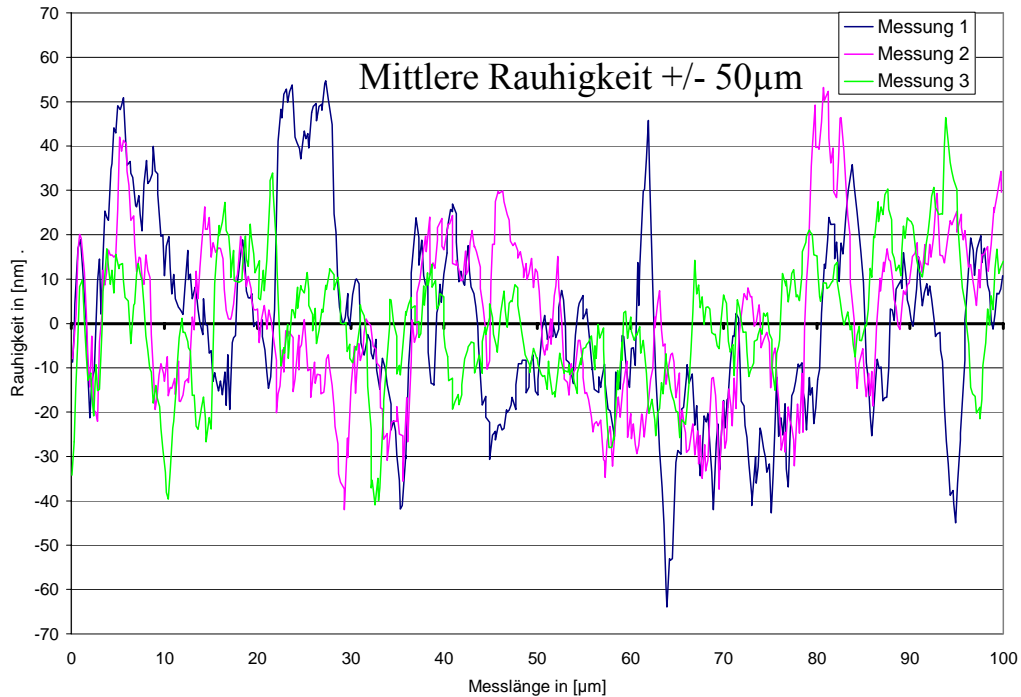


Abb. 3.8: Rauigkeit von AlCu; Dicke: 1200nm

### 3.3 Analyse der Pad-Oberfläche



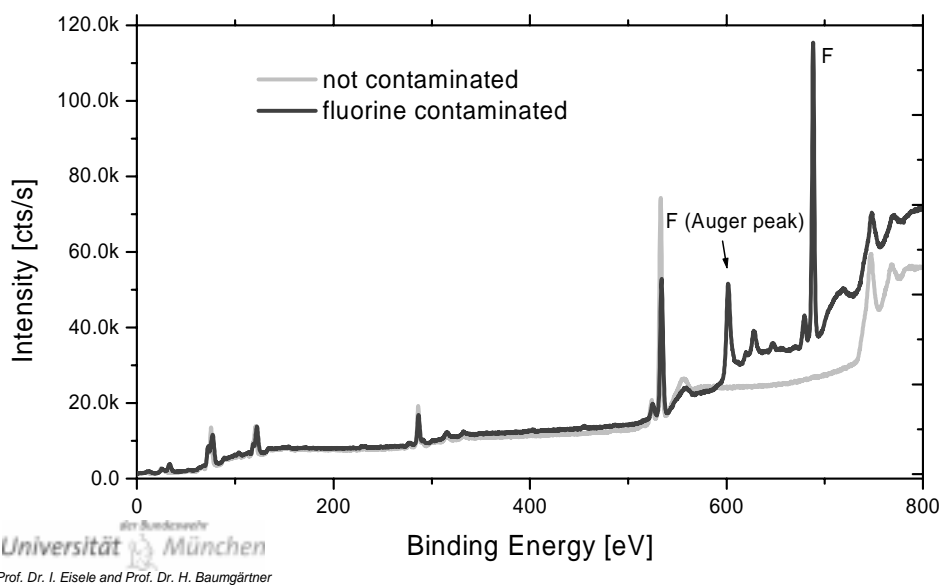
**Abb. 3.9: Rauigkeit von AlCu; Dicke: 2700nm**

Wie sich zeigt, hat die Dicke und das Abscheideverfahren einen deutlich messbaren Einfluss auf die Rauigkeit. Dickeres Aluminium hat dabei eine größere Rauigkeit als dünneres. Der Einfluss auf die elektrische Kontaktqualität und die Bruchhäufigkeit sind Gegenstand weiterer Untersuchungen (siehe Kap. 7). Tendenziell ist die Verschmutzung (Aluminium-Ablagerungen auf der Nadelspitze) bei dickeren Metallisierungsschichten stärker.

### 3.4 Einfluss der Fluor-Kontamination

Wie bereits erwähnt, ist Aluminium in der heutigen Halbleitertechnologie weiterhin ein häufig verwendetes Material. Eine weithin verbreitete Theorie besagt, dass die Güte des Kontaktwiderstands beim Probing in erster Linie durch Aluminiumoxid, das sich auf der Oberfläche der Pads bildet, bestimmt wird. [Bro04], [Kog04]. In [Rei08] wurde dargelegt, dass neben natürlichen Oxidschichten außerdem Fluor-Verunreinigungen eine entscheidende Rolle auf das Kontaktverhalten spielen. Verursacht wird die Kontamination durch die Verwendung von Fluorine-Plasma bei der Passivierungsöffnung der Pads. In [Hua03] wurde gezeigt, dass durch die Exposition von Aluminiumpads durch Fluorine-Plasma abnormal dicke Oxid-Lagen von mehr als 50nm Dicke entstehen können.

Bei Betrachtung eines durch Röntgen-Photoelektronenspektroskopie (XPS) ermittelten Spektrums von Aluminium-Proben wird die Fluor-Kontamination sichtbar. Untersucht wurden eine unbehandelte Probe und eine mit Fluor-Plasma behandelte Probe. Bei der kontaminierten Probe ist deutlich eine Intensitätsspitze bei der Bindungsenergie für Fluor (chem. Zeichen: F) zu erkennen.



**Abb. 3.10: XPS-Analyse von Aluminium-Wafer mit und ohne F-Kontamination**

Für eine ausführliche Beschreibung dieser Thematik wird auf die Dissertation von Markus Reinl, Universität der Bundeswehr, Institut für Physik, die zeitgleich und ergänzend zu dieser Arbeit durchgeführt wurde, verwiesen.

### 3.4 Einfluss der Fluor-Kontamination

#### 3.4.1 Reihenmessungen des Kontaktwiderstandes mit einer Cantilever-Nadelkarte

Der Einfluss auf die Kontaktstabilität durch F-Kontamination auf einen unstrukturierten flächig Al-beschichteten Wafer wurde mit einer produktionstauglichen Cantilever-Probekarte untersucht. In Tab. 2 sind die relevanten Nadelparameter der 3-lagigen Prüfkarte aufgelistet. Der Nadelkarten-Hersteller *MJC* hat die Konstruktion und Fertigung des Nadelringes und die Montage auf ein PCB für den Tester *Teradyne-J750* nach Vorgabe durchgeführt. Die Kontaktkraft (Spalte „Contact Force“) ist dabei für jede Lage mit ca. 60mN (hier Angabe in g) bei einem Federweg (abgekürzt OD) von 70µm berechnet.

Layer	Needle diameter (µ)	Angle	OFD (µ?)	Tip length (µ?)	Tip diameter (µ?)	Taper angle	Bending	Beam	Knee	Taper	Contact force (g)	Scrub amount (µ?)
1	015	6.52	75	300	25	4.8	101	3020	0061	1.27	642	14
2	015	7.61	75	450	25	4.0	102	3020	0068	1.45	627	16
3	015	8.69	75	600	25	3.5	103	3020	0073	1.59	616	19

Tab. 2: Spezifikation einer 3-lagigen Cantilever-Probekarte

Die Cantilever-Nadelkarte für den Testchip *GUPIP-L90*, der in Kap. 7.1 ausführlich beschrieben ist, hat insgesamt 110 Nadeln im Abstand von 60µm. Mit Hilfe eines speziell für die Charakterisierung von Produktions-Prüfkarten verschiedener Halbleiter-Testsysteme entwickelte Messtool *CRES-V2* ist es möglich, den Kontaktwiderstand von bis zu 128 Nadeln parallel unter weitgehend realen Produktionsbedingungen zu messen. In Abb. 3.11 ist der Verlauf des gemittelten CRes bei einem Messstrom pro Nadel von 10mA für einen unbehandelten und einen F-kontaminierten Wafer als Funktion der Kontaktanzahl („Touchdowns“) gezeigt. Der zulässige Wert ist mit 5 Ohm angesetzt, was den typischen Anforderungen des digitalen IC-Tests entspricht. Während der Kontaktwiderstand bei dem unbehandelten Wafer über eine Dauer von >2500 Kontaktierungen konstant bei ca. 2 Ohm bleibt, ist bei der Messung auf dem kontaminierten Wafer schon von Beginn an ein höherer Wert zu beobachten. Der Kontaktwiderstand wird schnell instabil und steigt nach ca. 1000 Kontaktierungen im Mittel über 5 Ohm und im weiteren Verlauf deutlich über 10 Ohm. Der negative Einfluss von Fluor beim Prozess der Passivierungsöffnung auf den Wafertest ist damit verdeutlicht. Es sind daher weitere Untersuchungen und Prozessoptimierungen notwendig.



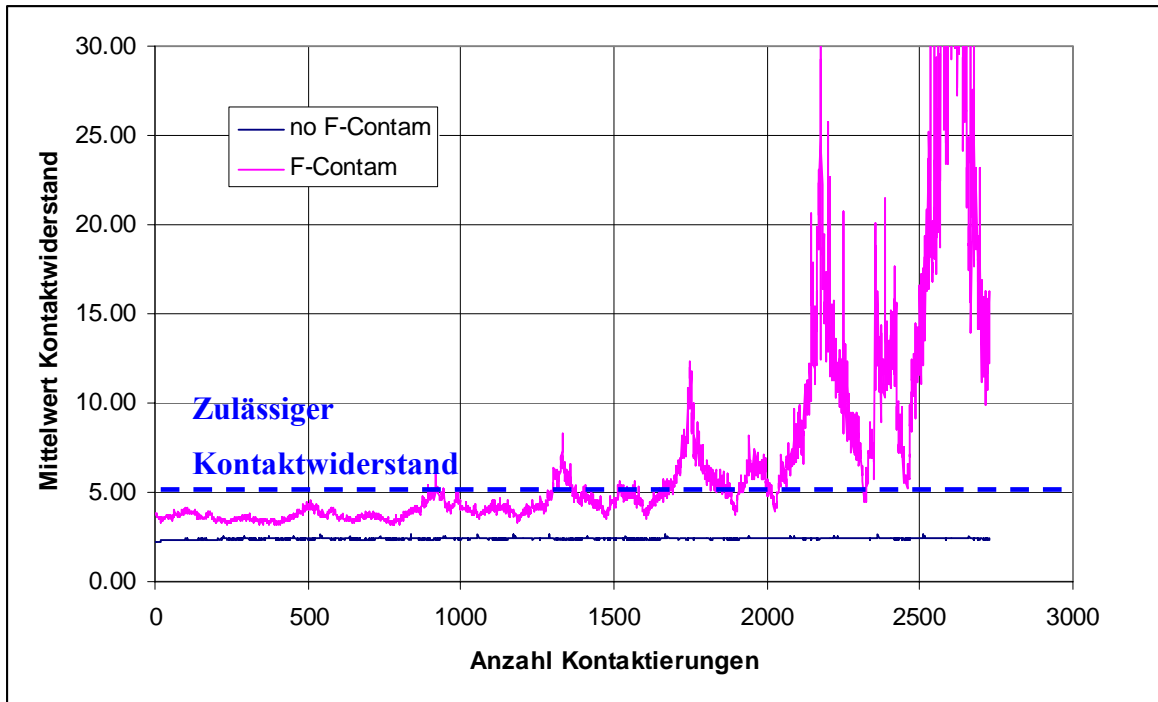


Abb. 3.11: Kontaktwiderstand einer Cantilever-Nadelkarte auf AlCu-Wafer ohne/mit F-Kontamination

## 4 Pad-Charakterisierung durch Nanoindentierung

Die Methode der Nanoindentierung ist von der klassischen Härteprüfung abgeleitet, bei der ein harter Prüfkörper in das zu untersuchende Material gedrückt wird. Während des Versuchs werden aufgebrachte Kraft und Eindringweg der Spitze simultan gemessen. Dies ermöglicht bei bekannter Geometrie der Spitze die Ermittlung der Kontaktfläche bei einer bestimmten Last, woraus die Härte unmittelbar berechnet werden kann (siehe Kap. 1.2.5). Durch die Messung des Weges kann nun nicht nur die Härte als Maß für den Widerstand eines Materials gegen plastische Verformung bestimmt werden, sondern auch die Elastizität des Materials.

Als Ausgangspunkt für die Berechnung von Härte und elastischem Modul dienen sogenannte „load-displacement-curves“ (siehe Abb. 4.4). In der Praxis werden auswertbare Versuche bis zu Eindringtiefen von nur 10 nm durchgeführt, diese untere Grenze hängt allerdings stark von der Rauigkeit der Probenoberfläche ab. Es können lokale mechanische Eigenschaften von Probenvolumina im Mikro- und Nanometerbereich gemessen werden. Ein verbreitetes Anwendungsgebiet der Nanoindentierung ist die mechanische Charakterisierung von dünnen Schichten, da hier sehr kleine Eindringtiefen erforderlich sind, um den Einfluss des Grundmaterials (Substrats) auf die Messergebnisse zu vermeiden. Die Messspitze dient dabei sowohl zur Indentierung als auch zur Abbildung der Oberflächentopographie einer Probe (vgl. Kap.3.3.1).

### 4.1 Beschreibung des Indenters

Für die hier durchgeführten Indentierungsexperimente wurde der in Abb. 4.1 dargestellte Nanoindenter G200 der Firma MTS Systems Corporation (Nano Instruments Innovation Center, Oak Ridge, Tennessee) benutzt. Dieses Messsystem ermöglicht es, registrierende Kontaktexperimente mit Kräften und Eindringtiefen von 50 nN und 0,01 nm durchzuführen.



Abb. 4.1: MTS G200 Nano-Indenter

## 4.1 Beschreibung des Indenters

Das Kompakt-Gerät besteht aus dem Indenterkopf, dem in der Ebene verfahrbaren Probenstisch mit bis zu 5 Halterungen, dem Auflichtmikroskop und der elektronischen Steuereinheit. Zur Ausstattung gehört außerdem ein schwingungsgedämpfter Tisch, ein Gehäuse zum Schutz vor Umgebungseinflüssen (Temperatur, Schmutz, ESD-Strahlung, Schall) und ein PC mit Microsoft-XP Betriebssystem.

Das Kernstück des Nanoindenters ist der Indenterkopf, der in Abb. 4.2 im Prinzip dargestellt ist. Er beinhaltet die Aktorik zur Kraftsteuerung, welche auf den elektromagnetischen Wechselwirkungen eines Spulen-Ankersystems beruht, und die Sensorik zur Wegmessung, die mit einem Dreiplattenkondensator realisiert wird. Durch diesen hardwareseitigen Aufbau ergibt sich eine kraft- oder weg-gesteuerte Arbeitsweise.

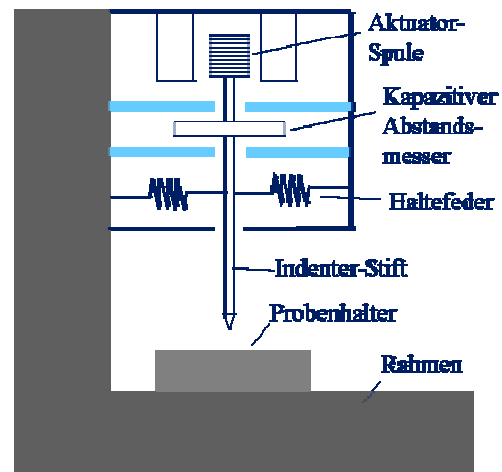


Abb. 4.2: Aufbau des Indenter-Kopfes

Das Gerät, das mit der Option „Ultra-low load range“ ausgestattet ist, hat eine Wegauflösung von 0.002nm. Die Kraftauflösung beträgt 1nN bei einer maximalen Last von 10mN. Die Steuerung, Makro-Programmierung und Datenauswertung wird mit Hilfe der mitgelieferten Software *TestWorks-4* bewerkstelligt, die es dem Anwender ermöglicht, beliebige Belastungsalgorithmen zu simulieren.

Der Nanoindenter G200 wurde für 3 Zielsetzungen verwendet, die in dieser Arbeit von Relevanz sind:

- Messung der Oberflächenrauigkeit → Kap. 3.3.1
- Materialcharakterisierung (E-Modul und Universalhärte) → Kap.4.2
- Charakterisierung der von rissempfindlichen Pad-Strukturen → Kap.7.2

Eine ausführliche Beschreibung der Methoden und Ergebnisse ist in den genannten Kapiteln vorhanden.

## 4.2 Messung der Universal-Härte und E-Modul

Im Rahmen der Härtemessung wurden die Indenter-Spitzen mit Grundflächen in Form eines Quadrates (*Vickers- Indenter*) benutzt. Dieser Indenter ist geometrisch selbstähnlich und die Kontaktflächenfunktion, welche die mit der Probe in Kontakt stehende Fläche in Abhängigkeit von der Eindringtiefe beschreibt, ist proportional zum Quadrat der Eindringtiefe (siehe Kap.1.2.5).

In Abb. 4.3 ist eine typische Kraft-Eindringtiefe Messung mit einem Vickers-Indenter dargestellt. Die Probe ist ein AlCu-beschichteter Si-Wafer mit einer Dicke der Metallisierungsschicht von 1200nm. Die maximale Eindringtiefe  $h_{\max}$  ist dabei auf 500nm begrenzt. Es ergibt sich eine maximale Kraft  $F_{\max}$  von ca. 12mN und eine verbleibende Eindringtiefe  $h_p$  von ca. 470nm. Mit diesen Werten und der Steigung  $S$  der Entlastungskurve kann mit den Gleichungen aus Kap. 1.2.5 die Universal-Härte  $H_U$  und der reduzierte E-Modul  $E_r$  bei dieser Eindringtiefe berechnet werden.

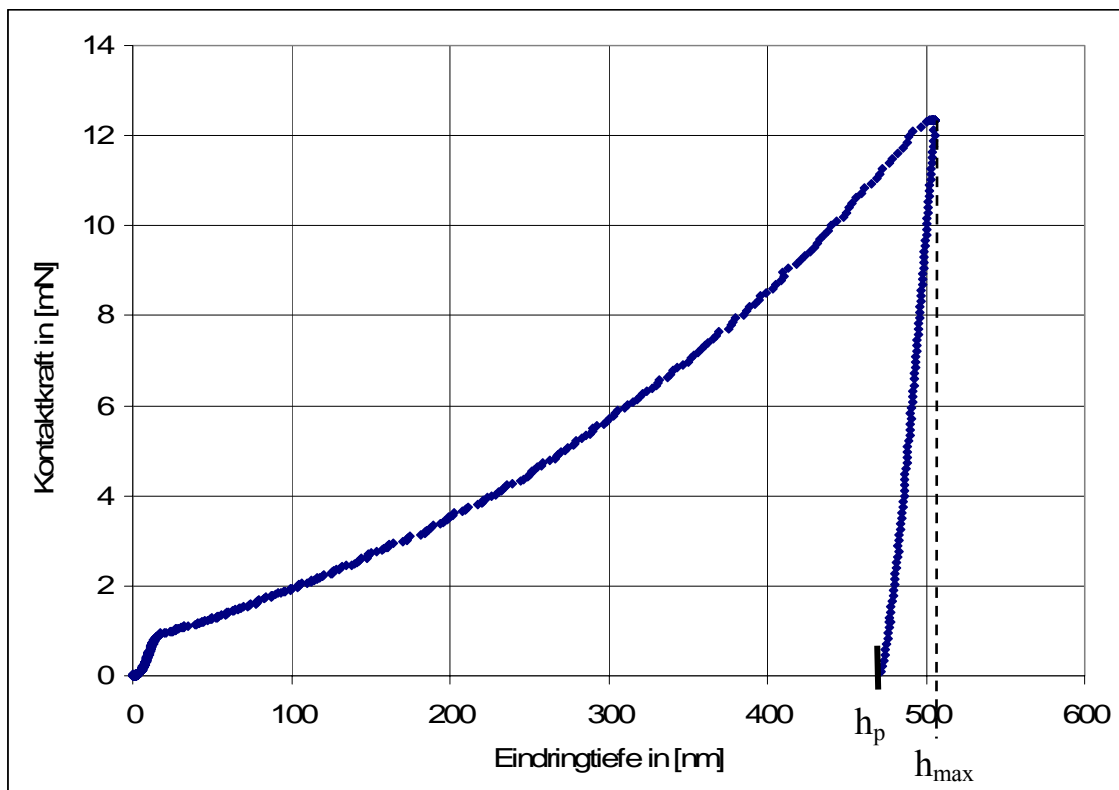


Abb. 4.3: Kraft-Eindringtiefe Kurve für Aluminium-Wafer

Bei kristallinen Materialien mit glatter Oberfläche kann eine plötzlich einsetzende plastische Deformation während des Indentierens auftreten [Goe01], [End01]. Die plastische Verformung macht sich in Sprüngen in der Kräfteindringkurve, dem sogenannten "Pop-In" Effekt, bemerkbar (Abb. 4.4). Aufnahmen der Oberfläche vor und nach der Indentierung zeigen, dass bis zu einer kritischen Last die Verformung rein elastisch erfolgt.

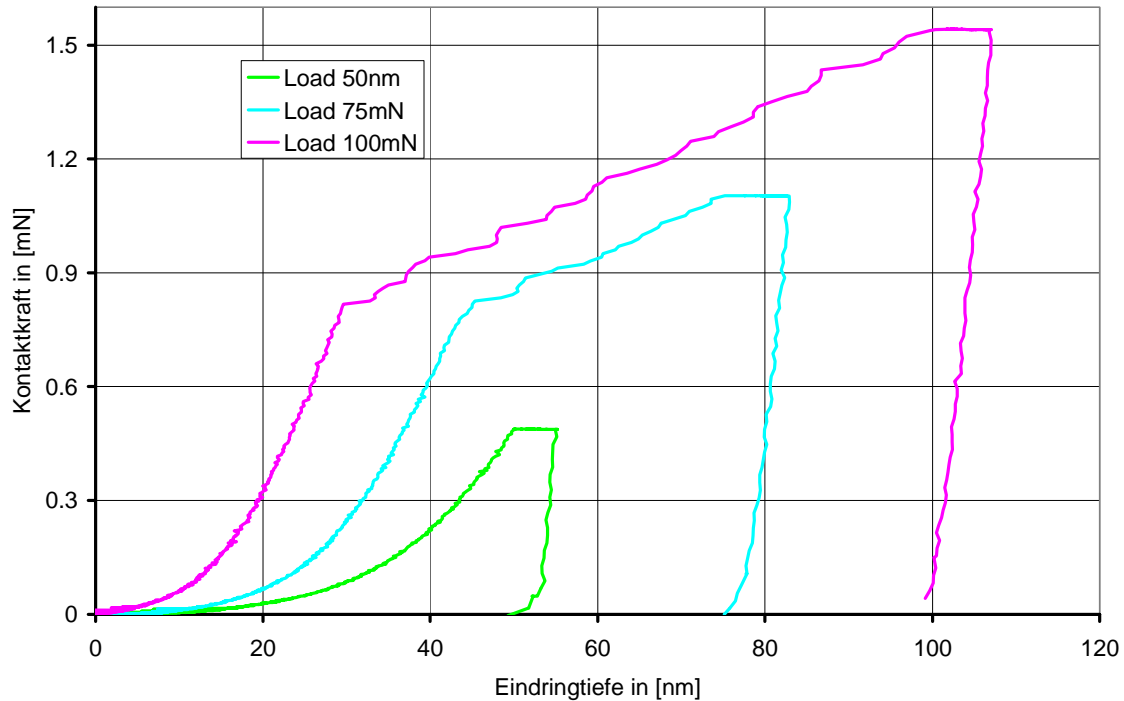


Abb. 4.4: Kraft-Eindring-Kurve für kleine Prüfkraft

Weiterhin wird häufig eine Zunahme der Härte mit abnehmender Eindringtiefe gemessen. Verschiedene Effekte, wie z. B. Oxidfilme, Verformungsschichten, usw. können zu einer Zunahme der Härte mit abnehmender Eindringtiefe führen. Bei vielen kristallinen Materialien beruht die Härtezunahme jedoch auf einer materialabhängigen Größenskala und wird als *indentation-size effect* bezeichnet. Theoretische Betrachtungen von [Nix02] konnten die experimentell gefundene Tiefenabhängigkeit der Härte auf die Dichte von geometrisch notwendigen Versetzungen zurückführen.

Unter Berücksichtigung der Effekte bei der Nanoindentation wurden beschichtete Wafer unterschiedlicher Dicke hinsichtlich Härte und E-Modul untersucht. Dafür wurde in Schritten von 20nm bis 200nm (Schrittweite wächst mit zunehmender Eindringtiefe) bei jeweils konstanten Parametern 5-mal eine Kraft-Eindringtiefe-Kurve aufgenommen.

## 4.2 Messung der Universal-Härte und E-Modul

Material Sample	Indenter Type	Min. Indentation Depth	Max. Indentation Depth	Hold time	No. of iterations
-	-	nm	nm	s	-
AlCu; 1200nm	Vickers Tip Diamond Included Angle 136°	20	1500	10	5
AlCu; 2700nm	Vickers Tip Diamond Included Angle 136°	20	3000	10	5

Tab. 3: Versuchsplan Härte – und E-Modul-Messung mit Nanoindenter

Wie in Abb. 4.5 zu erkennen ist, fallen die Härte und der E-Modul zunächst steil ab und bleiben dann bis zum Erreichen des Trägersubstrates Si nahezu konstant. Bei ca. 50% der Schichtdicke ist bei der Härte der Substrateffekt sichtbar, d.h. die Härte wird im Wesentlichen von der Eigenschaft des härteren Trägersubstrates bestimmt.

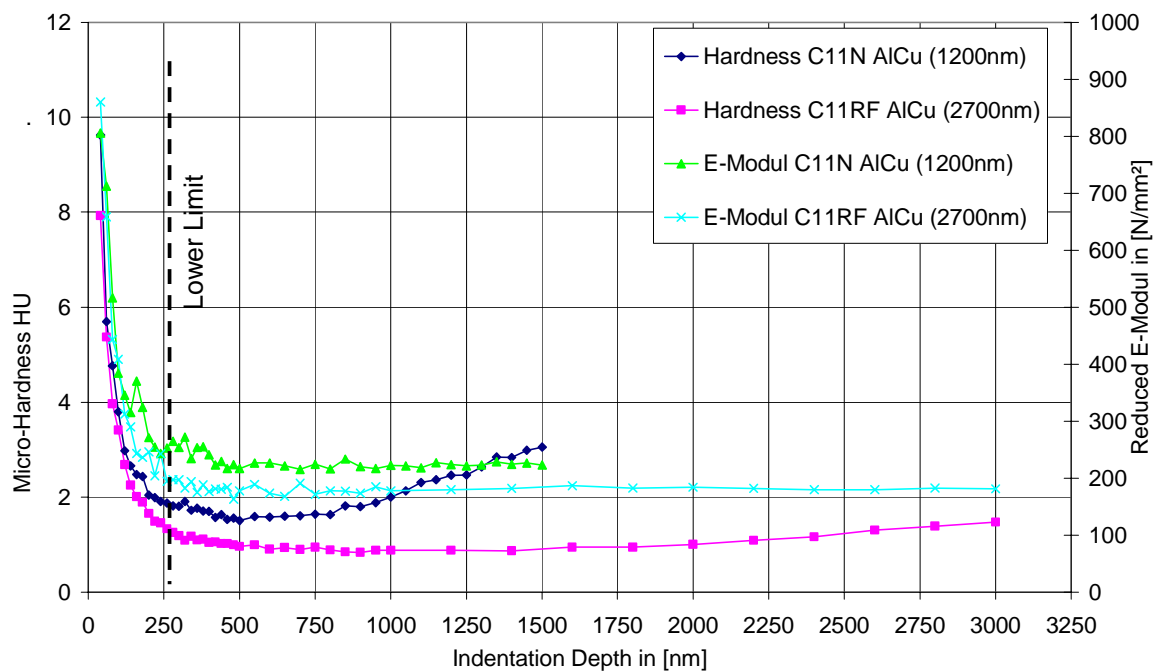
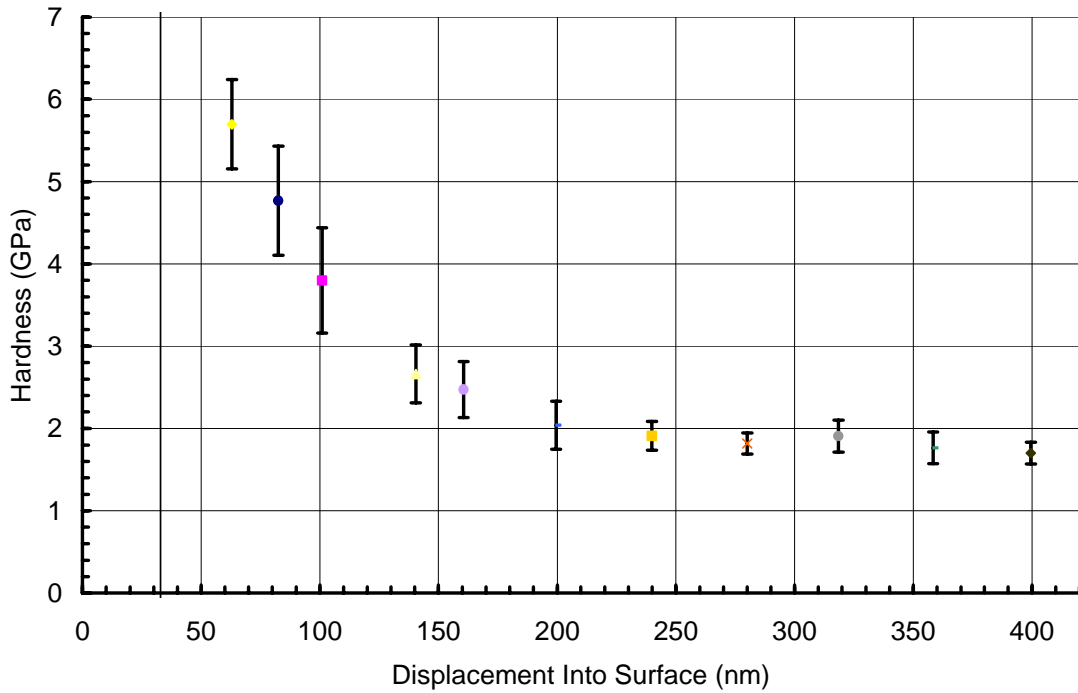


Abb. 4.5: Härte- und E-Modul Messung von verschiedenen AlCu-Schichtdicken

Der Abfall der Messwerte ist dabei unter anderem auf die Rauigkeit der Probe (siehe Kap. 3.3.1) zurückzuführen, weshalb erst ab einer Eindringtiefe von 250nm mit zuverlässigen Werten zu rechnen ist. Das zeigt sich auch in einer stärkeren Streuung der Werte (10 Wiederholungen) bei kleinen Eindringtiefen.



**Abb. 4.6:** Streuung der Härte bei Änderung der Eindringtiefe

## 5 Kontakt-Messungen an Einzelnadeln

Um ein tieferes Verständnis des grundlegenden physikalischen Verhaltens von Kontaktelementen (Nadeln) der verschiedenen Probing-Technologien zu erlangen, wurde im Rahmen dieser Arbeit in Zusammenarbeit mit dem Institut für Physik der Universität der Bundeswehr ein Messgerät [Nag01] entwickelt, mit dem die Charakteristik von Einzelnadeln unter definierten Bedingungen ermittelt werden kann. Stichpunktartig können mit dem Messgerät u. a. folgende fundamentale Untersuchungen durchgeführt werden:

- Ermittlung der Kontaktkräfte von beliebigen Kontaktfedern
- Ermittlung des Kontaktwiderstandes von beliebigen Kontaktfedern
- Bestimmung des minimalen Federweges bei erforderlichen Kontaktwiderstand
- Evaluierung von Reinigungsverfahren zur Verbesserung der Kontaktstabilität
- Untersuchung des elektrisch induzierten oder durch abrasive Reinigungsverfahren verursachten Nadelverschleisses
- Fritting (siehe Kap. 1.1.3)
- Evaluierung von Kontaktmaterialien (Nadel und/oder Pad)

### 5.1 Entwicklung eines Messtools zur Kontaktkraft und –widerstandsmessung

In Abb. 5.2 ist das Gerät schematisch dargestellt. Für die Positionierung im Sub-Mikrometerbereich der Probe und Auslenkung der Nadel entlang den 3 Raumachsen x, y und z ist jeweils ein Linear Motor der Fa. PI vorhanden. Die vertikale Wegauflösung vom hier verwendeten Modell M501 beträgt 25nm bei einem maximalen Verfahrensweg von 12,5mm. Die Kraftmessung entlang den Achsen x (laterale Kraft) und z (vertikale Kraft) wird mit Hilfe von speziellen hochauflösenden Sensoren der Fa. HBM ermöglicht. Für die Auswahl des Kraftsensors kam es neben der geringen Größe und Gewicht auf eine geeignete Krafteinleitung an, um auch größere Proben ohne Messfehler zu vermessen. Dies wird durch eine sogenannte Offset-Kompensation erreicht, die eine konstruktive Kombination der x- und z-Sensoren erlaubt. Der Sensor hat eine Kraftauflösung von  $< 0,5\text{mN}$ .



Abb. 5.1: Kraftsensor der Fa. HBM



## 5.1 Entwicklung eines Messtools zur Kontaktkraft und –widerstandsmessung

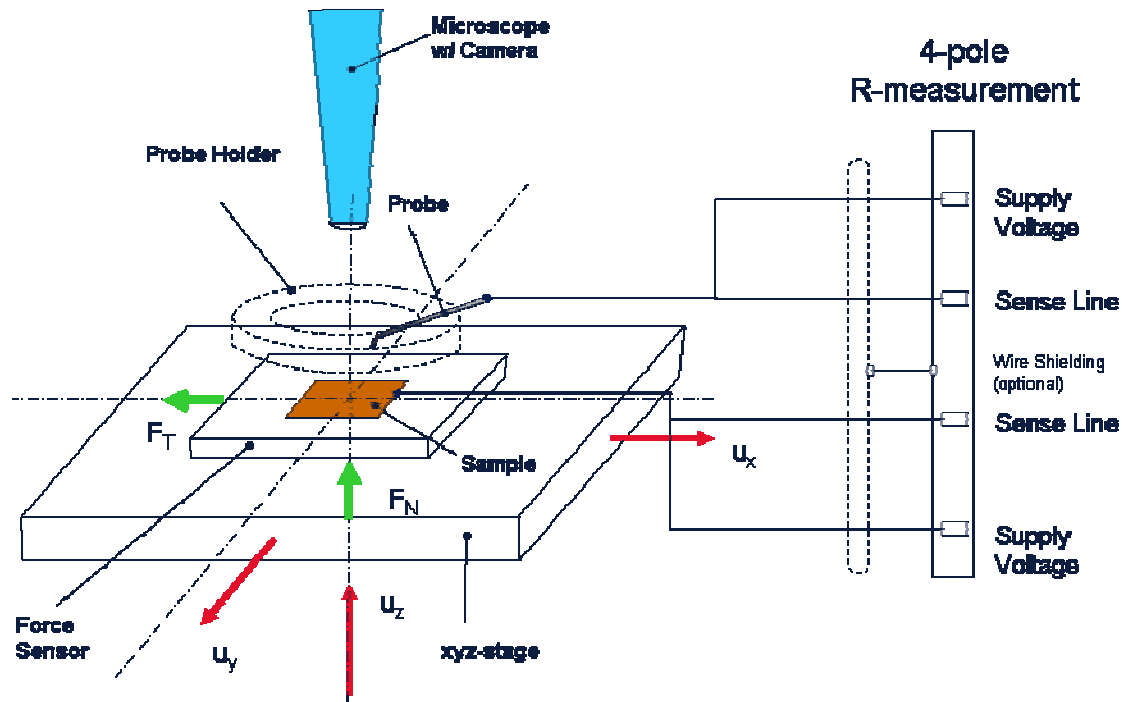


Abb. 5.2: Schematische Darstellung des Einzelnadel-Messplatzes

Die Widerstandsmessung erfolgt nach der in Kap. 1.1.4 beschriebenen 4-Punkt-Messung. Die elektronische Datenerfassung und -protokollierung wird mittels eines Einkanal-Messverstärkers (Fa. HBM Modell ML35B) realisiert, der als Einschub in das passende Messverstärkersystem MGCplus inklusive der erforderlichen Analysesoftware *catman@AP* adaptiert wird.

Um die Probe zu fixieren und elektrisch anzuschließen, wurde eine spezielle Aufnahme aus besonders leichtem Material, das aber dennoch eine genügend große Festigkeit und Stabilität aufweist, eigens für den Messplatz konstruiert (s. Anlage). Die Probe wird durch einen Vakuum-Halter fixiert und zusätzlich im Falle einer Kontaktwiderstandsmessung auf flächig leitenden Materialien über ein leitendes Kupfer-Klebeband elektrisch angeschlossen. Die Einzelnadel, die auf einer Universal-Steckplatine assembliert ist (Abb. 5.4), wird auf einen Rahmen über der Positioniereinheit und Probenhalterung, verschraubt.



Abb. 5.3: Einzelnadel-Messplatz

## 5.2 Messdatenerfassung in Echtzeit

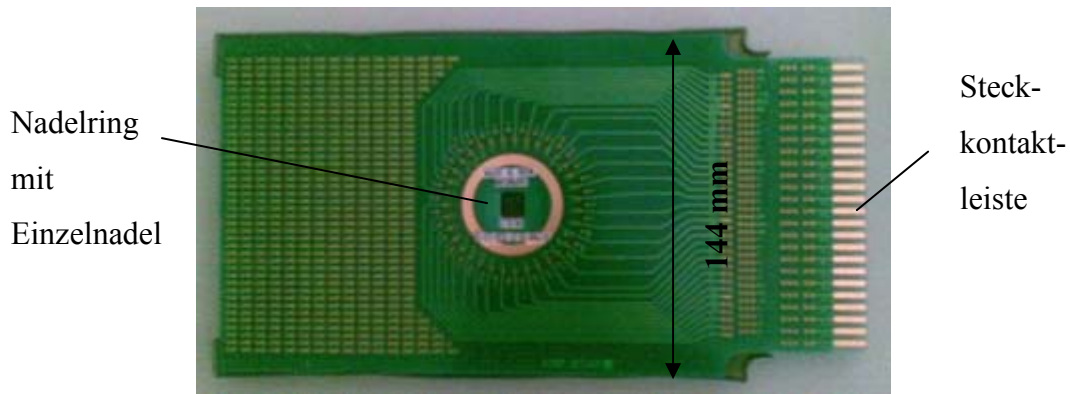


Abb. 5.4: Assemblierte Einzelnadel auf PCB

Die Konstruktion wurde in einen bereits vorhandenen manuellen Prober der Fa. *Cascade Microtech Inc.* integriert, der mit einem Mikroskop mit aufgesteckter CCD-Kamera ausgestattet war (Abb. 5.3). Dadurch ist es möglich (sofern die Prüfkarte im Bereich der Nadel eine Öffnung aufweist), die Nadel zur Probe optisch auszurichten. Die Steuerung über einen PC und Programmierung des Messplatzes wurde mit der Software *LabView*® realisiert. Die Erstellung von Messroutinen erfolgt durch eine einfache Programmiersprache über Macro's .

## 5.2 Messdatenerfassung in Echtzeit

Mit Hilfe des Messplatzes ist es nun möglich, die wesentlichen Parameter, die beim Probing auftreten, statisch und dynamisch auf verschiedenen Kontakt-Materialien zu messen. In Abb. 5.5 und Abb. 5.6 ist der Verlauf von lateraler und vertikaler Kontaktkraft sowie des sich daraus ergebenden elektrischen Widerstandes über der Zeit und als Funktion des Federweges (= OD) dargestellt.

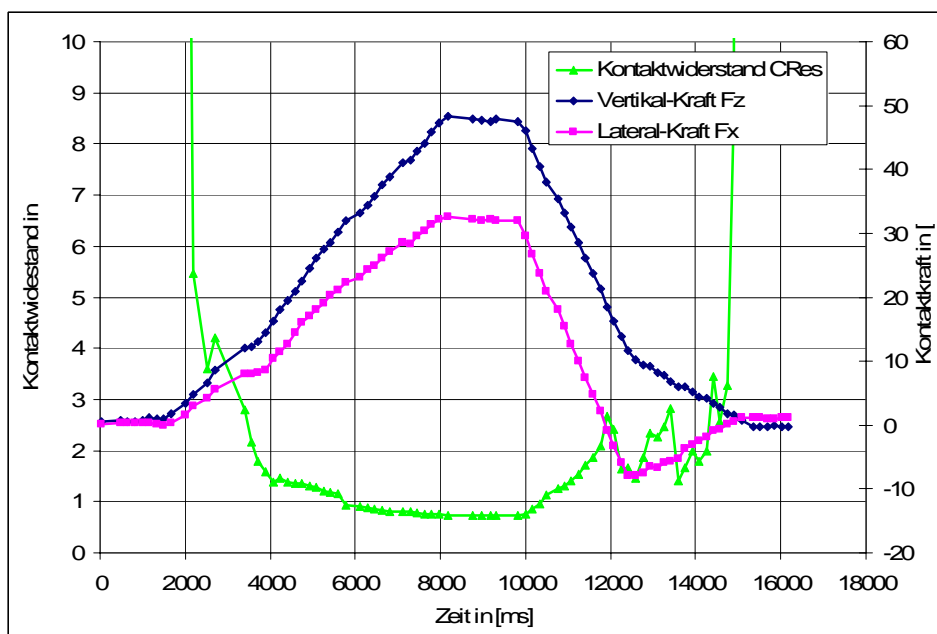


Abb. 5.5: Dynamischer Verlauf von Kontaktkraft und -widerstand über der Zeit

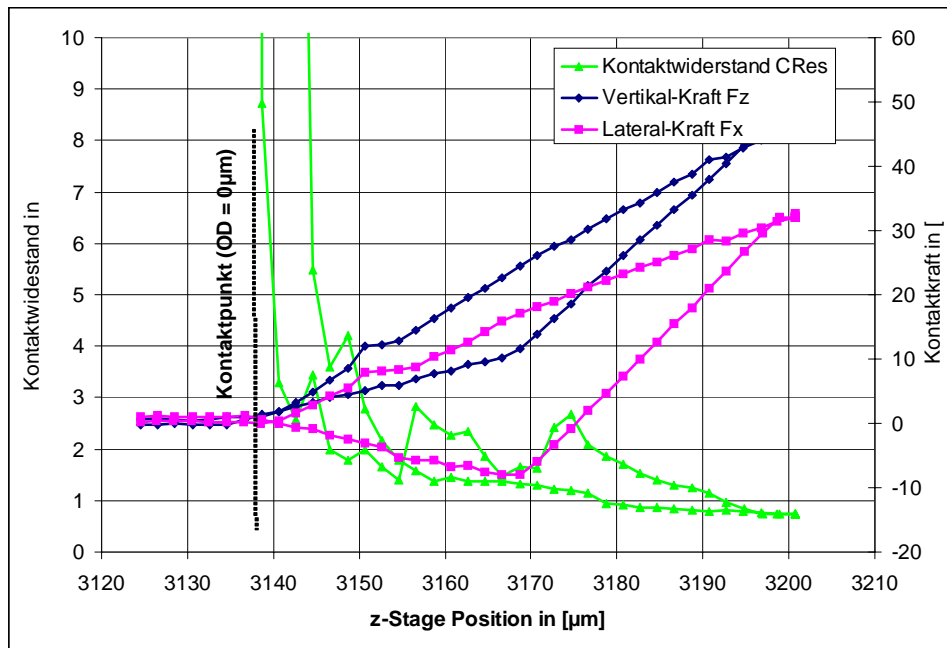


Abb. 5.6: Dynamischer Verlauf von Kontaktkraft und -widerstand über OD

Die Messung erfolgte mit einer Referenznadel auf einem flächig abgeschiedenen Aluminium-Substrat (Dicke 1200nm). Der z-Stage wurde dabei zunächst mit konstanter Geschwindigkeit ( $10\mu\text{m/s}$ ) nach oben bewegt. Beim Erreichen des Kontaktpunktes steigen die Vertikal- und Lateralkräfte linear an, während der Kontaktwiderstand schnell abfällt und asymptotisch gegen den Leitungs- und Schichtwiderstand (hier ca. 800 mOhm) zu seinem Minimum  $C_{\text{res, min}}$  läuft. Hat die Nadel seinen maximal gewählte Auslenkung erreicht, bleibt der z-Stage für eine beliebig lange Haltezeit  $t_{\text{H}}$  in Position und fährt anschließend wieder mit konstanter Geschwindigkeit in die Ausgangsposition. Zu Beachten ist, dass die Vertikalkraft  $F_z$  dabei sich nur wenig vom Verlauf mit ansteigender Kraft unterscheidet, während die Lateralkraft  $F_x$  zunächst steiler abfällt und dann sogar in einen negativen Bereich geht (Abb. 5.6).

### 5.3 Engewiderstandmessung auf Gold-Beschichtung

Durch eine sehr langsame Erhöhung des Overdrives kann man durch die Kontaktierung auf Materialien, die keine oder nur geringe Fremdschichten bilden, den Engewiderstand  $R_E$  in Abhängigkeit der Kontaktkraft erfassen und damit die analytische Lösung bei bekannten Materialwerten aus Gl. 9 verifizieren. Als Kontaktmaterial eignet sich dafür am besten Gold, das keine Oxidschichten im Gegensatz zu unedlen Metallen aufweist.

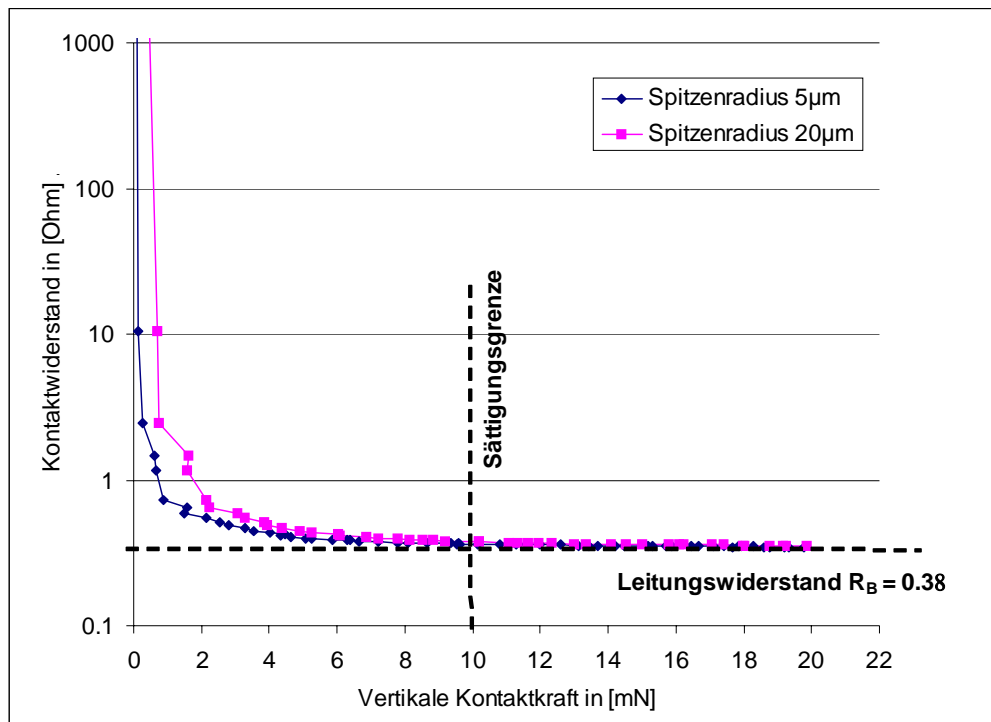


Abb. 5.7: Kontaktwiderstand auf Gold für verschiedene Spitzendurchmesser

In Abb. 5.7 ist zu erkennen, dass der Kontaktwiderstand mit zunehmender Kontaktkraft schnell in Sättigung geht und schon ab einer Kontaktkraft von ca. 10mN nicht mehr weiter abfällt. Der Einfluss von Fremdschichten ist bei Verwendung einer gereinigten Nadel weitgehend zu vernachlässigen und daher nur vom Engewiderstand  $R_E$  sowie vom Widerstand  $R_B$  der Kontaktkörper bestimmt. Man kann auch nur einen geringen Einfluss bei größerem Nadelspitzendurchmesser erkennen.

### 5.4 Variation von Kontaktmaterial und Nadelgeometrie

Es lag die Vermutung nahe, dass die Schichtdicke sowohl einen Einfluss auf den elektrischen Kontakt hat, aber auch die Kontaktkraft einer Cantilever-Nadel in normaler und lateraler Richtung durch eine Änderung der kinematischen Randbedingungen (Reibung zwischen Nadelspitze und Oberfläche) beeinflusst. Diese Annahme wurde durch Messungen mit Referenznadel mit den beiden Spitzen-Durchmesser  $10\mu\text{m}$  und  $20\mu\text{m}$  an dem Einzelnadelmessplatz überprüft. In Tab. 4 sind die Nadelparame-ter 1. Ordnung aufgeführt (vgl. Abb. 2.7).

Variant	Needle diameter	Material	Tip Length	Tip diameter	Angle	Beam Length
	$\mu\text{m}$		$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$	deg.	$\mu\text{m}$
14	80	ReW	400	10	12	1450
11	80	ReW	400	20	9	1450

Tab. 4: Designparameter der Referenznadeln

Zunächst wurde mit Nadel-Variante 14 (Spitzendurchmesser  $10\mu\text{m}$ ) die Kontaktkraft gemessen. Wie erwartet, ist der Verlauf der Kontaktkraft bei Änderung der Dicke der Metallschicht unterschiedlich. Bei der dickeren Schicht ist sowohl die Normalkomponente der Kontaktkraft (Abb. 5.8) größer, aber noch deutlicher die Lateralkomponente (Abb. 5.9). Die Messungen belegen dabei die Gültigkeit der analytischen Formel in Kap. 2.3. Dieser Effekt ist bei der Auslegung von Schichten für POAA zu berücksichtigen.

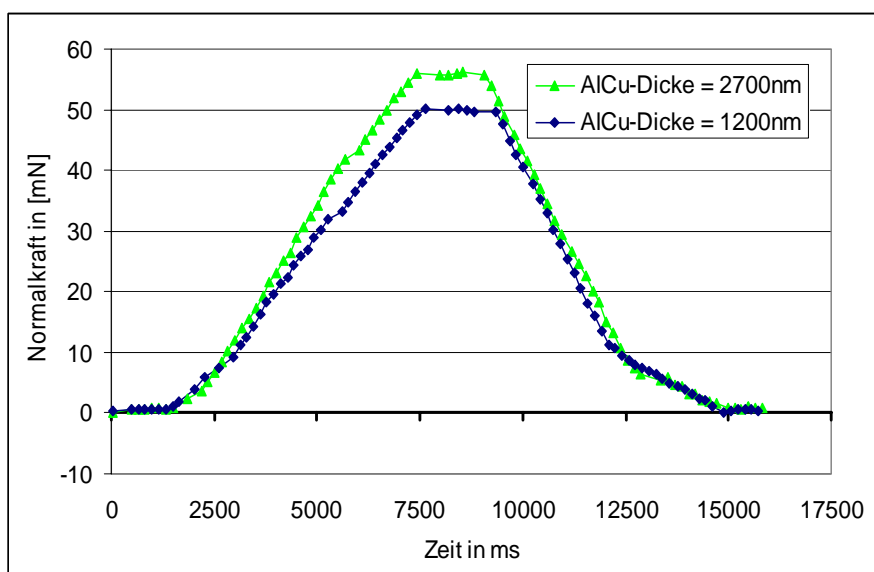


Abb. 5.8: Zeitl. Normalkraftverlauf einer Einzelnadel für verschiedene Aluminiumdicken

## 5.4 Variation von Kontaktmaterial und Nadelgeometrie

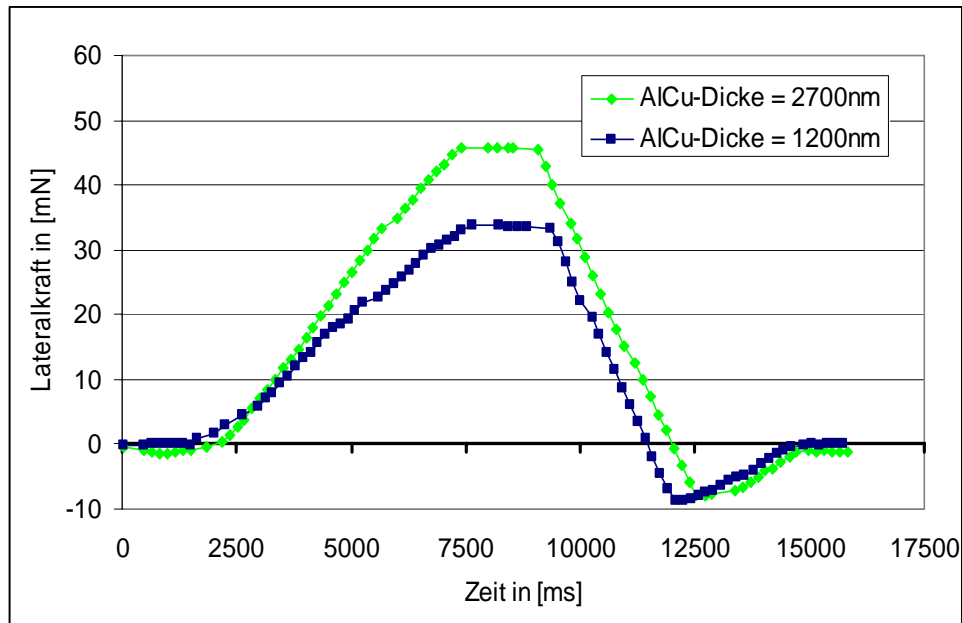


Abb. 5.9: Zeitl. Lateralkraftverlauf einer Einzelnadel für verschiedene Aluminiumdicken

Welchen entscheidenden Einfluss das Kontaktmaterial auf die Kontaktkraft hat, ist in Abb. deutlich zu erkennen. Bei beiden Nadelvarianten ist bei den untersuchten Materialien Glas, Goldschicht oder Aluminiumschicht ein Unterschied in der Normalkraft von bis zu 70% ausgehend vom niedrigsten Wert 30mN auf Glas, messbar. Das analoge Verhalten zeigt sich für die Lateralkraft (hier nicht dargestellt).

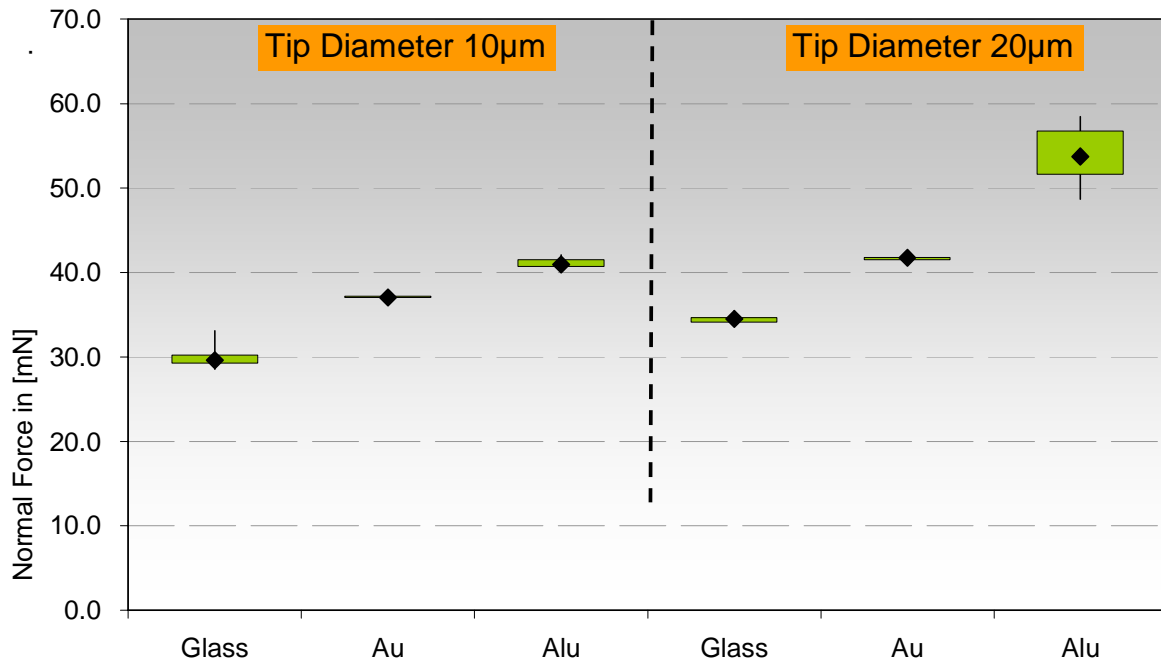


Abb. 5.10: Einfluss des Kontaktmaterials auf die Normalkraft

## 5.4 Variation von Kontaktmaterial und Nadelgeometrie

Wie oben erwähnt, wurde der Einfluss des Spitzendurchmessers auf die absolute Größe und Streuung des Kontaktwiderstandes (CRes) untersucht. Die Messwerte, dargestellt als Boxplot in Abb. 5.11, wurden bei einem Overdrive von  $60\mu\text{m}$  auf einem Aluminium-Wafer mit  $1200\text{nm}$  Schichtdicke ermittelt. Insgesamt wurden 20 Wiederholmessungen gemacht.

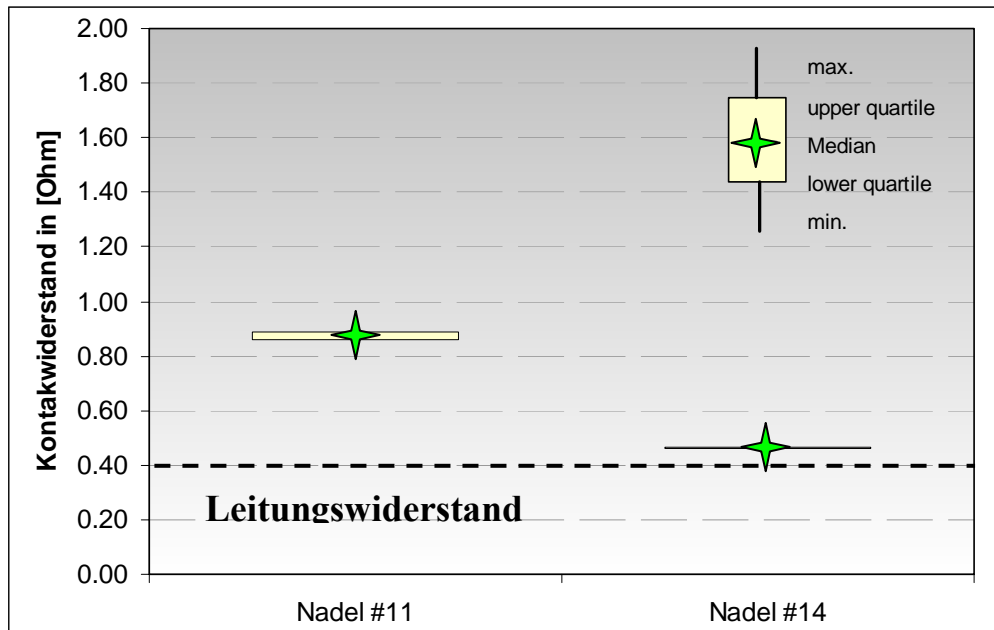


Abb. 5.11: Streuung von Kontaktwiderstand bei Variation des Spitzendurchmessers

Lässt man den Leitungs- und Schichtwiderstand, der hier bei ca.  $400\text{m}\Omega$  liegt, unberücksichtigt, hat die Nadel mit der dünneren Spitze (Variante #14) einen erkennbar geringeren Kontaktwiderstand. Die Streuung um den Median ist bei beiden Varianten innerhalb 20 Kontakten sehr gering. In diesem Zusammenhang ist es wichtig darauf hinzuweisen, dass bei einer quasi-statischen Messung, wie hier Fall, der Selbstreinigungseffekt der Cantilever-Nadeln nicht vorhanden ist, so dass schon nach weniger als 50 Kontakten ein abrasive oder chemische Reinigung der Nadeln empfehlenswert ist.

### 5.5 Optimierung eines Nadeldesign für Probing-over-Active-Area

Nachdem die theoretischen und praktischen Voraussetzungen für eine vollständige Charakterisierung einer Cantilever-Nadel gegeben sind, kann eine Optimierung der Nadelgeometrie erfolgen. Ziel ist dabei, die Kontaktkraft in vertikaler und lateraler Richtung zu minimieren, dabei aber gleichzeitig einen zuverlässigen elektrischen Kontakt zu gewährleisten. Als Randbedingung ist die Konstruktion und das Materialverhalten (keine plastische Verformung) der Nadel zu berücksichtigen, um eine noch genügend große mechanische Stabilität beim produktiven Einsatz zu sichern.

#### 5.5.1 Versuchsreihe zur Bestimmung der Zielvarianten

Für eine Optimierung der Nadeln wurden zunächst die wesentlichen Parameter, die bei Prüfkarten, die in der Produktion zum Einsatz kommen, identifiziert. Diese sind die Spitzenlänge, der Spitzendurchmesser und der Anstellwinkel  $\alpha$ .

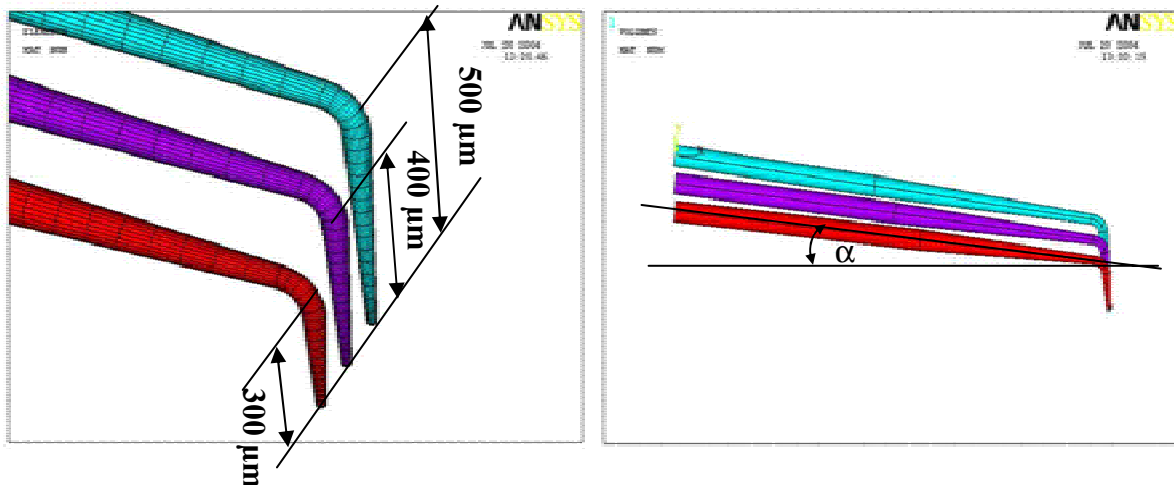


Abb. 5.12: Schematische Darstellung einer 3-lagigen Nadelanordnung

Dafür wurden zunächst insgesamt 18 verschiedene Einzelnadeln vom Hersteller MJC zu 2 Gruppen (mit 10µm und 20µm Spitzendurchmesser) mit jeweils 9 verschiedenen Design-Varianten untersucht. Ziel des Versuchs war es, aus den 18 Varianten 3 optimale Referenz-Nadeln zu identifizieren, mit denen es möglich ist, eine 3-lagige Nadelkarte für einen Chip mindestens 60µm Pad-Pitch zu konstruieren..



## 5.5 Optimierung eines Nadeldesign für Probing-over-Active-Area

Die Zielgrößen bei der Auslegung der Nadelgeometrie war die Kontaktkraft und die Scrub-Länge, die innerhalb den vorgegebenen Werten liegen sollte.

Variant	Needle diameter	Tip Length	Tip diameter	Angle	Beam Length	Scrub amount	Normal force
No.	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$	deg.	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$	g
1	80	300	10	6	1450	18.5	3.75
-		400		9		-	
18		500		12		29	4.80

Tab. 5: Versuchsmatrix der untersuchten Nadelvarianten

Die Versuchsparameter Overdrive und Chuck-Speed wurden mit  $60\mu\text{m}$  und  $0.5\mu\text{m/s}$  gewählt. Es wurden pro Nadel Messwerte von jeweils 20 Kontaktierungen aufgenommen. Wie vorher beschrieben, ist die vertikale und laterale Kontaktkraft, die einen unmittelbaren Einfluss auf die Eindringtiefe der Nadelspitze in das Padmaterial hat, möglichst gering zu halten. Deshalb war die Eindringtiefe die wesentliche Optimierungsgröße, anhand der die optimale Nadelgeometrie identifizierbar ist.

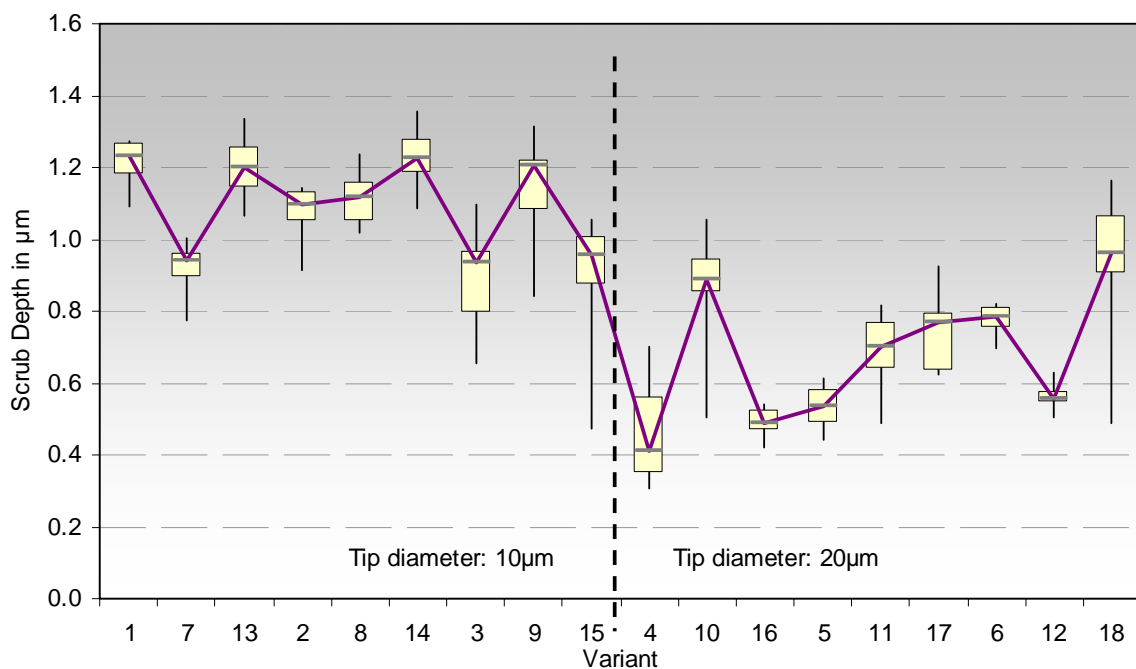


Abb. 5.13: Streuung der Eindringtiefe in 1200nm Alu-Schicht bei 20 Kontaktierungen

Aus Abb. 5.13 wird deutlich dass der Spitzendurchmesser der Parameter 1.Ordnung im Hinblick auf die Eindringtiefe hat. Ein klarer Zusammenhang mit den Parametern Spitzenlänge und Anstellwinkel war nicht eindeutig erkennbar.

### 5.5.2 Charakterisierung der Zielvarianten

Ausgehend von den Ergebnissen der vorausgehenden Versuchsreihe wurde jeweils ein Nadeldesign pro Lage identifiziert, das als Basis für einen Referentz Entwurf dient. Dabei wurden noch mal vom Hersteller MJC die exakten Nadelparameter, die für die Langzeit-Stabilität und Robustheit wichtig sind, optimiert. Außerdem wurde sichergestellt, dass das Referenzlayout der Nadel auch möglichst universell für Nadelkarten, die später in der Produktion eingesetzt werden, repräsentativ ist. Das Ergebnis für die Nadellagen 1-3 ist in Tab. 6 zusammengefasst.

Needle diameter $\mu\text{m}$	Angle	Tip length $\mu\text{m}$	Tip diameter $\mu\text{m}$	Beam length	Contact force (g)	Scrub amount ( $\mu\text{m}$ )
0.10	5.6	300	20	2150	3.13	12
0.10	7.1	400	20	2150	3.28	13
0.10	8.6	500	20	2150	3.10	13

Tab. 6: Nadelparameter der Zielvarianten 1-3

Entsprechend den genannten Parametern wurden pro Typ jeweils 3 Nadeln gefertigt (insgesamt 9) und auf Erfüllung der Design-Spezifikation überprüft. In Abb. 5.14 sind die Kontaktkräfte als Boxplot (Min., Max., 25%-Quartil, 75%-Quartil, Median) mit den Kontaktmaterialien Glas und Alu-Wafer (Schichtdicke 1200nm) bei einem Overdrive von  $70\mu\text{m}$  dargestellt.

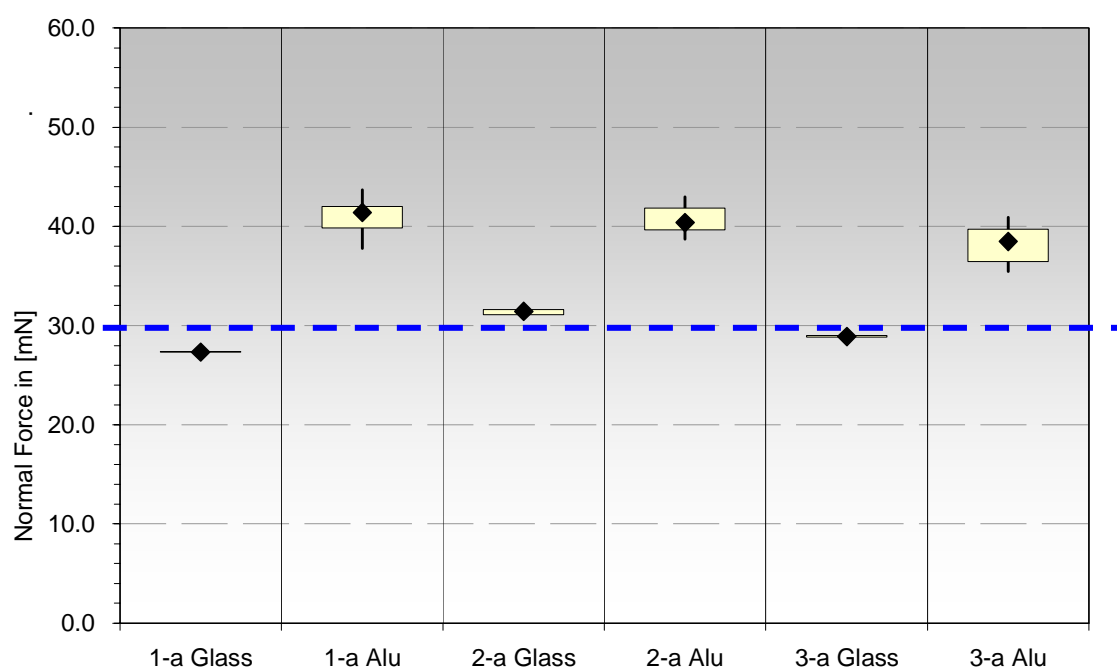


Abb. 5.14: Vertikale Kontaktkraft für Referenznadeln auf Glass und Alu-Wafer

## 5.5 Optimierung eines Nadeldesign für Probing-over-Active-Area

Die vom Hersteller spezifizierte Kontaktkraft von 30mN wird dabei bei der Messung auf einer harten Oberfläche (hier: Glas) gut eingehalten. Bei der Messung auf Aluminium sind auch hier um ca. 30% höhere Werte festzustellen.

Betrachtet man die Eindringtiefe der Nadelspitze in 1200nm dickes Aluminium im Verhältnis zu Kontaktkraft (stellt man fest, dass sich bei 3x3 Varianten (je 3 Nadeln mit Spitzenlänge 300, 400 und 500 $\mu$ m) die Werte nicht stark unterscheiden. Beim Ausreißer rechts in der Grafik wurde allerdings eine deutlich höher als spezifizierte Kontaktkraft gemessen.

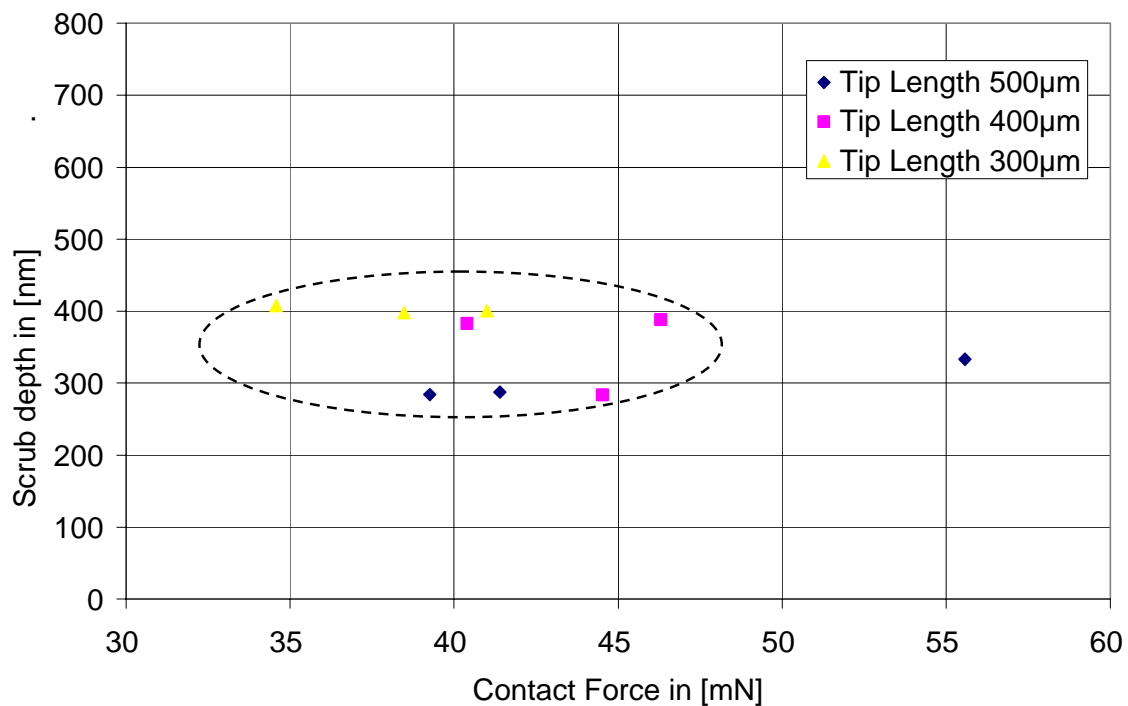


Abb. 5.15: Verhältnis Eindringtiefe zu Kontaktkraft bei Zielvarianten

## 6 FEM-Simulation der Kontaktkräfte und Spannungen

Die Methode der Finiten Elemente Methode (FEM) gehört zu den wichtigsten und am häufigsten verwendeten numerischen Lösungsverfahren zur Lösung von Differentialgleichungen in der Mechanik [Jun01]. Entwickelt wurde die Methode zur Lösung strukturmechanischer Problemstellungen, für die es im Allgemeinen keine analytische Lösung gibt.

Nach der Entwicklung der theoretischen Grundlagen der FEM in der Mitte des letzten Jahrhunderts erfolgte deren Einführung zunächst im Bereich der Luft- und Raumfahrtindustrie. In den achtziger Jahren wurde die FEM in der Automobilindustrie eingeführt. Durch den Rückgang der Preise für leistungsfähige Hard- und Software ist die Anwendung der FEM heute auch in anderen Industriebranchen wie die Elektro- und Halbleiterindustrie etabliert.

In der Statik und Festigkeitslehre können mit diesem Berechnungsverfahren zum Beispiel Spannungen, Verformungen, Dehnungen und Reaktionskräfte an Bauteilen und Baugruppen berechnet werden. In der Dynamik bzw. Schwingungslehre werden damit unter anderem die Eigenfrequenzen und die Eigenformen schwingender Strukturen ermittelt. Insbesondere im industriellen Umfeld hat sich die FEM aufgrund ihrer Flexibilität und Schnelligkeit als numerisches Standardberechnungsverfahren durchgesetzt. Für die hier gezeigten Simulationen wurde die Software *ANSYS*, Version 10.0 verwendet [Ans10].

Eine zu analysierende Struktur wird nach erfolgter Idealisierung (Eliminierung berechnungsirrelevanter Details) in kleine Bereiche unterteilt, d.h. diskretisiert. Für diese Elemente lassen sich dann Gleichungen aufstellen. Innerhalb der Elemente wird die mechanische Theorie simuliert. An den Übergängen von einem zum nächsten Element, an denen Unstetigkeiten und Sprünge in den Zustandsgrößen vorkommen, entsteht ein Fehler in der Berechnung. Die Genauigkeit der Berechnung hängt unter anderem von der Diskretisierung des Systems ab und daher ist die FEM aufgrund der notwendigen Diskretisierung und der Interpolation innerhalb der Elemente, ein Approximationsverfahren.

## 6.1 Elastischer Kontakt auf homogenem Material

Es wurden bereits einige Arbeiten über FEM-Simulationen von Pads über aktiven Strukturen vorgestellt [Awa04], [Bro03]. Der Schwerpunkt lag dabei in der Simulation des Bondingvorganges, bei dem wie beim Probing eine Kontaktkraft auf das Pad ausgeübt wird, was zu Zuverlässigkeitsproblemen führen kann [Yon05]. Ziel wurden die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Spannungsverteilung von Schichtstrukturen beim Chip-Bonding ermittelt und der Schichtaufbau und Materialien optimiert. In dieser Arbeit wird zunächst der Kugel- und Stempelindruck auf homogenem Material als 2D-Modell berechnet und mit den theoretischen Werten (siehe Kap. 1.3) verglichen. Im Weiteren werden der Einfluss von Tangentialbewegungen sowie der Lastfall auf einem Material-Verbund betrachtet.

Im ersten Schritt ist es wichtig, eine geeignete Modellierung der Spitzenform möglichst realitätsnah zu machen. Neben den idealen Fällen sphärisch und flach gibt es die Zwischenformen halbrund und flach mit abgerundeten Ecken. Für die Materialparameter E-Modul und Poissonzahl, die für eine linear-elastische Rechnung nötig sind, wird bei der Spitze der Werkstoff Diamant vorausgesetzt.

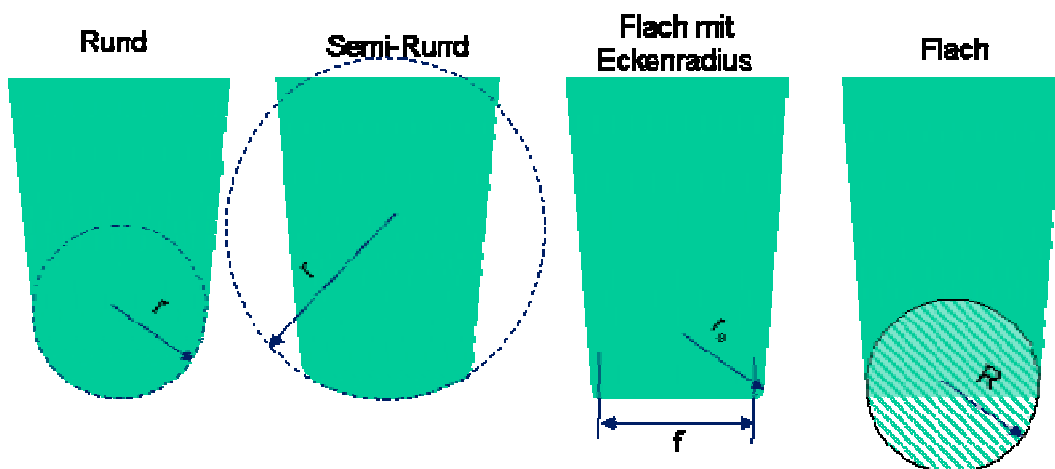


Abb. 6.1: Variationen der Spitzenformen

Die ebene Kontaktfläche wird zunächst als homogen betrachtet, d.h. die tatsächliche POAA-Struktur wird als elastischer Körper mit den aus der Literatur entnommenen Materialwerten (siehe Anhang) von Siliziumoxid modelliert.

## 6.1 Elastischer Kontakt auf homogenem Material

Um den Kontaktvorgang zwischen Kugel bzw. Stempel zu simulieren, wurden in das FEM-Modell sogenannte Surface-to-Surface Kontaktelemente implementiert. Da die Rechenleistung bei einem 3D-Modell beschränkt ist, wurden die FEM-Simulation bei den hier betrachteten Lastfällen nur als 2D-Modell durchgeführt, was aber für ein grundsätzliches Verständnis der POAA-Kontaktproblematik ausreichend ist [Deg04].

Für die Modellierung und Auswertung der Simulationsergebnisse wurde ein textbasiertes Makro-Programm für die Software ANSYS-10.0 entworfen, das im Anhang aufgelistet ist. Damit ist eine vollständig parametrisierte Rechnung verschiedener Lastfälle und Geometrieänderung jederzeit möglich.

In Abb. 6.2 sind die in Elemente diskretisierten Modelle schematisch für den Fall Kugel und Stempel dargestellt. Die Kontaktkörper werden mit einer vertikalen Kraft  $F_K$  auf die ebene Oberfläche gedrückt und können in lateraler Richtung darüber gleiten, wobei ein variabler Reibungskoeffizient  $\mu$  für die Berechnung der Reaktionskräfte und –Spannungen berücksichtigt werden kann.

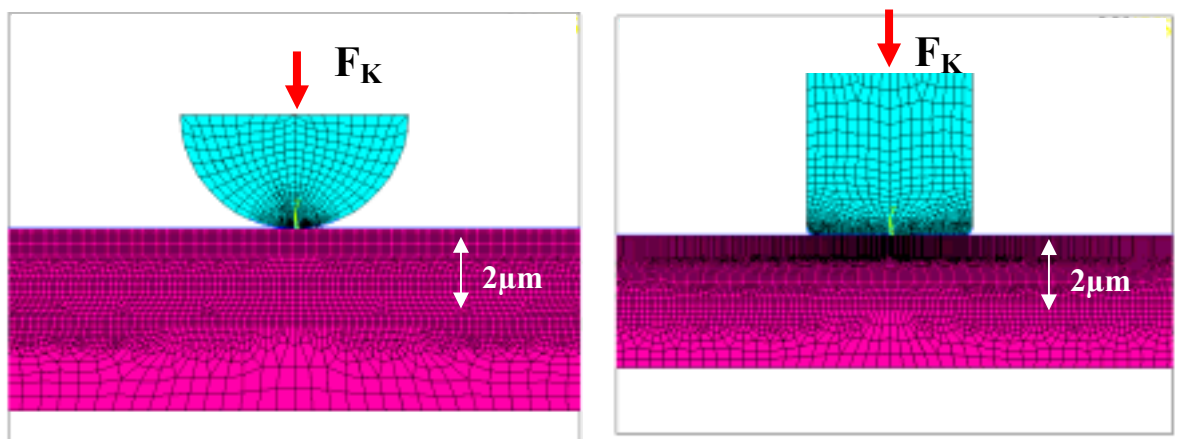


Abb. 6.2: FEM-Modell Kugel und Stempel auf ebener Fläche

Obwohl bei den Modellen die realen Dimensionen der Kontaktpaare gewählt wurden, liegt der Schwerpunkt bei der FEM-Simulation zunächst nicht in der exakten Ermittlung der tatsächlich auftretenden Spannungen, sondern in der Bewertung der Parameter Spitzenform, Durchmesser und Kontaktierung mit und ohne Tangentialbewegung. Damit soll das Verständnis des Versagensmechanismus verbessert werden.

### 6.1.1 Kugeleindruck ohne Tangentialbewegung

In Abb. 6.3 ist die elastische Verformung  $u_y$  als Kontourplot (Farbverlauf von blau = max. nach rot = min.) beim Kugeleindruck (Kugelradius  $5\mu\text{m}$ ) bei einer reinen Vertikalbelastung ohne Tangentialbewegung dargestellt. Entsprechend der Theorie für Hertz'sche Pressung (vgl. Kap. 1.3.1) ist die Verformung der Oberfläche sehr eng auf die Kontaktfläche begrenzt. Die Verschiebungen  $u_y$  sind hier in der Einheit [mm] angegeben. Unverformte Strukturen erscheinen rot.

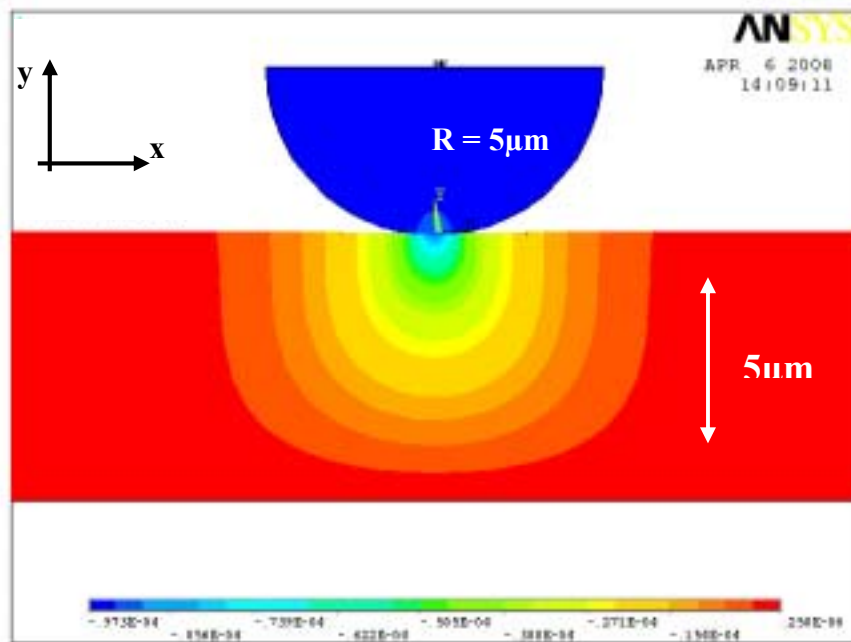


Abb. 6.3: Elastische Verformung der Kontaktkörper bei Kugeleindruck ohne Tangentialbewegung

In Abb. 6.4 sind weiterhin die Normalspannung  $\sigma_y$  und Radialspannungen  $\sigma_{xy}$  als Kontourplot in der Einheit [N/mm<sup>2</sup>] dargestellt. Diese Darstellung ist speziell für die Bestimmung der Lage der maximalen Spannungen interessant. Man erkennt, dass der Spannungsverlauf entlang der y-Achse bei  $x=0$  entsprechend der analytischen Lösung aus Kap. 1.3.1 auch für die FEM-Simulation gilt.

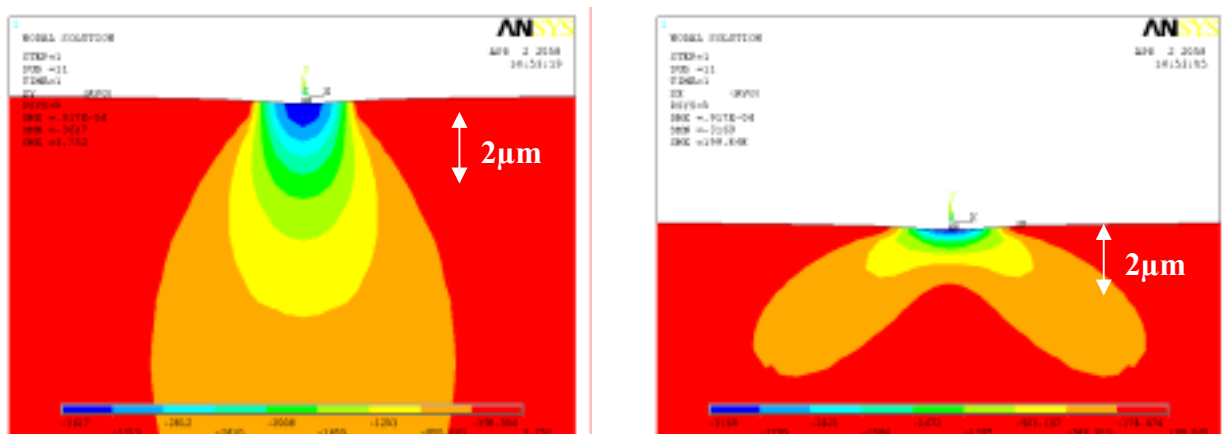


Abb. 6.4: Normal- und Radialspannungsverlauf bei Kugeleindruck ohne Tangentialbewegung

## 6.1 Elastischer Kontakt auf homogenem Material

### 6.1.2 Stempeleindruck ohne Tangentialbewegung

Analog zum Kugeleindruck wurden Simulationen mit einem Stempel durchgeführt [Jac05]. Die Kanten des kreisförmigen Stempels wurden hier mit einem Radius  $r_E > 0$  modelliert, was für den realen Körper zutrifft. Das Ergebnis für einen zylindrischen Stempel mit Radius  $5\mu\text{m}$  der Grundfläche (Kantenradius  $r_E = 0.5\mu\text{m}$ ) ist wieder als Kontourplot für die Verformung  $u_y$  (Abb. 6.5) und für die Normalspannungen  $\sigma_{yy}$  und Radialspannungen  $\sigma_{xy}$  (Abb. 6.6) dargestellt.

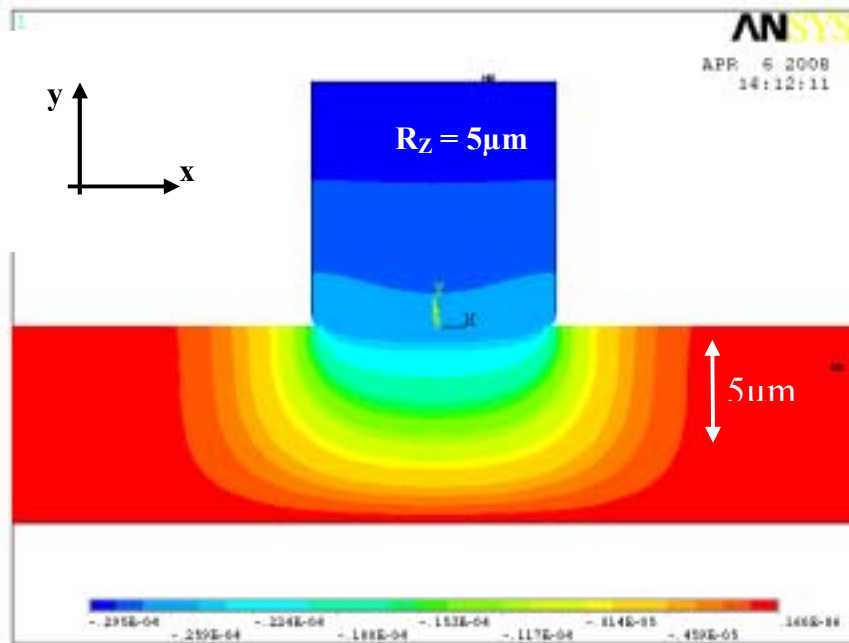


Abb. 6.5: Elastische Verformung der Kontaktkörper bei Stempeleindruck

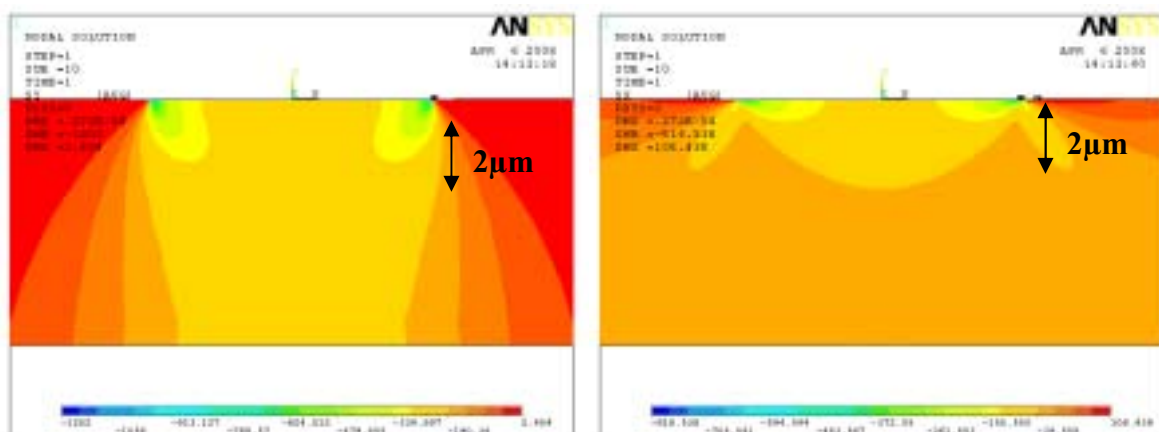


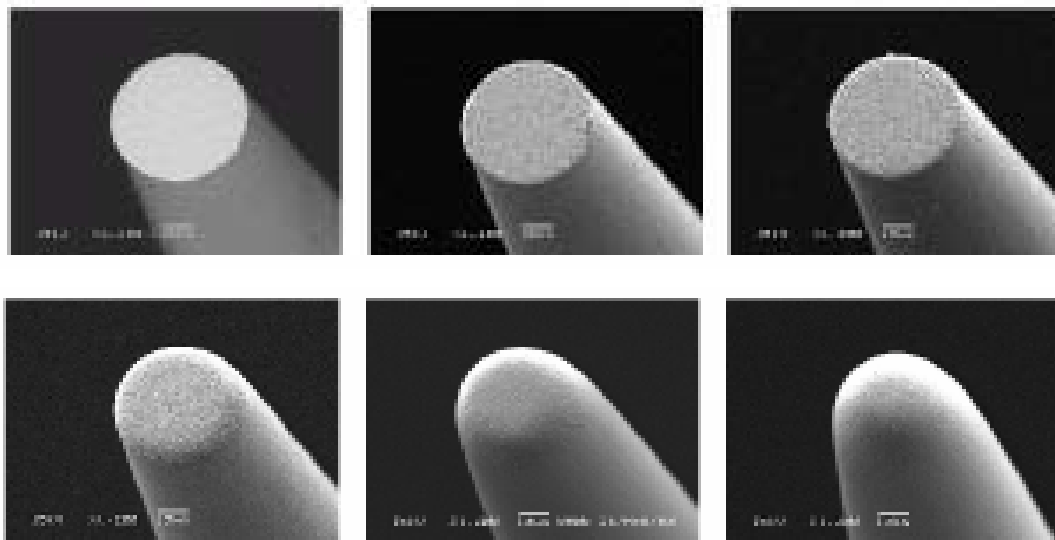
Abb. 6.6: Kontourplot der Normal- und Radialspannungsverlauf bei Stempeleindruck

Der Verlauf der Verschiebungen und Spannungen an der Oberfläche entspricht auch hier der in Kap. 1.3.2 dargelegten analytischen Gleichungen und verifiziert damit die FEM-Simulation.



### 6.1.3 Belastung bei Änderung der Spitzengeometrie

Wie in Kap. 1.1 dargelegt, kann es durch abrasive Reinigungsverfahren der Nadelspitzen zu einer Anspitzung und Verrundung der Spitzengeometrie kommen. Dabei wird die Kontaktfläche zunehmend kleiner und damit der Kontaktdruck bei konstanter Kontaktkraft größer (Abb. 6.7). Neben den bereits analytisch ermittelten Spannungen, die bei der Kontaktierung von Nadelspitzen auftreten und beim Überschreiten der zulässigen Spannungen zu Rissen im Material führen können, wird dieser Effekt mit Hilfe der FEM-Simulation nachgebildet.

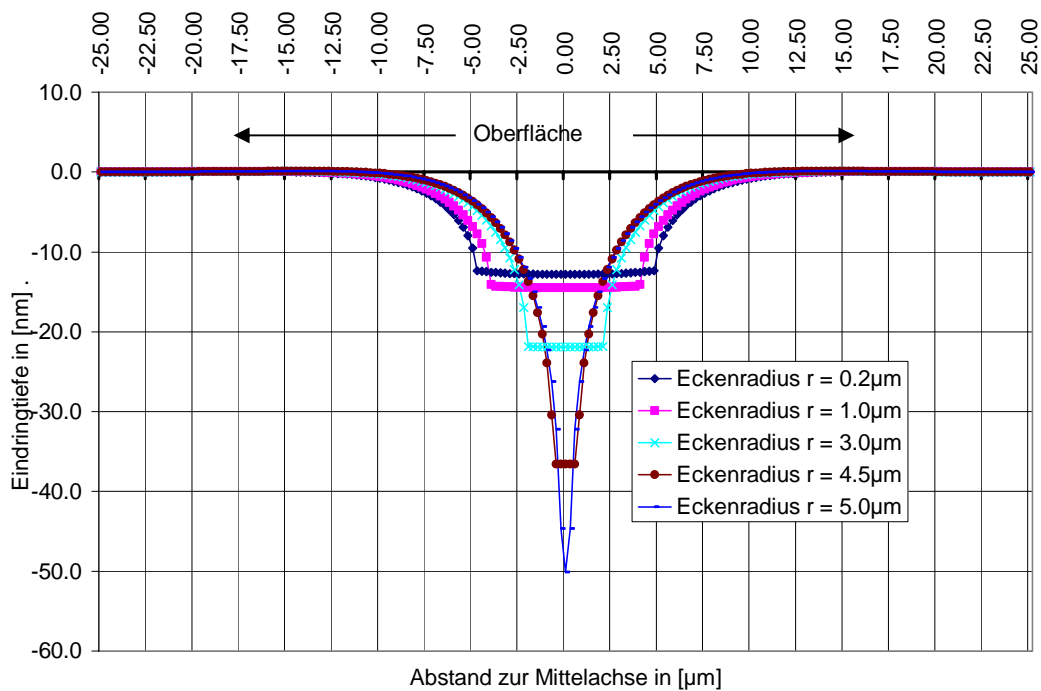


**Abb. 6.7: Änderung der Spitzengeometrie durch abrasives Reinigungsverfahren**

Die Verschiebungen und Spannungen wurden in einer FEM-Parameterstudie ermittelt. Die Geometrie des Eindringkörpers wurde dabei vom einem Extrem „flach“ (zylindrischer Stempel mit Durchmesser  $10\mu\text{m}$  mit Eckenradius  $0.2\mu\text{m}$ ) bis zum anderen Extrem „ideal sphärisch“ (Kugel mit Radius  $5\mu\text{m}$ ) modelliert. Der Eckenradius wurde schrittweise vergrößert, wobei die Schrittweite nahe den Grenzen kleiner gewählt wurde, um den Übergang flach-sphärisch deutlicher zu erkennen. Die vertikale Belastung (Kontaktkraft) ist für alle Fälle unverändert.

## 6.1 Elastischer Kontakt auf homogenem Material

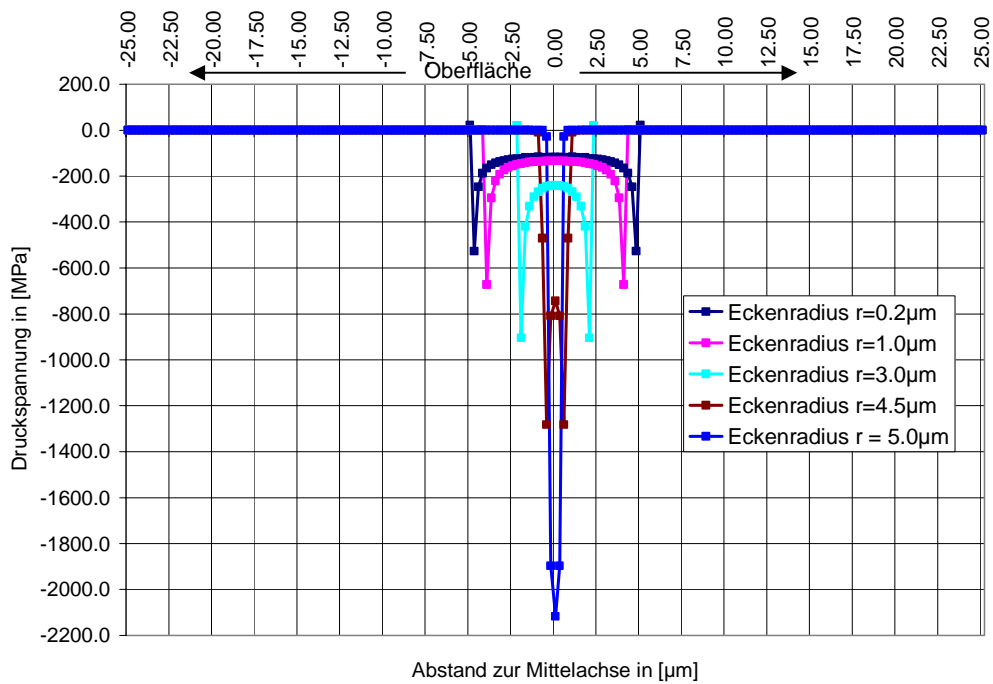
In Abb. 6.8 ist die elastische Verformung  $u_y(y=0)$  der vorher ebenen Kontaktfläche dargestellt. Diese verläuft entsprechend den analytischen Lösungen (vgl. Kap. 1.3) für einen Stempel- und Kugel-Eindruck. Beim Stempleindruck (flache Spitze) ist bei gleicher Kontaktkraft die Kontaktfläche wesentlich größer als beim Kugleindruck, dafür beträgt der Wert der maximalen Eindringtiefe nur etwa 20% dessen. Bei größer werdendem Eckenradius und damit einer zunehmenden Verrundung und Verkleinerung der Spitze nähert sich die Verformung der Oberfläche allmählich der typischen Form gemäß der Hertzschen Pressung.



**Abb. 6.8:** Verlauf der Verschiebung  $u_y$  bei Änderung des Stempel-Eckenradius

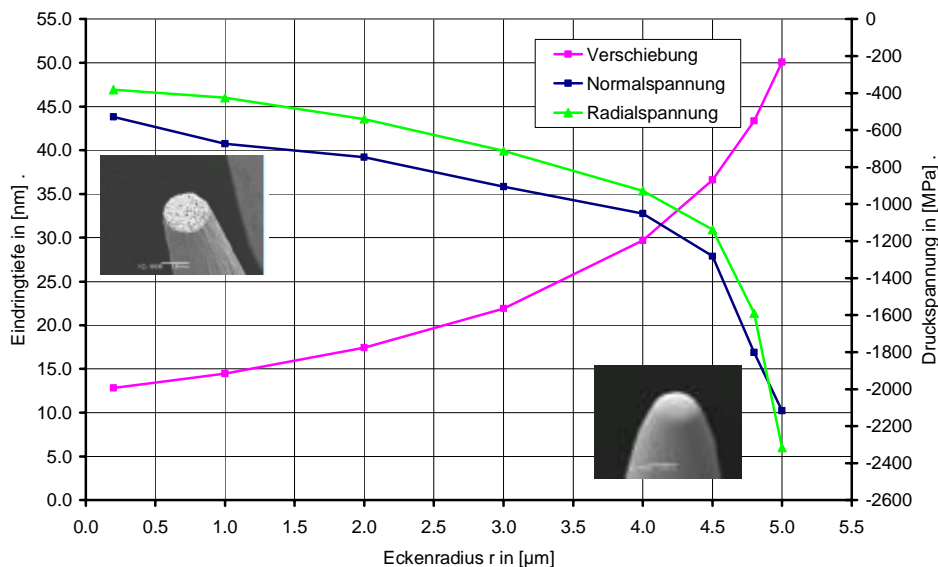
Betrachtet man in Abb. 6.9 die Druckspannung  $\sigma_{yy}$  an der Oberfläche, so wird hier ebenfalls die analytische Lösung bestätigt. Nahe dem Rand der flachen Spitzen ist hierbei jeweils die typische Überhöhung der Druck-Spannung zu erkennen. Numerische Fehler bei der Finiten-Elemente-Rechnung konnten durch Variation der Elementgröße und Diskretisierungsdichte ausgeschlossen werden. Analog zu den Verschiebungen folgt der Spannungsverlauf auch hier der Spitzenänderung von flach nach rund kontinuierlich.

## 6.1 Elastischer Kontakt auf homogenem Material



**Abb. 6.9:** Verlauf der Druck Spannungen  $\sigma_y$  bei Änderung des Stempel-Eckenradius

In Abb. 6.10 sind die maximalen Werte der Eindringtiefe und Normal- sowie Radialspannungen als Funktion des Eckenradius als Diagramm dargestellt. Sowohl die Eindringtiefe als auch die Spannungen nehmen dabei vom Betrag um ca. den 5-fachen Wert stetig zu (Druckspannungen sind negativ).



**Abb. 6.10:** Einfluss des Eckenradius' auf Spannungen und Verschiebungen

Durch diese Parameterstudie wird der große Einfluss der Spitzenform sehr deutlich. Eine genaue und regelmäßige Kontrolle beim Probing-over-Active-Area ist deshalb unabdingbar.

### 6.1.4 Kugeleindruck mit Tangentialbewegung

Unter Verwendung der Modelle mit gleichen Materialparametern und Dimensionen aus dem vorherigen Abschnitt wurde der Einfluss einer zusätzlichen tangentialen Bewegung, wie sie auch beim realen Probing auftritt, simuliert. Dabei wurde ein Reibungskoeffizient  $\mu$  zwischen Spitze und Kontaktebene von 0.5 gewählt, der vorher experimentell in den Versuchen mit Einzelnadeln (vgl. Kap. 5.4) ermittelt wurde. Die Bewegungsrichtung („Scrub“) des Indenters erfolgt in Abb. 6.11 nach links um einen Wert von  $10\mu\text{m}$ . Im Vergleich mit einem Eindruck ohne Scrub (siehe Abb. 6.3) ist in diesem Fall ein unsymmetrischer Verlauf der elastischen Verformung zu beobachten.

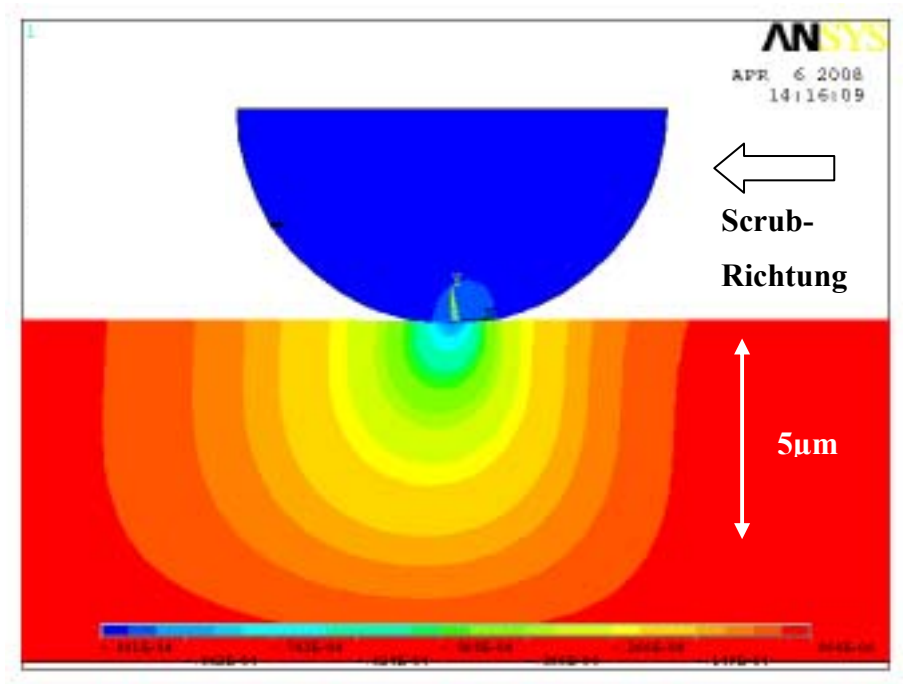


Abb. 6.11: Elast. Verschiebungen bei Kugeleindruck mit Tangentialbewegung

Besonders zu beachten ist der Radialspannungsverlauf, der in Abb. 6.12 als Kontourplot dargestellt ist. Direkt hinter der Kontaktfläche ändert sich das Vorzeichen der Spannung, d.h. es herrscht Zugspannung.

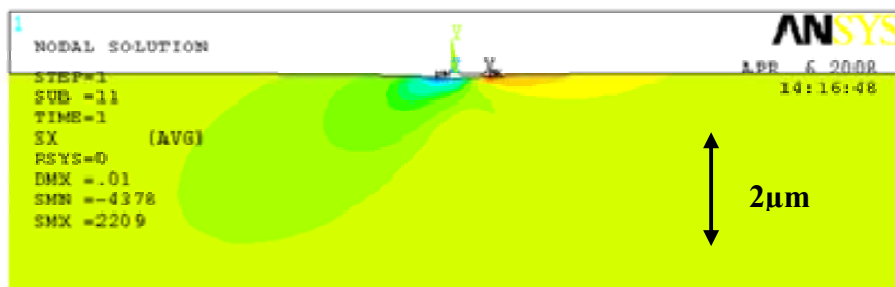


Abb. 6.12: Radialspannungsverlauf bei Kugeleindruck mit Tangentialbewegung

Besser erkennbar wird dieser Effekt, wenn man den Verlauf der Spannungen entlang der Oberfläche im Diagramm betrachtet. Während sich die Normalspannungen  $\sigma_{yy}$  im Fall „Scrub  $\neq 0$ “ im Verlauf und Betrag kaum ändert (Abb. 6.13), ändert sich die Radialspannung  $\sigma_{xy}$  deutlich (Abb. 6.14). Berücksichtigt man die starke Abhängigkeit der Festigkeit von spröden Werkstoffen von der Belastungsart (Zug, Druck, Biegung, vgl. Abb. 1.25) dann hat das Vorhandensein und der Betrag der Tangentialbewegung einen großen Einfluss auf die Bruchwahrscheinlichkeit.

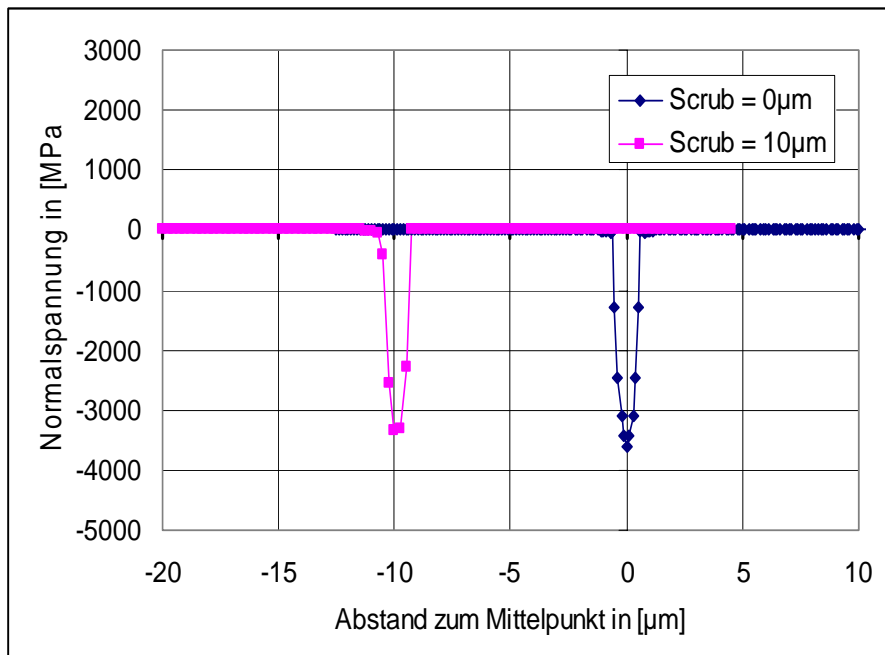


Abb. 6.13: Vergleich der Normal-Spannungen bei Kugleindruck mit/ohne Tangentialbewegung

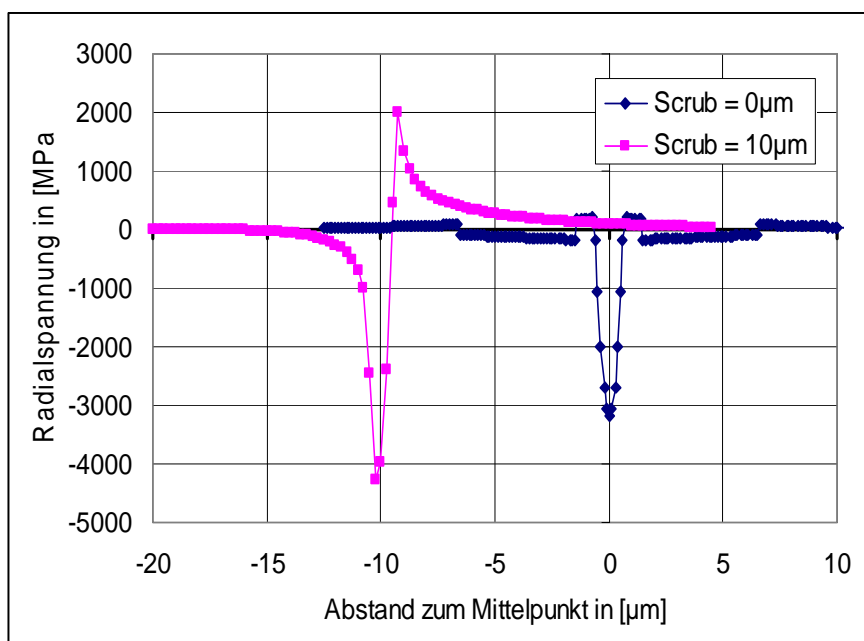


Abb. 6.14: Vergleich der Radial-Spannungen bei Kugleindruck mit/ohne Tangentialbewegung

### 6.1.5 Stempeleindruck mit Tangentialbewegung

Die Simulation des Stempeleindruckes mit Tangentialbewegung ergibt ein ähnliches Ergebnis. Auch hier wurde der Reibungskoeffizient  $\mu$  mit einem Wert von 0.5 angesetzt. Am Kontourplot der Verformung  $u_y$  in Abb. 6.15 erkennt man eine Verschiebung in Richtung der Scrub-Richtung und eine leichte Verkannten der vorher ebenen Kontaktfläche.

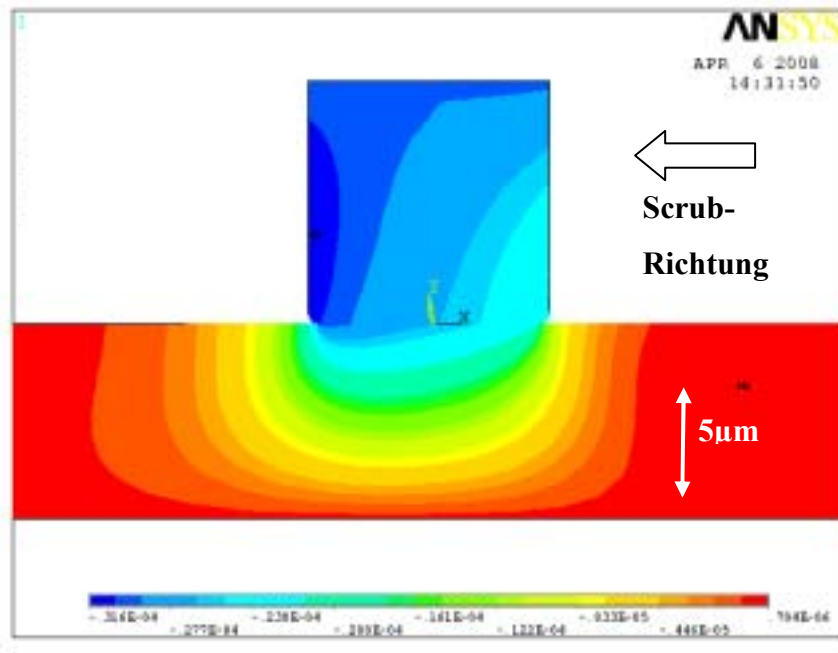


Abb. 6.15: Verschiebungen  $u_y$  bei Stempeleindruck mit Tangentialbewegung

Analog zum Kugeleindruck tritt auch hier (Abb. 6.16) unmittelbar hinter der Kontaktfläche Zugbelastung bei der Radialspannung  $\sigma_{xy}$  auf, was im realen Fall die Bruchwahrscheinlichkeit erhöhen würde.

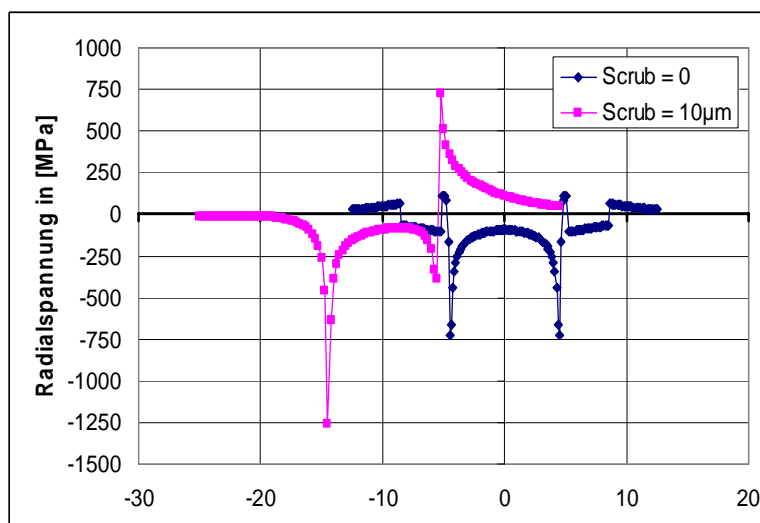


Abb. 6.16: Vergleich der Radial-Spannungen bei Stempeleindruck mit/ohne Tangentialbewegung

## 6.2 Elastischer Kontakt auf geschichteten Material

Wie in Kap. 1.4 beschrieben, ist es mit einem analytischen Ansatz nicht möglich, die Verformung des Schichtverbundes und den Spannungsverlauf bei Kontaktvorgängen zu berechnen. Dafür eignet sich die FEM-Simulation deutlich besser. In Abb. 6.17 ist ein für die CMOS-Technologie typischer Schichtverbund als diskretisiertes Modell dargestellt. Als oberste Schicht ist ein Aluminium-Pad (hier: blau) über einem Isolator (z.B. Silizium-Oxid, lila) modelliert. Dazwischen verläuft eine Kupfer-Metallbahn (gelb), über der ein dünner Diffusionslayer (z.B. Silizium-Nitrid, grün) liegt.

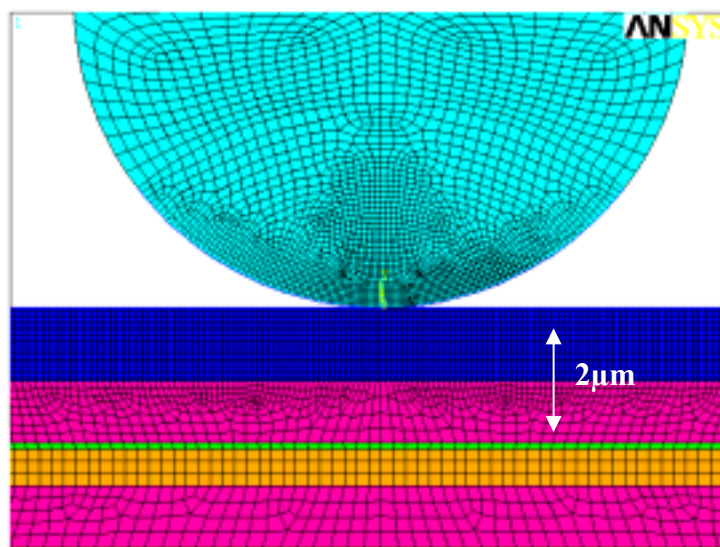


Abb. 6.17: FEM-Modell mit verschiedenen Schichtmaterialien

Die genauen Materialwerte sind meist nicht bekannt und müssen für die Simulation aus der Literatur entnommen werden.

Auch bei der Simulation des Kugeleindrucks auf einen Schichtverbund wurde zunächst nur von einem linear-elastischen Materialverhalten ausgegangen.

### 6.2.1 Einfluss der Pad-Dicke

Wie in den vorherigen Abschnitten gezeigt wurde, treten die maximalen Spannungen direkt an der Oberfläche auf und fallen dann stark ab. Bei einem Schichtverbund Aluminium-Oxid, mit unterschiedlichen Materialverhalten (duktil-spröde, siehe Kap.1.5) ist es deshalb entscheidend, wie tief die Nadel in das Metall eindringt und welche verbleibende Pad-Dicke noch vorhanden ist. Da die Spannung, wie oben erwähnt, stark fällt, je tiefer man in das Material eindringt, sinkt die Bruchwahrscheinlichkeit des Oxides, je mehr Material darüber verbleibt.

Diese Annahme wurde in weiteren FEM-Simulationen untersucht. Dafür wurde die Aluminium-Dicke für 3 Fälle 500nm, 300nm und 100nm variiert.

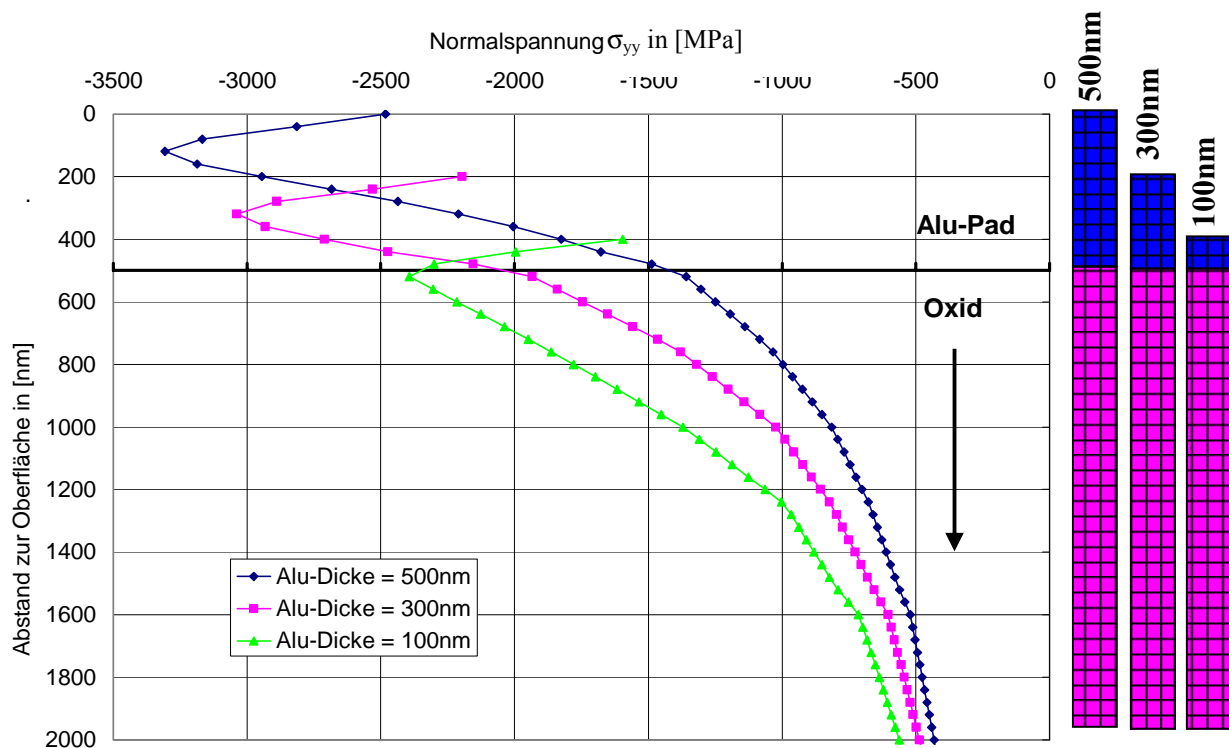


Abb. 6.18: Normal-Spannungsverlauf für verschiedene Pad-Dicken

In Abb. 6.18 ist der Verlauf der Normalspannung  $\sigma_{yy}$  im Material ausgehend von der Oberfläche für die 3 Last-Fälle mit unterschiedlicher Aluminium-Dicke dargestellt. Wie man sieht, fällt die Spannung schnell ab. Da ein Bruch immer vom Ort der maximalen Spannung ausgeht, ist besonders auf die Werte am Übergang Aluminium-Oxid zu achten.



## 6.2 Elastischer Kontakt auf geschichteten Material

Wie zu erwarten war, ist die Normal-Spannung am Interface je geringer, desto größer die verbleibende Aluminium-Dicke ist. Die Spannung hat dabei einen Wert von ca. 30 – 50% in Bezug auf das Maximum. Noch deutlicher ist dieser Effekt bei der Radialspannung  $\sigma_{xy}$  ausgeprägt (Abb. 6.19). Bei einer verbleibenden Schichtdicke des Aluminiums von mehr als 300nm ist die Radialspannung auf der Oxidoberfläche bereits nahezu auf null abgefallen.

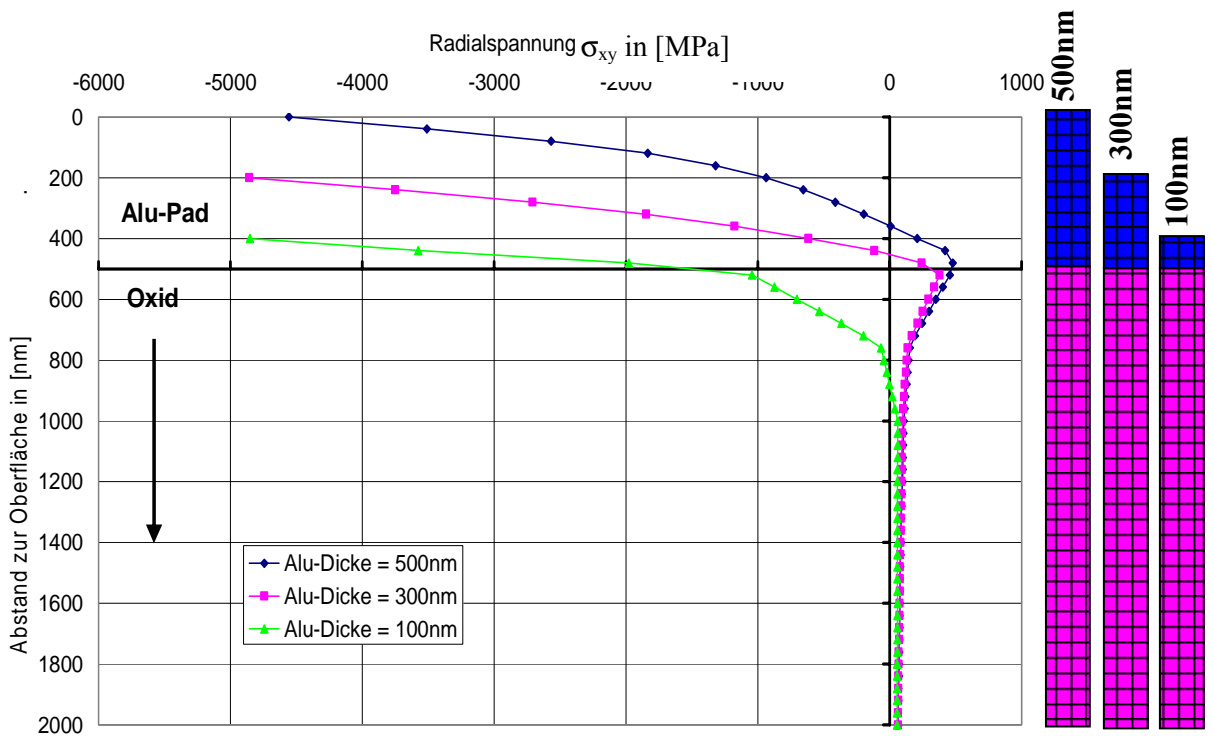


Abb. 6.19: Radial-Spannungsverlauf für verschiedene Pad-Dicken

Die Ergebnisse dieser FEM-Simulationen zeigen deutlich, dass die Eindringtiefe in das Aluminium das Risiko von Rissen im Oxid erheblich beeinflussen kann. In der Praxis sollte beim Probing auf Aluminium-Pads darauf geachtet werden, dass die Scrub-Tiefe im Verhältnis der Pad-Dicke möglichst nicht mehr als 60% sein sollte. Das ist z.B. durch spezielle Spitzenformen (flach), „no-Scrub“-Nadeln, Limitierung der Kontaktierungen pro Pad oder härtere Pad-Materialien zu erreichen.

### 6.3 Simulation des plastischen Kontaktes

Zum Abschluss des Kapitels 6 soll noch kurz auf die Möglichkeit der Simulation mit elasto-plastischen Materialverhalten eingegangen werden. Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, hat die Eindringtiefe beim Kontaktieren einen wesentlichen Einfluss auf die Höhe der kritischen Spannungen im Oxid. Dieser Effekt wurde durch die Modellierung einer verbleibenden Dicke des Pad-Materials nur linear-elastisch berechnet. Wie aber bereits ausführlich diskutiert, wird das Pad beim Kontaktieren in der Realität stark plastisch verformt.

Mit Hilfe des Programms ANSYS 10.0 ist es möglich, unter Verwendung geeigneter Element-Typen ein nichtlineares, plastisches Materialverhalten zu simulieren. Voraussetzung ist allerdings die Kenntnis der Materialparameter (Fließspannung, Spannungs-Dehnungs-Verlauf), was bisher speziell bei dünnen Schichten nicht der Fall ist. Unter Annahme von aus der Literatur entnommenen Werten für Aluminium wurde in Rahmen dieser Arbeit zumindest die Möglichkeit einer Simulation geprüft. Die Ergebnisse eines Beispiels für Kugelkontakt sind als Kontourplot der Verschiebungen  $u_y$  (Abb. 6.20) gezeigt.

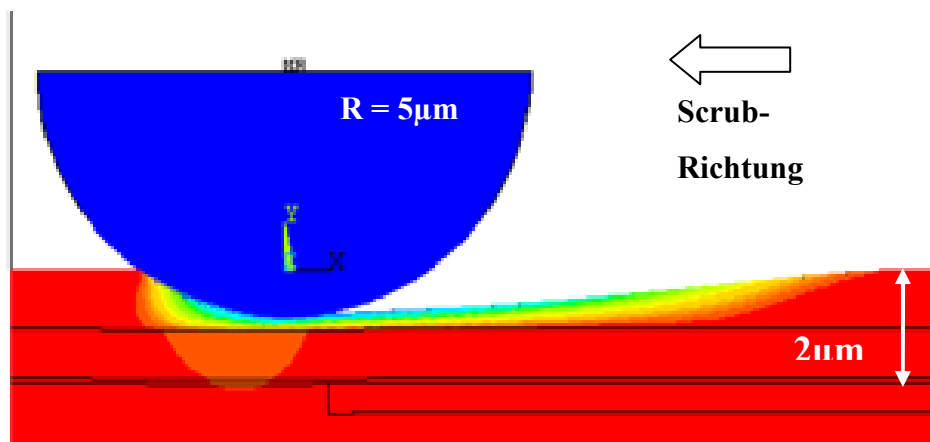


Abb. 6.20: Plastische Verformung des Pads beim Kugelkontakt mit Tangentialbewegung

Wie sich zeigte, war durch starke Elementverzerrungen, die zu numerischen Problemen bei der Berechnung führten, die Simulation der plastischen Verformung des Pads nur bis zu ca. 60% der Gesamtdicke des Pads möglich. Um Eindringtiefen bis zur kompletten Durchdringung des Pads der Kugel zu simulieren, müssen deshalb alternative Modellierungsansätze gefunden werden.

## 7 Messtechnische Ermittlung der Bruchwahrscheinlichkeit

Ziel des Versuches mit dem Indenter ist es, die kritische Belastung durch eine definierte Kraftaufbringung gemäß der Theorie der probabilistischen Bruchmechanik und die Bruchwahrscheinlichkeit an dafür geeigneten Strukturen zu ermitteln. Die Ergebnisse sollen für zukünftige Designs für Pads über aktiven Strukturen berücksichtigt werden und können als Gütekriterium für dünne Oxidschichten verwendet werden.

### 7.1 Testchip-Beschreibung

Für die Ermittlung der kritischen Werte bis zum Bruch der Oxidschicht wurde ein speziell dafür entwickelter Testchip, der die Bezeichnung *GUPIP-L90* trägt, verwendet. Dieser Testchip wurde entsprechend der 90nm-Technologieplattform ausgelegt und bei dem taiwanesischen Auftragsfertiger *UMC* gefertigt. In das Design sind Erkenntnisse aus früheren Untersuchungen eingeflossen. [Liu00]. Er besitzt sowohl rechteckige Pads entlang den Chip-Rändern, die anschließend drahtgebondet werden (Wirebond-Pads) können, als auch über den aktiven Bereich des Chips gleichmäßig flächig verteilte, oktagonale Pads, die später für das Packaging mit Lötbällen bestückt werden können (Flip-Chip-Pads). Beide Varianten haben eine Aluminium-Kupfer-(AlCu-) Metallisierung der Dicke 800nm. Für die hier aufgeführten Versuche wurden nur die Wirebond-Pads verwendet, die in Abständen von  $60\mu\text{m}$  (Pad Mitte zu Mitte) bei einer Passivierungsöffnung von  $52\mu\text{m} \times 125\mu\text{m}$  und von  $50\mu\text{m}$  bei einer Passivierungsöffnung von  $43\mu\text{m} \times 110\mu\text{m}$  ohne Versatz in einer Reihe angeordnet sind.

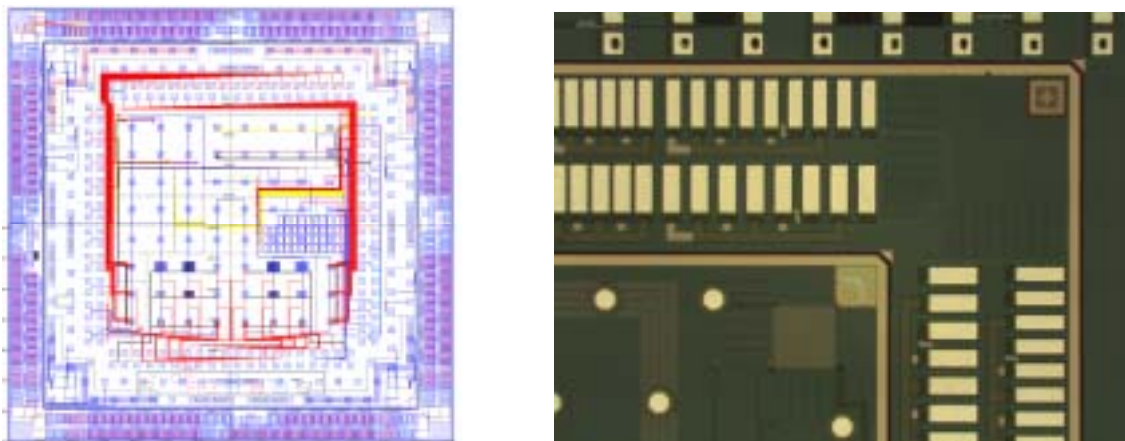


Abb. 7.1: Entwurf und Mikroskopaufnahme (Ausschnitt) des Testchips

## 7.1 Testchip-Beschreibung

Der Testchip hat Pads zu ca. 50 Gruppen mit jeweils 6 verschiedenen Pads mit unterschiedlichen Schichtaufbau (Abb. 7.2). Die Pad-Metallisierungsebene wird hier mit LB bezeichnet. Jede Gruppe hat 1 Auslesepad (Typ #1) und 5 bruch-sensitive Pads (Typ #2 - #6). Das passive Auslesepad #1 ist mit den Strukturen unter den Pads in den Metallebene M5 und M6 verdrahtet, um einen möglichen Leckstrom oder Kurzschluss, der infolge eines Oxid-Risses entsteht, elektrisch auszulesen (vgl. Kap. 3.2). Die Pads #2 bis #6 sind zusätzlich noch in 3er-gruppen, die jeweils um 1 Pad versetzt sind, kurzgeschlossen, was die Möglichkeit gibt, über eine Vier- ( bzw. 3-) Punkt-Messung den Kontaktwiderstand mit einer Nadelkarte zu messen.

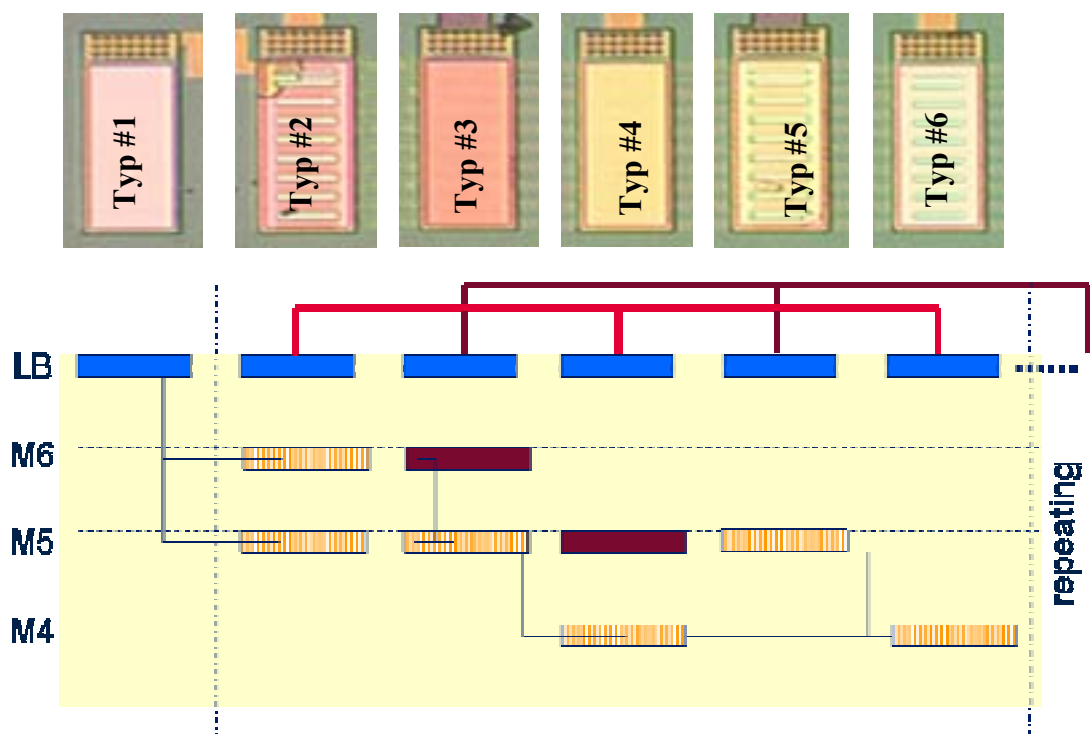


Abb. 7.2: Schichtaufbau und Verdrahtung des Testchips

In Tab. 7 sind die Materialien, Topographie und Dicken noch mal für die einzelnen Schichtverbund-Typen angegeben. Im Gegensatz zur Abb. 7.2 sind in der Tabelle die Siliziumnitridschicht und die Materialbezeichnung des Isolationsschicht angegeben.

Typ	1	2	3	4	5	6
<b>LB AlCu</b>	800nm	800nm	800nm	800nm	800nm	800nm
<b>SiO<sub>2</sub></b>	1000nm	1000nm	1000nm	1000nm	1000nm	1000nm
<b>SiN</b>	70nm	70nm	70nm	70nm	70nm	70nm
<b>M6 Cu</b>	FSG	810nm Gitter	810nm Platte	FSG	FSG	FSG
<b>FSG</b>	840nm	840nm	840nm	840nm	840nm	840nm
<b>SiN</b>	100nm	100nm	100nm	100nm	100nm	100nm
<b>M5 Cu</b>	FSG	500nm Gitter	500nm Gitter	500nm Platte	500nm Gitter	FSG
<b>FSG</b>	330nm	330nm	330nm	330nm	330nm	330nm
<b>SiN</b>	70nm	70nm	70nm	70nm	70nm	70nm
<b>M4 Cu</b>	FSG	FSG	FSG	500nm Gitter	FSG	500nm Gitter

Tab. 7: Schichtverbund und Schichtdicken des Testchips

Die Testchips, die vorher vom strukturierten Wafer ausgesägt wurden, werden mit Epoxydharz auf einen Probehalter geklebt und im Indenter positioniert. Für eine spätere korrekte Zuordnung der Versuchsbedingungen zu möglichen Rissen im Oxid ist auf eine genaue Chip-Orientierung und Pad-Position in xy-Koordinaten zu achten.

## 7.2 Ermittlung der kritischen Bruchlast durch Nanoindentation

Die Pads des Testchips wurden anschließend mit einer sphärischen Diamantspitze mit Radius  $R = 5\mu\text{m}$  indentiert. Die genaue Abfolge ist in Abb. 7.3 dargestellt. Zunächst wird nach der Oberflächenfindung mit einer sehr geringen Last (ca.  $20\mu\text{N}$ ) die Pad-Oberfläche über eine Länge von  $50\mu\text{m}$  abgetastet und das Oberflächenprofil „First Profile“ erfasst. Anschließend fährt die Diamantspitze in Pad-Längsrichtung  $10\mu\text{m}$  und beginnt mit der Indentierung („Scratch“). Dabei steigt die Kontaktkraft durch entsprechende vertikaler Verschiebung der Spitze linear bis zum vorher definierten Wert  $F_{K,\text{max}}$  an, während gleichzeitig die Probe proportional zu  $F_K$  um  $25\mu\text{m}$  lateral verfährt. Nach Erreichen von  $F_{K,\text{max}}$  wird die Probe durch ein vertikales Wegfahren der Spitze entlastet. Schließlich ermittelt das Gerät analog dem „First Profile“ die verbleibende Verformung des Spitzenabdruckes („Post Profile“).

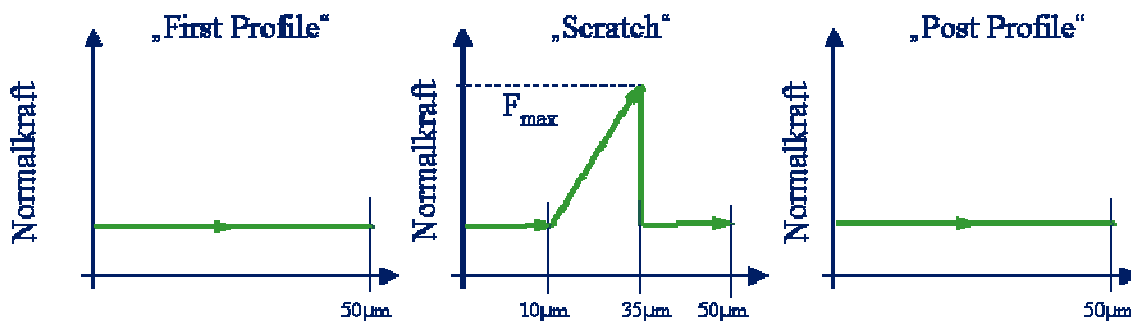


Abb. 7.3: Abfolge bei der Indentierung

In Abb. 7.4 ist das Ergebnis von einer Indentierung einer Pad-Reihe mit einer maximalen Kontaktkraft von  $50\text{mN}$  und einer Scrublänge von  $20\mu\text{m}$  zu erkennen.

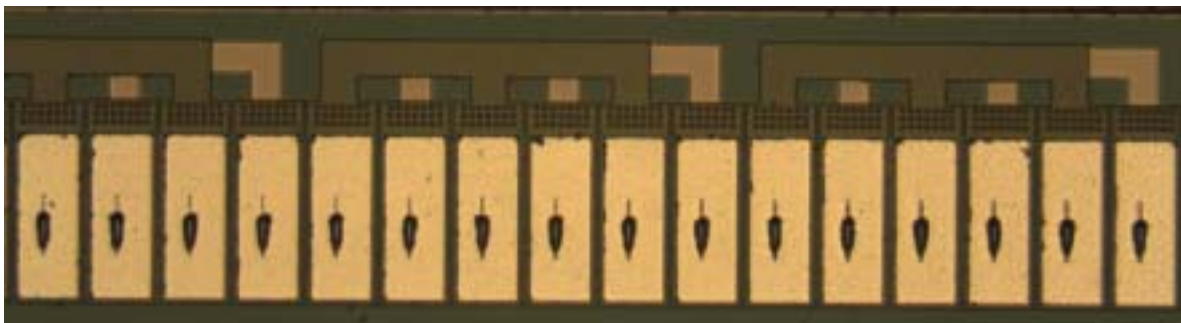
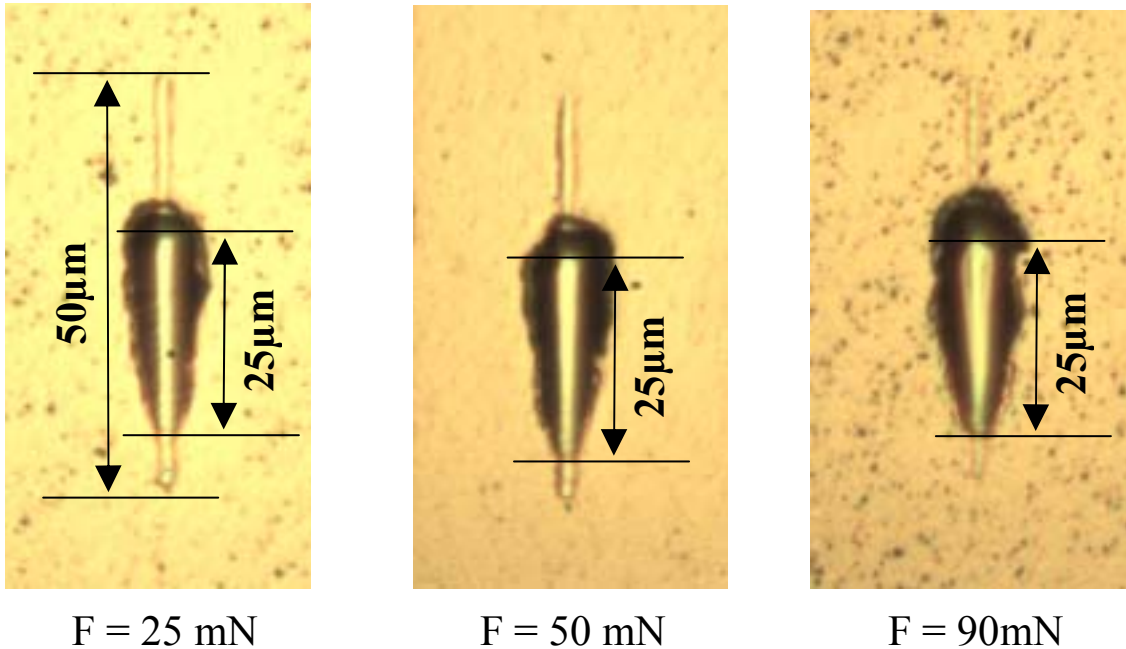


Abb. 7.4: Diamantspitzen-Abdrücke auf Pads nach Nano-Indentation ( $F = 50\text{mN}$ , Scrub =  $20\mu\text{m}$ )

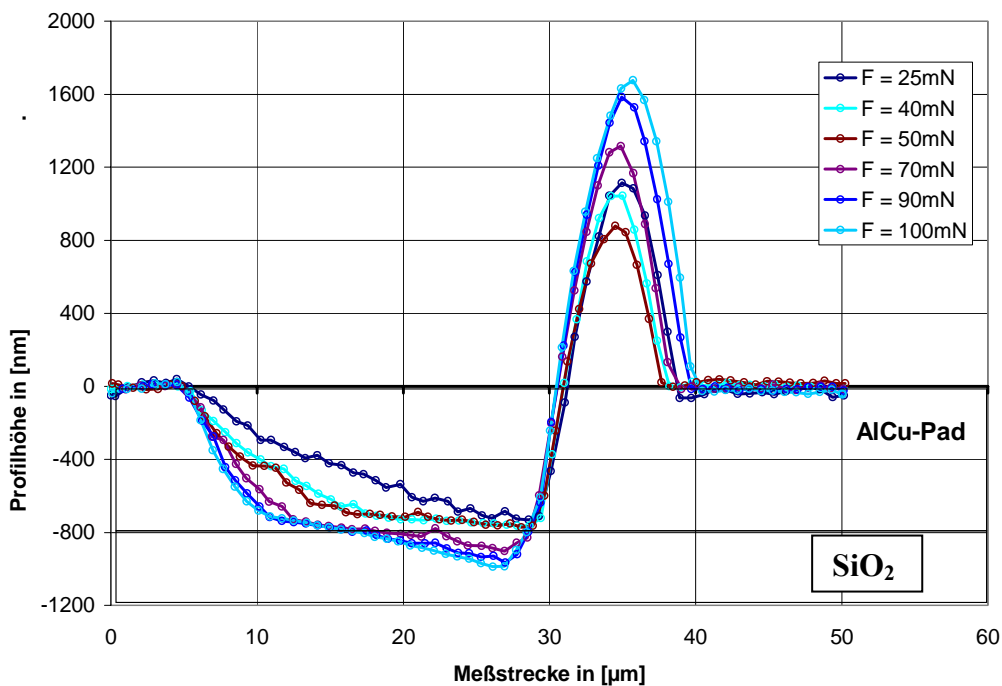
## 7.2 Ermittlung der kritischen Bruchlast durch Nanoindentation

In Abb. 7.5 sind noch mal die Spitzenabdrücke („Scratches“) mit Angabe der Indentierungslänge (hier  $25\mu\text{m}$ ) für verschiedene Kontaktkräfte zu sehen. Mittels einer optischen Analyse am Lichtmikroskop kann man dabei keinen wesentlichen Unterschied erkennen.



**Abb. 7.5: Indenterabdrücke auf Alu-Pad bei verschiedenen Kontaktkräften**

Erst bei der grafischen Auswertung der Indentierungsprofile (Abb. 7.6), die beim „Post Profile“ gemessen wurden, erkennt man Unterschiede in der verbleibenden Eindringtiefe und dem Materialaufwurf vor der Spitze in Scratch-Richtung.



**Abb. 7.6: Profilmessung der Indenter-Abdrücke**

## 7.2 Ermittlung der kritischen Bruchlast durch Nanoindentation

Für die Messreihe 1 wurden folgende Versuchsbedingungen gewählt:

Anzahl Chips	Pad-Typen	Pads pro Pad-Typ	Scratch-Länge	Spitzen-Radius	Kraft-Bereich	Schrittweite
17	2 -6	54	25µm	5µm	25 – 105 mN	5mN

Nach der Indentierung wurden die Chips entsprechend des im Kap. 3.2 beschriebenen Verfahrens präpariert. Die Inspektion erfolgte mittels eines Mikroskops, wobei die Oxidrisse gezählt und für die jeweilige Versuchsbedingung aufsummiert wurden.

Trägt man die Summenhäufigkeit (Anzahl Risse/ Anzahl der inspizierten Pads) über der Kontaktkraft auf, erhält man für jeden Pad-Typ die Verteilung der Bruchhäufigkeit. Die Ergebnisse sind auf Seite 105 grafisch dargestellt.

Man erkennt bereits hier einen erheblichen Unterschied zwischen den verschiedenen Typen in Bezug auf die Bruchhäufigkeit. Auffällig ist besonders die Verschiebung des Auftretens erster Risse in Richtung höherer Kontaktkräfte, wenn die Oxiddicke größer wird, was bei den Pad-Typen 4 und 5 der Fall ist. Es ist auch wichtig zu erwähnen, dass bei Typ 6 (3-fache Oxiddicke im Vgl. zu Typen 2 und 3) innerhalb des Messbereiches keine Cracks beobachtet wurden.

In einer 2. Messreihe wurden nur für die Typen 2 und 3 der Messbereich und die Schrittweite verfeinert, um einen stetigeren Verlauf der Bruchverteilung zu erhalten. Die genauen Messbedingungen sind hier aufgelistet:

Anzahl Chips	Pad-Typen	Pads pro Pad-Typ	Scratch-Länge	Spitzen-Radius	Kraft-Bereich	Schrittweite
16	2 -3	54	25µm	5µm	44 – 74 mN	2 mN

Die grafische Auswertung ist auf Seite 106 dargestellt.



Messreihe #1

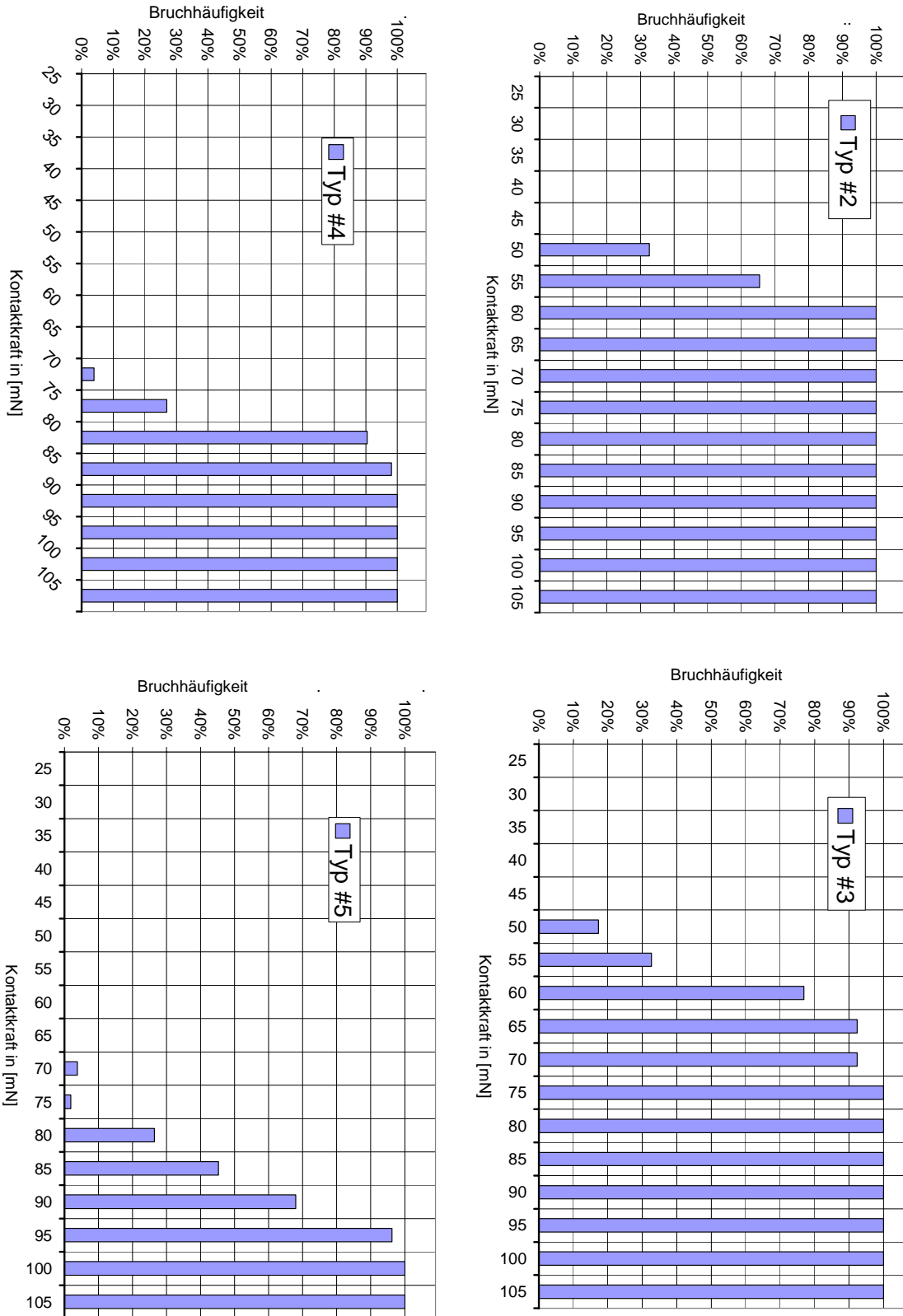


Abb. 7.7: Bruchhäufigkeit als Funktion der Kontaktkraft für Schichtfolgen Typ 2-5

## 7.2 Ermittlung der kritischen Bruchlast durch Nanoindentation

### Messreihe #2

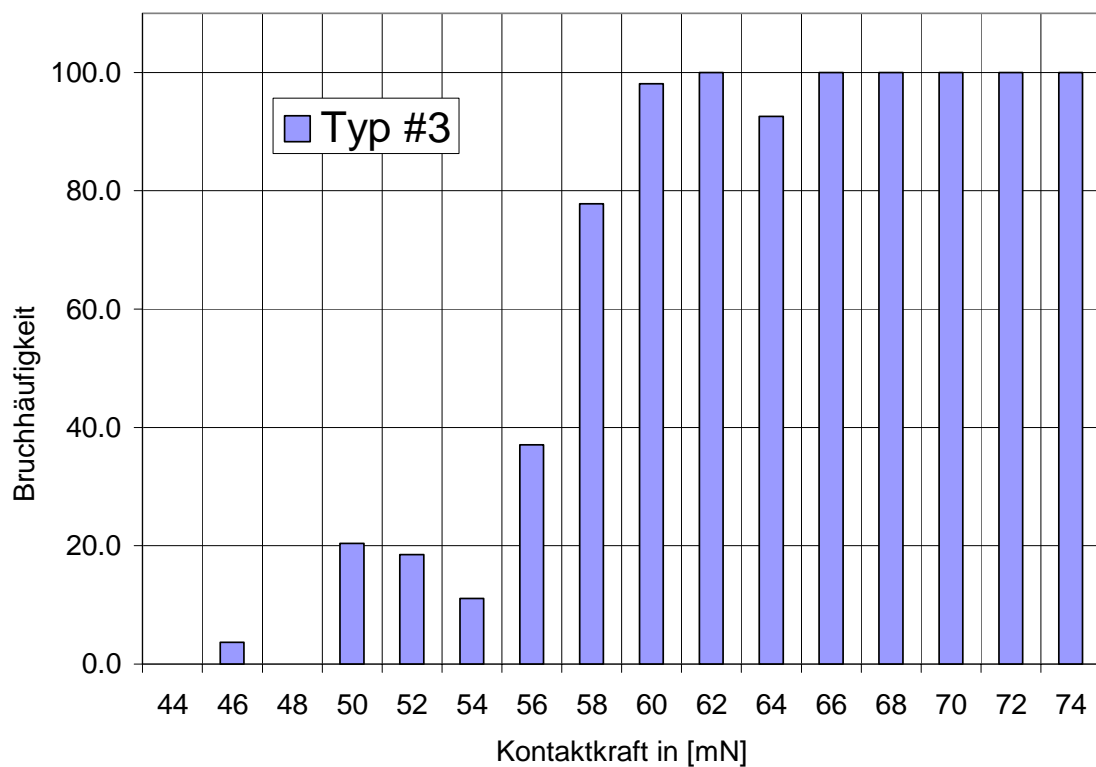
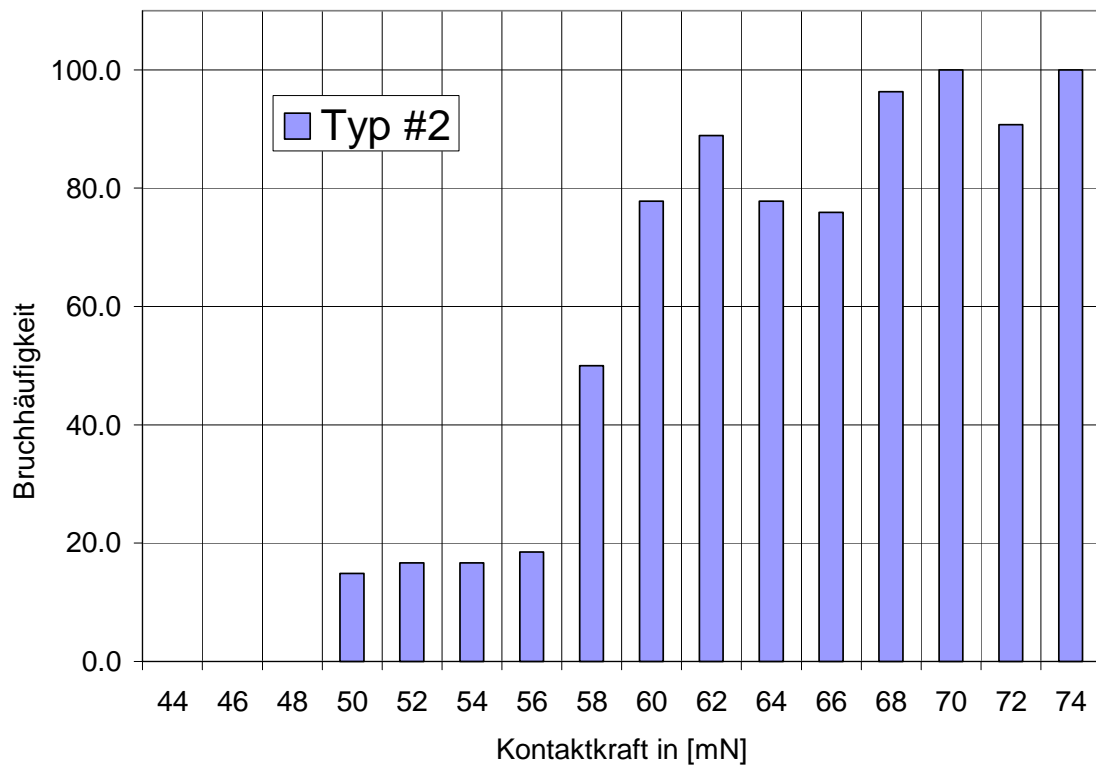


Abb. 7.8: Bruchhäufigkeit als Funktion der Kontaktkraft für Schichtfolgen Typ 2-3

### 7.3 Lineare Regression der Bruchhäufigkeit

Nach Ermittlung der Bruchhäufigkeit in Abhängigkeit der Kontaktkraft bei ansonsten konstanten Indentierungsbedingungen (Spitzengeometrie, Scratch-Länge) kann man durch eine lineare Regression die Weibull-Parameter und mittlere Festigkeit  $p_0$  für die verschiedenen Pad-Typen bestimmen.

Dafür muss zunächst unter Verwendung der in Kap. 1.3.1 hergeleiteten Kontaktspannungen für den Fall Kugel-Ebene berechnet werden. Da in diesem Fall nur die maximale Druckspannung  $p_0$  für das Auftreten von Rissen entscheidend ist, gilt für den hier herrschenden Belastungsfall Gl. (35):

$$p_0 = \left( \frac{6 \cdot F \cdot E^{*2}}{\pi^3 \cdot R^2} \right)^{1/3}$$

Bei einem gegebenen Indenter-Radius  $R$  und bekannter Kontaktkraft  $F$  kann mit Gl. (32) für den reduzierten E-Modul  $E^*$  (Kontaktpaar Diamant-SiO<sub>2</sub>; Materialparameter siehe Anhang) der maximale Druck  $p_0(F_K)$  an der Oberfläche der Oxidschicht berechnet werden.

Die Wertepaare mit der Ordnungszahl  $i$  mit den berechneten Drücken  $p_{0,i}$  (x-Koo.) und den experimentell in der Messreihe #1 und #2 ermittelten Bruchhäufigkeiten  $F_i$  (y-Koo.) können nun der Größe nach gemäß des in Kap. 1.7 beschriebenen Verfahrens der linearen Regression grafisch doppelt logarithmisch dargestellt werden (Abb. 7.9 und Abb. 7.10).

In den Tabellen 8 und 9 sind die Werte für den Weibull-Parameter  $m$  und die mittlere Festigkeit  $p_0$  (Schnittpunkt der Geraden mit der y-Achse =  $\ln(p_0)$ ) für die verschiedenen Schicht-Typen angegeben. Damit ist es leicht möglich, die das Unterschiede in der Festigkeit und Güte bei den Schichtfolgen auf einen Blick zu erkennen.

### 7.3 Lineare Regression der Bruchhäufigkeit

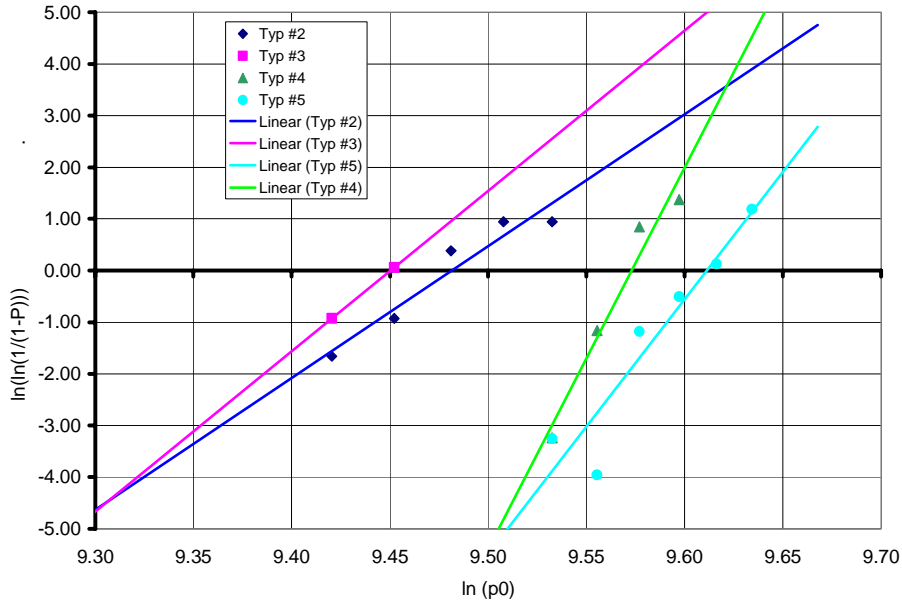


Abb. 7.9: Lineare Regression der Messreihe #1

	Typ #2	Typ #3	Typ #4	Typ #5
<b>Weibull-Parameter m</b>	25.52	31.03	73.88	49.30
<b>Mittl. Festigkeit <math>p_0</math></b>	13111	12710	14371	14930

Tab. 8: Weibullparameter m und mittlere Festigkeit Messreihe #1

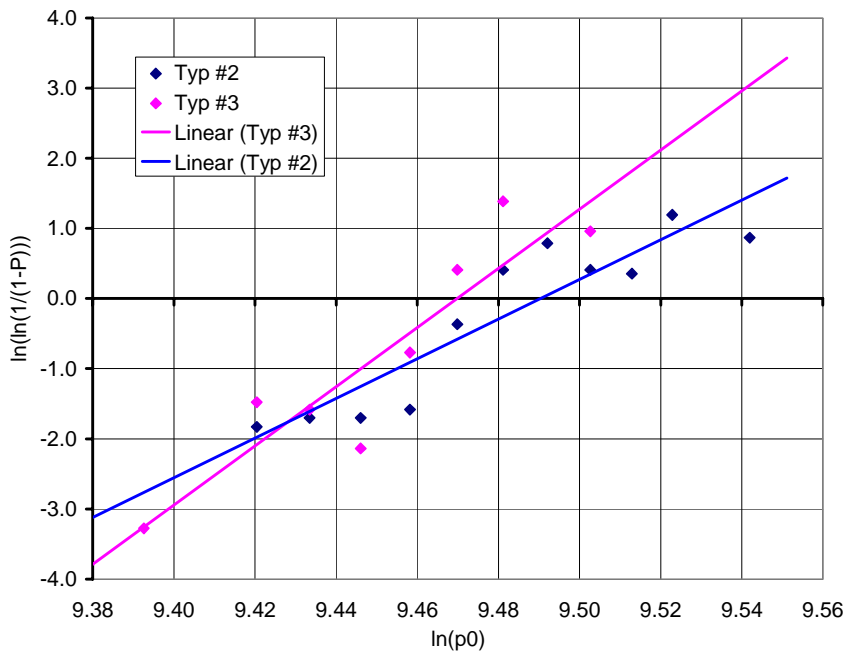


Abb. 7.10: Lineare Regression der Messreihe #2

	Typ #2	Typ #3
<b>Weibull-Parameter m</b>	28.232	42.173
<b>Mittl. Festigkeit <math>p_0</math></b>	13458	12962

Tab. 9: Weibull-Parameter m und mittlere Festigkeit Messreihe #2

## 7.4 Interpretation der Indenter-Versuche

Wie man den Versuchsergebnissen für die Bruchhäufigkeit der Pad-Typen #2 - #6 entnehmen kann, werden dabei 2 Dinge offensichtlich:

1. Die Bruchhäufigkeit nimmt mit zunehmender Oxid-Schichtdicke (Typ #4 und Typ#5) ab
2. Plattenförmige Metalllagen (Typ #2 und Typ #5) sind anfälliger für Risse als gitterförmige Strukturen

Das Ergebnis aus Punkt 1 ist zunächst nach dem in Kap. 1.3 dargelegten analytischen Ansatz nicht erklärbar. Da die maximalen Spannungen direkt im Kontaktbereich auftreten, ist anzunehmen, dass die Rissentstehung immer an der Oxidoberfläche beginnt. Aufgrund der geringen Schichtdicken ist es auch unwahrscheinlich, dass das Risswachstum vor Erreichen der nächsten Lage im Schichtverbund endet. Das bedeutet, dass ein Oxidriss mindestens bis zur obersten SiN-Schicht fortschreitet und dort zum Stillstand kommt. Die Dicke des Oxides spielt nach der Theorie der Hertzschen Pressung und entsprechend den FEM-Simulationen bei der Rissentstehung zunächst keine Rolle. Die experimentellen Ergebnisse stehen dazu allerdings im Widerspruch, da der Anstieg der Bruchhäufigkeit bei dickeren Oxidschichten im Vergleich zu den dünneren Schichten um ca. 20-30mN versetzt ist (vgl. Abb. 7.7).

Für die Auswertung der Risshäufigkeit ist es deshalb erforderlich, sich noch mal die Präparationsmethodik und die damit zusammenhängende optische Analyse der Proben zu vergegenwärtigen. Ein Oxidriss ist nur sichtbar, wenn die oberste Metalllage durch die Säure, die durch den Riss eindringt, angeätzt wird. Nach Entfernung des Pads und der darunterliegenden TiN-Schicht liegt einerseits das Oxid frei und damit ist keine Barriere mehr vorhanden. Siliziumnitrid ist im Gegensatz zu Aluminium und Kupfer relativ säurebeständig und wird bei den hier verwendeten Säure-Konzentrationen und Ätzzeiten und -temperaturen nur gering abgetragen. Deshalb kann die Säure nur die Cu-Strukturen anätzen, wenn auch die darüberliegende SiN-Schicht einen Riss aufweist.

## 7.4 Interpretation der Indenter-Versuche

Wie aus den FEM-Simulationen hervorgeht, sind die Druck- und Radialspannungen bereits in einer Tiefe von 1-2 $\mu$ m unter der Kontaktfläche um mehr als 50% geringer als am Ort des Maximums (vgl. Abb. 6.4). Die SiN-Schicht, die sich mit einer hohen Bruchfestigkeit und -zähigkeit auszeichnet, wird deshalb bei einem größeren Abstand von der Oberfläche später brechen. Damit ist die geringere Bruchwahrscheinlichkeit bei den Pad-Typen #4, #5 und #6 erklärbar, obwohl möglicherweise bereits ein Riss in der obersten Isolationsschicht vorhanden ist.

Die Erklärung des Ergebnisses aus Punkt 2, dass Oxide, unter den plattenförmigen Strukturen verlaufen eher zum Bruch neigen, hängt mit Punkt 1 eng zusammen. Wie weiter oben erörtert, schreitet der Oxidriss immer bis zur obersten SiN-Lage fort. Auch wenn es zum Bruch der Nitrid-Schicht kommt, muss bei der gitterförmigen Metallstruktur der Riss nicht zwangsläufig vom Ort des Rissbeginns auf der freien Oberfläche immer bis zum Metall verlaufen. Bei einer plattenförmigen Struktur wie bei den Typen #3 und #4 ist das allerdings immer der Fall. Die Wahrscheinlichkeit, dass die Säure bei Vorhandensein eines durchgängigen Risses in der Oxid- und Nitrid-Schicht ist daher bei der Kombination Pad/Oxid/Platte höher.

## 8 Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurden die Grundlagen des elektrischen und mechanischen Kontaktes behandelt und die wesentlichen Einflussgrößen bei der Rissentstehung bei Pads über aktiven Strukturen von Halbleitern durch FEM-Simulationen und Versuchen bestimmt. Dennoch sind noch nicht alle Probing- und Prozess-Parameter, die die Zuverlässigkeit bestimmen, untersucht worden. In der folgenden Liste sind einige Punkte aufgeführt:

- Änderung der Risshäufigkeit mit verfeinerter Indenter-Methodik

Die in dieser Arbeit vorgestellte Indentierungsmethodik stimmt nur näherungsweise mit dem realen Probing-Vorgang der verschiedenen Nadelkarten-Technologien überein. Betrachtet man z.B. den Kraft-Zeit-Verlauf einer Cantilever-Nadel (siehe Abb. 5.5), stellt man fest, dass die Vertikalkraft-Komponente einen weitgehend symmetrischen Verlauf hat. Beim Indentieren mit der Diamantspitze wurde dagegen nur ein linearer Kraftanstieg bis zum Maximalwert in Kombination mit einer lateralen Bewegung bei einer anschließenden vertikalen Entlastung durchgeführt (vgl. Abb. 7.3). Der Kraft-Weg-Verlauf der Cantilever-Nadelspitze beim Entlasten ist allerdings analog zur Belastung mit umgekehrten Vorzeichen. Es ist zu vermuten, dass die Bruchhäufigkeit beim Kontaktieren von POAA-Pads mit einer Cantilever-Charakteristik zu einer höheren Bruchhäufigkeit führt. Mit dem Indenter sind beliebige Kraft-Weg-Kurven programmierbar. Deshalb werden zurzeit Methoden am Indenter entwickelt, um verschiedene Nadelcharakteristiken exakter abzubilden und in weiteren Indenter-Messungen zu verifizieren..

- Einfluss der Scrublänge

Die Bruchhäufigkeit wurde mit einer Scrub-Länge von 25 $\mu$ m bei einem linearen Kraftverlauf ermittelt. Aus den Ergebnissen der FEM-Simulationen geht aber hervor, dass eine Tangentialbewegung zu einer erhöhten Bruchwahrscheinlichkeit aufgrund Änderung der Spannungsverteilung (Druck nach Zug) führt. Diese Vermutung soll in weiteren Messungen am Indenter und am Einzelnadelplatz überprüft werden.

- Einfluss von Mehrfachkontaktierung

Beim Wafertest in der Produktion werden die einzelnen Chips meist mehrfach kontaktiert. Gründe dafür sind Wiederholmessungen wegen Kontaktinstabilitäten oder eine getrennte Testabdeckung (analog & digital) beim Funktionstest. Deshalb ist es erforderlich, auch die Anzahl der Indentierungen zu erhöhen, um damit möglicherweise einen Einfluss der Versagenswahrscheinlichkeit zu ermitteln.

- Dynamischer Kontakt

Sowohl die Messung am Indenter als auch die Einzelnadelkontaktierung findet im Gegensatz zur Wafertest am Prober, der eine hohe vertikale Zustellgeschwindigkeit des Wafers von ca.  $10000\mu\text{m/s}$  hat, quasi stationär statt. Wie aber in Kap. 1.6. erwähnt, ist der kritische Spannungsintensitätsfaktor  $K_{Ic}$  auch von der Verformungsgeschwindigkeit abhängig. Die Abhängigkeit von der Dynamik des Kontaktvorganges soll in weiteren Messungen ermittelt werden.

- Korrelation der FEM-Simulation mit Experimenten

Die Problematik bei den FEM-Simulationen ist das Fehlen von zuverlässigen Materialkennwerten für dünne Schichten. Wie vorher dargelegt, sind die makroskopischen Materialeigenschaften wie Härte und Plastizität auf Strukturen mit zum Teil weniger als  $1\mu\text{m}$  Dicke nicht übertragbar. Daher sind weitere Messungen mit dem Indenter nötig, um genaue Materialwerte zu erhalten und auf die FEM-Modelle zu übertragen. Eine zusätzliche Möglichkeit ist außerdem ein „Model-Fit“, mit dem die Simulation durch Variation der Materialparameter mit den Messergebnissen korreliert wird.

- Abgleich der Indenter- und Einzelnadmessungen

Bei der Fa. Infineon Technologies AG ist geplant, den Aufwand der POAA-Technologiequalifikation in Zukunft mit Hilfe der in dieser Arbeit gezeigten Methode mit dem Indenter und Einzelnadmessplatz zu reduzieren. Bisher wird am Prober mit einer produktionstauglichen Nadelkarte eine nicht geringe Zahl von Wafern mit Einzelchips mehrfach bei maximal zulässigen Overdrive getestet und auf mögliche Risse im Oxid inspiziert. Dafür ist aber noch eine Korrelation der Indenter- und Einzelnadel-Messungen notwendig. Erste Ergebnisse mit einer Einzelnadel einer vergleichbaren Größe und Kraft wie der Indenter zeigten, dass die zulässige Kraft bis zum ersten Auftreten von Oxidrissen noch um das 2- bis 3-fache höher liegt.





## Literaturverzeichnis

- Rie01** RIEDER, Prof. Dr. Werner: „Electrical Contacts”, IEEE, Piscataway, NJ, USA, (2001)
- Hol53** HOLM, R.: „Dependence of contact resistance on mechanical load and hardness of the material“; Symposium on Electrical Contacts, Pennsylvania State College, (1953)
- Gre66** GREENWOOD, A.: “Contact of nominally flat surface”, Proceeding of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 295, Issue 1442, pp. 300-319, (1966)
- Vin01** VINARICKY, Eduard: “Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen“, Springer Verlag, Berlin, (2001)
- Lin87** LINSE, H.: “Elektrotechnik für Maschinenbauer“, Teubner Verlag, Stuttgart, (1987)
- Glo93** GLOSSBRENNER, E.W.: „The life and times of an A-spot - a tutorial on sliding contacts “, IEEE-Holm Conference on Electrical Contacts, (1993)
- Kog04** KOGUT, L.: „Electrical contact resistance theory for conductive rough surfaces separated by a thin insulating film”, Journal of Applied Physics, Vol. 95, No. 2, pp. 576-585, (2004)
- Sho06** SHOEMAKER, S.: „Leitfähigkeitsmessung“, GDCh, Jahrestagung 2006, Fachgruppe Angewandte Elektrochemie, Bayreuth, (2006)
- Pau58** Van der Pauw, L. J., “A method of measuring specific resistivity and Hall effect of discs of arbitrary shape”, Phillips Res. Repts. 13, 1-9, (1958)
- Bon77** BOND, N.T.: “Fundamental consideration of aluminum electrical contact interfaces”, IEEE-Holm Conference on Electrical Contacts, (1977)
- Deg06** DEGEN, C., Nagler, O.: “Parametric Study of Contact Fritting for Improved CRes Stability”, IEEE SW Test Workshop, San Diego, (2006)

- Mag84** MAGNUS, Prof. Kurt: “Grundlagen der Technischen Mechanik”, Teubner Verlag, Stuttgart, (1984)
- Bar88** BARGEL, Prof. Hans-Jürgen: “Werkstoffkunde”, 5. Auflage, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, (1988)
- Din14** DIN EN ISO 14577 „Instrumentierte Eindringprüfung zur Bestimmung der Härte und anderer Werkstoffparameter“, Blatt 1 bis 3, Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Berlin, (2003)
- Oli92** OLIVER, W. C., Pharr, G. M.: „An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments”, J Mater Res. 7, (1992)
- Nix02** NIX, W., Saha, R. „ Effects of the substrate on the determination of thin films mechanical properties by nanoindentation”, Acta Materialia, (2002)
- Bük65** BÜCKLE, H.: „Mikrohärteprüfung und ihre Anwendungen“, Berliner Union Verlag, Stuttgart, (1965)
- Sch97** SCHWARZER, Norbert: „Kugeleindruckversuch in geschichtete Materialien“, Dissertation, TU Chemnitz, (1997)
- Ang06** ANG. A.: „Probability Concepts in Engineering: Emphasis on Applications to Civil and Environmental Engineering“, John Wiley & Sons Inc., (2006)
- Mun99** MUNZ, D.; Fett, T.: „Ceramics - Mechanical Properties, Failure Behaviour, Materials Selection“, Springer Verlag, Berlin, (1999)
- Gro01** GROSS, D.; Seelig, T.: „Bruchmechanik mit einer Einführung in die Mikromechanik“, 3. Aufl., Springer Verlag, Berlin, (2001)
- Sal82** SALMANG, H., SCHOLZE, H., „Keramik, Teil 1: Allgemeine Grundlagen und wichtige Eigenschaften“, Springer Verlag, Berlin, (1982)
- DIN84** DIN EN 843-5:2007-03: „Hochleistungskeramik - Mechanische Eigenschaften monolithischer Keramik bei Raumtemperatur - Teil 5: Statistische Auswertung“, Deutsche Fassung EN 843-5, (2006)

- Gre98** GREEN, D.J.: "An introduction to the mechanical properties of ceramics", Cambridge University Press, Cambridge, (1998)
- Her81** HERTZ, H.: „Über die Berührung fester elastischer Körper“, Journal für die reine und angewandte Mathematik 92, S. 156-171, (1881)
- Joh85** JOHNSON, K.L.: „Contact Mechanics“, Cambridge University Press, (1985)
- Jon75** JONES, D.: “An investigation of the edge-sliding mode in fracture mechanics”, Engineering Fracture Mechanics, pp. 261-270, Institute for the Study of Fatigue, Fracture and Structural Reliability, (1975)
- End01** ENDERS, S.: „Untersuchungen der mechanischen Eigenschaften von spröden Schicht- und Kompaktsystemen durch Deformation kleiner Volumina“, Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Math.-naturw. Fakultät, (2000)
- Sne65** SNEDDON, I. N.: “The relation between load and penetration in the axisymmetric Boussinesq problem for a punch of arbitrary profile”, Int. Journal of Engineering Science, Vol.3, No.1, pp. 47-57, (1965)
- Man04** MANN, W.: “Leading Edge” Of Wafer Level Testing”, IEEE SW Test Workshop. San Diego, (2004)
- Bro04** BROZ, J.: “Controlling Contact Resistance”, Evaluation Engineering, Nelson Publishing Inc., (2004)
- Eis06** EISELE, Prof. I.: “Grundlagen der Silizium-Halbleitertechnologie”, Vorlesungsmanuskript, Universität der Bundeswehr, Institut für Physik, Neubiberg, (2006)
- Sau01** SAUTER, Prof. I.: „Technologie Integrierter Schaltungen“, Vorlesungsmanuskript, Universität der Bundeswehr, Institut für Elektrotechnik, Neubiberg, (2001)
- Hil08** HILLERINGMANN, Prof. U.: „Silizium-Halbleitertechnologie, Grundlagen mikroelektronischer Integrationstechnik“, 5. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, (2008)
- Bla69** BLACK, J. R.: „Electromigration Failure Modes in Aluminium Metallization for Semiconductor Devices”, Proceedings of the IEEE, Vol. 57 (No. 9), pp. 1587-1594, (1969)

- Hau04** HAU-RIEGE, C.S.: “An Introduction to Cu Electromigration”, Microelectronical Reliability. Vol. 44, (2004)
- Gon00** GONELLA, R.; Motte, P.; Torres, J.; “Assessment of copper contamination impact on inter-level dielectric reliability performed with time-dependent-dielectric-breakdown tests”, Microelectronics Reliability Elsevier: 2000. vol.40, Dresden, (2000)
- Wef87** WEFERS, K., MISRA, C.: “Oxides and Hydroxides of Aluminium”, Alcoa Technical Paper No. 19, Alcoa Laboratories, (1987)
- DIN42** DIN EN ISO 4287: “Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren; Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit”, Europäische Norm DIN EN ISO 4287 (Deutsche Fassung), (1998)
- Rei08** REINL, M.; Nagler, O; Kaesen, F.; Eisele, I.: „Influence of Fluorine Contamination on Semiconductor Wafer Probing”, 26th IEEE International Conference on Microelectronics, Nis (Serbia), (2008)
- Goe01** GOEKEN, M., Kempf, M.: „Pop-Ins in Nanoindentations - The Initial Yield Point“, Zeitschrift für Metallkunde 92, 1061-1067, (2001)
- Ans10** “ANSYS 10.0 Programmer's Guide”, SASIP Inc., Cannonsburg (PA), (2007)
- Jun01** JUNG, M.: “Methode der finiten Elemente für Ingenieure“, Teubner Verlag, Stuttgart, (2001)
- Bro03** BROCKE, H.: “FEM Analysis of a Via-Line Structure in Cu Technology with Low-k Dielectric with Respect to the Distribution of Current Density and Temperature”, 2<sup>nd</sup> VDE Microtechnologies Congress, München, (2003)
- Awa04** AWAD, E.: „Active Devices and Wiring under Chip Bond Pads: Stress Simulations and Modeling Methodology“, Proceedings of 54<sup>th</sup> IEEE Electronic Components and Technology Conference, (2004)
- Yon05** YONG, L., et. al. “Probe Test Failure Analysis of Bond Pad Over Active Structure by Modeling and Experiment”, Proceedings of 55<sup>th</sup> IEEE Electronic Components and Technology Conference (ECTC), (2005)

- Jac05** Jackson, R: „A Finite Element Study of Elasto-Plastic Hemispherical Contact against a Rigid Flat”, Journal of Tribology, Volume 127, pp. 343–354 (2005)
- Jia06** Jiang, J: „ Preliminary Finite Element Analyses of the Elasto-Plastic Response of Substrates Indented by Periodic Arrays of Smooth Strip Punches”, Report No. ME-MA2-06, Department of Mechanical Engineering, Louisiana State University, USA, (2006)
- Hua03** HUA, Y.N.; et. al.: “A Study on Fluorine-Induced Corrosion on Microchip Aluminum Bondpads”, Proceedings of the 28<sup>th</sup> Int. Symposium for Testing and Failure Analysis, Santa Clara (CA), (2003)
- Hes03** HESS, K.; et. al.: “Reliability of Bond over Active Pad Structures for 0.13- $\mu\text{m}$  CMOS Technology”, Proceedings of 53<sup>rd</sup> Electronic Components and Technology Conference (ECTC), (2003)
- Cho02** CHOU, K.; Chen, M.: “Active devices under CMOS I/O pads”, IEEE Transactions on Electronic Devices, Vol. 49, No. 12, (2002)
- Hei94** HEINEN, G.; Stierman, R.J.: “Wire bonds over active circuits”, Proceedings of 44th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), (1994)
- Hub05** HUBER, T.; Bauer, R.; Nagler, O.; et. al.: “Final Report of 8D-XOAA Team”, Infineon Technologies AG, München, (2005)
- Ric04** RICCARDI, B.; Montanari, R.: „Indentation of metals by a flat-ended cylindrical punch“, Materials Science and Engineering, p. 281-291, (2004)
- Liu00** LIU, X.H., Suo, Z.: „Developing design rules to avert cracking and debonding in integrated circuit structures“, Engineering Fracture Mechanics, p. 387-402, (2000)
- Deg04** DEGRYSE, D.; Vandeveldel, B.: „FEM Study of Deformation and Stresses in Copper Wire Bonds on Cu LowK Structures during Processing“, Proceedings of 54<sup>th</sup> Electronic Components and Technology Conference, New Orleans (USA), (2004)

## Eigene Veröffentlichungen

- Nag01** Nagler, O.; Reinl, M.; Kaesen, F.; Eisele, I.: „An Advanced Probe Characterization Tool for Online Contact Basics Measurements”, IEEE SW Test Workshop, San Diego (USA), (2005)
- Nag02** Nagler, O.; Reinl, M.; Kaesen, F.; Eisele, I.: „Advanced Characterization of Semiconductor Wafer Probing Methodology”, 23<sup>rd</sup> International Conference on Electrical Contacts (ICEC06), Sendai (Japan), (2006)
- Nag03** Reinl, M.; Nagler, O.; Kaesen, F.; Eisele, I.: „Influence of Fluorine Contamination on Semiconductor Wafer Probing”, 26<sup>th</sup> IEEE International Conference on Microelectronics, Nis (Serbia), (2008)
- Nag04** Degen, C., Nagler, O.; Horn, M.; Kaesen, F.: “Parametric Study of Contact Fritting for Improved CRes Stability”, IEEE SW Test Workshop, San Diego (USA), (2006)
- Nag05** Nagler, O.; Degen, C.; Kaesen, F.: „Enabling advanced cantilever probe cards for POAA wafer-test”, 3<sup>rd</sup> Infineon Test Summit, Ottobrunn, (2007)
- Nag06** Nagler, O.: “Generation Mechanism and Avoidance of Oxide Cracks during Probing-Over-Active-Area”, 1<sup>st</sup> Infineon Design-for-Manufacturing Conference, Munich, (2005)
- Nag07** Reinl, M.; Nagler, O.; Eisele, I.: „Advanced Characterization of Probing Methodology”, 8<sup>th</sup> European Manufacturing Test Conference (EMTC), Munich, (2006)

# Anhang

## Materialkennwerte

Werkstoff	E-Modul [MPa]	Poisson- zahl	Dichte [kg/dm <sup>3</sup> ]	Bruch-Festigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]			K <sub>1c</sub> [MPa m <sup>1/2</sup> ]	Fließ- spannung [N/mm <sup>2</sup> ]
				Druck	Zug	Biegung		
Aluminium (Film)	70000	0.33	2.70	176			-	124
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	400000	0.26	3.98	2945		414	3.70	
Silizium [110]	168400	0.28	2.33	7000			0.94	
SiC	480000	0.17	3.00	3000				
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	320000	0.25	3.10	800			3.20	
Wolfram	395000	0.28	19.25	5000			-	2900
Diamant	1035000	0.07	3.52	65000			5.30	
Gold	79000	0.25	19.30	300			-	
Quarzglas (SiO <sub>2</sub> )	72500	0.17	2.20	1230 (16000)	90	30	1.15	
Kupfer	132000	0.33	8.96	430			-	

Tab. 10: Materialeigenschaften der Komponenten

Quellen:

<http://www.memsnet.org/material/>

<http://www.ceramics.nist.gov/srd/summary/ftmain.htm>



## ANSYS Macro's

```

2d_material
!*** Material data *****

! All dimensions in mm

/units,user,1e-3,1e+3      ! mm, t, s => N
PI=ACOS(-1)
*afun,deg      ! Use degrees for angular functions
btol,1.0e-6

/pnum,mat,1
/number,1

mpdele,all,all

! Mat 1: Diamant
mp,ex,1,1035E+3      ! Youngs modul
mp,nuxy,1,0.07

! Mat 2: Aluminium
ex,2,200E+3
nuxy,2,0.33

mat_nr=21
ex,mat_nr,200E+3      ! E-Modul from Indenter
measurements
nuxy,mat_nr,0.33
TB,BISO,mat_nr,6
TBDATA,1,325,0,,,,

! Mat 4: Silicon
mat_nr=4
ex,mat_nr,1.68900e+5
nuxy,mat_nr,0.063

! Mat 5: SiO2
mat_nr=5
ex,mat_nr,72.5E+3
nuxy,mat_nr,0.17

! Mat 6: SiN Perdue Database
mat_nr=6
ex,mat_nr,320e+3
nuxy,mat_nr,0.25

! Mat 7: Cu
mat_nr=7
EX,mat_nr,132e+03
NUXY,mat_nr,0.33

!*****
/eof

```

```

2d_hertz
!***** Ball geometry *****

bd = 10e-3      ! Ball diameter

! Modelling ball

k,1,0,bd/2,0
k,2,+bd/2,bd/2,0
k,3,0,bd/2,1.0

l,1,2
arotat,all,,,,,1,3,-90
!k,4,0,0,0
!k,5,0,bd/3,0
!k,6,0,0,2.0
k,7,0,-3e-3,0
k,5,0,bd/3,0
k,6,0,-3e-3,2.0
l,7,5
arotat,4,,,,,7,6,-90

aovlap,all

adele,5,,,1

allsel
nummrg,all

et,1,42,      ! 2D solid (plane stress)
!et,1,82,      ! 2D nonlinear solid (plane stress)

mshkey,0
mshape,0,2d
aatt,1,,1,

lesize,7,,,40,2,1
lesize,8,,,60,2,1
esize,,20
smrtsize,off
amesh,3

!arsym,x,3,,,0

esize,
asel,s,area,,4
!sla
lesize,all,,,10,,
amesh,4

alls
nummrg,node,1E-6

!*****
/eof

```

## Anhang

```

2d_punch
!***** Punch geometry *****

! Delete ball
asel,s,mat,,1,,1
aclear,all
adele,all,,1

bd = 10e-3      ! punch diameter 1
!rc = 0.5e-3    ! Edge radius 1
!rc = 2.0e-3    ! Edge radius 2
!rc = 4.8e-3    ! Edge radius 9
rc = 5.0e-3     ! Edge radius 10

! Modelling punch

rectng,0,bd/2,0,bd
cyl4,bd/2-rc,rc,rc,270,,360

aovlp,all
adele,3,,1
aadd,all

! mesh ball

et,1,42,      ! 2D solid (plane stress)
!et,1,82,     ! 2D nonlinear solid (plane stress)

mshkey,0
mshape,0,2d
aatt,1,,1

lesize,13,,40,,1 ! Modify according to radius rc,
(=5.0)
!lesize,13,,5,,1 ! Modify according to radius rc,
(=4.8)

!lesize,7,,7,3,1 ! For rc = 0.5
!lesize,10,,20,3,1 ! For rc = 2.0
!lesize,10,,15,3,1 ! For rc = 1.0
!lesize,10,,4,1,1 ! For rc = 0.2
!lesize,7,,30,5,1 ! For rc = 3.0
lesize,10,,40,5,1 ! For rc = 5.0
!lesize,7,,40,5,1 ! For rc = 4.5, 4.0, 4.8

!lesize,6,,25,1/10,1 ! exclude for rc = 5.0
!lesize,14,,25,1/10,1 ! exclude for rc = 5.0

esize,,10
smrtsize,off
amesh,1

alls

!***** *****
/eof

```

```

2d_bulk
!***** Bulk pad *****

! Pad & Layer geometry

!cl = +1.0e-5      ! Chuck clearance

pl = 100e-3        ! Al pad length
!pd = 1.2e-3       ! Al pad thickness
!pd = 0.5e-3       ! Al pad thickness
!pds = 10          ! Al pad thickness element
division
pd = 0.3e-3        ! Al pad thickness
pds = 6            ! Al pad thickness
element division
!pd = 0.1e-3       ! Al pad thickness
!pds = 2           ! Al pad thickness
element division

oxd = 8.0e-3       ! SiO2 total thickness
oxd1 = 1.0e-3      ! SiO2 top layer thickness
oxl = 120e-3       ! SiO2 width

sind = 0.1e-3      ! SiN depth

!cud = 0.6e-3      ! Cu metal depth
cud = 1.0e-3       ! Cu metal depth
cul = 25.0e-3      ! Cu metal length
sp = (pl/3)-cul    ! Cu spacing

c4d = 0.550e-3     ! Metal 4 depth
c4l = 50.0e-3      ! Metal 4 width

usgm_d=0.00032     ! Last USG depth

et,11,182,2,,     ! 2-D 4-Node Structural
Solid

! Modelling & meshing layer

rectng,0,+pl/2,-cl,-pd-
cl,                ! Al pad total
rectng,0,+30e-3,-cl,-pd-
cl,                ! Al pad contact area

rectng,0,+oxl/2,-cl,-cl-
oxd,               ! all Oxid

rectng,0,+oxl/2,-pd-cl-oxd1,-pd-cl-oxd1-
sind               ! SiN layer

rectng,pl/2-sp/2,pl/2-sp/2-cul,-pd-cl-oxd1-sind,-pd-
cl-oxd1-sind-cud ! Metal 5
rectng,0,+cul/2,-pd-cl-oxd1-sind,-pd-cl-oxd1-sind-
cud

```

```
rectng,0,+oxl/2,-pd-cl-2*oxd1-sind-cud,-pd-cl-
2*oxd1-sind-cud-c4d ! Metal 4
```

```
allsel
asel,u,mat,,1
lsla
```

```
aovlp,all
```

```
asel,s,area,,11
lsla
lsel,u,loc,y,-cl-1e-6,-cl-pd+1e-6,
lesize,all,,,200,3,1
```

```
asel,s,area,,11
lsla
lsel,r,loc,y,-cl-1e-6,-cl-pd+1e-6,
lesize,all,,,pds,,1
```

```
mshkey,2
asel,s,area,,11
aatt,2,,1
!aatt,21,,11
!aatt,5,,1
amesh,all ! Mesh Al pad contact area
```

```
allsel
```

```
esize,pd/3
mshkey,0
asel,s,area,,10
aatt,2,,1
!aatt,5,,1
amesh,all ! Mesh Al pad rest
```

```
mshkey,0
esize,cud/5
asel,s,area,,7
asel,a,area,,13
aatt,7,,1
!aatt,5,,1
amesh,all ! Mesh Cu Top Layer
```

```
esize,c4d/2
asel,s,area,,9
!aatt,7,,1
aatt,5,,1
amesh,all ! Mesh Cu Bottom Layer
```

```
!lesize,oxd/10
esize,cud/5
asel,s,area,,12,16,2,1
!lsl,r,loc,x,,0
!lesize,all,,,4,,1
aatt,5,,1
amesh,all ! Mesh Oxid
```

```
esize,cud/3
asel,s,area,,15
!aatt,6,,1
aatt,5,,1
amesh,all ! Mesh SiN Layer
```

```
allsel
```

```
!*****
/eof
```

```
2d_xsym
!***** x-Symmetry
*****
```

```
allsel
arsym,x,all,,,0
```

```
esel,u,mat,,1
nsle
nummrge,node,1E-6
```

```
esel,s,mat,,1
nsle
nummrge,node,1E-6
```

```
allsel
```

```
!*****
/eof
```

```
2d_contact
!***** Tip-to-Pad Contact *****
```

```
et,2,169, ! 2-D Target Segment
```

```
et,3,171, ! 2-D Node-to-Surface Contact
```

```
keyopt,3,5,4 ! Auto ICONT
```

```
! real constants contact element
```

```
fkn = 1.0
ftoln = 0.1
taumax = 10e+3
slto = 0.1e-1
pinb = -20e-3
pmin =
pmax = 1.0e-5
```

```
r,20,,,,,
rmore,,,,
rmore,,,,
rmore,,,,,
```

## Anhang

```

! Mat 10: Contact pair

mp,mu,10,0.01      ! Friction coeff. for load case
without scrub
!mp,mu,10,0.5      ! Friction coeff. for load case
with scrub

asel,s,mat,,1,,1
!lsl,r,loc,y,-0.1e-3,rc+0.1e-3      ! punch
lsl,s,line,,4,8,4      ! ball
nsl,s,1
cm,tip,node      ! Contactor nodes

allsel
asel,u,mat,,1,
lsla
lsl,r,loc,y,-cl-1.0e-6,-cl+1.0e-6
lsl,r,loc,x,-30e-3,+30e-3
nsl,s,1
cm,pad,node      ! Target surface

allsel

type,3
real,20
mat,10
cmsel,s,tip
esurf      ! Generate contact surface

type,2
cmsel,s,pad
esurf      ! Generate target surface

!nsl,s,loc,y,bd+1e-6,bd-1e-6      ! punch
nsl,s,loc,y,bd/2+1e-6,bd/2-1e-6      ! ball
nsl,r,loc,x,+1e-6,-1e-6
*get,nc1,node,,num,min

allsel

!*****
/eof

2d_solu_hertz
!***** Solution Hertz Pressure *****

/solu

antype,stat,new
solcon,on,on
kbc,0
/gst,on
autots,on      ! automatic time
stepping on
nropt,auto,,off
nlgeom,on
eqslv,pcg

```

```

cutcontrol,PLSLIMIT,0.50
shpp,warn

allsel

lsclear,all

! ***** beginning of a do-loop *****

! DOF Constraints

nsl,s,loc,y,-cl-oxd+1e-6,-cl-oxd-1e-6
d,all,all,0,,,,      ! ux=0, uy=0 Bulk
bottom
!d,all,ux,10.0e-3      ! Apply scrub in x-
direction on bulk bottom

!nsl,s,loc,y,bd+1e-6,bd-1e-6      ! punch
top
nsl,s,loc,y,bd/2+1e-6,bd/2-1e-6      ! ball top
cp,1,all,all      ! couple ball top
cerig,nc1,all,uxyz      ! couple ball top
d,nc1,ux,0      ! ux=0 ball top

allsel

!*do,ii,1,10,1

! Apply surface load (pressure) on top of ball

sfldel,all,all

!lsl,s,loc,y,bd+1e-6,bd-1e-6      ! punch
top
lsl,s,loc,y,bd/2+1e-6,bd/2-1e-6      ! ball top
!sfl,all,pres,50*ii      ! pressure = 150
(contact force = 5mN) valid for R=10µm; scale for
other R
sfl,all,pres,150      ! pressure = 150
(contact force = 5mN) valid for R=10µm; scale for
other R

allsel

!lswrite,ii

alls

!*enddo

NSUBST,250,,      ! SPECIFY
NUMBER OF SUBSTEPS IN LOAD STEP

! ***** end of a do-loop *****

alls
outres,all,2

!lssolve,1,1
solve,

```

```

finish

!*****
/eof

/post1

!set,1
!set,2
set,last

/view,1,0,0,+1
/pcb,all,,0
/dscale,1,1
!/dscale,1,100
!/dscale,

esel,u,type,,4
pldisp,2

! Contour plot

/view,1,0,0,+1
/dist,1,0.005
/dscale,1,1
/focus,1,0,0,0
/pcb,nfor,,0
/cont,1,25,

plnsol,u,y      ! Vertical displacement

esel,s,mat,,2,21,1      ! No tip
nsle

plnsol,s,y      ! Normal stress sy
plnsol,s,x      ! Tangential stress sx
plnsol,s,xy     ! Shear stress sxy
plnsol,s,eqv   ! Von-Mises stress

plnsol,epel,x   ! Elastic x-strain
plnsol,epel,y   ! Elastic y-strain
plnsol,epto,eqv ! Von-Mises strain

/view,1,0,0,+1
/dist,1,0.007
/dscale,1,1
/focus,1,0,-3e-3,0
/pcb,nfor,,1

pdef,sy,s,y

! Path Plot

esel,s,mat,,2,21,1      ! No tip
nsle

path,stress_z,2,,200      ! Path along z-axis
under contact point

ppath,1,,0.0e-3,0.0,
ppath,2,,0.0e-3,-cl-oxd,

!ppath,1,,-13.4e-3,0.0,
!ppath,2,,-13.4e-3,-cl-oxd,

pdef,sx,s,x
pdef,sy,s,y
pdef,sxy,s,xy

plpath,sx,sy,sxy

prpath,sx,sy,sxy

!*****

esel,s,mat,,2,21,1      ! No tip
nsle

path,surface,2,,200      ! Path along surface
ppath,1,,-pl/4,0.0,
ppath,2,,+pl/4,0.0,

pdef,sx,s,x

path,stress_x,2,,200      ! Path along x-axis
below Alu pad
ppath,1,,-pl/4,-pd,
ppath,2,,+pl/4,-pd,

pdef,sx,s,x
pdef,sy,s,y
pdef,sxy,s,xy
pdef,svmi,s,eqv
pdef,uy,u,y

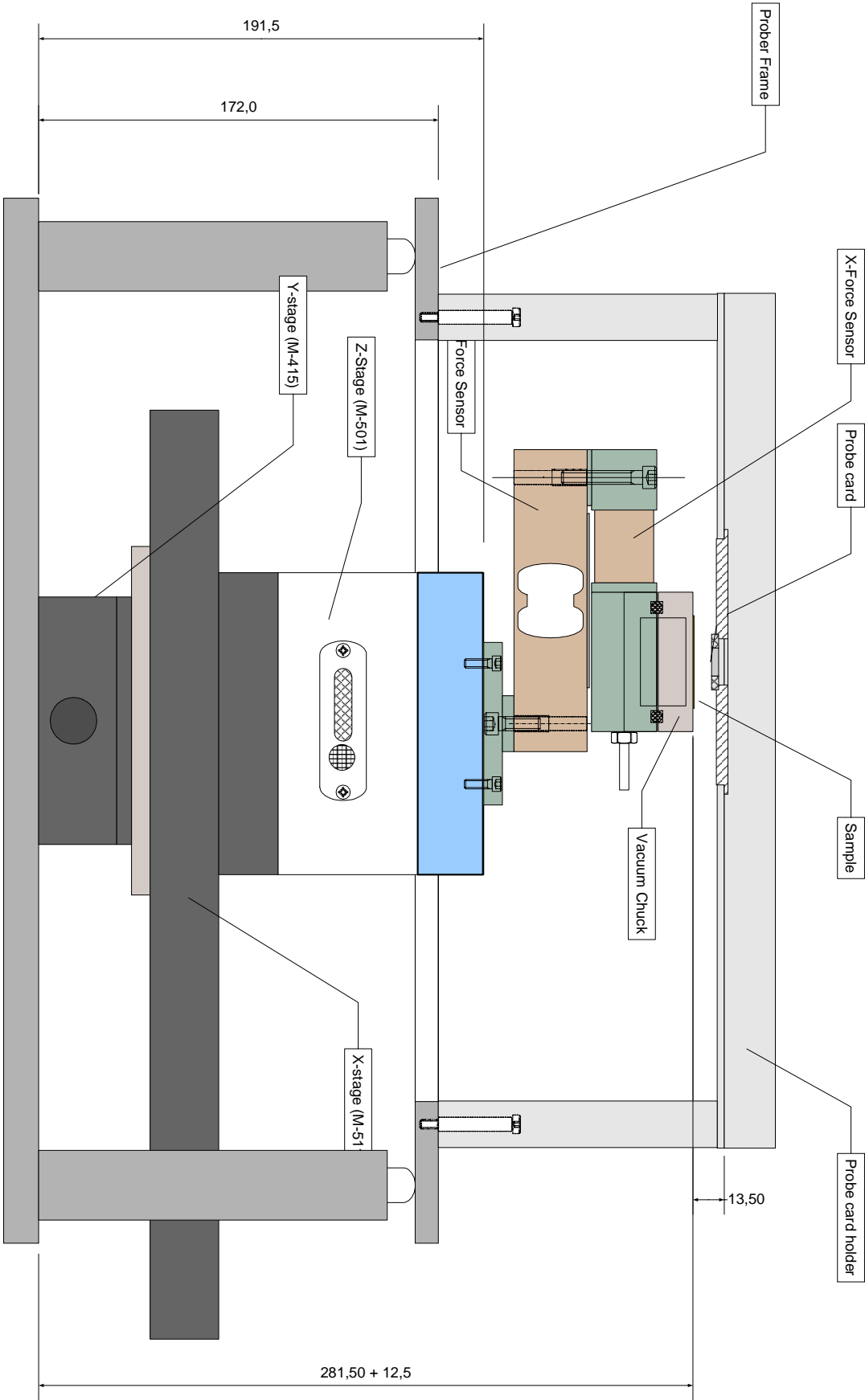
plpath,sx,sy,sxy
plpath,uy

prpath,sx,sy,sxy,uy

/eof

```

### Konstruktionszeichnung des Einzelnadel-Messplatzes



## **Abkürzungsverzeichnis**

BEOL	Back-end of Line
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CMP	Chemisch-mechanische Planarisierung
CRes	Contact Resistance
DIN	Deutsches Institut für Normung
DUT	Device under test
FEOL	Front-end of Line
FEM	Finite-Elemente-Methode
FSG	Fluor-Silikat-Glas
IC	Integrated Circuit
ILD	Interlevel Dielektrika
LEBM	Linear-elastisches Materialverhalten
MTTF	Mean time to failure
PoAA	Probing over Active Area
OD	Overdrive
REM	Rasterelektronenmikroskop
SiN	Siliziumnitrid
XPS	Röntgen-Photoelektronenspektroskopie





## Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit bei der Fa. Infineon Technologies AG, Abteilung für Test Technology, Neubiberg. Die technischen Erfahrungen und fachlichen Kenntnisse, die ich während meiner Tätigkeit als Entwicklungsingenieur im Bereich CMOS Wafer Test gesammelt habe, bildeten eine günstige Basis für diese Arbeit.

Herrn Professor Dr.-Ing. Ignaz Eisele danke ich für die Überlassung des Themas und sein stetes Interesse am Fortgang dieser Arbeit. Herrn Professor Dr. Hermann Baumgärtner möchte ich für die Übernahme des Koreferates und die wertvollen Hinweise bei der Fertigstellung dieser Arbeit danken. Herrn Professor Dr.-Ing. Christoph Jungemann danke ich für die Mitarbeit im Promotionsausschuss.

Die Durchführung der Arbeit wurde durch ein Kooperationsprojekt zwischen der Fa. Infineon Technologies AG und der Universität der Bundeswehr, Institut für Physik finanziell gefördert. In diesem Zusammenhang möchte ich speziell Herrn Klaus Luther, Leiter der Abt. Test Technology, für seine Unterstützung meiner Promotion und der Genehmigung des Projektes danken. Danken möchte ich auch besonders Herrn Dr.-Ing. Florian Kaesen, der durch seine engen Kontakte zur Universität der Bundeswehr, intensiven Anregungen, fachlichen Diskussionen und jeglicher Unterstützung die Arbeit erst ermöglicht hat.

Namentlich erwähnen möchte ich außerdem Herrn Markus Reinl, der zeitgleich mit mir am Institut für Physik auf einem fachlich ergänzenden Thema promoviert hat, wodurch ich wertvolle Erkenntnisse für diese Arbeit gewinnen konnte.

Weiterhin möchte ich mich bei allen Kolleginnen, Kollegen, Werkstudenten und Freunden bedanken, die durch ein gutes und freundliches Arbeitsklima direkt und indirekt zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Ganz herzlich danke ich meiner Frau Claudia und meiner Tochter Isabella, ohne deren Anteilnahme und Geduld diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

München, im März 2009

Oliver Nagler