

Aufbau- und Verbindungstechnik

Sensor- und Systemaufbau

Inhalt

1. Was ist ein Sensor?.....	1
2. Vielfalt von Sensoren.....	5
2.1 iPhone.....	5
2.2 Auto	21
2.3 Medizintechnik.....	33
2.4 Maschinenbau, Anlagen- und Prozesstechnik	45
2.5 Sicherheitstechnik	57
3. Mikroaktoren.....	61
4. Klassifikation mikrotechnischer Aufbauten.....	63
5. Gehäusetechnologie.....	67
5.1 Einführung	67
5.2 Verbindungstechnik und Gehäusetechnologie.....	71
5.3 Gehäusebauformen.....	81
6. Substrate und Systemträger.....	85
6.1 Standardleiterplatten	85
6.2 Designregeln am Beispiel Leiterplatte.....	91
6.3 Keramiksubstrate.....	95
6.4 Aufbauvarianten am Beispiel Herzschrittmacher	102
6.5 MID-Substrate	107
6.6 Aktuelle und neue Lösungen für kompakte Systeme.....	111
7. Qualität und Zuverlässigkeit	119
7.1 Einführung	119
7.2 Ausfallmechanismen	131
7.3 Zuverlässigkeitstests	137
7.4 Materialdatenbestimmung	145
7.5 Modellierung und Simulation	149

1. Was ist ein Sensor?

Sensorium (lat.) = das Empfindungsvermögen

Definition (in Anlehnung an Göpel et al., "Sensors"): Sensoren liefern ein brauchbares elektrisches (optisches, pneumatisches) Ausgangssignal **Y** als Folge einer zu bestimmenden physikalischen oder chemischen Eingangsgröße **X**

1. Mechanische Sensoreingangsgrößen: Länge, Fläche, Volumen, Winkel einschließlich deren 1. und 2. Ableitung nach der Zeit, Durchfluss, Kraft, Druck, Drehmoment, akustische Wellenlänge, akustische Intensität

2. Thermische Sensoreingangsgrößen: Temperatur, Wärmemenge, spezifische Wärme, Entropie, Wärmeübergang, Wärmestrahlung

3. Elektrische Sensoreingangsgrößen: Strom, Spannung, Ladung, Widerstand, Induktivität, Kapazität, Dielektrizitätskonstante, Polarisierung, elektrisches Feld, Frequenz, Dipolmoment

4. Magnetische Sensoreingangsgrößen: Flussdichte, Feldstärke, magnetisches Moment, Permeabilität

5. Strahlungs-Sensoreingangsgrößen: Intensität, Phase, Wellenlänge, Polarisierung, Reflektivität, Transmission, Brechungsindex

6. Chemische Sensoreingangsgrößen: Zusammensetzung, Konzentration, Reaktionsrate, pH, Redox-Potential

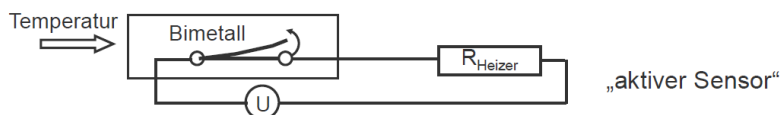
Weitere Unterscheidungsmerkmale:

aktive Sensoren: benötigen keine Hilfsenergie (thermoelektrischer Effekt, piezoelektrischer Effekt, ...)

passive Sensoren: benötigen Hilfsenergie, z. B. elektrischen Strom (piezoresistiver Sensor, Widerstandstemperatursensor, ...)

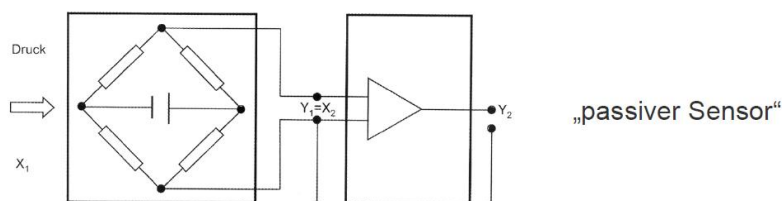
Beispiele für verschiedene Typen von Sensoren/Sensorsystemen:

1. Bimetall-Temperatursensor mit Schalter, z.B. Elektroherd als einfachstes Sensor-Reglersystem, Eingangsgröße: Temperatur der Herdplatte, Ausgangsgröße: Heizstrom der Herdplatte.

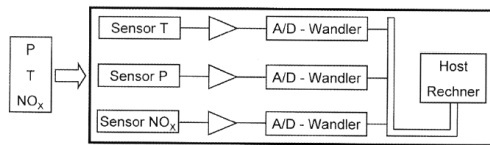


2. Piezoresistiver Drucksensor mit Verstärker

Eingangsgröße: Druck, Ausgangsgröße: elektrische Spannung.



3. Multisensorsystem mit Verstärker, Analog-Digital-Wandler (A/D-Wandler), Rechner
Eingangsgrößen: Temperatur, Druck und NO_x-Gehalt im Abgas, Ausgangsgrößen: digitale Werte in Binärdarstellung.



Sensorsysteme mit
aktiven und passiven
Sensoren

Weltmarkt Sensoren

Rangfolge von Sensoren mit den größten Marktvolumina nach Stückzahl:

1. Temperatursensoren
2. Drucksensoren (ohne Differenzdruck)
3. Durchflusssensoren (inkl. Differenzdruck-sensoren für Durchflussmessung)

Kenngößen von Sensoren

1. Messbereich (Span oder Full Scale Input): Bereich der Eingangsgröße (X) mit sinnvollem Wert der Ausgangsgröße (Y)

2. Vollausschlag (Full Scale Output bzw. FSO): Differenz der Ausgangsgröße (Y) für die obere und untere Grenze des Messbereichs

3. Genauigkeit (Accuracy): maximale Abweichung zwischen den idealen und den vom Sensor ausgegebenen Werten (Ungenauigkeit), Angabe in absoluten Einheiten oder als % - Angabe (relativ)

$$\text{absolut: } E_a = \pm |Y_i - Y_w| \quad \text{relativ: } E_r = \pm 100 \cdot \frac{|Y_i - Y_w|}{FSO}$$

4. Auflösung (Resolution): kleinstes Inkrement der Eingangsgröße X mit sinnvoller Ausgangsgröße Y, Angabe in absoluten Einheiten oder als % - Angabe

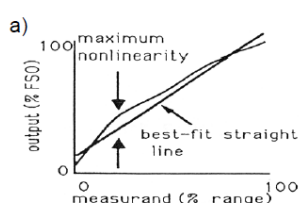
$$R = \Delta X_{min}$$

5. Empfindlichkeit (Sensitivity): Änderung der Ausgangsgröße Y mit der Eingangsgröße X

$$S = \frac{dY}{dX}$$

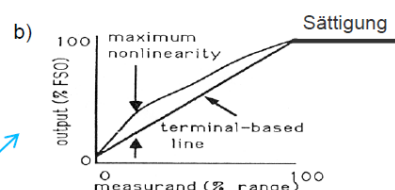
6. Querempfindlichkeit (Selectivity): bei Multisensorsystemen mit N Sensoren j für M Eingangsgrößen i: $S_{ij} = dY_j/dX_i$ Querempfindlichkeit des Sensors j auf Änderungen der Eingangsgröße i. Bei einem idealen Sensorsystem ist S_{ij} eine Diagonalmatrix, d. h. der Sensor hat keine Querempfindlichkeit.

7. Nichtlinearität (Nonlinearity): Eine lineare Kennlinie ist eine Gerade durch Ursprung und erfüllt die Bedingung $Y(X_1 + X_2) = Y(X_1) + Y(X_2)$



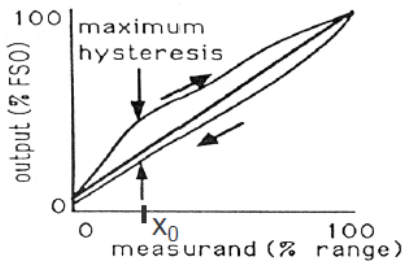
Abweichung von der Ausgleichsgerade durch alle (X_i, Y_i)

Abweichung von der Gerade (X_{min}, Y_{min}) und (X_{max}, Y_{max})

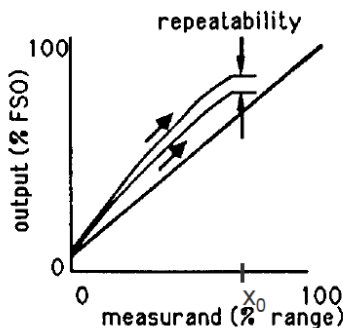


8. Nullpunktabweichung (Offset): Ausgangsgröße bei gegen Null strebendem Wert der Eingangsgröße

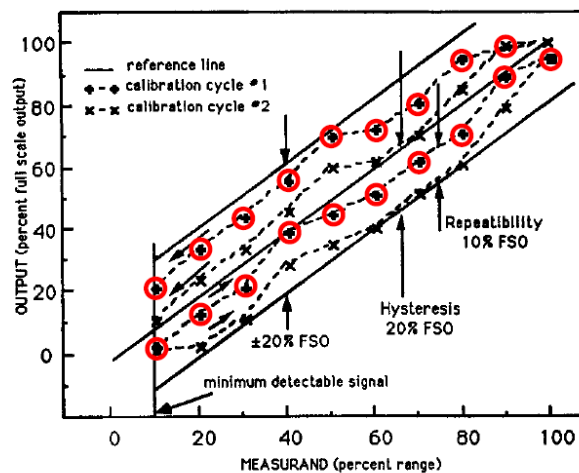
9. Hysterese (Hysteresis): Abweichung der Ausgangsgrößen $Y(X_0)$ beim Anfahren der Eingangsgröße X_0 von unten und von oben



10. Wiederholungenauigkeit (Repeatability)



Abweichung der Ausgangsgröße $Y(X_0)$ beim wiederholtem Anfahren der Eingangsgröße X_0 von einer Seite



Wiederholungenauigkeit, Hysterese und kleinstes messbares Signal:

11. Ausgangswiderstand (Output Impedance) Sensor mit Strom oder Spannung als Ausgangsgröße: Ausgangswiderstand des Wandlers

12. Rauschen, Rauschquellen (Noise) externes Rauschen: Eingangsgröße X rauscht internes Rauschen: Sensor erzeugt ein Rauschen am Ausgang

- Thermisches Rauschen (Shot Noise): statistische Bewegung der Ladungsträger bei allen Widerständen
- Rekombinations-Generationsrauschen: alle p-n-Übergänge
- 1/f-Rauschen (Flicker Noise): fallende Amplitude bei höherer Frequenz Alle Rauschquellen addieren sich in Ihrer Wirkung. Alle Rauschamplituden wachsen mit höherer Temperatur.

13. Kleinstes messbares Signal (Minimum detectable signal (MDS)): Kleinster Wert einer rauschfreien Eingangsgröße mit sinnvoller Ausgangsgröße. Das MDS entspricht dem effektiven Rauschpegel des Sensors (root mean square (RMS) equivalent noise)

14. Drift (Instability) Änderung der Empfindlichkeit S oder der Ausgangsgröße Y bei gegen Null strebender Eingangsgröße als Folge von äußeren Größen wie Temperatur, Zeit, mechanischen Erschütterungen etc., jedoch unabhängig von X

2. Vielfalt von Sensoren

2.1 iPhone

Touchscreen: Touchsensor

Plattenkondensator

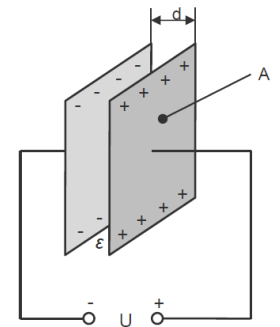
Funktionsweise:

- Der Kondensator kann Ladung speichern. Die Kapazität C ist ein Maß für die Speicherfähigkeit
- Die Kapazität C eines Kondensators berechnet sich zu:

$$C = \varepsilon \cdot \frac{A}{d} \text{ mit } \varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$$

Die Kapazität C hängt **nur** von der Geometrie und dem Dielektrikum ab.

- Es können Kräfte erzeugt werden (Aktor), da sich die Ladungen anziehen.
- Es können Kapazitätsänderungen / -differenzen oder Ladungsänderungen bedingt durch die Änderung der Geometrie (d , A) oder des Dielektrikums (ε_r) detektiert werden (kapazitiver Sensor).



$$\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ As / Vm}$$

ε_r ... Dielektrizitätszahl

$$\varepsilon_{r, \text{Luft}} \approx 1$$

$$\varepsilon_{r, \text{Wasser}} = 81$$

$$\varepsilon_{r, \text{Eis}} = 3,2$$

$$\varepsilon_{r, \text{Kunststoff}} = 3 \dots 8$$

$$\varepsilon_{r, \text{Keramik(X7R)}} = 1000 \dots 4000$$

Auf- und Entladung eines Kondensators

- Der Lade- / Entladestrom eines Kondensators ist gegeben durch:

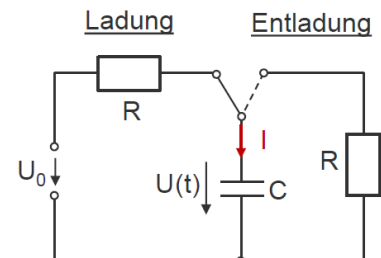
$$I = \frac{dQ}{dt} = C \cdot \frac{dU}{dt}$$

- Am Widerstand gilt das ohmsche Gesetz

$$R = \frac{U}{I} \rightarrow I = \frac{U}{R}$$

- Im Entladungsstromkreis mit R und C gilt:

$$C = \frac{dU}{dt} = -\frac{U}{R} \rightarrow \dot{U} = -\frac{1}{R \cdot C} \cdot U$$

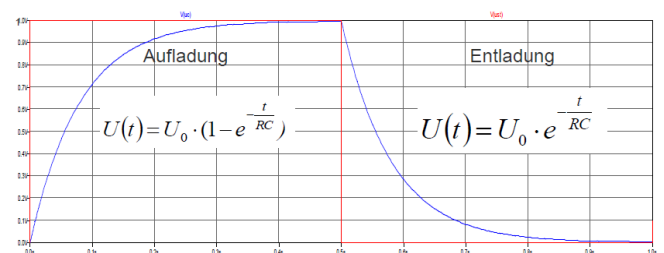


Die Lösung der DGL 1. Ordnung

$$\dot{U} = -\frac{1}{R \cdot C} \cdot U \text{ mit der Zeitkonstanten } \tau = R \cdot C$$

ergibt mit den entsprechenden Anfangsbedingungen die Auf- bzw. Entladekurve eines Kondensators.

Es gilt: $U(t = 0) = 0$ für die Aufladung
 $U(t = 0) = U_0$ für die Entladung



Kapazitive Touchsensoren

Prinzipien:

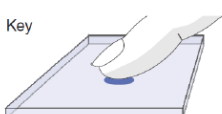
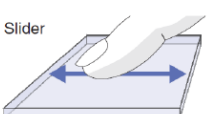
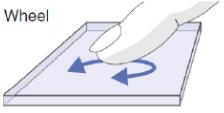
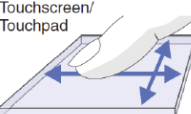
Typ 1: Eigenkapazitives Prinzip

- ➔ Eine Sensorelektrode, Mensch ist die zweite Elektrode

Typ 2: Wechselseitig-kapazitives Prinzip

- ➔ Zwei Sensorelektroden, Sende- / Empfängerelektrode
- ➔ Hohe Empfindlichkeit

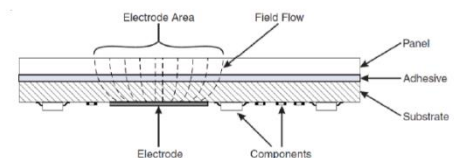
Dimensionen:

Zero Dimensional Sensors Single point of contact	One Dimensional Sensors Movement in one direction	Two Dimensional Sensors Movement in two directions
Key 	Slider  Wheel 	Touchscreen/ Touchpad 

Eigenkapazitive Touchsensoren

Funktionsweise:

- Der Finger hat eine Leitfähigkeit (100Ω).
- Eine Sensorelektrode
- Der Finger wirkt als Gegenelektrode.
- Zwischen der Elektrode und dem Finger bildet sich ein E-Feld (C).
- Die mit der Kapazitätsänderung verbundene Ladungsänderung wird detektiert (Ladungsverstärker).



Typische Elektrodenformen



Aufbau:

Protective Anti-reflective Coating:

- Antireflexbeschichtung mit angepasstem Brechungsindex n (z. B. $n = 1,38$ für MgF_2)

Protective Cover:

- PMMA, Polycarbonat, Glas ($n = 1,47$ für SiO_2)

Bonding Layer:

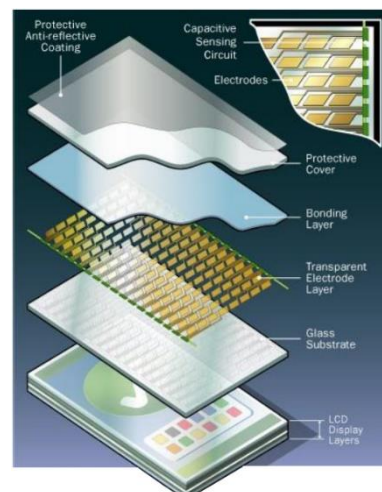
- Acrylfolie

Transparent Electrode Layer:

- Kupfer, Karbon, Silbertinte, Indiumzinnoxid

Substrate:

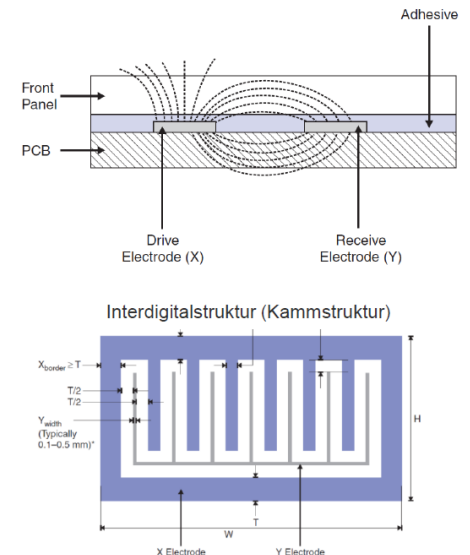
- Glas, PET, Polycarbonat



Wechselseitig-kapazitive Touchsensoren

Funktionsweise:

- E-Feld besteht zwischen X und Y Elektrode, Feldlinien verlaufen im darüber liegenden Panel.
- Berührendes Objekt (typ. Finger) unterbricht die Feldlinien, was eine Kapazitätsänderung zur Folge hat.
- Die mit der Kapazitätsänderung verbundene Ladungsänderung wird detektiert (Ladungsverstärker).
- Interdigitalstruktur erhöht die Kapazität und die Kapazitätsänderung, da die Kapazitäten der einzelnen Finger der Kämme parallel geschaltet sind.



Aufbau:

Protective Anti-reflective Coating:

- Antireflexbeschichtung mit angepasstem Brechungsindex n

Protective Cover:

- PMMA, Polykarbonat, Glas

Bonding Layer:

- Acrylfolie

Driving- / Sensing-Lines:

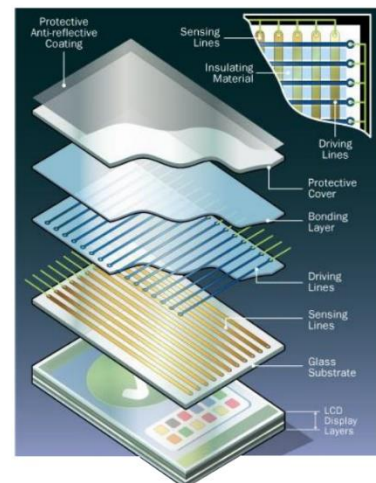
- Kupfer, Kohlen, Silbertinte, Indiumzinnoxid

Insulating Material:

- PMMA, SiO₂, PET,...

Substrate:

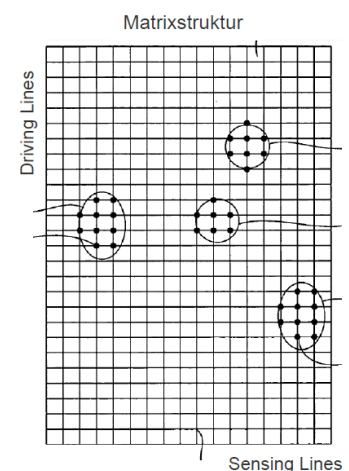
- Glas, PET, Polykarbonat



Multitouchfunktion mit wechselseitigem Prinzip

Funktionsweise:

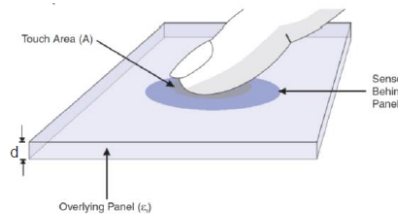
- Horizontale Elektroden (Driving Lines)
- Vertikale Elektroden (Sensing Lines)
- Horizontale und vertikale Elektroden liegen mit einem Abstand übereinander.
- E-Feld entsteht zwischen Driving und Sensing Lines, Kondensator bildet sich im Kreuzungspunkt
- Berührung mit Objekten (typ. Finger) führt zur Übertragung von Ladungen und verändert somit die Kapazität beim Berühren



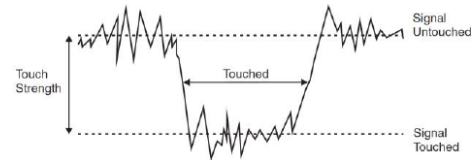
Design von Touchpads

Kapazität C: $C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d}$

Bei dünneren Frontplatten (Panels) aus Materialien mit höheren dielektrischen Konstanten entsteht beim Berühren eine höhere Kapazitätsänderung, demzufolge ein höheres Amplitudenverhältnis und ein besseres Verhältnis des Signals zum Rauschen (SNR).



ϵ_0 ... el. Feldkonstante
 ϵ_r ... Permittivitätszahl
 A ... Berührungsfläche
 d ... Dicke des Panel



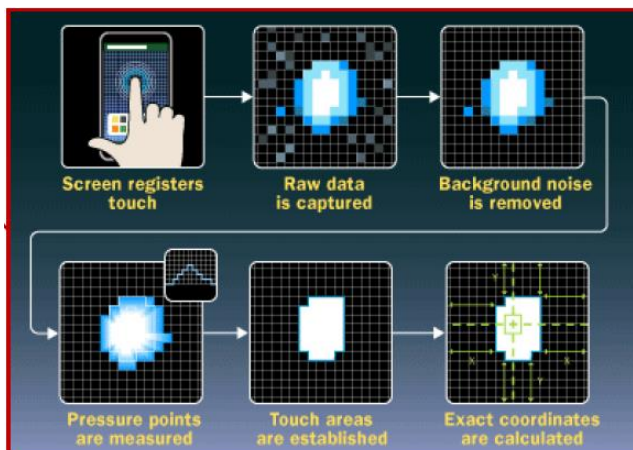
$$SNR(dB) = 20 \log(TouchStrength / NoiseTouched_{RMS100})$$

$$TouchStrength = SignalTouched_{AVG100} - SignalUntouched_{AVG100}$$

$$NoiseTouched_{RMS100} = \sqrt{\frac{\sum_{n=0}^{n=99} (Signal[n] - SignalTouched_{AVG100})^2}{100}}$$

- **AVG100**: Numerischer Durchschnittswert aus 100 gleichmäßig, über einen Zeitraum von 2 s verteilten Datenpunkten
- **RMS100**: Quadratischer Mittelwert aus 100 gleichmäßig, über einen Zeitraum von 2 s verteilten Datenpunkten mit dem Betrag aus AVG100 als Basis

Touchfunktion

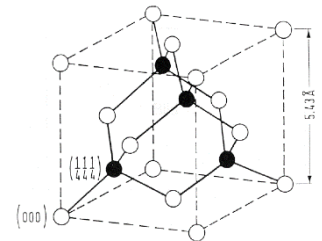


Grundbegriffe der Mikrosystemtechnik

- IC: **I**ntegrated **C**ircuit, Chip mit einer integrierten Schaltung
- ASIC: **A**pplication **S**pecific **I**ntegrated **C**ircuit (für spezielle Kundenanwendungen)
- MEMS: **M**icro **E**lectronic **M**echanical **S**ystems (z.B. Beschleunigungssensor)
- MOEMS: **M**icro **O**pto **E**lectronic **M**echanical **S**ystems (z.B. Mikrospiegelarray)
- Die: Bezeichnung eines Siliziumchips
- Bond Pad: Kontaktierungsfeld auf dem Die
- Test Pad: Kontaktierungsfeld für die Funktionsprüfung
- MOS-Transistor: **M**etal **O**xide **S**emiconductor, Feld-Effekt-Transistor
- CMOS: **C**omplementary **M**OS, integrierte Schaltung mit n-MOS und p-MOS Transistoren auf demselben Chip IC besteht aus CMOS-Elementen

Siliziumgitter oder Diamantgitter (4 kovalente Bindungen)

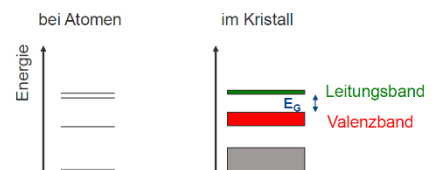
- 2 kubisch flächenzentrierte Gitter sind um 1/4 Periode versetzt ineinander gestellt
- Jedes Si-Atom hat 4 Bindungen und 4 nächste Nachbarn (KZ = 4)
- Si-Atom bildet mit den 4 Nachbarn ein Tetraeder
- Weitere Stoffe: Ge, Sn, Diamant, ...



Silizium als Halbleiter

Das Bändermodell von Festkörperkristallen

Im Bänderdiagramm oder Bändermodell werden die Zustände von Elektronen in einem Kristall beschrieben. Es gibt mehrere Energiebereiche, in denen viele quantenphysikalisch mögliche Zustände existieren, die energetisch so dicht liegen, dass sie als Kontinuum – als Energieband – angesehen werden können.

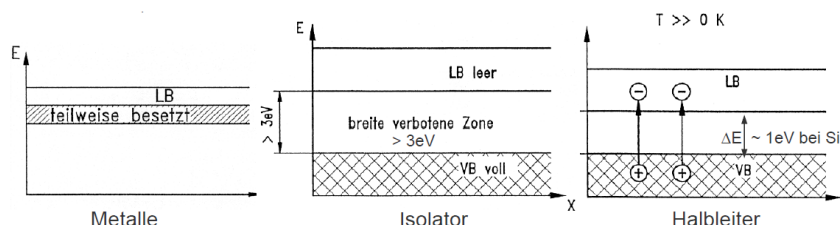


Der Mechanismus der elektrischen Leitung im Bändermodell

Der elektrische Strom wird durch die Bewegung von Ladungsträgern hervorgerufen:

$$\vec{j} = N \cdot q \cdot \vec{v} \quad (\vec{j} = \text{Stromdichte}, \quad N = \text{Ladungsträger / Volumen}, \quad q = \text{Ladung}, \quad \vec{v} = \text{mittlere Geschwindigkeit})$$

In voll besetzten Bändern kann kein Strom transportiert werden! Die Besetzung im obersten Band (Leitungsband) ist entscheidend für den Strom.



Halbleiter: Breite der verbotenen Zone ist klein (~1eV); aus dem Valenzband (VB) können e- thermisch in das Leitungsband (LB) angehoben werden und ein "Loch," (= fehlendes e-) im Valenzband hinterlassen. Die elektrische Leitung erfolgt über das frei bewegliche e- im LB und durch Platzwechsel des Lochs im VB und heißt intrinsische Leitung oder Eigenleitung; $N_i \sim e^{-\frac{\Delta E}{kT}}$

Isolatoren: Die verbotene Zone ist so breit, dass keine e^- thermisch aus dem Valenzband in das Leitungsband gelangen.

Leitungsmechanismus in n-Silizium

n-Silizium ist mit Atomen der 5. Hauptgruppe dotiert ($10^{12} - 10^{21} / \text{cm}^3$)

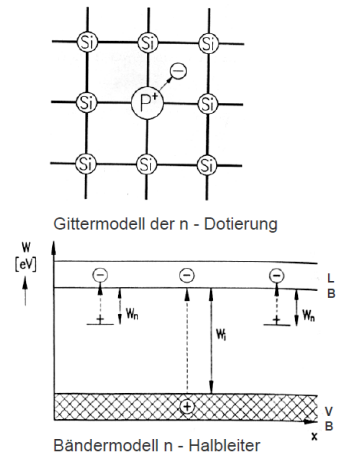
• Gittermodell:

Atom der 5. Hauptgruppe (z.B. Phosphor) hat ein Valenzelektron, das nicht für die Bindung im Gitter benötigt wird, und gibt dieses e^- als bewegliches e^- an das Gitter ab. Element der 5. HG ist ein "Donatoratom".

• Bändermodell:

Das Atom der 5. HG führt zu einem zusätzlichen Energieniveau direkt unterhalb des LB (Donatorniveau) mit der Energiedifferenz W_n . Da W_n klein ist ($W_n \sim 0,05$ eV), sind praktisch alle e^- des Donatorniveaus bei Raumtemperatur im LB angeregt.

- Das Donatoratom der 5. HG erzeugt ein Leitungselektron, aber hinterlässt kein Loch.



p-Silizium ist mit Atomen der 3. Hauptgruppe dotiert ($10^{12} - 10^{21} / \text{cm}^3$)

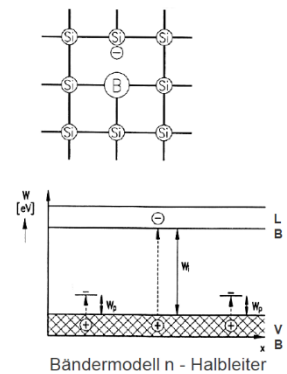
• Gittermodell:

Die fehlende Bindung des 3-wertigen B erzeugt eine Elektronenlücke (Loch). Das Loch kann durch e^- aus benachbarten Atomen des Gitters besetzt werden und damit durch Platzwechsel wandern.

• Bändermodell:

Das Atom der 3. HG führt zu einem zusätzlichen Akzeptorniveau direkt oberhalb des Valenzbandes (VB) mit der Energiedifferenz W_p . Da W_p klein ist ($W_p \approx 0,06$ eV) sind bei RT praktisch alle Akzeptorniveaus mit e^- aus dem VB besetzt. Das VB hat entsprechend Löcher.

- Die Löcher führen zu einem elektrischen Strom. Der Widerstand von p-Silizium ist bei gleicher Konzentration an Dotieratomen etwa 3 x größer als bei n-Silizium.



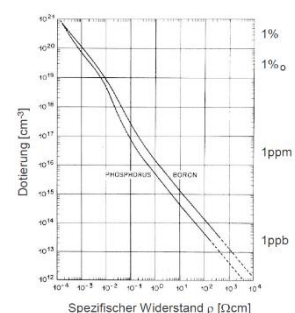
Spezifischer Widerstand von dotiertem Silizium bei Raumtemperatur

Die Dotierung wird in Dotieratomen pro Volumen $1/\text{cm}^3$ angegeben.

Der spezifische Widerstand hängt sehr stark von der Dotierung ab, d.h. um den Widerstand genau einzustellen, muss die Dotierung genau eingestellt werden und damit muss die Reinheit des Si-Kristalls vor der Dotierung sehr hoch sein.

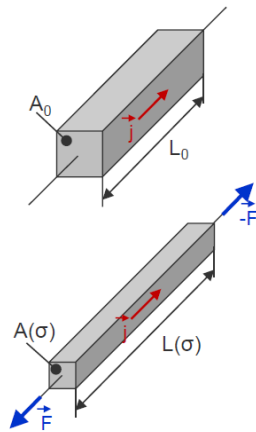
$$R = \rho \cdot \frac{l}{a}$$

R: elektrischer Widerstand, l: Länge des Widerstands a: Querschnittsfläche des Widerstands, ρ : spezifischer Widerstand



Auswirkungen des piezoresistiven Effekts für die AVT

Der Widerstand eines el. Leiters ist abhängig von der mechanischen Spannung



- Der Widerstand eines Leiters berechnet sich zu: $R = \rho \cdot \frac{L_0}{A_0}$
- Das Aufbringen einer mechanischen Spannung $\sigma = \frac{F}{A}$ bewirkt eine Geometrieänderung.
- Bei piezoresistiven Materialien ist auch der spezifische Widerstand abhängig von der mech. Spannung. Es gilt: $\rho = \rho(\sigma)$
- Der Widerstand eines piezoresistiven Materials lässt sich somit ausdrücken zu: $R_{\text{piez}} = \rho(\sigma) \cdot \frac{L(\sigma)}{A(\sigma)}$
- D.h. Widerstände in Silizium Chips können sich durch eingeprägte mechanische Spannungen verändern.
- Bei der AVT ist daher darauf zu achten, die Spannungen im Chip so gering wie möglich zu halten.

- Falls Spannungen eingepreßt sind, dürfen diese ihren Wert über die Lebensdauer des Chips nicht verändern.

Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit eines dotierten Halbleiters

Bereich 1:

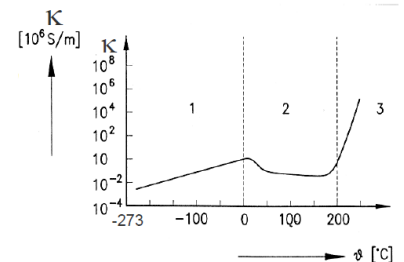
Anregung aller Akzeptor- und Donatorniveaus mit steigender Temperatur

Bereich 2:

Alle e- und Löcher sind aktiviert; κ nimmt ab, weil die Beweglichkeit auf Grund von Stößen der Ladungsträger abnimmt

Bereich 3:

Bei hohen Temperaturen wird die Eigenleitung durch Generierung von e-Loch-Paaren angeregt, die in Gebiet 1 und 2 nicht wesentlich zur Leitfähigkeit beitragen. Der Halbleiter ist ein „Heißleiter“.



$$\kappa = \mu \cdot q_e \cdot N$$

q_e ... Elementarladung

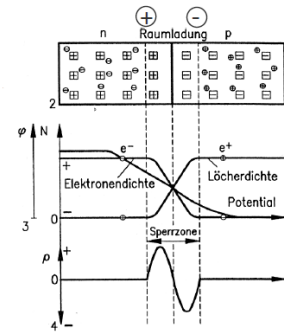
κ ... Leitfähigkeit

N ... Ladungsträgerdichte (Elektronendichte)

μ ... Beweglichkeit

Schematische Darstellung des symmetrischen unbelasteten p-n-Übergangs

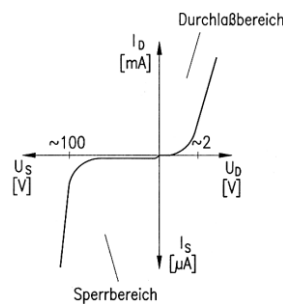
- Si mit gleicher Konzentration von p und n - Dotanten wird zusammengebracht
- Der abrupte Übergang der Konzentration ist nicht stabil: e⁻ diffundieren ins p-Gebiet Löcher diffundieren ins n-Gebiet
- Es entsteht eine Raumladungszone aus ionisierten Gitteratomen: positive Raumladung im n-Gebiet negative Raumladung im p-Gebiet
- Die Raumladungen hemmen den Diffusionsstrom: Gleichgewichtszustand
- Über dem p - n - Übergang entsteht eine Potenzialdifferenz (Diffusionsspannung $U_{diff} \approx 0,6 \text{ V}$ bei Si)



- 1 = Ausgangszustand des unbelasteten p-n-Überganges
 2 = unbelasteter p-n-Übergang nach Herausbildung der Verarmungszone (Sperrzone)
 3 = Ladungsstörungsichte und Potentialverlauf am unbelasteten p-n-Übergang
 4 = Raumladungsdichte am unbelasteten p-n-Übergang
- Symbolerklärung: $\square$ = ionisiertes Donatoratom
 $\square$ = ionisiertes Akzeptoratom
 $\bullet$ = Defektelektron
 $\circ$ = Leitungselektron
 N = Ladungsträgerdichte $N = \frac{n}{\text{Volumeneinheit}}$
 ϕ = elektrisches Potential
 ρ = Raumladungsdichte

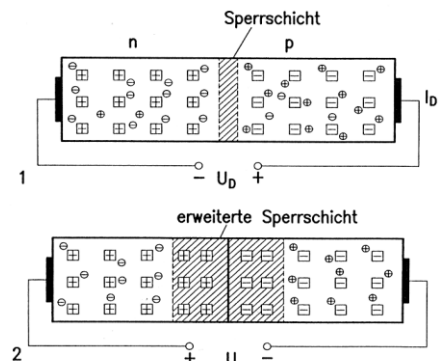
Der belastete p-n-Übergang oder die Diode

- Durchlassrichtung: äußere Spannung erniedrigt die Diffusionsspannung
- Sperrrichtung: äußere Spannung erhöht die Diffusionsspannung



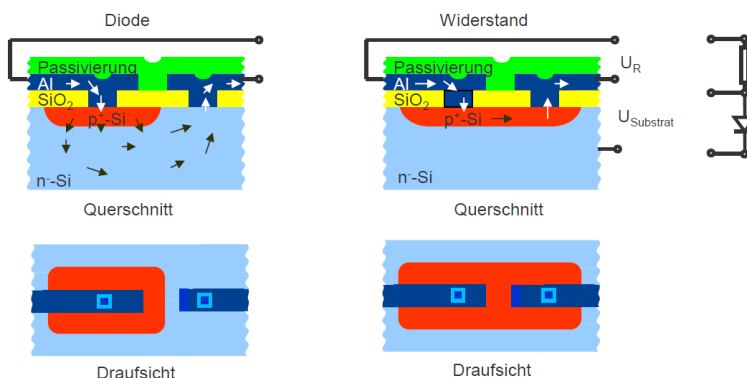
Kennlinie einer Si-Diode bei 22 °C

- Sperrstrom: Eigenleitung



- 1 = p-n-Übergang in Durchlassrichtung
 2 = p-n-Übergang in Sperrrichtung
- Symbolerklärung: $\square$ = ionisiertes Donatoratom
 $\square$ = ionisiertes Akzeptoratom
 $\bullet$ = Defektelektron
 $\circ$ = Leitungselektron

Wie sehen Diode und Widerstand auf einem Si-Wafer aus?



Der p+-Siliziumwiderstand besteht aus einem p⁺-Gebiet im n-Si, das mit dem Substrat eine Diode bildet, die durch Anlegen von $U_{Substrat}$ in Sperrrichtung geschaltet ist. Daher kann kein Strom durch das Substrat fließen und der Stromfluss wird auf das p⁺-Gebiet beschränkt. Damit ergibt sich ein definierter Widerstand.

Der innere fotoelektrische Effekt (Fotodiode)

Optoelektronisches Sensorelement:

- Licht kann als ein Fluss aus einzelnen Lichtquanten (Photonen) betrachtet werden.
- Die Energie E_{ph} eines Photons hängt von seiner Frequenz f bzw. seiner Wellenlänge λ ab (1).
- Treffen Photonen mit ausreichender Energie auf Atome, können e- aus dem Valenzband ins Leitungsband gehoben werden.
- Die zum Auslösen erforderliche Energie entspricht dem Unterschied zw. dem Energie-niveau des Valenzbandes E_V und dem des Leitungsbandes E_L , also ΔE (Bandabstand) (2).
- E_{ph} muss also größer sein als ΔE .

E_G : Energielücke der verbotenen Zone (**1,12 eV @ 300 °K**)

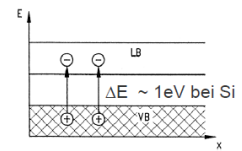
λ_{gr} : Grenzwellenlänge

h : Planck'sches Wirkungsquantum ($6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$)

c : Lichtgeschwindigkeit

- Absorptionskante bei $\lambda_{gr} = 1107 \text{ nm} = 1,107 \mu\text{m}$:
 - Silizium ist für infrarote Strahlung durchsichtig
 - Silizium absorbiert sichtbares Licht
- Photonen mit $\lambda_{gr} < 1107 \text{ nm}$ können Elektronen aus dem Valenzband ins Leitungsband anregen.

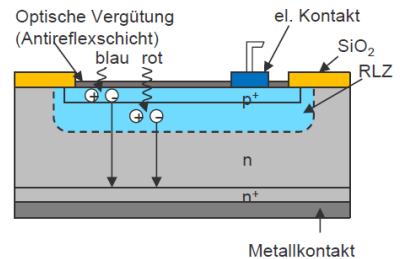
$$(1) E_{ph} = h \cdot f = h \cdot c / \lambda$$



$$(2) \Delta E = E_L - E_V$$

h ... Plancksches Wirkungsquantum

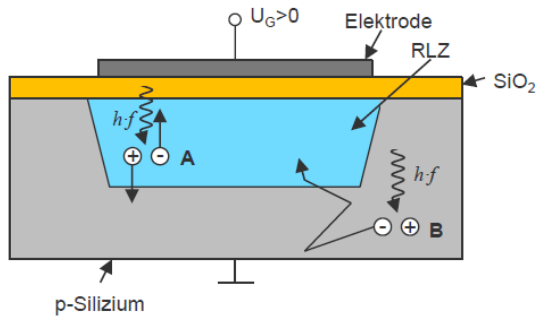
c ... Lichtgeschwindigkeit



$$\lambda < \lambda_{gr} = \frac{hc}{E_G}$$

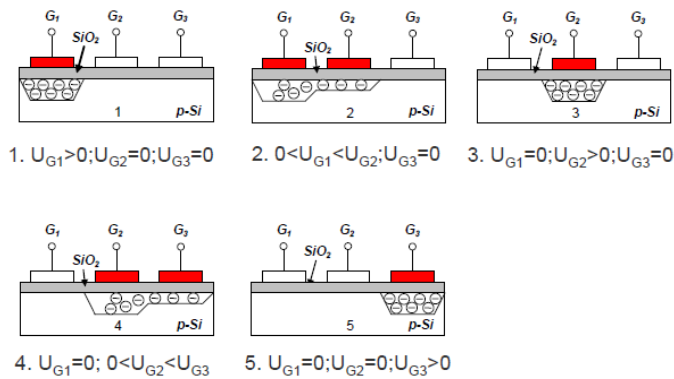
CCD (Charge-Coupled-Device) Bildsensoren

MOS-Kondensator:



- Anlegen einer pos. Spannung an die Sammelelektrode eines MOS-Elements
- Entstehen einer Raumladungszone (RLZ) aus ortsfesten positiven Ladungsträgern
- Die durch Lichteinfall photoelektrisch erzeugten e^- sammeln sich in RLZ (A,B)

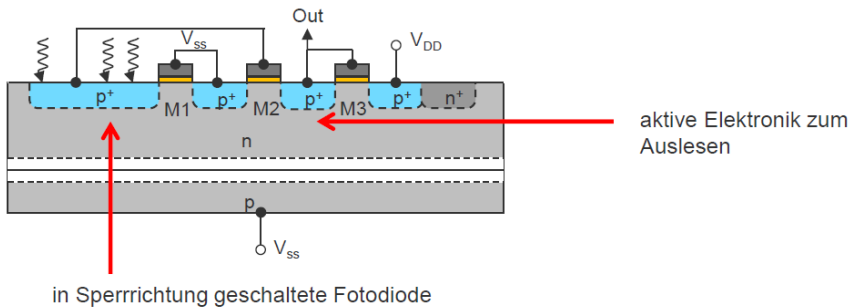
Ladungstransport beim CCD:



- Für Ladungstransport sind weitere Transferelektroden (G2 u. G3) neben Sammel-elektrode (G1) angebracht
- Anheben des Potentials einer Transferelektrode bei gleichzeitiger Absenkung des Sammelelektrodenpotentials (Schritt 2. u. 4.) und Verschiebung der Ladung in ein benachbartes MOS-Element, welches durch eine Blende vor Lichteinfall geschützt ist. Umwandlung der analogen Ladungen in ein Spannungssignal -> Auslesen durch A/D Wandler

CMOS Bildsensoren

CMOS Bildsensoren gelten heute im Vergleich zu CCD-Sensoren als fortschrittlichere Lösung (werden beim iPhone verwendet)



Unterschiede zum CCD-Sensor:

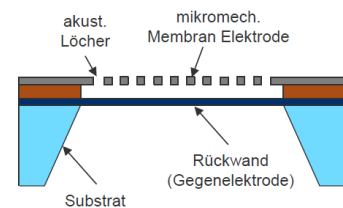
- Pixel werden **nicht** seriell ausgelesen, sondern sind wie beim RAM einzeln ansteuerbar. Zu jedem Pixel wird auch aktive Elektronik integriert
- Die Helligkeitswerte werden nicht proportional in elektrische Signale gewandelt, sondern vor der Auslesung logarithmiert. Erst durch diese Maßnahme lässt sich die Helldunkel-Dynamik auf mehr als 6 Dekaden ausdehnen.

Funktionsprinzip eines MEMS-Mikrofons

Mikrofone sind Wandler, die akustische Energie in elektrische Energie wandeln

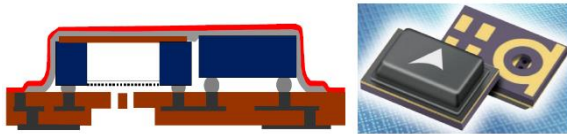
Siliziummikrofone

- wandeln akustische in elektrische Energie, indem sie die Druckschwankungen der Schallwelle messen. → hochfrequenter kapazitiver Drucksensor
- Mikrofon besteht aus mikromech. Membran mit akust. Löchern und Rückwand, welche zusammen einen Kondensator bilden. Auslenkung der Rückwand bewirkt eine Kapazitätsänderung weitgehend proportional zum Schalldruck.
- Mikrofone haben geringe Empfindlichkeit gegenüber statischem Druck, d.h. geringer Einfluss des Luftdrucks, aber eine hohe Empfindlichkeit bei einer Druckänderung.
- Nachteil von Kondensatormikrofonen: Bei hohen Frequenzen nimmt Empfindlichkeit ab, da sich der Strömungswiderstand des schmalen Luftspaltes der akust. Löcher erhöht. Durch eine größere Anzahl an Löchern lässt sich der akustische Widerstand verkleinern.
- $f = 15 \text{ Hz bis } 20 \text{ kHz}$



Gehäuse für MEMS-Mikrofone

Chip Size MEMS Package – CSMP



HTCC Substrat mit Schallloch

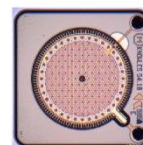
Flip-Chip bonden MEMS

Flip-Chip bonden ASIC

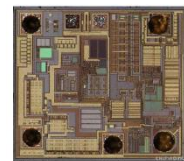
Polymer-Folie laminieren

Laserablation am Bauteilrand

Metallisierung: Sputtern und Galvanik



Mikrofon



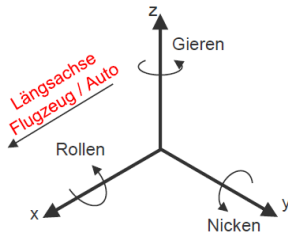
ASIC



Package

Wieso benötigt man Beschleunigungs- und Drehratensensoren für die Bewegungserkennung?

Ursprung aus Luft- und Raumfahrttechnik



Beim Flugzeug:

- Gieren: Korrektur mit Seitenruder
- Rollen: Querruder um Längsachse drehen
- Nicken: Höhenruder um Querachse drehen

Beim Auto:

- Gieren: Schleudern
- Rollen: Überschlag
- Nicken: Bremsen / Beschleunigen

Beschleunigungssensoren und Newton: $F = m \cdot a$

So lange keine Rotation des Systems auftritt, messen Beschleunigungssensoren die linearen Beschleunigungen richtig.

Bei Rotation des Systems, wird die Zentrifugalbeschleunigung ebenfalls erfasst und es gibt keine Möglichkeit lineare und zentrifugale Beschleunigung zu unterscheiden.

Drehratensensoren und Coriolis: $F = -2m \cdot (\Omega \times v)$

Bei Rotation eines Systems detektiert der Drehratensensor die Drehbewegung, während er die linearen Beschleunigungen nicht erfasst.

Die Kombination beider Systeme bildet ein Trägheitsnavigationssystem

Kapazitiver Beschleunigungssensor

Ein kapazitiver Beschleunigungssensor besteht aus zwei Kapazitäten C_1 und C_2 , die sich bei Bewegung der seismischen Masse gegenläufig ändern (Differentialkondensator).

Funktionsweise:

- Kapazitäten C_1 u. C_2 ergeben sich aus der Parallelschaltung der Einzelkapazitäten:

$$C_1 = C_{1,1} + C_{1,2} + C_{1,3} + \dots + C_{1,n} \text{ und } C_2 = C_{2,1} + C_{2,2} + C_{2,3} + \dots + C_{2,n}$$

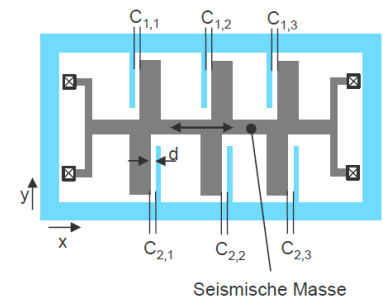
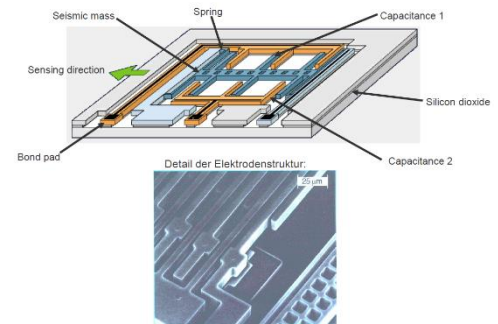
$$\text{mit } C_{1,n} = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{d+x} \text{ und } C_{2,n} = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{d-x}$$

- Am kap. Spannungsteiler (s. Schaltbild)) stellt sich die Ausgangsspannung U_A ein.

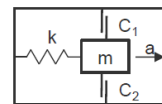
- Diese ist von der Beschleunigung a abhängig.

$$\text{mit: } F = m \cdot a \text{ und } x = \frac{F}{k} \rightarrow x = \frac{m \cdot a}{k}$$

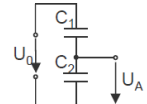
$$\text{ergibt sich: } U_A = U_0 \cdot \frac{\frac{1}{C_2}}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}} = \frac{1}{2} \cdot U_0 \cdot \left(1 - \frac{m}{k \cdot d} \cdot a\right)$$



Feder-Masse-System

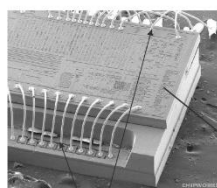


Schaltbild

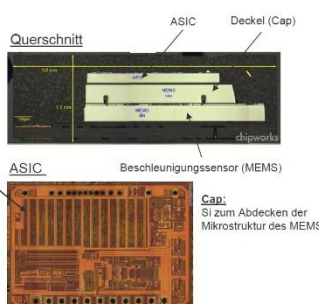


3-achsiger Beschleunigungssensor im iPhone

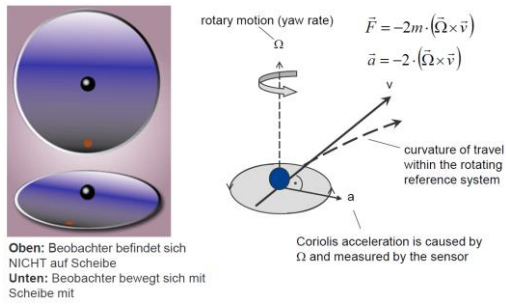
Funktion: Motion Sensing



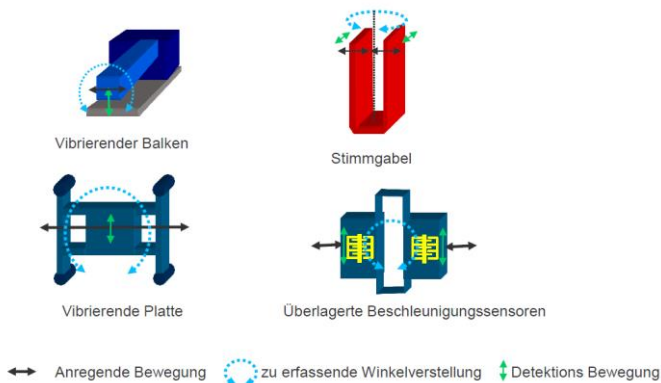
Bonddraht



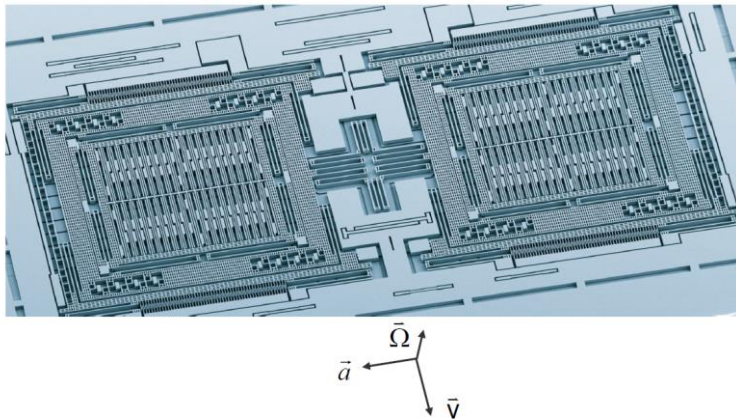
Messprinzip für Drehraten



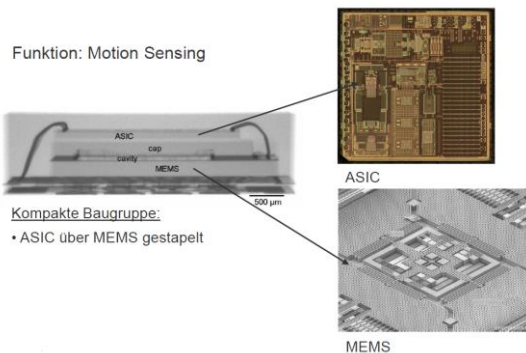
Prinzip für Drehratensensoren



Mikromechanischer Drehratensensor



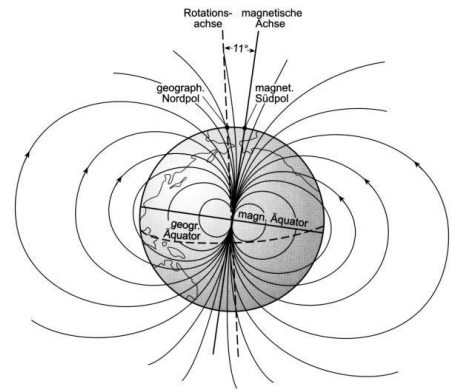
3-achsiger Drehratensensor im iPhone



Navigation: digitaler Kompass (Hallsensor)

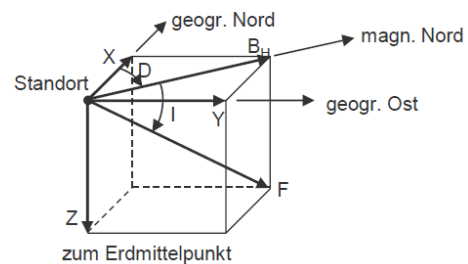
Das Erdmagnetfeld

- Entsteht durch geodynamischen Prozess
- Magnetisches Gleichfeld
- Der magnetische Südpol liegt in der Nähe des geographischen Nordpols
- Eine Kompassnadel gibt die Richtung des Magnetfeldes horizontal zur Erdoberfläche an



Erdmagnetischen Elemente:

- $B_H = \sqrt{X^2 + Y^2}$ Horizontalintensität
- $F = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$ Totalintensität
- I = Inklination (Einfallswinkel Feldlinien)
- D = Deklination (Winkel zw. geogr./magn. Norden = 11°)

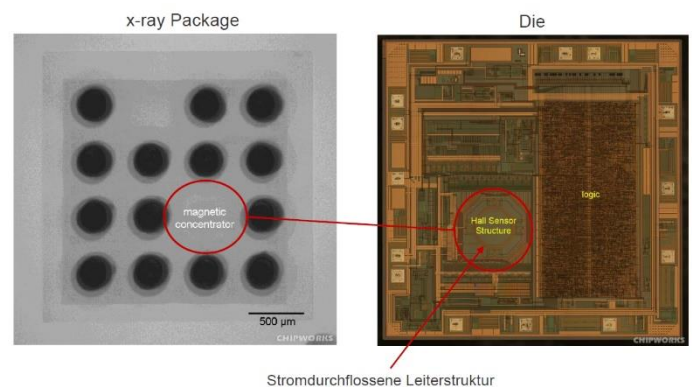
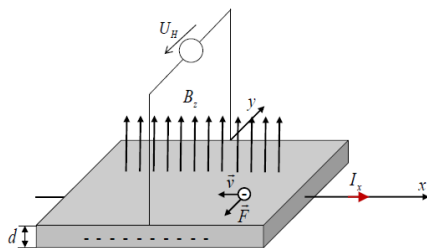


Magnetische Induktion B:

- $B_{H, \text{Äquator}} = 31 \mu T$
- $B_{H, \text{Flensburg}} = 18 \mu T$; mit $I = 69^\circ$
- $B_{H, \text{Kempten}} = 22 \mu T$; mit $I = 63,4^\circ$

Digitaler Kompass im Smartphone - Hallsensor

In einem stromdurchflossenen Leiter (I_x), der sich in einem Magnetfeld befindet, entsteht eine Spannung U_H , die **Hall-Spannung**, die proportional zur magnetischen Flussdichte B_z ist:



Technische Daten iPhone

Betriebstemperatur	0 °C bis 35 °C
Lagertemperatur	-20 °C bis 45 °C
Rel. Luftfeuchtigkeit	5 % bis 95 % (nichtkondensierend)
Max. Betriebshöhe	3000 m
Standortbestimmung	• GPS • Digitaler Kompass • W-LAN • 3G (UMTS)
Prozessor	1 GHz, 512 MB RAM
Sensoren	• 3-Achsen Drehratensensor • Beschleunigungssensor • Touchsensor • Hallsensor • Bildsensor CMOS • Mikrofon
Kamera (Foto + Video)	• Videoaufnahmen HD (30 Bilder / s) • 5-Megapixel • LED Blitz
Display	• 3,5 Zoll • Auflösung: 960x640

Grundlegende Spezifikationen zum Einsatz von Mikrosystemen in der Konsumerelektronik

	Konsumelektronik
Anwendungen	Mobiltelefon / PC
Betriebstemperatur*	0°C bis 55°C
Lagertemperatur*	-40°C bis +85°C
Einsatzumgebung	Umgebungsluft
Mech. Schockfestigkeit	hoch
Lebensdauer*	1 - 3 Jahre
Kosten	Sehr gering
EMV**	Störfestigkeit/-aussendung für Wohnbereich, Geschäfts- und Gewerbebereiche sowie Kleinbetriebe

Quelle: *IPC-9701, *Performance Test Methods and Qualification Requirements for Surface Mount Solder Attachments*

**DIN EN 61000

2.2 Auto

Sensoren für Motormanagement

- Manifold Air Pressure MAP: - Saugrohr- Ladedruck (1...5 bar) bei Benzineinspritzung
- Barometric Air Pressure BAP: - Umgebungsdruck für die Berücksichtigung der Luftdichte
- Medium pressure sensor: - Öldruck für die Berücksichtigung der Motorbelastung in der Serviceanzeige - Kraftstoffdruck für die Überwachung des Verschmutzungsgrades des Kraftstofffilters
- Diesel particulate filter: - Differenzdrucksensor im Diesel Partikelfilter
- Mass flow sensor: - Durchflussmesser um definiertes Luft-Kraftstoff-Verhältnis einzustellen
- High pressure sensor: - Raildrucksensor für Benzin-Direkteinspritzung (bis 200 bar) - Raildrucksensor für Dieseleinspritzsystem Common Rail (bis 2000 bar)
- Tank pressure sensor: - Über-/Unterdruck der Tankatmosphäre (0,5 bar)

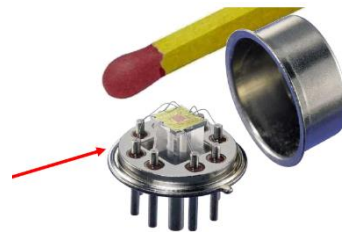
Druckmessgeräte

Allgemeine Grundlagen von elektrischen Druckmessgeräten

Mit elektrischen Druckmessgeräten wird die Messgröße Druck erfasst, in eine elektrisch verarbeitbare Größe umgewandelt und angezeigt.

Messprinzipien:

- Dehnungsmessstreifen , • induktiv , • kapazitiv , • optisch
- piezoelektrisch , • **piezoresistiv**
- Resonator , • Wärmeleitung



Begriffe für elektrische Druckmessgeräte

Die Norm DIN 16086 gilt für elektrische Druckmessgeräte, die die Messgröße Druck in eine elektrische Größe umwandeln.

Druckarten:

• Absoluter Druck p_{abs} (Absolutdruck):

Absoluter Druck oder Absolutdruck p_{abs} ist der Druck gegenüber dem Drucknull im leeren Raum.

• Überdruck (Relativdruck):

Differenz zwischen einem absoluten Druck p_{abs} und dem jeweiligen (absoluten) Atmosphärendruck p_{amb} ; diese atmosphärische Druckdifferenz p_e wird Überdruck oder auch Relativdruck genannt:

$$p_e = p_{abs} - p_{amb}$$

Der Überdruck (Relativdruck) p_e nimmt positive Werte an, wenn der absolute Druck größer als der Atmosphärendruck ist; er nimmt negative Werte an, wenn der absolute Druck kleiner als der Atmosphärendruck ist.

• Differenzdruck:

Differenz zweier Drücke p_1 und p_2 wenn sie selbst Messgröße ist: $\Delta p = p_1 - p_2$

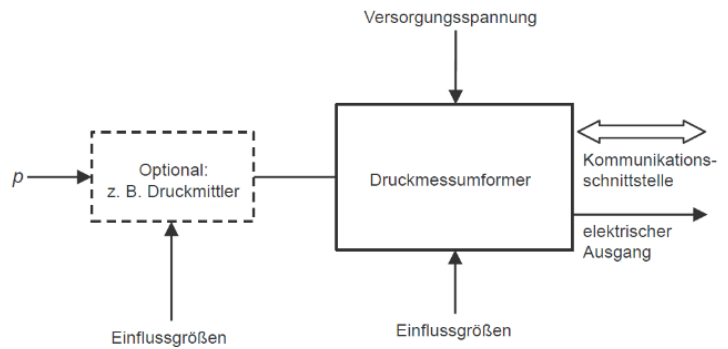
Druckdifferenz oder auch Differenzdruck $p_{1,2}$

Funktionseinheiten einer Druckmessanordnung

• Druckmittler

Funktionseinheit, die den zu messenden Druck zum Druckmessumformer auf hydraulischem Wege überträgt und vom Prozess herrührende Einflussgrößen vom Druckmessumformer entkoppelt. Hierbei übernimmt eine aus geeigneten Werkstoffen gefertigte Membran die Trennung zwischen Messstoff und Messorgan und eine dem Messproblem angepasste Flüssigkeit die Druckübertragung auf das Messelement.

(ANMERKUNG: Der Druckmittler ist in die Betrachtung der Gesamtmessabweichungen einzubeziehen, z. B. Temperatureinfluss, Sprungantwortzeit usw.).



• Druckmessumformer:

Messumformer zur Umwandlung des zu messenden Druckes in ein definiertes oder genormtes analoges und/oder digitales Ausgangssignal. Er kann auch mit elektrischen Zusatzeinrichtungen / Anzeigen versehen sein.

Technische Eigenschaften:

• Überlastbarkeit; maximaler Druck p_s :

Vom Hersteller angegebener höchster Druck, für den der Druckmessumformer / die Messanordnung mechanisch ausgelegt ist und bis zu welchem der Druckmessumformer belastet werden darf, ohne dass sich die zugesicherten messtechnischen Eigenschaften nach Rückkehr in den Messbereich verändert haben. Bei Anbau von Komponenten wird der maximal zulässige Druck der gesamten Messanordnung durch den niedrigsten zulässigen Druck einer Einzelkomponente bestimmt.

• Überlastbarkeit; minimaler Druck:

Vom Hersteller angegebener minimaler Druck

• Zerstörungsbereich:

Druckbereich, in dem beim Druckaufnehmer bleibende Veränderungen seiner messtechnischen Eigenschaften auftreten und der Aufnehmer auch mechanisch zerstört werden kann. Er beginnt am Ende des Überlastbereiches.

• Berstdruck:

Druck, bei dem die drucktragenden Teile durch Überschreiten der Festigkeitsgrenzen versagen können und in infolge dessen Prozessmedium austreten kann.

• Systemdruck:

Druck, der auf den Druckaufnehmer einwirkt.

• Bemessungstemperaturbereich:

Temperaturbereich, für den der Druckmessumformer die Spezifikationsgrenzen nicht überschreitet.

• Grenztemperaturbereich:

Temperaturbereich, in dem der Druckmessumformer ohne bleibende Veränderungen seiner messtechnischen Eigenschaften betrieben werden darf.

- **Lagertemperaturbereich:**

Temperaturbereich, in dem ein Druckmessgerät ohne bleibende Veränderungen seiner messtechnischen Eigenschaften gelagert oder transportiert werden darf.

- **Eigendiagnose des Druckmessgerätes:**

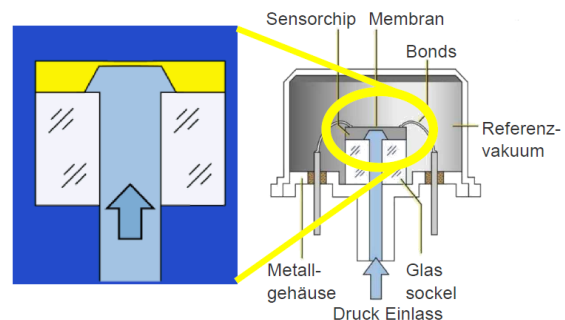
Selbstüberwachungsroutrinen bzw. Diagnosefunktionen, die im Druckmessgerät implementiert sind, zur Erkennung eines sich anbahnenden oder schon eingetretenen internen Fehlers.

- **Prozessdiagnose:**

Über die Messaufgabe hinausgehende Überwachungsroutrinen bzw. Diagnosefunktionen, die im Druckmessgerät implementiert sind, zur Erkennung einer sich anbahnenden oder schon eingetretenen unzulässigen Umgebungs- und Prozessbedingung.

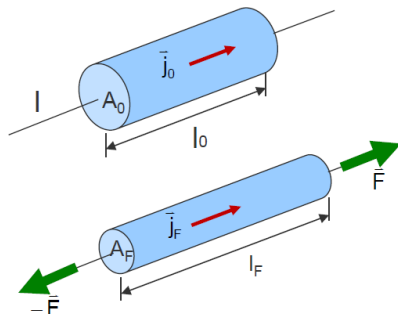
Aufbau und Funktionsweise des piezoresistiven Drucksensors

Durch den anliegenden Druck wird die Siliziummembran ausgelenkt. Die dabei entstehenden mechanischen Spannungen bewirken eine Änderung von speziell angebrachten Messwiderständen aufgrund der Spannungsabhängigkeit des spezifischen Widerstandes (piezoresistiver Effekt).



Funktionsweise von Dehnmessstreifen (DMS)

Abhängigkeit des Widerstands eines Leiters von der mechanischen Spannung



$$R = \rho \cdot \frac{l_0}{A_0}$$

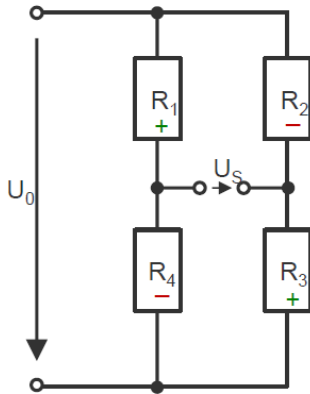
$$\sigma = E \cdot \frac{\Delta l}{l}$$

$$R_F = \rho \cdot \frac{l_F}{A_F}$$

$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \frac{\Delta l}{l}$$

Bei Metallen ist ρ unabhängig von der Spannung $\sigma = \frac{F}{A}$. Der Widerstand ändert sich nur durch die Änderung der Geometrie. → D.h., wird der Widerstand gezogen, so wird dieser länger. Sein Querschnitt wird durch die Querkontraktion eingeschnürt, also kleiner. Der K-Faktor ist $K \approx 2$, wenn das Volumen konstant ist.

Wheatstone'sche Messbrücke beim Drucksensor



- Bei der „ideal abgeglichenen Brücke“ gilt: $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_0$
- Das Messsignal ist proportional zum Druck. Im unbelasteten Zustand ergibt sich für die Messspannung U_S :

$$U_S = U_0 \left(\frac{R_2}{R_2 + R_3} \right) - U_0 \left(\frac{R_1}{R_1 + R_4} \right) = 0$$

- Wenn die Widerstände nicht gleich groß sind, ergibt sich ein Offset
- Für den temperaturabhängigen Widerstand $R_i(T)$ gilt:

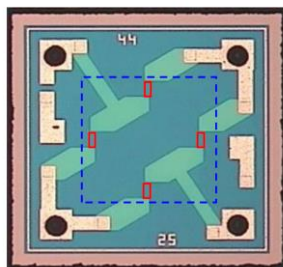
$$R_i(T) = R_0 \left(1 + \frac{dR}{dT} (T - T_0) \right) = R_0(1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

- Die vier gleich großen Widerstände ergeben somit eine Temperaturkompensation:

$$U_S = U_0 \left(\frac{R_0(1 + \alpha \cdot \Delta T)}{2 \cdot R_0(1 + \alpha \cdot \Delta T)} - \frac{R_0(1 + \alpha \cdot \Delta T)}{2 \cdot R_0(1 + \alpha \cdot \Delta T)} \right)$$

Gehäuse für Drucksensoren

Piezoresistiver Drucksensorchip



1 x 1 mm²

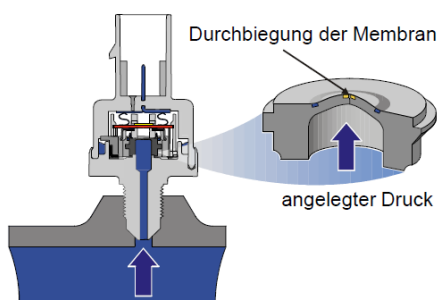
10 µm Membran

Piezoresistive Widerstände

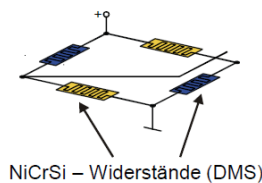
Spannungsarme Montage nötig

wichtig: Stressless Packaging of Pressure Sensors

Hochdrucksensor-Funktionsprinzip



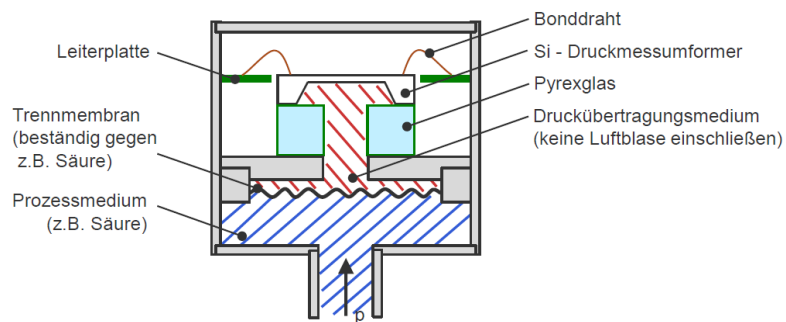
Wheatstonesche Messbrücke



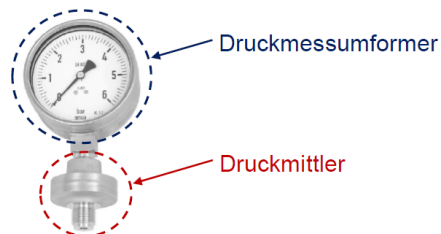
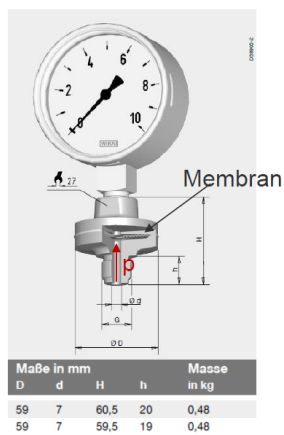
- Der angelegte Druck führt zur Verformung einer Stahlmembran.
- Die Deformation wird über eine Wheatstonesche Messbrücke erfasst.
- Zwei Widerstände befinden sich im Bereich der Zugspannungen (Mitte) und zwei im Bereich der Druckspannungen (Rand).

Funktionsprinzip Druckmittler

Einflussgrößen aus dem Prozess werden entkoppelt



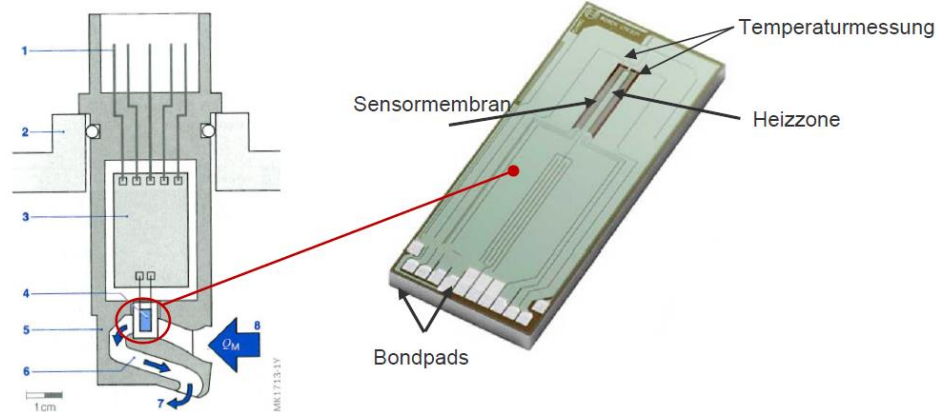
- In das Druckübertragungsmedium darf keine Luftblase eingeschlossen werden, da diese kompressibel ist und somit das Messergebnis verfälschen würde.
- Die Viskosität des Druckübertragungsmediums darf nicht zu hoch gewählt werden fehlende Dynamik.



- Anwendung für aggressive oder verschmutzte Messstoffe
- Druckbereich: 0...90 bar
- Werkstoff: CrNi-Stahl
- Membrandurchmesser: 50 mm

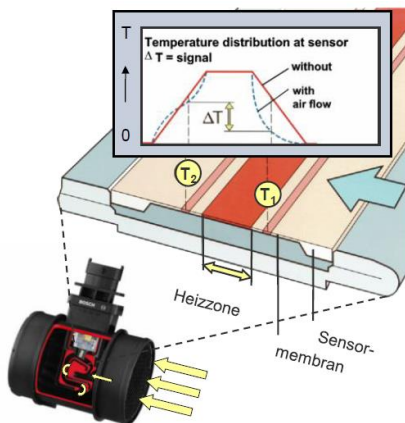
Aufbau Heißfilm-Luftmassensensor

- | | |
|---|---------------------|
| 1 | el. Anschlüsse |
| 2 | Messrohr |
| 3 | Auswerteelektronik |
| 4 | Sensormesszelle |
| 5 | Sensorgehäuse |
| 6 | Teilstrom-Messkanal |
| 7 | Auslass $\dot{Q}_M$ |
| 8 | Einlass $\dot{Q}_M$ |



- Messzelle (Pos.4) wird von Luft angeströmt
- Messzelle besteht aus Halbleitersubstrat
- sensitive Fläche wird durch über mikromechanische Verfahren hergestellte Membran gebildet
- Auf der Membran sind temperaturempfindliche Widerstände aufgebracht

Messprinzip Heißfilm-Luftmassensensor

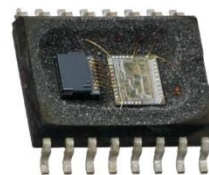
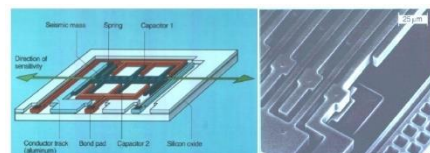


- Heizwiderstand erhitzt Sensormembran und hält sie auf konstanter Temperatur
- Außerhalb der Heizzone fällt die Temperatur auf beiden Seiten ab
- Zwei symmetrisch zum Heizwiderstand aufgebrachte temperaturabhängige Widerstände (Messpunkte T1 und T2) erfassen die Temperaturverteilung auf der Membran
- Strömt Luft über Sensormesszelle, ändert sich das gleichmäßige Temperaturprofil auf der Membran
- Auswerteelektronik wandelt Widerstandsdifferenz in analoges Spannungssignal (0V...5V)

Sensoren zur Fahrdynamikregelung VDC

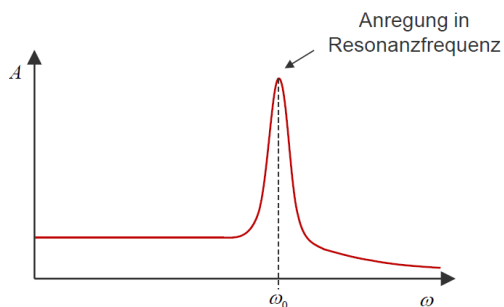
- Yaw rate sensor MM4: Drehratensensor erfasst mittels ESP die Drehbewegung eines Fahrzeugs um seine Hochachse, z.B. bei gewöhnlichen Kurvenfahrten aber auch beim Ausbrechen und Schleudern
- High pressure sensor: Bremsflüssigkeitsdrucksensor im Hydroaggregat des ESP (bis 350 bar)
- Inertial sensor: Erfassen der Trägheitsbeschleunigung für ABS oder ESP
- Sensor cluster with yaw rate and acceleration sensor:
 - Messen von Winkelgeschwindigkeiten und Beschleunigungen und digital aufbereiten
 - Für: Bergbremse, automatisiertes Bremsen beim Parken, Navigation, adaptive Geschwindigkeitsregelung, Steer by Wire
- Torque Sensor Steering TSS: Erfassung des Drehmoments beim Lenken für elektromechanische Servolenkung
- Low-g acceleration sensor for active suspension: Bewerten der Karosseriebeschleunigung für Systeme der Fahrwerksregelung

Beschleunigungssensor – erstes Mikrosystem im Auto



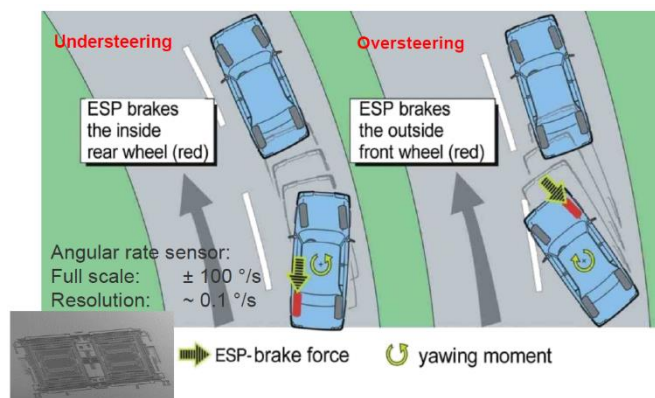
Aufteilung der Produktkosten:
 1/4 Sensorchip
 1/4 Elektronikchip
 1/4 AVT/Gehäuse
 1/4 Test

Selbstüberwachung beim Beschleunigungssensor



- Zum Selbsttest wird am Beschleunigungssensor eine Spannung angelegt, um die seismische Masse zu bewegen.
- Die Anregung erfolgt in Resonanzfrequenz, da die Bewegung der seismischen Masse dann maximal ist.
- Falls der Sensor kein entsprechendes Ausgangssignal liefert, kann auf eine Funktionsstörung geschlossen werden.

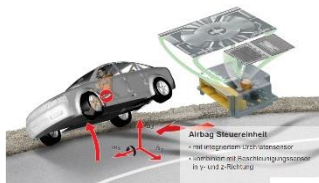
ESP Funktionsprinzip



Sensoren für Sicherheitssysteme

- Acceleration sensor: Beschleunigungssensor zum Auslösen von Rückhaltesystemen (Airbag, Gurtstraffer)
- Rollover sensor low-g: Beschleunigungssensor zum Auslösen des Überrollbügels.
- Rollover sensor gyroscope: Überrollerkennung zur Zündung von Rückhaltesystemen (Seiten-/Fenster-Airbags, Überrollbügel). Erfassung der Drehbewegung um die Längsachse.
- Occupant weight sensor iBolt: Gewichtsklassifizierung des Beifahrers (Vermeiden/Reduzieren der Verletzung von Kindern durch Auslösen des Airbags)
- Pedestrian Contact Sensor PCS: Beschleunigungssensor zum Schutz von Fußgänger bei Frontalaufprall (anheben der Motorhaube um zusätzlichen Deformationsraum zwischen Haube und Motorblock zu schaffen)
- Upfront Sensor UFS: Beschleunigungssensor zur verbesserten Frontcrash-Erkennung
- Peripheral Pressure Sensor PPS: Periphere Drucksensoren dienen der Seitencrash-Erkennung und werden in Seitentür integriert.

Sensorsystem zur Überrollerkennung



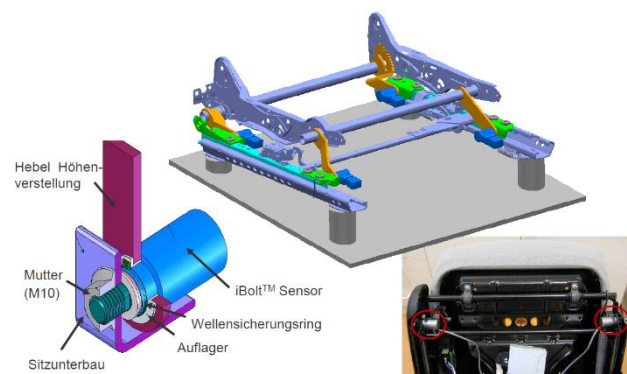
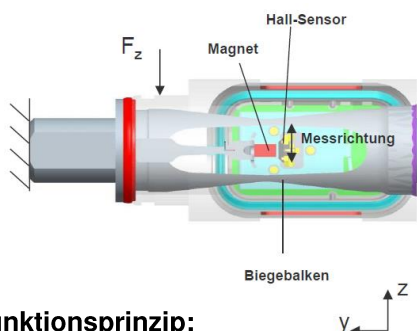
→ Drehratensensor,
kombiniert mit Beschleunigungssensor in y- und z-Richtung

Ausfahrbarer Überrollbügel bei Cabrios

- Bei Unfall fährt Überrollbügel in deutlich weniger als einer Sekunde aus
- Überrollbügel wird nicht mit Pyrotechnik, sondern mit Federn ausgefahren
- Feder wird bei bestimmtem Neigungswinkel oder bei freiem Fall des Fahrzeugs ausgelöst



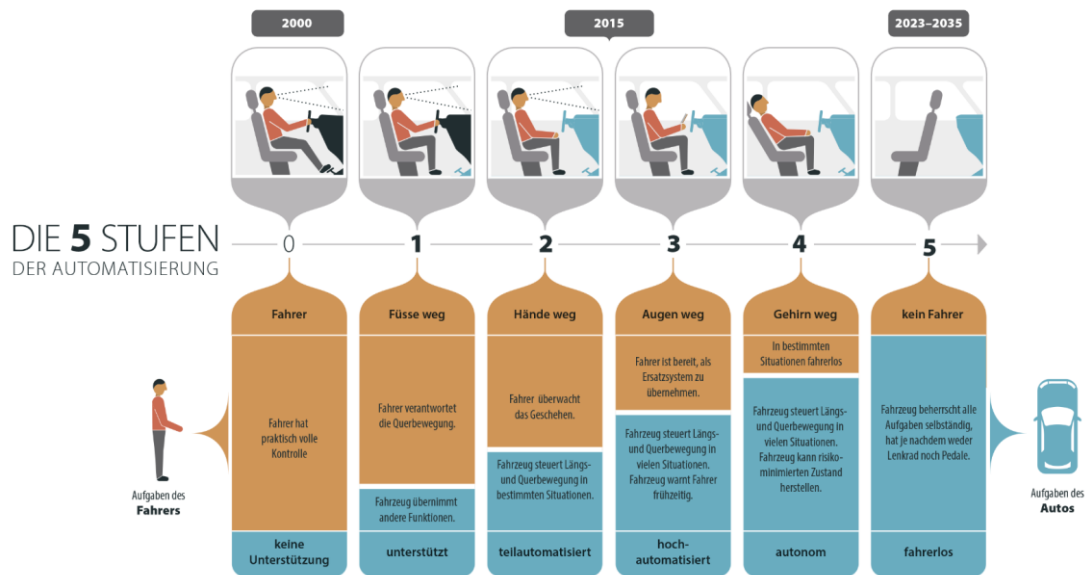
iBolt™ - in die Sitzkonstruktion integriert



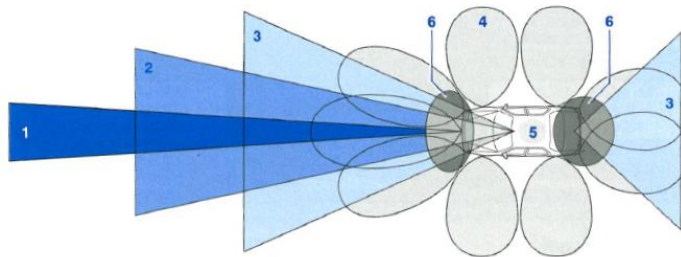
Funktionsprinzip:

- iBolt™ ersetzt existierende Schrauben in der Sitzkonstruktion.
- Das Gewicht des Passagiers erzeugt eine Biegung des Biegebalkens.
- Die Biegung verändert die relative Position des Hallsensors zum Magneten.
- Die Änderung des Magnetfeldes ist proportional zur Belastung auf dem Sitz.

Der Weg zum autonomen Fahren



Sensorik für Fahrzeugrundumsicht

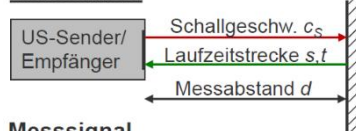


1. Fernbereichsradar (77 GHz) mit Reichweite < 200 m, für Abstandsregelung
2. Fern- Nahbereichs- Infrarotsichtsystem mit Reichweite < 150 m, für Verbesserung der Nachtsicht. Kameras nehmen Geschehen vor dem Fahrzeug auf, und geben es über Display wieder
3. Außenbereich-Video < 80 m, z.B. für Spurhalteassistent
4. Nahbereichsradar (24 GHz) < 20 m, z.B. für Überwachung des toten Winkels
5. Innenraum-Video
6. Ultraschall-Sensorik < 2,5 m, z.B. für Einparkhilfe und Rückfahrlhilfe

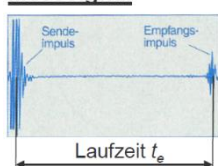
Ultraschalltechnik

Prinzip der Abstandsmessung mittels Ultraschall

Messaufbau



Messsignal



- Ultraschallsensoren sind in Stoßfängern von Kfz integriert
- Analog zum Echolotverfahren senden die Sensoren Ultraschallimpulse ($f = 43.5 \text{ kHz}$) aus
- Das Zeitintervall zwischen Aussenden der Impulse und Eintreffen der vom Hindernis reflektierten Echoimpulse wird detektiert
- Der Abstand d zum Hindernis ergibt sich zu:

$$d = 0,5 \cdot t_e \cdot c_s \quad \text{mit} \quad c_{s, \text{Luft}} \text{ ca. } 340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Radartechnik

Radar ... Radio Detection and Ranging

Die vom Radargerät ausgesendeten Wellenpakete werden von Oberflächen aus Metall oder anderen reflektierenden Materialien zurückgeworfen und können vom Empfangsteil des Radars wieder aufgenommen werden

- Impulsverfahren:

- Bestimmung des Abstands a aus Messung der Laufzeit
- Analog zum Echolotverfahren senden die Sensoren elektromagnetische Wellen ($f = 24 \text{ GHz}$)
aus $a = \frac{1}{2} \cdot c \cdot \tau$ mit $c = 300\,000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$

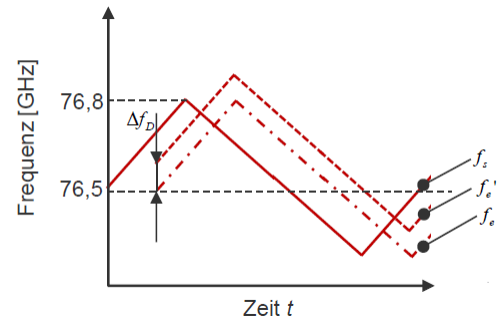
- Dauerstrich (**C**ontinuous **W**ave) Radar:

- Bestimmung der Geschwindigkeit → **Dopplereffekt**
- Entsprechend der rel. Geschwindigkeit v_{rel} des Objekts zum Radarsensor gibt es eine Frequenzverschiebung f_D zwischen Sende- und Empfangssignal $f_D = \frac{-2f_c v_{\text{rel}}}{c}$
- Entsprechend der bei ACC (Adaptive Cruise Control) verwendeten Radarfrequenz f_c (76,5 GHz) ergibt sich die Frequenzverschiebung:
 $f_D \approx 510 \cdot v_{\text{rel}}$ also 510 Hz bei $1 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 3.6 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ Relativgeschwindigkeit

FMCW (**F**requency **M**odulated **C**ontinuous **W**ave)



- Simultane Bestimmung des Abstands und der Relativgeschwindigkeit
- Sendesignal f_s ($76.5 \pm 0.3 \text{ GHz}$)
- Empfangssignal f_e bei gleicher Geschwindigkeit ist um Signallaufzeit verzögert
- Empfangssignal f_e' bei vorhandener Relativgeschwindigkeit ist um Signallaufzeit verzögert und um Frequenz Δf_D gegenüber f_s verschoben



Typische Umweltbelastungen auf Sensoren im Auto

Mechanische Belastung z.B. Schock, Vibration	  
Medieneinflüsse z.B. Motoröl, Benzin, Kaffee	   
Wasser und Korrosion z.B. Regen, Schnee	  
Thermische Belastung z.B. Sonne, Motortemperatur	 

	Automobil		
Anwendungen	Innenraum	Motorraum Chassis	Motoranbau Getriebe
Betriebstemperatur*	-40 °C – 85 °C	-40 °C – 125 °C	-40 °C – 150 °C
Lagertemperatur*	-50°C bis 150°C		
Umwelteinflüsse	Öl, Gas, Wasser, Salz		
Mech. Schockfestigkeit	hoch		
Lebensdauer*	10 - 15 Jahre		
Kosten	Gering		

2.3 Medizintechnik

Wichtige Anforderungen an medizinische Implantate

Allgemein:

- Biokompatibilität und gleichzeitig Beständigkeit gegen die Körperumgebung
- Sterilisierbarkeit
- Integrierbarkeit von Schnittstellen
- Autarke Energieversorgung

Elektronik:

- Zuverlässigkeit (aktive Lebensdauer u.U. einige Jahrzehnte)
- Hohe Packungsdichte / niedriges Gewicht
- Kompatibilität mit hermetischer Gehäuseumgebung

Vorteile aus der Körperumgebung und dem hermetischen Gehäuse:

- Konstante, moderate Temperatur (ca. 37 °C)
- Keine ernsthaften Vibrations- oder Schockbelastungen
- Sehr trockene und inerte atmosphärische Umgebung

Biokompatibilität

Materialien für medizinische Implantate, die mit dem Körperinneren in Kontakt kommen, müssen biokompatibel sein. Biokompatibilität ist die Verträglichkeit zwischen einem biologischen und einem technischen System.

Materialanforderungen:

- Physikalische, chemische und mechanische Eigenschaften müssen an Körperumgebung angepasst sein.
- Das Material darf nur Substanzen in nicht-toxischen Konzentrationen freisetzen.
- Es darf nur schwache Fremdkörperreaktionen auslösen, also keine Immunreaktionen wie Allergien, Nekrosen (Zelltod) oder Entzündungen.

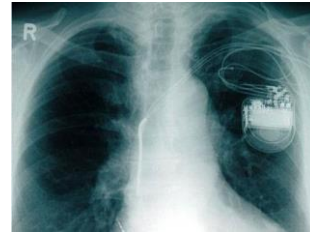
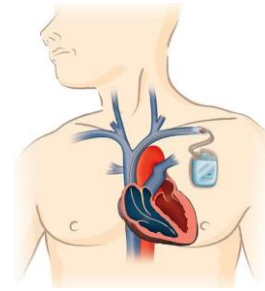
Herzschrittmacher

Einsatz bei Menschen mit zu langsamem Herzschlag

Stimulation des Herzmuskels mit elektrischen Impulsen

Verhindern von:

- herzbedingter Bewusstlosigkeit
- Schwindelattacken
- Schwächegefühlen



Aufgabe / Funktion Herzschrittmacher

- Bei einem zu langsamem / unregelmäßigen / asynchronen Herzschlag können Beschwerden auftreten, welche die Lebensqualität beeinträchtigen (zu wenig Blut um Organe zu versorgen).
- Herzschrittmacher ist ein Impulsgenerator (Aggregat), der im Brustbereich eingepflanzt ist und der die Herzfrequenz beschleunigt / synchronisiert.
- Ein, zwei oder drei dünne Drähte (**Elektroden**) verbinden das Gerät mit dem Herzen:
 - Elektrische Impulse des Herzens werden erfasst und an Impulsgenerator weitergeleitet.
 - Elektrische Energie wird vom Impulsgenerator an Herz geleitet.
- Der Impulsgenerator überwacht so die Herzfunktion ununterbrochen und gibt elektrische Impulse an das Herz ab, wenn er einen langsamem / unregelmäßigen Rhythmus wahrnimmt. Dies bewirkt, dass das Herz schneller / regelmäßiger schlägt.

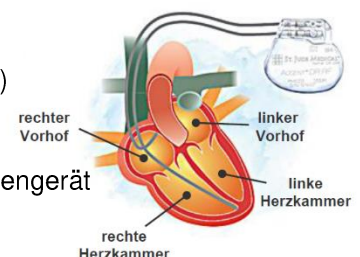
Funktionsweise Herzschrittmacher

Der Arzt kann mittels Funk Schrittmacher programmieren oder aufgezeichnete Daten auslesen. Je nach Krankheitsbild gibt es **Einkammer**-, **Zweikammer**- und **Dreikammer**-Schrittmacher.

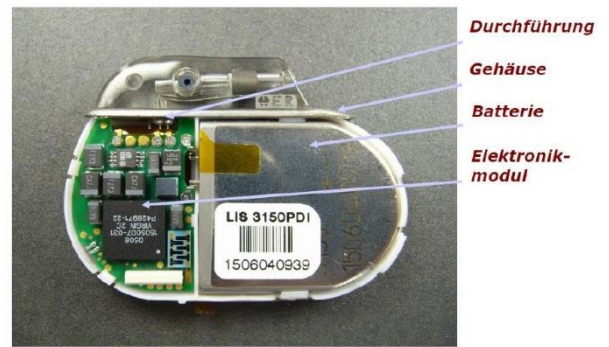
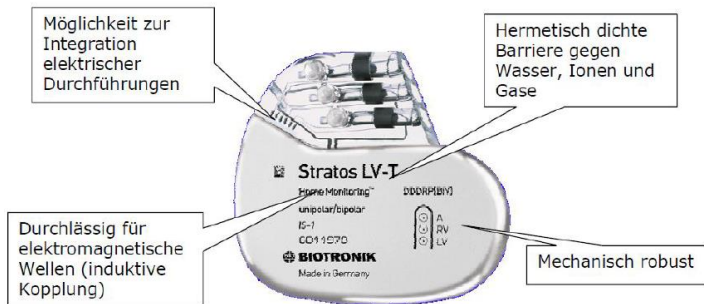
- **Einkammer-Schrittmacher:** Ein Einkammer-Schrittmacher weist eine einzige Elektrode auf, die zur Überwachung und zur Übertragung von Signalen aus einer Kammer des Herzens verwendet wird.
- **Zweikammer-Schrittmacher:** Ein Zweikammer-Schrittmacher hat zwei Elektroden. Eine Elektrode wird im rechten Vorhof platziert, die andere in der rechten Herzkammer.
- **Dreikammer-Schrittmacher:** Ein Dreikammer-Schrittmacher hat drei Elektroden. Die Elektroden werden im rechten Vorhof und beiden Kammern platziert. Er hilft Patienten mit fortgeschrittener Herzschwäche, bei denen das Zusammenspiel beider Herzkammern gestört ist, die Pumpleistung des Herzens wieder zu verbessern.

• Zusatzfunktionen:

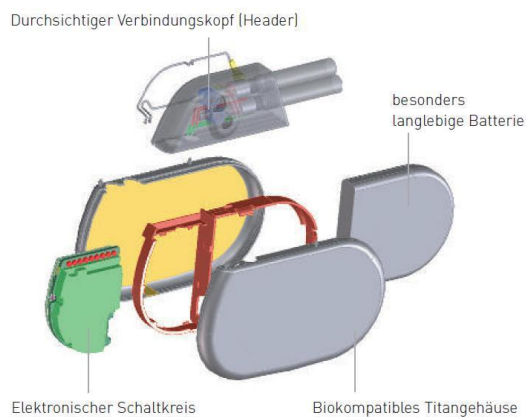
- Beschleunigungssensor, um Erschütterungen zu detektieren
→ Anpassung der Stimulationsfrequenz an Bedarf (z.B. bei Anstrengung)
- Home-Monitoring-System:
 - Antenne im Schrittmacher sendet regelmäßig Daten an mobiles Patientengerät (Batteriestatus / Elektrodenstatus / abgegebene el. Impulse).
 - Daten werden über Mobilfunknetz weitergeleitet.



Wesentliche Anforderungen



Aufbau eines Herzschrittmachers



Zweikammer-Schrittmacher auf Starr-Flex-Substrat



Interfaces



Quadrupolare Durchführung für zwei bipolare Elektroden

Bipolare Durchführung an Flexausleger angelötet



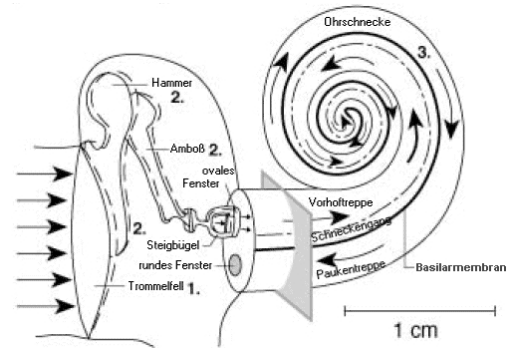
Gewährleisten die hermetische Abdichtung zwischen Körperflüssigkeit und Gehäuseinnerem !

Cochlea-Implantat

Implantate für Schwerhörigkeit oder Taubheit

Der Hörmechanismus:

- Schallwellen bringen Trommelfell zum Schwingen (bis zu 24 kHz).
- Über filigrane Strukturen werden Schallwellen in die Ohrschnecke (Cochlea) weitergeleitet.
- Die Basilarmembran beginnt zu schwingen und lenkt dadurch Sinneshärchen aus.
- Sinneshärchen sind mit Hörnerv verbunden und wandeln die Bewegung in elektrische Signale.



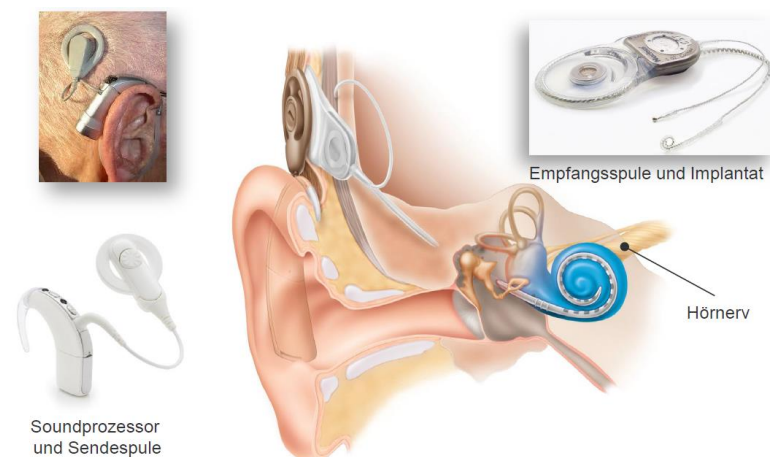
Mögliche Ursachen für Schwerhörigkeit oder Taubheit

- Verwerfungen der Gehörknöchelchenkette durch Verletzungen (Schädelbruch)
- Trommelfellriss (Explosion, direkte Verletzung)
- Narben im Mittelohr durch Entzündungen

→ Cochleaimplantat



Der **Soundprozessor 1** erfasst Schallwellen und wandelt diese in einen digitalen Code. Die **Sendespule 2** überträgt die digital codierten Audiosignale vom Soundprozessor an die **Empfangsspule 3** des Implantats. Ein leistungsstarker **Mikrochip 4** wandelt die Audiosignale in elektrische Impulse um, die über **el. Leitungen 5** an die **Elektroden 6** weitergeleitet werden. Diese ermöglichen eine gezielte Stimulation der Hörnervenfasern (wichtig für hohe Qualität der Wiedergabe von Geräuschen, Sprachen und Musik). Der **Softip™ 7** gewährleistet, dass während des chirurgischen Eingriffs die empfindlichen Wände der Cochlea optimal geschützt bleiben. Durch das **Silikongehäuse 8** lässt sich das Implantat leicht biegen und an unterschiedliche Kopfformen anpassen.

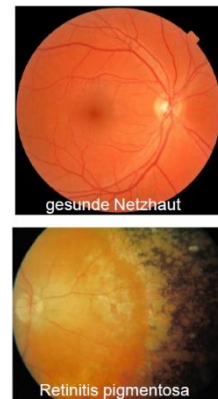


Retina-Implantat

Implantate für blinde Menschen

Krankheitsbild Retinitis pigmentosa

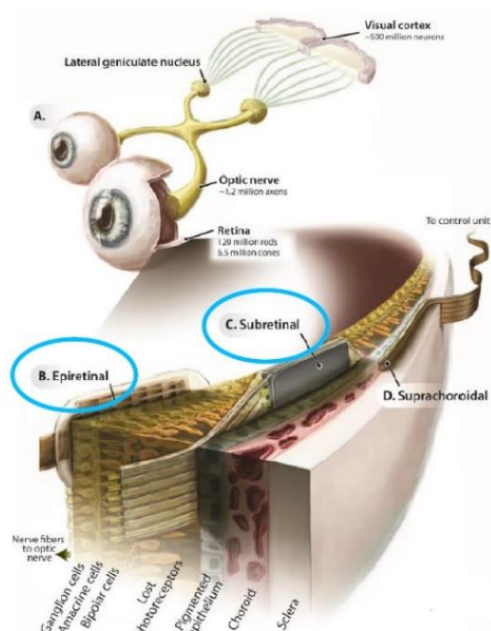
- Ein Viertel der blinden Menschen ist an der degenerativen Netzhauterkrankung Retinitis pigmentosa erblindet.
- Dabei sterben die lichtempfindlichen Sinneszellen des Auges ab. Das Absterben vollzieht sich in der Regel vom Rand des Gesichtsfeldes hin zur Mitte und führt vom immer mehr verengenden **Tunnelblick** bis hin zur vollständigen Erblindung.
- Sekundär bilden sich Pigmenteinlagerungen und Gefäßverengungen, welche der Krankheit ihren Namen geben.
- Da der Sehnerv und die dazugehörigen Hirnregionen durch die Krankheit nicht zerstört werden, können **Retina Implantate** einen Teil des Sehvermögens wiederherstellen.



Technische Ansätze für Retina-Implantate

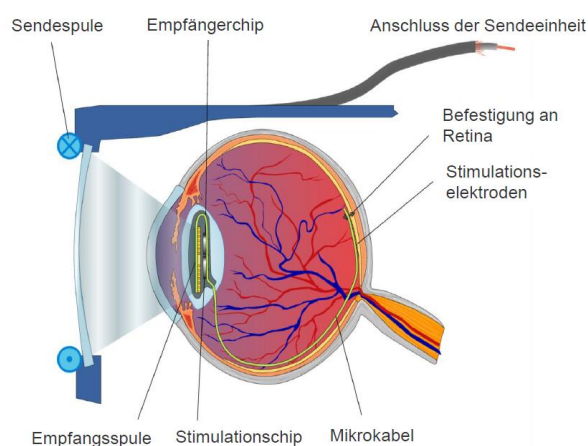
Mögliche Positionen zur Platzierung von Retina-Implantaten:

- **Epiretinales Implantat:** wird auf der Netzhaut fixiert, Blickrichtung wird durch eine in die Brille integrierte Kamera vorgegeben
- **Subretinales Implantat:** liegt zwischen Netzhaut und Aderhaut, wird nur durch Augendruck fixiert, im Auge integriertes Photodiodenarray kann natürliche Bewegung des Auges in Blickrichtung nutzen

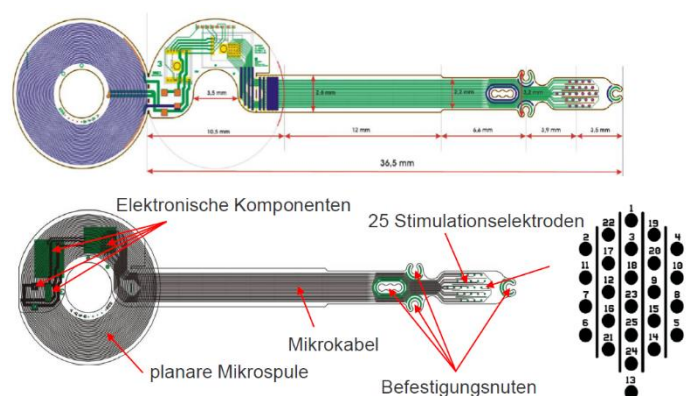


Epiretinales Implantat

Das Epiret-3-System: Schematische Darstellung



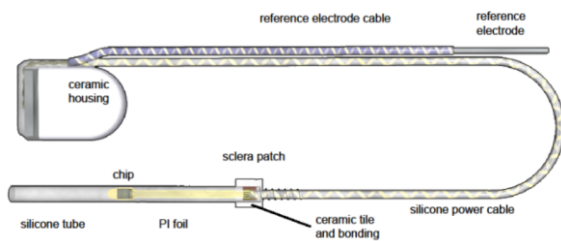
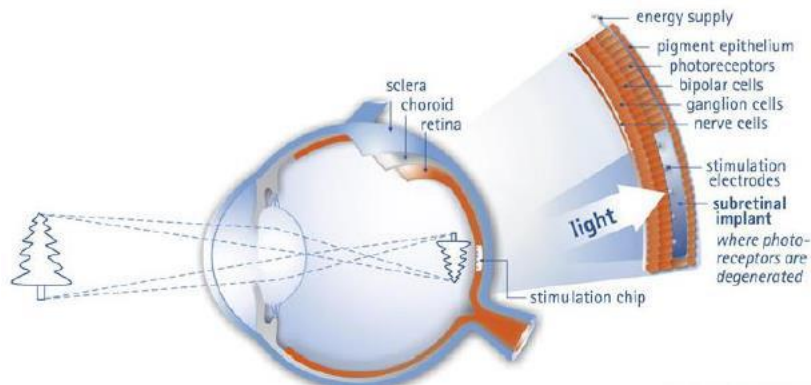
Layout eines Polyimid-Substrats



Subretinales Implantat

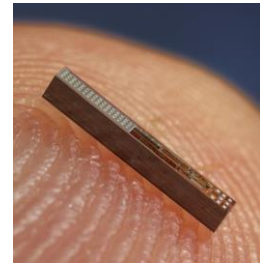
Retina Implant Alpha IMS von Retina Implant AG

- Anordnung des Implantats zwischen Retina und Aderhaut
- Bilderzeugung über Photodiodenarray direkt im Auge
- Dadurch Nutzung der natürlichen Bewegung des Auges zur Anpassung der Blickrichtung



Implantierbarer Blutdrucksensor

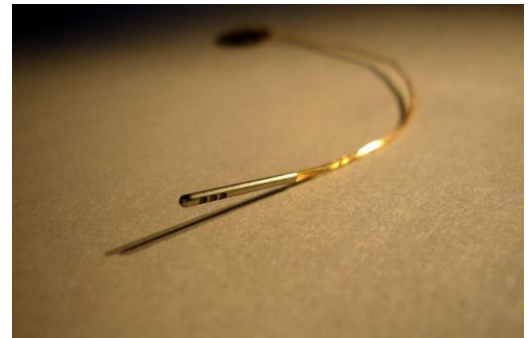
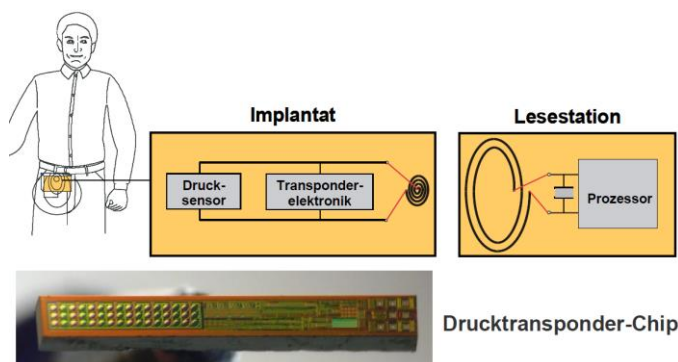
- Um den Blutdruck einstellen zu können, muss dieser oft über längere Zeit beobachtet werden. Dies geschieht durch implantierbare **Drucksensoren**.
- Strömt das Blut mit zu hohem Druck durch die Arterien, kann dies gefährlich sein. Bei Bluthochdruck pumpt das Herz ständig auf Hochtouren.
- Herz und Gefäßwände werden belastet.
- Blutdruck muss über Medikamente eingestellt werden. Hierfür ist Langzeitüberwachung erforderlich.
- Drucksensor wird in Leisten Schlagader eingeführt und überträgt die Daten drahtlos.
- Blutdruck wird 30 mal pro Sekunde gemessen.



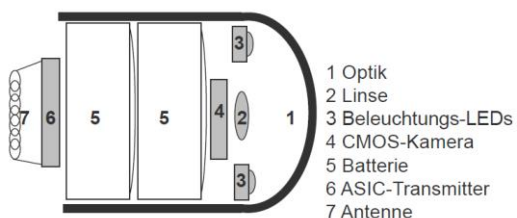
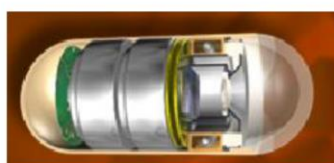
Vorteil gegenüber der bisherigen Methode:

Kein regelmäßiges Aufpumpen der Manschette am Arm ist mehr nötig, dies führt zu einer geringeren Belastung für den Patienten.

HyperIMS



kabelloses Endoskop



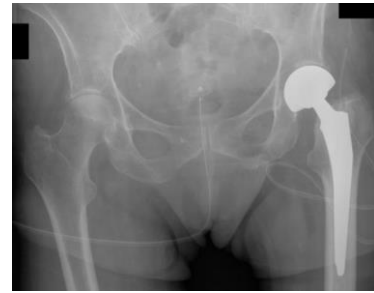
M2ATM™ -Kapsel mit Batterie, Lichtquelle, CMOS-Kamera, Antenne, Transmitter Einheit (Hersteller: Giving Imaging Ltd. Atlanta)

Intelligente Hüftprothese

Implantation eines künstlichen Hüftgelenks gehört mittlerweile zu den am häufigsten durchgeführten Operationen in Deutschland.

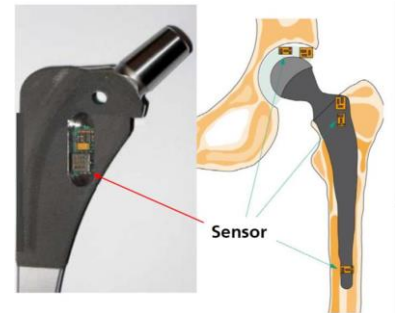
Medizinische Situation in Deutschland:

- 160 000 Erstimplantationen in Deutschland jährlich.
- 10 % Prothesenwechsel nach 10 Jahren.
- Davon 10 % der Operationen unnötig oder zu spät.
- Unzuverlässige Diagnoseverfahren.
- Hohe Belastung für Patienten und Gesundheitssystem.



Intelligente Hüftprothese mit integriertem Beschleunigungssensor, Mikrocontroller und RFID-Schnittstelle.

- Detektion von Lockerungen der Prothese im Knochen durch integrierten Beschleunigungssensor und sensornahe Signalverarbeitung.
- Übertragung der Daten über die RFID-Schnittstelle aus dem Körper heraus.
- Arzt kann damit die Festigkeit der Verbindung zwischen Prothese und Knochen überprüfen.



passives Implantat

Orthopädi. Gelenk-Klinik, Freiburg

Verbindungstechniken

Formschluss

Kraftschluss (Reibschluss)

Stoffschluss

aktives Mikrosystem

Biokompatibilität

Piezo-Biegewandler

Die Vorteile von Biegewandlern gegenüber Magneten als Stellelement liegen in einem geringeren Energiebedarf, höherer Stellgeschwindigkeit, nahezu keiner Wärmeentwicklung, geräuschlosem Betrieb und geringem Platzbedarf.

- Trimorphe Piezo-Biegewandler sind ein Verbund aus zwei Piezokeramiken mit und ohne Zwischenlage.

→ Typischer Biegewandler

- Bei Monomorphen wird auf eine der beiden Keramiken verzichtet.

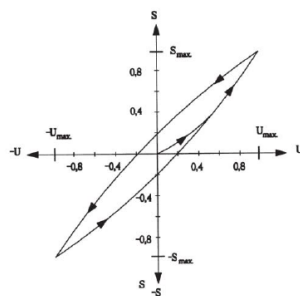
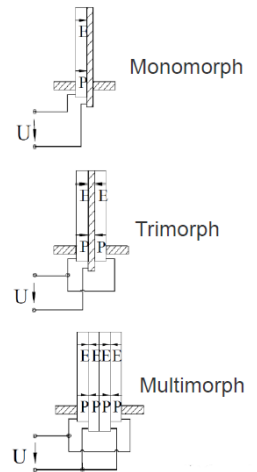
→ Für Spezialanwendungen

- Bei Multimorphen wird eine Vielzahl von aktiven Schichten verwendet.

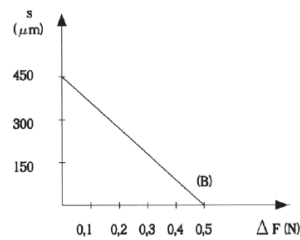
→ Für Spezialanwendungen

- Normalerweise wird einseitige Einspannung gewählt, um Auslenkung und Stellkraft am anderen Ende des Biegewandlers zu nutzen.

- Aufgrund des inversen piezoelektrischen Effekts entsteht eine mechanische Spannung, die eine Biegung des Verbundes erzeugt.



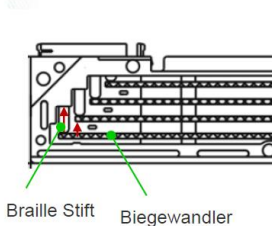
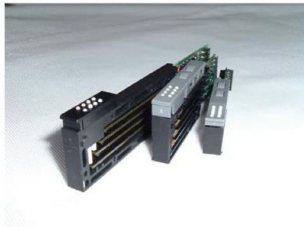
Weg-Spannungs-Kennlinie zeigt nach einigen Perioden Hysterese Eigenschaften aufgrund interner mechanischer Scherbeanspruchungen, welche auf die Keramik und die Klebestellen zwischen den Lagen wirken.



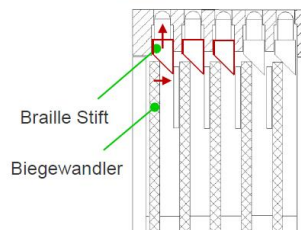
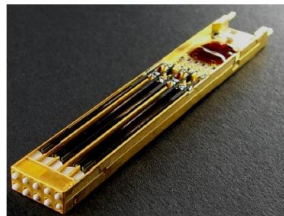
Die Haltekraft (B) ist die maximale Kraft die der Biegewandler erzeugen kann. In diesem Fall ist die Auslenkung gleich Null. Je größer die Auslenkung, desto geringer ist die Kraft.

Ansteuerung der Braille-Schrift

Braillezeilen mit „Hubantrieb“



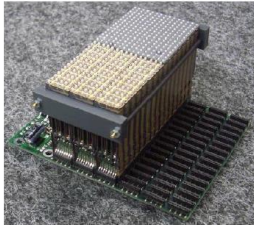
Brailledisplay mit „Keilantrieb“



Internetfähiges Brailledisplay

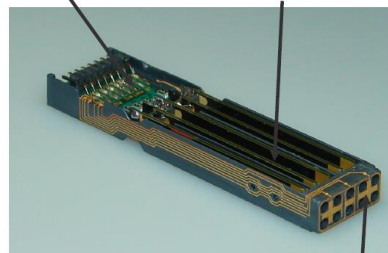


Aufgebautes Braille-Display



Block mit 48 Braille-Modulen auf Backplane

Elektronik-Leiterplatte mit Stecker, ASIC und SMD-Bauteilen

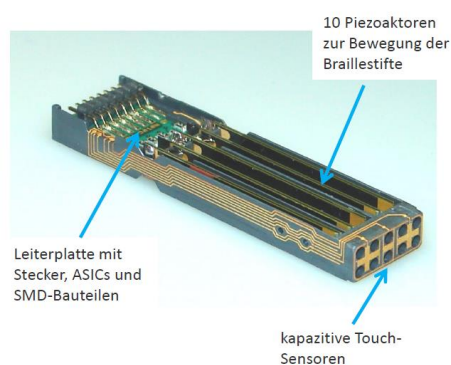


Hybridaufbau des Moduls LDS-MID und Leiterplatte

kapazitive Touch-Sensoren

Braillemodule in LPKF-LDS-Technik

Hybridaufbau der Braillemodule mit Moulded-Interconnect-Device (MID)



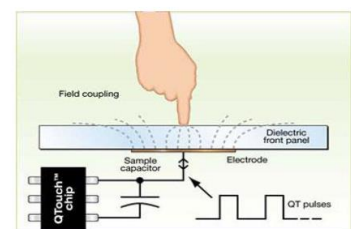
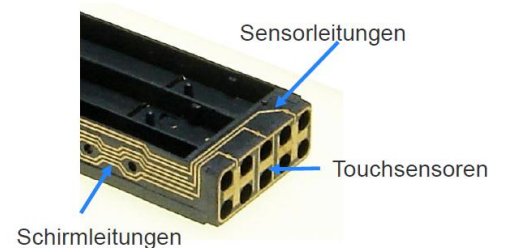
Touchsensor Eigenkapazitives Prinzip

Funktionsprinzip

- Der Finger hat eine Leitfähigkeit (100 Ω).
- Eine Sensorelektrode
- Der Finger wirkt als Gegenelektrode.
- Zwischen der Elektrode und dem Finger bildet sich ein E-Feld (C).
- Die mit der Kapazitätsänderung verbundene Ladungsänderung wird detektiert (Ladungsverstärker).

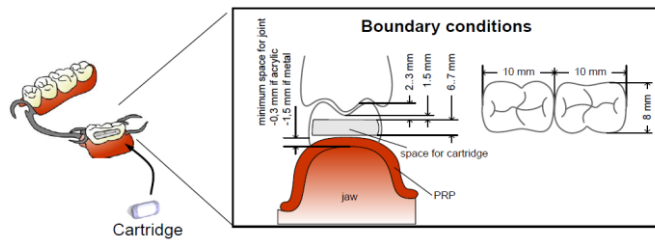
Vorteile:

- Sensor mit einer Elektrodenfläche
- Verschleißfeste Sensorabdeckung möglich (Berührungen oder Annäherungen des Fingers können durch unterschiedlich dicke Dielektrika erkannt werden)



HELP: Home based Empowered Living for Parkinson's Disease Patents

Kontinuierliche Dosierung von Levodopa und Abgabe an die Wangenschleimhaut



Werkzeug zur Handhabung

- Bedienbarkeit für Parkinson Patienten stellt hohe Anforderungen
- Magnetisches Werkzeug: Erstes Ende zum Einsetzen, zweites Ende zum Rausnehmen



Grundlegende Anforderungen zum Einsatz von Mikrosystemen in der Medizintechnik

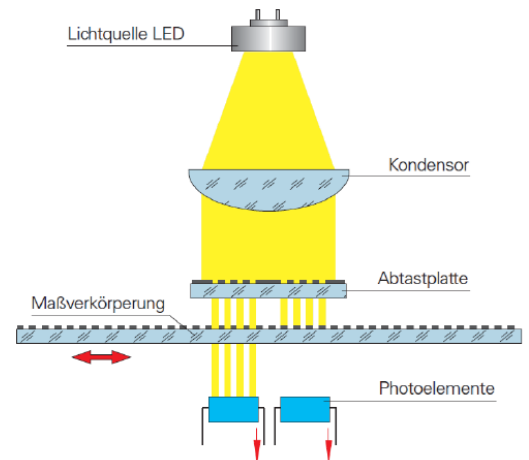
	Medizintechnik
Umgebung	Haut, Gewebe, Blut, Knochen
Betriebstemperatur	37 °C
Lagertemperatur	-20 °C bis 65 °C
Umwelteinflüsse	Blut, Gewebeflüssigkeit
Mech. Schockfestigkeit	gering
Lebensdauer	2 Jahre bis einige Jahrzehnte
Spezielle Anforderungen	Biokompatibilität
Kostendruck	gering / mittel

2.4 Maschinenbau, Anlagen- und Prozesstechnik

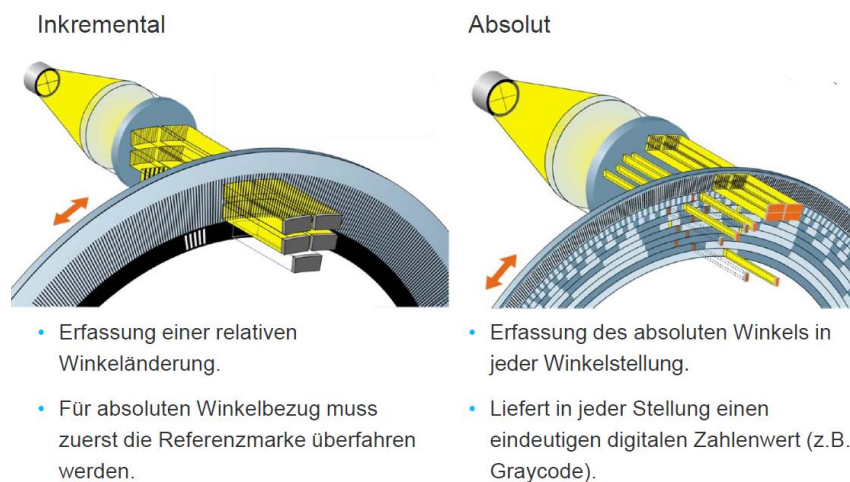
Wegmesssysteme

Funktionsprinzip optischer Wegmesssysteme mit Schattenwurf

- Abtastung erfolgt berührungslos und damit verschleißfrei.
- Das abgebildete Messprinzip arbeitet mit schattenoptischer Signalerzeugung.
- Zwei Strichgitter mit z.B. gleicher Teilungsperiode (Abtastplatte und Kodier- maßstab) werden zueinander bewegt.
- Der Kondensor erzeugt paralleles Licht. Fällt dieses durch eine Rasterstruktur, werden in bestimmten Abstand Hell/Dunkel-Felder abgebildet. Hier befindet sich eine Maßverkörperung mit gleicher Teilungsperiode (Kodierscheibe)
- Bei Relativbewegung der Raster zueinander wird Licht moduliert.
- Photoelemente wandeln diese Lichtänderung in elektrische Signale um.



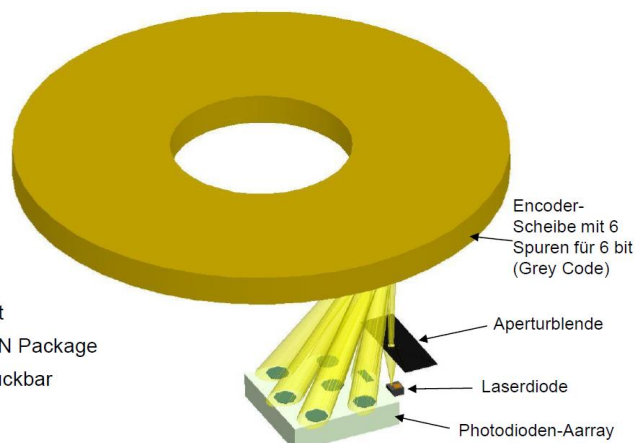
Inkremental- und Absolutdrehgeber



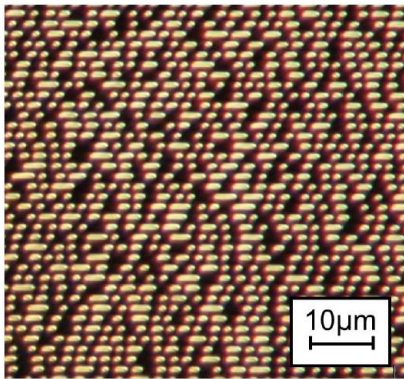
Absolut kodierter optischer Drehgeber (6 Bit)

Anforderungen:

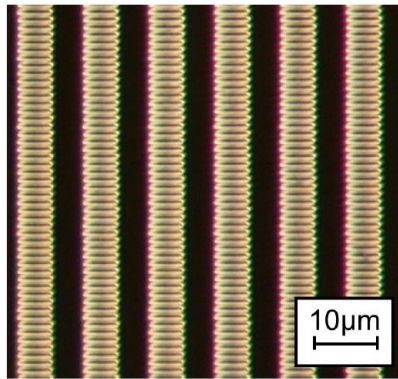
- Absolutkodierung 6 Bit
- Kontaktierung wie QFN Package
- Bleifrei als SMD bestückbar



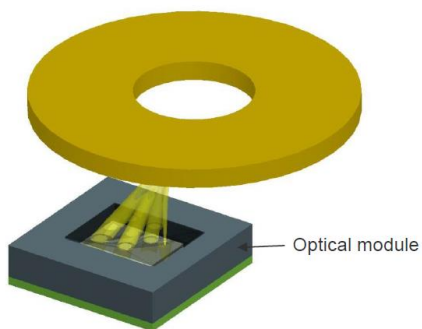
Zur Winkelkodierung werden reflektierende Beugungsgitter benutzt



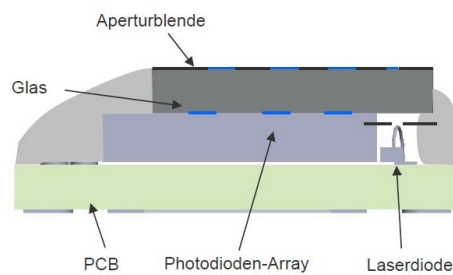
Daten/Bit-Strukturen einer Audio CD



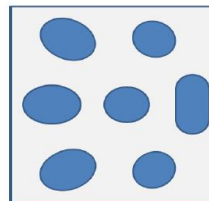
Geometrische Strukturen einer Winkelscheibe



Baugröße des Optikmoduls:
5x5x1,6 mm³

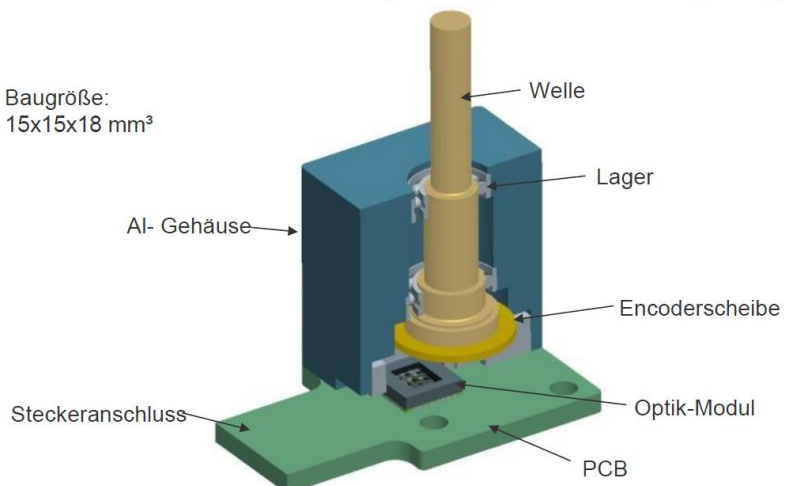


Layout des Photodioden-Array



Demonstrator zur Überprüfung des Funktionsprinzips

Baugröße:
15x15x18 mm³



- Application and environmental conditions
 - Extreme temperature fluctuations
 - Wind and weather
 - Mechanical strain
 - Electro smog
 - Corrosive, abrasive, aggressive and explosive media
- Test scenarios
 - Splashing
 - Temperature
 - Abrasion
 - EMC



Differenzdrucksensor

- 2 „Process membranes“ trennen das grüne Druckübertragungsmedium vom Prozessmedium.
 - Zwei Bereiche (dunkelgrün, hellgrün)
- Die „Overload membrane“ schützt den „Silicon sensor“ vor Überdruck.
- Das System ist für Betriebsdrücke von bis zu 630 bar ausgelegt und kann Differenzdrücke von 100 mbar messen. (Genauigkeit 0,05%)

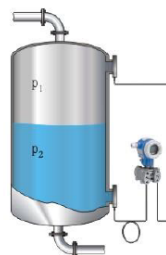
Füllstandsmessung

Hydrostatisch



Die hydrostatische Füllstandmessung in offenen Behältern basiert auf der Bestimmung des hydrostatischen Drucks, der durch Höhe der Flüssigkeitssäule erzeugt wird. Der gemessene Druck ist somit ein direktes Maß für den Füllstand.

Differenzdruck



In geschlossenen, drucküberlagerten Behältern führt hydrostatische Druck der Flüssigkeitssäule zu einer Druckdifferenz. Diese Druckdifferenz führt zu einer Auslenkung des Messelementes, das dem hydrostatischen Druck proportional ist

Vibronik



Sensor in Form einer Stimmgabel wird auf Resonanzfrequenz zum Vibrieren angeregt. Der Antrieb erfolgt piezoelektrisch. Durch das Eintauchen in Medium verändert sich die Schwingfrequenz bzw. die Amplitude. Diese Änderung wird ausgewertet und in Schaltsignal umgesetzt. Für alle Flüssigkeiten.

Ultraschall



Messung mit Ultraschall beruht auf Laufzeitmessung. Die durch Sensor ausgesandten Ultraschallimpulse werden von Oberfläche des Mediums reflektiert und wieder vom Sensor erfasst. Die benötigte Laufzeit ist Maß für den zurückgelegten Weg im leeren Tankteil. Der Wert wird von gesamt Tankhöhe abgezogen und man erhält daraus den Füllstand.

Radar



Abstrahlung von hochfrequenten Radar-Impulsen von Antenne welche von Füllgutoberfläche reflektiert werden. Laufzeit des reflektierten Radar-Impulses ist direkt proportional zum zurückgelegten Weg. Bei bekannter Behältergeometrie lässt sich daraus der Füllstand berechnen

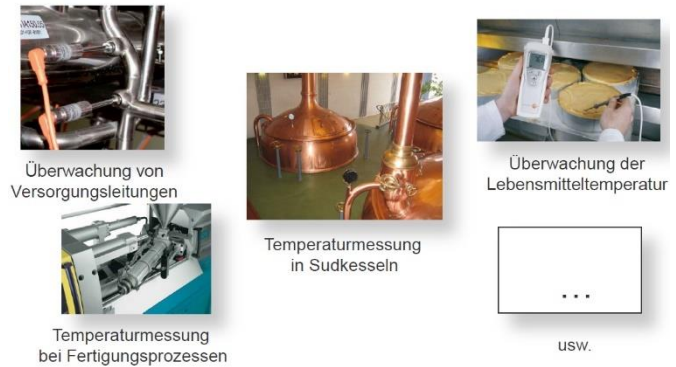
Kapazitiv



Das Prinzip der kapazitiven Füllstandmessung beruht auf der Änderung der Kapazität eines Kondensators. Die Sonde und die Tankwand bilden einen Kondensator, dessen Kapazität vom Füllungsgrad abhängt. Ein leerer Behälter hat geringere, gefüllter Behälter hat höhere Kapazität.

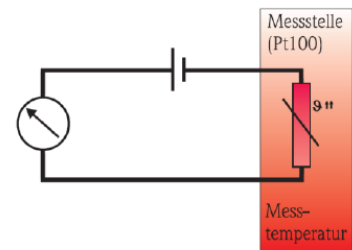
Temperatursensoren

Temperatur ist der am häufigsten gemessene Parameter in der Prozess- und Lebensmittelindustrie



Temperaturmessung mit RTD-Widerstandssensoren „Resistive Thermal Device“

- In RTD-Widerstandssensoren ändert sich der el. Widerstand mit der Temperatur.
- Sie zeichnen sich durch eine hohe Messgenauigkeit aus (0,1 K).
- Geeignet für Messungen zw. -200°C bis ca. 800°C.
- Häufigstes Widerstandssensorelement ist Pt100; dies ist ein temperaturempfindlicher Platinwiderstand mit 100 Ω bei 0°C.
- Pt100-Sensoren gibt es in versch. Bauformen:



• Drahtgewickelte Keramiksonden (bis 800°C):

Im Keramikträger befindet sich eine Wicklung aus haarfeinem / hochreinem Pt-Draht. Der Träger wird mit Keramikschutzschicht Versiegelt. Sensoren bieten gute Langzeitstabilität.

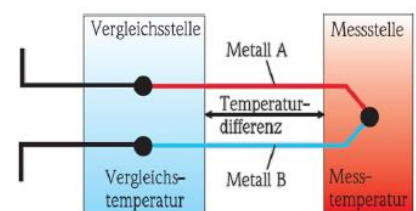
• Dünnschichtsensoren (bis 400°C):

Im Vakuum wird auf Keramikplatte eine 1 µm dicke Pt-Schicht aufgedampft und anschließend fotolithographisch strukturiert.

Platinleiterbahnen bilden Messwiderstand. → Vorteile gegenüber drahtgewickelter Variante liegt in kleineren Abmessungen und besserer Vibrationsbeständigkeit.

Temperaturmessung mit TC-Thermoelementen „Thermocouples“

- Ein Thermoelement ist ein Bauteil aus zwei unterschiedlichen und an einem Ende miteinander verbundenen Metallen.
- Aufgrund des Seebeck-Effekts entsteht an dem offenen Ende ein el. Spannung, wenn die Verbindungsstelle und die offenen Enden untersch. Temperaturen ausgesetzt sind.
- Mit Hilfe der thermoelektrischen Spannungsreihe kann auf die Temperatur an der Verbindungsstelle geschlossen werden. Die k-Werte sind auf 293 K (20°C) bezogen.
- Temperaturbereich von 0°C bis 1800°C.
- Thermoelemente zeichnen sich durch schnelle Ansprechzeiten und hohe Vibrationsbeständigkeit aus.



Thermospannung
(Differenz aus Thermospannungen von Metall A und Metall B)

Thermospannung:

$$U_{th} = (k_A - k_B) \cdot (T_1 - T_2)$$

thermoel. Spannungsreihe	
Material	k-Wert (mV/100 K)
Konstantan	-3,2
Nickel	-1,9
Platin	0,0 per. Def.
Nickelchrom	2,2

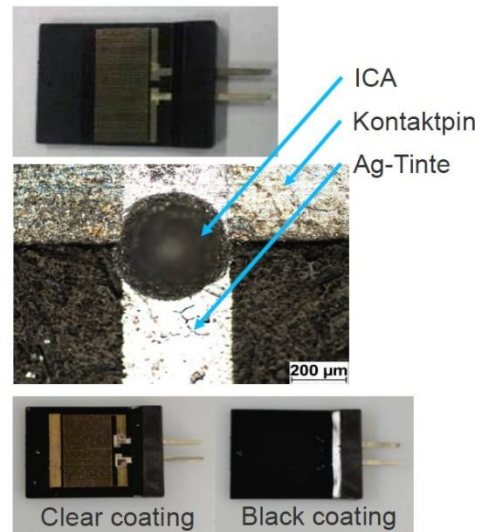
Temperatursensor (Injekt gedruckt)

Schematischer Aufbau zur Messung an durchströmtem Rohr



Produktionsprozess des Sensors

1. Inkjet-Druck der Sensorstruktur (Silber-Nanotinte) auf thermoplastischem Substrat mit umspritzten Kontaktpins
2. Sintern (thermisch)
3. Aufbringen isotrop leitfähigen Klebers (ICA) zwischen Sensorstruktur und Kontaktpin
4. Aufbringen einer Schutzschicht (Lack)



Aufbau eines Thermometers in der Prozesstechnik

1 Anschlusskopf

- Schutz und Montagemöglichkeit des Anschlusssockels
- Kabeleinführung und Verdrahtung

2 Halsrohr

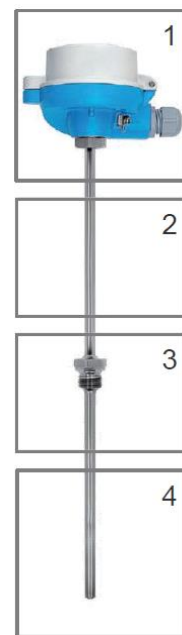
- Verbindungsstück zwischen Anschlusskopf und Prozessanschluss.
- Schutz des Anschlusskopfs vor Überhitzung.

3 Prozessanschluss

- Stellt Verbindung zwischen Prozess und Thermometer dar.
- Verbindungsarten: Gewinde, Flansche, Einschweißverbindungen

4 Schutzrohr

- Ist prozessberührender Teil des Thermometers.
- Verlängert Lebensdauer des Messeinsatzes durch Schutz vor Prozesseinflüssen



Trübungsmessung

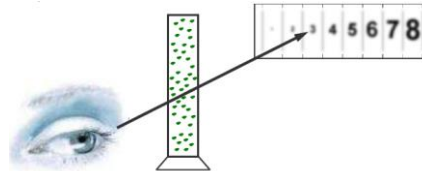
Trübung ist alltägliche Erscheinung und wird mit Attributen wie: „schlecht durchsichtig, Kontrast vermindernd, farbgebend, usw.“ beschrieben. Trübung ist die Bezeichnung für eine optische Erscheinung, hervorgerufen durch die Streuung des Lichtes an ungelösten Partikeln, die in einer Flüssigkeit vorhanden sind.

Historische Trübungsmessung:

- Messung mittels durchsichtigen Behälters, auf dessen Rückseite eine Sichttafel ist, welche durch Flüssigkeit betrachtet wird.
- Die Zahl, die gerade noch zu erkennen ist, entspricht der gemessenen Trübung.

Nachteil:

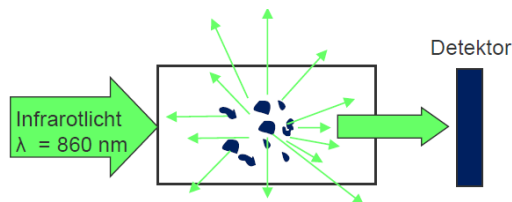
- Ungenau
- Abhängig vom subjektiven Eindruck



Prinzip der Trübungsmessung

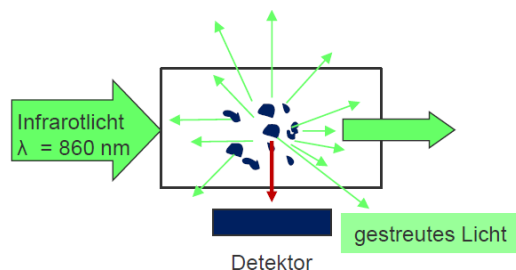
Mit dem Trübungswert wird das qualitative Phänomen der Trübung quantitativ erfasst. Ziel der Trübungsmessung ist es, Aussagen über Gehalt an streuenden Partikeln zu erhalten. Dies kann durch zwei grundlegende Messmethoden erreicht werden:

1. Messen der Schwächung durchgehender Lichtstrahlung



- Bei Durchlichtmessung wird gebündelter Lichtstrahl durch Prozessmedium geschickt.
- Messung des Lichtverlustes des transmittierenden Strahls (Streukoeffizient).
- Streukoeffizient entspricht der Gesamtheit des Streulichts, das dem einfallenden Strahl entzogen wurde.
- Geeignet für große Trübungen.

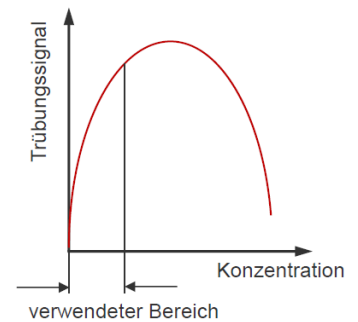
2. Messen des Streulichts (90°)



- Bei Streulichtmessung wird Intensität des seitlichen Streulichts gemessen.
- Streuintensität gibt an, wie viel Streulicht unter bestimmten Winkel abgelenkt wird.
- Standardprozess ist 90°-Messung.
- Wird für Bewertung der Produktklarheit verwendet, um einwandfreie Filtration zu gewährleisten.

Bei Streulichtmessungen (90°) kommt es ab einer bestimmten Feststoffkonzentration zu einem Umkehrpunkt im Messergebnis. Der Grund hierfür ist Mehrfachstreuung.

- Bei kleinen Konzentrationen kann sich gestreutes Licht jedes einzelnen Teilchens frei fortsetzen (Einfachstreuung).
- Bei höheren Konzentrationen schirmen einerseits die der Lichtquelle näher liegenden Partikel das einfallende Licht ab, andererseits kann sich Streulicht nicht mehr frei ausbreiten und wird von anderen Partikeln zurückgestreut.
- Streuintensität nimmt nicht mehr proportional zur Feststoffkonzentration zu.



Um Trübungen vergleichbar messen zu können wurde Trübungsstandard-flüssigkeit **Formazin** (Hydrazin Sulfat + Hexamethylentetramin + Ultrapureinstwasser) geschaffen.

- Die Trübung bei 90° Streulichtmessungen wird in FTU (**F**ormazine **T**urbidity **U**nit) angegeben.
- Trübungseinheit bezieht sich auf Verdünnungen der Flüssigkeit Formazin.
- Trübungswerte unter 0,016 sind nicht messbar, da bereits die reinen Wassermoleküle Einfluss auf die Lichtstreuung haben.



Medium	Trübungswert (FTU)
Sauberes Wasser	0,03
Trinkwasser	0,05
Abwasser	100 - 2000
Formazin	4000
Milch (1,5% Fett)	50 000
Kläranlagenablauf	0,5 - 10

Typische Trübungswerte

Die Trübungsmessung im Trinkwasserbereich liefert wichtigen Qualitätsparameter. In fast jedem Land der Welt ist ein gesetzlicher Grenzwert (Deutschland: 1 FTU) vorgeschrieben, der nicht überschritten werden darf. Sämtliche in der Trinkwasseraufbereitung nötigen Schritte lassen sich durch Trübungsmessung überwachen und regeln.

Trübungspartikel streuen das ausgesandte Infrarotlicht, das von zwei Fotoempfängern aufgenommen wird. Eine Referenz-LED kompensiert Intensitätsschwankungen der Lichtquelle.

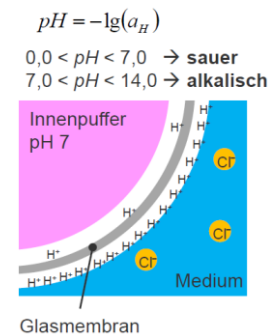
pH-Wert-Messung

Der pH-Wert ist ein Maß für den sauren oder basischen Charakter einer wässrigen Lösung. Er ist der negative Zehnerlogarithmus der Wasserstoffionen-Aktivität a_H .

Der pH-Wert wird mittels einer **potentiometrischen Messung** bestimmt.

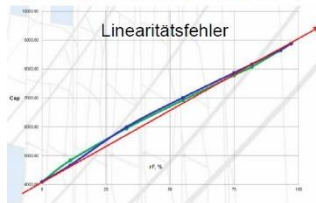
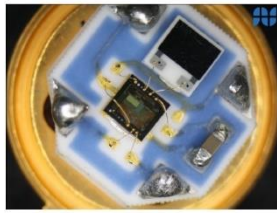
pH-Wert-Messung mit Glaselektrode:

- Von beiden Elektrolyten diffundieren die H^+ Ionen in die Außen- und Innenoberfläche der Glasmembran.
- H^+ Ionen neigen dazu sich an Silikatgruppen in der Glas-oberfläche anzulagern.
- Kationen und Anionen mit größerem Ionenradius gelingt dies nicht, d. h. die Glasmembran ist selektiv für H^+ Ionen.
- D. h. Glasoberflächen sind positiv geladen, die direkt anschließenden Elektrolytschichten sind negativ aufgeladen. Es entstehen zwei elektrische Doppelschichten.
- Die Spannung ($U_{außen} - U_{innen}$) ist ein Maß für den pH-Wert.

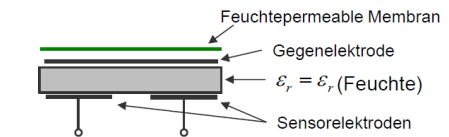


Feuchtemessung

Funktionsprinzip:



- Plattenkondensator mit Dielektrikum, das bei Feuchtaufnahme seine Dielektrizitätszahl ändert ist auf einem Keramikchip in Dünnschichttechnik hergestellt.



- Für die Kapazität gilt:

$$\begin{array}{c} \text{---} \parallel \text{---} \parallel \text{---} \\ C_1 \quad C_2 \end{array} \quad C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} = \frac{1}{2} C_1$$

- Kapazitätsmessung erfolgt mit einem ASIC, der die Kennlinie abschnittsweise mit 2 Polynomen 3.Ordnung linearisieren kann.

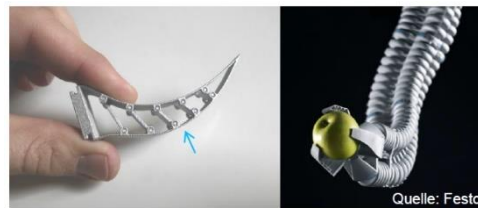
Kalibration der Feuchte über die Temperatur

- bis zu 4096 Sensoren in einem Kalibrierlauf
- Herstellkosten des Sensors: 3 € davon Kalibrierkosten: 1,5 €

Dehnungssensoren

Gedruckt mit Aerosol-Jet Verfahren

- Silber-Tinte auf LCP
- Wheatstone Konfiguration
- k-Faktor ca. 2.8
- Anwendung: Lagebestimmung eines bionischen Greifwerkzeuges

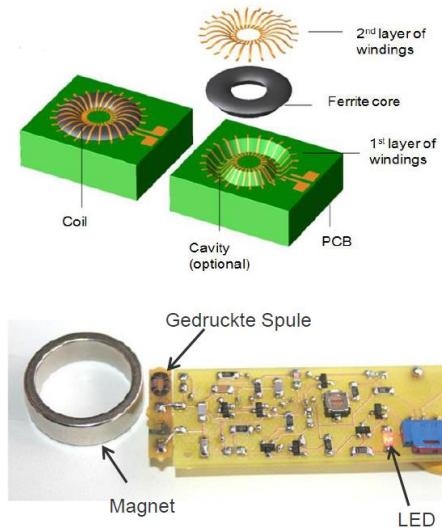


Quelle: Festo

Gedruckte Magnetfeldsensoren

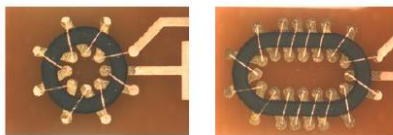
Aerosoljet gedruckt mit ferromagnetischem Kern

- Leiterplatten- und Drucktechnik sind günstige und vielfältig einsetzbare Technik
- Daher niedriges Startinvest und leichtes Anpassen der Geometrie (z.B. Windungszahlen)
- Einsatz z.B. als Endschalter (Festo)
- Projektdemonstrator beinhaltet LC-Oszillator-Schaltung, Energiequelle, gedruckte Spule und eine LED
- LED ändert Leuchtstärke nach Abstand des Magnets zum Sensor

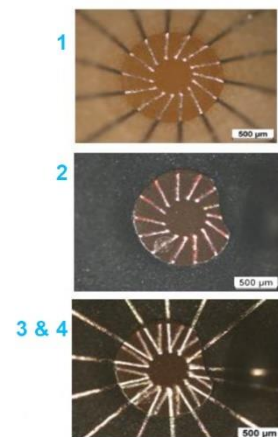


Produktionsprozess:

1. Erste Schicht der Spulengeometrie entweder in Leiterplattentechnik erstellt oder per Aerosoljet gedruckt und außenstromlos mit Kupfer nachverstärkt
2. Aufbringen von Ferritpaste per Dispenser oder Siebdruck
3. Zweite Schicht der Spulengeometrie per Aerosoljet aufgedruckt (Ag- oder Cu-Tinte)
4. Sintern und außenstromloses Nachverstärken mit Kupfer



- Erste Schicht auf PCB
- Siebgedruckter Kern
- Zweite Schicht Ag Aerosoljet gedruckt und Cu nachverstärkt



Grundlegende Anforderungen zum Einsatz von Mikrosystemen im Maschinenbau, der Anlagen- und Produktionstechnik

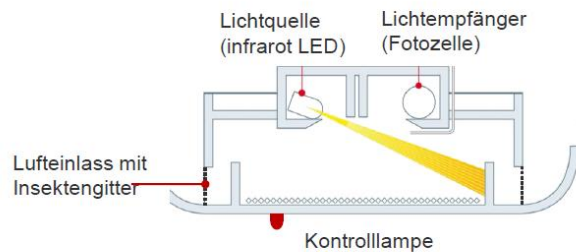
	Maschinenbau	Anlagen-/ Prozesstechnik
Umgebung	Industrielle Fertigungsmaschinen	Kühlhäuser, Kläranlagen, Hochöfen, Klimatechnik, ...
Betriebstemperatur	-40°C bis 65°C	-40 bis >1000 °C
Lagertemperatur	-55/150 °C	-55/150 °C
Umwelteinflüsse	Öl, Schmutz, Abrieb	extreme Hitze, Abwasser, Schlamm, Chemikalien
Mech. Schockfestigkeit	mittel	mittel
Lebensdauer	10 bis 15 Jahre	> 10 Jahre
Kosten	gering / mittel	mittel / hoch

2.5 Sicherheitstechnik

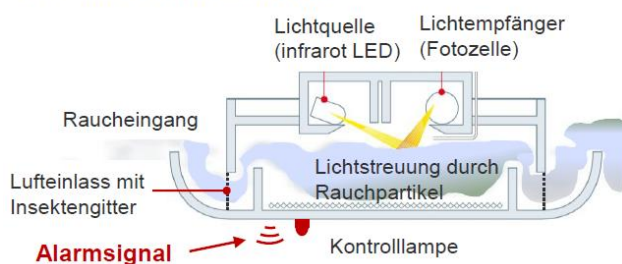
Rauchmelder

Optische Rauchmelder

Normalzustand



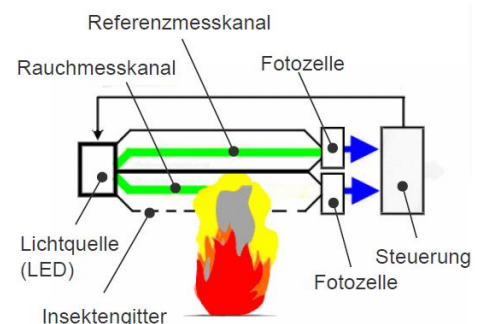
Zustand bei Raucheintritt



- Die Sensoren arbeiten nach einem optischen Prinzip.
- In der Messkammer werden regelmäßig Prüflichtstrahlen ausgesendet, welche im Normalzustand **nicht** auf die Fotozelle treffen. Klare Luft reflektiert praktisch kein Licht.
- Bei Raucheintritt in die Messkammer werden die Lichtstrahlen an den Rauchpartikeln gestreut, und auf die Fotozelle abgelenkt.
- Eine Fehlbelichtung des Lichtsensors durch von den Gehäusewänden reflektiertes Licht oder durch Fremdlicht von außen wird durch ein Labyrinth aus schwarzem, nicht reflektierendem Material verhindert.
- Das Signal der Fotozelle löst den Alarm aus.
- Bevorzugt eingesetzt zum frühzeitigen Erkennen von Schwelbränden (kalter Rauch mit großen/hellen Partikeln).

Durchlichtrauchmelder

- Der Lichtstrahl einer LED wird hier geteilt und durch die Messkammer geschickt.
- Der Referenzmesskanal ist hermetisch von der Außenluft abgeschlossen.
- Der Rauchmesskanal überprüft die Außenluft kontinuierlich auf Rauchpartikel.
- Die Lichtstrahlen werden von den Fotozellen aufgenommen und in ein el. Signal überführt.
- Die Werte des Referenzmesskanals dienen der Kompensation von Störgrößen wie Temperatur und Verschmutzung.
- Treten Rauchpartikel in den Rauchmesskanal ein, so wird das Licht in diesem Messkanal getrübt.
- Die Steuerung registriert die Differenz der Fotozellen und löst beim Überschreiten eines Grenzwertes Alarm aus.
- Reagiert gleichmäßig auf alle Rauchpartikel (groß/klein)

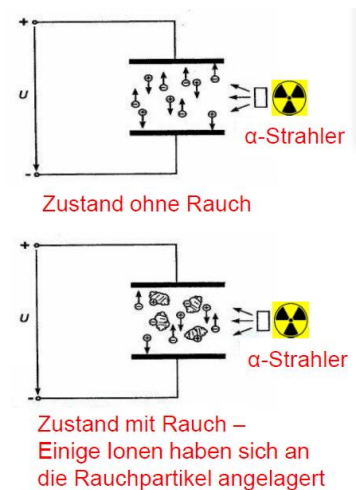


Ionisationsrauchmelder

Ionisationsrauchmelder reagieren auf kleine Rauchteilchen in der Luft (Aerosole)

- Messkammer befindet sich zwischen zwei Metallplatten, an denen eine Gleichspannung anliegt.
- Das Luftvolumen zwischen den Platten wird mit einem α -Strahler (Americium 241) bestrahlt und dadurch ionisiert. Die Luft wird dadurch elektrisch leitend.
- Es fließt ein Ionenstrom, der gemessen wird.
- Dringen Rauchpartikel in die Messkammer ein, lagern sich Ionen an die Rauchpartikel an.
- Durch die nun höhere Masse der Ionen verlangsamen sich diese und somit sinkt der Ionenstromfluss.
- Sinkt der Stromfluss unter einen bestimmten Wert, löst der Alarm aus.
- Geeignet für offene Brände mit kleinen Rauchpartikeln.

➔ **Nachteil:** Radioaktives Material ist Sondermüll (hohe Kosten) und darf bei Betrieb nicht aus Gehäuse austreten.



Bewegungsmelder

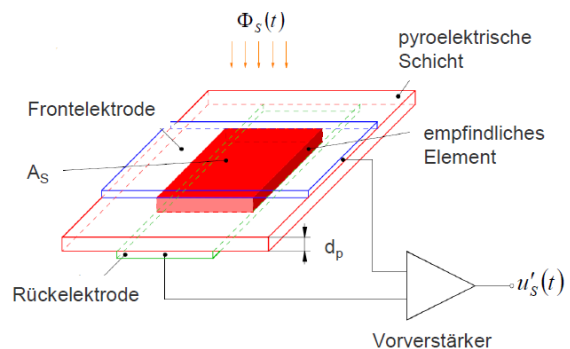
Pyroelektrischer Effekt (PIR-Sensor)

Funktionsprinzip:

- Sensor erfasst die von einem Objekt abgestrahlte IR-Strahlung, also eine Temperaturänderung. Er reagiert nicht auf statische Wärmeunterschiede (hervorgerufen durch Sonneneinstrahlung).
- Strahlung fällt durch eine gewölbte Kuppel aus kleinen Sammellinsen aus visuell weißlich-trübem Kunststoff auf einen in Brennweiteabstand platzierten Infrarot-Detektor. Der Kunststoff ist transparent für IR-Strahlung.
- IR-Strahlung wird mittels des pyroelektrischen Effekts in elektrische Signale umgewandelt.

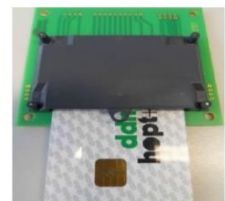
Wesentliche Bestandteile eines PIR-Sensors sind der Vorverstärker und das empfindliche Element, welches aus einem dünnen mit Elektroden versehenen pyroelektrischen Chip (Piezokristall) besteht.

- Trifft infraroter Strahlungsfluss $\Phi_s(t)$ auf die empfindliche Fläche A_s , wird er vom empfindlichen Element mit Absorptionsgrad α absorbiert.
- Dadurch entsteht im Pyroelek-trikum eine Temperaturänderung $\Delta T(t)$. Diese verursacht eine Änderung des Abstands der Gitterionen im Kristall, was zu einer Polarisierung ähnlich wie beim piezoelektrischen Effekt führt. Somit entsteht eine Ladungsänderung $\Delta Q(t)$ auf den Elektroden.
- Diese Ladungsänderung wird mit Hilfe des Vorverstärkers in die Signalspannung umgewandelt.



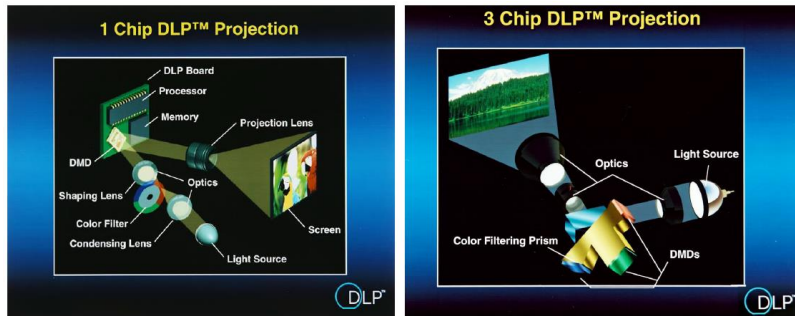
Intrusionssensoren

- Manipulationssicherung elektronischer Systeme wie Kartenleser (Bank) oder Glücksspielautomaten
- Beschädigung der Kappe unterbricht die Leiterstruktur und das System wird unbrauchbar
- Inkjet gedruckte Strukturen aus Silber-Nanotinte auf PBT
- 4 Mäanderstrukturen mit jeweils 3.5 m Länge und ca. 3 k Ω Widerstand



3. Mikroaktoren

Großbildprojektion mit „Digital Light Processing“ (DLP) Technologie



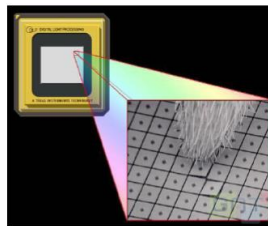
DLP Mikrospiegel – Array



Gehäuse

Technischen Daten:

Spiegelemente	1024 x 768
Pixelgröße	10,8 x 10,8 μm^2
Kippwinkel	$\pm 12^\circ$
Aktive Fläche	0,55''
Füllfaktor (Fläche)	92 %
Spiegelreflektivität (420 – 700 nm)	88 %



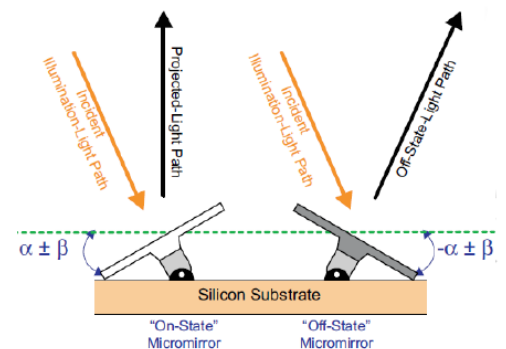
Ausschnitt aus Spiegelarray



Schema des DLP - Prinzip

Graustufendarstellung

- Ein DLP-Chip kann nur die Zustände 0 (Off-State) und 1 (On-State) annehmen.
- Zwischen Weiß und Schwarz gibt es noch analoge Abstufungen von Grau.
- Für Graustufen nutzt die Technologie eine Schwäche der menschlichen Wahrnehmung: Die schnelle Abfolge von weißen bzw. schwarzen Bildern nimmt der Mensch als Grauton war. Je mehr weiße Bilder, desto heller ist das Grau, je mehr schwarze Bilder, desto dunkler.
- Verfahren heißt binäre Pulsweitenmodulation (bPWM): Ein binärer Code mit Datenwortbreite 8 bit (entspricht 256 Graustufen), der die Intensität des darzustellenden Graus enthält, wird in den Speicher geladen. Danach wird jedes Bit einzeln entsprechend seiner Position im Code zeitlich gewichtet und schließlich angezeigt.
- Das Bit an der Stelle 7 wird somit 128 mal länger angezeigt als das Bit an der Stelle 0.



Bit-Position

7	6	5	4	3	2	1	0
1	0	0	1	1	1	0	0
128	64	32	16	8	4	2	1

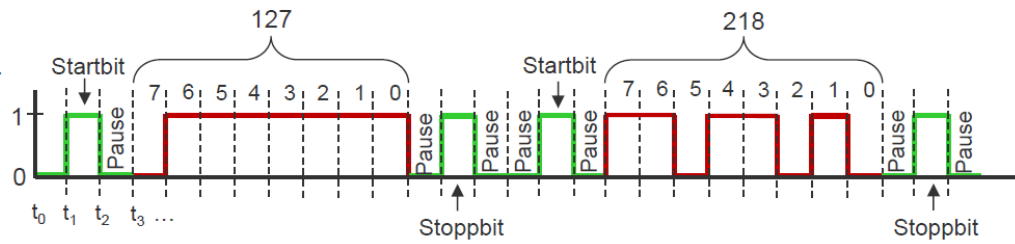
Gewichtung in ms

Zeitachse →

Seriell- und Parallelbus

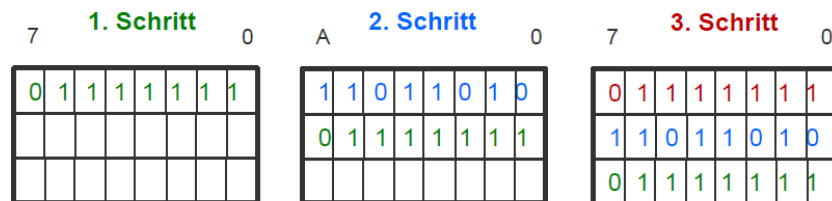
Serieller Bus

- serielles Auslesen über 1 Leitung

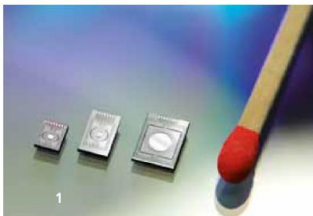
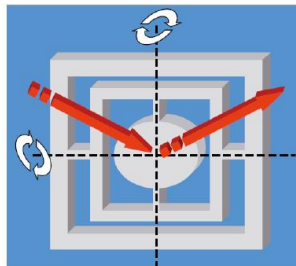
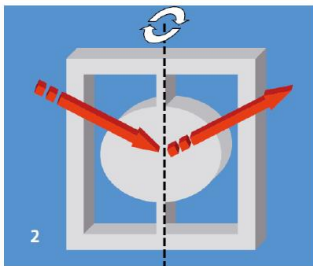


Paralleler Bus

- paralleles Auslesen über 8 Leitungen

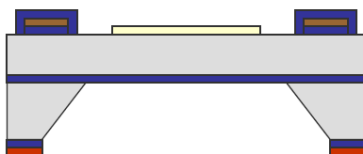


1- und 2-dimensionale resonante Scannerspiegel

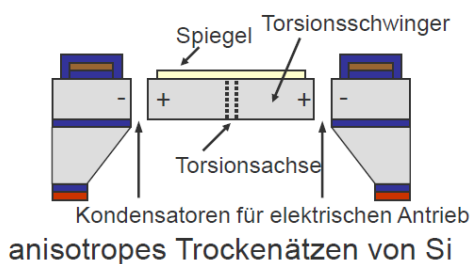


Zweck:	Ablenkung von Licht
Spiegel:	Rechteckig, elliptisch, rund
Scan-Frequenz:	0,1 – 50 kHz
Scanbereich:	bis zu 120° optisch
Spiegeldurchm.:	bis 5 mm (1D), 2mm (2D)
Reflexionsgrad:	ca. 90 %

Herstellung von Schwingungselementen



anisotropes nasschemisches Ätzen von Si



anisotropes Trockenätzen von Si

4. Klassifikation mikrotechnischer Aufbauten

Wichtige Anforderungen an Mikrosysteme in Bezug auf Lagerung, Transport, Betrieb

	Information+Kommunikation	Automobil		
Anwendungen	Mobiltelefon / PC	Innenraum	Motorraum Chassis	Motoranbau Getriebe
Betriebstemperatur	0°C bis 55°C	-40°C - 85°C	-40°C - 125°C	-40°C - 150°C
Lagertemperatur	-40°C bis 85°C	-55°C bis 150°C		
Stoffe in der Umgebung	Umgebungsluft	Öl, Gas, Wasser, Salz		
Mech. Schockfestigkeit	sehr hoch	hoch		
Lebensdauer	1 - 3 Jahre	10 - 15 Jahre		
Kosten	sehr gering	gering		
Sensoren	Touch, Hall, Beschleunigung, Drehrate, CMOS, CCD, Mikrofon...	Beschleunigung, Drehrate, Hall, Druck, Temperatur, Regen, Ultraschall, Radar, Durchfluss, ...		

	Medizintechnik	Maschinenbau	Anlagen- / Prozesstechnik
Anwendungen	Implantate	Industrielle Fertigungs- maschinen	Kühlhäuser, Kläranlagen, Hochöfen, Klimatechnik, ...
Betriebstemperatur	37 °C	-40°C bis 65°C	-40 bis >1000 °C
Lagertemperatur	-20°C bis 65 °C	-55/150 °C	-55/150 °C
Stoffe in der Umgebung	Blut, Gewebeflüssigkeit	Öl, Schmutz, Abrieb	extreme Hitze, Abwasser, Schlamm, Chemikalien
Mech. Schockfestigkeit	gering	mittel	mittel
Lebensdauer	2 bis >>10 Jahre	10 bis 15 Jahre	> 10 Jahre
Kosten	mittel / hoch	gering / mittel	mittel / hoch
Sensoren	Cochlea, Retina, Herzschríttmacher, Blutdruck, ...	Weg, Neigung, ...	Temperatur, Druck, Feuchte, Trübung,...

Wichtige Komponenten von mikrotechnischen Sensoren

Ein mikrotechnisches System oder ein Sensor bestehen i.A. aus Wandler, elektronischer Schaltung sowie Gehäuse oder Systemträger. Bei bestimmten Sensor-systemen werden auch Stimuli bzw. Aktoren zur Erzeugung des Sensorsignals benutzt, z.B. Licht-, Radar- und Ultraschallquellen.

1. Aufgabe des Wandlerelements

a) Direkte Wandlung der zu messenden Eingangsgröße in eine elektrische Größe:

- Spannung (Thermoelement, ...)
- Strom (Fotodiode, ...)

b) Wandlung mit Hilfsenergie / Stimuli:

- Spannung (resistive Drucksensoren, ...)
- Kapazität (Drehratensensor, Beschleunigungssensor, ...)
- Strom (Fototransistor, ...)
- Widerstand (Temperatursensor, ...)
- Induktivität (linearer variabler Differentialtransformator (LVDT))

2. Die elektronische Schaltung (Elektronik)

Aufgabe: Wandlung der elektrischen Größe in ein elektrisches Standardsignal und Bereitstellung der Hilfsenergie

- stromproportionales Signal
- spannungsproportionales Signal
- digitalisiertes Standardsignal

Aufbauvarianten:

- Monolithisch integriert, d.h. Sensor und Elektronik sind auf einem Chip (Bosch-Drucksensor)
- ASIC (anwendungsspezifischer IC)
- ASIC plus zusätzliche Bauelemente (Referenzwiderstände, Referenzkondensatoren, Mikroprozessoren, ...)
- Diskrete Bauelemente und ICs

3. Sensorgehäuse oder Sensorträger

Aufgabe:

- Mechanische Fixierung und Justierung
- Schnittstellen zur Kopplung des Wandlerelements mit der Messgröße: thermisch, optisch, mechanisch, fluidisch, chemisch, ...
- Medientrennung bei aggressiven, gefährlichen, kontaminationsempfindlichen Gasen oder Flüssigkeiten, z. B. Druckmittler bei Drucksensoren
- Schnittstellen zur Verbindung der Elektronik mit der System-Peripherie
- Interne elektrische Verbindung von Wandler und elektronischen Bauelementen
- Ableitung innerer Wärmeenergie aufgrund der elektrischen Verlustleistung
- Schutz von Wandlerelement und Elektronik vor Umwelteinflüssen: Wärme, UV-Strahlung, Feuchte, chemischer Angriff, Erschütterungen, elektromagnetische Störungen, ...

Klassifikation der Gehäuse für mikrotechnische Sensoren und Systeme bzgl. Einkopplung der Messgröße bzw. AVT

1. „Gehäuse ohne Medienöffnung“

- Feld- oder Trägheitskopplung (Magnetfeldsensoren, Touchsensoren, Beschleunigungssensoren, ...) ohne Medienkopplungsöffnung
- Mechanische Kopplung (Kraftsensoren, Sitzbelegungssensoren, ...)
- Thermische Kopplung (Thermowiderstände, Thermoelemente, ...)

2. „Gehäuse mit Medieneinkopplung“

- Strahlungsfenster (Lichtsensoren, Bildsensoren, Thermographiekameras, ...)
- Fluidkontakt, d.h. Kontakt zu Gasen und Flüssigkeiten:
ohne Medientrennung (Mikrophon, Luftdrucksensor, Massenflusssensor, ...)
mit Medientrennung bei aggressiven oder kontaminationsfreien Fluiden (Drucksensoren, Mikroventile, ...)

3. Implantate (Herzschrittmacher, Cochlea-Implantat, ...)

- Biokompatibilität

Bauformen mikrotechnischer Wandlerelemente

- Wandler-Chip aus Silizium

Bauform	Messsignal
Drucksensor, Temperatursensor	Widerstandsänderung
Beschleunigungssensor, Drehratensensor, MEMS-Mikrofon	Kapazitätsänderung
Magnetfeldsensor	Spannung
Fotodiode, CCD, CMOS-Sensor	Strom

- Wandler hergestellt in Dünnschichttechnik auf verschiedenen Substraten

Bauform	Messsignal
Pt-100 (Glas-Chip), Drucksensor (Keramik-Chip, Stahlbauteil), Kraftsensor (Stahlbauteil), DMS (Folie)	Widerstandsänderung
Feuchtesensor (Glas-/Keramik-Chip, Folie)	Kapazitätsänderung

- Wandler hergestellt in Dickschichttechnik auf verschiedenen Substraten

Bauform	Messgröße
Drucksensor (Keramik-Chip)	Widerstandsänderung
Feuchtesensor (Keramik-Chip)	Kapazitätsänderung

- Wandler hergestellt in Leiterplattentechnologie

Bauform	Messgröße
potenziometrische Wegsensoren	Spannung
Neigungswinkelsensor, Drucksensor	Kapazitätsänderung

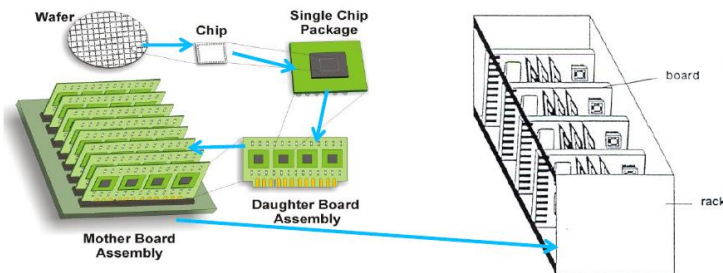
- In Gehäuse integrierte Wandler

Bauform	Messgröße
Touch-Sensor, Bedienelemente	Kapazitätsänderung
Bedienelemente	Widerstandsänderung

5. Gehäusetechnologie

5.1 Einführung

Hierarchie mikroelektrischer Aufbauten



Chip-Ebene

Chip-Gehäuse
Multi-Chip-Module
einzelne oder mehrere
Chips in einem Gehäuse

Leiterplatten (Motherboards)

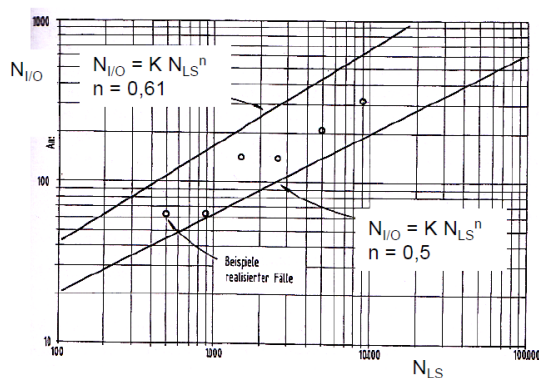
mehrere Module oder gehäute
Chips zu einer Baugruppe auf
einer Leiterplatte aufgebaut

Geräteebene

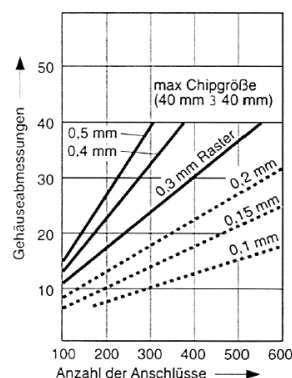
Gerätegehäuse,
Racks

Die Aufbau- und Verbindungstechniken elektronischer Systeme sind Vorbild und Ausgangsbasis für die AVT von Mikrosystemen.

Gehäuseentwicklung in der Mikroelektronik



Anzahl der Anschlüsse N_{IO} in Bezug auf die
Anzahl integrierter logischer Schaltkreise N_{LS}



Gehäuseabmessungen als Funktion der
Anzahl von Anschlüssen

Rent'sche Regel:

$$N_{IO} = K \cdot N_{LS}^n$$

$n \approx 0,4 \dots 0,65$

N_{IO} = Anzahl der Anschlüsse pro Bauelement

K = Konstante, deren typischer Wert bei $K = 2,5$ liegt

N_{LS} = mittlere Anzahl der integrierten logischen Schaltkreise

Chip Packages

Zweck des Chip-Packaging

- Schutz des Chips vor physikalischer Beschädigung
- Schutz des Chips vor Verschmutzung (Partikel, Fluide)
- Steigerung des Wärmetransports vom Chip weg (Leistungselektronik)
- Elektrische Schnittstelle des Chips zur Peripherie erzeugen (Handling):
 - Elektrischer Kontakt für Test in Fertigung
 - Elektrische Verbindung nach Montage im System

Übliche Gliederungen der Chip-Packages

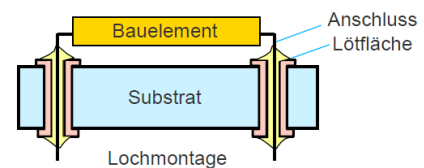
Nach *Montagetechnik* der gehäuseten Bauteile

- Durchsteckmontage: Through Hole Packages (THT)
- Oberflächenmontage: Surface Mount Packages (SMT)
- Weitere Untergliederungen nach:
 - *Gehäusematerialien*: Kunststoff, Keramik, Metall, Pre-Molded
 - > 99 % der Packages sind kunststoffgekapstelt
 - *Form der elektrischen Anschlüsse*: No Lead, Pin, Ball, ...
 - Spezielle Aufbau- und Anordnungsvarianten: Verschiedene Chips nebeneinander / übereinander, Kombination von Chips und SMD-Bauteilen, ...

THT- und SMT-Gehäuse

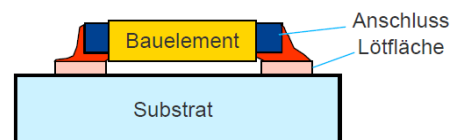
THT-Gehäuse:

- Lochmontagetechnik, "Through Hole Technology (THT)" mit verlöteten, durchgesteckten, bedrahteten Bauelementen



SMT-Gehäuse:

- Oberflächenmontagetechnik, "Surface Mount Technology (SMT)" mit aufgesetzten verlöteten oder geklebten BE

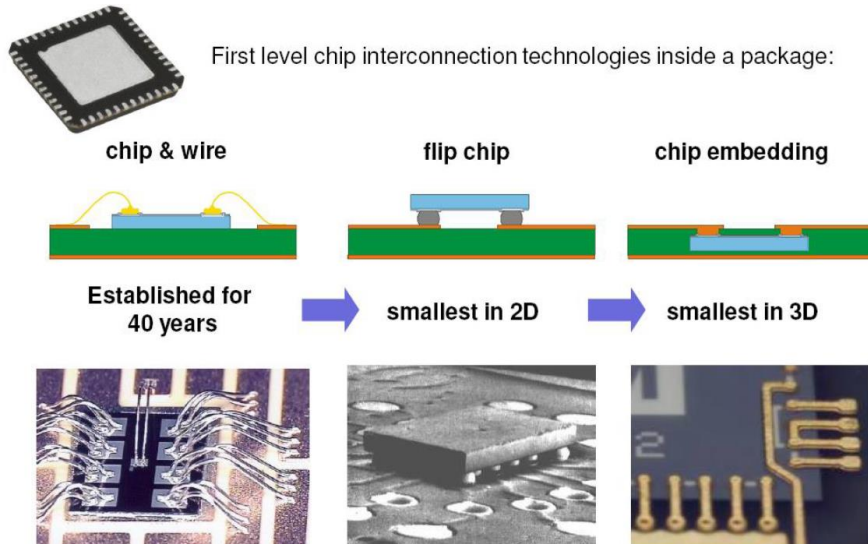


Wichtige Gehäusetechnologien der Mikroelektronik

Art	Verschluss	Anschlusszahl	Dichtheit	Wärmeableitung
Metallgehäuse	Metalldeckel Geschweißt	niedrig (<10)	hermetisch	sehr gut
Keramikgehäuse	Metalldeckel Gelötet	mittel – sehr hoch (800)	hermetisch	gut – sehr gut
Pre-Molded Gehäuse	Deckel geklebt, Vergussmasse	mittel – hoch	mittel	mäßig
Umgespreste Kunststoffgehäuse	umgespreste	Mittel	mittel	mäßig

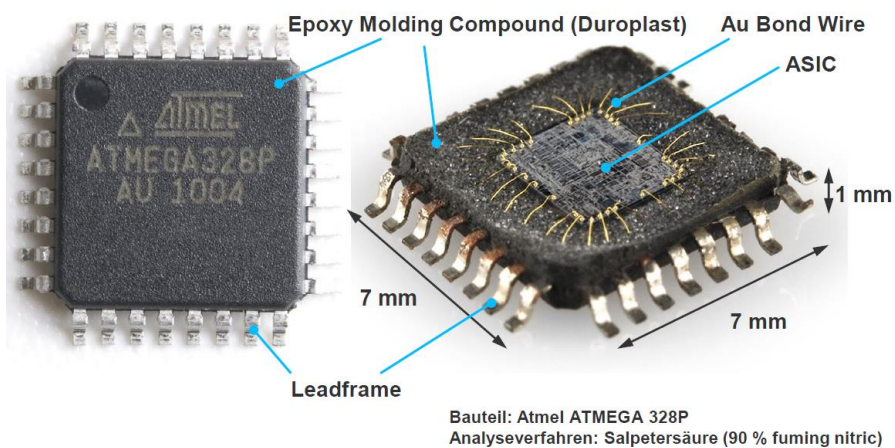
Art	Bauelemente	Anwendung	Preis	Stückzahl
Metallgehäuse	Diode, Transistor, Hybridschaltung, IR-Sensor, Drucksensor	High-End, spezial, Power HF-Anwend. Automotiv	sehr hoch	klein – mittel
Keramikgehäuse	Mixed Signal, Prozessoren, ...	High-End Prototypen HF-Anwend.	hoch	klein – mittel
Pre-Molded Gehäuse	Drucksensoren, LED's, Drehraten- sensoren,...	Prototypen	mittel	klein – mittel
Umgespreste Kunststoffgehäuse	Speicher, Logic, LED's, Mixed Signal	Low-End - Medium	günstig	sehr hoch

Interconnect Evolution



Aufbaubeispiel Mikrocontroller

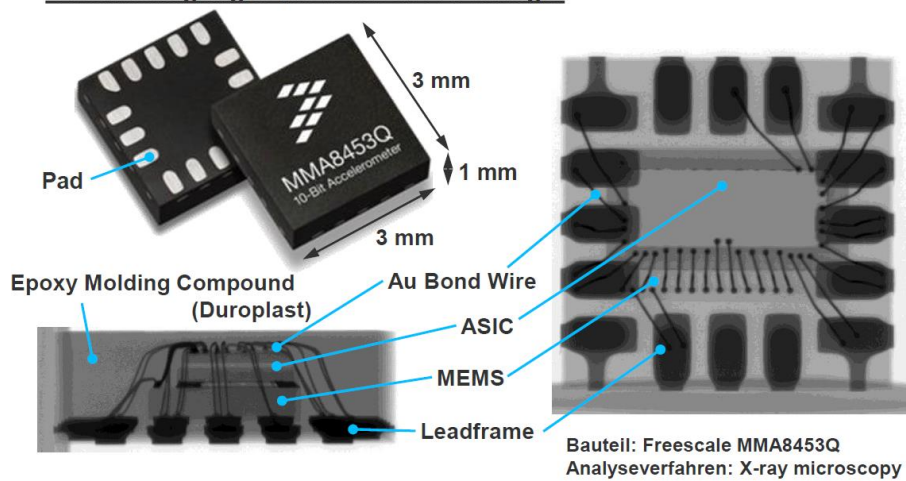
Atmel-Mikrocontroller im QFP-Package:



Bauteil: Atmel ATMEGA 328P
Analyseverfahren: Salpetersäure (90 % fuming nitric)

Aufbaubeispiel Beschleunigungssensor

Beschleunigungssensor im QFN-Package:



Bauteil: Freescale MMA8453Q
Analyseverfahren: X-ray microscopy

5.2 Verbindungstechnik und Gehäusetechnologie

Verbindungstechnik: Drahtbonden

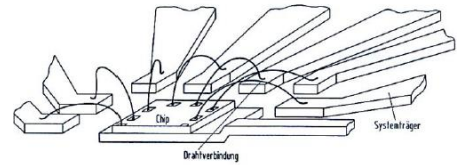
Drahtbondtechnik – Prinzip der Drahtkontaktierung

Vorteile des Drahtbondens:

- Möglichkeit von verschiedenen Metallisierungen der Pads.
- Flexibilität im Hinblick auf die Gehäuse-, Substrat- und Chip-Geometrie
- Umfangreicher Erfahrungsschatz zur Verfahrensführung und Qualitätssicherung (ausgereifte Technologie)
- Einfache (zerstörende) Prüfbarkeit der Verbindung und deren Zuverlässigkeit
- Reparierbarkeit der Verbindungen

Ziele:

gute mechanische Festigkeit der Drähte + guter elektrischer Kontakt

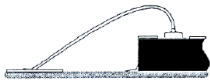


„Elektrische Verbindung der Chipkontaktflächen (Pads) mit den Gehäuse-/ Substratkontaktflächen durch Mikroschweißen (Kaltpressschweißen) von Mikrodrähten“

Verschiedene Verfahrensvarianten des Drahtbondens

- Bonddrahtführung und Kontaktgeometrie

Ball/Wedge-Bonden



Wedge/Wedge-Bonden



Bändchenbonden



- Arten der Energiezuführung

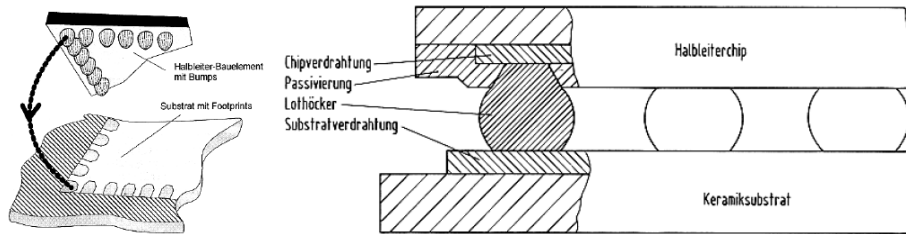
- TC: Thermokompression (Temperatur + Druck)
 - TS: Thermosonic (Temperatur + Ultraschall + Druck)
 - US: Ultraschall (Ultraschall + Druck)
- | | | |
|---|----------|-------------------|
| } | Au-Draht | T ≈ 350°C |
| | Al-Draht | T ≈ 150°C - 200°C |

- Typische Prozessparameter

- Drahtdurchmesser: 17 / 25 / 33 µm (500 µm beim Al-Dickdrahtbonden)
- Anpresskraft: 25 bis 70 cN
- Anpressdauer: 30 bis 50 ms

Flip-Chip-Technik (FC-Technologie)

Der Chip wird mit der Oberseite zum Substrat „geflippt“ und durch direkte Kontaktierung von Bondpads auf dem Chip zu Kontaktflächen auf dem Substrat mit Hilfe von Höckern (Bumps) verbunden. Die Bumps werden in der Regel auf dem Chip erzeugt.



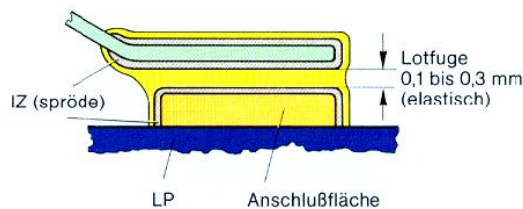
Schematische Darstellung einer Flip-Chip-Verbindung (Prinzip und Querschnitt)

Vorteile: Aus der hohen Packungsdichte, guten Wärmeableitung, guten Justierung des Chips zum Substrat und den geringen parasitären Induktivitäten, im Gegensatz zum Loop beim Drahtbonds, ergibt sich die beste Eignung für schnellste Digitalschaltungen (Prozessoren) und optoelektronische Bauelemente (LED).

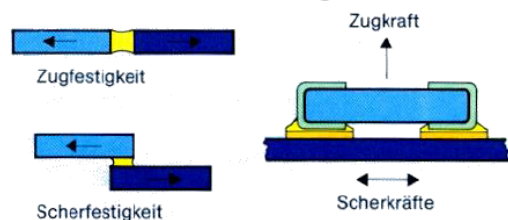
Aufbau und mechanische Kräfte von SMT-Lötverbindungen

Thermomechanische Kräfte treten immer auf, wenn Materialien mit unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten (CTE) fest mit einander verbunden sind (z.B. Bi-Metall).

Aufbau einer typischen Lötverbindung



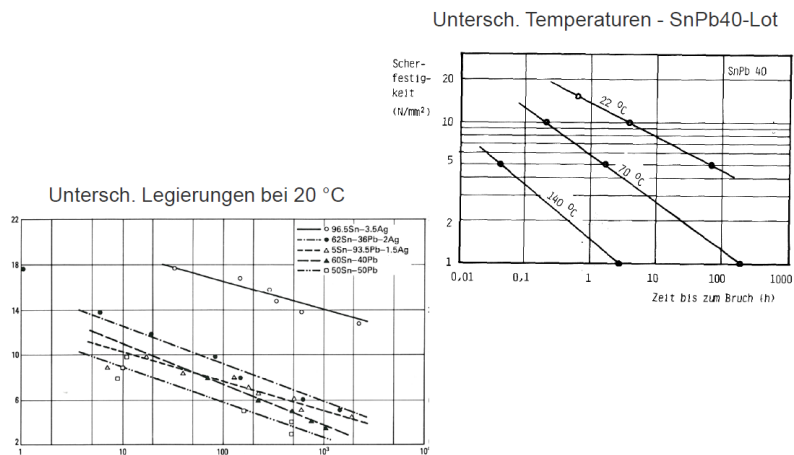
Mechanische Krafteinwirkungen auf eine Lötverbindung



- Dynamische Kräfte aufgrund Gehäusemassen und Schwingungen (→ gering)
- Thermomechanische Kräfte aufgrund unterschiedlicher thermischer Ausdehnungskoeffizienten (CTE) von Substrat / Systemträger und gehäustem Bauelement (→ dominierend)

Festigkeit von Lötverbindungen

Kriechverhalten in Abhängigkeit von Spannung/Temperatur/Legierung

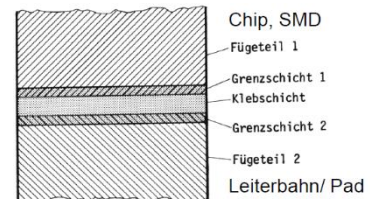


Einflussgrößen auf die mechanische Zuverlässigkeit

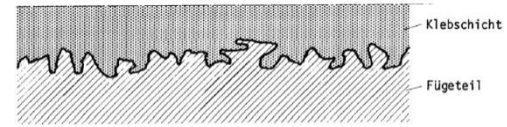
- Eine Minstdicke der Lotfuge gibt Elastizität und Steifigkeit.
- Das Kriechen ist eine zeitabhängige irreversible plastische Dehnung (bei gleichbleibender mech. Spannung) welche die Dauerfestigkeit reduziert. Es ist die Hauptausfallursache gelöteter Bauelemente.
- Die spröde intermetallische Zone (IZ) limitiert die Scherfestigkeit. Unter Temperatureinwirkung wachsen die IZ durch Diffusion.
- Zulässige Scherbelastung: $< 1 \text{ N/mm}^2$

Aufbau einer Klebeverbindung

- Kleben ist eine stoffschlüssige Verbindung.
- Nahezu alle Festkörperflächen können mit einer Klebschicht verbunden werden.
- Klebstoffe sind Polymerwerkstoffe und sind elektrisch isolierend und thermisch schlecht leitend.
- Die Leitfähigkeit kann durch Füllstoffe verbessert / eingestellt werden.



Aufbau einer Klebeverbindung



Grenzschicht zwischen Klebstoff und Fügeteil

Festigkeit einer Klebeverbindung

• Kohäsion

Die innere Festigkeit der Klebschicht wird durch die Bindungsstärke der Klebstoffmatrix bestimmt.

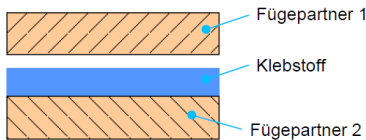
• Adhäsion

Die Festigkeit der Grenzschichten wird durch den Bindungsmechanismus zwischen Klebschicht und Fügeteil bestimmt:

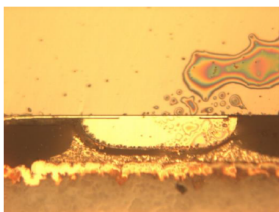
- chemische und/ oder physikalische Bindung.
- mechanische Verankerung durch Oberflächenrauheit (Formschluss).

Versagensmechanismen von Klebstoffverbindungen

Adhäsionsbruch

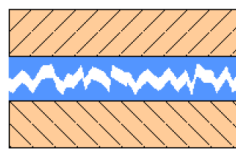


Bruch der Klebstoffverbindung in der Grenzschicht



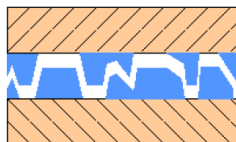
Beispiel für Adhäsionsbruch zwischen Bump und leitfähigem Klebstoff (klebstoffseitig)

Kohäsionsbruch



Bruch der Klebstoffverbindung in der Klebstoffschicht

Mischbruch



Kombination aus Bruch der Klebstoffschicht und der Grenzschicht

Isotrop leitfähiges Kleben beim Die-Bonden

Prinzip: Klebstoff wird mit leitenden Partikeln (Flakes) gefüllt. Die Leitfähigkeit entsteht durch die Berührung der Partikel.

- Füllstoff: Ag-, (Au-) Flakes; Silberoxid ist ein Leiter, Aluminiumoxid ist ein guter Isolator !
- Anteil: 70-80 % Gew. entspricht < 20 % Vol.
- Größe der Partikel: 10-40 µm

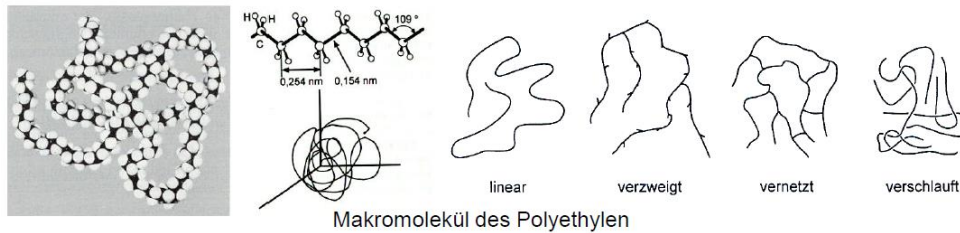
Wichtige Temperaturdaten von Leitklebschichten (hängen ab von der Aushärtung):

	Epoxid	Polyimid
Glasübergangstemperatur [°C]	50 bis 120	150 bis 235
Betriebstemperatur [°C]	-55 bis +150	< 270
Grenztemperatur [°C]	300	370

➔ **Klebstoffe in der Mikrosystemtechnik sind meist Duromere.**

Aufbau von Polymerwerkstoffen aus Makromolekülen

Makromoleküle bestehen aus kettenförmig aneinandergereihten Monomeren, z.B. C_2H_4 beim Polyethylen, die zusammen mehr als 1000 Atome mit einem Molekulargewicht von 104 bis 107 g/mol ausmachen.



- Die Atome innerhalb eines Makromoleküls sind **chemisch (kovalent)** gebunden (sehr fest)
- Lineare Makromoleküle bilden Knäuel
- Die **Bindung** zwischen Makromolekülen erfolgt
 - physikalisch durch Van-der-Waals-Kräfte und Verzahnungen/Verschlaufungen (lose Bindung)
 - chemisch durch Vernetzungen (feste Verbindung)

Klassifikation der Polymerwerkstoffe: Thermoplaste und vernetzte Kunststoffe

Thermoplaste

Thermoplaste (TP) bestehen aus linearen oder verzweigten Makromolekülen, die physikalisch gebunden sind. TP sind bei Raumtemperatur hart und erweichen bei Erwärmung in den plastischen Zustand, in dem sie durch Umformung leicht verarbeitet werden können. Die Erweichung ist reversibel. Lineare Moleküle mit nicht zu sperrigen Verzweigungen können sich in mikroskopischen Bereichen parallel zueinander lagern und Kristallite bilden (**teilkristalline TP**). Zwischen den kristallinen Bereichen sind amorphe Bereiche.

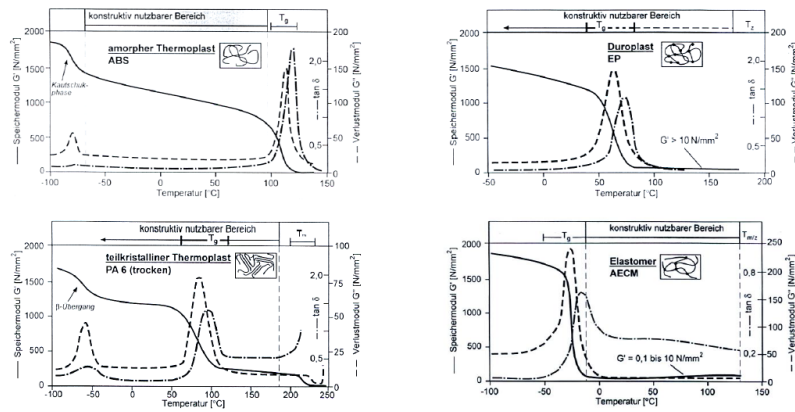
Thermoplaste	
amorph	teilkristallin
verzweigte Kettenmoleküle	lineare Kettenmoleküle

Duroplaste und Elastomere

Duroplaste entstehen durch eine Vernetzungsreaktion mehrerer Komponenten. Dabei werden die Makromoleküle durch chemische Bindungen stark vernetzt (1 Vernetzung pro 20 Atome). Zusätzlich wirken die physikalischen Bindekräfte ähnlich wie bei TP. Durch Erwärmen werden nur die physikalischen Bindungen erweicht, was zu einer Verminderung der Festigkeit führt. Ein plastischer Zustand wie bei TP kann nicht mehr erreicht werden. **Elastomere** sind weitmaschig vernetzt (1 Vernetzung pro 1000 Atome). Die physikalischen Kräfte sind meist bei RT erweicht (gummiartiges Verhalten).

Elastomere	Duroplaste
schwach vernetzte Kettenmoleküle	stark vernetzte Kettenmoleküle

Thermomechanisches Verhalten der Polymer-Werkstoffe



$G' \approx$ E-Modul bei Schwingungsbelastung
 $G'' \sim$ Energieverlust pro Schwingung

T_g = Glasübergangstemperaturbereich
 T_m = Schmelzbereich
 T_z = Zersetzungsbereich

Übersicht zu Chip-Package-Technologien

- Gehäusematerialien: Metalle / Keramiken / Kunststoffe (> 99 % Marktanteil)
- Form der elektr. Anschlüsse (englisch lead) von SMD-Packages:



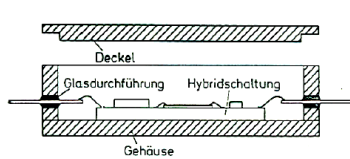
- Bemerkung:
 - Lead = aus dem Gehäuse herausragende/abstehende elektrische Anschlüsse
 - No-lead = flache elektrische Anschlüsse am Gehäuse, nicht abstehend, Leadless
- Kunststoffgehäuse:
 - Fertigungsverfahren: Injection Molding / Transfer Molding am häufigsten angewandt
 - Fertigungsprinzip: Pre-Molded / Post-Molded

Gehäusetechnologie: Metallgehäuse

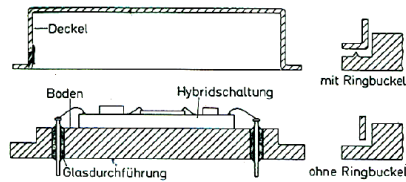
- Herstellung:

1. Gehäusekörper aus Metall herstellen
2. Stifte mit Sinterglasteil einschmelzen

- Bauformen (Schnittdarstellung):

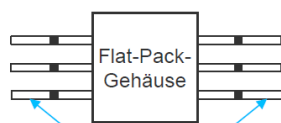


Flat-Pack-Gehäuse
für HF-Anwendungen



Plug-In Gehäuse
„Transistor-Outline-Gehäuse“

Impedanzmäßige Anpassung des
Gehäuses an Wellenleiter (Draufsicht)



Wellenleiter für HF - Anwendungen

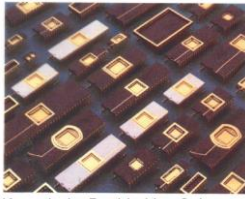
TO-Gehäuse



Materialkombinationen mit angepassten therm. Ausdehnungskoeffizienten

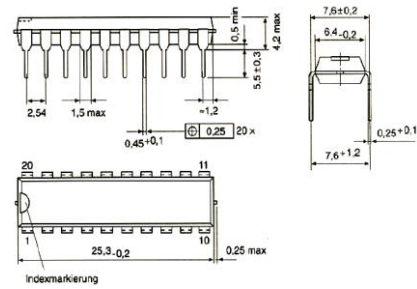
	Material 1	α [$10^{-6}/K$]	Material 2	α [$10^{-6}/K$]
Gehäuse	Kovar Fe54 Ni29 Co17	5.1 (Si = 2.6)	Ni Fe47 Cr	9.4
Stifte	Kovar	5.1	Ni Fe47 Cr	9.4
Glaspreform	Borosilikatglas (hart)	4.6	weiches Glas	8.5 - 10.5

Dual-In-Line-Gehäuse



Keramische Dual-In-Line Gehäuse

- Gängige Typen: DIL 4... DIL 48 (4 -48 Pins)
- Unterschiedliche Ausführungen: Cavity (Größe, up, down,...) Deckelanschluss,...



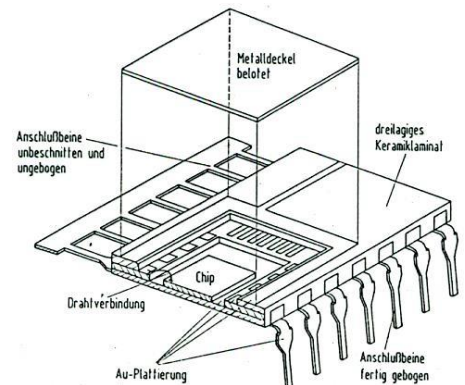
Übersicht über die Maße bei Kunststoff-DIPs (Raster der Pins: 2,54 mm)

Ausführung in Keramik, Kunststoff

Mehrlagenkeramikgehäuse

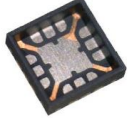
Herstellung:

1. "grüne" Keramikbänder (25-50% Lösungsmittel)
2. Bedrucken mit W-Mo-Paste für Leiterbahnen
3. Laminieren mehrerer grüner Bänder übereinander, Strukturierung durch Stanzen
4. Brennen des Laminats (1500°C)
5. Chemisches Vernickeln der sichtbaren Leiterbahnen
6. Anlöten der Fahnen, Stifte aus Kovar (Fe54 Ni29 Co17) oder Alloy42 (FeNi42)
7. Chemische Beschichtung 2 µm Ni, 1.5 µm Au, SnPb



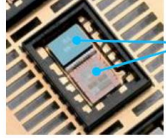
Pre-Molded Kunststoffgehäuse

Unbestückt:



- Für Prototypen geeignet
- Verschließen der Gehäuse durch Verguss oder Deckel

Mit Chips bestückt:



Chips

Drehratensensor-Modul:



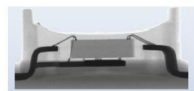
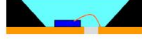
Verschlussdeckel



Die-Attach und Drahtbonden



Vergießen mit z.B. Epoxy

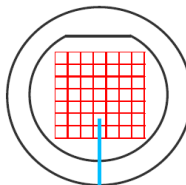
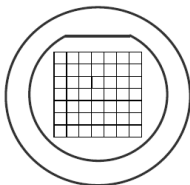
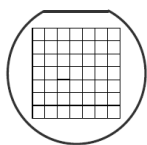


Röntgen-Aufnahme

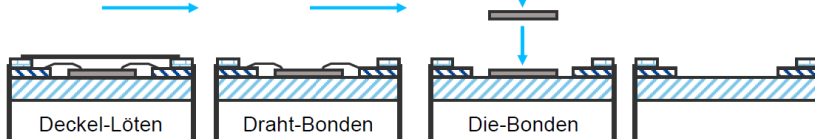
Chipmontage bei Metall-, Keramik- und Premold-Gehäusen

Wafer mit gefertigten Bauelementen bereitstellen

Wafer wird auf selbstklebender elastischen Folie befestigt



Vereinzeln der Chips durch Zersägen des Wafers. Die Folie wird dabei nicht durchtrennt. Durch Spannen der Folie werden die Chips getrennt und können durch einen Greifer entnommen werden.



Verschließen des Chip-Gehäuses durch Deckel

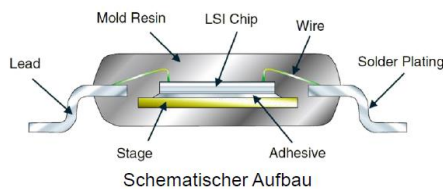
Kontaktieren der Pads von Chip und Gehäuse durch Draht-Bonden

Einlegen und Befestigen des Chips im Gehäuse => Die-Bonden

Leere Chipgehäuse werden bereitgestellt

Kunststoffgehäuse

Plastic Packages, Post-molded Packages



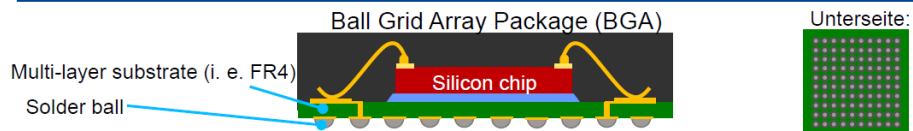
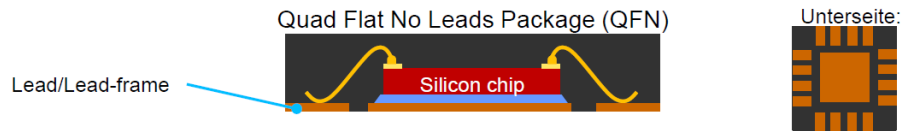
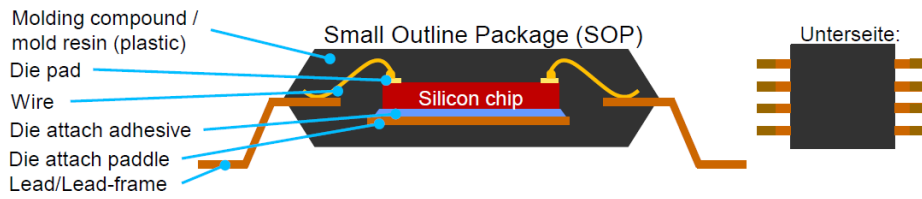
Schematischer Aufbau



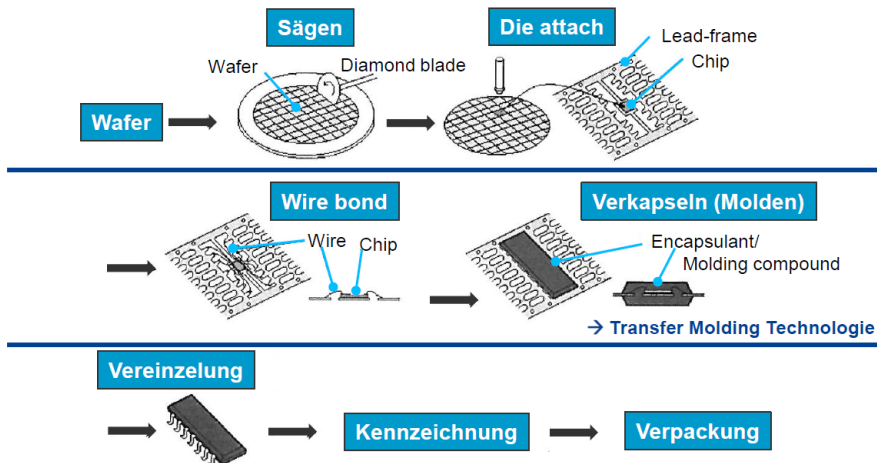
Das Si-Chip wird mit der "Die-Bond"-Technik auf dem Leadframe befestigt. Die Anschlussflächen des Chip werden mittels Draht-Bond-Technik mit dem Leadframe verbunden. Danach wird das Leadframe inklusive Chip mittels Transfer-Moulding mit Epoxidharz vergossen.

Leadframe Materialien	Ausdehnungskoeffizient [10 ⁻⁶ /K]	Therm. Leitfähigkeit [W/m/K]	Anschlussflächen für Bonddrähte
Kovar (Fe54 Ni29 Co17)	5.1	17.5	Au, Ni, Ag
Alloy42 (Fe58, Ni42)	5.3	15.1	Au, Ni, Ag
Cu	16.8	395	Ni/Au, Co, Au

Aufbau von SMD Plastic-Packages im Querschnitt

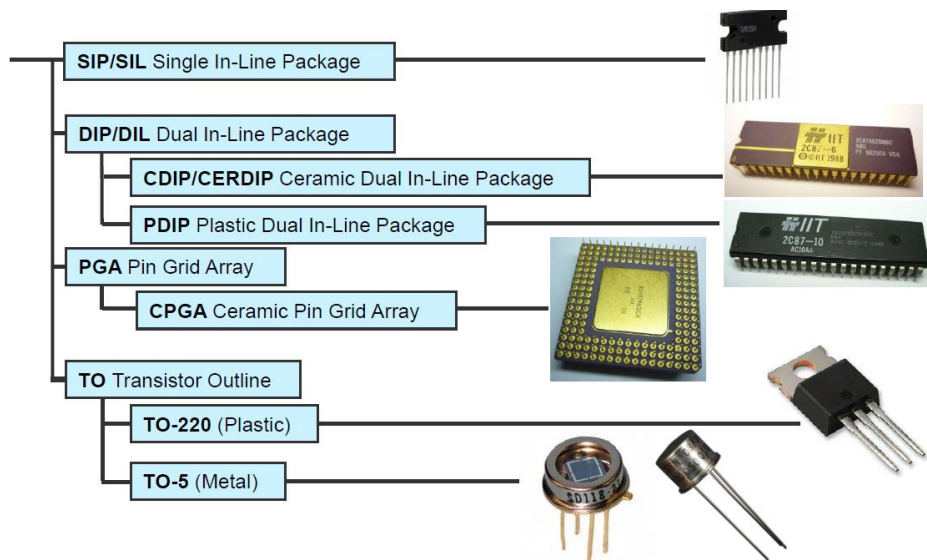


Herstellprozess eines Plastic Packages

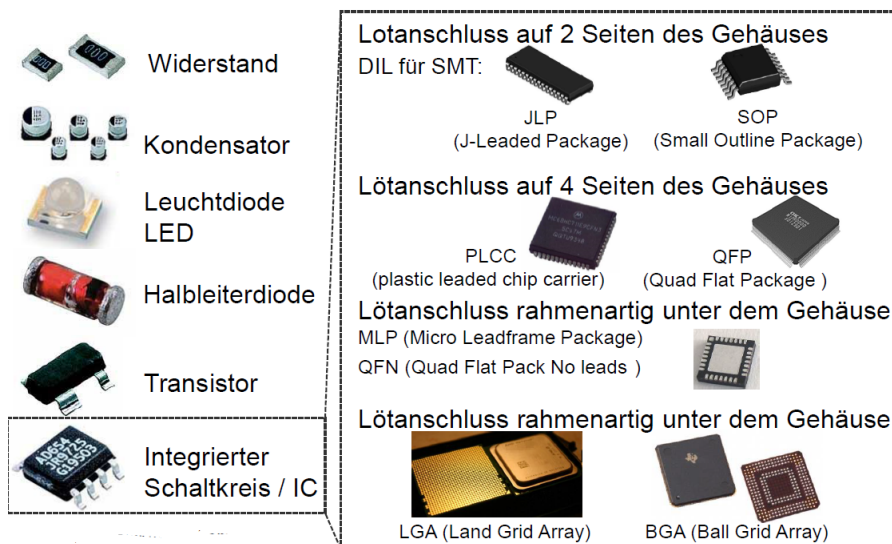


5.3 Gehäusebauformen

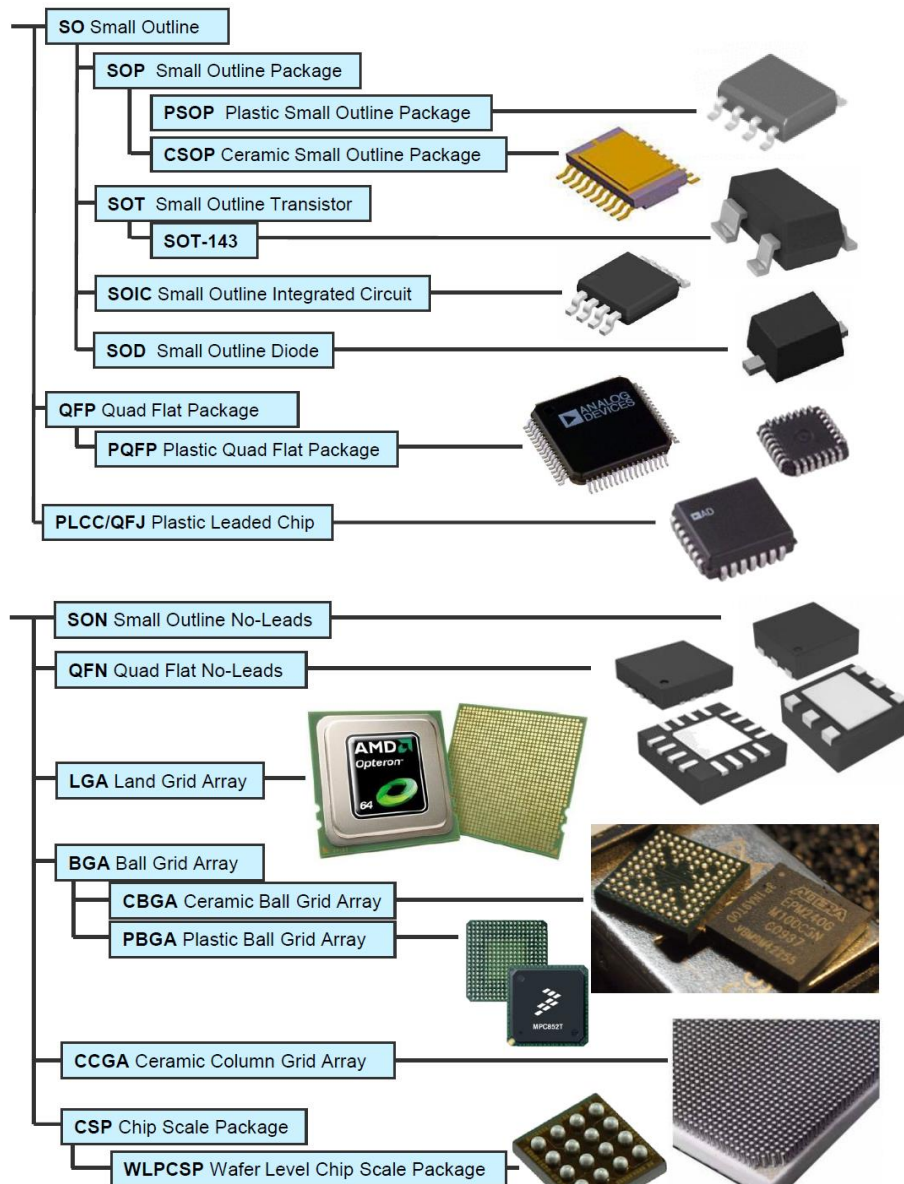
Through Hole Packages



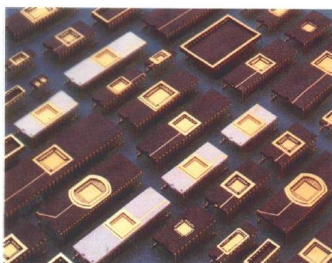
Übersicht über SMD-Bauelemente



Surface Mount Packages



Dual-In-Line Gehäuse (DIL-Gehäuse) für THT-Montage



Keramische Dual-In-Line Gehäuse

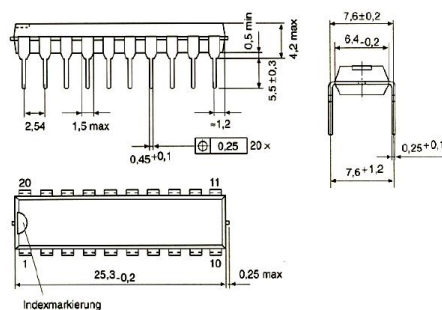
Gängige Typen:

DIL 4... DIL 48 (4 -48 Pins)

Unterschiedliche Ausführungen:

Cavity (Größe, up, down,...)

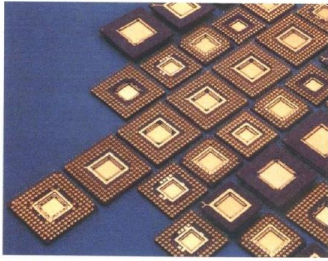
Deckelanschluss,...



Übersicht über die Maße bei Kunststoff-DIPs (Raster der Pins: 2,54 mm)

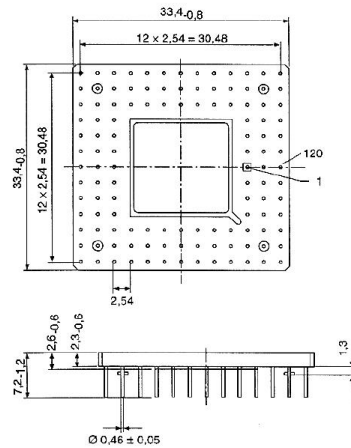
Ausführung in Keramik, Kunststoff

Pin Grid Arrays (PGA-Gehäuse) für die THT-Montage



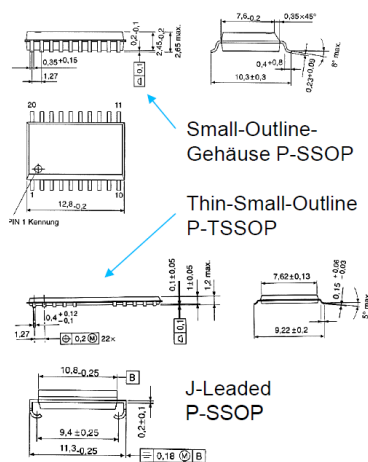
Keramische PGAs

Raster der Pins: 2,54 mm
Unterschiedliche Ausführungen
Cavity (Größe, up, down,...)
Bis zu einigen hundert Pins (500)



Maßübersicht bei keramischen PGAs

Plastik Small Outline DIL-Gehäuse für die SMT



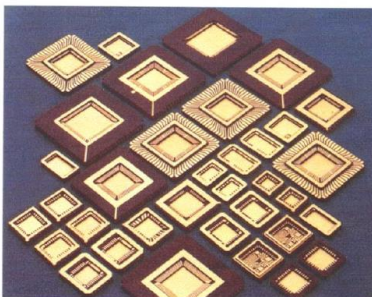
Beinchen Mittenabstand in mm

Gehäuse breite [mm] Gehäuselänge → in mm

	3.00	5.00	6.20	6.50	7.20	7.80	8.20	9.70	10.20	11.50	12.50	12.60	14.00	17.00
4.4 ± 0.1	8	16	20	24	28									
6.12 ± 0.1		32	36	48	36									
8.0 ± 0.1					24	28	32	36	48					
5.3 ± 0.3						28	36	48	56	64				

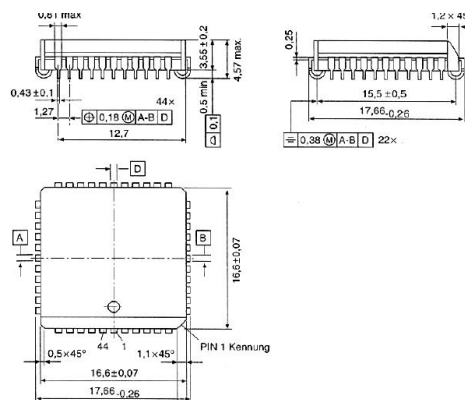
JEDEC Standard für P-SSOP/P-TSSOP
(Joint Electron Device Engineering Council)
SSOP: Shrink Small Outline Package

Chip-Carrier für die SMT



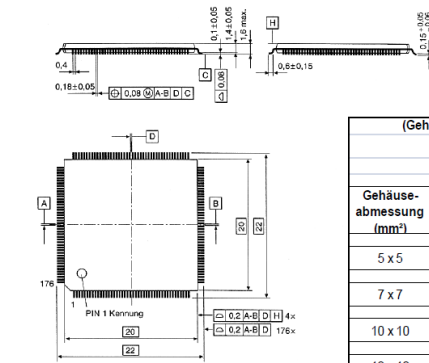
- Keramische Chip-Carrier (CC)

Verschiedene Ausführungen:
Leadless Ceramic Chip Carrier (LCCC)
Ceramic Leaded Chip Carrier (CLCC)



- Plastic Leaded Chip Carrier (PLCC)
Pin-Raster: 1,27 mm

Plastic Thin Quad Flat Packs (PTFP) für die SMT



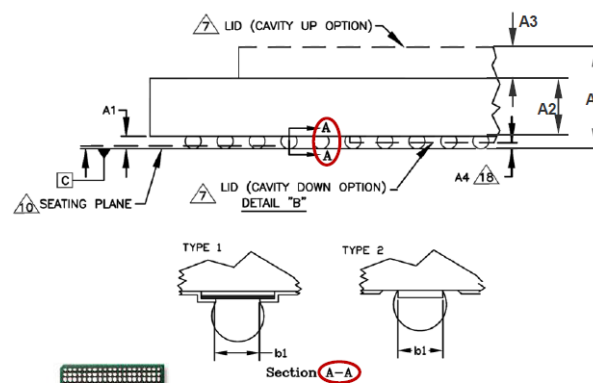
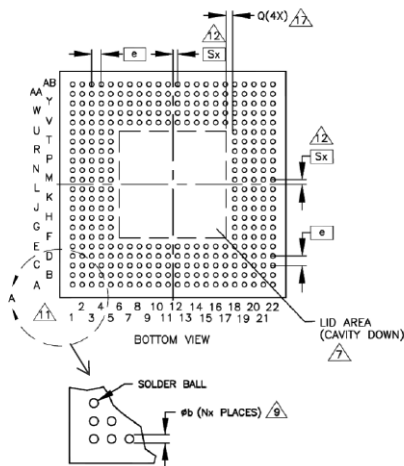
Maßübersicht PTFP

A	max. Gehäusehöhe	1,2 & 1,6
A1	Abstand Gehäuseunterseite zu FBG	0,05 - 0,15
A2	Gehäusedicke	1,0 & 1,4
L1	max. Beinchenlänge	1,0
L1	Beinchenlänge (flacher Teil)	0,6 ± 0,15
c	max. Beinchendicke	0,09 - 0,02
b	Beinchenbreite (e = 1)	0,5
b	Beinchenbreite (e = 0,8)	0,45
b	Beinchenbreite (e = 0,65)	0,38
b	Beinchenbreite (e = 0,4)	0,27

JEDEC und EIAJ Standards für P-TQFP

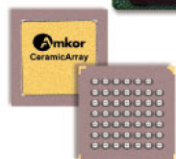
(Gehäusedicke 1,4 mm und 1,0 mm)										Jedec										EIAJ	
Beinchen Mittenabstand (e) in mm:										1,0	0,8	0,65	0,5	0,4	0,3						
Gehäuseabmessung (mm ²)	Anzahl der Anschlüsse →										JEDEC MO-136 (09/93)										
	32	36	40	44	48	52	56	64	80	100	112	120	128	144	160	176	208	216	256	304	360
5 x 5																					
7 x 7																					
10 x 10																					
12 x 12																					
14 x 14																					
20 x 20																					
24 x 24																					
28 x 28																					
14 x 20																					

Ball Grid Array (BGA)



Unterschiedliche Ausführungen:

- Plastic Ball Grid Array (PBGA)
- Ceramic Ball Grid Array (CBGA)



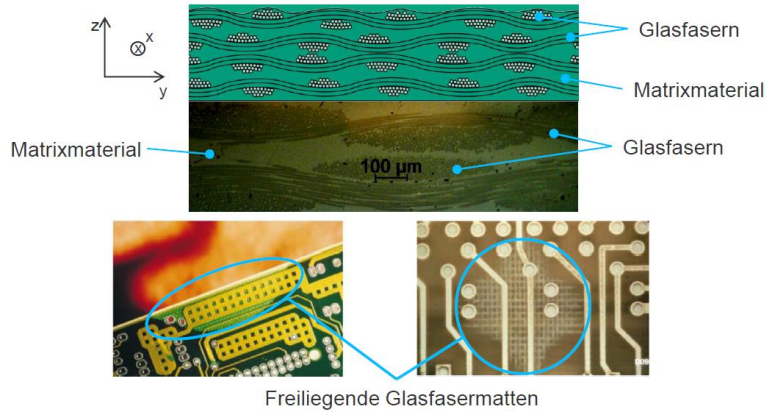
DIMENSION	e = 1.00			e = 1.27			e = 1.50		
	MIN	NOM	MAX	MIN	NOM	MAX	MIN	NOM	MAX
A	—	—	5.50	—	—	5.50	—	—	5.50
A1	0.30	—	—	0.35	—	—	0.35	—	—
A2	0.25	—	3.00	0.25	—	3.00	0.25	—	3.00
A3	—	—	3.50	—	—	3.50	—	—	3.50
A4	0.10	—	—	0.10	—	—	0.10	—	—
b	0.50	0.60	0.70	0.60	0.75	0.90	0.60	0.75	0.90
Q	0.25	—	—	0.25	—	—	0.25	—	—
b1	The diameter of the solderable surface defined by an opening in the solder resist layer (Type 1) or diameter of a metallized pad (Type 2)						b nom	b1 min type 1	b1 min type 2
							0.75	0.55	.060
							0.60	0.45	.050

6. Substrate und Systemträger

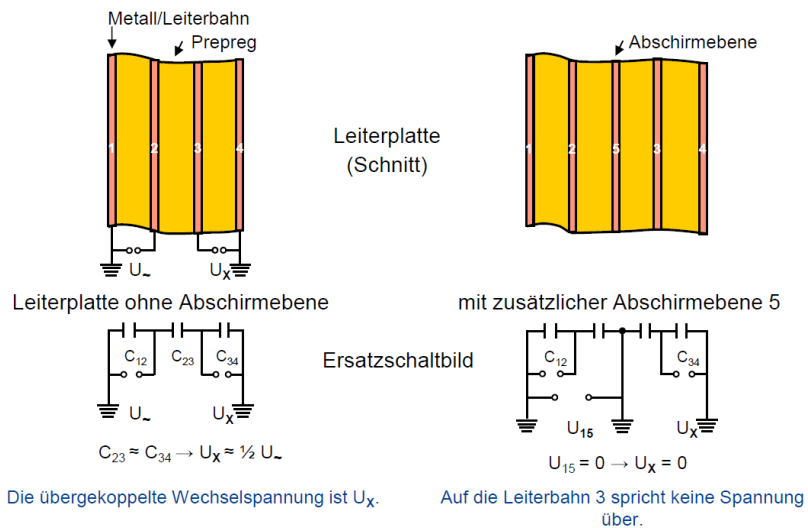
6.1 Standardleiterplatten

Aufbau eines Leiterplattenprepregs

Ein Leiterplattenprepreg ist ein Faserverbundwerkstoff bestehend aus in Epoxydharz getränkten Glasfasermatten.

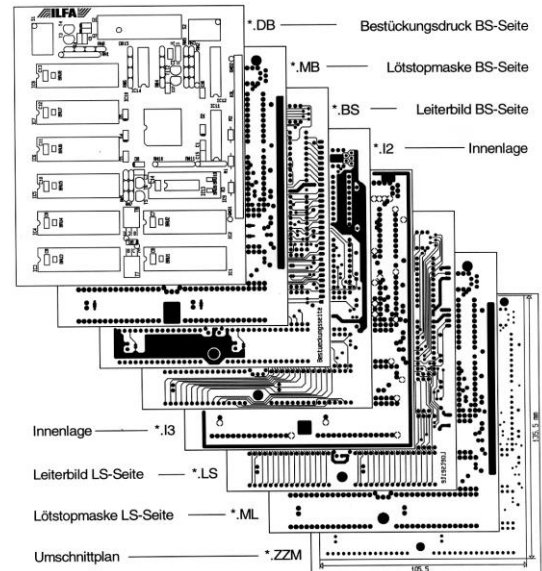


Prinzip des kapazitiven Übersprechens und der Abschirmebene



Aufbau einer 4-Lagen Leiterplatte

- Einseitige Bestückung mit THT-Bauteilen
- Für den Aufbau der 4-lagigen Leiterplatte sind insgesamt 8 strukturierte Ebenen zu konstruieren!
- In diesem Beispiel dient „I3“ ausschließlich zur Schirmung; „I2“ dient zur Signalführung und zur Schirmung
- „Schwarze“ Symbole können je nach Lage die Struktur oder das Komplement der Struktur bedeuten!



Anisotropie der mechanischen und thermischen Eigenschaften

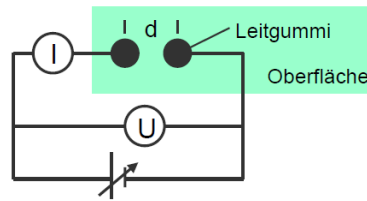
Hersteller	Typ	Material	Klasse	Richtung	T _G DSC [°C]	CTE (T < T _G) TMA [ppm/K]	CTE (T > T _G) TMA [ppm/K]	Biegefestigkeit [N/mm²]
Technolam	NP-140	Glas / Epoxid	FR4	x,y	135-145	15-18	16	480, 415
				z		50-70	270-300	
Technolam	NP-175	Glas / Epoxid	FR4	x,y	165-175	15-18	16	480, 415
				z		40-60	270-300	
Technolam	NP-180	Glas / Epoxid	FR5	x,y	170-180	15-18	11-14	480, 415
				z		40-60	200-300	
Isola	IS410	Glas / Epoxid	FR4	x,y	170-180	17, 13	15, 6	592, 534
				z		55	217	
Isola	IS500	Glas / Epoxid	FR4	x,y	150	40, 12	13, 5	600, 500
				z		55	230	
Isola	IS620i	Glas / Epoxid	FR6	x,y	220	15, 12	13, 5	460, 340
				z		55	230	
Isola	P96	Polyimid		x,y	260	13, 16	n/a	
				z		60	n/a	
Rogers	RO3006 / RO3010	PTFE		x,y	288	17	n/a	
				z		24	n/a	

Wichtige Eigenschaften der Leiterplattenmaterialien

	Epoxidharz FR 4	Epoxidharz FR5	Polyimid	PTFE/Teflon
Oberflächenwiderstand [Ω]	10 ¹²	10 ¹³	4 x 10 ¹³	4.5 x 10 ¹³
Durchgangswiderstand [Ωcm]	10 ¹²	10 ¹⁴	5 x 10 ¹²	1.2 x 10 ¹⁵
Durchbruchfeldstärke [kV/cm]	40	40	40	> 45
Dielektrizitätskonstante	4.0 – 4.7	4.5 – 5.1	3.5 – 4.0	2.2
Dielektrischer Verlustfaktor [tan δ (1 MHz)]	0.025	0.025	0.01	0.003 (10 GHz)
Maximale Einsatztemperatur [°C]	120	155	230	260
Glasumwandlungstemperatur [°C]	120 – 140	160 – 170	260	-----
Kupferhaftung [N/mm]	1.4	1.8	1.2	1.4
Brennbarkeit	V0	V0	V0	V0
Wasseraufnahme [%]	< 0.25	< 1	2.8	0.02
Biegefestigkeit [N/mm²]	400	480	biegeschlaff	90
Therm. Ausdehnungskoeff. [ppm/K]	17	15	30	11-21

Oberflächenwiderstand

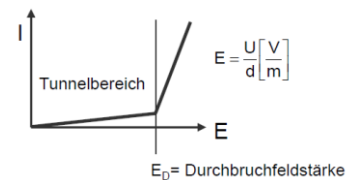
- Bestimmung des Oberflächenwiderstands: Oberfläche eines Isolators wird mit zwei Leitgummiklötzen kontaktiert



- Der Oberflächenwiderstand ist abhängig von:
 - relative Luftfeuchtigkeit
 - Struktur des Isolierstoffes
 - Verunreinigungen oder Zersetzungsprodukte auf der Oberfläche
 - Elektrodenform und -anordnung

Durchbruchfeldstärke

- Wird das angelegte E-Feld zu groß, so können die Ladungsträger so viel Energie aufnehmen, dass es lokal zu einer Ionisation der gebundenen Ladungen kommt, die sich lawinenartig verstärkt. Die nun freien Ladungsträger erzeugen einen Stromfluss (Durchbruch). Im Durchbruch nimmt der Stromfluss schlagartig zu.



- Oberhalb der Durchbruchfeldstärke lösen thermische oder durch Höhenstrahlung generierte Ladungsträger eine Ionisationslawine aus!

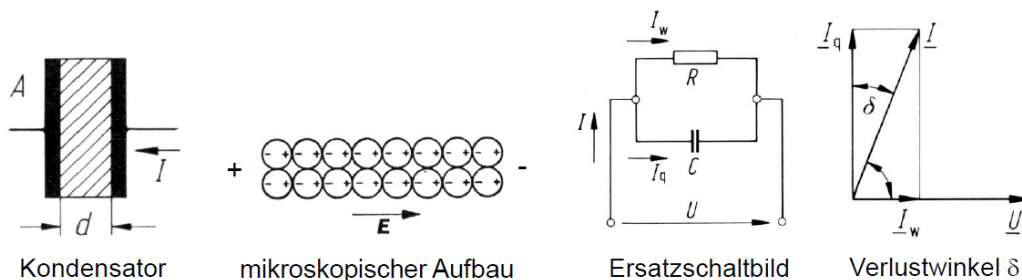
Dielektrischer Verlustfaktor

Im realen Isolator existiert eine geringe Anzahl von freien Ladungsträgern, d.h. der Durchgangswiderstand ist hoch und es fließt ein geringer Strom beim Anlegen einer Gleichspannung ($I=U/R$), der zu Verlustwärme führt. Außerdem ist im Wechselfeld für die Umpolung der mikroskopischen Dipole eine Energie aufzubringen, die ebenfalls als dielektrische Verlustenergie in Wärme umgewandelt wird. Daher verhält sich ein realer Kondensator wie ein idealer Kondensator mit einem parallel geschalteten Widerstand.

Dielektrischer Verlustfaktor $\tan \delta$:

$$\tan \delta = \frac{I_w}{I_q}$$

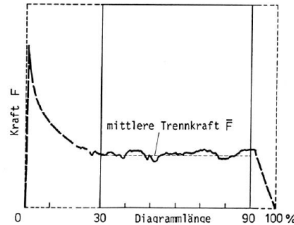
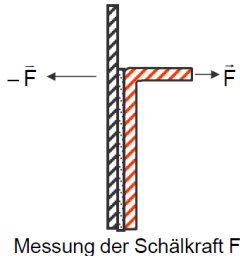
I_w beschreibt den Strom der zur Erwärmung führt und I_q den Verschiebungsstrom zum Laden des Kondensators.



Schälfestigkeit/Schältest

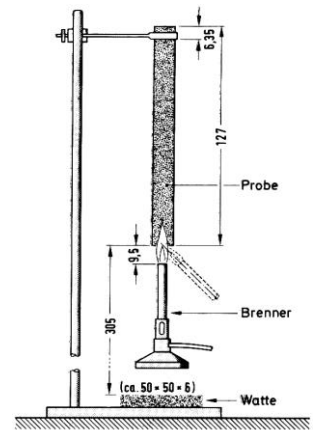
DIN IEC 326 Teil 3

- Messung der benötigten Kraft zur Schälung von Filmen / Schichten (z.B. Kaschierungen von Leiterplatten, Metallisierungen von Kunststoffen)
- Abzugskraft muss senkrecht zu Oberfläche wirken
- Ergebnis auf Einheitsbreite skalieren (z.B. 100 mm)
- Anforderung für Leiterplatten: mind. 1.2 N/mm



Brennbarkeitsprüfung nach UL-Vorschrift 94

- Probekörper: $127 \cdot 12,7 \cdot x \text{ (12,7) mm}^3$
Prüfung von 2 Sätzen mit mindestens 5 Probekörpern
- Vorbehandlung: 48h bei Normklima (1. Probensatz)
168h bei 70°C danach 4h im Exsikator auf Raumtemperatur (2. Probensatz)
- Prüfung: Zwei Beflammungen je 10 s am unteren Ende.
Zweite Beflammung erfolgt sobald Probe erloschen.



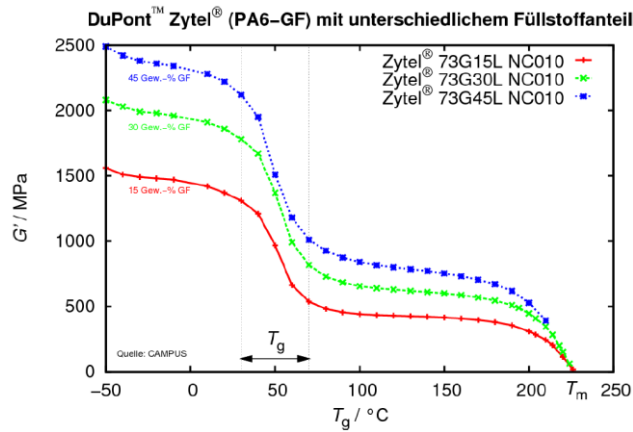
Einstufung der Brennbarkeit nach UL-Vorschrift 94

	Nachbrennen nach Beflammung	Mittlere Nachbrennzeit (5 Proben)	Brennendes Abtropfen	Vollständiges Abbrennen	Nachglühen
94 V – 0	< 10 s	< 5 s	Kein	Kein	< 30 s
94 V – 1	< 30 s	< 25 s	Kein	Kein	< 60 s
94 V – 2	< 30 s	< 25 s	Ja (zünden der Watte)	Kein	< 60 s

Problematik

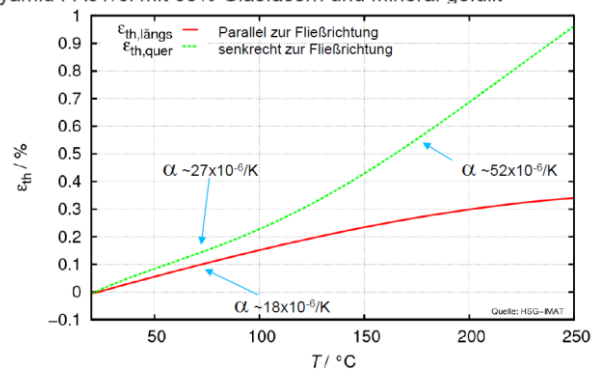
- Vorbehandlung: z.B. nimmt Polyamid Wasser auf
- Geometrie: kleine Größen brennen leichter

Mechanische Festigkeit



Thermische Ausdehnung

Optimierter Hochtemperaturthermoplast: EMS Grivory XE 3844
Polyamid PA6T/6I mit 65% Glasfasern und Mineral gefüllt



Flexible und starrflexible Leiterplatten

Basismaterial:

- Polyesterfolie
- Polyimidfolie (kleberhaltig/kleberlos)

Vorteile:

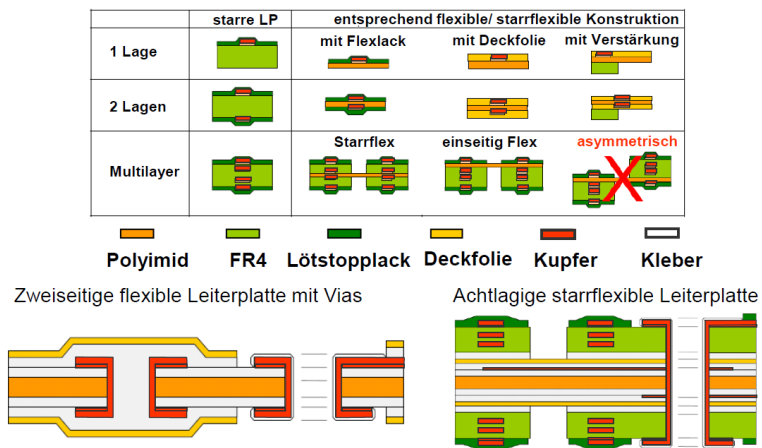
- Miniaturisierung
- Gewichtsreduktion
- Höhere Zuverlässigkeit

Anwendungen:

- Medizintechnik
- Luft- und Raumfahrttechnik
- Meßtechnik/ Regeltechnik
- EDV
- Automotive
- Audio-/ Video-Technik



Prinzipielle Aufbaumöglichkeiten von flexiblen / starrflexiblen Leiterplatten



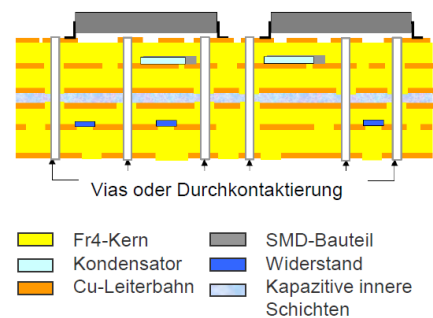
Einbettung aktiver und passiver Bauelemente in mehrlagige Leiterplatten

Der Trend in der Elektronikindustrie geht zu immer kleineren und leistungsfähigeren Produkten. Platzeinsparungen lassen sich durch die Miniaturisierung der Bauelemente erreichen. Bei passiven Bauelementen scheint eine Größenreduktion nur bis auf $0,4 \times 0,2 \text{ mm}^2$ rentabel.

Lösung: Integration von aktiven und passiven Bauelementen in der Leiterplatte.

Vorteile:

- Platzersparnis an der Oberfläche der Leiterplatte
- Geringere Bestückungskosten
- Gesteigerte Ausfallsicherheit auf Grund der Reduktion der Anzahl der Lötverbindungen
- Verbesserte Signalintegrität



6.2 Designregeln am Beispiel Leiterplatte

Entwicklungsablauf bei ICs und Silizium MEMS Chips

Nr.	Entwicklungsschritt	Zweck	Bemerkung
1	Lastenheft / Pflichtenheft	Genaue Festlegung der Anforderungen an BE	
2	Chip-Design	Entwurf, Simulation und Verifikation des BE	Designregeln beachten, CAD+Simulations-Tools
3	Art-Work	Erstellung der Maskendaten	(Designregeln beachten)
4	Maskenherstellung	Herstellung der Lithographie-Masken	
5	Waferherstellung (1st silicon)	Herstellung der Silizium-Wafer mit Maskensatz	
6	Chip Packaging	Aufbau des Chip im Gehäuse	(Designregeln beachten)
7	Funktionstest	Verifikation der Funktion des BE	
8	Chip-Redesign	Überarbeitung des Designs einschl. Verifikation	
9	Chip-Herstellung (2nd silicon)	Ablauf wie Schritte 3-6	
10	Funktionstest	Verifikation der Funktion des BE (Prototyp)	
11	Qualifikation	Überprüfung der BE Zuverlässigkeit	
12	Validierung / Feldtest	Überprüfung der Erfüllung der Kundenwünsche	Freigabe zur Serie
13	Serienprodukt	Serienproduktion	

Der Ablauf ist für ASICs und Silizium-Mikro-Chips ähnlich. Die Designregeln legen alle Daten fest, die bei dem Chip-Design und Artwork berücksichtigt und eingehalten werden müssen. Jeder Chip- und Masken-Hersteller hat seine eigenen für ihn spezifischen Designregeln.

Entwicklungsablauf bei Mikrosystemen

Nr.	Entwicklungsschritt	Zweck	Bemerkung
1	Lastenheft / Pflichtenheft	Genaue Festlegung der Anforderungen ans System	
2	System-Konzeption	Konzeption der Architektur und Fertigungstechnologie (Gehäuse, Substrate, Bauelemente, Fertigungstechnik, Dienstleister...)	
3	System-Design/Konstruktion	Entwurf, Simulation und Verifikation des Systems und der Komponenten; für Si Chips erfolgt der entsprechende Ablauf (s.o.)	Designregeln beachten, CAD+Simulations-Tools
4	Fertigungstechnik festlegen	Fertigungstechnik für alle Komponenten und für die System-Montage festlegen	
5	CAM-Daten	Daten für die Herstellung oder Beschaffung aller Komponenten generieren	CAM-Regeln beachten
6	Fertigungstechnik einrichten	Fertigungstechnik für Komponenten und System-Montage einrichten (Werkzeuge, Versuche,...)	
7	Komponenten bereitstellen	Komponenten beschaffen, anfertigen, Testen	
8	Prototypen anfertigen	Systemkomponenten zu Prototypen montieren	
9	Funktionstest	Verifikation der Funktion des Systems	
10	System-Redesign	Überarbeitung des Systems Ablauf wie Schritte 3-8	
11	Qualifikation	Überprüfung der System-Zuverlässigkeit	
12	Validierung/Feldtest	Überprüfung der Erfüllung der Kundenwünsche	Freigabe Serie
13	Serienprodukt	Serienproduktion	

Der Entwicklungsablauf für Mikrosysteme ist ähnlich zum Ablauf bei Leiterplatten-Baugruppen. Jeder Komponentenhersteller hat seine eigenen für ihn spezifischen Design- und CAM-Regeln.

Aufgabe von Designregeln

- Designregeln beschreiben die Schnittstellen zwischen den einzelnen Entwicklungs- und Fertigungsbereichen bei Halbleiter-Chips (ICs, MEMS, ...), Elektronischen Systemen (Leiterplatten-Baugruppen, Keramik-Baugruppen, ...) und Mikrosystemen.
- Jeder Hersteller hat für jeden Fertigungsprozess einen Satz von Designregeln, die er dem Entwickler zur Verfügung stellt.
- Designregeln beinhalten alle wichtigen Angaben und Daten, die bei Entwurf/Konstruktion des Chips oder Systems berücksichtigt werden müssen (maximale und minimale Abmessungen, Leistungsdaten, Toleranzen, Materialien, ...).
- Die Einhaltung/Berücksichtigung der Designregeln stellt sicher, dass das entworfene/konstruierte System mit dem gewählten Fertigungsprozess mit „guter“ Ausbeute produziert werden kann.
- Die Einhaltung/Berücksichtigung der Designregeln stellt sicher, dass das gefertigte System eine „gute“ Zuverlässigkeit hat.
- Allerdings stellt die Einhaltung/Berücksichtigung der Designregeln nicht zwangsläufig sicher, dass ein richtig produziertes und zuverlässiges System auch tatsächlich die gewünschte Funktion/Leistung hat. Dies ist die Aufgabe des Systementwicklers.

Zwischen folgenden Parteien/Bereichen gibt es Design- und CAM-Regeln

IC/MEMS Entwickler	AMD, ic+Haus, intel, BOSCH, SIEMENS, iis chips, TEXAS INSTRUMENTS, ...
Maskenhersteller	ADVANCED MASK, TECHNOLOGY CENTER, ...
IC/MEMS Hersteller	AMD, SIEMENS, Infineon, TEXAS INSTRUMENTS, BOSCH, ...
Packaging	Amkor technology, MST, Micro Systems Technologies, mpa, ...
Leiterplatten Entwickler	WE, AT&S, SCHWEIZER ELECTRONIC, ...
Leiterplatten Hersteller	WE, AT&S, SCHWEIZER ELECTRONIC, ...
Leiterplatten-Bestücker	AT&S, RAFI, SOLUTIONS WITH PASSION, ...

Ein- und doppelseitige Leiterplatten

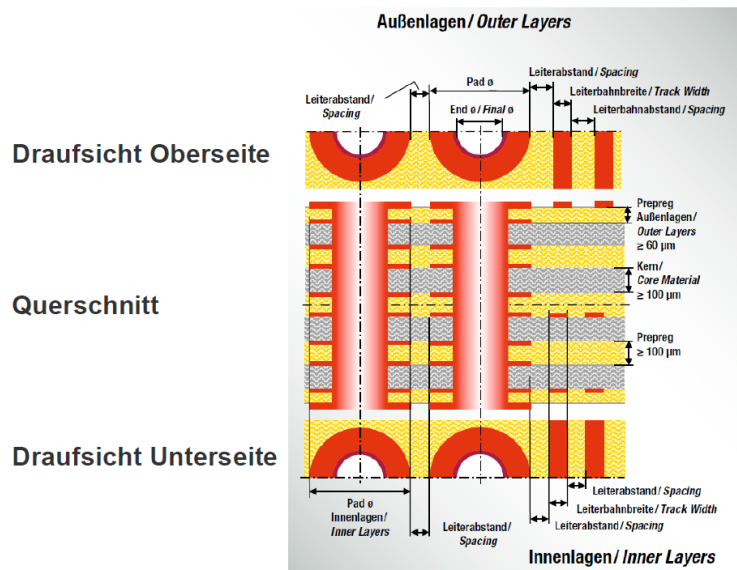
Fertigung nach Standardparametern: Ihr direkter Nutzen

- Zeit- und Kosteneinsparung durch verkürzten Design- und Arbeitsvorbereitungsaufwand
- Yield Optimierung auf beiden Seiten
- Klare und eindeutige Kommunikation
- Stabiler Übergang vom Prototyp zur Serienfertigung

HAL: Hot Air Leveling
• Eintauchen der Leiterplatte in heißes Zinnbad.

Merkmale	Werte
max. Leiterplattengröße	570 x 500 mm
Leiterplattendicke	max. 2,4 mm min. 0,6 mm
Kupferkaschierungen (Basiskupfer)	18 µm, 35 µm, 70 µm, 105 µm
Material	FR4 (TG 135, TG 150, TG 170)
Oberflächen	HAL, HAL bleifrei, chemisch Nickel-Gold, chemisch Zinn, chemisch Silber
min. Werkzeugdurchmesser	0,25 mm
min. Leiterbahnbreite- und abstand	100/100 µm
Aspect Ratio (Bohrdurchmesser : Leitplattendicke)	1 : 8

Basic Design Rules



Leiterbahnbreite und Leiterabstände / Track Width and Conductor Spacing Außenlagen / Outer Layers

Kupferend- schichtdicke / Final Copper Thickness	Leiterbahn- breite / Track Width	Leiter- abstand / Spacing
ca. 50 μm > 33.4 μm (IPC-6012)	100 μm	100 μm
70 μm	125 μm	160 μm
105 μm	150 μm	225 μm
ca. 25-30 μm ¹⁾	75 μm ¹⁾	75 μm ¹⁾

1) Erhöhte Anforderung. Aus Kostengründen nur empfohlen, wo unbedingt erforderlich.

Leiterbahnbreite und Leiterabstände / Track Width and Conductor Spacing Innenlagen / Inner Layers

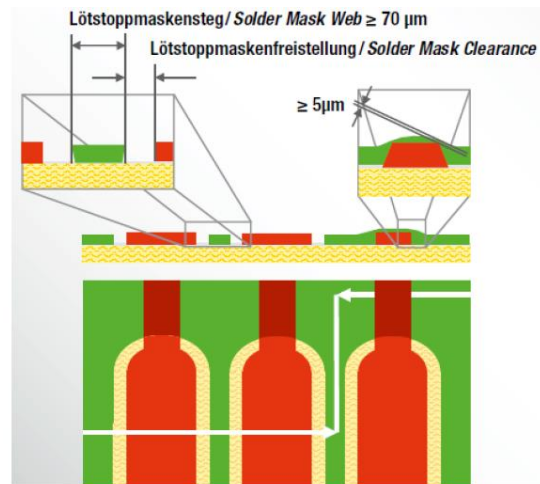
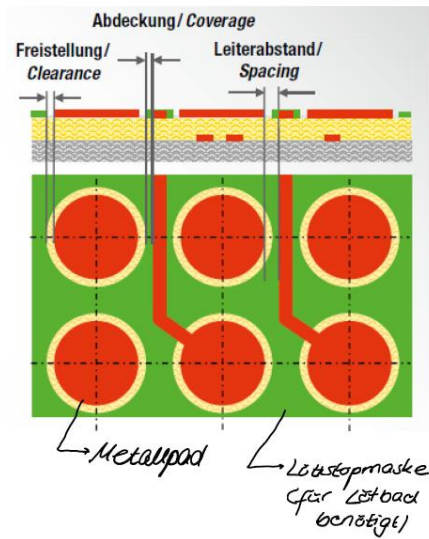
Kupferend- schichtdicke / Final Copper Thickness	Leiterbahn- breite / Track Width	Leiter- abstand / Spacing
17.5 μm / ½ oz/ft²	100 μm 75 μm ¹⁾	100 μm 75 μm ¹⁾
35 μm / 1 oz/ft²	100 μm	100 μm
70 μm / 2 oz/ft²	125 μm	150 μm
105 μm / 3 oz/ft²	175 μm	225 μm

Durchgehende Vias / Plated Through Hole Vias

Padgröße / Pad Size	Anmerkung / Note	Bohrer / Drill Tool	Enddurchmesser / Final Hole Diameter	Toleranz / Tolerance (Standard)
0.60 mm	Standard / Preferred	0.35 mm	0.25 mm	+0.10 / -0.05 mm
0.55 mm		0.30 mm	0.20 mm	
0.50 mm (Cu max. 35 μm)	max. ca. 12 Lagen / Layers max. ca. 1.80 mm LP-Dicke / Board Thickness	0.25 mm	0.15 mm	
0.45 mm (Cu max. 35 μm)	Für weniger komplexe Lagen- aufbauten / For stack-ups with lower complexity	0.25 mm (0.20 mm)	0.15 mm	

Genereller Hinweis: Kleinere Parameter sind in vielen Fällen in Absprache möglich! / General Note: Enhanced design rules

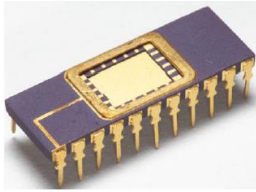
Lötstopmmaske / Solder Mask



Lötstopmmaske / Solder Mask		
	Standard	Advanced
Freistellung / Clearance	$\geq 50 \mu\text{m}$	$35 \mu\text{m}$
Leiterbahn-abdeckung / Coverage	$50 \mu\text{m}$	$40 \mu\text{m}$
Lötstoppmaskensteg / Solder Mask Web	$\geq 70 \mu\text{m}$	

6.3 Keramiksubstrate

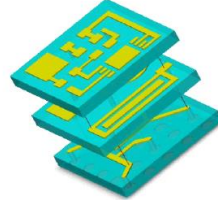
Keramische Gehäuse



Hybridschaltungen



Mehrlagen Keramik-schaltungen



Vorteile von Keramiken:

- Hohe mechanische Festigkeit, günstiger CTE
- Gute bis hohe Wärmeableitung
- Gute HF – Eigenschaften
- Hohe Temperaturbeständigkeit

Einsatzgebiete von Keramiksubstraten / Dickschichttechnik

Branche	Hauptanwendungen
Nachrichtenelektronik	Satelliten, Antennenverstärker, Sender, Fernsprecher
Kfz-Elektronik	Zündschaltungen, Einspritzung, Ölstandskontrolle, ABS, Getriebesteuerung, Airbag, Abstandssensor, Lambdasonde, ...
Luft- und Raumfahrttechnik	Identifizierungssysteme, Primär-Radar, Sekundär-Radar, Nachtsichtgeräte, Laser-Entfernungs-Messer
Rechentchnik	CPU, Hochleistungscomputersysteme
Industrieelektronik	PCB- und IC-Tester, speicherprogrammierbare Anlagensteuerungen, Motorsteuerungen, Tomographie, Sonographie, Dispenser

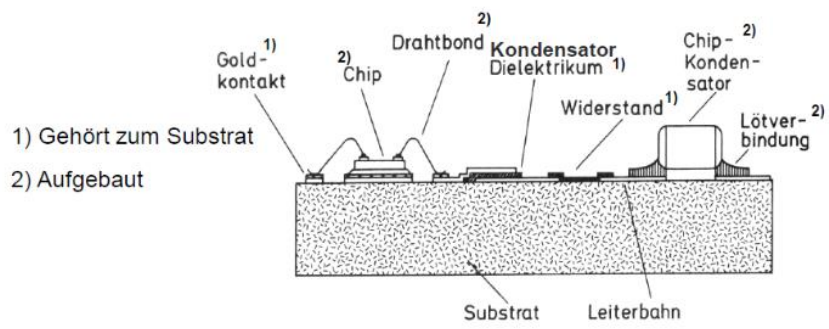
Keramiksaltungen werden aus Kostengründen kontinuierlich durch hochwertige Leiterplatten (FR 6) ersetzt.

Dickschicht- und Hybridschaltungen

Definition nach DIN: „Integrierte Schichtschaltungen, bei denen die Schichten im Siebdruckverfahren auf (keramische) Träger aufgebracht und anschließend eingebrannt werden.“

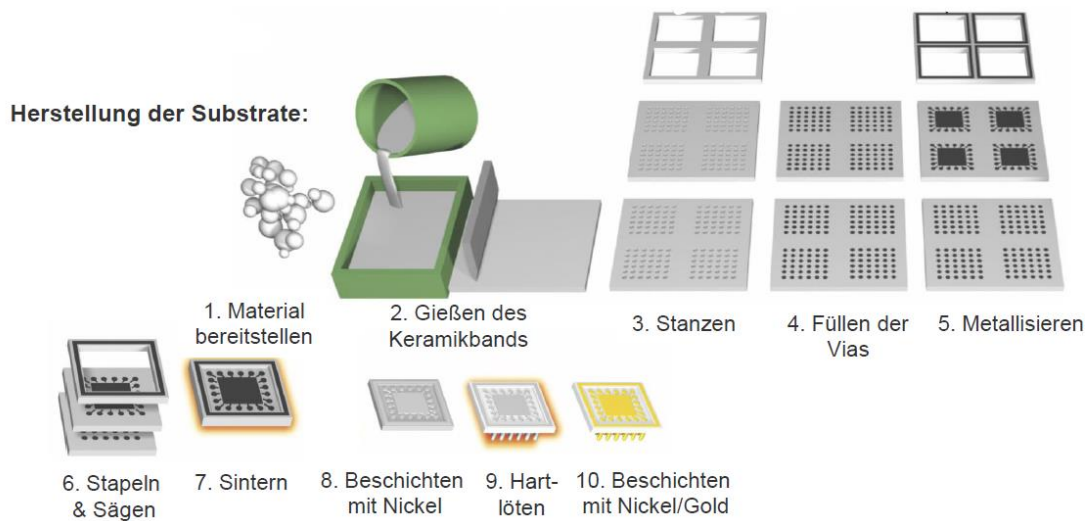
Hauptvorteile (gegenüber Leiterplatten):

- bessere Langzeitstabilität und Zuverlässigkeit
- genauere analoge Schaltungen herstellbar (trimmen, geringe TKs der Widerstände)
- höhere Wärmeleitung des Substrats, höhere thermische Belastbarkeit (Leistungselektronik)
- höhere Grenzfrequenzen (HF - Schaltungen)



Mehrlagenkeramiksubstrate

Bei der Herstellung von Mehrlagenkeramiksubstraten für elektronische Packages werden unterschiedliche Materialien verwendet. Diese lassen sich einteilen in: Keramiken, Metallisierungen, hartgelötete Komponenten und Beschichtungen.



Konstruktionswerkstoffe der Keramiksubstrate

- **Aluminiumoxid** - Al_2O_3 , **H**igh **T**emperature **C**o-fired **C**eramic (HTCC), 1600°C bis 1800°C
 - Ist der am häufigsten verwendete keramische Werkstoff für Mehrlagen Packages (bis zu 70Lagen).
 - Dieser Werkstoff wird seit vielen Jahren verwendet. Seine Eigenschaften sind daher sehr gut charakterisiert.
 - Aluminiumoxid bietet eine hohe Steifigkeit, gute thermische Leitfähigkeit, hermetische Dichtheit, exzellente elektrische Isolationseigenschaften und billige hochdichte Verbindungstechnologie
- **Aluminiumnitrid** - AlN
 - Aufgrund der hohen thermischen Leitfähigkeit (160 W/mK) und des guten CTE-Match mit Silizium wird AlN für Hochtemperaturanwendungen verwendet.
 - Hauptanwendungen sind **M**ulti **C**hip **M**odule (MCM) welche mehrere Metalllagen besitzen (30+ möglich).
- **Low Temperature Co-fired Ceramic** (LTCC), 850°C bis 900°C
 - Gute Hochfrequenzeigenschaften dadurch günstige Alternative zu HF-Leiterplatten
 - Ermöglicht durch niedrige Brenntemperatur den Einsatz von Silber
 - Schlechte Wärmeleitung, dadurch weniger geeignet als Mehrlagensubstrat

Materialeigenschaften von Keramiken

Material		HTCC 92% Al ₂ O ₃	AlN	LTCC CaO, Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , B ₂ O ₃
Farbe		Schwarz/weiß	Durchscheinend grau	
Dichte	[g/cm ³]	3.62	3.26	3.1
Härte	[Kg/mm ²]	1207 (Knoop)	1200 (Knoop)	n/a
Biegefestigkeit	[MPa]	443	280	320
E-Modul	[GPa]	275	340	152
Schubmodul	[GPa]	112	140	n/a
Rauheit	[µm]	< 1.14	< 0.76	n/a
CTE (25-300°C)	[10 ⁻⁶ /K]	6.57	4.00	5.8
Therm. Leitfähigkeit (25°C)	[W/mK]	20.3	160	3
Durchschlagfestigkeit	[kV/mm]	11.6	13.0	>5
Spez. Widerstand	[Ωm]	> 10 ¹⁴	> 10 ¹⁴	> 10 ¹⁴
Dielektrische Konstante (1 MHz)		9.2	8.6	7.8
Dielektrischer Verlustfaktor (10 GHz)		0.003	0.001	0.0045

Funktionswerkstoffe für Keramiksubstrate

Metallisierungen:

- Wolfram, Molybdän bei **HTCC, AlN**
- Silber, Gold, Kupfer bei **LTCC**

Beschichtungen bei HTCC und AlN:

- Nickel, 50 µm bis 300 µm
- Gold (Au), 30 µm bis 100 µm

Hartgelötete Komponenten bei HTCC und AlN:

- Nickel 42 (Ni 42)
Eisen-Nickellegierung (41 bis 43 Gew.% Ni)
Beliebt da guter CTE-Match mit Keramik und billig
- Kovar, Begriff beschreibt Legierung die kleineren CTE als sonstige Metalle haben
Zusammensetzung: z.B. Eisen 54 Gew.%, Nickel 29 Gew.% und Cobalt 17 Gew.%
Beliebt da guter CTE-Match mit Keramik und billig
- Molybdän
- Wolfram Kupfer (WCu)
- Kupferlegierungen

Eigenschaften der Komponenten

Materialeigenschaften der Komponenten

Material	Molybdän	Wolfram Kupfer	Nickel 42	Kovar	Wolfram
Therm. Leitfähigkeit / 25°C [W/mK]	138	170	10.5	16.7	173
CTE / 25°C - 100°C [10-6/K]	5.1	7.1	5.0	5.9	4.5
Spez. Widerstand [Ωcm]	5.2	6.1	72	49	5.5
Spez. Gewicht [g/cm^3]	10.2	16.8	8.1	8.4	19.3

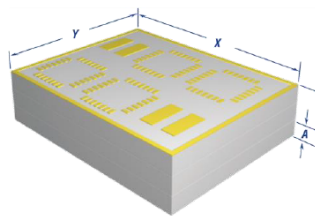
Metallisierungswiderstand

Keramik	Aluminiumoxid	Aluminiumnitrid
Metallisierung	Wolfram	Wolfram-Molybdän
Vergraben	0,012 Ω/sq	0,015 - 0,02 Ω/sq
Oberfläche	0,005 Ω/sq (Au-Beschichtet)	0,005 Ω/sq (Au-Beschichtet)
Vias ($\varnothing = 0.25 \text{ mm}$)	0,003 Ω/sq	---

Auslegung von HTCC-Mehrlagenkeramiksubstraten

Strukturparameter

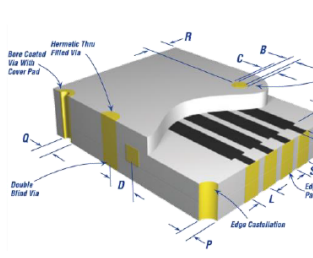
Jedes keramische Material hat aufgrund seiner physikalischen Eigenschaften und seines Herstellungsprozesses spezifische Design- und Toleranzgrenzen. Diese beinhalten Größe, Anzahl der Lagen und Ebenheit.



Struktur	Beschreibung	HTCC Al_2O_3	AlN
Länge/Breite (X/Y)	Toleranz	$\pm 0,13\text{mm}$	$\pm 0,13\text{mm}$
Lagendicke (A)	Standard	0,18 - 0,64mm	0,13mm
	Toleranz	$\pm 10\%$	$\pm 10\%$
Substratdicke (Z)	Bereich	0,25 - 8,89mm	0,09 - 0,38mm
	Toleranz	$\pm 10\%$	$\pm 0,08\text{mm}$
Ebenheit	Standard	0,08mm/mm	0,03mm/mm
Oberflächenfinish	nach Brennen	$< 1,14\mu\text{m}$	n/a
	geläppt	$< 0,51\mu\text{m}$	$< 0,64\mu\text{m}$
	poliert	n/a	$< 0,13\mu\text{m}$

Vertikale elektrische Verbindungen

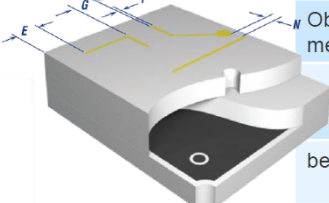
Die Standardverbindung zwischen den Lagen ist ein mit Metall gefülltes Via. Ebenfalls werden beschichtete Bohrlöcher, metallisierte Eckknoten und flache Kantenmetallisierungen verwendet. Generell sollte der Via-Durchmesser gleich der Dicke der Keramiklage sein. Der Pitch zwischen den Vias sollte 2,5 mal der Lagendicke sein.



Struktur	Beschreibung	HTCC Al ₂ O ₃	AlN
Gefülltes Via (B)	Ø Bereich	0,1 - 0,51mm	0,13-0,51mm
(C)	Ø Abdeck-Pad	Via-Ø+0,05mm	Via-Ø+0,05mm
(D)	Pitch Via-zu-Via	min. 0,3mm	min. 0,38mm
(R)	Pitch Via-zu-Kante	0,2mm	0,25mm
Bohrlochmetall. (Q)	Ø im Bereich von	0,3-0,65mm	n/a
(P)	Radius Nut	0,2mm	n/a
Kantenmet. (L)	Pitch	min. 0,64mm	n/a
(J)	Einschnürung	0,13mm	n/a
(K)	Kantenabstand	min. 0,25mm	n/a
(S)	min. Padbreite	0,2mm	n/a

Horizontale elektrische Verbindungen

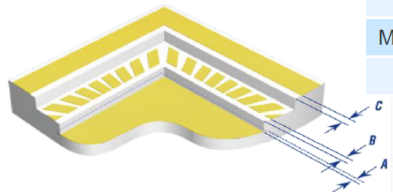
Die Herausforderung beim Layout der Horizontalen Verbindungen ist einen Kompromiss zwischen der Leiterbahnbreite, also dem Minimieren des el. Widerstands, und einem ausreichenden Abstand zwischen den Leiterbahnen (Platzbedarf) zu finden.



Struktur	Beschreibung	HTCC Al ₂ O ₃	AlN
Vergrabene Metallisierung (F)	typ. Breite	0,15-0,25mm	0,15-0,25mm
(G)	typ. Abstand	0,15-0,25mm	0,15-0,25mm
Oberflächenmetallisierung (F)	typ. Breite	0,2mm	0,2mm
(G)	typ. Abstand	0,2mm	0,2mm
(E)	Abstand zu Ecken	0,25mm	0,254mm
bei Vias (N)	Abstand Leiterbahn zu Pad	0,25mm	0,05mm

Kavitäten

Kavitäten werden im ungebrannten Zustand in die Keramik gestanzt. Metallisierungen sollten generell einen gewissen Abstand zu den Ecken der Kavität haben. Wenn der Boden einer Kavität metallisiert werden soll, sollte sich die Metallisierung unter die Wand der Kavität erstrecken, um eine vollständige Abdeckung zu gewährleisten.



Struktur	Beschreibung	HTCC Al ₂ O ₃	AlN
Die Attach Pad (A)	typ. Fortsatz	0,51mm	N/A
	min. Fortsatz	0,25mm	N/A
Schaltungsmuster (B)	typ. Abstand	0,13mm	N/A
	min. Abstand	0,08mm	N/A
Metallisierte Abdichtung (C)	typ. Abstand	0,25mm	N/A
	min. Abstand	0,13mm	N/A

Draht-Bond-Pads

Um Schrumpfungsschwankungen des Substrats während des Brennvorgangs auszugleichen, sollten die Draht-Bond-Pads in einem radialen Muster (ausgehend von der Substratmitte) ausgelegt werden (Bild 1). Für Anwendungen mit hoher Verdrahtungsdichte können die Pads zweireihig um den Die gestaffelt werden (Bild 2). Minimale Padgröße von 0,15 x 0,15 mm² bei einem Pitch von 0,15 mm.

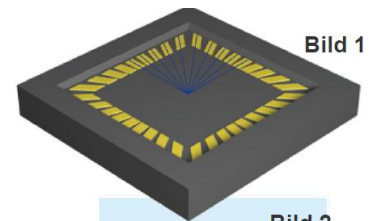


Bild 1

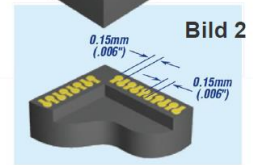
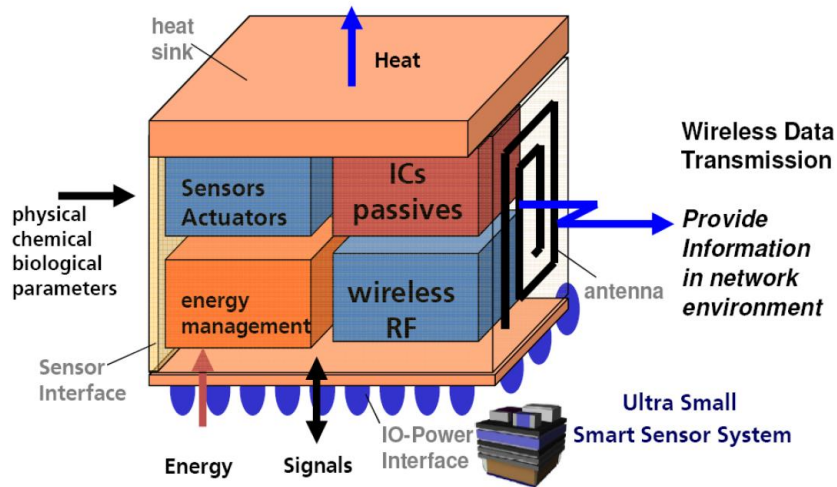


Bild 2

6.4 Aufbauvarianten am Beispiel Herzschrittmacher

siehe auch Kapitel Medizintechnik: Herzschrittmacher

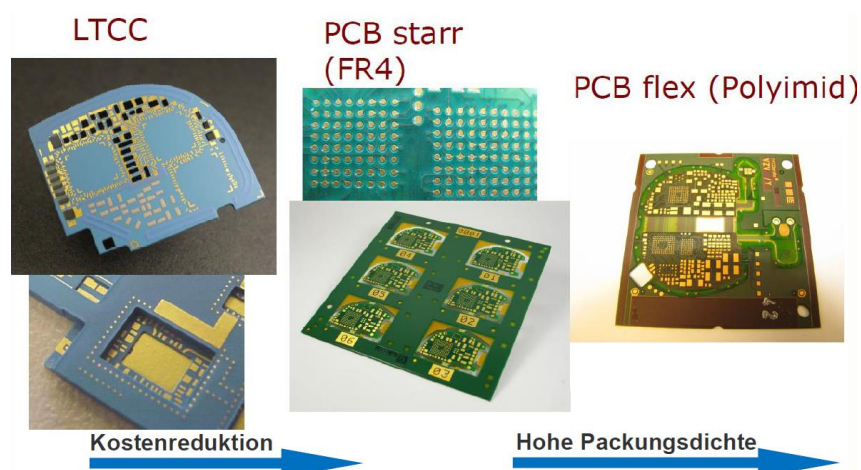
Heterogene System Integration



Technologie des Verdrahtungsträgers

	LTCC	HTCC	PCB FR4	PCB PI
Verdrahtungsdichte	✓✓	✗	✓	✓✓
HF-Performance	✓✓✓	✓	✗	✗
Leiterbahnwiderstand	✓✓	✗	✓✓✓	✓✓✓
3D	✓	✓	✓	✓✓
Feuchtigkeitsaufnahme	✓✓✓	✓✓✓	✓	✗
Kosten	✗	✗	✓✓	✓

Substrate

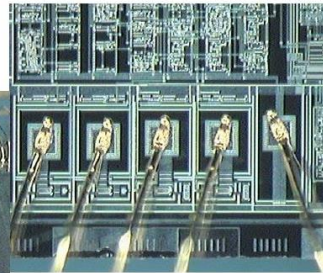
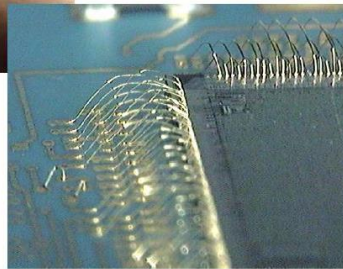
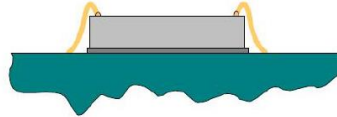
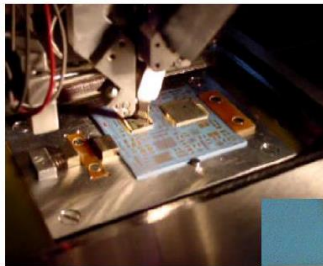
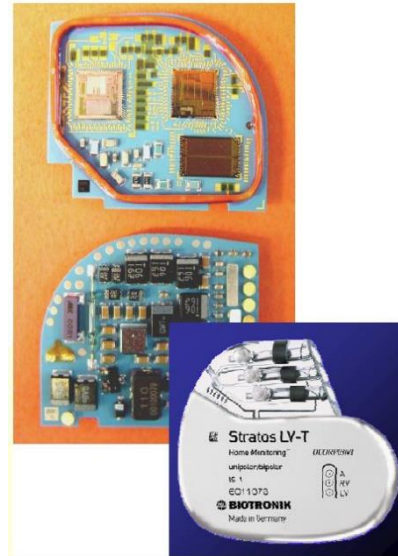


Chip&Wire-Technik

Dreikammer-Schrittmacher mit Home-Monitoring-Funktionalität

Substrat/ Hybrid:

- 6-Lagen LTCC-Substrat auf 4"x4"-Panel
- 7 Verdrahtungsebenen
- Gesamt-Leiterbahnlänge 2,01 m
- 642 vias
- perforierter „D shape“ für Vereinzeln nach Assembly



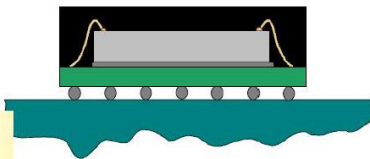
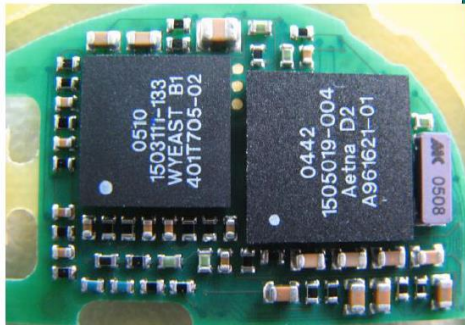
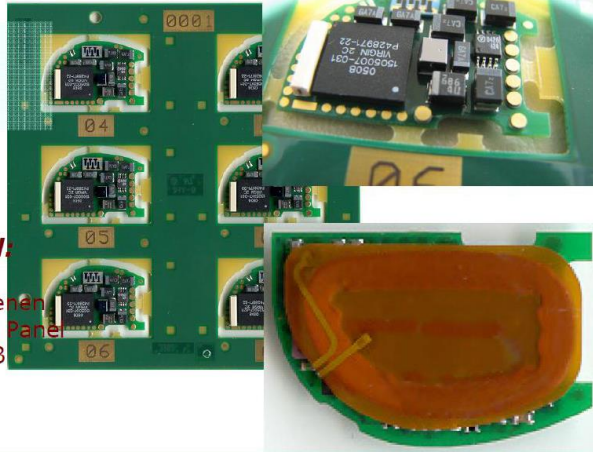
Vorteile	Nachteile
Keine zusätzlichen Packaging-Steps nach Waferherstellung	Höherer Flächenbedarf
Zuverlässige, verbreitete Technologie	Reduzierte HF-Performance
Flexible Funktionskonfiguration durch verschiedene Bondoptionen	Sequentieller (=langsamer) Verbindungsprozess
Flexibilität im Fall von Die-Shrinks	Mechanischer Schutz der Baugruppe erforderlich

μBGA

Zweikammer-Schrittmacher auf FR4 PCB

Substrat/ Modul:

- FR4 Substrat
- 4 Verdrahtungsebenen
- 6 -fach-Nutzen im Panel
- No clean Lötprozeß
- Laservereinzlung

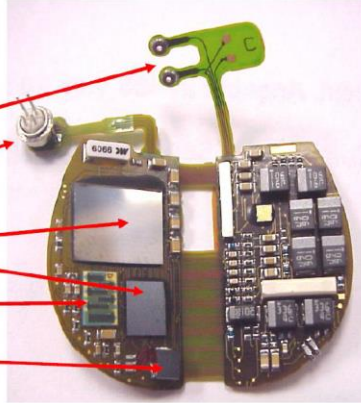


Vorteile	Nachteile
Robustes Package	Zusätzliche Packaging-Schritte (Drahtbonden, Transfurmolden)
Im Standard-SMT-Prozess montierbar	Reduzierte HF-Performance
Paralleler (= schneller) Verbindungsprozess	Beschränkte Verfügbarkeit falls nicht „high volume“
Kompletter elektrischer Test nach Packaging	

Elektronikmodule im System

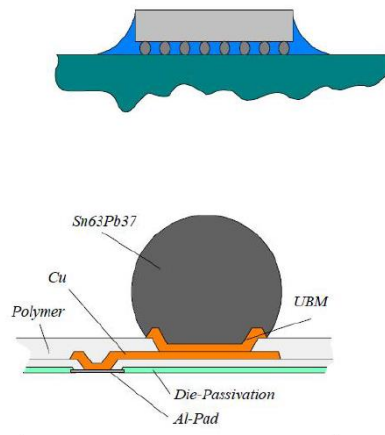
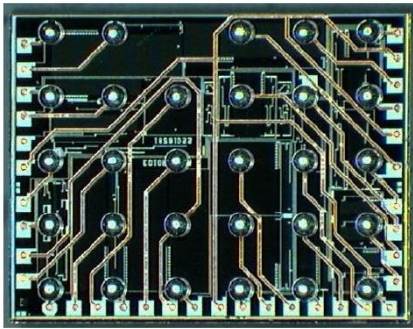
Zweikammer-Schrittmacher
auf Starr-Flex-Substrat

- Flexarm mit Verbindungen zur Batterie
- Flexarm mit gelöteter Durchführung
- Chip Scale Packages
- μ BGA mit Abgleichwiderständen
- Beschleunigungssensor



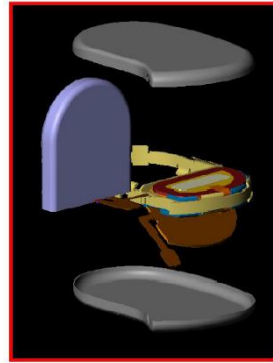
Assembly

Chip Scale Package (CSP)



Vorteile	Nachteile
Kleines Package (bis herunter zur tatsächlichen Chipgröße)	Zusätzliche Wafer-Scale-Prozesse (Redistribution + Bumpen)
Im Standard-SMT-Prozess montierbar	Redistribution-Layer ist kritisch hinsichtlich Crosstalk
Paralleler (= schneller) Verbindungsprozess	Underfill empfohlen

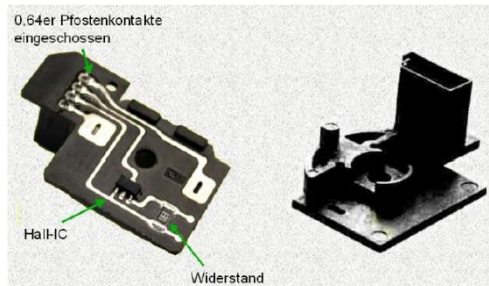
Systeme: Fertig gefaltetes Modul und Einbauschema



6.5 MID-Substrate

MID (Molded Interconnect Devices) = Spritzgegossene Schaltungsträger

Idee von MID: MID-basierte Motorhalterung



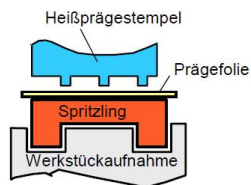
Features:

- integrierte Schaltungen
- integrierte Leiterbahnen
- geringe Stückkosten

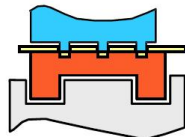
Vorteile von MID-Lösungen:

- 3D-Integration
- Miniaturisierung
- Integration von unterschiedlichen Funktionen
- Kurze Entwicklungszyklen
- Kosteneffektiv
- ...

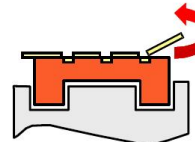
Heißpräge-MID-Technik



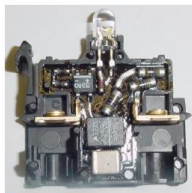
1. Bauteil in Werkstückaufnahme einlegen, Folie zuführen



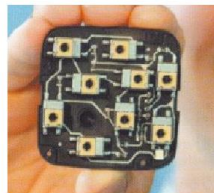
2. Ausstanzen des Leiterbilds, Aufschmelzen des Kunststoffs



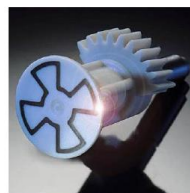
3. Restfolie entfernen



Automatisierungstechnik
(Moeller)

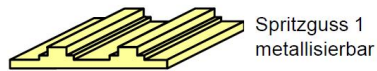


Kfz-Innenraum
(2E Mechatronik)



Kfz-Motorraum
(Oechsler)

2-k-MID-Technik



Spritzguss 1
metallisierbar



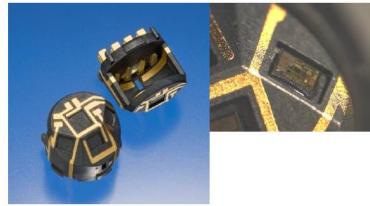
Spritzguss 2
nicht metallisierbar



Katalysieren



Metallisieren



Kombinierter Sonnen- und
Umgebungslichtsensor
Quelle: Hella



MIDLED-Gehäuse
Quelle: Osram

MID-Industriepreis 2011

Drucksensor für ESP und ABS

- Bauteilfunktion: Messung des hydraulischen Bremsdrucks bis 280 bar
- MID als Träger für Leiterplatte, für Umverdrahtung vom Sensorelement zur Leiterplatte und von der Leiterplatte zu den Kontakten
- Merkmale:
 - Großserienfertigkeit
 - Einsatz für alle neuen Bremssysteme
 - MID in sicherheitsrelevanter Funktion in Fahrzeugen



Bisherige Drucksensoren

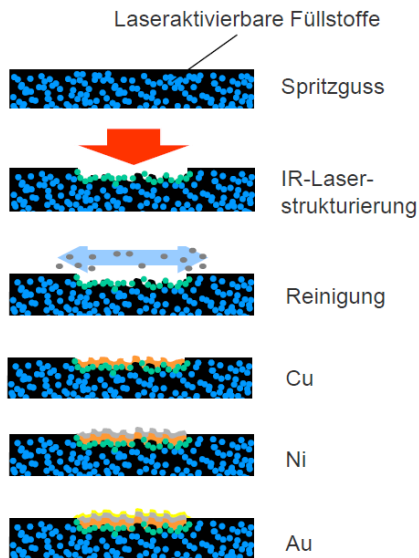


Neuer Drucksensor



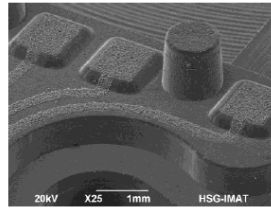
→ MID Lösung reduziert das
Bauvolumen um 50 %

Prozessablauf

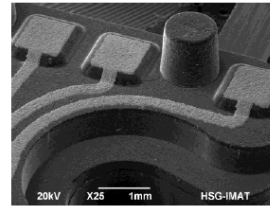


Merkmale

- Volladditives Verfahren mit kurzer Prozesskette
- Mehrere Thermoplaste kommerziell verfügbar
- 3D-Leiterbilder
- Min. Leiterpitch < 300 µm
- hoher Miniaturisierungsgrad
- Durchkontaktierungen möglich



nach Laserstrukturierung



nach Cu/Ni/Au

Außenstromlos chemische Metallisierung

Prozesse:

- Vorbehandlung
- Reinigung
- Chemisch Kupfer
- Chemisch Nickel
- Tauchgold
- Galvanisch Kupfer



Metallisierung in der Trommel



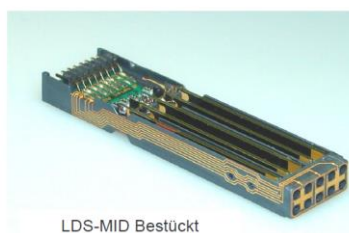
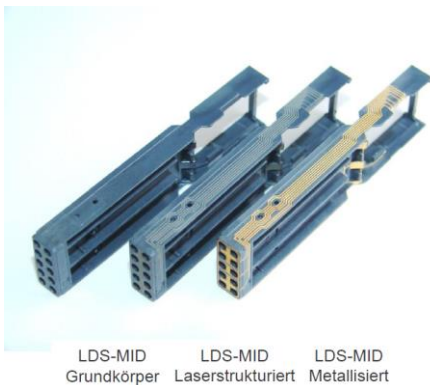
Metallisierungsanlage:
Arbeitsvolumen ca. 30 L



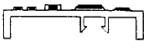
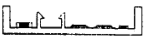
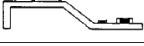
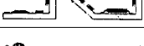
Elektrolytüberwachung
e-Cu: Check



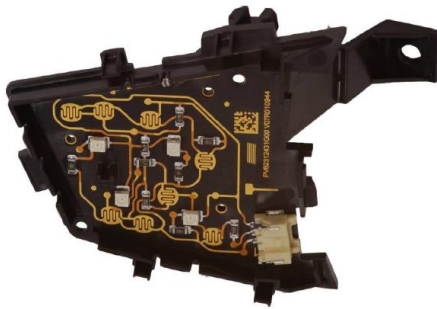
Metallisierung im Gestell



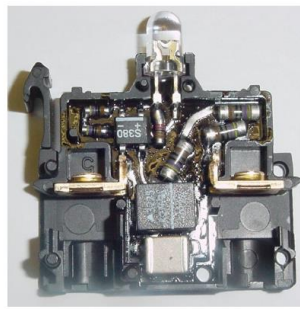
Klassifizierung räumlicher Schaltungsträger

Dimension	Merkmale	Bestückung	Leiterbild
2D	planare Prozeßfläche		eben, 1 - mehrere Lagen
2 ½ D	planare Prozeßfläche, 3D-Elemente auf der gegenüberliegenden Seite		eben, 1 - 2 Lagen
	planare Prozeßfläche, 3D-Elemente auf der Prozeßseite		eben, 1 - 2 Lagen
	mehrere planparallele Prozeßflächen		2½ D 1 - 2 Lagen
n x 2D	mehrere planare Prozeßflächen im Winkel		2½ D 1 - 2 Lagen
3D	Regelflächen, z.B. Zylinderflächen		3D
	Freiformflächen		3D

Flaches einlagiges Leiterbild mit 2D bis 2 ½ D Bestückung

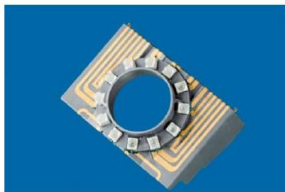


Lenkradschalter (LDS Technik)



Anzeigemodul (Heißprägen)

3D Leiterbild mit 2 ½ D und 3D montierten LEDs



Kamerabeleuchtungsmodul (LDS Technik)



LED Modul mit Reflektor und Heat Sink (2K Technik)

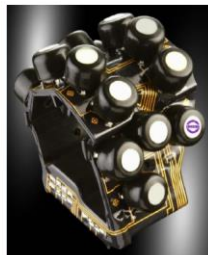


LED als Glühbirnenersatz (LDS Technik)

3D Leiterbild mit 3D Bestückung



Bewegungsmelder (Laser Semiadditiv)



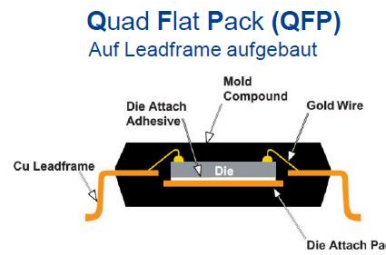
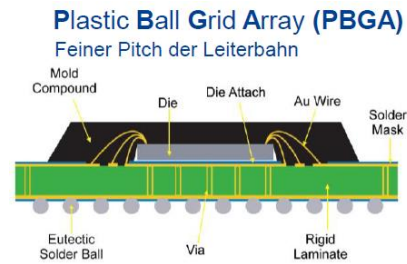
Schalterbaugruppe (LDS-Technik)



Lichtsensor (2K Technik)

6.6 Aktuelle und neue Lösungen für kompakte Systeme

Aktuelle Chip-Packages in der Mikroelektronik

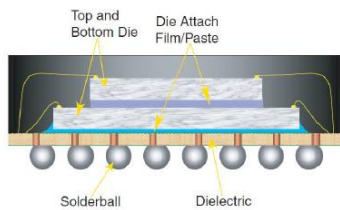


Chip Scale Package (CSP)

Chip und Gehäuse in etwa gleich groß

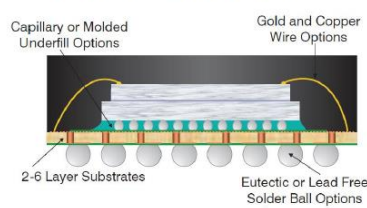
1. Stacked CSP

Chipstapel mit Die-Bonden



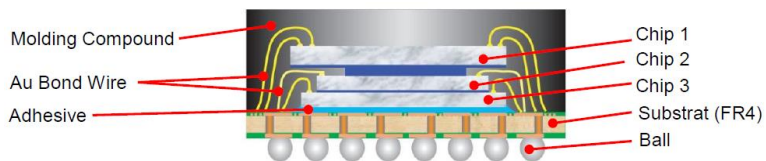
2. Flip-Stack CSP

Chipstapel mit Flip-Chip-Technik



Advanced Packaging – Stacked Die

Aufbau von Chip-Stapeln:



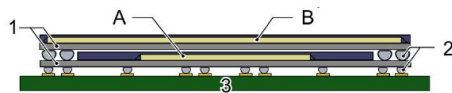
Aufbaubeispiel:

- 20 Chips übereinander aufgebaut
- 30 µm Höhe je Chip
- 1.4 mm Gesamthöhe
- Hersteller: Akita Elpida

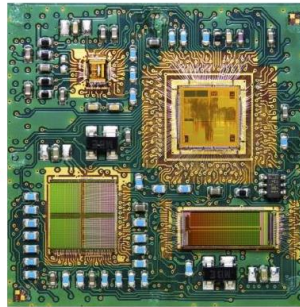


MCP Multi Chip Package / MCM Multi Chip Module

- Mehrere einzelne Chips in einem Package untergebracht (gestapelt und/oder nebeneinander)
- Kombination der Chips wirkt nach Außen wie ein einzelner Chip
- Teilweise Aufbau mit diskreten passiven SMD-Bauteilen

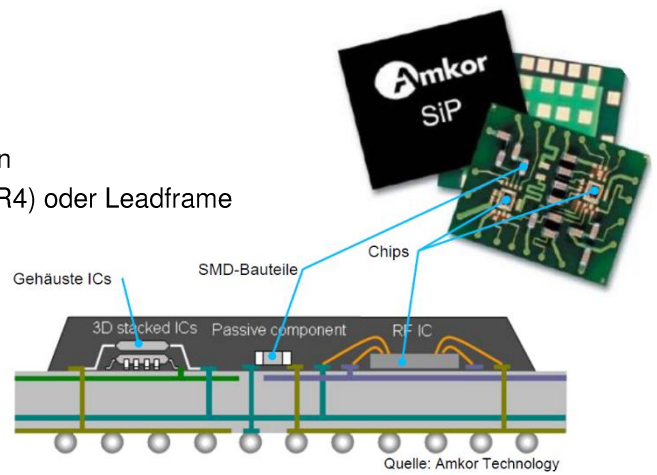


Zwei gestapelte Chips **A** und **B** auf jeweils
eigenem Substrat **1**, mit Lotperlen **2**, zusammen
auf einer Basisplatte **3**



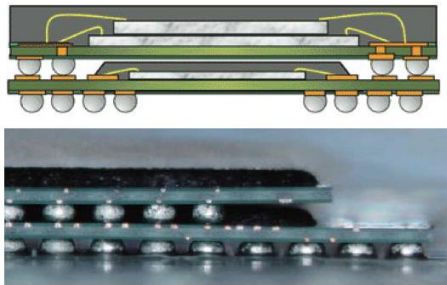
System-in-Package (SiP)

- Kombination von Chips und diskreten SMD-Bauteilen (Widerstände, Kondensatoren) auf einem Substrat (FR4) oder Leadframe
- Aktive und passive Bauteile eingesetzt
- Analoge und Digitale Bauteile eingesetzt
- Ähnlich dem MCP/MCM



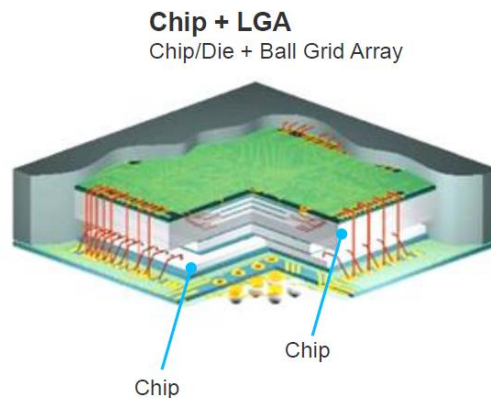
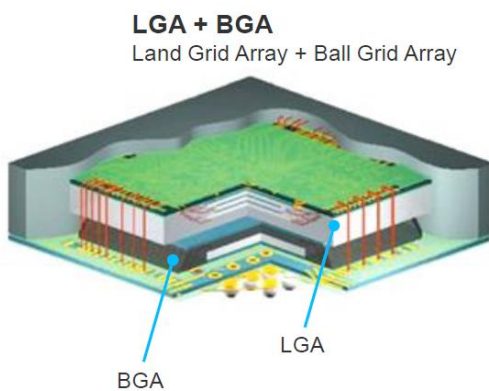
Package on Package (PoP)

- Häufig für Kombinationen von Memory und Logic-Packages eingesetzt



Package in Package (PiP)

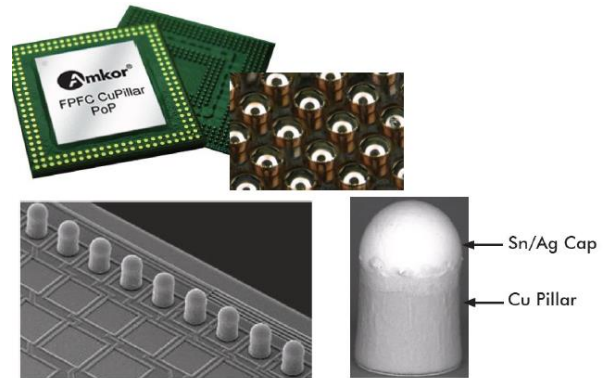
- Mehrere einzelne Packages in einem Package untergebracht
- Kombination von Chips und Packages in einem Package



Aktuellste Entwicklungen bei Flip-Chip-Gehäusen

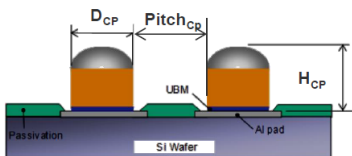
Copper Pillar Bumps (Kupferpfeiler) sind eine neue Generation von Flip Chip Verbindungen, welche viele Vorteile bieten und gleichzeitig die **ROHS**-Anforderungen einhalten. **Restriction of hazardous substances** - regelt die Verwendung von Gefahrstoffen in Geräten und Bauteilen.

- Fine Pitch geeignet bis zu 50 μm .
- Effiziente Betriebseigenschaften bzgl. Elektromigration.
- Kompatibel mit Standard-abmessungen und Metallisierung von Drahtbondpads auf Si-Die's. Dies ermöglicht eine schnelle Markteinführung von Flip Chip.
- Aufgrund von extremem Fine Pitch von 40 μm geeignet für Through Silicon Via (TSV) und Chip on Chip (CoC)



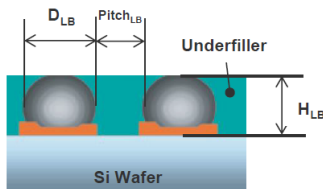
Vergleich der Abmessungen

Cu Pillar Bumps



Parameter	Abmessung
Durchmesser D_{CP}	20 – 50 μm
Gesamthöhe H_{CP}	30 – 45 μm
min. Pitch _{CP}	40 μm

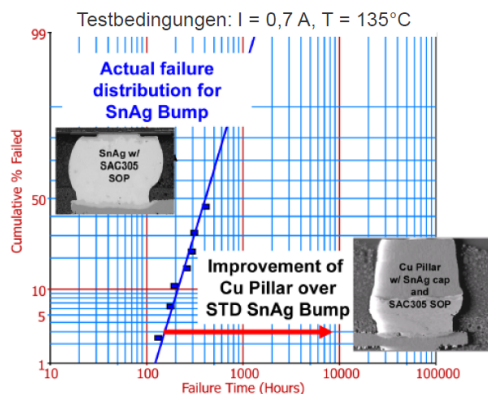
Lot Balls



Parameter	Abmessung
Durchmesser D_{LB}	90 – 125 μm
Gesamthöhe H_{LB}	70 – 100 μm
min. Pitch _{LB}	150 μm

Elektromigration – Zuverlässigkeitsvergleich

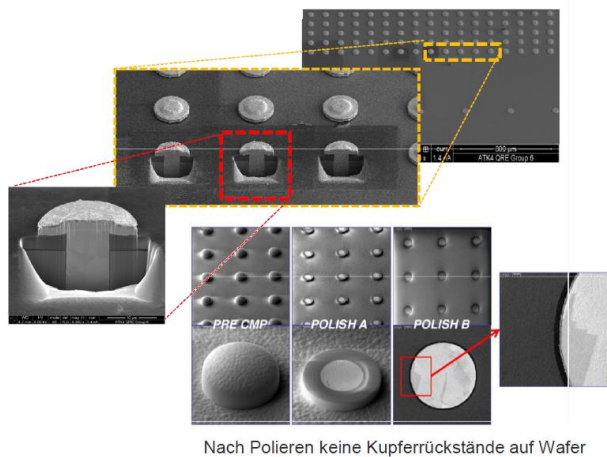
SnAg Bump im Vergleich zu Cu Pillars



Vergleich der Lebensdauer eines Cu Pillars mit einem Lotball bei gleichen Umweltbedingungen und ähnlicher Bump/UBM Geometrie. Kein Ausfall eines Cu Pillars nach 8000 h Test.

Through Silicon Via (TSV)

Für (3D) MEMS Packaging sind TSV's eine der wichtigsten Neuentwicklungen.

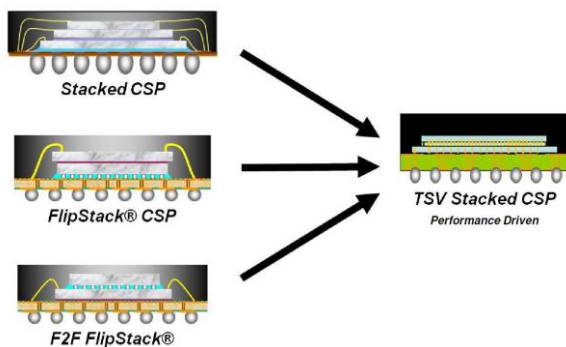


TSV Einsatzgebiete

- 3D Vertical Stacking
- 2.5D Interposer (zur Umverdrahtung)

Stacked CSP (Chip Scale Package)

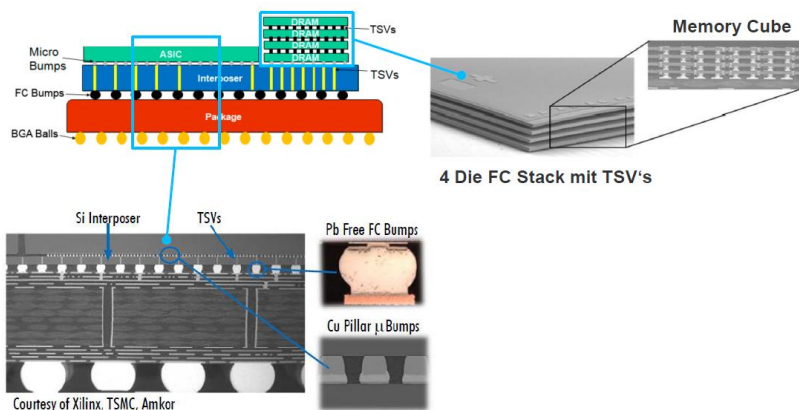
Aufbau zukünftig in TSV Technik



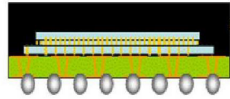
- Schnellerer Datentransfer durch geringere induktive Verluste
- Durch kürzere Kontakte geringerer Energieverbrauch

3D Flip-Chip Packages mit TSV

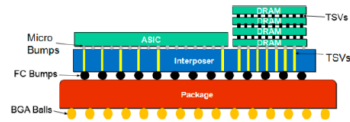
Die nächste Generation komplexer 3D Package Architekturen



Vor- und Nachteile von TSV's



TSV Stacked Chip Scale Package



TSV Stacked Ball Grid Array

Vorteile

- Erhöhung der Funktionalität von ICs bei gleicher Gehäusegrundfläche.
- Weniger induktive Verluste und dadurch schnellerer Datentransfer als bei Drahtbonds
- TSV erlauben kürzere Verbindungen zwischen den Dies. Das reduziert gegenüber langen horizontalen Drahtkontaktierungen den Energieverbrauch.
- Verringerung der Komplexität
- Weniger Maskierlagen
- Hohe Wafer-Ausbeute ($> 99,8\%$)
- Reduzierung der Wafer – Startkosten

Nachteile

- Drahtbonden billiger als TSV
 - Microbumps erforderlich
 - Füllen mit Kupfer dauert lange (geringer Durchsatz)
- Waferdurchbiegung ist Problem aufgrund CTE Mismatch von Cu ($16 \cdot 10^{-6} /K$) und Si ($2,5 \cdot 10^{-6}/K$)

Übersicht wichtiger physikalischer Parameter von Gehäusen/Substraten

	Keramik			Metall Kovar	Kunststoff Epoxid	Kunststoff Polyimid
	Al ₂ O ₃ 92%	Al ₂ O ₃ 99%	AlN			
Thermischer Ausdehnungskoeffizient [$10^{-6}/K$]	6.7	8.1	4.4	5.1	30 unter T _G 90 über T _G Leadframe: 5 - 17	20 - 70
E-Modul [GPa]	310	390	350	140	-	3
Dielektrizitätszahl	9.3	10.0	8.9	-	4	3.2
Spez. Widerstand [Ωm]	$< 10^{12}$	$> 10^{12}$	$> 10^{12}$	-	$10^{12} - 10^{14}$	$> 10^{12}$
Durchbruchfeldstärke [MV/m]	15	15	15	-	-	300
Schichtwiderstand Metallisierung [$m\Omega/Sq$]	15 (W)	15 (W)	15 (W)	Stifte	Leadframe	5 (Cu)
Wärmeleitfähigkeit [W/m/K]	20	31	170	17.5	0.67 Ableitung, Leadframe	0.2
Dielektrischer Verlustwinkel [rad]	3×10^{-4}	10^{-4}	3×10^{-4}	-	$4 - 5 \times 10^{-3}$	2×10^{-3}
Betriebstemperatur [$^{\circ}C$]	> 300			> 300	< 150	< 250

7. Qualität und Zuverlässigkeit

7.1 Einführung

Definition von Qualität und Zuverlässigkeit

Qualität: Erfüllung der Kundenanforderungen (Lastenheft)

Zuverlässigkeit: Erhaltung der Qualität beim Gebrauch während der Lebensdauer

Warum sind Qualität und Zuverlässigkeit wichtig?

- Schlechte Qualität bzw. Zuverlässigkeit sind ein Wettbewerbsnachteil.
- Durch die Produkthaftung muss der Hersteller für Schäden haften, die durch Ausfall seines Produkts entstehen.

Treten Zuverlässigkeitsprobleme, d.h. Ausfälle am Produkt auf, so sind diese mit Kosten für den Hersteller verbunden. Die Kosten sind am höchsten, wenn das Produkt schon beim Kunden im Markt ist, z.B. bei Rückrufaktionen bei Autos. Daher muss der Hersteller darauf achten, dass Zuverlässigkeitsprobleme bei der Entwicklung bzw. am Prototyp erkannt werden und sie bereits in diesem Stadium abgestellt werden.

Qualitätssicherung / Qualitätsmanagement

Für die Durchführung der Qualitätssicherung gibt es Normen, z.B. nach DIN EN ISO 9000.

Qualitätssicherung findet in allen Stadien der Produktentwicklung und Fertigung statt.

- **Produktentwicklung:** Entwurfsprüfung, Produktsimulation Design Review, FMEA (Failure Mode and Effects Analysis)
- **Produktion / Montage:** Prozessparameterprüfung, Maschinenfähigkeitsprüfungen, Funktionsprüfung, Statistische Bewertung der Prüfergebnisse
- **Zuverlässigkeitsprüfung:** Prüfung von Prototypen und Vorserien-erzeugnissen Berücksichtigung des gesamten Produktlebenszyklus (Gebrauch, Transport, Lagerung,...)
- Die **Anwendung der Qualitätssicherung** stammt aus der Rüstungsindustrie insbesondere Luft und Raumfahrt. Heute hat das KFZ auch sehr hohe Anforderungen. Praktisch alle Produkte unterliegen heute hohen Qualitäts- und Zuverlässigkeitsanforderungen.

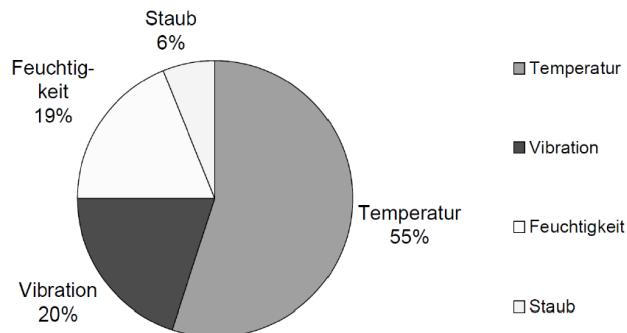
Die vier Stadien der Produktentstehung

	Stadium	Ergebnis	Zweck
1.	Grundlagenforschung oder Vorlaufforschung	Wirkprinzip, Grundprinzip für ein mögliches Produkt	Suchen neuer technischer Möglichkeiten für innovative Produkte
2.	Vorentwicklung (Vorausentwicklung)	Demonstrator oder Funktionsmuster	Nachweis der grundsätzlichen Eignung für ein Produkt; Freigabe der Entwicklung
3.	Entwicklung	Prototyp ¹⁾	Überprüfung des Entwicklungsstandes durch Vergleich mit dem Lastenheft; Freigabe der Vorserie
4.	Vorserienfertigung	Vorserienerzeugnis ¹⁾	Validierung des Produkts durch Feldtests beim Kunden; Qualifizierung des Produkts und des Fertigungsverfahrens (Zuverlässigkeitsprüfung); Freigabe der Serienfertigung
	Serienfertigung ¹⁾	Serienerzeugnis ¹⁾	Fertigung und Vertrieb des Produkts ²⁾

1) An diesen Erzeugnissen dürfen Prüfungen **nur** mit kalibrierten Messgeräten durchgeführt werden (Messgeräte der Klasse C).

2) Zwischen Vorserien- und Serienerzeugnissen dürfen keine Änderungen am Erzeugnis und am Verfahren vorgenommen werden.

Belastungen als Ausfallursachen von Elektronik



Temperatur stellt die häufigste Ausfallursache im Betrieb für elektronische Baugruppen dar. Den Zuverlässigkeitsuntersuchungen mit Temperaturbelastung ist daher besondere Bedeutung zuzuschreiben.

Umwelt – Stressfaktoren belasten die Produkte

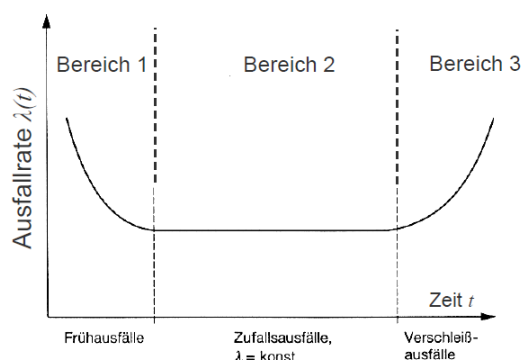
Verschiedene Stressfaktoren belasten unsere Produkte zusätzlich zur Belastung und zum Verschleiß durch die Benutzung. Sie kommen aus der Umgebung/Umwelt des Produkts und wirken in allen Stadien des Produktlebens: Produktion, Transport, Lagerung, Benutzung, Stand-By-Betrieb, ...

Die wichtigsten Faktoren sind:

- **Mechanischer Stress:** Vibrationen, mechanischer Schock
- **Natürlicher klimatischer Stress:** Regen, Luftfeuchtigkeit, Schadgase, Staub, Wind, Luftdruck, Schimmel, Insekten, Nagetiere, Sonneneinstrahlung (UV Strahlung)
- **Korrosion:** Elektrolytische Korrosion, Spannungsrisskorrosion
- **Technische Schadgase:** SO_2 , H_2S , Cl_2 , NO_2 , O_3 , ...
- **Thermischer Stress:** Hochtemperaturstress, Langzeittemperaturstress, Temperaturwechselstress

Die Badewannenkurve

Ausfallcharakteristik für Produkte im Gebrauch



Frühausfälle und Zufallsausfälle werden bei der Umweltprüfung (und Lebensdauerprüfung) erkannt. In besonderen Fällen wird ein „Burn In“ gemacht, um die Bauteile, die einen Frühausfall haben, erkennen zu können, indem sie ausfallen. Die Rate der Zufallsausfälle muss im Bereich von weniger als einigen ppm sein!

Die einzelnen Bereiche der Badewannenkurve können durch unterschiedliche statistische Verteilungen (z.B. Exponentialverteilung, Lognormalverteilung, Normalverteilung) beschrieben werden. Die Weibullverteilung ist in der Lage alle 3 Bereiche abzubilden. Daher wird sie bei Lebensdauer- und Zuverlässigkeitsuntersuchungen besonders häufig verwendet.

Ausfallarten

Frühausfälle

Frühausfälle treten unmittelbar nach der Inbetriebnahme eines Bauteils auf. Sie basieren auf Fehlern, welche bereits bei Inbetriebnahme eines Produktes vorhanden waren. Verursacht werden diese Frühausfälle durch fehlerhafte CAD-CAM-Daten, Fertigungs- und Werkstofffehler, Defekte im Chip oder Si-Wafer sowie durch eklatante Konstruktionsfehler. Die Ursachen für diese Fehler liegen in allen Phasen der Produktentstehung.

Zufallsausfälle

Zufallsbedingte Ausfälle können während der gesamten Betriebsdauer jederzeit auftreten. Verursachung von zufallsbedingten Ausfällen kann eine Überlastung (Überspannung, Überstrom), das Nichteinhalten von Umgebungsbedingungen (Temperatur, Feuchte, mechanischer Schock) sowie Verschmutzung und Durchfeuchtung (Korrosion, Elektro-Korrosion) sein. Weitere Ursachen sind Ausfälle, die durch statistische Schwankungen eingeleitet werden: Schwankungen von Materialeigenschaften (Inhomogenitäten), Vibrationen, Schock, Lastschwankungen sowie Spannungsspitzen aus dem elektrischen Netz. Das Ausfallrisiko einer Einheit ist gering und immer gleich. Ausfälle dieser Art sind sehr schwer zu prognostizieren.

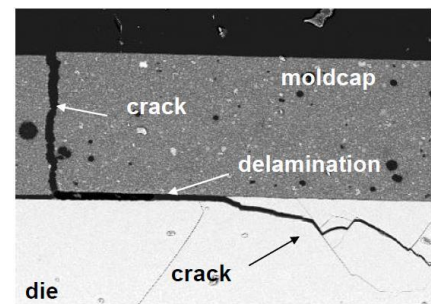
Ermüdungsausfälle

Die Ursache von verschleißbedingten Ausfällen liegt in der Ermüdung bzw. Alterung von Komponenten, also an Veränderungen, welche sich mit fortlaufender Einsatzdauer einstellen. Ursachen für Ermüdungsausfälle können Schwell- und Wechselbelastungen, Oberflächenveränderungen sowie chemische und strukturelle Materialveränderungen sein. Bei Mikrosystemen gibt es i.d.R. keine Wartung, die das Ausfallrisiko mindert. Mikro-systeme werden i.d.R. auch nicht nach einem Ausfall repariert sondern ausgetauscht. Weiterhin gibt es bei Mikrosystemen i.d.R. keine Ausfälle durch Verschleiß oder Reibung. Die Ermüdungsausfälle sind stark abhängig von den Umgebungsbedingungen und bewirken einen starken Anstieg der Ausfallrate gegen Ende der Lebensdauer. Dieser Bereich der ermüdungs-bedingten Ausfälle lässt sich rechnerisch erfassen. Entsprechende Zuverlässigkeitsvorhersagen sind überwiegend auf diesen Bereich beschränkt.

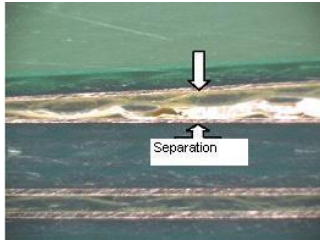
Häufige Ausfallarten...

... von Silizium-Chips / Dies

- **Überspannungsbedingte Durchschläge** bei p-n-Übergängen
- **Leiterbahnunterbrechungen** durch hohe Strombelastung (Elektromigration)
- **Bruch** von mikromechanischen Elementen aus mono- und polykristallinem Si (Balken, Federn,...) kommt bei richtiger Auslegung (kleinen Dehnungen) nicht vor!
- **Mikrorisse** Risse in der Moldkappe die sich während der Temperaturwechselbelastung in den Chip fortsetzen. Mikrorisse entstehen bevorzugt am Chiprand, da hier durch den Sägeprozess eine Schädigung stattfindet.

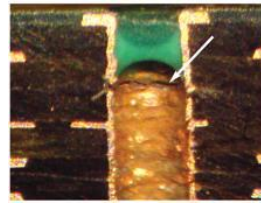


...bei Leiterplatten (PCB)



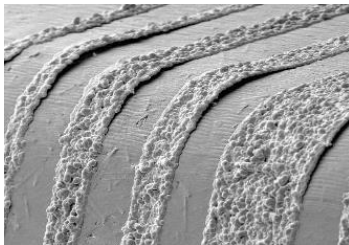
Delamination der Lagen

Die Delamination entsteht insbesondere, wenn die Leiterplatten vor dem Reflow-Löten Feuchte/Wasser aufgenommen haben. Beim System ergibt sich ein Frühausfall oder ein zufälliger Ausfall.

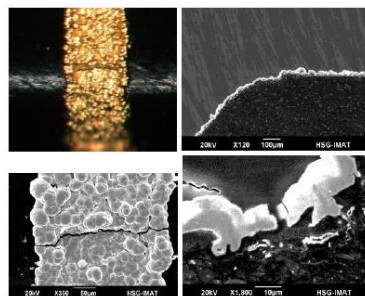


Mikrorisse im Metall der Durchkontaktierung entstehen aufgrund unterschiedlicher CTE bei Temperaturwechselbelastung. Der CTE von PCB ist viel größer als der des Cu. Dies führt zu Ermüdungsausfall.

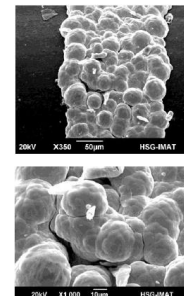
Leiterbahndefekte bei Molded Interconnect Devices (MID)



Delamination der Leiterbahnen beim Verlauf über eine Bauteil Ecke/Kante. Durch unterschiedliche thermische Ausdehnung entstehen Kräfte senkrecht zur Leiterbahnebene, die der Haftung entgegenwirken.



Mikroriss in einer Leiterbahn ausgelöst durch eine Mikrostufe im Kunststoffbauteil wegen schlechter Fertigung. Führt zu Frühausfall.



Anfangsstadium der Entwicklung eines **Mikrorisses** (Früh- oder Zufallsausfall).

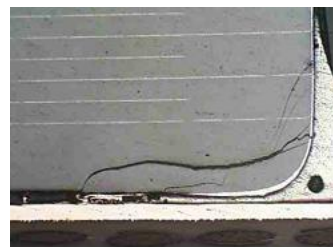
→ Die Gefahr für diese Defekte ist umso größer, je höher der CTE des Thermoplasten ist.

... bei Gehäusen und SMD-Bauteilen



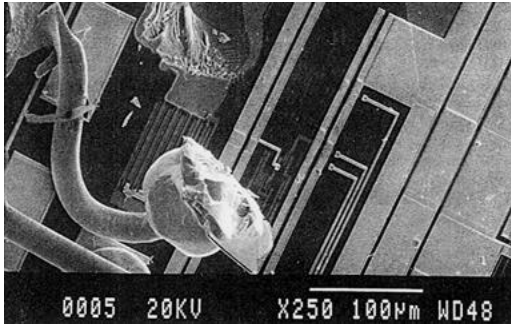
Chip-Out bei Plastic Packages

Der Ausbruch bei einem Kunststoffgehäuse ist wahrscheinlich aufgrund von unsachgemäßer Handhabung in der Fertigung entstanden. Der Ausbruch führt wahrscheinlich zu einem Früh- oder Zufallsausfall.

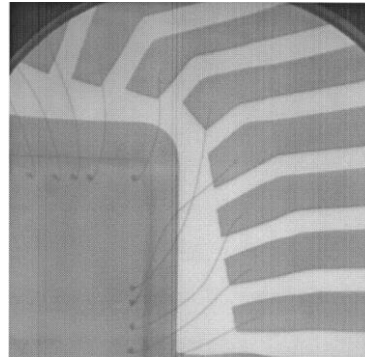


Der Ausbruch bei einem Chip- Kondensator aufgrund von unterschiedlichen CTE. Der Bruch wird initiiert durch Mikrorisse und führt zum Frühausfall.

... von Draht-Bond-Verbindungen (fertigungsbedingt)

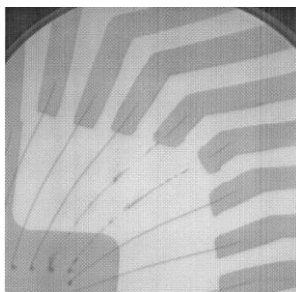


Zu hohe Bondkraft in Kombination mit zu hoher Ultraschalleistung und Bonddauer hat zu einem Muschelbruch im Silizium unter dem Bondpad geführt (Früh- oder Zufallsausfall).

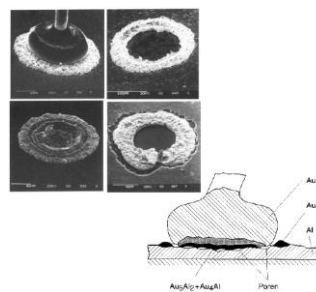


Verformung der Bonddrähte beim Transfer-Molding des Kunststoffgehäuses führt zu einem Kurzschluss (Früh- oder Zufallsausfall).

... von Draht-Bond-Verbindungen (im Betrieb)

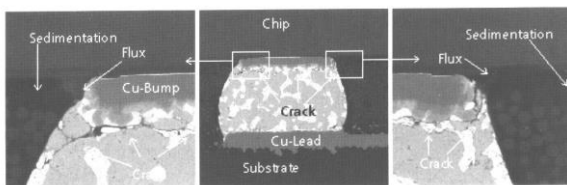


Zu hohe Strombelastung aufgrund einer falschen Beschaltung hat zum Aufschmelzen eines Bonddrahtes geführt (Früh- oder Zufallsausfall).



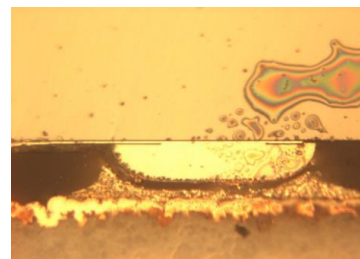
Bildung von „Kirkendahl“-Poren und intermetallischen Phasen bei Au-Drähten auf Al-Si Pads führt zum Ausfall von Bonddrähten. Der Ausfall entsteht durch Diffusion (Ermüdungsausfall).

... bei Flip-Chip-Verbindungen



Bumpverbindung mit Underfill; Ausfall nach 2500 Temperaturzyklen

Degradation eines Lot-Bumps bei einem Chip in Folge von Temperaturwechselbelastung (Ermüdungsausfall).

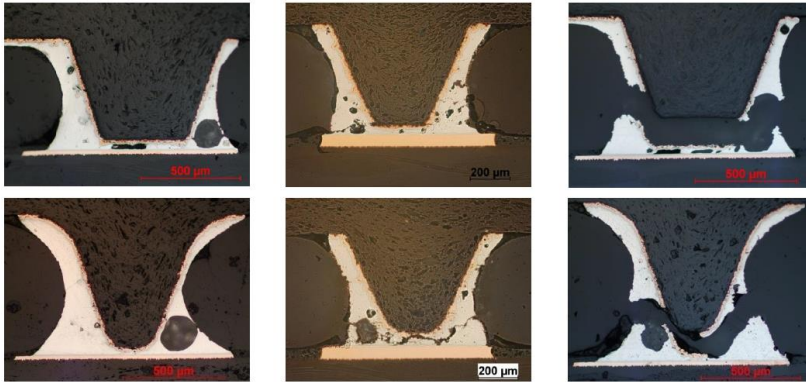


Adhäsionsbruch Bump - ICA

Delamination einer Flip Chip-Verbindung eines Ni-P/Au-Bumps mit einem, mittels Leitkleben verbundenen, MID aufgrund hoher thermomechanischer Spannungen (Früh- oder Zufallsausfall).

... bei SMD-Lötverbindungen auf Leiterplatten

Ausfallmechanismen / Rissentstehung beim TST (-40°C / 125°C)



Der Ausfall entsteht bei Temperaturwechselbelastung durch Kriechen des Lots. Die finale Rissbildung beginnt vorzugsweise bei Fehlstellen wie hier bei Lunkern / Poren (Ermüdungsausfall).

Übersicht zu Ausfällen von Mikrosystemen

Chip		Substrat	
Ausfall	Typ	Ausfall	Typ
Mikroriss	F, Z	Delamination Lage PCB	F, Z
Durchschlag Gate-Oxid	F, Z	Mikrorisse Via PCB	E
Durchschlag p-n-Übergang	Z	Delamination Leiterbahn MID	F, Z
Leiterbahnunterbrechung	Z, E	Mikrorisse Leiterbahn	F, Z, E
Bruch mechanischer Elemente (unwahrscheinlich)	E		
Gehäuse und SMD-Bauteile		Verbindungen	
Ausfall	Typ	Ausfall	Typ
Ausbruch Kunststoffgehäuse	F, Z	Si-Ausbruch Bond-Pad	F
Bruch Chip-Kondensator	F	Verbiegung der Loops beim Molding	F
		Aufschmelzen Bond-Draht	Z
		Kirkendahl-Poren	E
		Degradation Lot-Bump	E
		Ausfall geklebter Ni-P/Au Bump	Z
		SMD-Lötverbindung	E

Legende:

F = Frühausfall

Z = Zufallsausfall

E = Ermüdungsausfall

Weibull-Verteilung für Früh-, Zufalls-, und Ermüdungsausfälle

• Überlebenswahrscheinlichkeit $R(t)$:

Anzahl der nach der Zeit t noch intakten Bauteile bezogen auf die Gesamtanzahl der Bauteile.

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b}$$

• Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$:

Anzahl der nach der Zeit t ausgefallenen Bauteile bezogen auf die Gesamtanzahl der Bauteile ($F(t) = 1 - R(t)$).

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b}$$

• Dichtefunktion $f(t)$:

Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für den Ausfall von Bauteilen.

$$f(t) = \frac{dF}{dt} \leftrightarrow f(t) = \frac{b}{T} \left(\frac{t}{T}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b}$$

• Ausfallrate $\lambda(t)$:

Gibt an, wie viele Bauteile in einer Zeiteinheit ausfallen.

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \leftrightarrow \lambda(t) = \frac{b}{T} \cdot \left(\frac{t}{T}\right)^{b-1}$$

t : Zeit nach Betriebsbeginn; T : Charakteristische Lebensdauer; b : Formfaktor bzw. Ausfallsteilheit

Definition der Begrifflichkeiten

• Lebensdauer t :

Wilker: „Nach DIN 40041 [2] wird der Begriff Lebensdauer als die Betriebsdauer einer nicht in Stand zu setzenden Einheit vom Anwendungsbeginn bis zum Zeitpunkt des Ausfalls definiert. Die Lebensdauer wird durch zeitabhängige Einheiten beschrieben, wie beispielsweise Schaltzyklen, Belastungszyklen, Betriebsdauer, Abschaltungen sowie zurückgelegte Wegstrecken.“

D.h. die „Lebensdauer“ muss nicht unbedingt eine Zeit sein.

• Charakteristische Lebensdauer T :

Beschreibt die Lebensdauer bis zu der eine bestimmte Anzahl an Bauteilen bezogen auf die Gesamtanzahl der Bauteile ausgefallen ist. Bei der Weibullverteilung entspricht dies einer Ausfallwahrscheinlichkeit von 63,2 %. Die charakteristische Lebensdauer ist der Lageparameter der Weibull-Verteilung und wird als Mittelwert betrachtet.

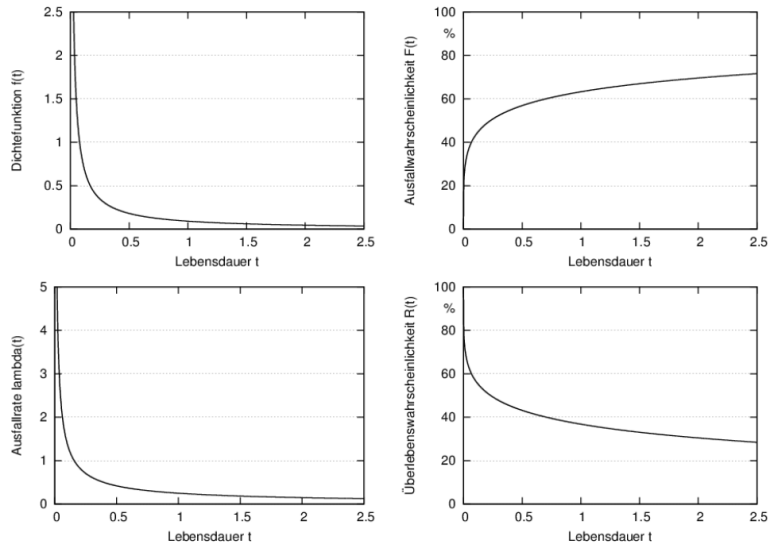
• Ausfallsteilheit oder Formfaktor b :

Die Ausfallraten verschiedener Ausfallmechanismen weisen typischerweise unterschiedliche Werte des Formfaktors b auf. Der Formfaktor b ist ein Maß für die Streuung der Lebensdauer t und für die Form der Dichtefunktion. In Abhängigkeit von Formparameter b können die einzelnen Bereiche der Badewannenkurve beschrieben werden.

- $b < 1$ beschreibt Frühausfälle
- $b = 1$ beschreibt Zufallsausfälle
- $b > 1$ beschreibt Ermüdungs-/ Verschleißausfälle

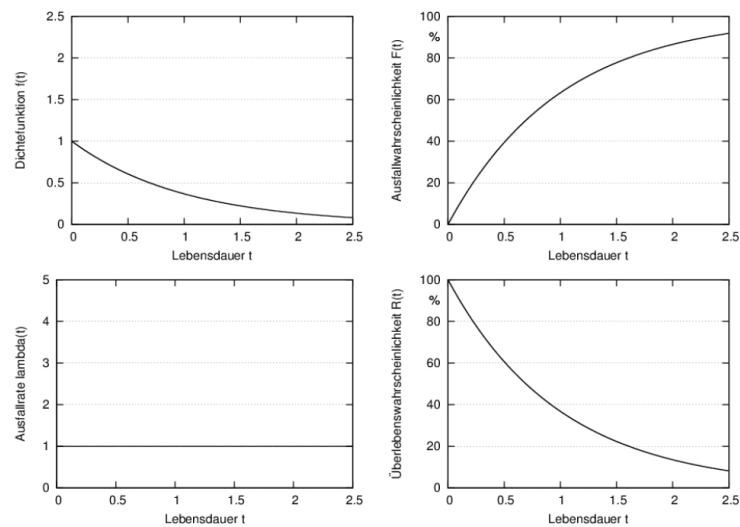
Badewannenkurve – Bereich 1: Frühausfälle

Für $b < 1$ und $T = 1$



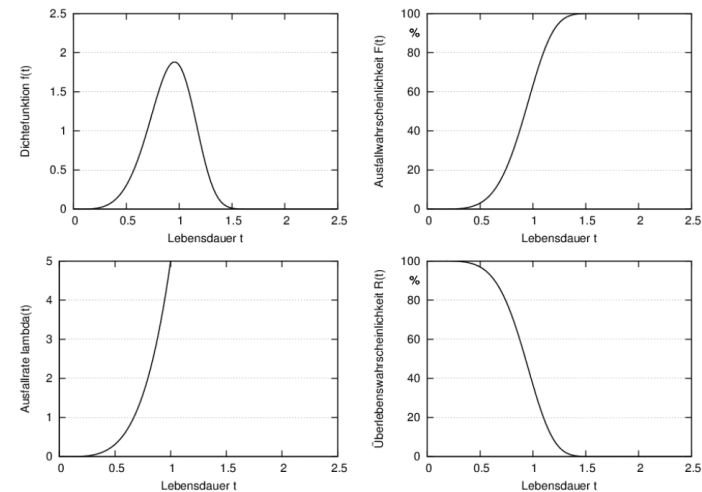
Badewannenkurve – Bereich 2: Zufallsausfälle

Für $b = 1$ und $T = 1$

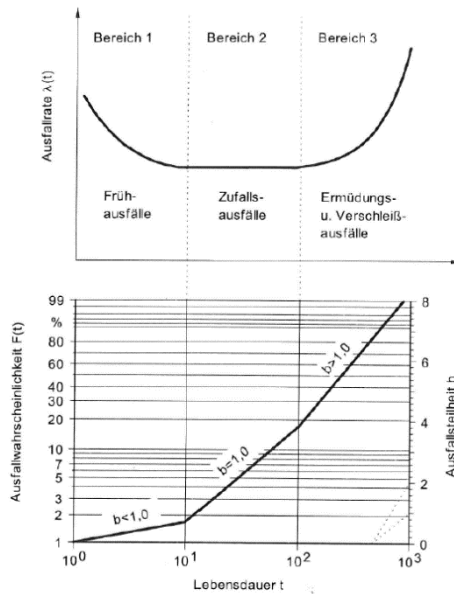


Badewannenkurve – Bereich 3: Verschleiß- / Ermüdungsausfälle

Für $b > 1$ und $T = 1$



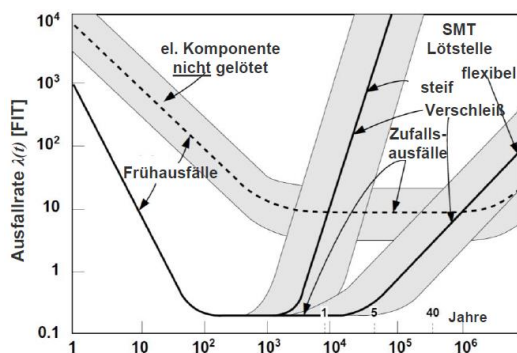
Zweiparametrische Weibull-Verteilung



Konstruktion der Badewannenkurve der Zuverlässigkeit aus drei Weibullkurven, welche unterschiedliche Ausfallmechanismen widerspiegeln. Die Ausfallraten verschiedener Ausfallmechanismen werden typischerweise durch unterschiedliche Werte des Formparameters b beschrieben.

Schematische Badewanne-Kurve für SMT-Bauelemente

Vergleich der Ausfallrate eines SMD (Surface Mounted Device), das nicht aufs Substrat gelötet ist (kein Stresseintrag vom Substrat), zur Ausfallrate der Lötstellen von SMDs mit flexiblen (z.B. Gull Wing) und steifen (z.B. QFN) Anschlüssen.



Quelle: IPC-SM-785 Betriebszeit [Stunden]
FIT...Failures In Time (bezogen auf 10^9 Bauteilbetriebsstunden)

- Für eine Aussage über die gesamte Baugruppe müssen die Kurven der Komponenten und der Lötstellen addiert werden.
- Früh- und Zufallsausfälle sind eher durch das el. Bauteil selbst bestimmt, treten also bei Lötstellen weniger auf.
- Die Ermüdungsausfälle (Materialermüdung) hingegen sind hauptsächlich durch die Lötstellen bestimmt.

ZUMIKROSYS

Experimentelle Lebensdauerermittlung

Untersuchung von gelöteten Flip Chip-Aufbauten auf unterschiedlichen Substraten

• Substratmaterialien:

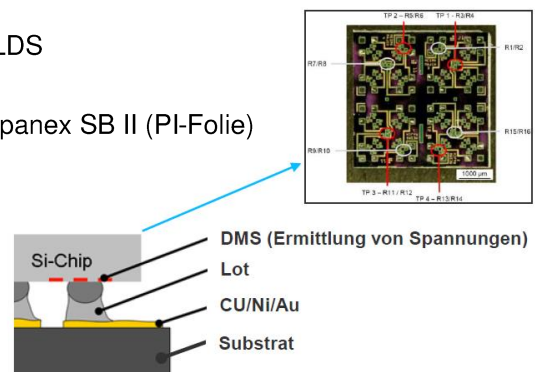
- LDS-MID: LCP Vectra E840i LDS, Pocan DP T7140 LDS
- Leiterplatte: FR4
- Flex-Substrate: Rogers Ultralam 300 (LCP-Folie), Espanex SB II (PI-Folie)

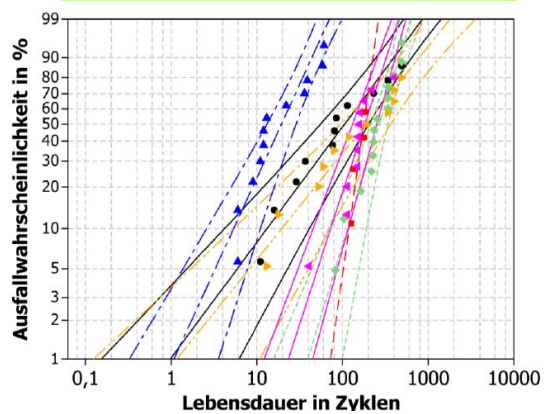
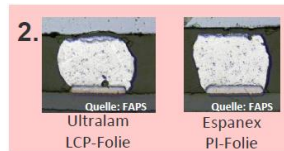
• Testbedingungen:

- Temperaturwechsel: -40 °C bis 150 °C
- Test: End of Life

• Ermittlung der Lebensdauer

- 2-Parameter-Weibullverteilung





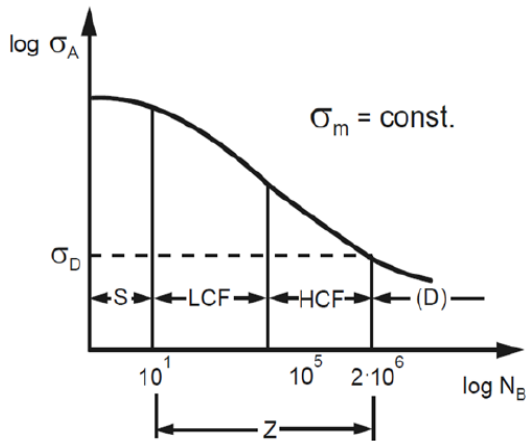
Substrat
ESPANFX
FR4 Var1
FR4 Var2
Pocan
ULTRALAM
Vectra

b	T
0,90419	158,591
4,78258	190,946
2,20981	317,630
1,46599	24,894
0,83408	290,168
2,06626	216,869

1. FR4 Var2, Vectra und Pocan haben ca. gleichen Formfaktor b , d.h. gleicher Ausfallmechanismus.
→ **Ermüdungsbruch** des Lots
2. Die Flex-Substrate weisen $b < 1$ auf.
→ Ausfallmechanismus **Chip- und Adhäsionsbruch**.

Allgemeine Wöhlerlinie

Zur Bestimmung des Werkstoffverhaltens unter schwingender Beanspruchung ist der Dauerschwingversuch nach DIN 50100 maßgebend. Proben werden einer zumeist sinus-förmigen wechselnden Last oder Verformung unterworfen. Aus zahlreichen Versuchen wird eine Spannungs- oder Dehnungswöhlerlinie gewonnen, die einen Zusammenhang zwischen der max. Spannungs- oder Dehnungsamplitude und der zugehörigen ertragbaren Lastspielzahl herstellt.



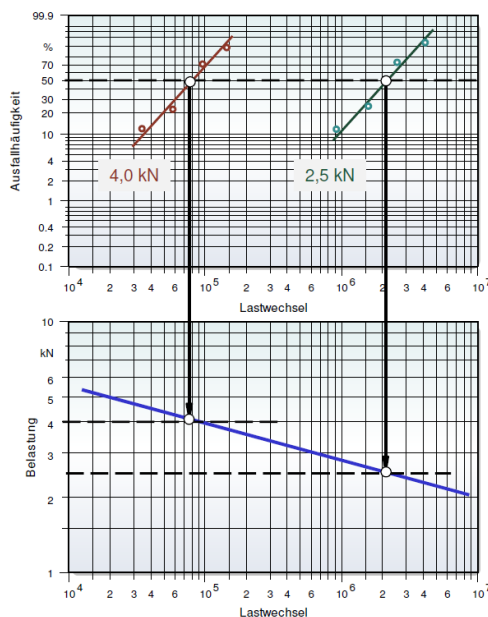
S: Statische Festigkeit von ca. 1 bis 101 Schwingspielen. Bauteile, deren zu erwartende Lebensdauer unter 101 liegt, werden statisch dimensioniert, entsprechend einer ruhenden Beanspruchung.

LCF (Low-Cycle-Fatigue): Kurzzeitschwingfestigkeit unterhalb von ca. 104 bis 105 Schwingspielen. Diese Art der Ermüdung tritt bei hohen plastischen Dehnungsamplituden auf, die zu frühem Versagen führen.

HCF (High-Cycle-Fatigue): Zeitschwingfestigkeit zwischen 104 und materialabhängig etwa $2 \cdot 10^6$ Schwingspielen.

D: Ertragbare Amplitude oberhalb $2 \cdot 10^6$ Schwingspielen wird als Dauerfestigkeit bezeichnet.

Ableitung der Wöhlerlinie aus der Weibullverteilung



Für die Ausfallpunkte innerhalb einer Kurve im Weibulldiagramm muss gelten, dass alle den gleichen Belastungen unterliegen.

Im Wöhlerdiagramm wird dagegen die Lastwechselzahl in Abhängigkeit von der Bauteilbelastung dargestellt. Dabei kann eine Aussage über eine zu erwartende Lebensdauer für eine bestimmte Belastung gemacht werden.

Eine Aussage darüber, wie viel Prozent der Bauteile bei einer bestimmten Belastung ausfallen werden, kann nicht gemacht werden.

Durch Kombination aus Weibullauswertung und Wöhlerdiagramm ist dies jedoch möglich. Für jeden Belastungsfall wird für eine bestimmte Ausfallhäufigkeit, hier z.B. 50% der Punkt im Weibulldiagramm nach unten in das Wöhlerdiagramm projiziert. Dabei lässt sich durch Verbinden dieser Punkte die Wöhlerlinie ziehen.

7.2 Ausfallmechanismen

Thermische Ausdehnung und thermomechanischer Stress

Material	Ausdehnungskoeffizient α [$10^{-6}/K$]		
	x (parallel)	y (quer)	z (Dicke)
Quarz	ca. 0,5		
Silizium	ca. 2,5		
Glas	4,6 ... 10		
Kovar	5,1		
Al ₂ O ₃ Keramik	6,7 ... 8,1		
NiFe47Cr	9,2		
Kupfer	17		
Epoxidharz-Leiterplatten (FR4)*	15-18/15-18	15-18/15-18	50-70/270-300
Epoxidharz-Vergussmassen*	30/67; (20/112)		
Transfer-Moulding-Massen*	7 (-60 nicht optimiert)/30 (-185)		
Hochtemperatur Thermoplast*	18/18	27/52	27/52
LDS Thermoplaste (LCP)*	(13-) 20/20	30/30	30/30

*Typische Werte, unterhalb/oberhalb T_g

Thermisch induzierter Stress in Leiterbahnen

Thermischer Stress einer „dünnen“ Schicht auf „dickem“ Substrat - z.B. einer Leiterbahn - entsteht, in dem die Leiterbahn der Substratausdehnung folgt. D.h. es wird näherungsweise angenommen, dass die Leiterbahn keinen Einfluss auf die Ausdehnung des Substrats hat. Die entstehende intrinsische Schichtspannung in der Leiterbahn ergibt sich zu:

$$\sigma = \frac{E}{1 - \nu} (\alpha - \alpha_{Subs}) (T_{ref} - T)$$

E ...Elastizitätsmodul der dünnen Schicht

ν ...Querkontraktionszahl der dünnen Schicht

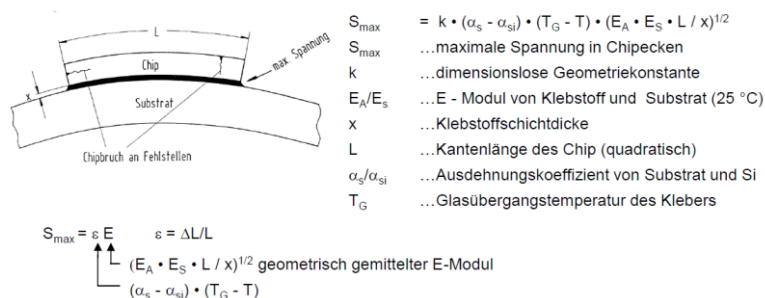
α ...Wärmeausdehnungskoeffizient der dünnen Schicht

α_{Subs} ...Wärmeausdehnungskoeffizient des Substrats

T_{ref} ...Temperatur des spannungsfreien Zustandes der dünnen Schicht

Mechanische Spannungen im Chip nach dem Die-Bonden

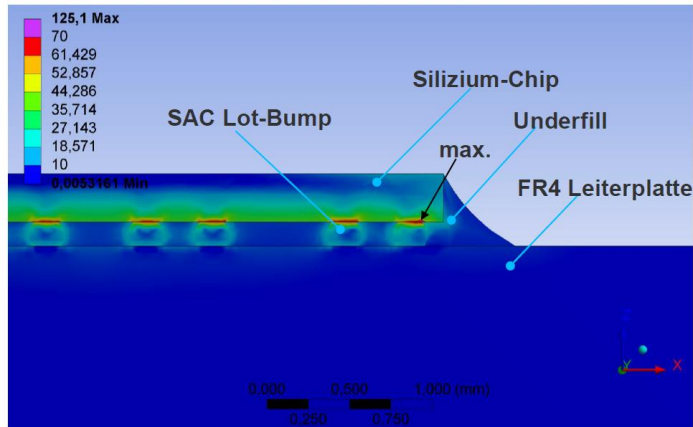
- Der Chip wird als „dünne“ Schicht betrachtet. Der Klebstoff wirkt als Puffer.



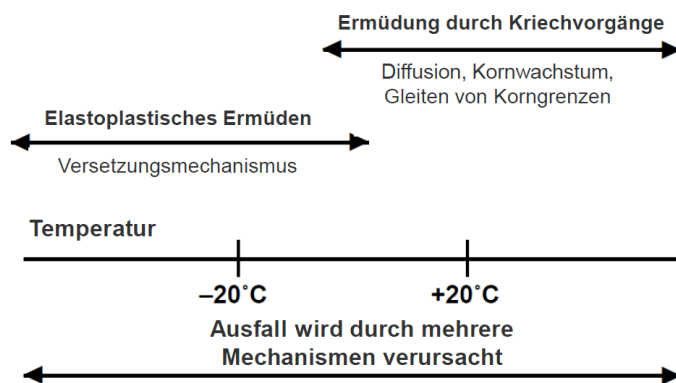
- Die Chipecken sind besonders gefährdet, da am Rand vom Sägen Mikrodefekte vorhanden sind.

Thermisch induzierter Stress in Lotverbindungen (Flip-Chip-Aufbau)

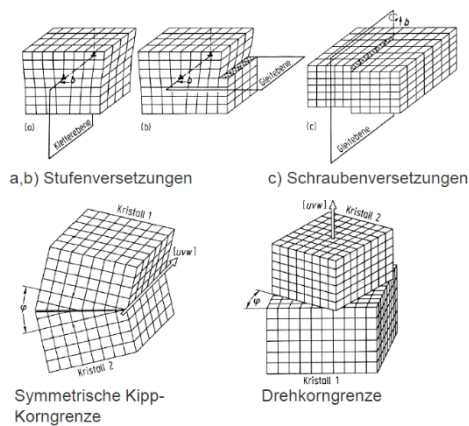
Vergleichsspannungen (von Mises) in MPa bei 85°C



Ausfallmechanismen von Lotverbindungen bei thermischer Belastung



Versetzungen und Korngrenzen in Kristallen



• Versetzungen dominieren im Falle des elasto-plastischen Ermüdens bei niedrigen Temperaturen.

• Gleiten von Korngrenzen, Kornwachstum und Diffusion dominieren im Falle des Ermüdens durch Kriechen bei hohen Temperaturen.

Kriechen von Lotverbindungen

Als Kriechen bezeichnet man die zeitabhängige, plastische Verformung eines Werkstoffs unter Last. Kriechvorgänge sind viskoplastische Vorgänge (visko = zeitabhängig).

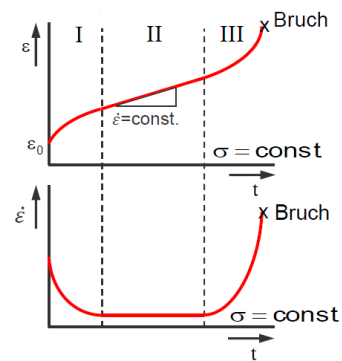
- Wird eine Lotlegierung bei erhöhter Temperatur, d.h. bei einer Temperatur von mindestens $0,4 T_{Schmelz}$ belastet, so nimmt die Dehnung des Bauteils bei konstanter Spannung mit der Zeit zu.
- Zu Beginn der Belastung reagiert das Bauteil mit einer sofortigen und zeitunabhängigen elastischen sowie plastischen Dehnung ε_0 , die hauptsächlich durch die Bewegung von Versetzungen entsteht.
- Sind alle Versetzungsvorgänge ausgeglichen stellt sich ein konstanter Zustand ein, das sekundäre Kriechen, das hauptsächlich durch Veränderungen an den Korngrenzen geschieht. Hier spielen Diffusionsvorgänge eine wichtige Rolle.
- Wenn der Großteil der Lebensdauer vergangen ist (tertiäres Kriechen) tritt massive innere Schädigung auf. Es vermindert sich der tragende Querschnitt, was zu einer starken Zunahme der Dehnrate führt.

- Kriechen ist eine der Hauptausfallursachen von Lotverbindungen
- Stadien des Kriechens bei konstanter mechanischer Spannung

I. Primäres Kriechen Zunehmende Dehnung ε bei abnehmender Dehnrate $\dot{\varepsilon}$, hauptsächlich Versetzungen

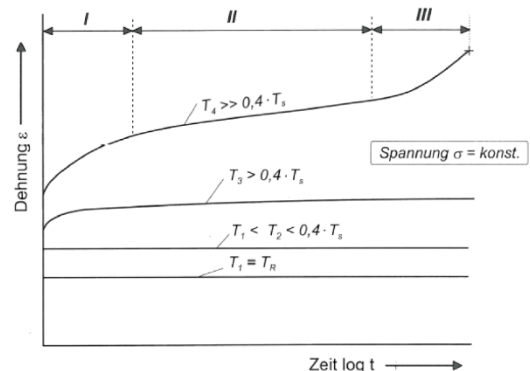
II. Sekundäres Kriechen Linear zunehmende Dehnung bei konstanter Dehnrate, hauptsächlich Korngrenzen

III. Tertiäres Kriechen Starke Zunahme der Dehnung sowie der Dehnrate bis zum Bruch, Ende der Lebensdauer

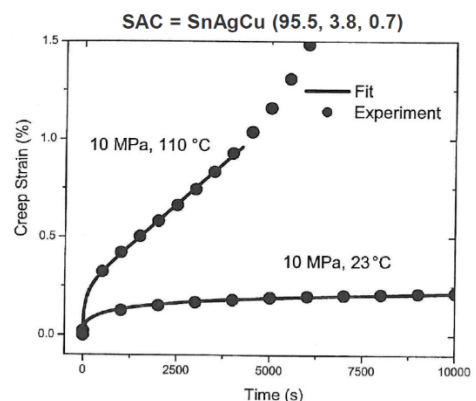


- Bei Lötverbindungen wird der Stress durch unterschiedliche Ausdehnungen beim Erwärmen (Abkühlen) durch das Kriechen wieder abgebaut.

Kriechverhalten in Abhängigkeit der Temperatur



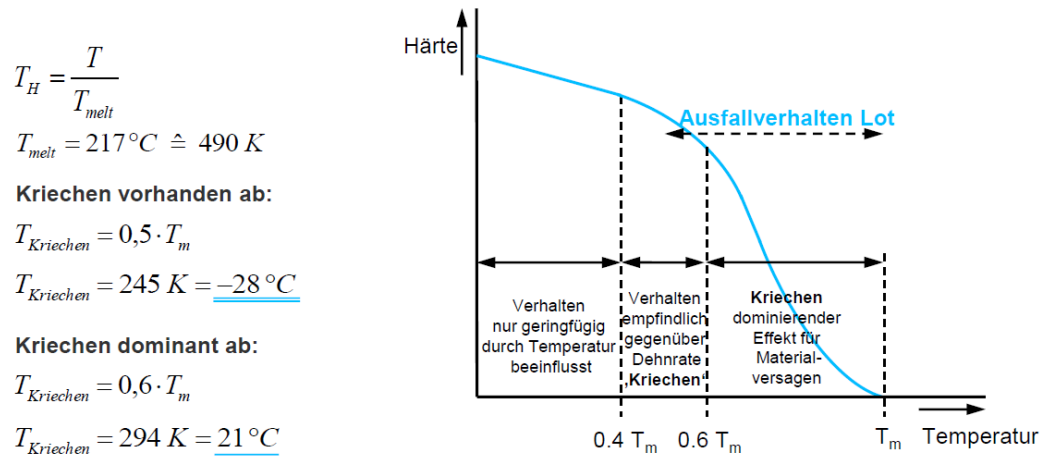
Temperaturabhängige Kriechkurve eines SAC-Lots



Homologe Temperatur T_H

Die homologe Temperatur ist die Temperatur, die auf den (absoluten) Schmelzpunkt eines Werkstoffs bezogen ist. Für Festkörper kann sie dementsprechend zwischen 0 und 1 betragen. **Kriechen** beginnt bei einer homologen Temperatur im Bereich von $0.4 < T_H < 0.6$

Ein SAC Lot mit einer Schmelztemperatur von 217 °C beginnt ab ca. $T_H > 0,5$ zu kriechen:



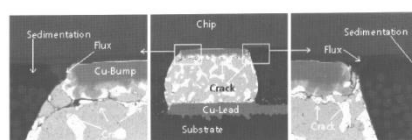
Schadenmechanismus durch thermisches Zyklieren

Ein reiner Kriechbruch entsteht also, wenn die Lötstelle einer dauerhaften Belastung ausgesetzt ist. Bei Mikrosystemen ist dazu eine Temperaturwechselbelastung erforderlich. Bei Erwärmung kriecht das Lot und die mechanischen Spannungen werden dabei abgebaut. Abkühlen führt zu erneuten Spannungen und erneutem Kriechen. Dieser Vorgang setzt sich bis zur Materialermüdung fort.

- Durch die akkumulierte Schädigung von Zyklus zu Zyklus wird die Kornstruktur des Lots gröber durch Diffusion.
- Nachdem ca. 25 bis 50 % der Lebensdauer der Lötstelle erreicht ist, entstehen Mikroporen an den Korngrenzen.
- Mit steigender akkumulierter Schädigung entstehen aus den Mikroporen Mikrorisse. Diese wachsen und verbinden sich zu großen Rissen.
- Bei ungleichmäßiger Spannungs-Dehnungs-Verteilung in der Lotstelle kann ein größerer Riss zum Ausfall führen.

Thermische Zyklen entstehen

- Im Motorraum vom Auto beim Anlassen / Fahren / Abstellen (z.B. 2 Zyklen pro Tag).
- In der Fahrerkabine vom Auto bei Wechsel zwischen Tag und Nacht.
- Im Flugzeug bei Start / Flug / Landung.
- ...

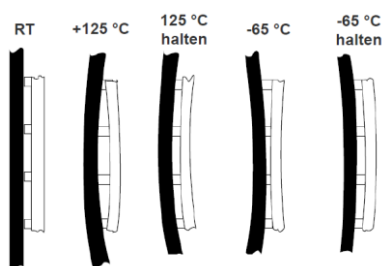


Schadenmechanismus durch thermischen Schock

- Beim thermischen Schock resultieren die extrem schnellen Temperatur-veränderungen von 30°C/Minute oder mehr darin, dass sich die SMT- Baugruppe verbiegt.
- Die Verbiegung wird durch die großen zeitlich durch den Temperatursausgleich bedingten Temperaturgradienten der einzelnen Komponenten verursacht, wenn diese einem schnellen Temperaturwechsel ausgesetzt sind.
- Dies resultiert in einer Zug-/ Druck- sowie in einer Scherbeanspruchung der Lötstelle.
- Diese Beanspruchung, die zu Temperaturgradienten führt, dominiert den vorherrschenden CTE-Mismatch. D.h. sogar Baugruppen mit aufeinander abgestimmten CTE weisen Ausfälle der Lötverbindung auf, wenn sie thermischem Schock ausgesetzt sind und dabei Temperaturgradienten entstehen.

Temperaturgradienten entstehen bei

- Schnellen Veränderung der Umweltbedingungen, z.B. Wechsel Sonnen-/ Schattenseite im Weltraum
- Plötzliche und große Veränderungen des Energiestatus im Bauteil, z.B. Strom-/ Spannungsüberhöhung
- Unterschiedlichen Fertigungs- oder Reparaturprozessen, z.B. erneutes Aufschmelzen



Thermomechanische Durchbiegung einer SMT Baugruppe hervorgerufen durch Temperaturgradienten beim thermischen Schock

→ Beim thermischen Schock sind die Spannungen größer als beim langsamen Temperaturwechsel.

Schadenmechanismus durch Vibration

Schäden, die durch Vibration an SMT-Lötstellen verursacht werden, unterscheiden sich grundlegend von thermisch induzierten Schäden. Thermischer Stress ist durch CTE-Mismatch zwischen einzelnen Komponenten oder durch Temperaturgradienten bedingt.

- Vibrationen sind periodische Bewegungen um den Schwerpunkt einer Baugruppe, die in vielen Bereichen vorkommen, wie Automotive-, Luft- und Raumfahrt- sowie Militäranwendungen.
- Vibrationen von relativ hohen Frequenzen (> 30 Hz) bewirken eine elastische Belastung der Lötstelle, d.h. der mechanische Stresseintrag ist gering und der Ausfall erfolgt nach vielen Schwingungszyklen (HCF, $> 10^4$ Zyklen)
- Vibrationen werden z.B. durch das Chassis und/oder das Gehäuse auf die Leiterplatte übertragen.
- Durch die Relativbewegung zwischen Platine und der Befestigung der Platine an den Ecken wird eine Durchbiegung der Platine erzeugt.
- Der induzierte Stress in einer SMT Lötstelle ist abhängig vom Krümmungsradius der Platine bedingt durch die Durchbiegung und von der Position des Bauteils auf der Platine.
- Der Schadensmechanismus ist letztendlich bedingt durch ein lokales plastisches Verhalten. Kleine Spannungskonzentrationen, bevorzugt an Oberflächendefekten der Lötstelle oder an Interfaces, induzieren lokale plastische Dehnungen, welche Mikrorisse zur Folge haben. Die Mikrorisse wachsen weiter zu großen Rissen, welche zum Ausfall der Lötstelle führen.

7.3 Zuverlässigkeitstests

Übersicht über die wichtigsten Prüfverfahren

mechanischer Stress	thermischer Stress	klimatischer Stress	Korrosion
Vibrationsprüfung - MIL-STD-810 - sinusförmiger Schw. - rauschförmiger Schw. Mechanischer Shock - bei vorgegebenen Schockformen DIN EN 60 068-2-27 - Falltest ISO 4180/2	Lagerung bei konstanter Temperatur - Tieftemperaturlagerung IEC 60 068-2-1 - Hochtemperaturlagerung IEC 60 068-2-2 Lagerung bei wechselnder Temperatur - Zwei-Kammer-Temperaturschock-Prüfung IEC 60 068-2-14 Na - Temperaturwechselprüfung IEC 60 068-2-14 Nb	Feuchte Wärme - zyklisch IEC 60 068-2-30 - konstant IEC 60 068-2-56 Kondenswasserprüfung - DIN 50 017	Salzsprühnebelprüfung - DIN 50 021 SS Kondenswasserprüfung mit Schwefeldioxid - EN ISO 6988

Beschleunigte Zuverlässigkeitstests

Die Lebensdauer von Mikrosystemen bzw. von Fahrzeugen, Maschinen und Anlagen, in denen die Mikrobaugruppen verbaut sind ist groß im Vergleich zur Entwicklungszeit.

Produkt	Entwicklungszeit [a]	Lebensdauer [a]
PKW	4	15
LKW	6	25
Flugzeug	10	30
Werkzeugmaschine	3	10
Implantat	5	10
Phone	0,5	3

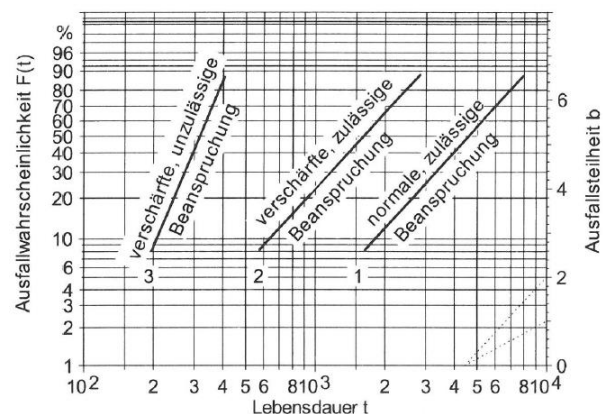
Um die Zuverlässigkeit eines Systems während der Entwicklungszeit überprüfen zu können ist es daher nicht möglich, unter genau denselben Stressbedingungen wie während der Lebenszeit des Systems zu prüfen. Daher werden beschleunigte Zuverlässigkeitstest

durchgeführt, bei denen in kurzer Zeit ein Belastungskollektiv appliziert wird, das die selben Auswirkungen auf Ausfälle haben soll, wie die während der Lebensdauer des Produkts zu erwartenden Belastungen. Die Beschleunigung oder Raffung erfolgt durch höhere Frequenz der Belastungen, höhere Temperaturen, verschärfte Feuchteeinwirkung, korrosivere Umgebung, ...

Beschleunigte Alterungstests

Bei gleicher Ausfallsteilheit ($b > 1$) darf der Versuch gerafft werden. Für Temperaturwechseltests bedeutet dies ein höheres ΔT (z.B. bei Kurve **1** $\rightarrow 100^\circ\text{C}$, bei Kurve **2** $\rightarrow 125^\circ\text{C}$). Unzulässig ist eine Beanspruchung, wenn durch den Test Fehlermechanismen verursacht werden, die im Feld nicht auftreten (z.B. bei Kurve **3**, hat anderen Formfaktor b).

Beispielsweise darf bei el. Aufbauten auf Leiterplatten (oder alternativen Substraten) die Glasübergangstemperatur im Test nicht überschritten werden, wenn diese im Feld ebenfalls nicht überschritten wird.

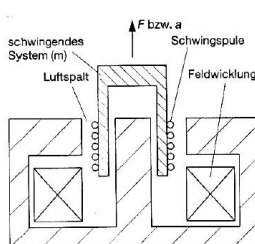


Übersicht über wichtige Testbedingungen der KFZ-Industrie

- Temperaturschock (zwei Kammer)
 - Temperaturwechsel -40°C/+85°C (Innenraum)
 - Temperaturwechsel -40°C/+125°C (Motorraum)
 - Temperaturwechsel -40°C/+150°C (Motoranbau)
 - Für Technologieerprobung min. 1000 TW und/oder bis End of Life (EOL)
 - Für Geräteerprobungen typisch 30-200 TW
- Feuchtelagerung 1000h 40°C/93% rel. H. oder 85°C/85% rel. H.
- Feuchtzyklus 95% rel. H. 25°C/55°C
- Temperaturlagerung bei T_{max} und T_{min} je 1000 h
- Prüfkriterien
 - Optische Kontrolle, Haftfestigkeit Leiterbahn, Funktion, Scherkräfte,...
 - Bei Kontakten Übergangswiderstand, mech. Kennwerte

Vibrationsprüfungen

Zweck der Vibrationsprüfung ist die Simulation der Vibrationen beim Transport durch LKW oder Flugzeug und im Betrieb des Produkts, z.B. im PKW. Als Prüfgerät wird ein elektrodynamischer Shaker verwendet.



Kenngrößen:

- Kraftvektor ($F=m \cdot a$)
- max. Amplitude
- Resonanzfrequenz
- max. Geschwindigkeit

Ansicht eines 5 kN-Shakers



Industrielle Anwendungen

- ✓ Test Automotive-Komponenten
- ✓ Test Flugzeugkomponenten
- ✓ Test el. Baugruppen
- ✓ Vibrations-Stress-Test unter wechselnden Einsatzbedingungen
- ✓ Ermittlung von Eigenfrequenzen

Hochtemperaturstress

Ursache:

- Betrieb bei hoher Umgebungstemperatur
- Interne Erzeugung von Wärme
- Lagerung bei hoher Temperatur, z.B. bei Sonneneinstrahlung im Auto

Auswirkungen:

- Festigkeit bei Kunststoffen
- Gedächtniseffekt bei tiefgezogenen Kunststoffen
- Verschlechterung der Schmierung
- Veränderung der Gefügestruktur beim Löten u.v.a.

• **Prüfungen:** Hochtemperaturlagerungen und Hochtemperaturdauerlauf

• **Beschleunigte Prüfungen** durch Aktivierung nach Arrhenius

Arrhenius:

$$F(T, T_0) = \frac{\lambda(T)}{\lambda(T_0)} = \exp\left(-\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right)$$

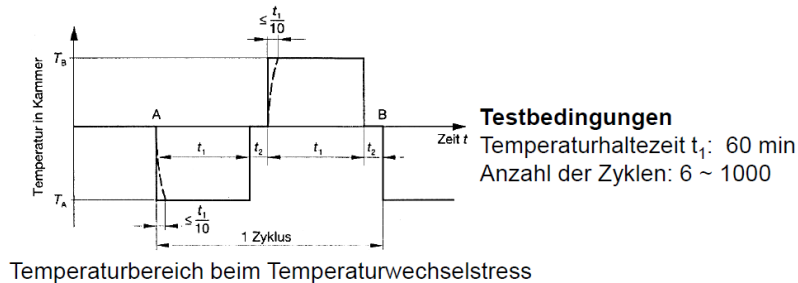
- E_a Aktivierungsenergie ($E_a = 0,4 \dots 0,6$ eV bei Ics)
- $k = 8,617 \cdot 10^{-5}$ eV/K Boltzmann-Konstante
- T, T_0 Temperatur in Kelvin
- F Zeitlicher Raffungsfaktor
- λ Ausfallrate

z.B. bei $E_a = 0,5$ eV und einer Temperaturerhöhung von 20°C auf 130°C ist $F = 222$

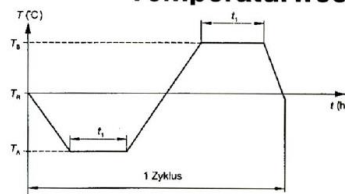
Temperaturwechselstress oder „Temperaturschocktest“

- **Ursache:** Wechselnde Umgebungstemperatur, wechselnde innere Wärmeentstehung, z.B. Kaltstart des KFZ im Winter
- **Auswirkungen:** Wechselnde mechanische Spannungen wegen unterschiedlicher Ausdehnungskoeffizienten

Die Prüfung wird mit einer Zwei-Kammer-Temperaturschock-Prüfung (IEC 60068) durch Überführung der Prüflinge zwischen einer „heißen“ (+125°C) und einer „kalten“ (-40°C) Kammer durchgeführt.



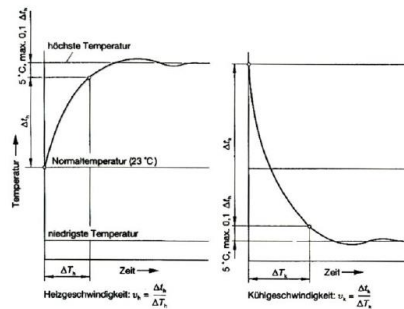
Temperaturwechselprüfung (IEC 60 068)



T_A = untere Temperatur
 T_B = obere Temperatur
 t_1 = Verweilzeiten

Temperaturwechselprofil

Die Temperatur wird mit der Temperaturgeschwindigkeit von 1...5 K/min geändert. Die Prüfung wird mit und ohne Funktion des Prüflings durchgeführt.



Heiz- und Kühlgeschwindigkeit

Typische Temperaturbereiche

Temperaturbereich	Anwendungen
-40°C - 85°C	Automatisierungstechnik, KFZ-Innenraum
-40° - 125°C	KFZ Technik Motorraum
-40°C - 125°C	KFZ Technik Motoranbau

Beschleunigung von langsamen Temperaturwechselversuchen

Wird ein Produkt im Feldeinsatz dauernden Temperaturwechseln ausgesetzt, dann kann eine Beschleunigung der Temperaturwechsel mit folgender Überlegung erreicht werden:

Eine höhere Beanspruchung B_2 kann innerhalb einer kürzeren Zeit t_2 die gleiche Bauteilschädigung hervorrufen wie eine niedrigere Beanspruchung B_1 innerhalb einer längeren Zeit t_1 :

$$t_2 = t_1 \left(\frac{B_1}{B_2} \right)^k$$

Der materialabhängige Exponent (Beschleunigungsfaktor) k muss experimentell bestimmt werden und ist abhängig vom Bauteil und Fehlermechanismus, der zum Ausfall führt.

Erhöhung des Temperaturhubes

Wird das Bauteil im Feldeinsatz sich ändernden Temperaturen $T_1 \leq T \leq T_2$ ausgesetzt, so kann eine Beschleunigung dadurch erzeugt werden, dass der im Feld auftretende Temperaturbereich vergrößert wird. Diese hierbei entstehenden temperaturbedingten Bauteilspannungen sind größer als die im Feldeinsatz auftretenden Spannungen, weshalb eine geringere Zyklenzahl eine entsprechende Wirkung hat. Mit untenstehender Gleichung kann aus dem beschleunigten Test auf die zu erwartende Lebensdauer im Feldeinsatz geschlossen werden. Es gilt:

$$n_1 = n_2 \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right)^k$$

- n_1 : Anzahl der Temperaturwechsel bis zum Ausfall bei realer Belastung im Betrieb
- n_2 : Anzahl der Temperaturwechsel im Laborversuch
- ΔT_1 : Temperaturamplitude im Feldeinsatz
- ΔT_2 : Temperaturamplitude im Laborversuch
- k : Materialabhängiger Exponent (Beschleunigungsfaktor)

Einsatzbedingungen und empfohlene beschleunigte Testumgebungen für SMT-Verbindungen bei langsamer Temperaturwechselbelastung

Einsatzbereich	Worst-Case Einsatzumgebung (Feld)					Typical years of service	Approx. accept. failure risk [%]	Beschleunigte Testumgebung			
	T_{min} [°C]	T_{max} [°C]	$\Delta T^{(1)}$ [°C]	t_D [h]	Cycles [a ⁻¹]			T_{min} [°C]	T_{max} [°C]	$\Delta T^{(2)}$ [°C]	t_D [min]
Konsument	0	+60	35	12	365	1-3	1	+25	+100	75	15
Computer	+15	+60	20	2	1460	5	0.1	+25	+100	75	15
Telekom.	-40	+85	35	12	365	7-20	0.01	0	+100	100	15
Verkehrsflugzeug	-55	+95	20	12	365	20	0.001	0	+100	100	15
Industrie & Automotive Innenraum	-55	+95	20 & 40 & 60 & 80	12 12 12 12	185 100 60 20	10	0.1	0	+100	100	15
Militär Boden & Schiff	-55	+95	40 & 60	12 12	100 265	10	0.1	0	+100	100	15
Weltraum	-55	+95	3 ... 100	1 12	8760 365	5-30	0.001	0	+100	100	15
Militär Luftfahrt-elektronik	-55	95	40 60 80 & 20	2 2 2 1	365 365 365 365	10	0.01	0	+100	100	15
Automotive Motorraum	-55	+125	60 & 100 & 140	1 1 2	1000 300 40	5	0.1	0	+100	100	15

• T_{max}/T_{min} ... max./min. Einsatz-/Testtemperatur

• ΔT ... maximale Temperaturamplitude

• t_D ... Haltezeit der Temperatur

1) ΔT steht für die maximale Temperaturamplitude. Es muss beachtet werden, dass der Temperaturbereich ΔT nicht die Differenz zwischen den möglichen Betriebstemperaturextremen T_{max} und T_{min} darstellt, typischerweise ist ΔT signifikant geringer.

2) Bei allen beschleunigten Temperaturwechseltests sollten die Rampen < 20 °C/min und die Haltezeiten 15 min, gemessen auf den Testboards, betragen. Dies ergibt ca. 24 Testzyklen/Tag.

3) Der Ausfallmechanismus von Lot ändert sich bei niedrigeren Temperaturen; für Baugruppen, die hauptsächlich kalten Umgebungen ausgesetzt sind, sollten zusätzlich „**COLD**“ Tests durchgeführt werden; es werden z.B. Rampen von -40 bis 0°C empfohlen, mit Haltezeiten die so lange andauern, bis im gesamten Bauteil die gleiche Temperatur vorherrscht. Es sollten die gleichen „**Cold**“ Zyklenzahlen wie im Feldversuch getestet werden.

4) Der Schadensmechanismus von Lot ändert sich für große Temperaturamplituden wenn der Übergangsbereich zwischen -20 °C und 20 °C durchschritten wird; bei Baugruppen die solchen Zyklen im Feld ausgesetzt sind, sollten zusätzlich „**LARGE ΔT** “ - Tests durchgeführt werden, mit gleichem ΔT und gleicher Zyklenzahl wie im Feldversuch.

Korrosionsstress

- **Ursache:** Feuchte, salzhaltige Feuchte, saurer Regen, Reibung in aggressiver Atmosphäre (Reibkorrosion)
- **Auswirkungen:** Elektrolytische Korrosion: Auflösung des unedleren Metalls bei Metallkombinationen
- Der Korrosionstest wird mit einer **Salzsprühnebelprüfung** (DIN 50 021 SS) durch Besprühen mit Salznebel in einer Schrankanlage durchgeführt.
- Prüfparameter:
 - Lufttemperatur 35 ± 2°C (Beschleunigung)
 - Salzgehalt im Wasser 5% NaCl, pH-Wert 6,5...7,2
 - Testdauer 144 - 168 Std
- Varianten zur Beschleunigung des Korrosionstest:
 - Zugabe von Essigsäure pH 3,1...3,3
 - Zugabe von Essigsäure und Kupfer(II)chlorid
 - Kombinierte Prüfungen mit Zyklen aus Sprühphasen, Feuchtelagerung und Lagerung im Normalklima.

Beispiel: Temperaturschocktest

Versuchsprogramm:

5 elektronische Bauteile

- 3 Keramikwiderstände CR1206, CR0805, CR0603 (Steife Verbindung)
- SO8 **Daisy Chain** (Flexible Verbindung)
- MLF®/MicroLeadFrame® → **Daisy Chain** (Steife Verbindung)

4 Substratmaterialien

- Pocan DP T7140 LDS (MID)
- Ultramid T4381 LDS (MID)
- LCP Vectra E840i LDS (MID)
- FR4 (Standardleiterplatte)

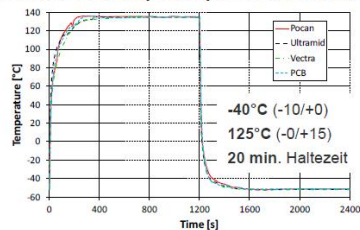
40 Testvehikel pro Substrat (IPC-9701)

- Lot: Heraeus F640 SAC305

1. Testaufbau mit 480 Anschlüssen



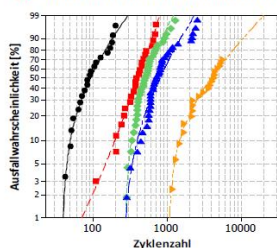
2. Gemessenes Temperaturprofil nach JEDEC JESD22



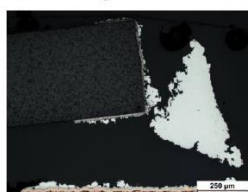
3. 2-Kammer Prüfschrank



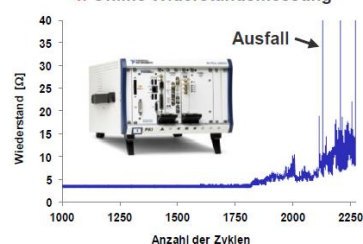
6. Charakteristische Lebensdauer



5. Bestimmung der Ausfallsursache



4. Online Widerstandsmessung

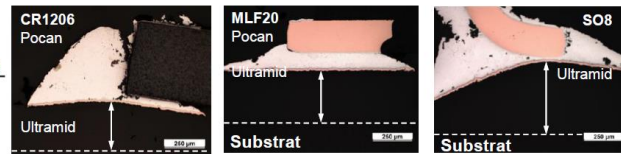


Ausfallursachen beim Temperaturwechseltest

Kriechbruch im Lot

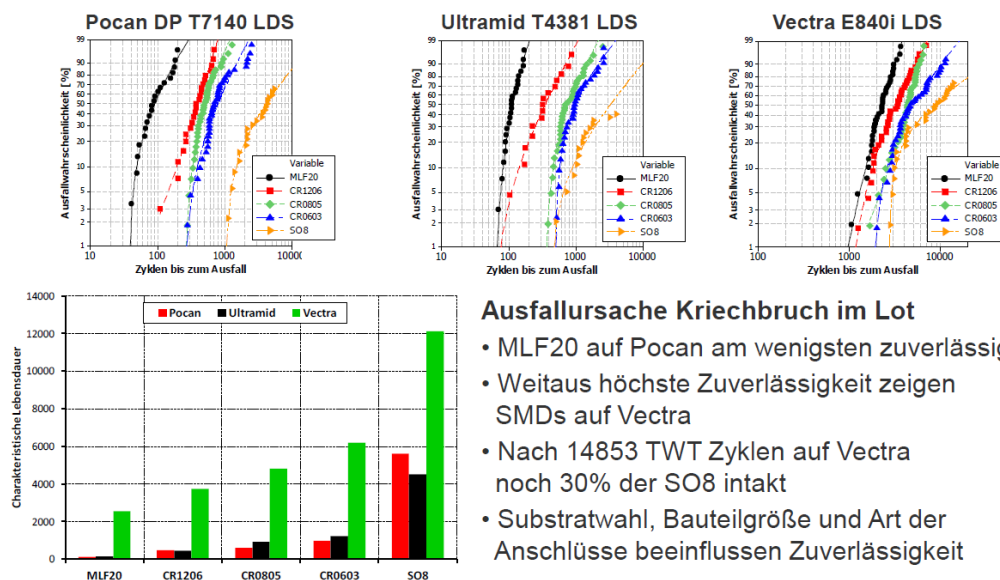


Ablösen der Metallschicht

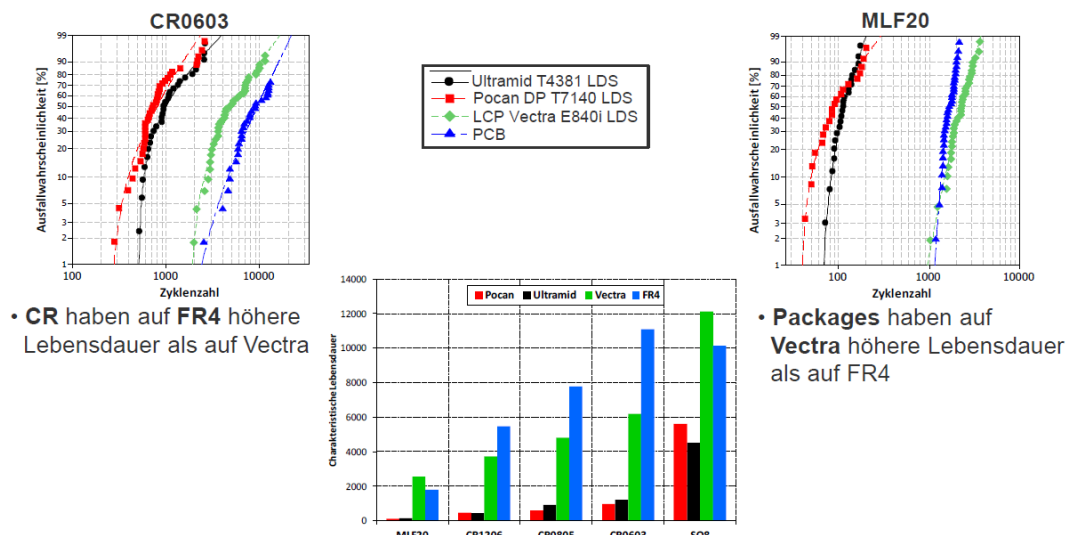


- Kriechbruch im Lot als Hauptausfallursache
- Ablösen der MID-Metallschicht vom Substrat
- Mischbruch durch Ablösen der MID-Metallschicht bei schon vorhandenem Riss im Lot
- Substratwahl, Bauteilgröße und Art der Anschlüsse beeinflussen Ausfallursache

Lebensdauer beim Temperaturschocktest

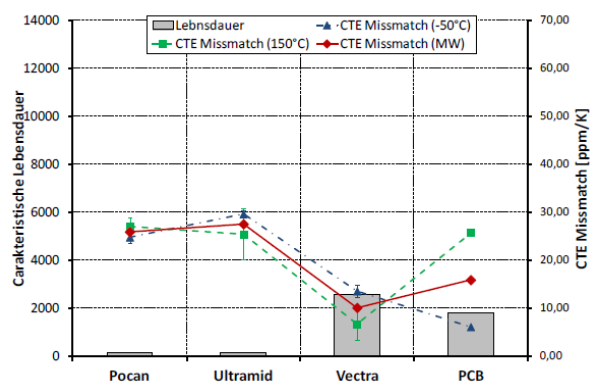
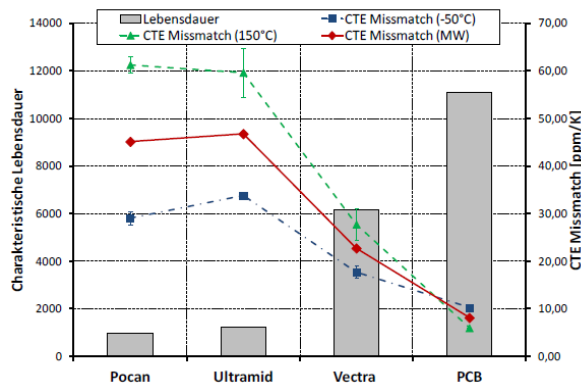


Lebensdauer von MID und Leiterplatten (FR4)



Einfluss CTE-Mismatch auf die Lebensdauer

Ausfallmechanismus: Unterschiedliche CTE zwischen Substrat und SMD verursachen thermo-mechanische Spannungen in den Verbindungsstellen

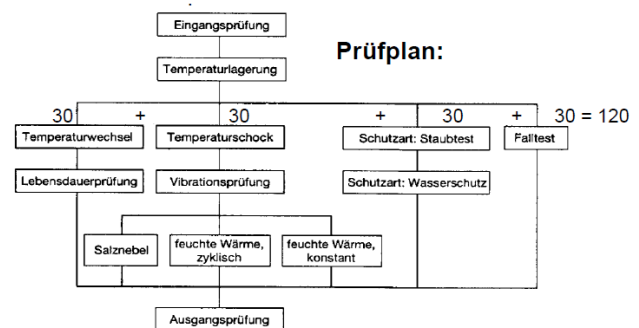


- Bei **CR0603** niedrigerer mittlerer CTE Mismatch auf **FR4** als auf Vectra
 - Bei **MLF20** niedrigerer mittlerer CTE Mismatch auf **Vectra** als auf PCB
- Je geringer der CTE-Mismatch der einzelnen Komponenten, desto höher die Zuverlässigkeit

Durchführung der Zuverlässigkeitsprüfung nach Prüfplan

Bei Serienprodukten wird im Rahmen der Produktqualifizierung eine Zuverlässigkeitsprüfung nach Prüfplan durchgeführt. Dabei werden Prüfungen entsprechend der Anwendung der Produkte und der Normen aufgelistet und berücksichtigt. Die Durchführung der Prüfungen erfolgt nach dem Prüfplan, der Teil des Lastenheftes ist.

Die Stückzahl der Prüflinge liegt bei ICs und mikrosystemtechnischen Sensoren oder Bauelementen typisch im Bereich von 250 - 500. Daher können mit der Prüfung systematische Fehler sicher erkannt werden. Stochastische Fehler mit geringer Fehlerwahrscheinlichkeit werden i.d. Regel nicht erkannt. Bei Geräten und Systemen ist die Anzahl der Prüflinge je nach Seriengröße geringer. Die Zahl der zulässigen Ausfälle ist gering (0,1) !



7.4 Materialdatenbestimmung

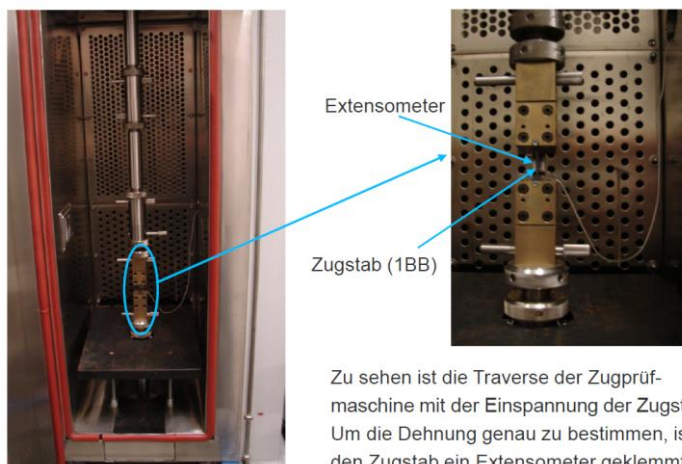
Für Zuverlässigkeitsanalysen benötigte Materialdaten

Um die mechanischen Eigenschaften und die Zuverlässigkeit eines Systems / einer Baugruppe / eines Bauelements hinreichend genau bestimmen zu können, müssen die dafür notwendigen Materialdaten mit ihrer Temperaturabhängigkeit ermittelt werden.

Materialkennwert	Bestimmung durch	Norm
E-Modul	Zugversuch / DMA	Din EN 10 002 / DIN EN ISO 527 / DIN EN ISO 6721
Schubmodul	Torsionsversuch / DMA	DIN EN ISO 6721
Bruchspannung	Zugversuch	Din EN 10 002 / DIN EN ISO 527
Bruchdehnung	Zugversuch	Din EN 10 002 / DIN EN ISO 527
Plastische Dehnung	Zugversuch	Din EN 10 002 / DIN EN ISO 527
Kriechdehnung	Zeitstandzugversuch	DIN EN ISO 899
Querkontraktionszahl	Grauwertkorrelation / Zugversuch / Berechnung über E-Modul und Schubmodul	DIN EN ISO 527
Thermischer Ausdehnungskoeffizient	Thermomechanische Analyse (TMA)	ISO 11359

Zugprüfmaschinen bei Hahn-Schickard / am IFM

TIRAtest mit Klimakammer:



Zu sehen ist die Traverse der Zugprüfmaschine mit der Einspannung der Zugstäbe. Um die Dehnung genau zu bestimmen, ist auf den Zugstab ein Extensometer geklemmt.

oder Maschine von Zwick/Roell

Bei Hahn-Schickard / am IFM verwendete Zugstäbe

Maße in mm		
Probekörpertyp	1BA	1BB
l_3 Gesamtlänge	≥ 75	≥ 30
l_1 Länge des engen parallelen Teils	$30 \pm 0,5$	$12,0 \pm 0,5$
r Radius	≥ 30	≥ 12
l_2 Entfernung zwischen den breiten parallelen Teilen	58 ± 2	23 ± 2
b_2 Breite an den Enden	$10,0 \pm 0,5$	$4 \pm 0,2$
b_1 Breite des engen Teils	$5,0 \pm 0,5$	$2 \pm 0,2$
h Dicke	≥ 2	≥ 2
L_0 Meßlänge	$25,0 \pm 0,5$	$10 \pm 0,2$
L Anfangsabstand der Klemmen	$l_2 + \frac{1}{2}$	$l_2 + \frac{1}{2}$

ANMERKUNG: Probekörper Typ 1BA und 1BB sind proportional zu Typ 1B mit einem Reduktionsfaktor von 1:2 bzw. 1:5 mit Ausnahme der Dicke.

Die thermomechanischen Eigenschaften von Thermo-plasten sind abhängig von der Einspritzrichtung aus dem Spritzgussprozess. Um die Materialeigenschaften in Abhängigkeit der Faser-orientierung messen zu können, werden Platten mit 2 mm Dicke abgespritzt. Die Zugproben werden im nächsten Schritt parallel und quer zur Einspritzrichtung aus den Platten heraus gefräst.

Technische Daten der Zugprüfmaschinen

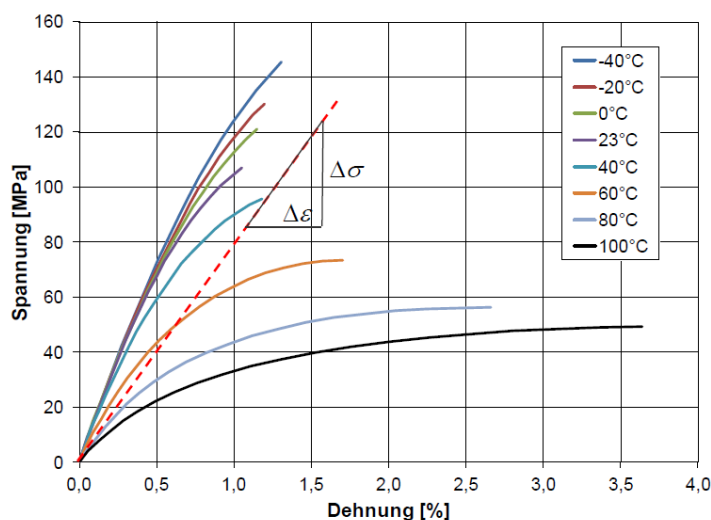
	TIRAtest	Zwick / Roell
Prüfkraft in Zug / Druck	1 kN / 10 kN	50 N / 500 N
Traversengeschwindigkeit	0,01 bis 500 mm/min	0,001 bis 1500 mm/min
Arbeitsraumhöhe	1080 mm	569 mm
Temperaturlast	-40 bis +180 °C	-----
Luftfeuchtelast	10 bis 90 %r.F.	-----
Messaufnehmer: <i>Kraft</i>	Kraftmessdose	Kraftmessdose
Messaufnehmer: <i>Dehnung</i>	Traverse / Extensometer	Traverse
Bemerkung	- Messung mit Extensometer genauer als mit Traverse - Messbasis Extensom. 10 mm - Länge Zugprobe = 3 x Messbasis Extensom.	- Einspannlänge der Zugprobe muss gemessen werden (Messbasis) - Ausgleichskurve der Einspannung muss berücksichtigt werden

Messgrößen und Materialverhalten

	TIRAtest	Zwick / Roell
Messgrößen	Spannung Dehnung Bruchspannung Bruchdehnung Streckspannung Streckdehnung Glasübergangsbereich	Spannung Dehnung Bruchspannung Bruchdehnung Streckspannung Streckdehnung
Materialverhalten	elasto-plastisch Kriechen (Spannungsgeregelt) Viskoelastizität (Dehnungsgeregelt)	elasto-plastisch

Temperaturabhängiges Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Lanxess Pocan DP T7140 LDS (parallel zur Faserorientierung)



Bestimmung des **E-Moduls** aus Spannungs-Dehnungs- Diagramm. Ermittlung der Steigung des linear elastischen Bereichs:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon}$$

Auffällig: Größere Abweichung der Steigung der Spannungs-Dehnungs-Kennlinien zwischen 40°C und 80°C als zwischen 80°C und 100°C. Im Bereich 40°C bis 80°C liegt der **Glasübergangsbereich**.

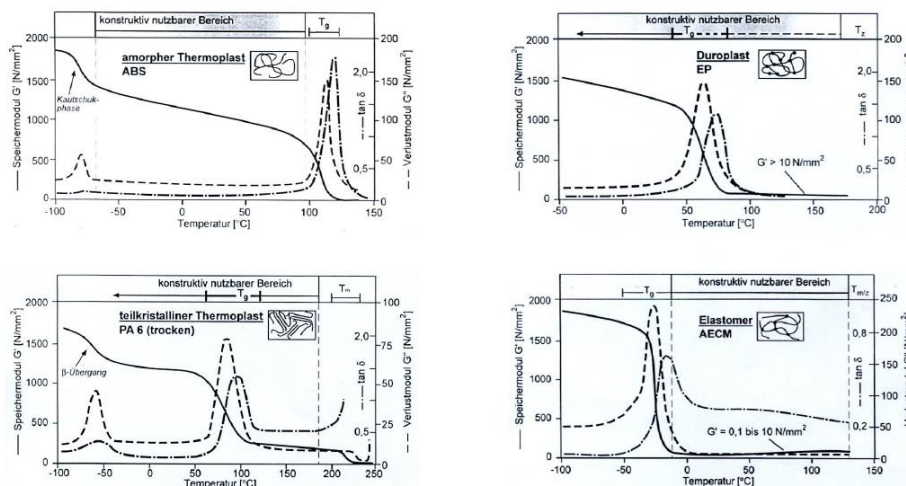
Glasübergangstemperatur

Die Glasübergangstemperatur T_g ist die Temperatur, bei der z.B. ein Kunststoff die größte Änderung seiner Verformungsfähigkeit aufweist.

Ursache:

- Durch thermische Energie werden intermolekulare Bindungen (Van der Waals-Kräfte) so weit überwunden, dass die Moleküle beweglicher werden. Dadurch verringert sich die mechanische Festigkeit, der Kunststoff ist also leichter verformbar.
- Die Bindungen werden dabei nicht aufgelöst. Die eingebrachte thermische Energie ist so hoch, dass Umlagerungen der Moleküle ohne das Anlegen einer äußeren mechanischen Spannung möglich sind, bei denen die Bindungen gelöst und wieder neu verknüpft werden, d.h. die Aktivierungsenergie für einen solche Umlagerungsprozess kann allein durch die thermische Energie zur Verfügung gestellt werden.

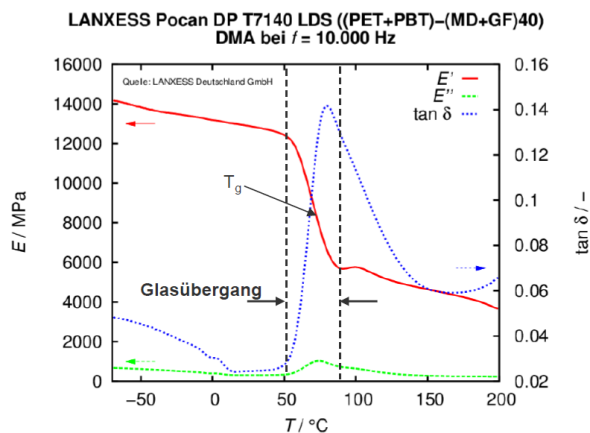
Thermomechanisches Verhalten der Polymer-Werkstoffe (ohne Füllstoffe)



$G' \approx$ E-Modul bei Schwingungsbelastung
 $G'' \sim$ Energieverlust pro Schwingung

T_g = Glasübergangstemperaturbereich
 T_m = Schmelzbereich
 T_z = Zersetzungsbereich

Temperaturabhängiger E-Modul



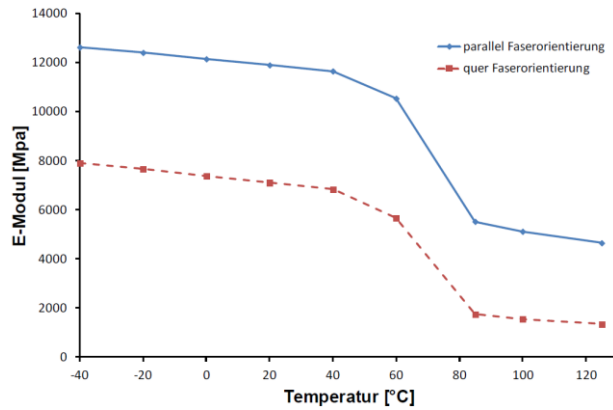
E' ... Zugspeichermodul, ist proportional zur maximal während einer Belastungsperiode gespeicherten Arbeit und stellt die Steifigkeit eines viskoelastischen Werkstoffs dar.

E'' ... Zugverlustmodul, ist Arbeit die während der Belastung dem System entzogen wird.

$\tan d$... Verlustfaktor, ist ein Maß für die Dämpfung eines viskoelastischen Systems.

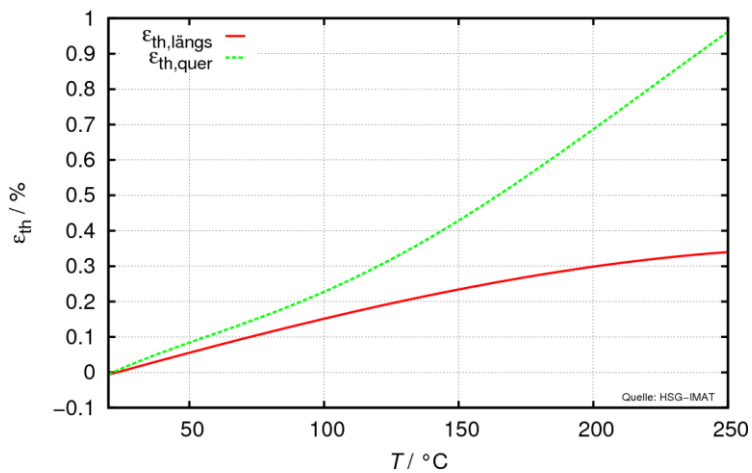
E-Modul abhängig von Temperatur und Faserorientierung

Lanxess Pocan DP T7140 LDS



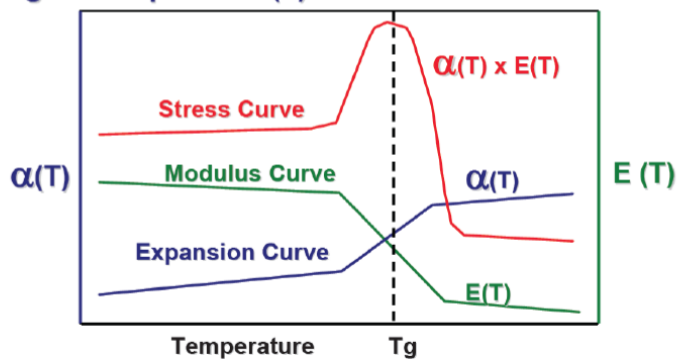
Thermische Ausdehnung (TMA)

Optimierter Hochtemperaturthermoplast: EMS Grivory XE 3844 Polyamid PA6T/6I mit 65% Glasfasern und Mineral gefüllt



Temperaturverläufe bei Duromeren + teilkristallinen Thermoplasten (schematisch)

α, E, Tg vs Temperature (T)



niedriger CTE
niedriger E-Modul

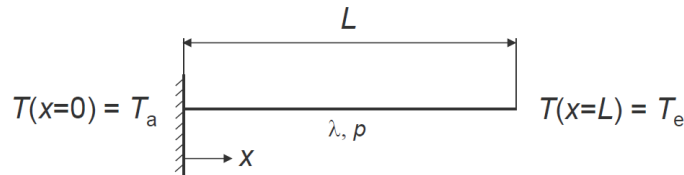


niedriger thermischer
Stress im Bauteil

7.5 Modellierung und Simulation

DGL der Wärmeleitung im Stab

Gesucht ist die stationäre Temperaturverteilung in einem Stab. Konvektion soll vernachlässigt werden. Der Stab wird durch eine Wärmequelle (T_a) mit der Leistungsdichte p beheizt. Das Material des Stabes mit Wärmeleitfähigkeit λ sei homogen, isotrop und über den betrachteten Temperaturbereich konstant. Der Stab sei radial thermisch isoliert.



Analytische Lösung und FEM-Simulation

- Leistungsdichte:

$$p = \int_{x=0}^L \frac{P}{A} dL$$

P...Leistung
A...Querschnittsfläche
L...Länge des Stabs

- Randbedingungen:

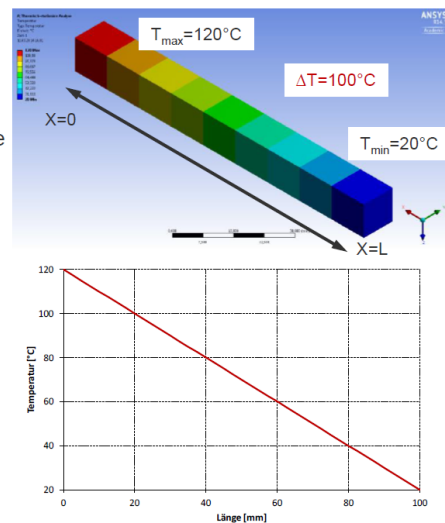
$$\lambda_{\text{Stab}} = 1 \text{ W / mK}$$

$$P = 0,1 \text{ W}$$

$$A = 10 \cdot 10 \text{ mm}^2$$

$$L = 100 \text{ mm}$$

$$\Delta T = -\frac{P}{\lambda} = -\frac{0,1 \cdot 0,1}{0,0001} \text{ K} = -100^\circ \text{C}$$



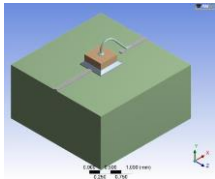
Die FEM-Software ANSYS

- ANSYS ist ein weit verbreitetes Finite Elemente Programm der 1970 gegründeten Firma ANSYS, Inc. Seit 2008 ist die Ansoft Corporation (Maxwell, HFSS, Simpler) ein Teil der ANSYS, Inc. und verstärkt den Elektromagnetikteil.
- Die aktuelle Version bietet die Möglichkeit physikalisch gekoppelte Problemstellungen zu lösen (Mechanik, Wärmeübertragung, CFD, Akustik und Elektromagnetik).
- Die Modelle können entweder in ANSYS erstellt werden oder aus CAD-Tools importiert werden.
- Modelle und Materialparameter können parametrisiert werden, um Designstudien durchführen zu können.

Beispiel 1: Stationäre Temperaturverteilung bei einer Diode

Wenn ein dauerhafter (stationärer) Zustand von Interesse ist, muss eine thermisch stationäre Simulation durchgeführt werden.

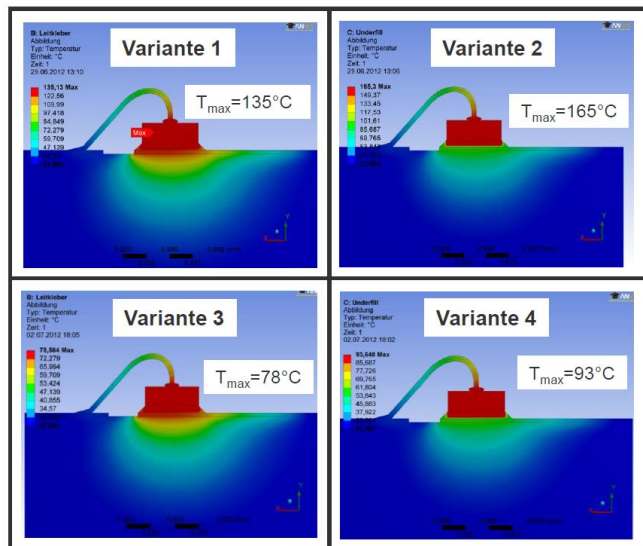
Versuchsaufbau



- Eine Diode wird mit 2 unterschiedlichen Leitklebern (ICA1, ICA2) auf eine Leiterplatte (FR4) aufgebracht
- ICA1 und ICA2 haben unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten λ_1 und λ_2
- Diode erzeugt eine Verlustleistung von 1 W / 0,5 W

Versuchsplan

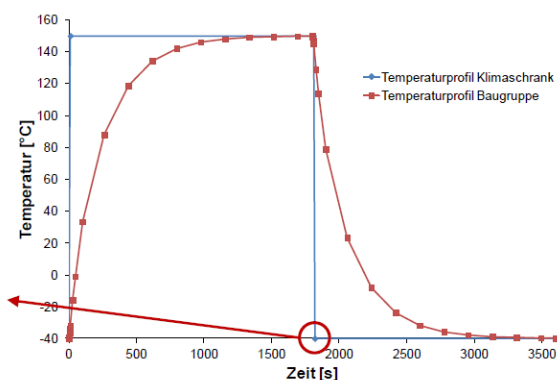
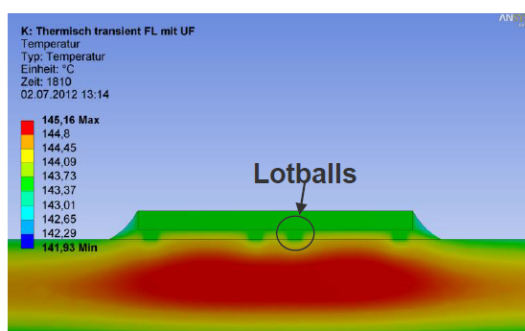
	$\lambda = 2,5 \text{ W/mK}$	$\lambda = 0,21 \text{ W/mK}$	$P_{\text{Verlust}} = 1 \text{ W}$	$P_{\text{Verlust}} = 0,5 \text{ W}$
Variante 1	X		X	
Variante 2		X	X	
Variante 3	X			X
Variante 4		X		X



Beispiel 2: Transiente Temperaturverteilung im Flip-Chip-Aufbau

Ist der zeitliche Verlauf der Temperaturverteilung von Interesse, muss eine thermisch transiente Analyse durchgeführt werden.

Das Bauteil besitzt aufgrund unterschiedlicher spezifischer Wärme und aufgrund der Konvektion eine thermische Trägheit. D.h. es folgt nicht unmittelbar dem externen Temperaturprofil (Klimaschrank), sondern unterliegt einer Zeitkonstanten.



Beispiel 3: Erstellung von Lebensdauermodellen für gelötete SMDs

Versuchsprogramm Temperaturwechseltest:

5 elektronischen Bauteile

- 3 Keramikwiderstände CR1206, CR0805, CR0603 (Steife Verbindung)
- SO8 **Daisy Chain** (Flexible Verbindung)
- MLF®/MicroLeadFrame® **Daisy Chain** (Steife Verbindung)

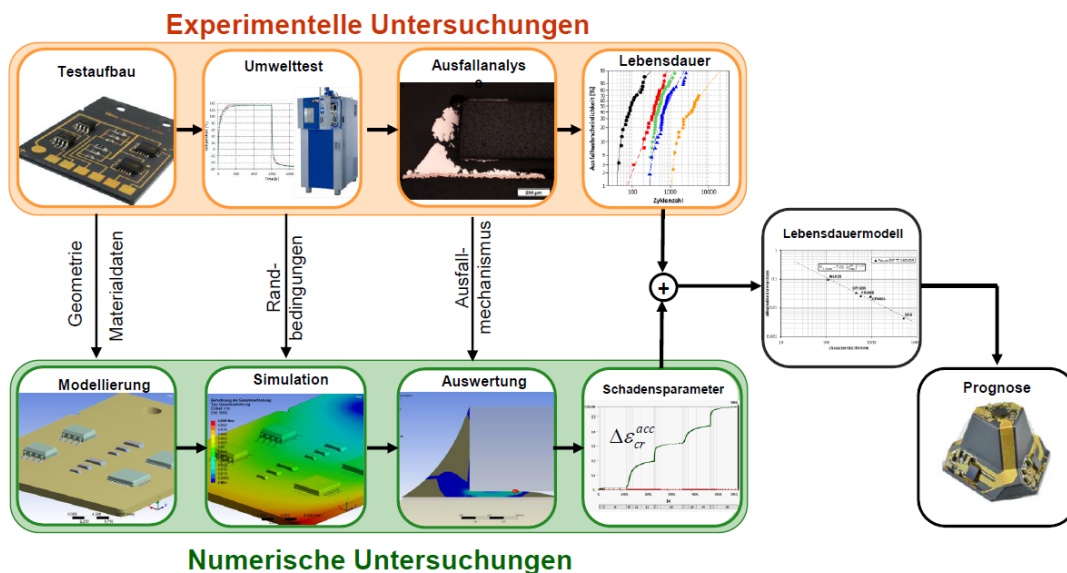
4 Substratmaterialien

- Pocan DP T7140 LDS (MID)
- Ultramid T4381 LDS (MID)
- LCP Vectra E840i LDS (MID)
- FR4 (Standardleiterplatte)

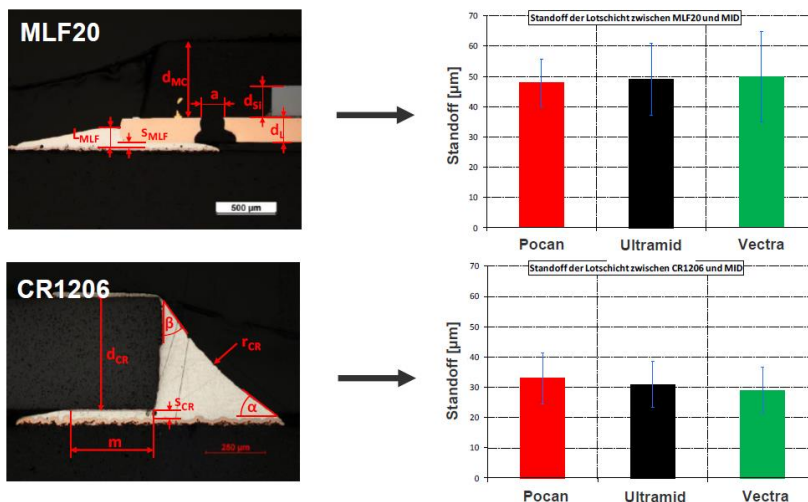
40 Test Vehicle pro Substrat (IPC-9701)

- Lot: Heraeus F640 SAC305

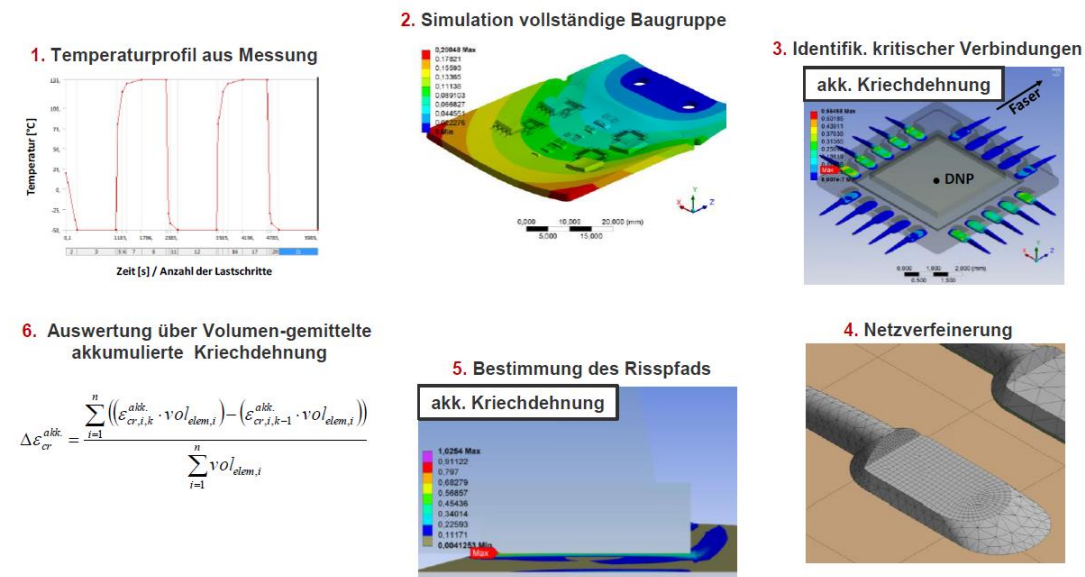
Ablauf beim Aufstellen von Lebensdauermodellen



Ausmessen von Querschliffen zur Geometrieeerstellung

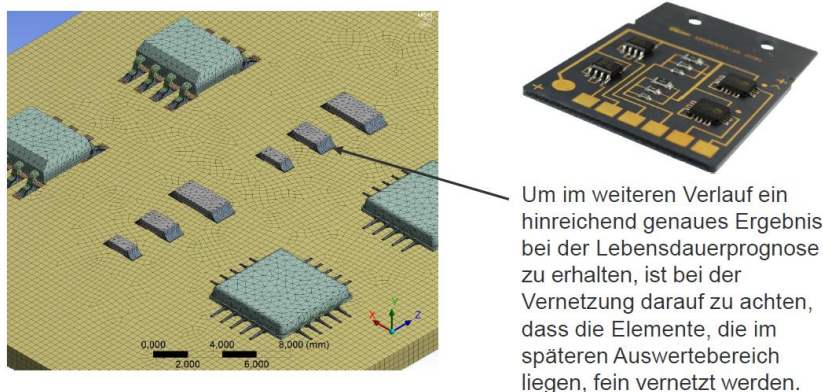


Keine signifikanten Abweichungen der Geometrieparameter zwischen den Substraten

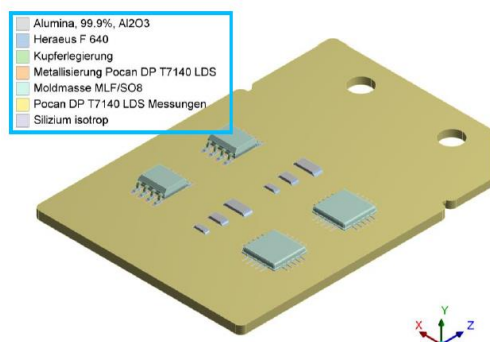


Einpflegen der Geometrie in ANSYS und Vernetzen

Die Geometrie kann aus dem CAD-Programm (ProE) in ANSYS importiert werden oder direkt in ANSYS erstellt werden.



Setzen der Randbedingungen: Materialien zuweisen



Die experimentell ermittelten Materialdaten (E-Modul, CTE, Kriechdaten,...) müssen in die Materialbibliothek von ANSYS eingepflegt werden. Diese können dem jeweiligen Element zugeordnet werden. Um eine thermisch-mechanische Analyse durchführen zu können, müssen mindestens der E-Modul und die Querkontraktionszahl angegeben werden.

Materialdaten für Ansys aufbereiten und einpflegen

Die ermittelten Materialdaten (Kriechdehnung $\varepsilon_{creep}(t, \sigma, T)$ aus den Kriechversuchen) können über verschiedene Kriechgesetze beschrieben werden. Hier wurde das Kriechverhalten über das Kriechgesetz nach **Garofalo** beschrieben.

Kriechgesetz nach Garofalo:

$$\frac{d\varepsilon_{creep}}{dt} = C_1 \cdot [\sinh(C_2 \cdot \sigma_{eqv})]^{C_3} e^{-\frac{C_4}{T}}$$

- Der **sinh** beschreibt das Kriechverhalten.
- Der **Arrhenius**-Term beschreibt den Einfluss der Temperatur

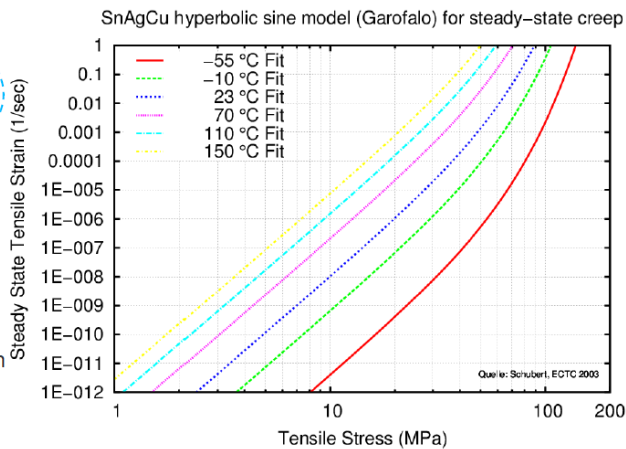
$\frac{d\varepsilon_{creep}}{dt}$... Kriechgeschwindigkeit

C_1 bis C_4 ... Materialabhängige Konstanten

σ_{eqv} ... Vergleichsspannung (von Mises)

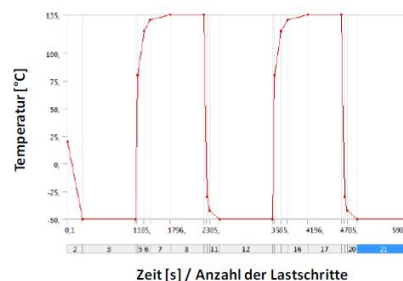
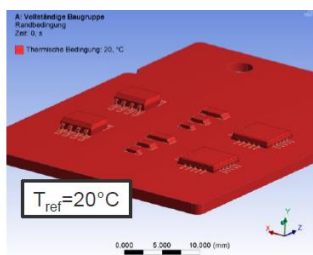
T ... Temperatur

Die ermittelten Konstanten C_1 bis C_4 werden in Ansys eingegeben.



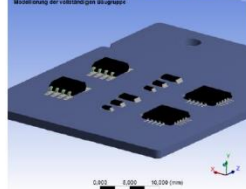
Setzen der Randbedingungen: Thermische Belastung

- Der **spannungsfreie Zustand** des Systems wird mit 20 °C angenommen. Dies ist auch die Temperatur, bei der die experimentellen Zuverlässigkeitstests beginnen.
- Da der erste Zyklus ein zu hohes Kriechdehninkrement ausgibt, das nicht repräsentativ für einen exp. Temperaturschockzyklus ist, werden 2 Temperaturzyklen berechnet und die Veränderungen vom 1. zum 2. Zyklus ausgewertet.
- Für alle Elemente werden die gleichen Temperatur- und Zeitbedingungen wie im Experiment vorgegeben: $T_{min} = -50$ °C; $T_{max} = 135$ °C; $t_{Halte} = 20$ min



Identifikation der am höchsten belasteten Stellen

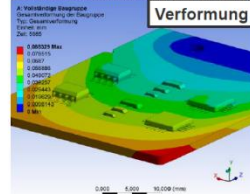
Modell vollständiger Baugruppe



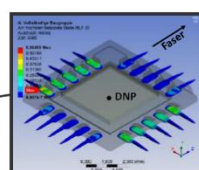
Höchsten belastete Stellen



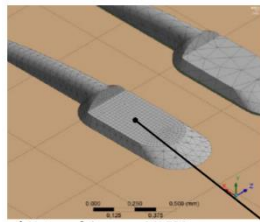
Simulation vollständiger Baugruppe



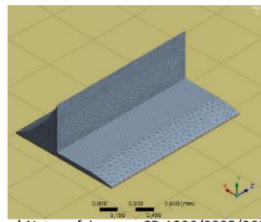
Durch Auswertung der Kriechdehnung wird die kritische Verbindung ermittelt. Das Lebensdauermodell wird nur anhand der kritischen Verbindung erstellt.



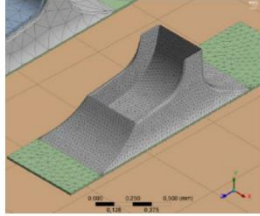
Netzverfeinerung an den kritischen Stellen



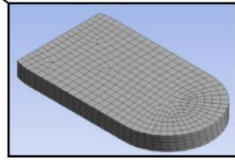
a) Netzverfeinerung MLF20



c) Netzverfeinerung CR-1206/0805/0603



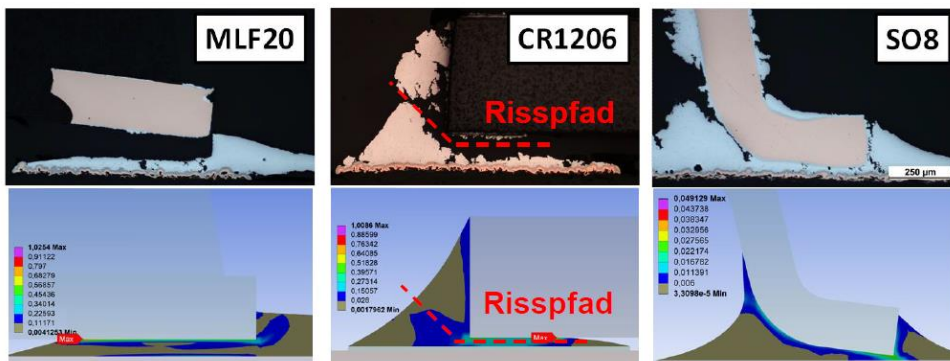
c) Netzverfeinerung SO8



Nur die kritischen Stellen sind für Zuverlässigkeit und Lebensdauerprognose relevant. Deshalb werden diese feiner vernetzt.

Validierung der Ausfallursache

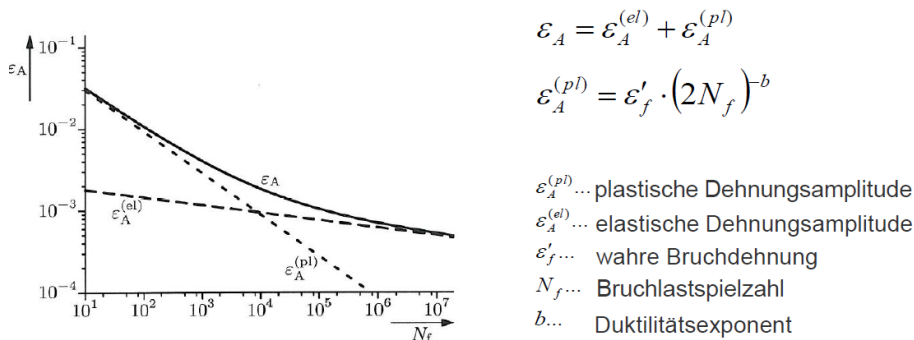
Pocan DP T7140 LDS



- Gute Übereinstimmung des Risspfads zwischen FEM und Experiment bei allen Komponenten
 - Gute Voraussetzung zur Erstellung von Lebensdauermodellen
- Aus experimentell bestimmter Lebensdauer und FEM-Simulation wird Lebensdauermodell erstellt.

Dehnungswöhlerdiagramm und Coffin-Manson-Gleichung

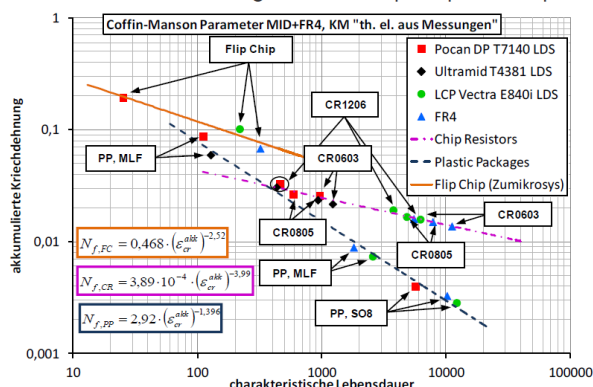
Trägt man die Dehnungsamplitude ε_A (N_f) über N_f doppelt-logarithmisch auf, so erhält man das Dehnungs-Wöhler-Diagramm. Es sind zwei lineare Bereiche zu erkennen, die fließend in einander übergehen. Diese linearen Bereiche können dem elastischen und dem plastischen Anteil der Gesamtdehnung zugeordnet werden.



Großen Bruchzyklenzahlen (HCF) entspricht eine kleine Spannungsamplitude, bei der nur eine geringe plastische Dehnung auftritt, wodurch die Gesamtdehnung hier dem elastischen Anteil entspricht. Bei geringen Bruchzyklenzahlen (LCF) und hohen Spannungen, wie sie bei Lotverbindungen vorkommen, dominiert der plastische Anteil. Dieser Anteil kann über die Coffin-Manson-Gleichung angenähert werden.

Lebensdauermodell

Coffin-Manson-Beziehung für MID + Flip Chip + Leiterplatte



- Unterschiedliche Bauteiltypen ergeben unterschiedliche Coffin-Manson Parameter
- Verschiedene Substratmaterialien ergeben bei denselben Bauteiltypen dieselbe Modellbeschreibung

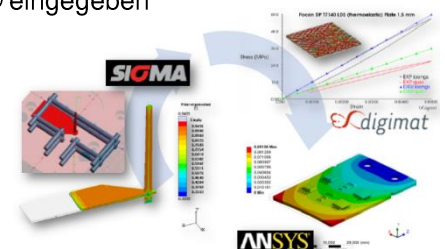
Materialmodelle für Thermoplaste

Materialmodelle ohne Kopplung der Spritzgussimulation

- Thermo-elastisch (th. el. aus Messungen)
- E-Modul u. CTE aus Messungen werden Richtungsabhängig in Ansys® eingegeben

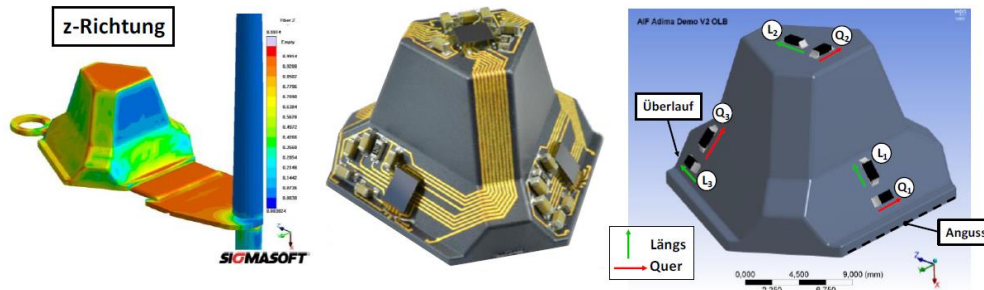
Materialmodelle mit Kopplung der Spritzgussimulation

- Thermo-elastisch (th. el. gekoppelt)
- Erstellt mit *digimat*® in Abhängigkeit der Faserorientierung
- Thermo-visko-elastisch (visko. th. el. gekoppelt)
- Erstellt mit *digimat*® in Abhängigkeit der Faserorientierung



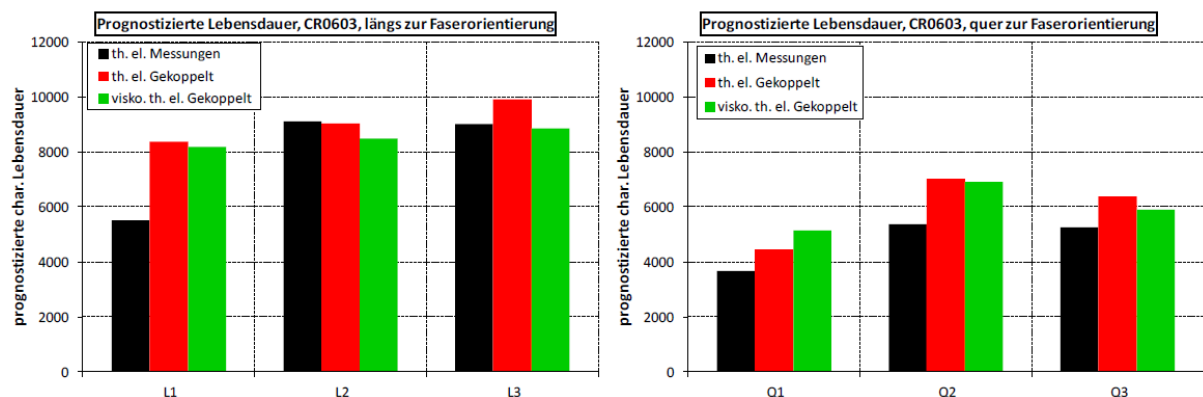
Lebensdauerprognose: 3D-MID Adima-Demonstrator

- CR0603 längs/quer zur Faserorientierung angeordnet
- Material: Vectra E840i LDS
- Spritzgusssimulation
- Berechnungen mit aufgestellten Materialmodellen
- Lebensdauerprognose mit zugehörigen Coffin-Manson-Parametern



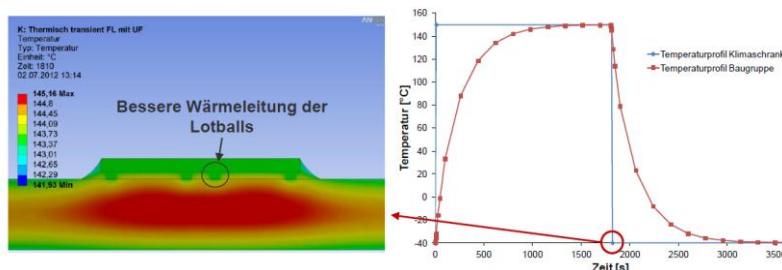
Vergleich prognostizierter Lebensdauern der CR0603 Widerstände

- Alle Kunststoffmodelle bilden Unterschiede in Lebensdauer längs und quer zur Faserorientierung ab
- Kunststoffmodelle mit Kopplung bilden lokale Unterschiede in jeweiligen Ebenen ab
- Für 3D-MID ist gekoppelte Simulation über digimat® empfehlenswert
- Thermo-elastische Modellbeschreibung hierfür ausreichend



Beispiel 4: Verfeinerung der Lebensdauerprognose durch vorgeschaltete thermisch transiente Analyse

Das Bauteil besitzt aufgrund unterschiedlicher spezifischer Wärme und aufgrund der Konvektion eine thermische Trägheit. D.h. es folgt nicht unmittelbar dem externen Temperaturprofil (Klimaschrank) sondern unterliegt einer Zeitkonstanten.

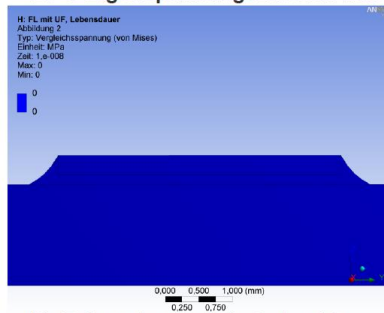


Das sich ergebende Temperatur-/ Zeitprofil wird im Weiteren bei der thermomechanischen Analyse, also Lebensdauerberechnung, verwendet.

Simulation der Temperaturwechselzyklen

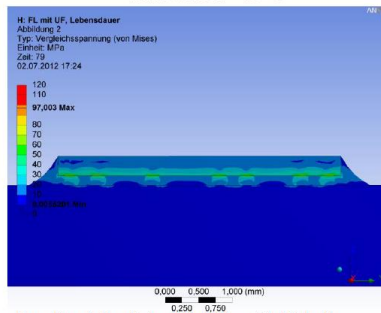
Im Folgenden ist dargestellt, wie sich der Spannungszustand im Flip-Chip Aufbau während Temperaturwechselzyklen ändert. Hierfür wurden die Spannungen bei unterschiedlichen Temperaturen ausgewertet.

20°C Eigenspannungszustand null



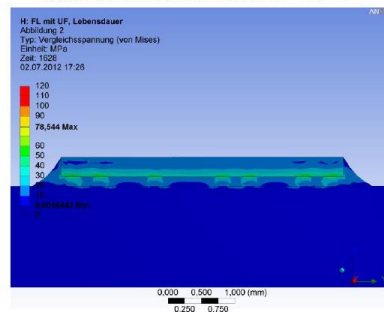
Die Referenztemperatur im System ist 20°C. Der Aufbau wird hier als „perfekt“ gerade angenommen

Abkühlen -40°C



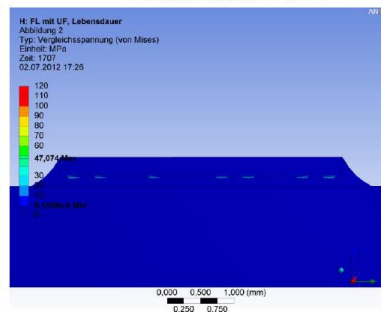
Das Bauteil mit der höchsten Steifigkeit bestimmt den Spannungszustand in der Baugruppe

Nach 30 min Haltezeit bei -40°C



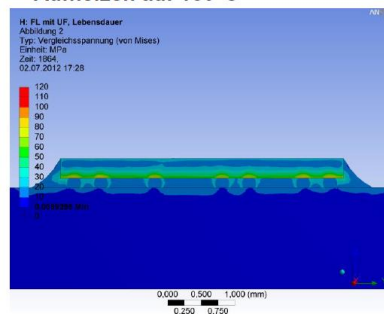
Leichter Spannungsabbau zu erkennen (vgl. Maximalwerte). Dies ist durch das Kriechen des Lots bedingt.

Aufheizen auf 20°C



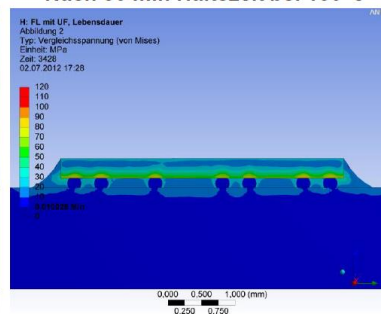
Der Spannungszustand ist nicht mehr wie zu Beginn null. Durch das Kriechen des Lots ist die Baugruppe bei 20°C nun leicht verformt.

Aufheizen auf 150°C



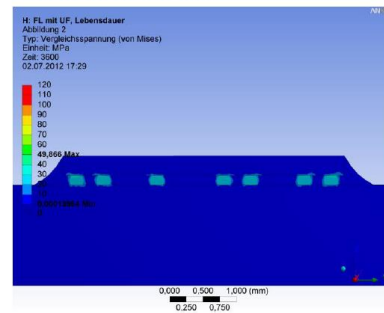
Höhere Spannungen im Chip als bei -40°C da größeres DT zu 20°C.

Nach 30 min Haltezeit bei 150°C



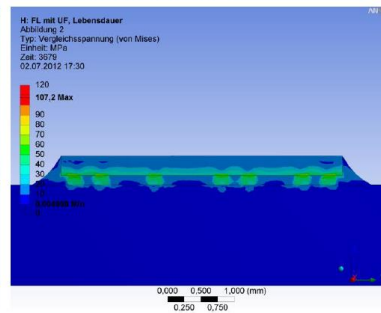
Es fällt auf, dass die Spannungen im Lot weitestgehend durch Kriechen abgebaut wurden.

Abkühlen auf 20°C



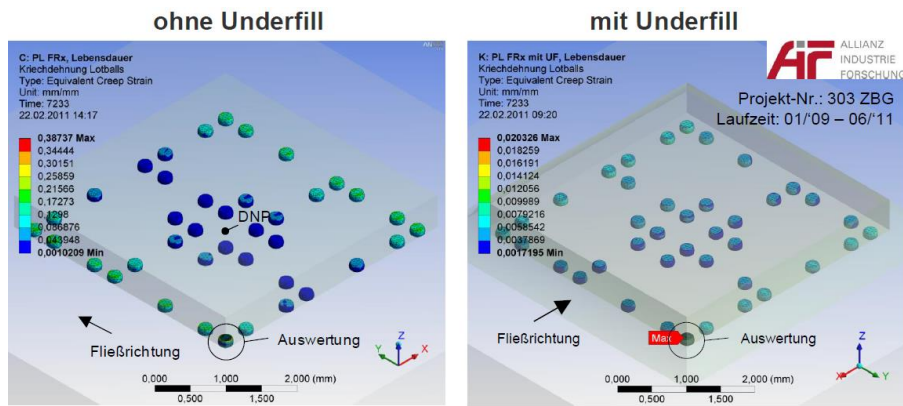
Höhere Spannungen im Lot als beim ersten 20°C Durchlauf, da das Lot bei 150°C stärker gekrochen ist, und sich die Baugruppe somit stärker Verformen konnte als bei -40°C.

Abkühlen auf -40°C



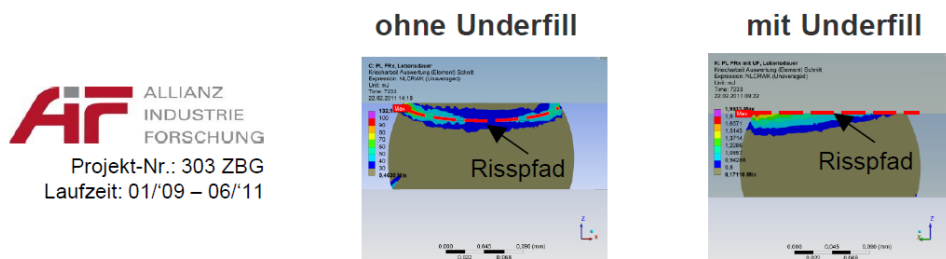
Höhere Spannungen im Lot als beim ersten Abkühlen auf -40°C, da die Baugruppe stärker Verformt ist als zuvor.

Identifikation der kritischen Verbindung



Underfill führt zu Verteilung der Belastung auf alle Lotballs und erhöht damit die Lebensdauer → z. B. $N_{f,ohne} = 13$ zu $N_{f,mit} = 1194$ (bei Pocan DP T7140 LDS)

Flip-Chip-Lötaufbau – Simulation / Experiment



TST - Zyklen bis zum Ausfall Underfiller	$N_{f,Sim. ohne}$	$N_{f,Exp. ohne}$	$N_{f,Sim. mit}$	$N_{f,Exp. Mit}$
Pocan DP T7140 LDS	13	25	1194	>1250
Vectra® E840i LDS	87	163	1510	>1250
FR4	92	287	1540	>1250

Zuverlässigkeit der Lötverbindungen ist stark abhängig vom Substratmaterial, aber auf Vectra® E840i LDS und FR4 annähernd vergleichbar.