

Interregionale Ringvorlesung, Materialintegration, 05.05. 2020:

D. Lehmhus, S. Bosse et al.

Materialintegration III – Anpassung Elektronik, Sensorik, Interconnects und Fallstudien

Einleitung

Inhalte Materialintegration III

- Übersicht: Material, Prozess, Merkmalskategorien.
- Mechanische Belastbarkeit und Kompatibilität.
- Thermische Belastbarkeit und Kompatibilität.
- Fallstudien Materialintegration.
- Zusammenfassung.

Material, Prozess, Merkmalskategorien.

Beispiele nach Material und Prozess.

	Metalle	Kunststoffe	Keramik
Urformen	<ul style="list-style-type: none"> Metallguß (V) Pulvermetallurgie (V) Sprühkompaktieren (V) 	<ul style="list-style-type: none"> Resin Transfer Moulding (V) Laminierverf. (V) Kunststoff-Spritzguss (V) umformbare Kunststoffe und Kunststoffmatrix-Verbunde (V) 	
Umformen	<ul style="list-style-type: none"> umformbare Bleche (O) 		
Trennen			
Fügen			
Beschichten	<ul style="list-style-type: none"> therm. Spritzen (O) 	<ul style="list-style-type: none"> Pulverbeschichtung (O) 	

Hybridmat. wie Faser-Metall-Lamine (O/M)

Material, Prozess, Merkmalskategorien.

Beispiele nach Material und Prozess.

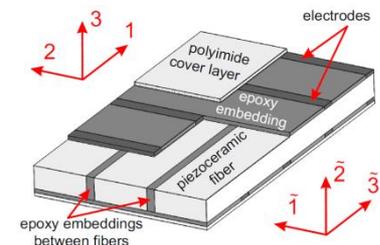
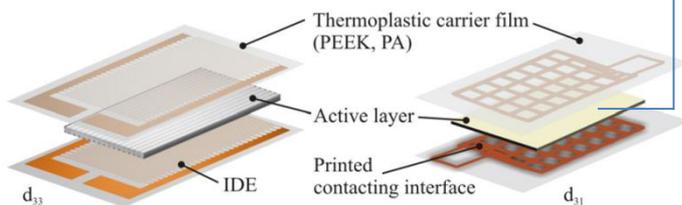
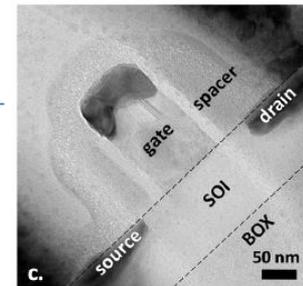
	Metalle	Kunststoffe	Keramik
Urformen	<p>Metallguß (V)</p> <p>Pulvermetallurgie (V)</p> <p>Sprühkompaktieren (V)</p>	<p>Resin Transfer Moulding (V)</p> <p>Laminierverf. (V)</p> <p>Kunststoff-Spritzguss (V)</p>	
Umformen	<p>umformbare Bleche (O)</p>	<p>umformbare Kunststoffe und Kunststoffmatrix-Verbunde (V)</p>	
Trennen			
Fügen			
Beschichten	<p>therm. Spritzen (O)</p>	<p>Pulverbeschichtung (O)</p>	

Hybridmat. wie Faser-Metall-Laminat (O/M)

Materialien

Auswahl aus den nachfolgenden Fallstudien.

- Silizium
- Aluminium
- Polydioxymethylsilane (PDMS)
- Polyimid (PI)
- Polyetheretherketon (PEEK)
- Blei-Zirkon-Titanat (PZT)



Materialien

Auswahl aus den nachfolgenden Fallstudien.

- Silizium

- Aluminium
- Polydioxymethylsilane (PDMS)
- Polyimid (PI)
- Polyetheretherketon (PEEK)
- Blei-Zirkon-Titanat (PZT)

Elastizitätsmodul	[GPa]	130-189
Festigkeit	[GPa]	2,8-6,8
therm. Ausdehnung	[$10^{-6}/K$]	2,6
therm. Beständigkeit (z. B. Schmelzpunkt)	[°C]	1414

Materialien

Auswahl aus den nachfolgenden Fallstudien.

- Silizium
- Aluminium

- Polydioxymethylsilane (PDMS)
- Polyimid (PI)
- Polyetheretherketon (PEEK)
- Blei-Zirkon-Titanat (PZT)

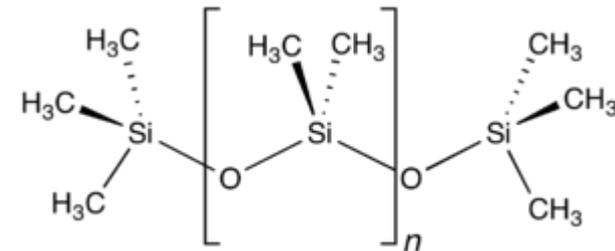
Elastizitätsmodul	[GPa]	70
Festigkeit	[MPa]	50-700
therm. Ausdehnung	[$10^{-6}/K$]	23,1
therm. Beständigkeit (z. B. Schmelzpunkt)	[°C]	660

Materialien

Auswahl aus den nachfolgenden Fallstudien.

- Silizium
- Aluminium
- Polydioxymethylsilane (PDMS)

Quelle: www.wikipedia.org



Quelle: www.mit.edu
www.itemp.rwth-aachen.de

- Polyimid (PI)
- Polyetheretherketon (PEEK)
- Blei-Zirkon-Titanat (PZT)

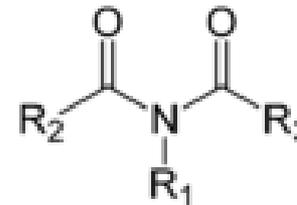
Elastizitätsmodul	[kPa]	360-870
Festigkeit	[MPa]	2,24
therm. Ausdehnung	[10 ⁻⁶ /K]	300
therm. Beständigkeit (z. B. Schmelzpunkt)	[°C]	„gering“

Materialien

Auswahl aus den nachfolgenden Fallstudien.

- Silizium
- Aluminium
- Polydioxymethylsilane (PDMS)
- Polyimid (PI)

Quelle: www.wikipedia.org



Quelle: www.goodfellow.com

- Polyetheretherketon (PEEK)
- Blei-Zirkon-Titanat (PZT)

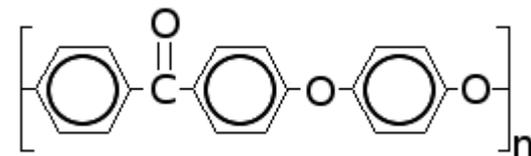
Elastizitätsmodul	[GPa]	2,0-3,0
Festigkeit	[MPa]	70-150
therm. Ausdehnung	[10 ⁻⁶ /K]	30-60
therm. Beständigkeit (Glasübergang)	[°C]	ca. 250

Materialien

Auswahl aus den nachfolgenden Fallstudien.

- Silizium
- Aluminium
- Polydioxymethylsilane (PDMS)
- Polyimid (PI)
- Polyetheretherketon (PEEK)

Quelle: www.techlab.de



Elastizitätsmodul	[GPa]	ca. 3,6
Festigkeit	[MPa]	ca. 97
therm. Ausdehnung	[10 ⁻⁶ /K]	47
therm. Beständigkeit (Schmelzpunkt)	[°C]	ca. 350

- Blei-Zirkon-Titanat (PZT)

Materialien

Auswahl aus den nachfolgenden Fallstudien.

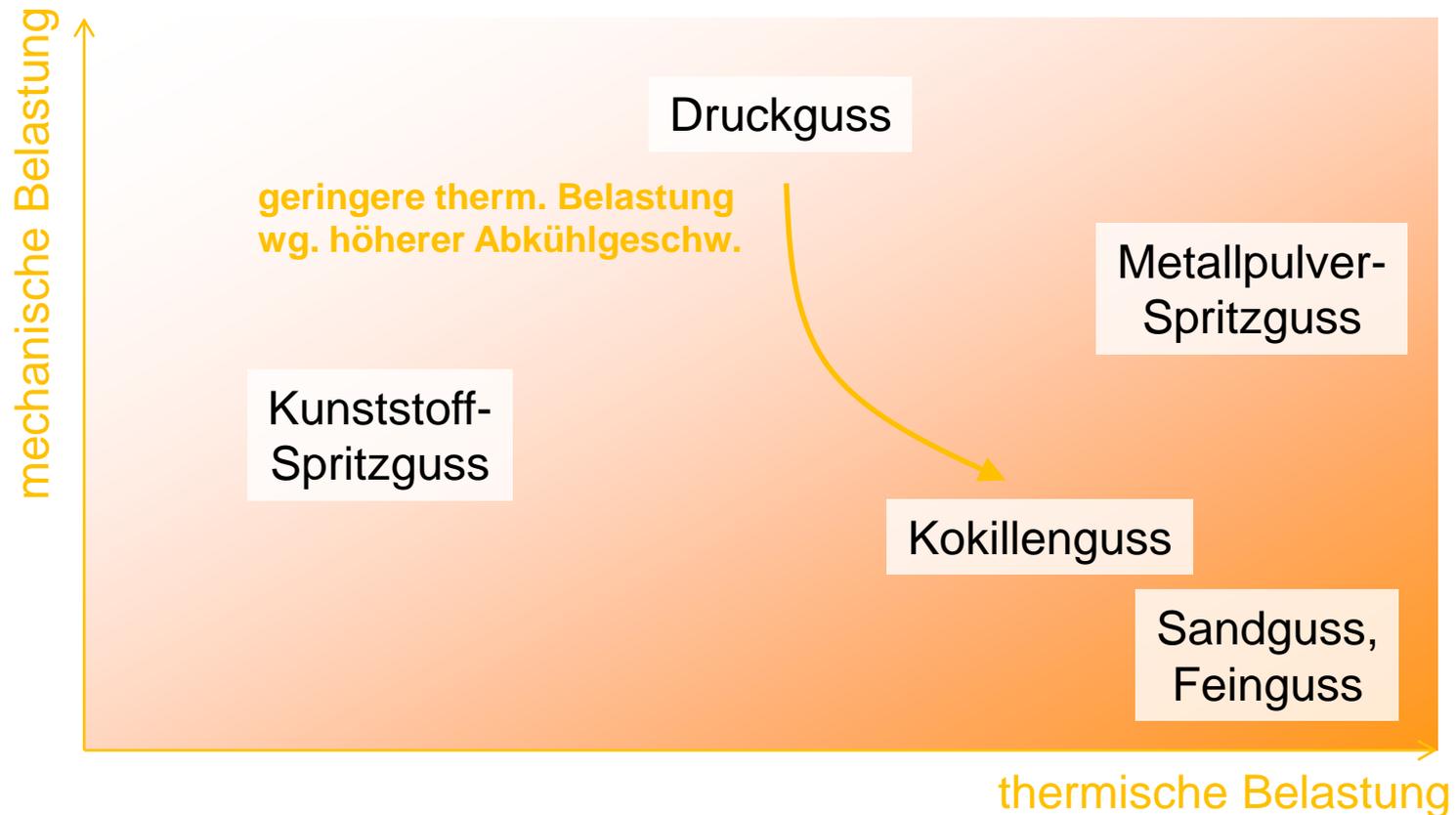
- Silizium
- Aluminium
- Polydioxymethylsilane (PDMS)
- Polyimid (PI)
- Polyetheretherketon (PEEK)
- **Blei-Zirkon-Titanat (PZT)**

Quelle: www.piceramic.de

Elastizitätsmodul	[GPa]	49-63
Festigkeit (Druck)	[MPa]	>600
therm. Ausdehnung	[$10^{-6}/K$]	-4-8
therm. Beständigkeit (hier:Curietemperatur)	[°C]	150-370

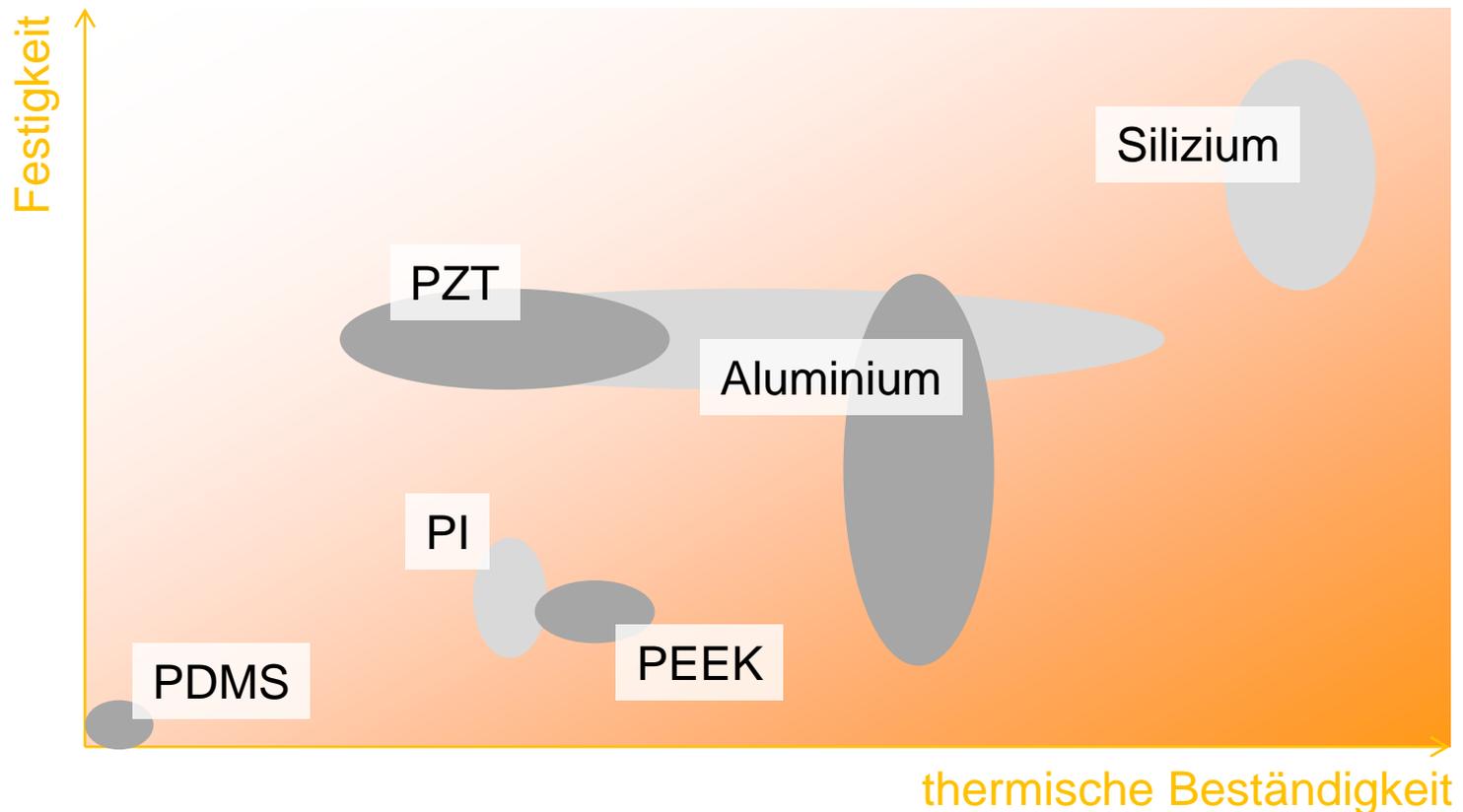
Anforderungen an integrierbare Systeme.

Gießverfahren: Mech./therm. Belastung.



Materialeigenschaften.

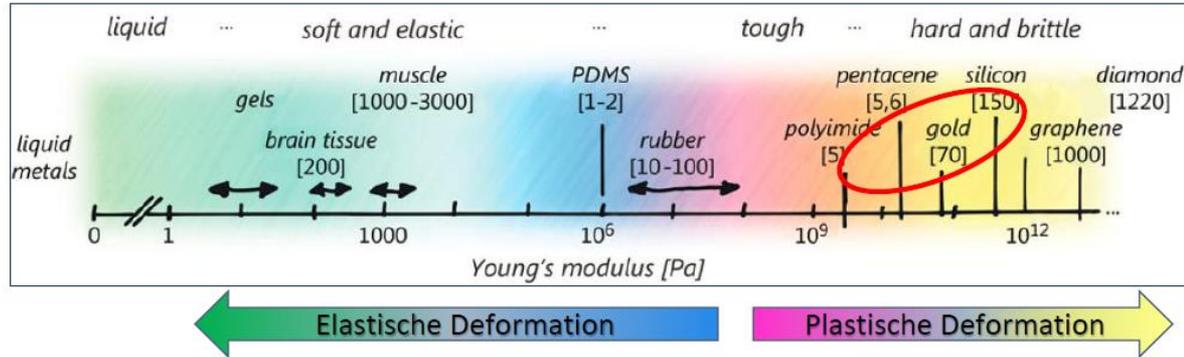
Gießverfahren: Mech./therm. Belastung.



Materialien

Übersicht, Größenordnung Materialsteifigkeit.

Bestimmende Materialeigenschaft: E-Modul (Elastizitätsmodul, N/mm²) $E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \text{const.}$



Je höher der E-Modul desto geringer die Dehnung bis zum Bruch

Intrinsisches Problem: was sich gut strecken lässt leitet schlecht, was gut leitet, lässt sich schlecht strecken

- Chips bestehen aus Silizium (engl. uch als *Silicon* bezeichnet), $E \sim 150\text{GPa}$
- Kondensatoren, Widerstände bestehen aus Keramiken (Titanate, Niobate), $E \sim 75\text{GPa}$
- Leiterbahnen bestehen aus Kupfer $E \sim 120\text{GPa}$ oder Gold $E \sim 70\text{GPa}$
- Lotstellen bestehen zumeist aus z.B. aus Kupfer-, Silber-, Zinnlegierungen, $E \sim 30\text{-}50\text{GPa}$
- Basismaterialien (Polymere) haben E-Moduln im 1-1000 MPa - Bereich

Quellen: www.wikipedia.org, www.journals.cambridge.org

Quelle: www.ats.net

Materialintegration: Herausforderungen.

Die vielen Probleme der Materialintegration.

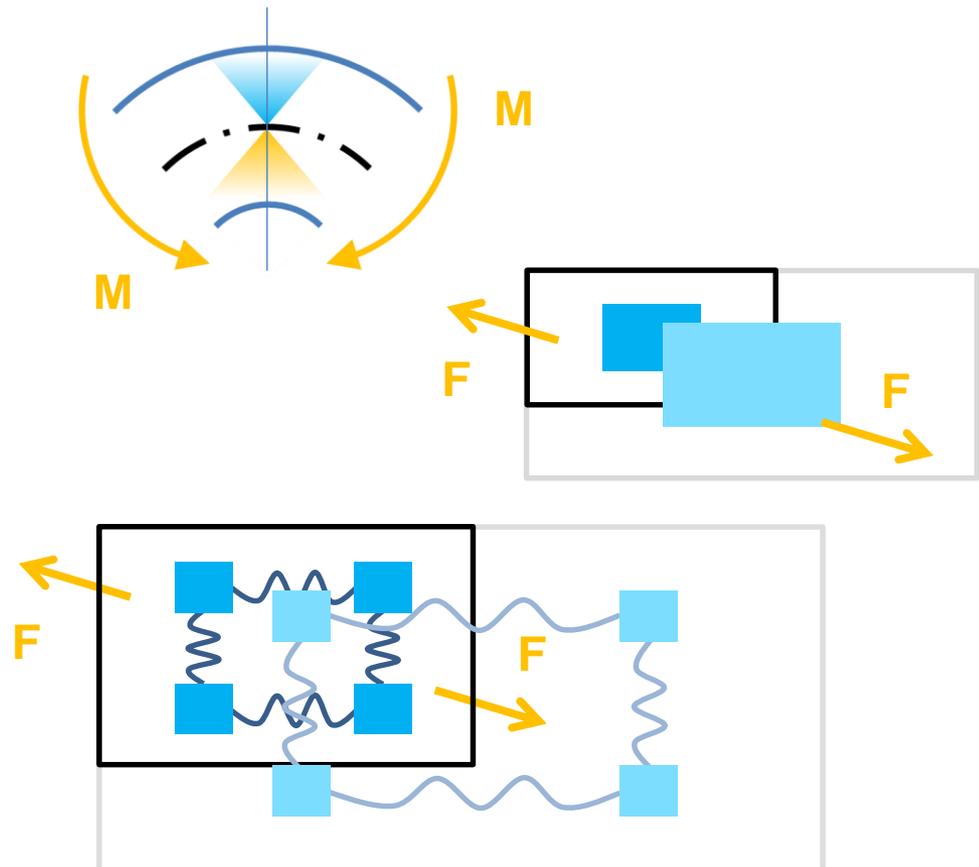
- **Mechanische Stabilität**
ertragen mechanischer Belastung in Produktion und Betrieb
- **Thermische Stabilität**
ertragen thermischer Belastungen in Produktion und Betrieb
- **Verträglichkeit mit der Matrix**
 - **Mechanische Anpassung**
Anpassung an Steifigkeit, Festigkeit etc. des aufnehmenden Materials, Grenzflächeneigenschaften, Erzeugung innerer Spannungskonzentrationen, Eigenspannungen ...
 - **Thermische Anpassung**
Anpassung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten an das aufnehmende Material, Eigenspannungen ...
 - **Chemische und sonstige Verträglichkeit**
Reaktion auf äußere Einflüsse wie Feuchtigkeit, spezielle chemische Einflüsse im Betrieb etc.

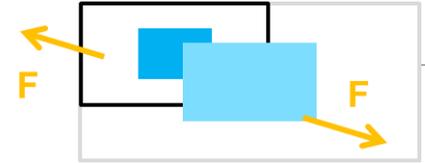
Zentrale Herausforderung
während der Fertigung
von Materialien/Strukturen
mit eingebetteten
Sensorsystemen

Mechanische Anpassung.

Mechanische Anpassung: Grundprinzipien.

- „neutral plane engineering“
- Biegeweiche und dehnbare Komponenten:
→ *organische Elektronik*
- dehnbare Verbindungen zwischen konventionellen und/oder biegeweichen Bauelementen als starren „Inseln“ im Material





Mechanische Anpassung.

Dehnbare Komponenten: „Plastic Logic“.

„Kosten“ der mechanischen Anpassung:

Eine Nische für gedruckte Elektronik?

low cost

Printed Electronics

- long switching times
- low integration density
- large areas
- flexible substrates
- simple fabrication
- extremely low fabrication costs

low end

high cost

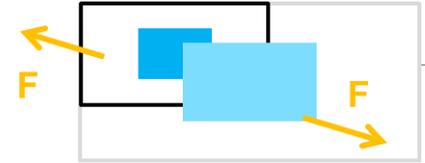
Conventional Electronics

- extremely short switching times
- extremely high integration density
- small areas
- rigid substrates
- sophisticated fabrication
- high fabrication costs

high end

Quelle:

www.wikipedia.org,
„Complementary Technologies“
Heiko Kempa, Institute of
Print and Media Technologies,
TU Chemnitz



Mechanische Anpassung.

Dehnbare Komponenten: „Plastic Logic“.

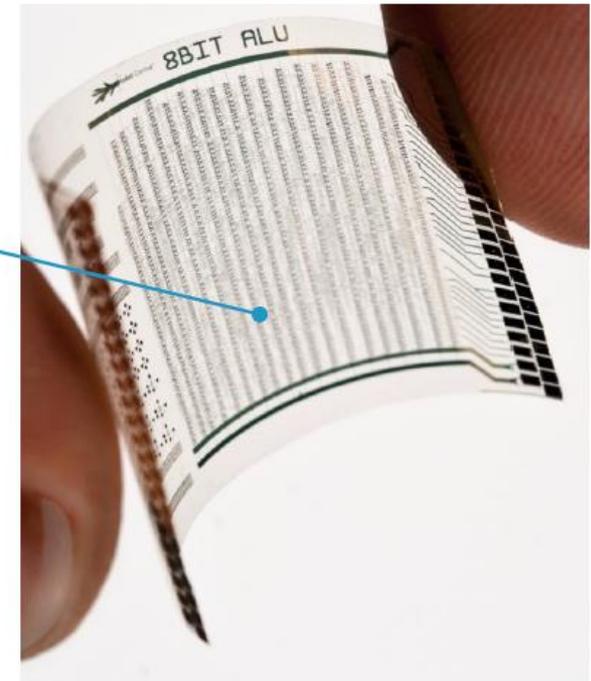
Organische
Lösungen für
eine bessere
Anpassung
der lokalen
Steifigkeiten.



Plastic microprocessor

- Unipolar p-type pentacene only logic
- Dual-gate technology
- 4,000 transistors
- Thickness 25 μm

"It has the processing power of a 1970s silicon chip and executes commands at about 6 instructions/sec, but it is flexible. Allowing uses in flexible displays, or as sensors wrapped around food, pharmaceuticals or as intelligent sensors."

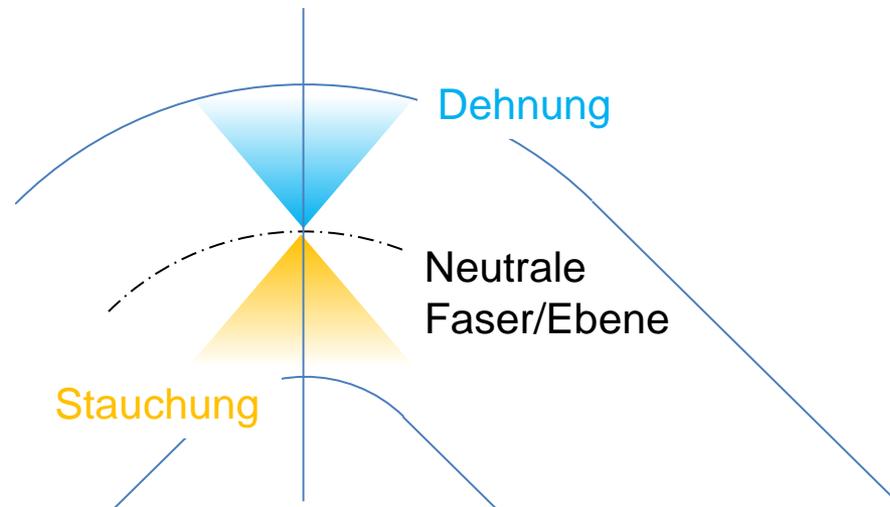


Mechanische Anpassung.

Biegebelastung: Neutrale Faser/Ebene.

Eliminierung der mechanischen Belastung durch Positionierung in der bezogen auf Biegung "neutralen Ebene":

Unwirksam bei Belastung in der Strukturebene oder Druckbelastung senkrecht dazu.



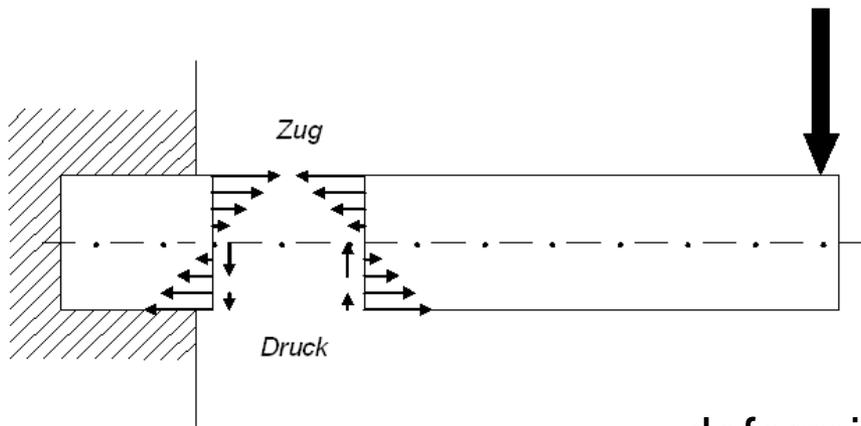
“Like any other stiff material, circuits become flexible and rollable when their thickness is reduced to 1/1000 of the desired radius of curvature.”

S. Wagner und S. Bauer: *Materials for stretchable electronics*.
MRS Bulletin 37 (2012) 207-213.

Mechanische Anpassung.

Biegung: Makro- und mikroskopische Sicht.

Die klassische Spannungsverteilung im Biegebalken wie unten dargestellt ergibt sich aus vereinfachenden Annahmen, die zum Teil beim Übergang zu mikroskopischen Verhältnissen nicht mehr aufrecht erhalten werden können:



Quelle: www.wikipedia.org

Beispiel **Bernoulli-Balken**:

Querschnitte bleiben auch nach Verformung senkrecht zur (neuen, deformierten) Balkenachse und in sich eben:

Mikromechanische Betrachtung nötig.

Mechanische Anpassung.

Steifigkeitsunterschied und lokale Belastung.

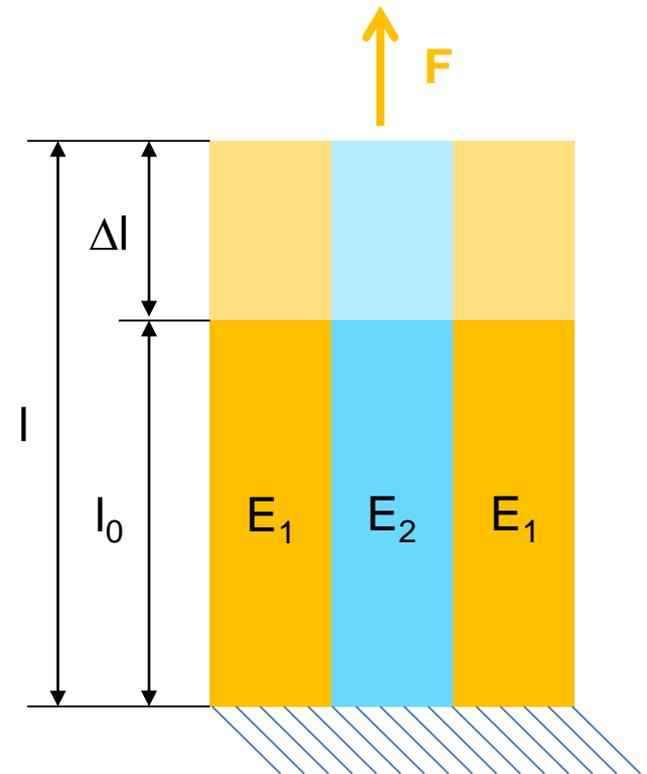
Einfaches mechanisches Modell,
Annahme:

Dehnungskontrollierte Verformung:
Spannungsüberhöhung entspr. E_2/E_1

$$\varepsilon = \Delta l / l_0$$

$$\varepsilon = \sigma / E \quad \rightarrow \quad \begin{aligned} \sigma_1 &= E_1 \cdot \varepsilon \\ \sigma_2 &= E_2 \cdot \varepsilon \end{aligned}$$

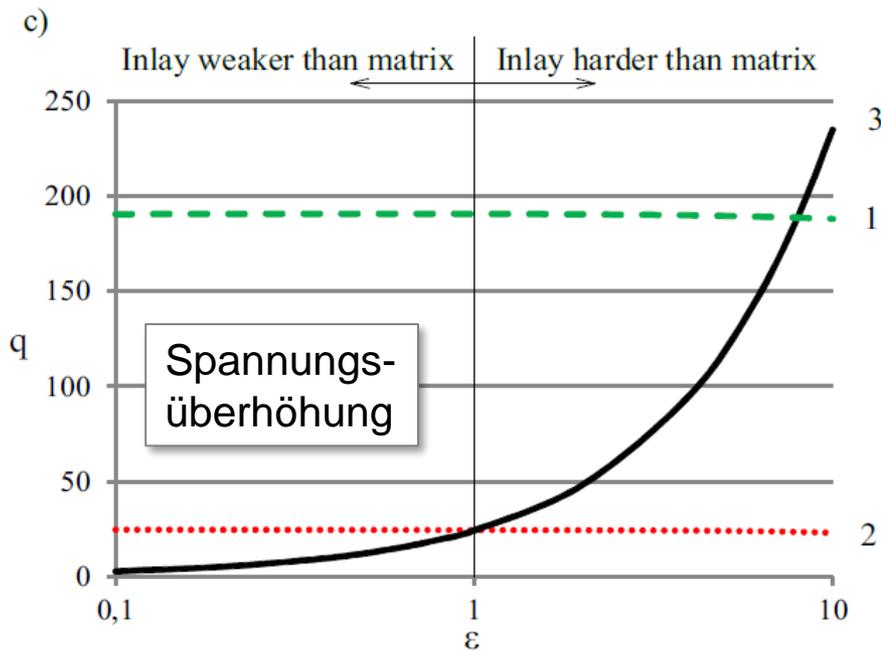
ε	techn. Dehnung	[-]
σ	Spannung	[MPa]
E	Elastizitätsmodul	[MPa]



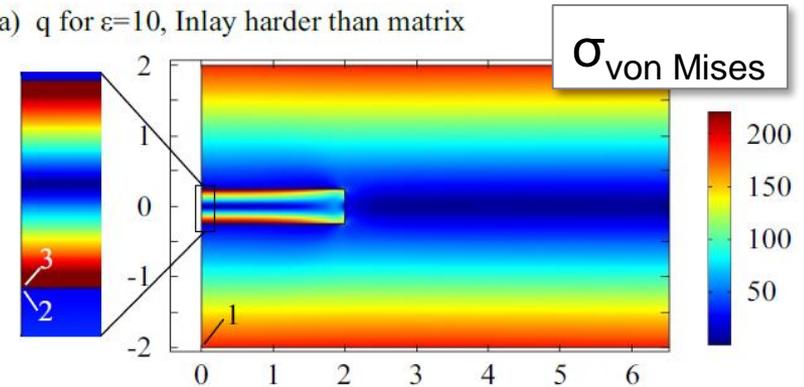
Mechanische Anpassung.

Steifigkeitsunterschied und lokale Belastung.

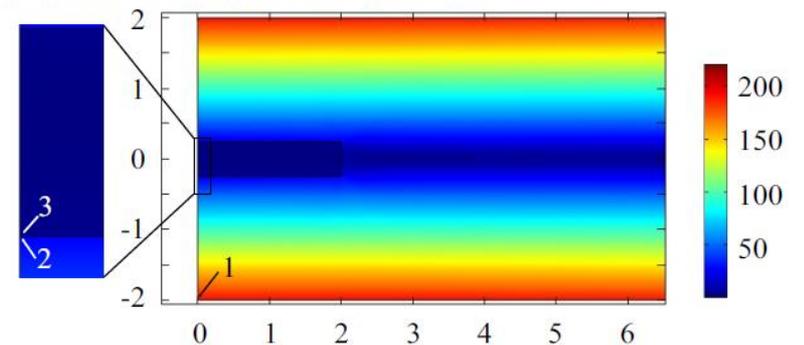
Biegebelastung I



a) q for $\epsilon=10$, Inlay harder than matrix



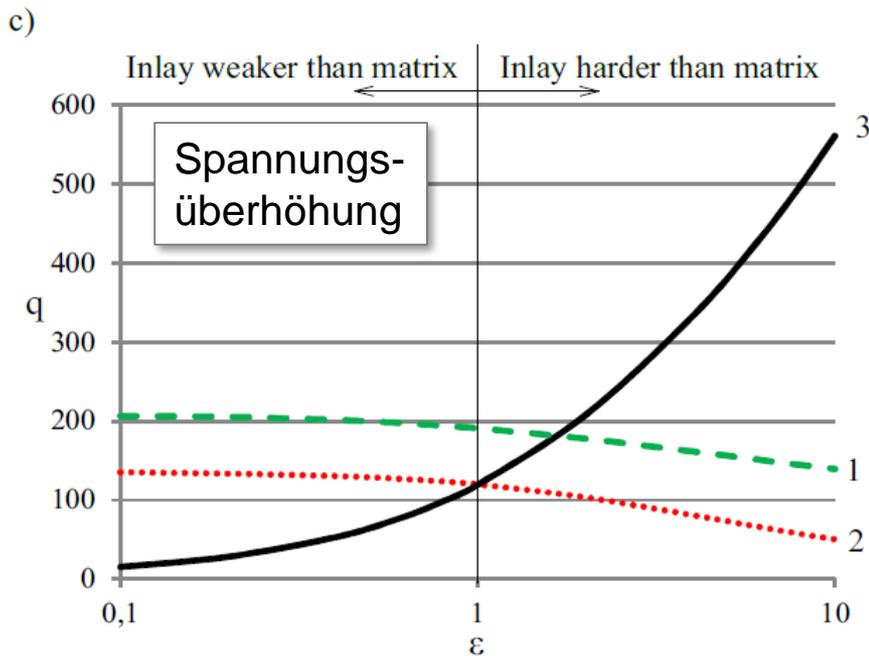
b) q for $\epsilon=0.1$, Inlay weaker than matrix



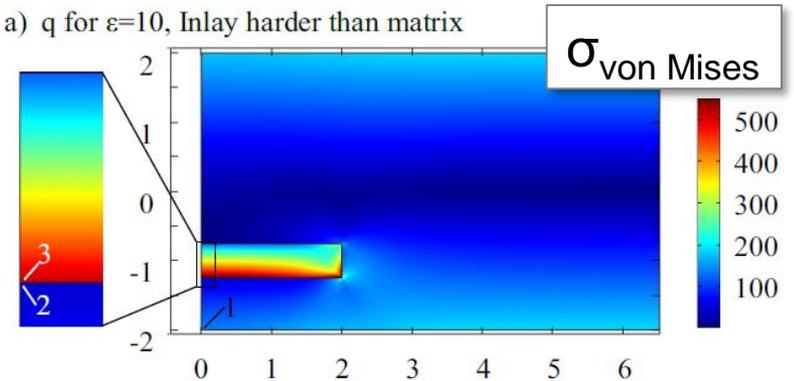
Mechanische Anpassung.

Steifigkeitsunterschied und lokale Belastung.

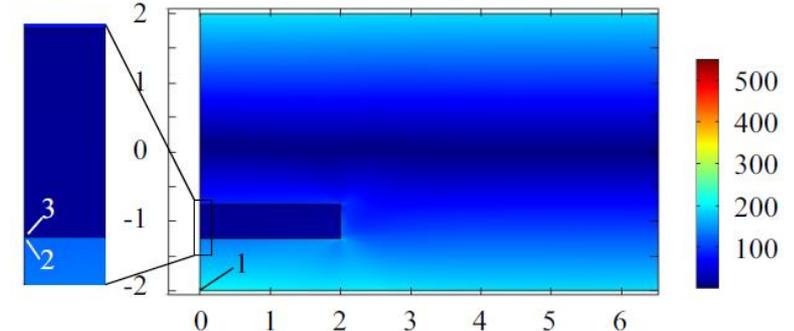
Biegebelastung II



a) q for $\epsilon=10$, Inlay harder than matrix

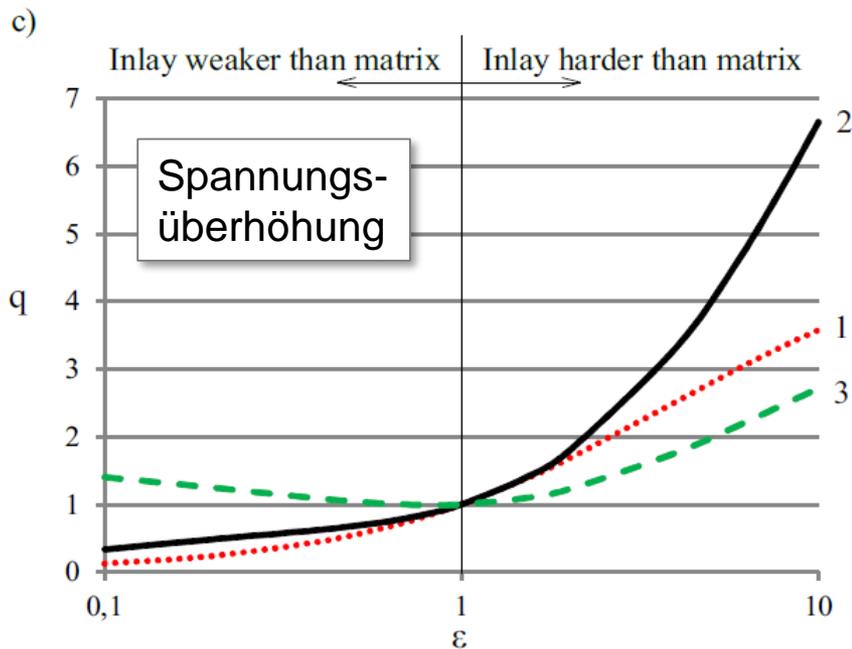


b) q for $\epsilon=0.1$, Inlay weaker than matrix

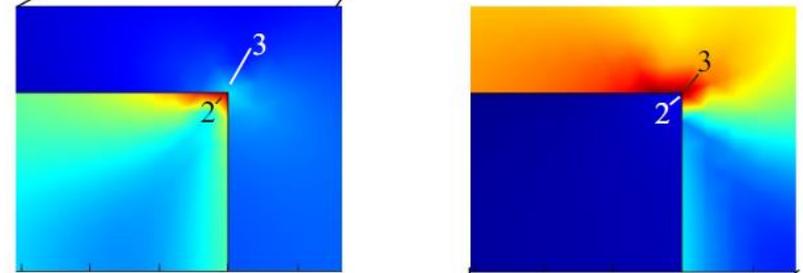
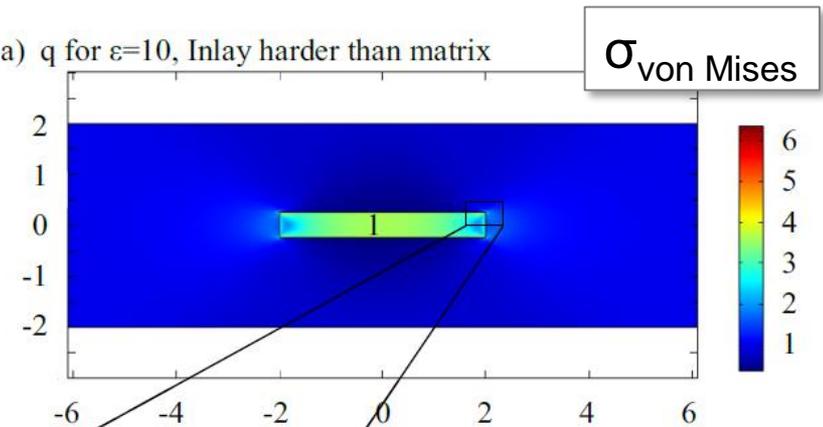


Mech. Anpassung. Lokale Belastung.

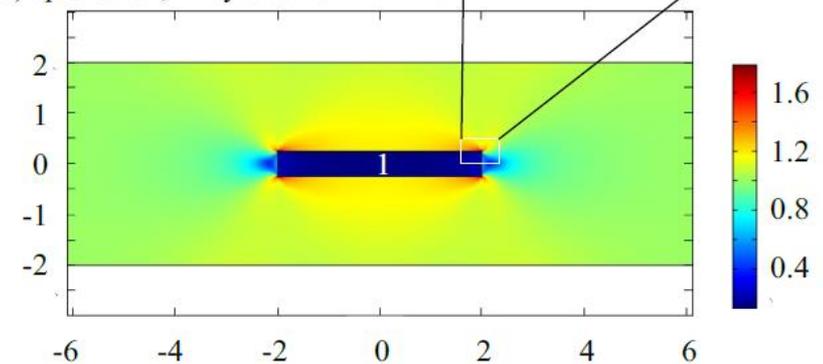
Zugbelastung



a) q for $\epsilon=10$, Inlay harder than matrix



b) q for $\epsilon=0.1$, Inlay weaker than matrix



Mechanische Anpassung.

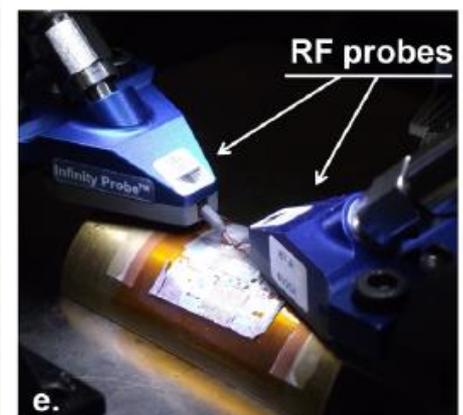
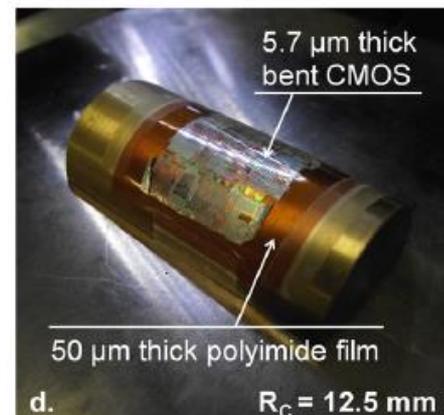
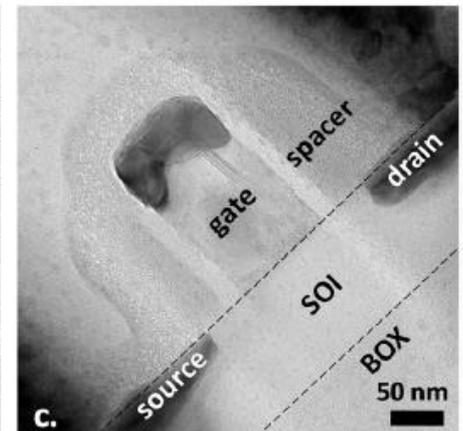
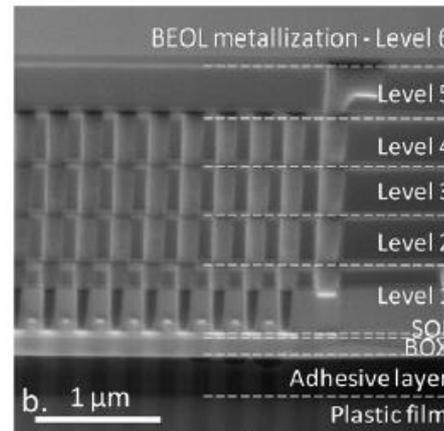
Ultimate Thinning & Transfer Bonding (UTTB)

Herstellung biegeweicher elektronischer Komponenten durch kombiniertes Schleifen und Ätzen zwecks Dickenreduzierung konventioneller Mikrochips.

Verwandtes Verfahren:

UTCP = Ultra-Thin Chip Packaging

A. Lecavelliers des Etangs-Lavellois et al.:
A converging route towards very high frequency, mechanically flexible, and performance stable integrated electronics.
Journal of Applied Physics 113 (2013) ID 153701



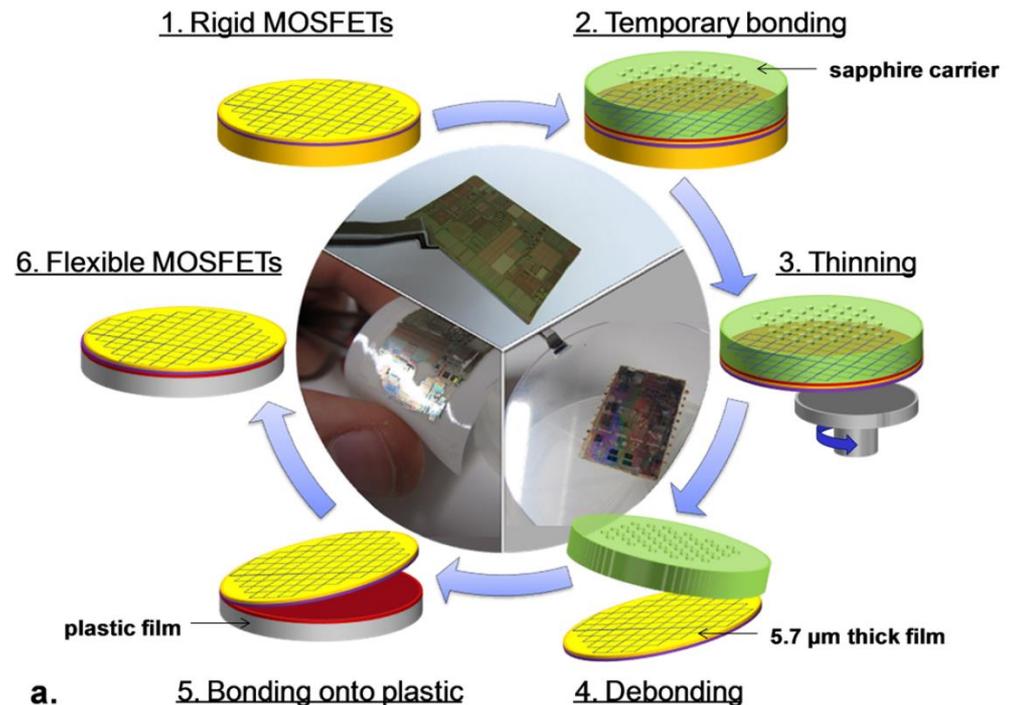
Mechanische Anpassung.

Ultimate Thinning & Transfer Bonding (UTTB)

Herstellung biegeweicher elektronischer Komponenten durch kombiniertes Schleifen und Ätzen zwecks Dickenreduzierung konventioneller Mikrochips.

Verwandtes Verfahren:

UTCP = Ultra-Thin Chip Packaging



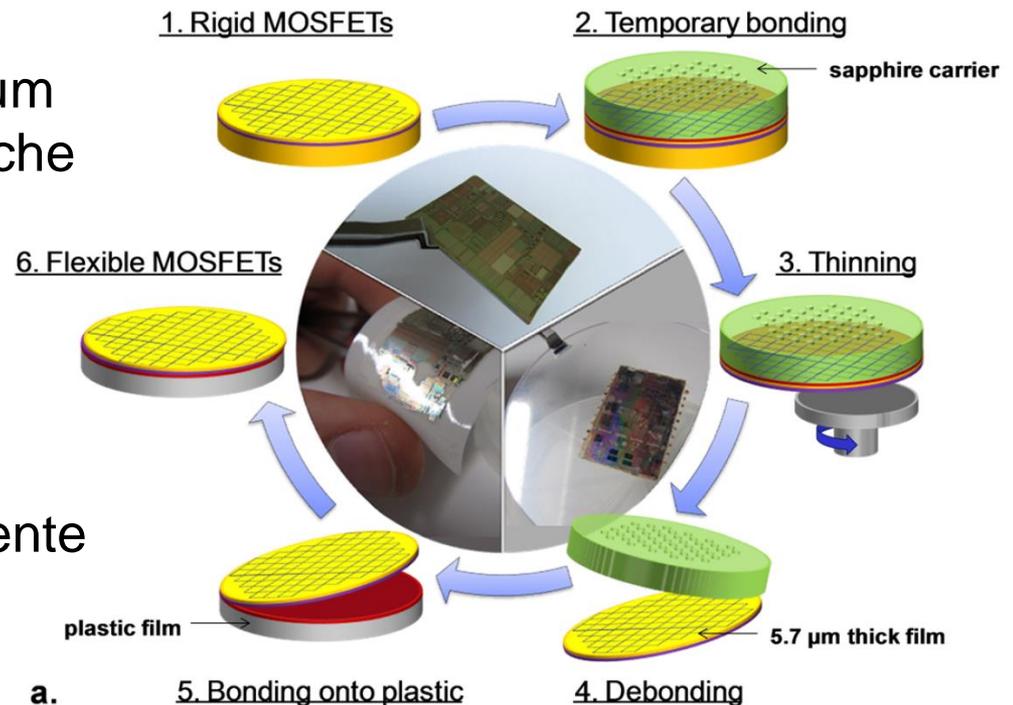
A. Lecavelliers des Etangs-Lavellois et al.: *A converging route towards very high frequency, mechanically flexible, and performance stable integrated electronics*. Journal of Applied Physics 113 (2013) ID 153701

Mechanische Anpassung.

Ultimate Thinning & Transfer Bonding (UTTB)

Ausgangsmaterial Silicon-on-Insulator (SOI)-Wafer mit 780 μm dicker Si-Schicht für mechanische Stabilität/Handhabbarkeit, auf dieser 65 nm Buried Oxide (BOX)-Schicht zur elektr. Isolation und 60 nm dicker, funktionaler SOI-Schicht, in der sich die elektr. Bauelemente (MOSFETs) befinden.

Ziel: Übertragung der SOI-Schicht auf Polymersubstrat.



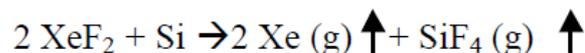
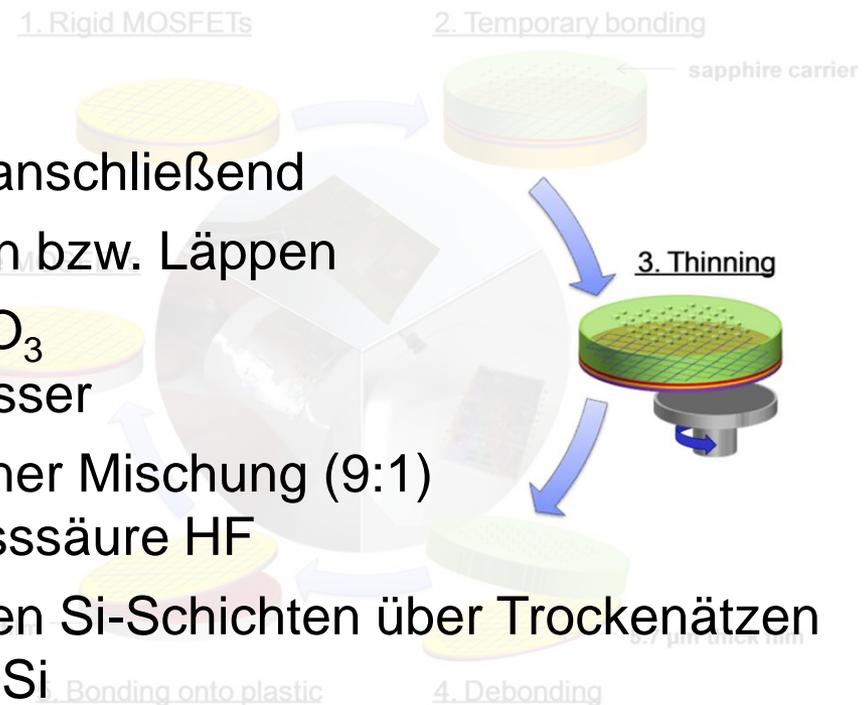
A. Lecavelliers des Etangs-Lavellois et al.: *A converging route towards very high frequency, mechanically flexible, and performance stable integrated electronics.* Journal of Applied Physics 113 (2013) ID 153701

Mechanische Anpassung.

Ultimate Thinning & Transfer Bonding (UTTB)

Ablauf der Dünnung:

- Aufbringen einer – temporären – Trägerschicht auf der Frontseite, anschließend
- chemisch-mechanisches Schleifen bzw. Läppen
- mechanisch mit 15 bzw. 3 μm Al_2O_3 Schleifpulver in deionisiertem Wasser
- chemisch mittels Naßätzen mit einer Mischung (9:1) aus Salpetersäure HNO_3 und Flusssäure HF
- Entfernung der letzten rückwärtigen Si-Schichten über Trockenätzen mittels XeF_2 , hohe Selektivität für Si



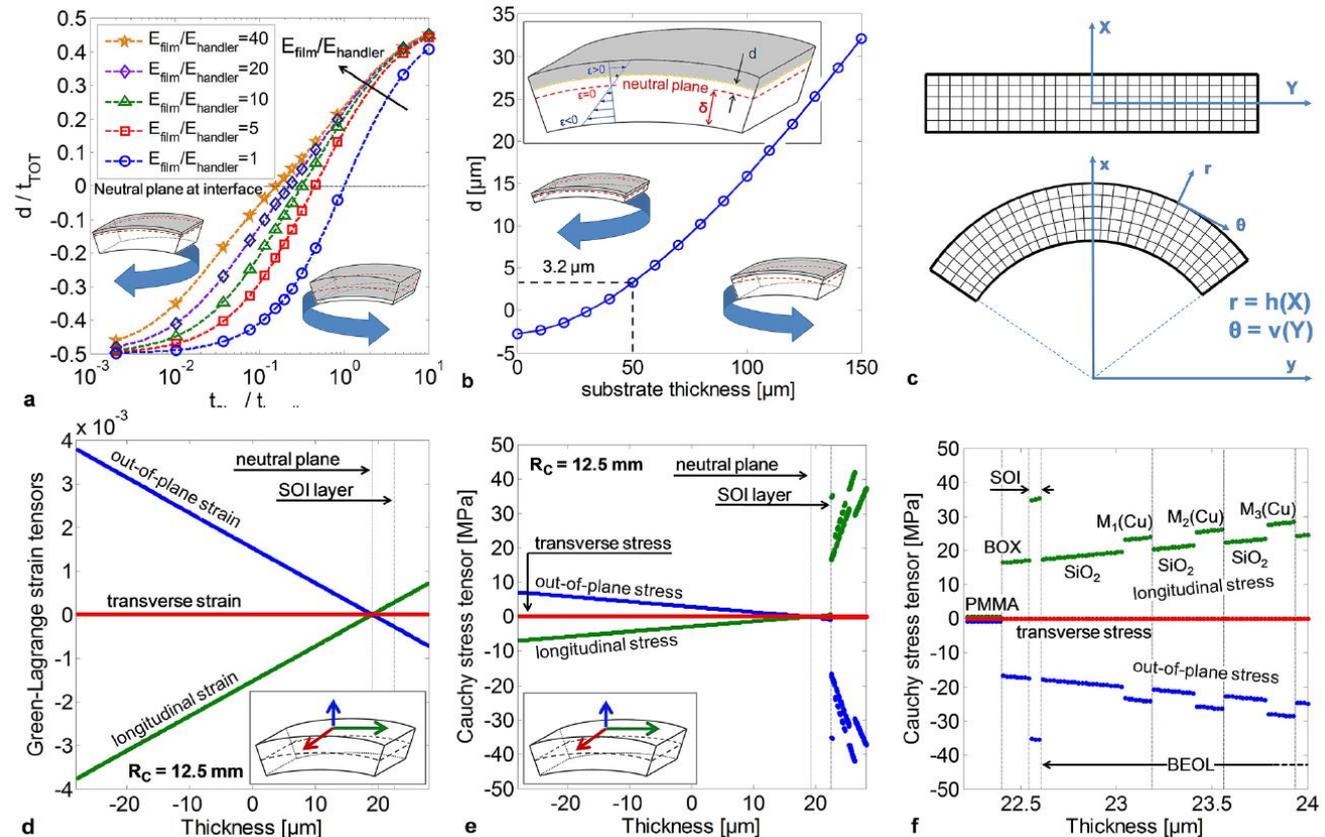
A. Lecavelliers des Etangs-Lavellois et al.: *A converging route towards very high frequency, mechanically flexible, and performance stable integrated electronics.* Journal of Applied Physics 113 (2013) ID 153701

Mechanische Anpassung.

UTTB

Mechanik des
zuvor gezeigten
Aufbaus,
inkl. BEOL*.

* Back End Of Line,
Fertigungsfolge in der IC-
Herstellung, die die
Kontaktierung und Ver-
bindung der Halbleiterbau-
elemente auf dem Wafer
über (mehrere) Metallisier-
ungs-, Isolationsschichten
etc. ebenfalls auf dem Wafer
beinhaltet.



A. Lecavelliers des Etangs-Lavellois et al.: *A converging route towards very high frequency, mechanically flexible, and performance stable integrated electronics*. Journal of Applied Physics 113 (2013) ID 153701

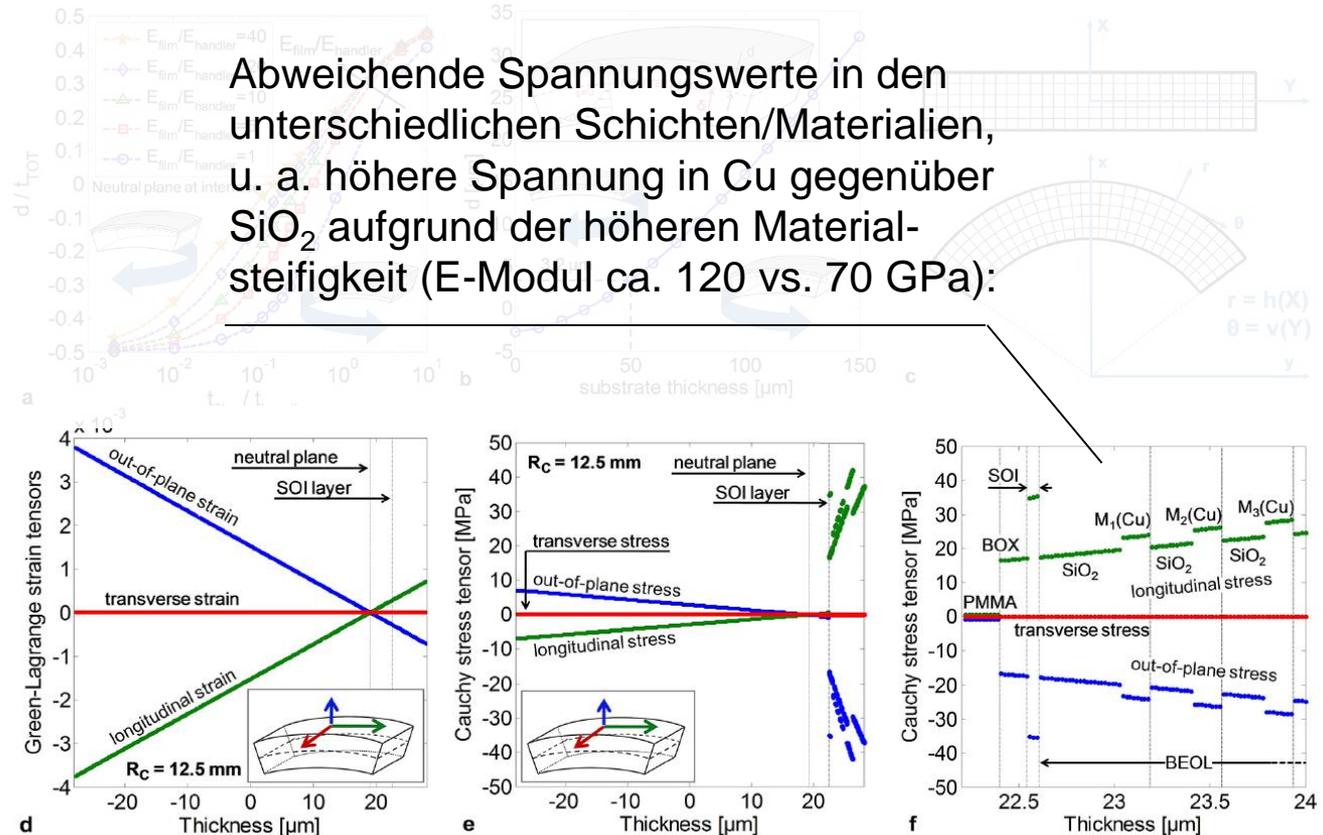
Mechanische Anpassung.

UTTB

Mechanik des
zuvor gezeigten
Aufbaus,

inkl. BEOL*.

* Back End Of Line,
Fertigungsfolge in der IC-
Herstellung, die die
Kontaktierung und Ver-
bindung der Halbleiterbau-
elemente auf dem Wafer
über (mehrere) Metallisier-
ungs-, Isolationsschichten
etc. ebenfalls auf dem Wafer
beinhaltet.



A. Lecavelliers des Etangs-Lavellois et al.: *A converging route towards very high frequency, mechanically flexible, and performance stable integrated electronics*. Journal of Applied Physics 113 (2013) ID 153701

Zusammenfassung

Fazit und Ausblick

- Grundprinzipien bezüglich mechanischer Anpassung Nutzung der neutralen Ebene, biege- und/oder dehnbare Komponenten oder starre Inseln mit dehnbaren Verbindungen (Interconnects).
- Unterschied zwischen Biegebarkeit und Dehn-/Streckbarkeit.
- Dehnbare Elektronik-Komponenten (z. B. Zukunftspotenziale im Bereich organische Elektronik) hier nicht behandelt.
- Komplexität des Aufbaus und der Materialvielfalt führt zu komplexen mechanischen, thermischen und, über Kopplungen wie thermische Ausdehnungskoeffizienten, thermomechanischen Verhältnissen.

Einleitung.

Volumenintegration: Ausblick.

- **Typ des aufnehmenden Materials**
Metall, Leichtmetall, (thermoplastischer/duroplastischert) Kunststoff, Textil, faserverstärkter Kunststoff, ...
- **Verarbeitung des aufnehmenden Materials**
Gießverfahren, Additive Manufacturing, Laminierverfahren, pulverbasierte Verfahren, ...
- **Konfiguration des Sensor-Matrix-Verbundes**
Klassifikation nach Konnektivität der aufnehmenden Phase und der die Sensorknoten repräsentierenden Phase
- **Sensortyp nach**
faseroptischer Sensor (F)
- **Sensortyp**
mechanischer (D)

Volumen-
integration

Vierte Vorlesung heute:

- Fortsetzung mechanische Anpassung
- thermische Einflüsse und Anpassung
- Fallstudien für unterschiedliche Fertigungsverfahren

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit ...

Wo Sie uns finden:

Dr.-Ing. Dirk Lehmhus

Tel. +49 (0)421 2246 7215

Fax +49 (0)421 2246 300

Email dirk.lehmhus@uni-bremen.de

Web www.ifam.fraunhofer.de

Postal Address Wiener Straße 12
28359 Bremen
Germany