*Interregionale Ringvorlesung, Materialintegration, 20.05. 2020:*

D. Lehmhus, S. Bosse et al.

# Materialintegration IV – Anpassung Elektronik, Sensorik, Interconnects und Fallstudien

# Einleitung

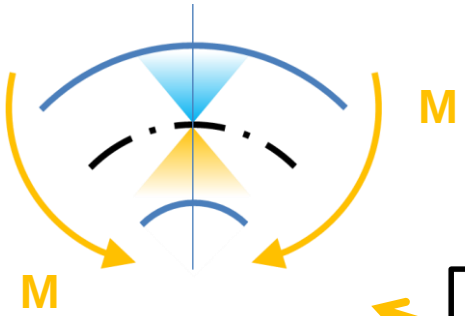
## Inhalte Materialintegration IV

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

# Mechanische Anpassung.

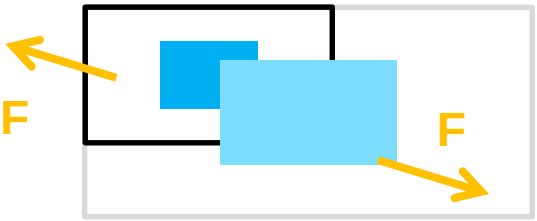
## Mechanische Anpassung: Grundprinzipien.

- „neutral plane engineering“

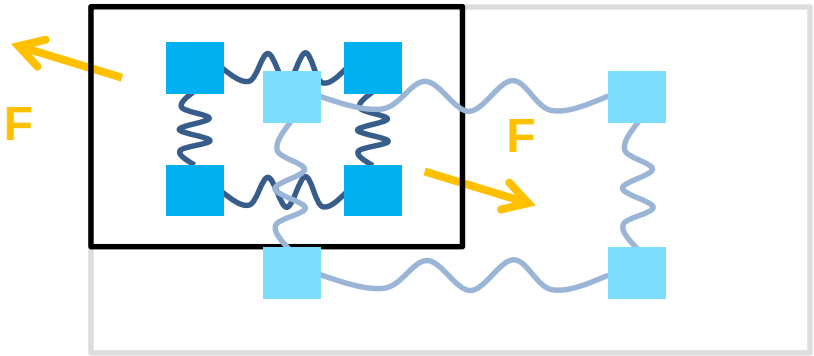



- Biegeweiche und dehnbare Komponenten:

  → *organische Elektronik*

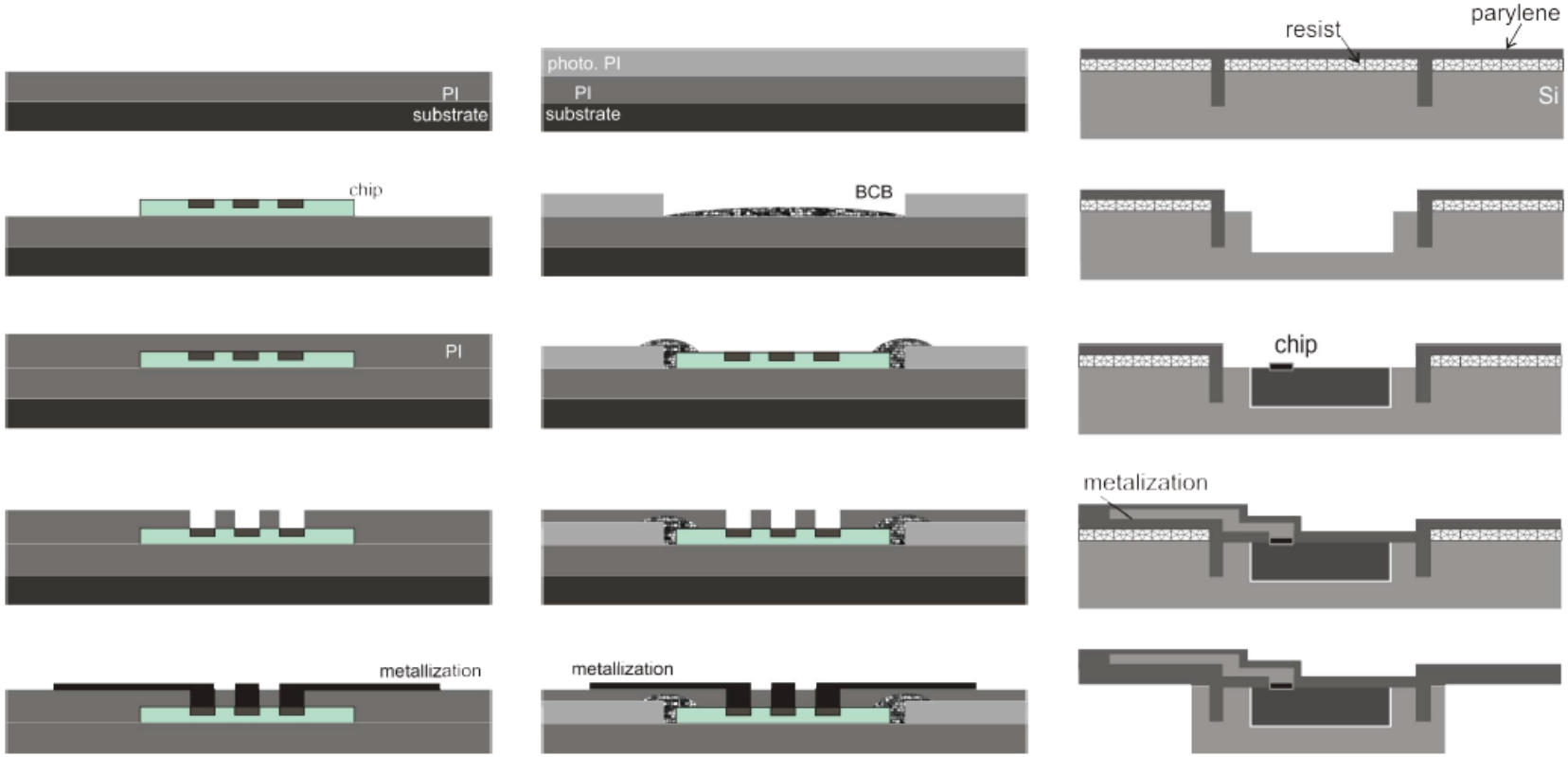



- dehnbare Verbindungen zwischen konventionellen und/oder biegeweichen Bauelementen als starren „Inseln“ im Material



# Mechanische Anpassung.

## Mikrochips in flexiblen Substraten.



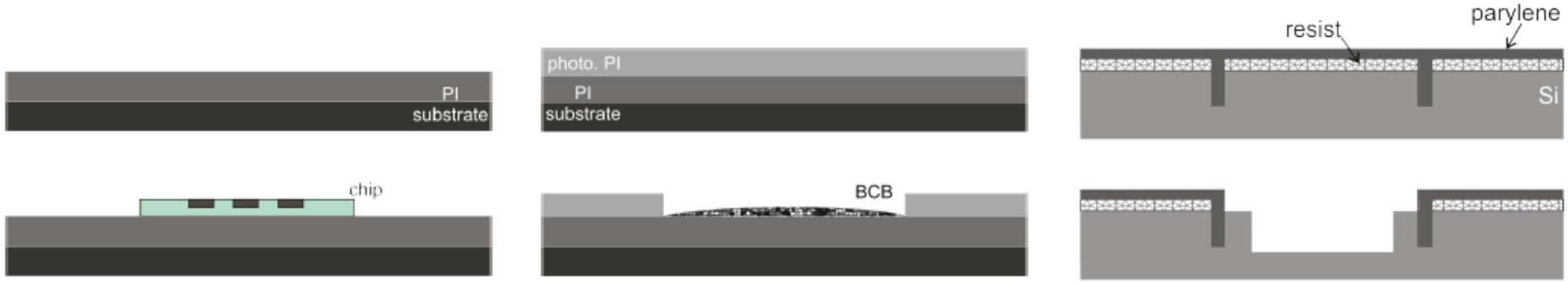

(a) Polyimide packaging suggested by [37]

(b) Ultra thin chip packaging by [38]

(c) Parylene as a flexible packaging material [39]

# Mechanische Anpassung.

## Mikrochips in flexiblen Substraten.

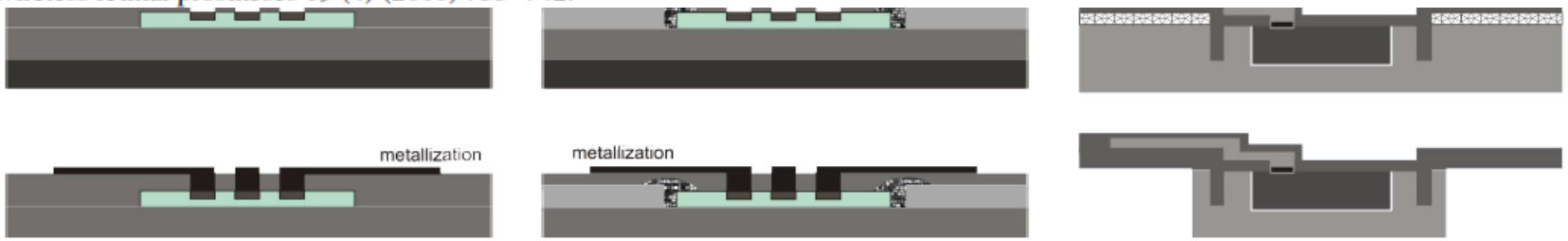




[37] T.-Y. Kuo, Y.-C. Shih, Y.-C. Lee, H.-H. Chang, Z.-C. Hsiao, C.-W. Chiang, S.-M. Li, Y.-J. Hwang, C.-T. Ko, Y.-H. Chen, Flexible and ultra-thin embedded chip package, in: Proc. 59th Electronic Components and Technology Conf. ECTC 2009, 2009, pp. 1749–1753.

[38] J. Govaerts, W. Christiaens, E. Bosman, J. Vanfleteren, Fabrication processes for embedding thin chips in flat flexible substrates, IEEE Transactions on Advanced Packaging 32 (1) (2009) 77–83.

[39] W. Li, D. C. Rodger, E. Meng, J. D. Weiland, M. S. Humayun, Y.-C. Tai, Wafer-level parylene packaging with integrated rf electronics for wireless retinal prostheses 19 (4) (2010) 735–742.

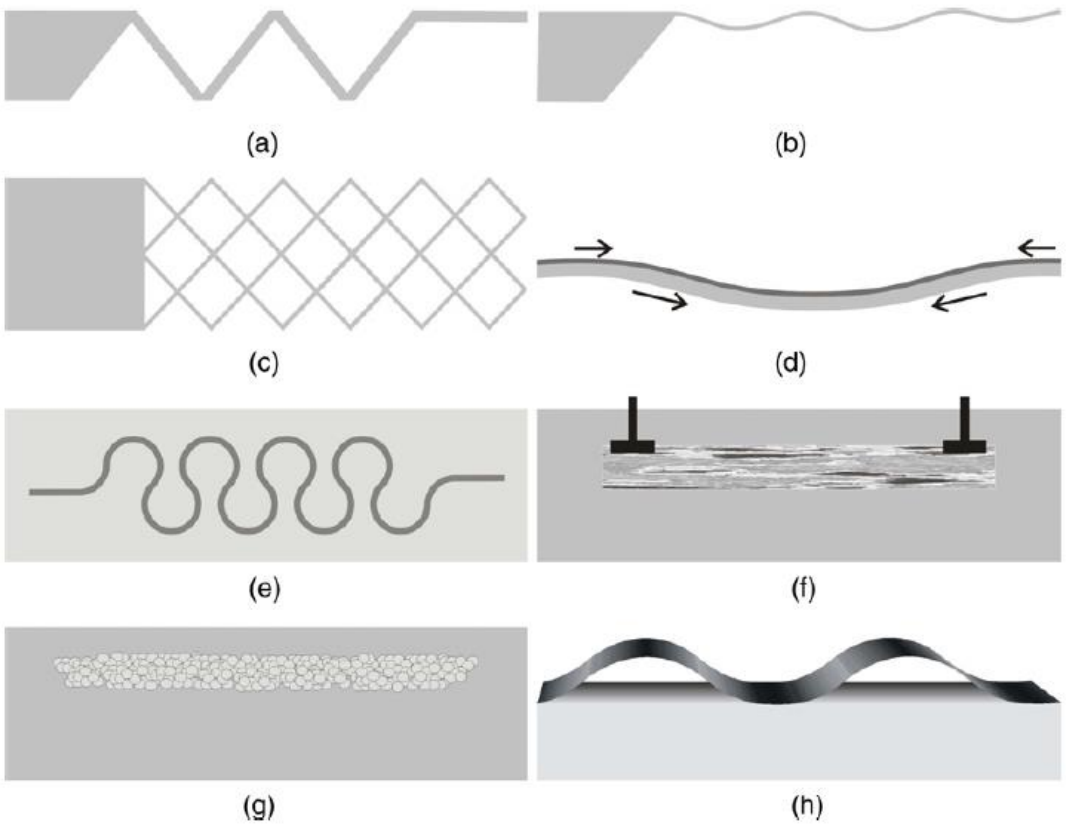

(a) Polyimide packaging suggested by [37]

(b) Ultra thin chip packaging by [38]

(c) Parylene as a flexible packaging material [39]

# Mechanische Anpassung.

## Flexibilität als Dehnbarkeit: Übersicht.




a) „Akkordeon“ geätzt in Si
b) wellenförmige Membran
c) Netz geätzt in Si
d) Metall abgeschieden auf verstrecktem Si
e) Hufeisen-Geometrie auf Polydimethylsiloxan/PDMS
f) implantierte Gold-Cluster in Silizium
g) flüssiges Indium in PDMS
h) wellenförmige Si-Struktur

W. Lang et al.: *From embedded Sensors to Sensorial Materials – the Road to FSI*. Sensors and Actuators A 171 (2011) 3– 11

# Mechanische Anpassung.

## Dehnbarkeit: Akkordeon.

H. Sandmaier, H. L. Offereins, K. Kuhl, W. Lang, Corner compensation techniques in anisotropic etching of (100)-silicon using aqueous koh, in: Proc. Int Solid-State Sensors and Actuators Digest of Technical Papers, TRANSDUCERS '91. Conf, 1991, pp. 456–459.

## Dehnbarkeit: Membran.

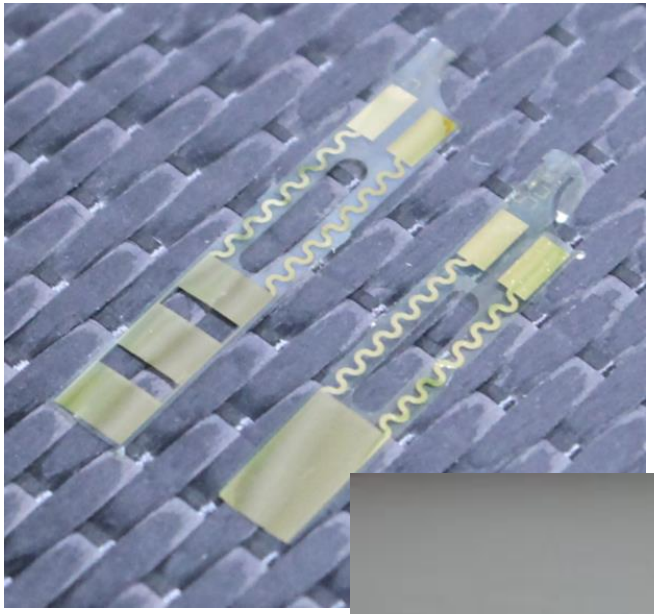
Q. B. Zou, Z. F. Wang, R. M. Lin, S. Yi, H. Q. Gong, M. K. Lim, Z. J. Li, L. T. Liu, A study on corrugated diaphragms for high-sensitivity structures, Journal of Micromechanics and Microengineering 7 (4) (1997) 310–315.

## Dehnbarkeit: Netzstruktur.

T. Someya, Y. Kato, T. Sekitani, S. Iba, Y. Noguchi, Y. Murase, H. Kawaguchi, T. Sakurai, Conformable, flexible, large-area networks of pressure and thermal sensors with organic transistor active matrixes, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 102 (35) (2005) 12321–12325.

# Mechanische Anpassung.

## Flexibilität als Dehnbarkeit: In der Ebene?



Spannung um Inlays, Fortsetzung:
Ein praktisches Beispiel

Komplexe Geometrien führen zu komplexer Verformung auch bei Belastung in der Ebene.

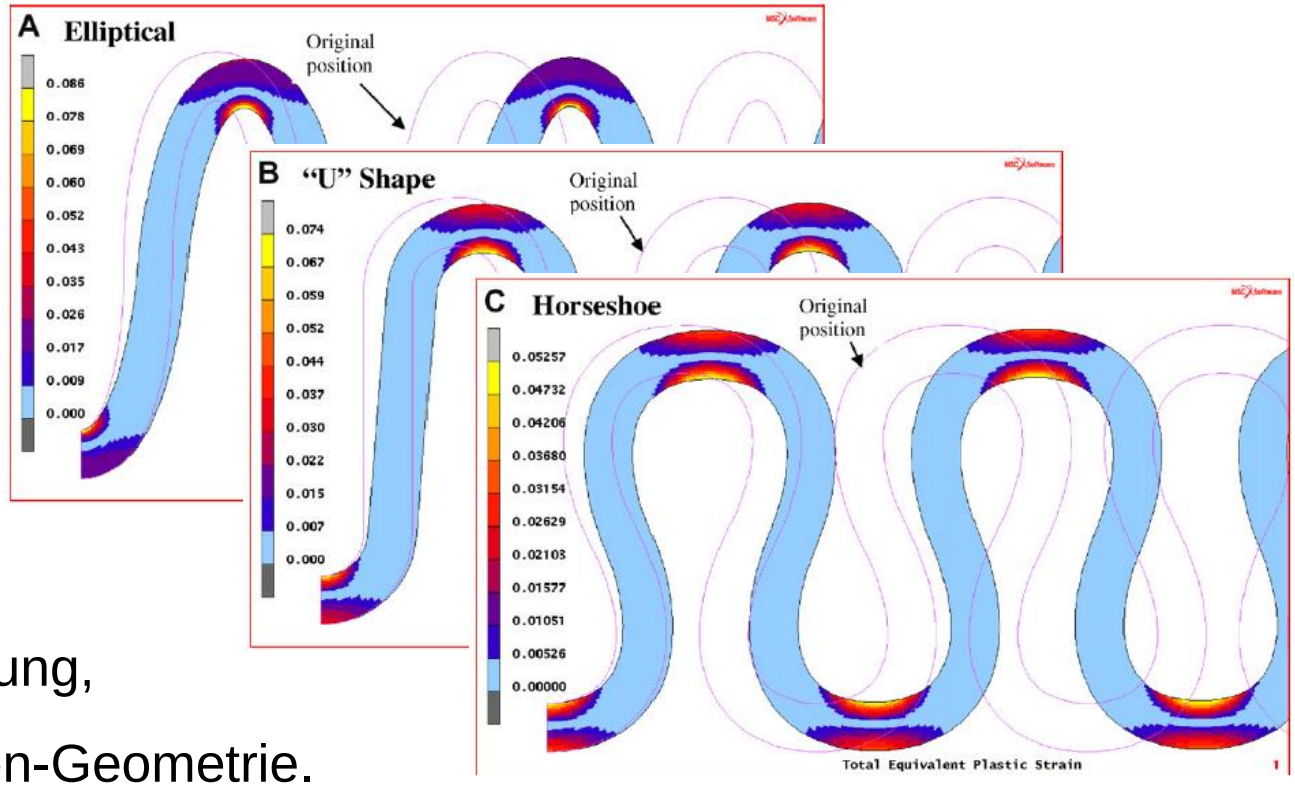
# Mechanische Anpassung.

## Dehnbarkeit: Hufeisen.

Grundprinzip Mäanderform zur Erzielung v. Dehnbarkeit in Richtung des Leiters, Analyse unterschiedl. Geometrien,

Ziel Reduzierung der lokalen Belastung,

Ergebnis : Hufeisen-Geometrie.

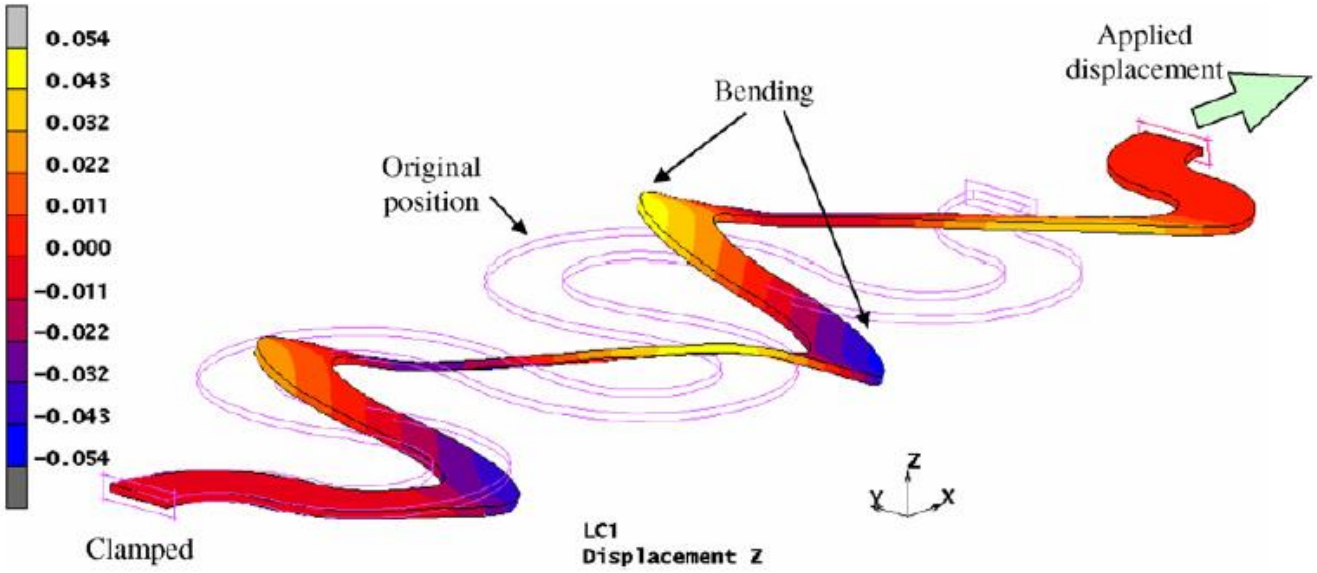



M. Gonzalez et al.: *Design of metal interconnects for stretchable electronic circuits*. Microelectronics Reliability 48 (2008) 825-832.

# Mechanische Anpassung.

## Dehnbarkeit: Hufeisen.

Problem der Dehnung außerhalb der Ebene illustriert von Gonzalez et al., vgl. Film auf der Folie „Flexibilität als Dehnbarkeit: In der Ebene?“.

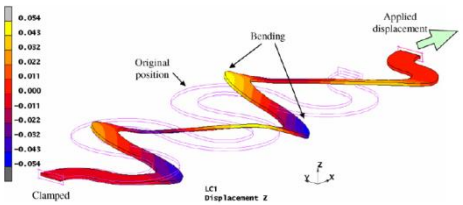


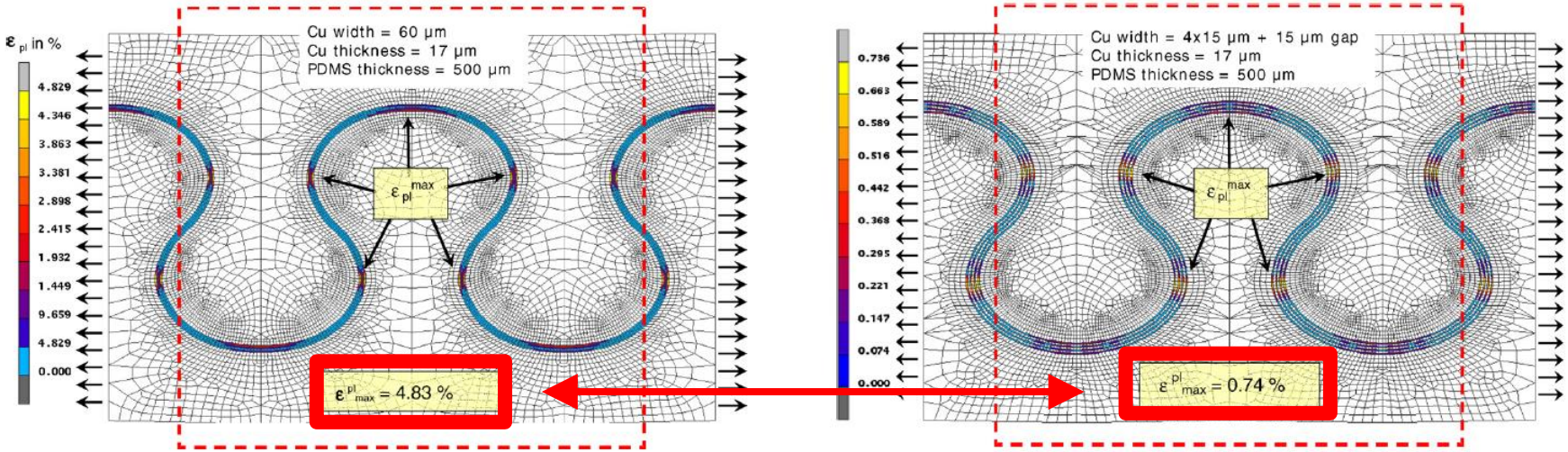

M. Gonzalez et al.: *Design of metal interconnects for stretchable electronic circuits*. Microelectronics Reliability 48 (2008) 825-832.

# Mechanische Anpassung.

## Dehnbarkeit: Hufeisen.

Problem der Dehnung außerhalb der Ebene, Abhilfe: Parallele Leiterbahnen, dadurch red. Aspektverhältnis Breite:Dicke.

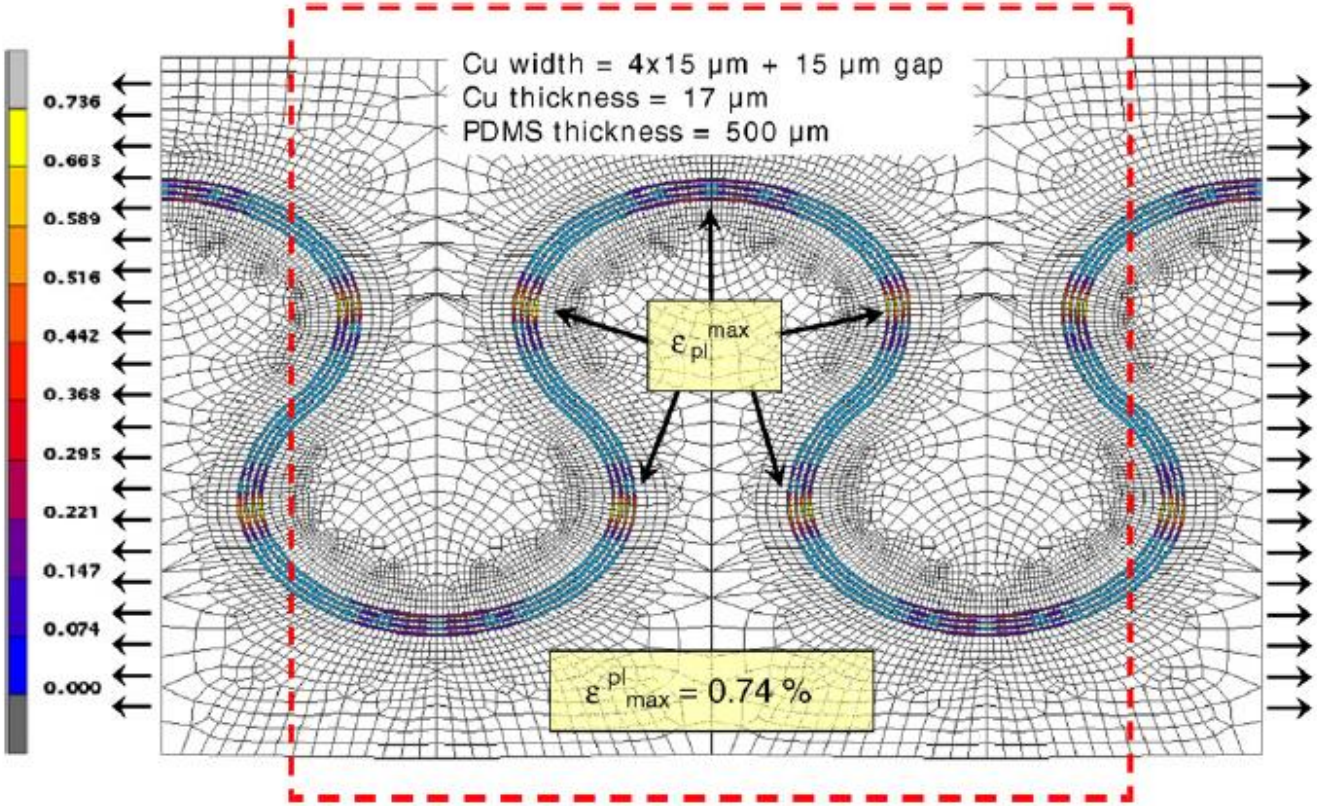



M. Gonzalez et al.: *Design of metal interconnects for stretchable electronic circuits*. Microelectronics Reliability 48 (2008) 825-832.

# Mechanische Anpassung.

## Dehnbarkeit: Hufeisen.



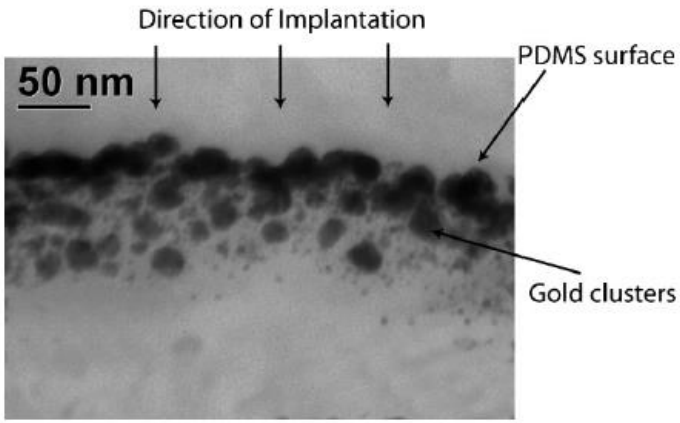

Poisson effect observed during a uniaxial tension test for a multiple conductor line. Dashed line shows the original dimensions of the substrate.

M. Gonzalez et al.: *Design of metal interconnects for stretchable electronic circuits*. Microelectronics Reliability 48 (2008) 825-832.

# Mechanische Anpassung.

## Dehnbarkeit: Au-Cluster.

Au-Ionenimplantation in einer Polydimethylsiloxan (PDMS)-Oberfläche, bis ca. 50 nm Tiefe, Dehnungen bis 175%.



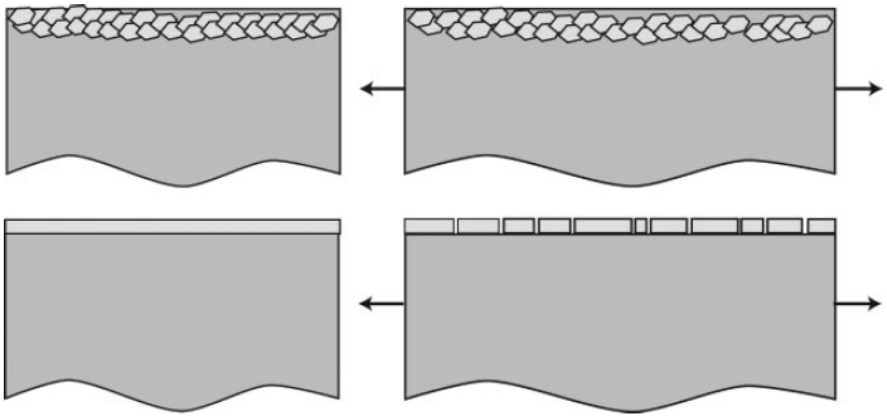
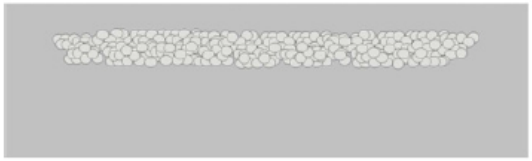



**Figure 2.** Top: schematic cross-section illustrating a compliant electrode obtained by ion implantation. The clusters are touching each other but can slide relative to each other. They can sustain large strain while remaining conductive. Bottom: non-compliant electrode obtained by thin-film deposition. The strong binding forces which link the metallic atoms together drastically limit the achievable strain before damage to the electrode.

S. Rosset, M. Niklaus, P. Dubois, H. R. Shea, Metal ion implantation for the fabrication of stretchable electrodes on elastomers, Advanced Functional Materials 19 (3) (2009) 470–478.

# Mechanische Anpassung.

## Dehnbarkeit: Flüssiges In.



Mikrokanäle von 0.5x0.6 $mm^2$ Querschnitt gefüllt mit bei Raumtemperatur flüssigem Indium in Polydimethylsiloxan (PDMS)-Oberfläche und mit Kontaktierung über Goldstifte.

Prüfung mit 100 Zyklen bis zu einer Dehnung von 35% über-standen.

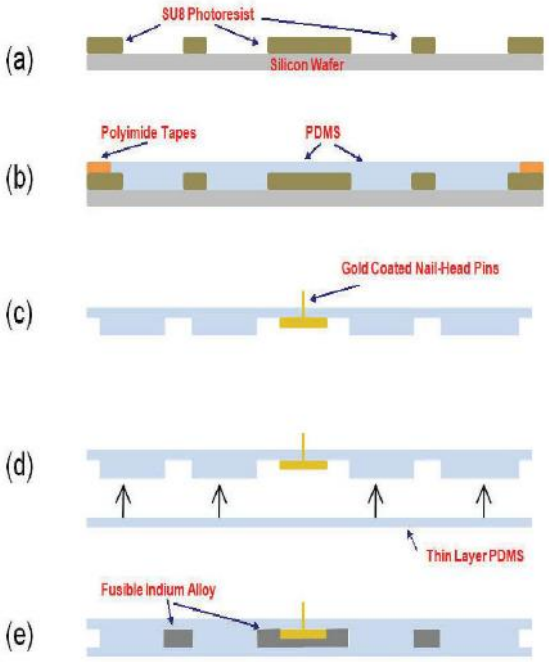
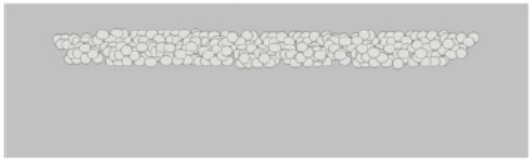



*Figure 2. Fabrication Process.*

P. Wei, R. Taylor, Z. Ding, G. Higgs, J. J. Norman, B. L. Pruitt, B. Ziaie, A stretchable cell culture platform with embed-ded electrode array, 2009 IEEE 22nd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. MEMS 2009 (2009) 407–10doi:10.1109/MEMSYS.2009.4805405.

# Mechanische Anpassung.

## Dehnbarkeit: Flüssiges In.



Mikrokanäle von 0.5x0.6 $mm^2$ Querschnitt gefüllt mit bei Raumtemperatur flüssigem Indium in Polydimethylsiloxan (PDMS)-Oberfläche und mit Kontaktierung über Goldstifte.

Prüfung mit 100 Zyklen bis zu einer Dehnung von 35% über-standen.

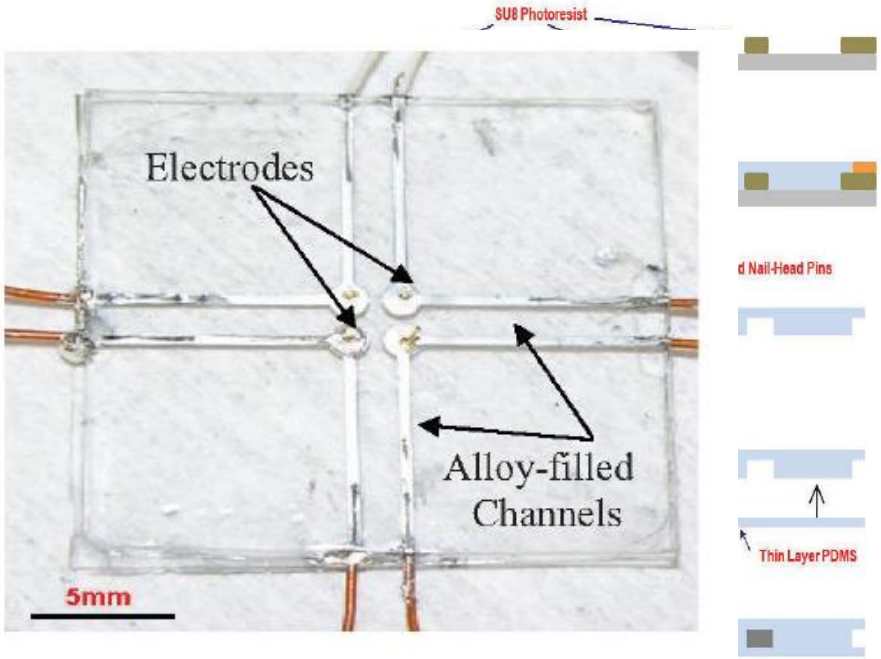



*Figure 3. Photograph of a fabricated device.*

P. Wei, R. Taylor, Z. Ding, G. Higgs, J. J. Norman, B. L. Pruitt, B. Ziaie, A stretchable cell culture platform with embed-ded electrode array, 2009 IEEE 22nd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. MEMS 2009 (2009) 407–10doi:10.1109/MEMSYS.2009.4805405.

# Mechanische Anpassung.

## Dehnbarkeit: Wellen.

Durch verschiedene Ätzschritte wird aus bzw. auf einem SOI-Wafer eine Silizium-Membran hergestellt, die auf ein PDMS-Substrat übertragen wird.

Diese Übertragung und die Ausbildung der Verbindung zwischen Si-Membran und Substrat erfolgt bei erhöhter Temperatur (ca. 180°C).

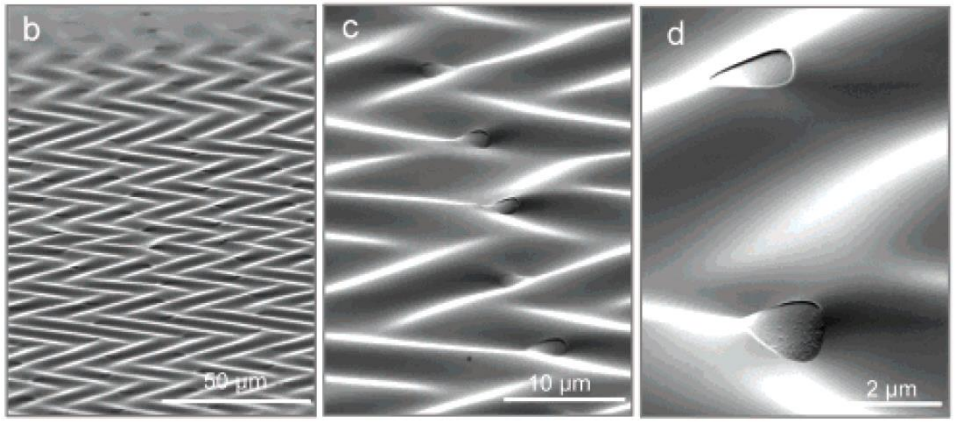
Da der thermische Ausdehnungskoeffizient von PDMS größer ist als der von Silizium, schrumpft  das Substrat stärker als die Membran und setzt diese unter Druckspannungen, die letztlich zur Ausbildung einer Faltenstruktur führen. Die Falten erlauben Dehnungen in der Ebene bis zu dem Punkt, an dem die Struktur „glattgezogen“ ist.

W. M. Choi, J. Song, D.-Y. Khang, H. Jiang, Y. Y. Huang, J. A. Rogers, Biaxially stretchable "wavy" silicon nanomembranes, Nano Letters 7 (6) (2007) 1655–1663, pMID: 17488053.

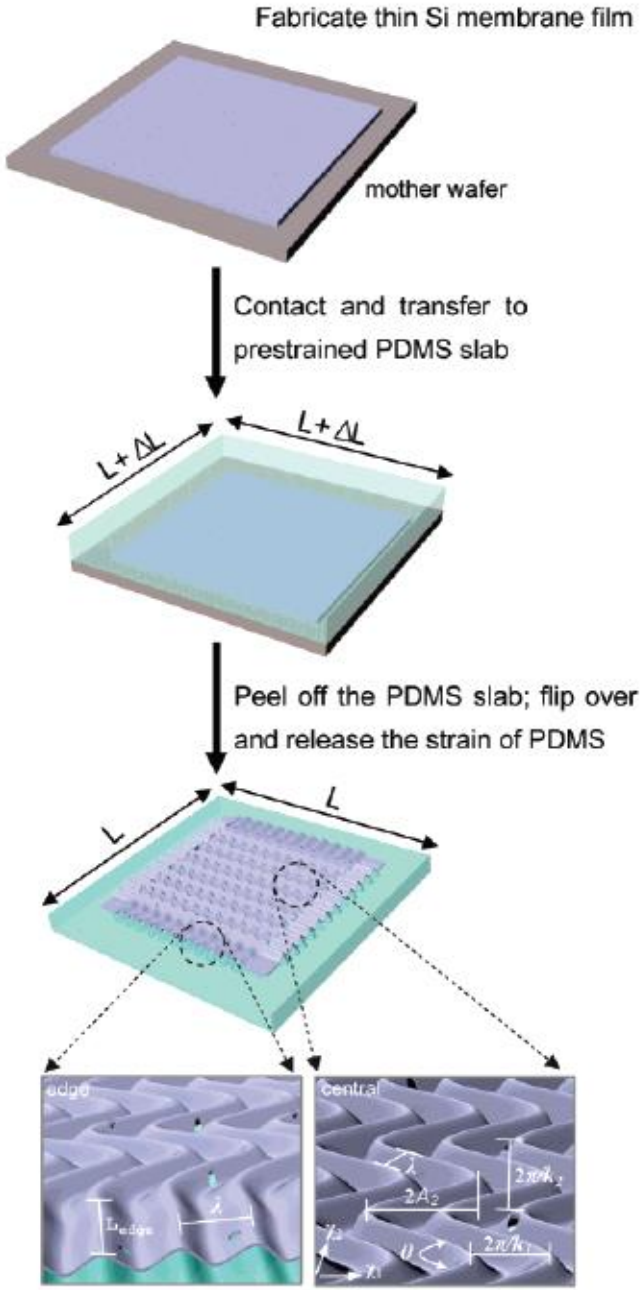
# Mechanische Anpassung.

## Dehnbarkeit: Wellen.

Schematische Darstellung des Verfahrens und Bilder der Struktur für 100 nm Si und 3.8 % thermische Dehnung.




W. M. Choi, J. Song, D.-Y. Khang, H. Jiang, Y. Y. Huang, J. A. Rogers, Biaxially
7 (6) (2007) 1655–1663, pMID: 17488053.



# Mechanische Anpassung.

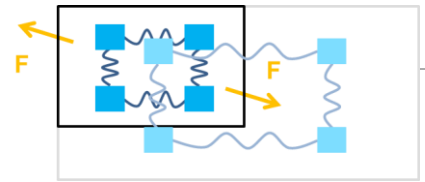
## Dehnbarkeit: Au gestaucht.

Das Konzept ähnelt den zuvor dargestellten Wellen, mit dem Unterschied, dass die funktionale (leitende) Schicht in diesem Fall aus Gold besteht und durch aufdampfen (electron beam evaporation) aufgebracht wird.

Es ist nicht klar, ob die Bildung der Wellen durch in der Goldschicht während des Aufdampfens eingebrachte (welcher Mechanismus ?) Druckspannungen entsteht, oder eine Folge des Abscheidens auf einem mechanisch vorgestreckten Substrat ist, dass nach Ausbildung der Schicht entlastet wird.

Die erzeugten Schichten ertrugen Dehnungen von bis zu 22%.

S. P. Lacour et al.: *Stretchable gold conductors on elastomeric substrates*. Applied Physics Letters 82 (2003) 2404-2406.



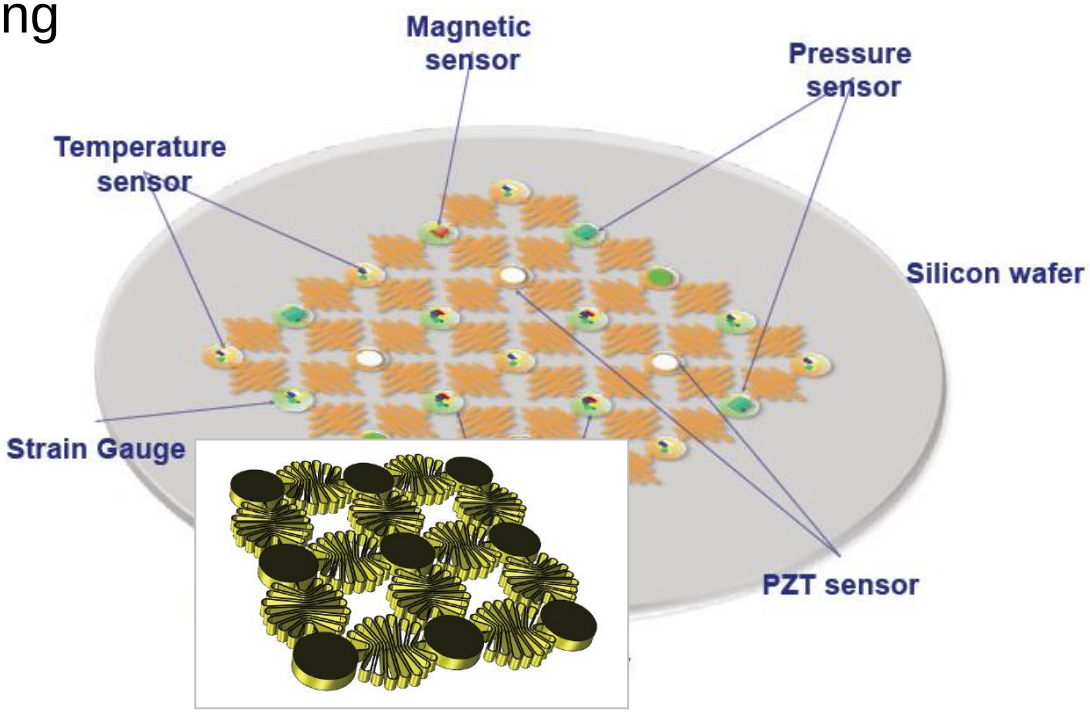

# Mechanische Anpassung.

## Dehnbarkeit: Vom Wafer zum Flugzeug.

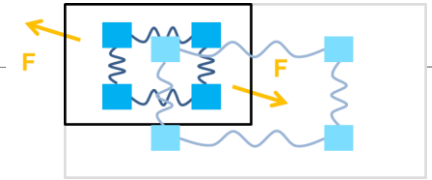
Neue Wege zur Realisierung von „Dehnungen“ um Größenordnungen.

<u>Ziel:</u>

Vom Wafer als dem Maßstab der Fertigung für MEMS-Prozesse zu großflächigen Sensornetzwerken.

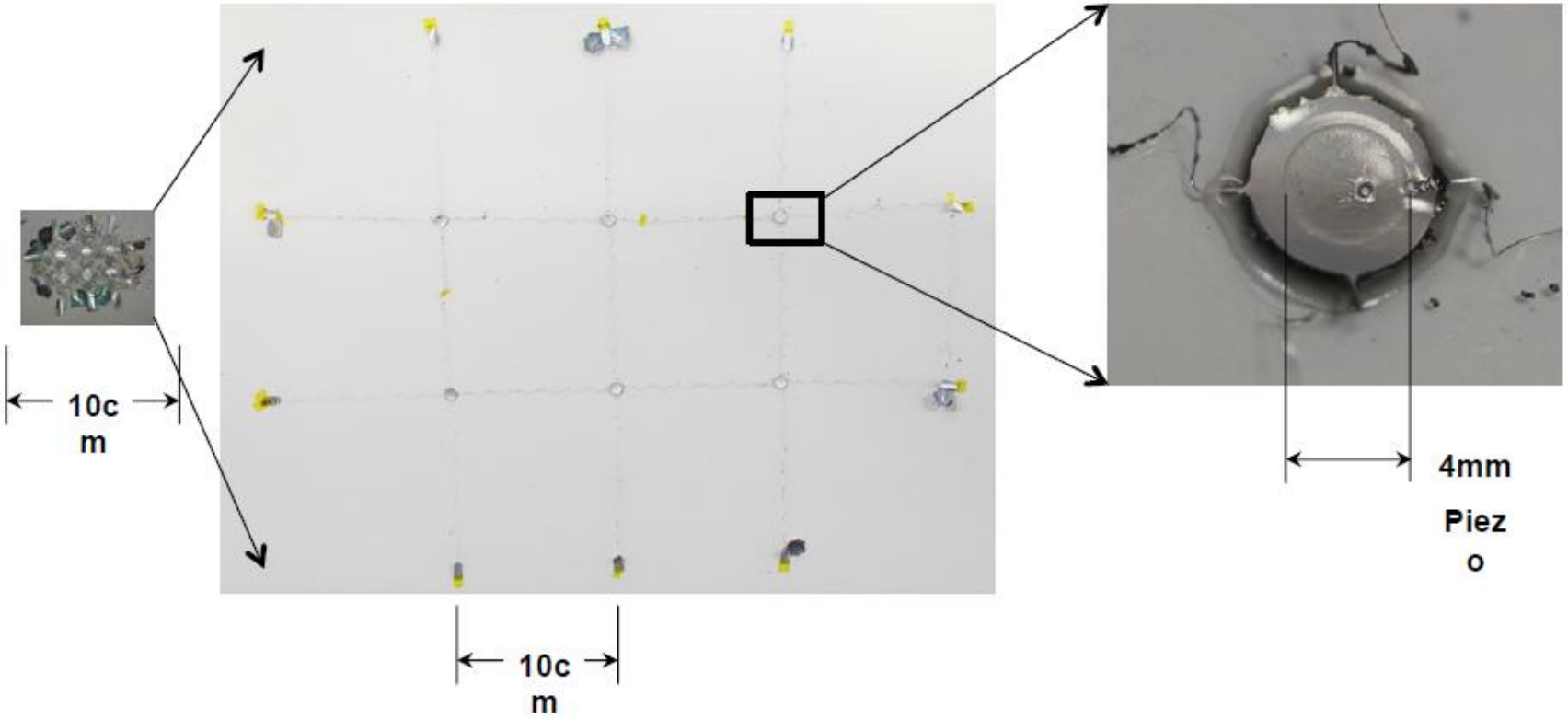



Quelle: Fu-Kuo Chang, Stanford University, retrieved from http://cars.stanford.edu/Affiliates%20News%20Stories/Attached%20Documents/2013-04-09_Chang.pdf




# Mechanische Anpassung.

## Dehnbarkeit: Vom Wafer zum Flugzeug.




Quelle: Fu-Kuo Chang, Stanford University, retrieved from http://cars.stanford.edu/Affiliates%20News%20Stories/Attached%20Documents/2013-04-09_Chang.pdf

# Thermische Anpassung

## Temperaturausdehnungskoeffizient α [$10^{-6}$/K]

Abweichungen der thermischen Ausdehnungskoeffizienten zwischen eingebetteten Komponenten und aufnehmendem Material führt zu mechanischen Spannungen:

- Bei ursprünglich spannungsfreiem Zustand als Folge von Temperaturänderungen im Betrieb.
- Im Verlauf der Herstellung bei Abkühlung von einem Prozessschritt, der mit erhöhter Temperatur einhergeht ggf. auch in Form von Eigenspannungen, die im Betrieb den lastinduzierten Spannungen überlagert sind.

# Thermische Anpassung

## Therm. Ausdehnungskoeffizient α [$10^{-6}$/K]

<u>Beispiel:</u>

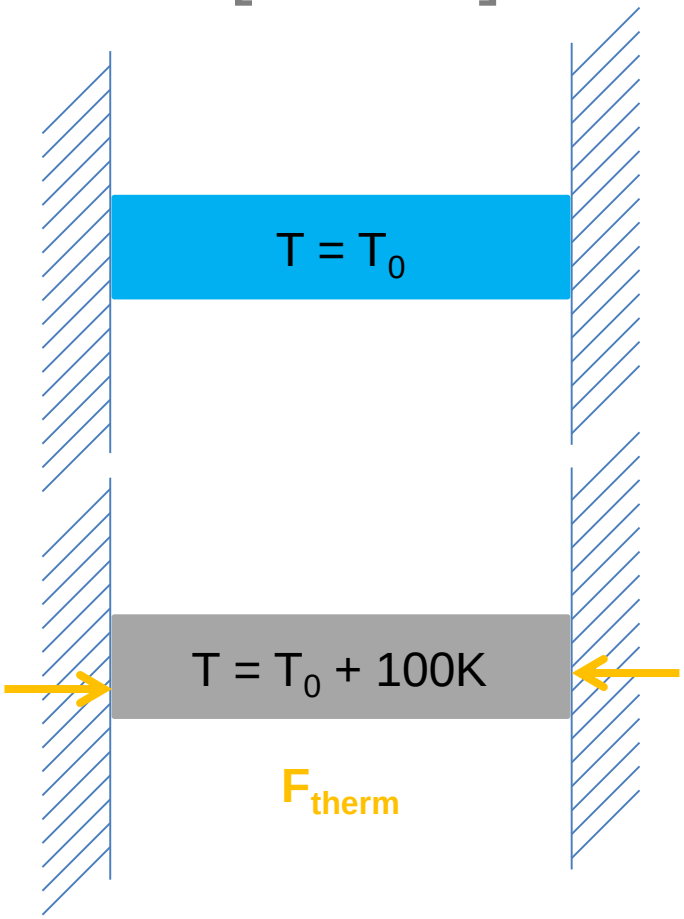
Material 1 Eisen, $\alpha = 10^{-6}$/K
Material 2 Al, $\alpha = 10^{-6}$/K

Spannungsfreie Lage bei $T = T_0$ (Einbautemperatur),

Situation bei $T = T_0 + 100$ K ?

Situation bei hybridem Materialaufbau, im Betrieb und bei Abkühlung von der Temperatur der Bildung des Verbundes?

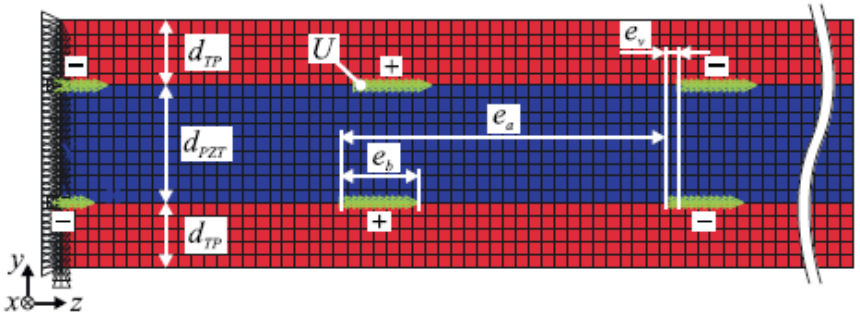
vgl. Bimetall-Effekt



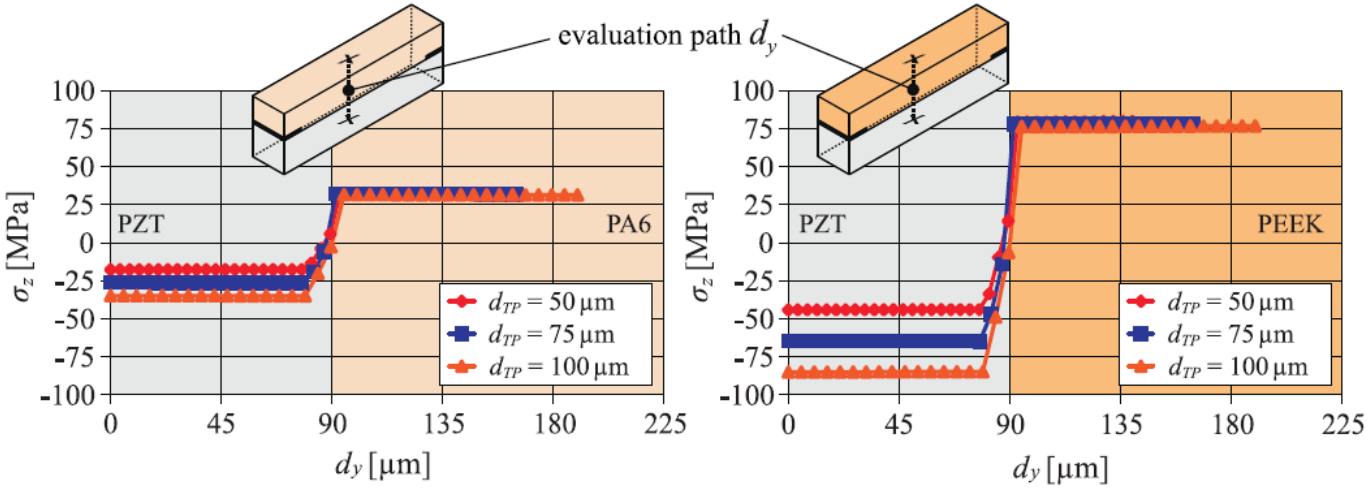
# Thermische Anpassung

## Eigensp. bei Kombination PZT-PEEK bzw. PA

Thermisch induzierte Eigen-spannungen in einem piezo-keramischen Modul zur Ein-bettung in FVK, Variation von Substratmaterial und -dicke.



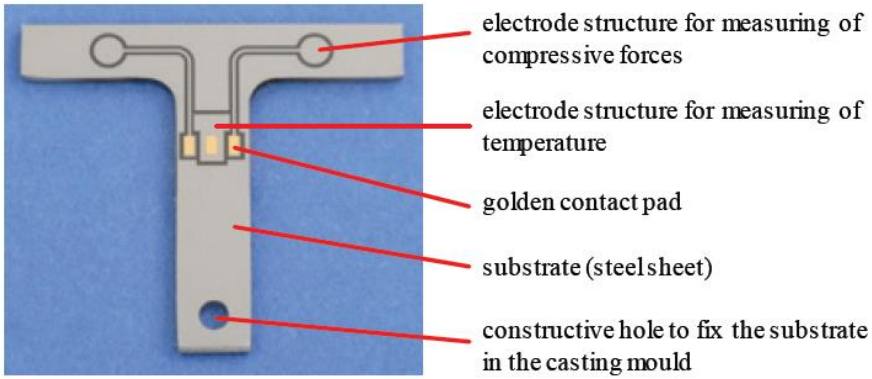

T. Heber et al.: *Production process adapted design of thermoplastic-compatible piezoceramic modules.* Composites Part A 59 (2014) 70-77.



# Fallstudien

## FS Ia: Sensorintegration im Druckguss

DiaForce®-Sensor, entwickelt am Fraunhofer IST, piezoresistiver DLC-Dünnschicht-Sensor hoher Härte (ca. 24 Gpa) und dadurch bedingt hoher tribologischer Beständigkeit. Sehr dünner Schichtaufbau von ca. 9-10 µm.




Isolation gegen umgebendes Metall über Schutzschicht auf Si-Basis mit Sauerstoff-Dotierung, ebenfalls entw. am Fraunhofer IST, Markenname SiCON®.

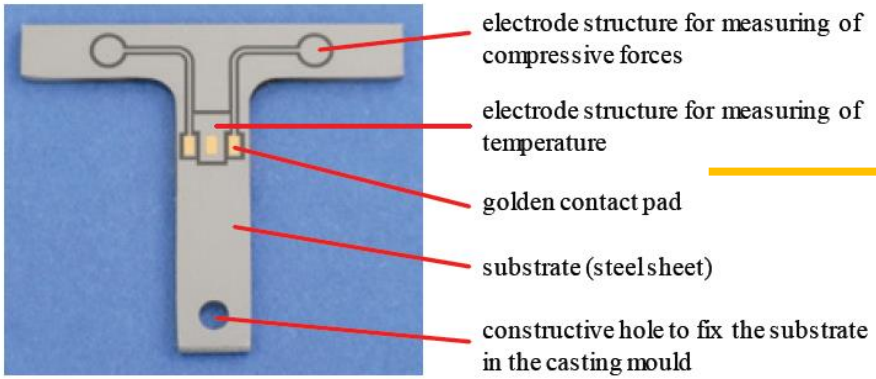
Interonnects auf Chrom-Basis: Temperaturfestes Gesamtsystem.

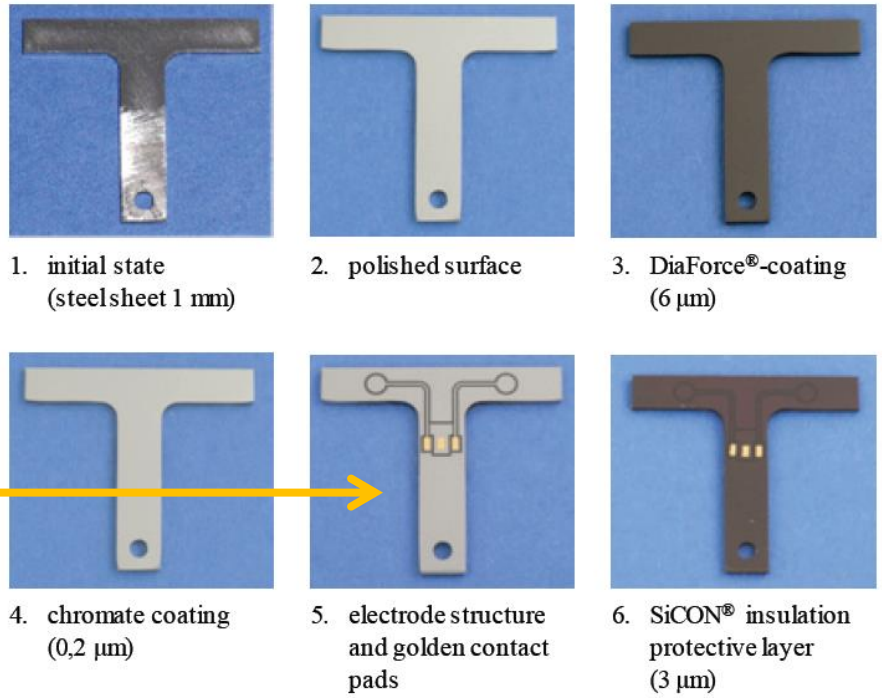
C. Pille et al.: *Encapsulating piezoresistive thin film sensors based on amorphous diamond-like carbon in aluminium castings*. Proceedings of the SysInt 2012 Conference, Hannover, 27.-29. Juni 2012.

# Fallstudien

## FS Ia: Sensorintegration im Druckguss

Hochtemperatur- und tribologisch beständiger piezoresist. (!) Sensor (Diamond-Like Carbon, DLC) und Isolation/Kapselung aus sauerstoffdotiertem Silizium.



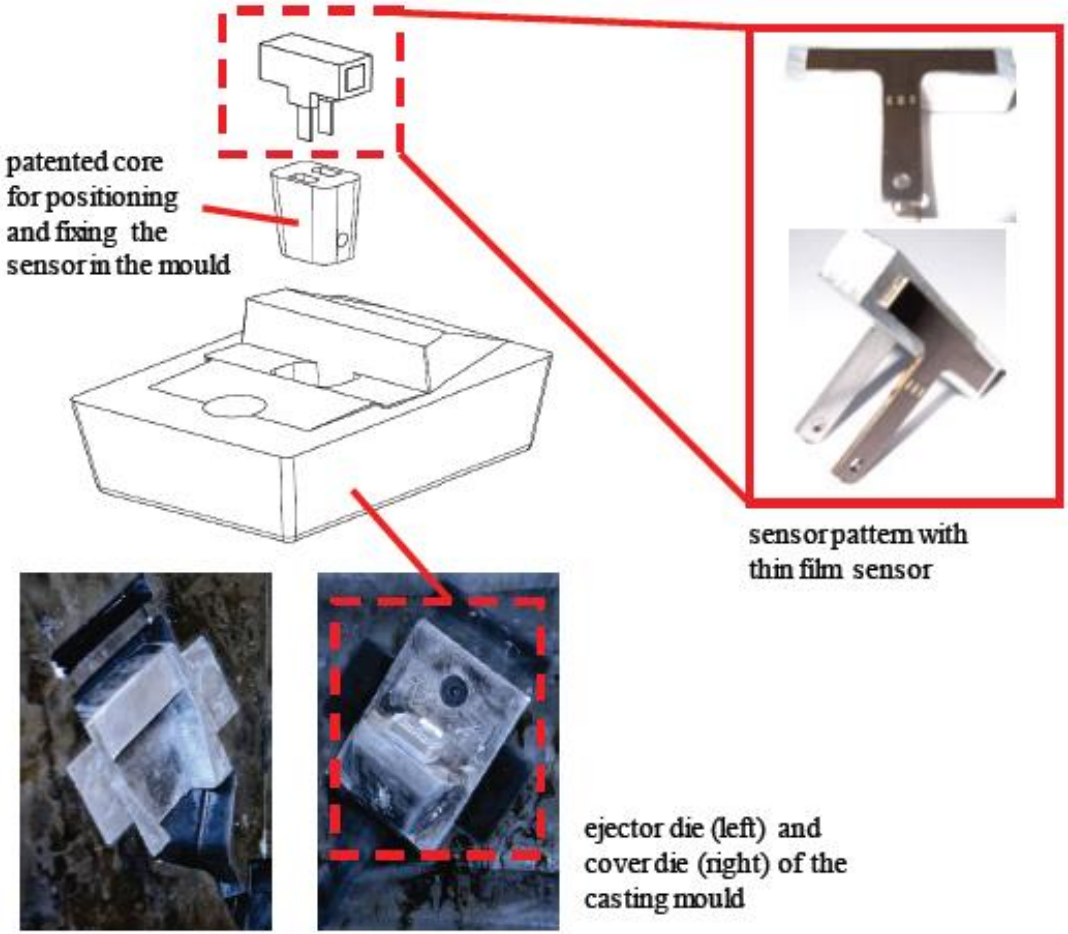

C. Pille et al.: *Encapsulating piezoresistive thin film sensors based on amorphous diamond-like carbon in aluminium castings*. Proceedings of the SysInt 2012 Conference, Hannover, 27.-29. Juni 2012.

# Fallstudien

## FS Ia: Druckguss

Halterung für Sensor-träger mit Fixierung in einem speziell ent-wickelten Kern in der Druckguss-Form:

Positionierung, Verhinderung einer Verlagerung durch die einströmende Schmelze (AlSi9MgMn, Silafont-36, Gießtemperatur ca. 700°C).



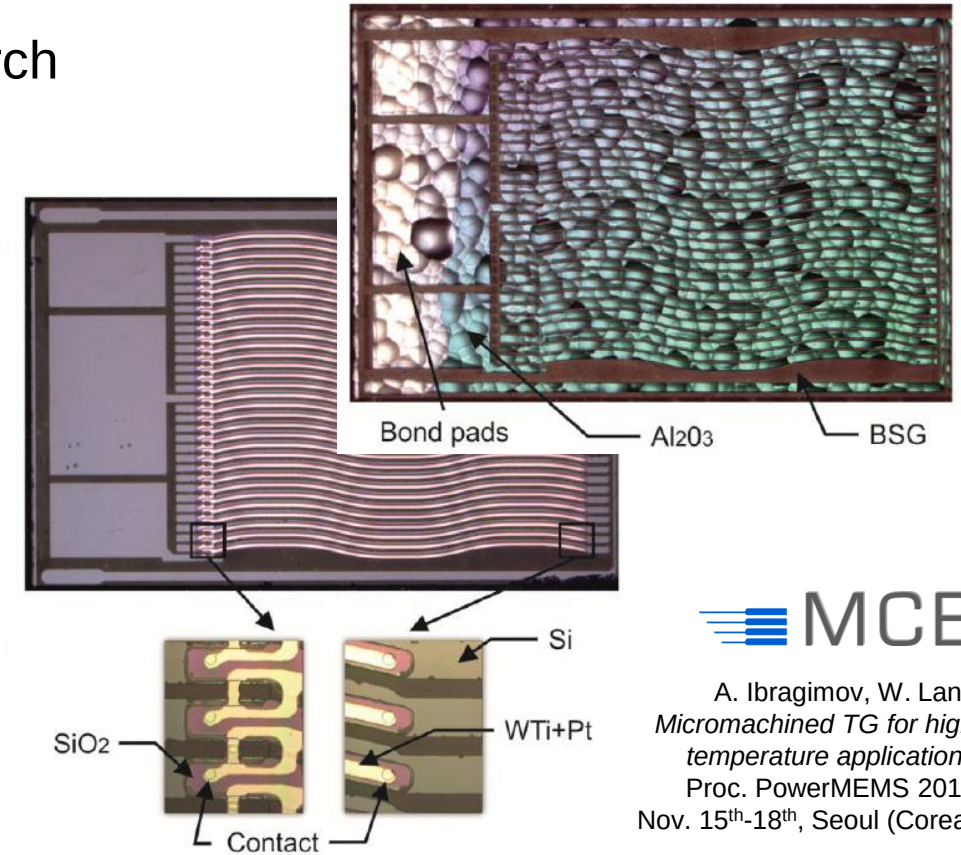

C. Pille et al.: *Encapsulating piezoresistive thin film sensors based on amorphous diamond-like carbon in aluminium castings*. Proceedings of the SysInt 2012 Conference, Hannover, 27.-29. Juni 2012.

# Fallstudien

## FS Ib: TG integriert im Druckguss

Ein Thermogenerator (TG), durch geeignete Materialauswahl angepasst an die Integration in Gießverfahren:

Teilweise Einbettung in ein Aluminium-Bauteil herge-stellt im Druckguss bei Schmelzetemperaturen von ca. 770°C.



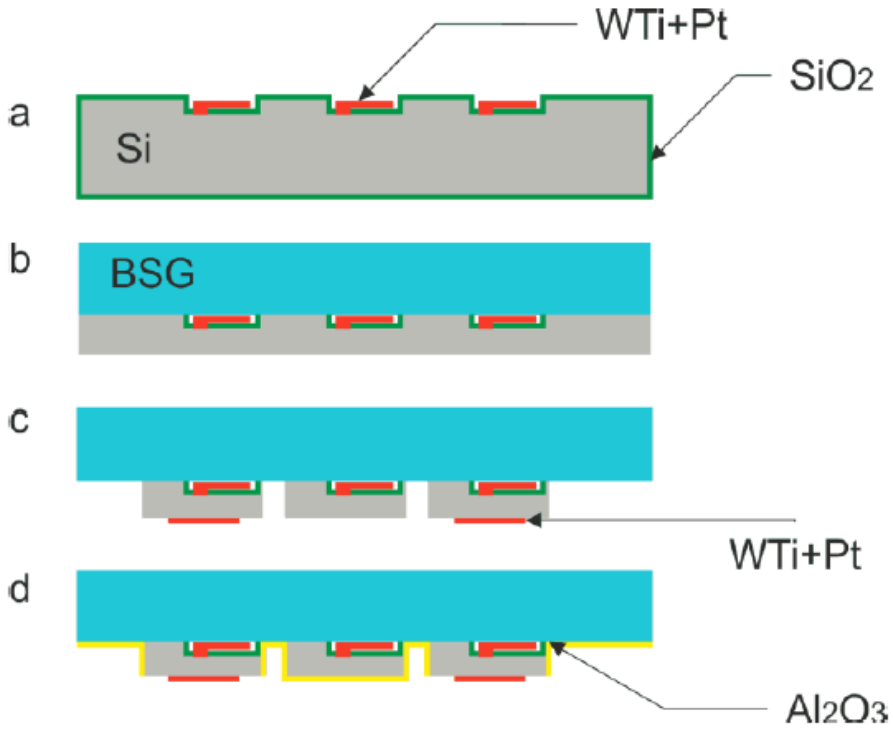

A. Ibragimov, W. Lang: *Micromachined TG for high-temperature applications*. Proc. PowerMEMS 2011, Nov. 15th-18th, Seoul (Corea).

# Fallstudien

## FS Ib: TG integriert im Druckguss

Ein Thermogenerator, durch geeignete Materialauswahl angepasst an die Integration in Gießverfahren:

Teilweise Einbettung in ein Aluminium-Bauteil herge-stellt im Druckguss bei Schmelzetemperaturen von ca. 770°C.




A. Ibragimov, W. Lang:
*Micromachined TG for high-temperature applications*.
Proc. PowerMEMS 2011, Nov. 15th-18th, Seoul (Corea).

MCB Fraunhofer IFAM

# Fallstudien

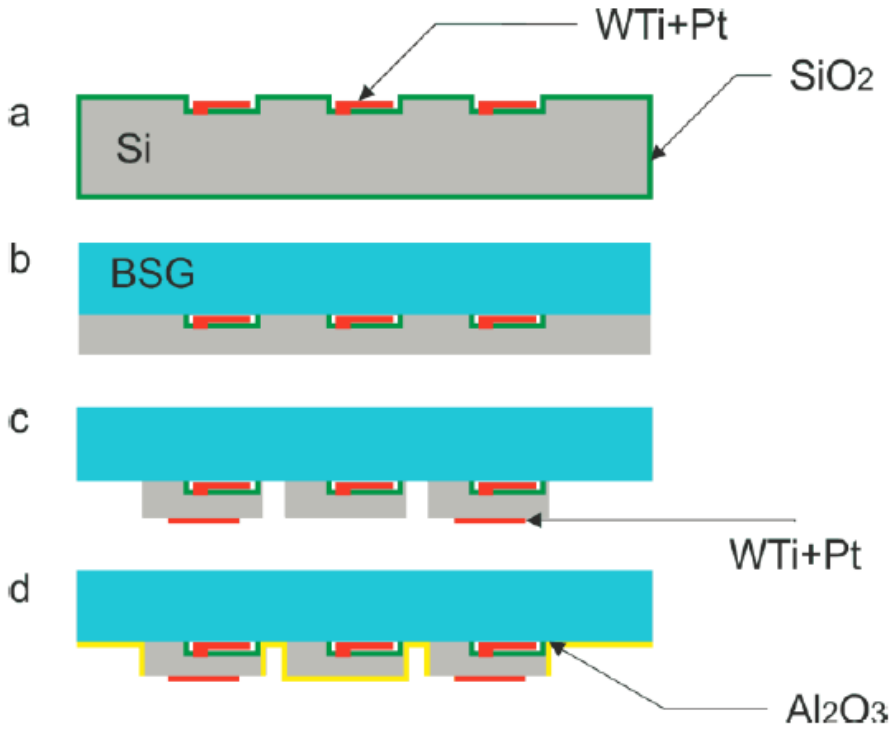
## FS Ib: TG integriert im Druckguss

(a) oxidierter Si-Wafer mit den metallischen Komponenten des Thermopaares in Vertiefungen mit Fenstern zur Kontaktierung betw.

(b) teilw. Entfernung des Si, verbinden mit BSG, Dünnen

(c) Kontaktierung, DRIE

(d) Abscheidung Isolation



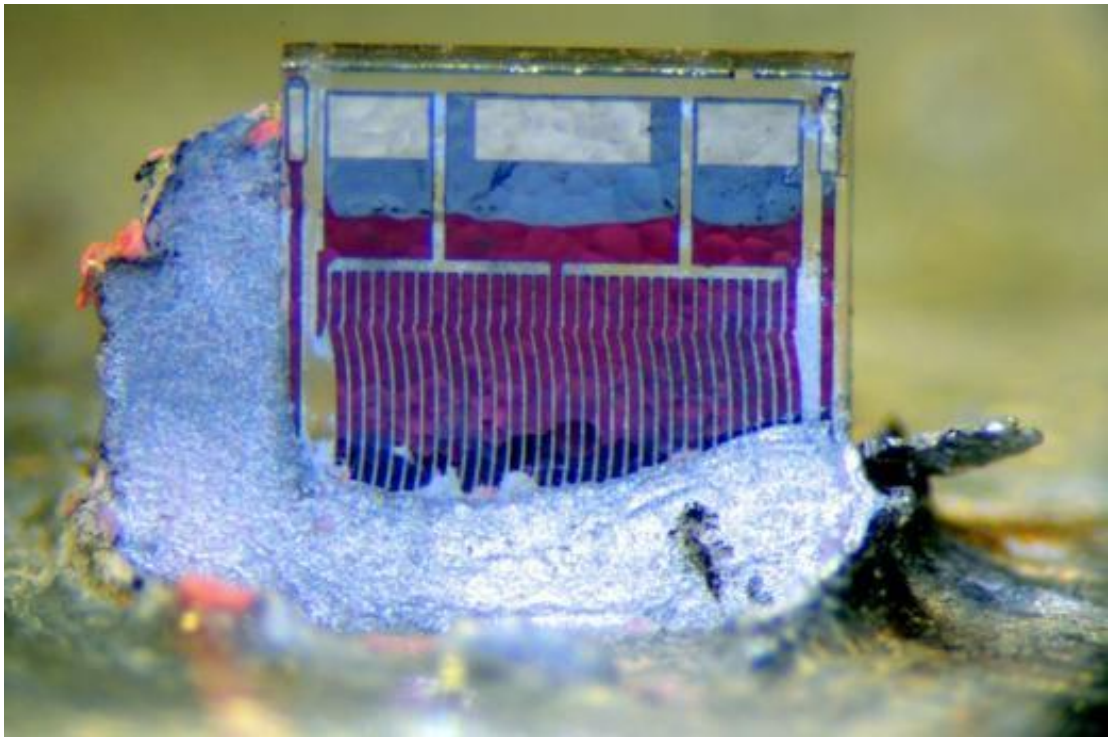

A. Ibragimov, W. Lang:
*Micromachined TG for high-temperature applications*.
Proc. PowerMEMS 2011, Nov. 15th-18th, Seoul (Corea).

# Fallstudien

## FS Ib: TG integriert im Druckguss

Thermogenerator nach dem Gießen, teilweise eingebettet in Aluminium,

Kontakte sichtbar und zugänglich.



Fraunhofer IFAM

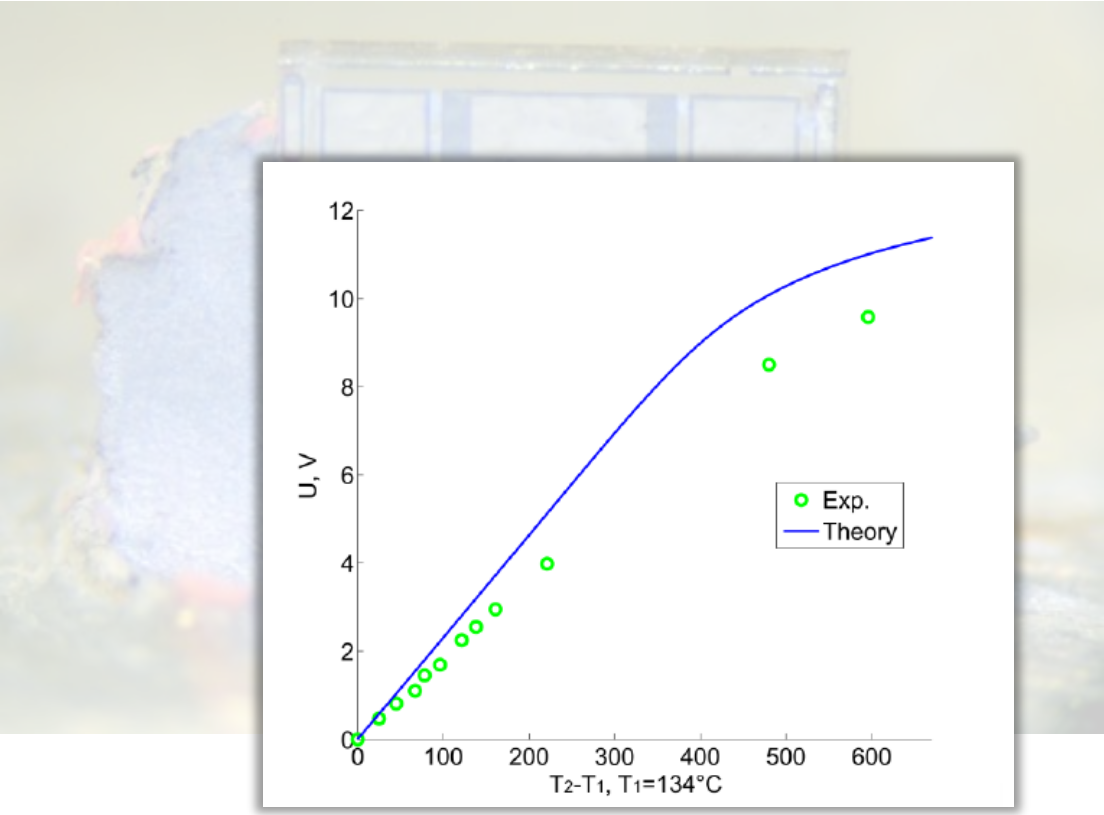
MCB

A. Ibragimov, W. Lang: *Micromachined thermogenerator for high-temperature applications*. Proc. PowerMEMS 2011, Nov. 15th-18th, Seoul (Corea).

# Fallstudien

## FS Ib: TG integriert im Druckguss

Prüfung thermo-elektrischer Eigen-schaften des Systems: Erzeugte Spannung im erwarteten Bereich.




Fraunhofer IFAM

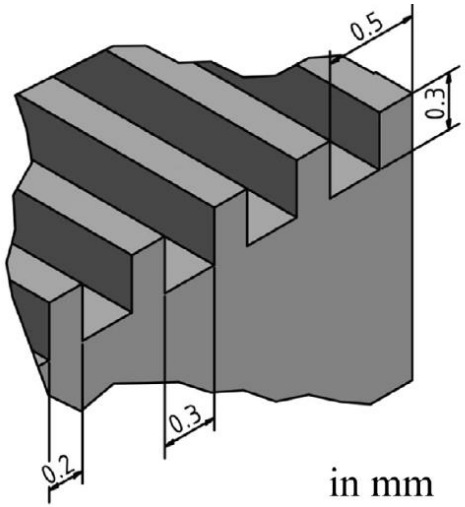
MCB

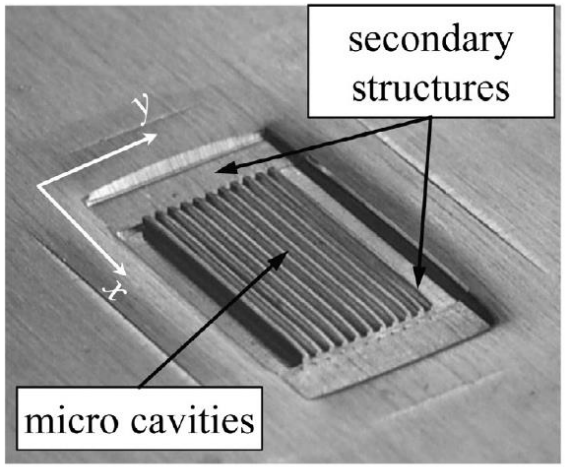
A. Ibragimov, W. Lang: *Micromachined thermogenerator for high-temperature applications*. Proc. PowerMEMS 2011, Nov. 15th-18th, Seoul (Corea).

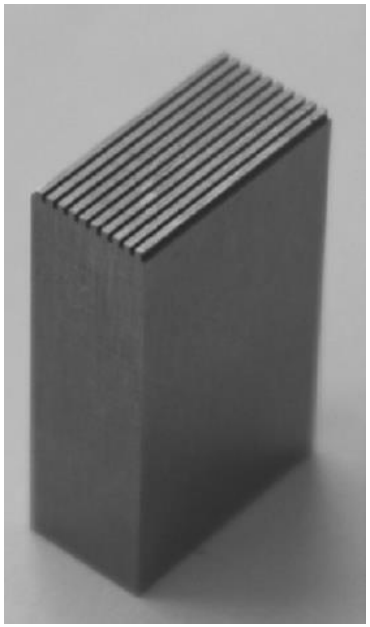
# Fallstudien

## FS II: Piezoel. Sensoren in Blechwerkstoffen

Einprägen von Vertiefungen in die Blechoberfläche mit Mikro-Umform-werkzeugen als Aufnahme für piezokeramische Sensoren bzw. Aktuatoren:



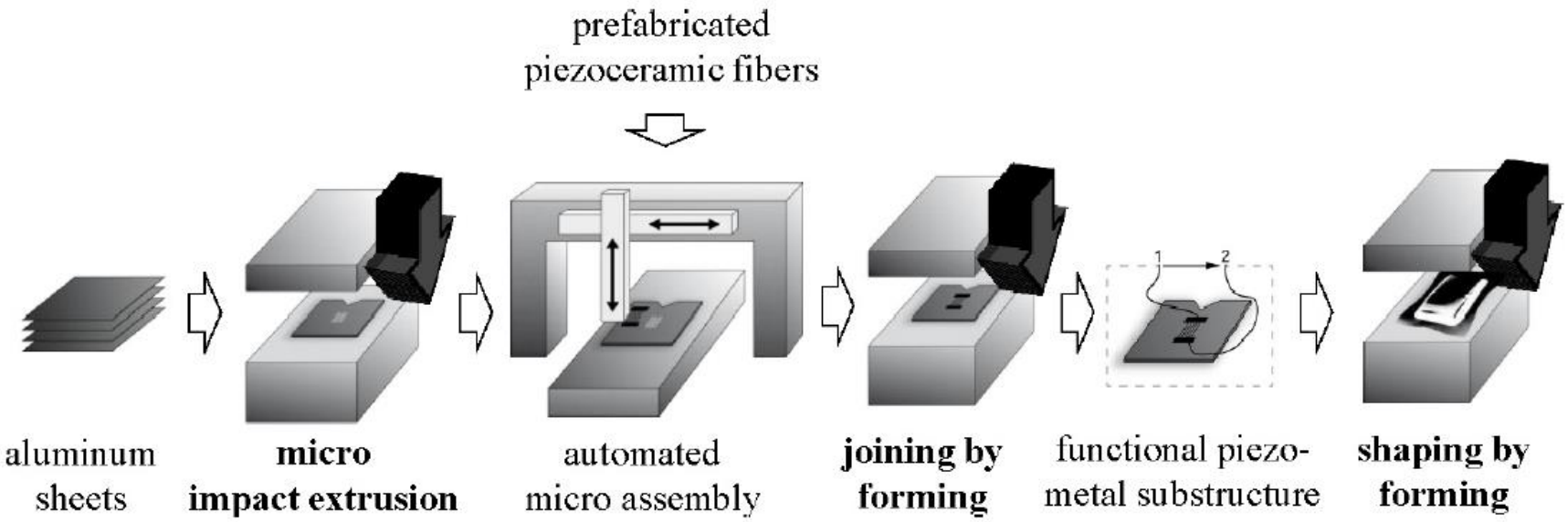



W.-G. Drossel et al.: *Experimental and numerical study on shaping of aluminium sheets with integrated piezoceramic fibres*. Journal of Materials Processing Technology 214 (2014) 217-228.

# Fallstudien

## FS II: Piezoel. Sensoren in Blechwerkstoffen

Fertigungskonzept, Übersicht:




W.-G. Drossel et al.: *Experimental and numerical study on shaping of aluminium sheets with integrated piezoceramic fibres*. Journal of Materials Processing Technology 214 (2014) 217-228.

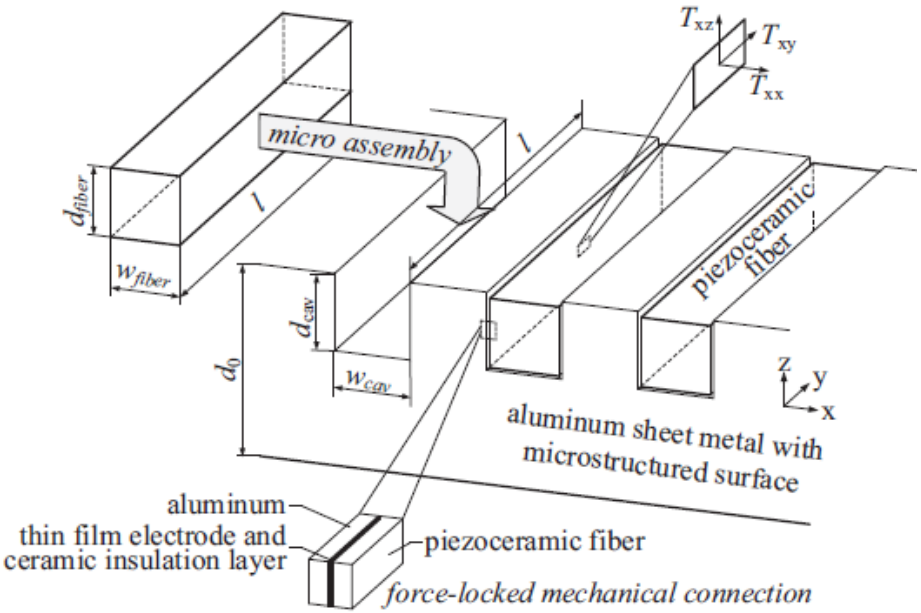
# Fallstudien

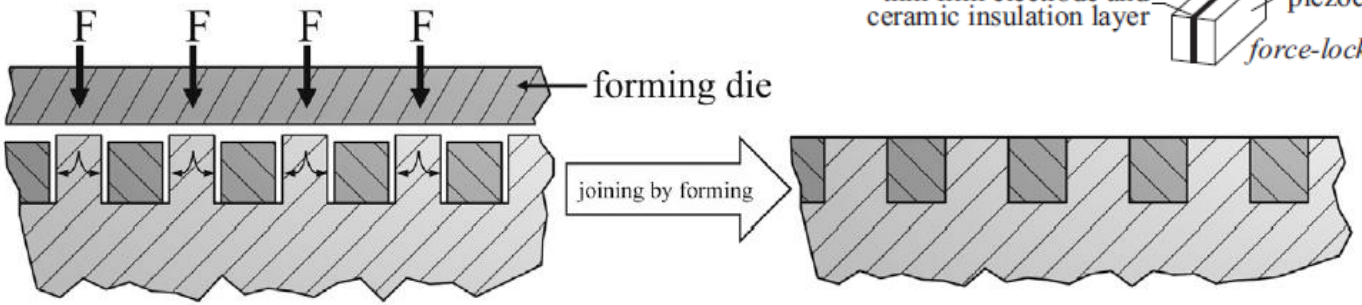
## FS II: Piezoel. Sensoren in Blechwerkstoffen

Integration piezokeramischer Module:

Fügen durch Umformung, mechanische Klemmung

W.-G. Drossel et al.: *Experimental and numerical study on shaping of aluminium sheets with integrated piezoceramic fibres*. Journal of Materials Processing Technology 214 (2014) 217-228.

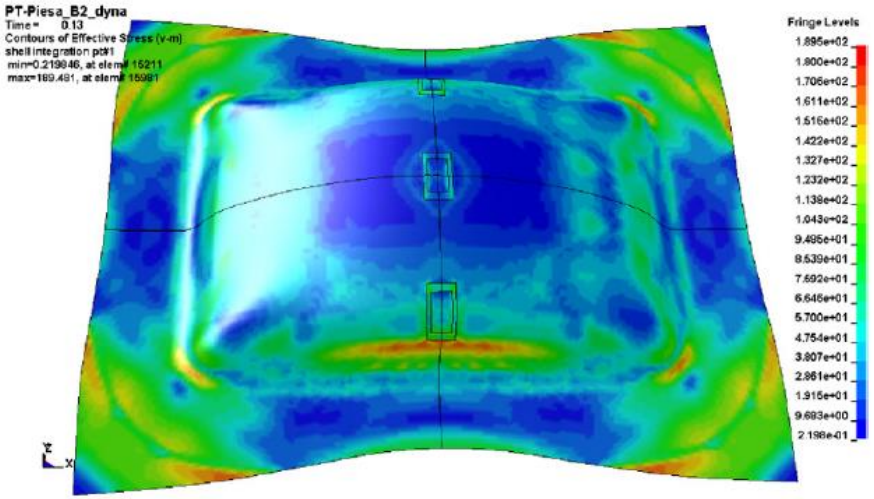


# Fallstudien

## FS II: Piezoel. Sensoren in Blechwerkstoffen

Umformung des sensorintegrierten Blechs in nachfolgenden Schritten der Bauteilfertigung:

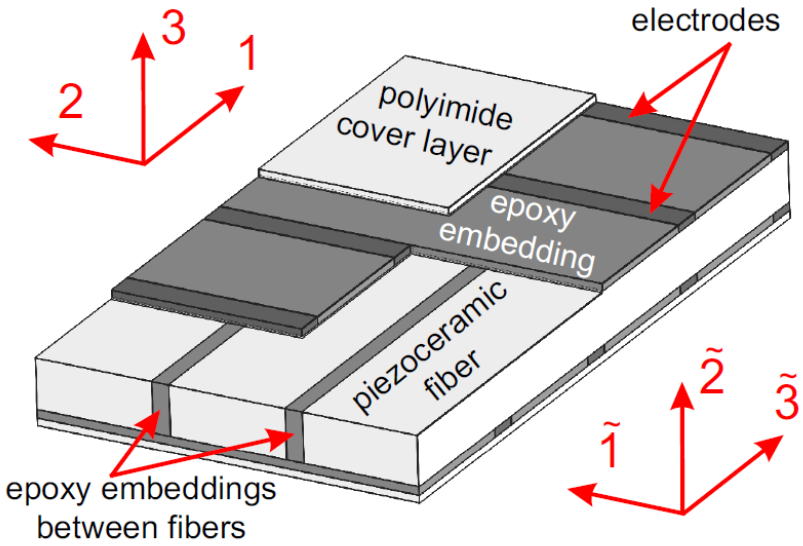


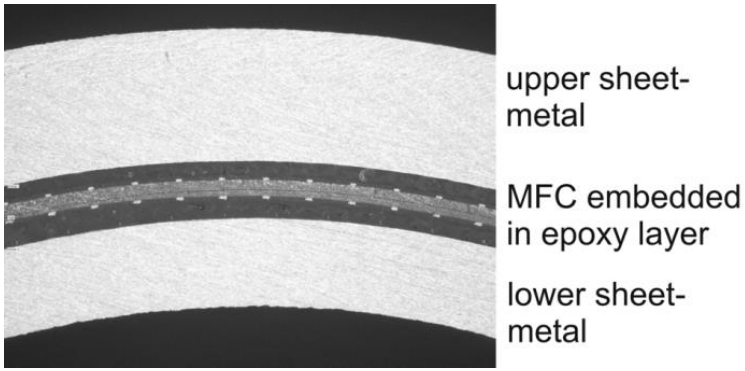

W.-G. Drossel et al.: *Experimental and numerical study on shaping of aluminium sheets with integrated piezoceramic fibres*. Journal of Materials Processing Technology 214 (2014) 217-228.

# Fallstudien

## FS II: Piezoel. Sensoren in Blechwerkstoffen

Alternative Vorgehensweise:
Neutral Plane Engineering mit Fasermodulen im Schichtaufbau.



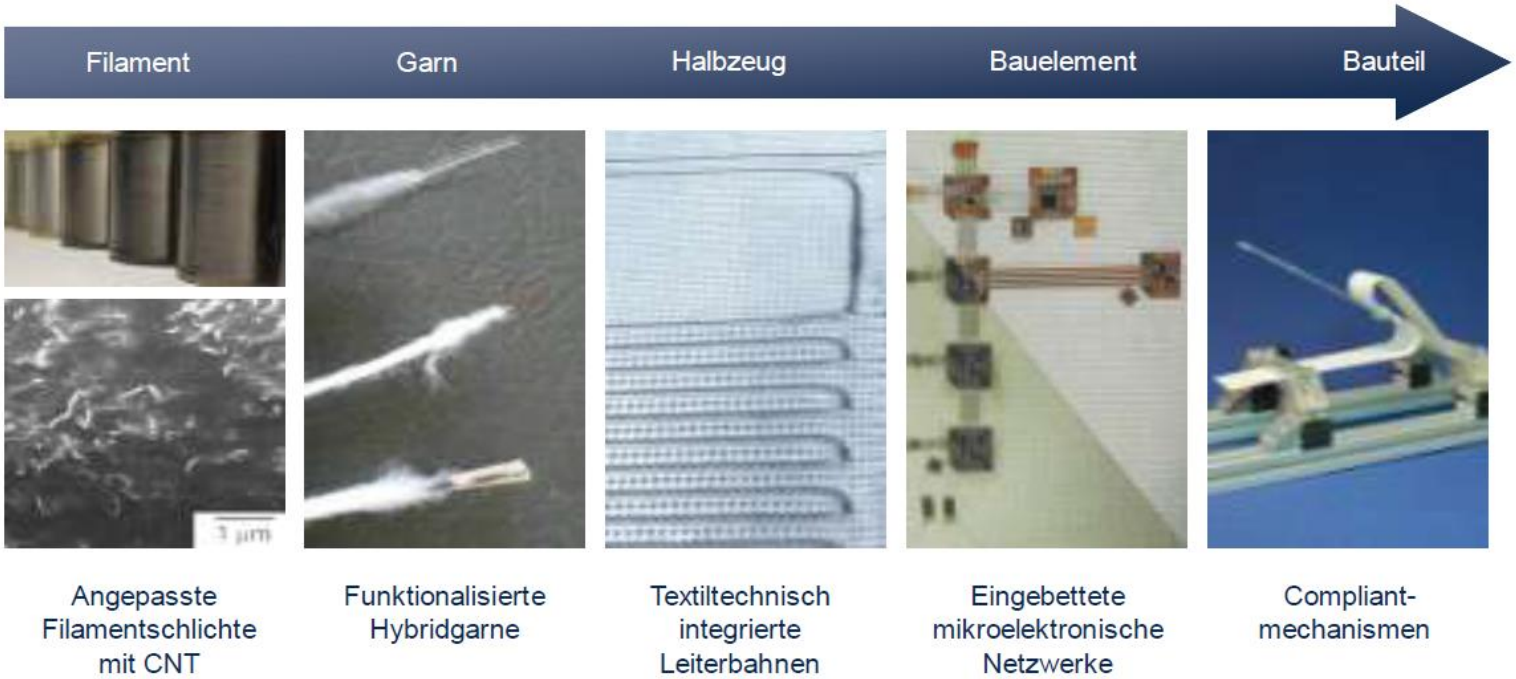




W.-G. Drossel et al.: *Evaluation of Actuator, Sensor and Fatigue Performance of Piezo-Metal Composites*. IEEE Sensors Journal (2014), accepted.

# Fallstudien

## FS III: Sensoren/Aktoren in FVK, Übersicht

Anknüpfungsebenen für Integration sensorischer Funktion in FVK:



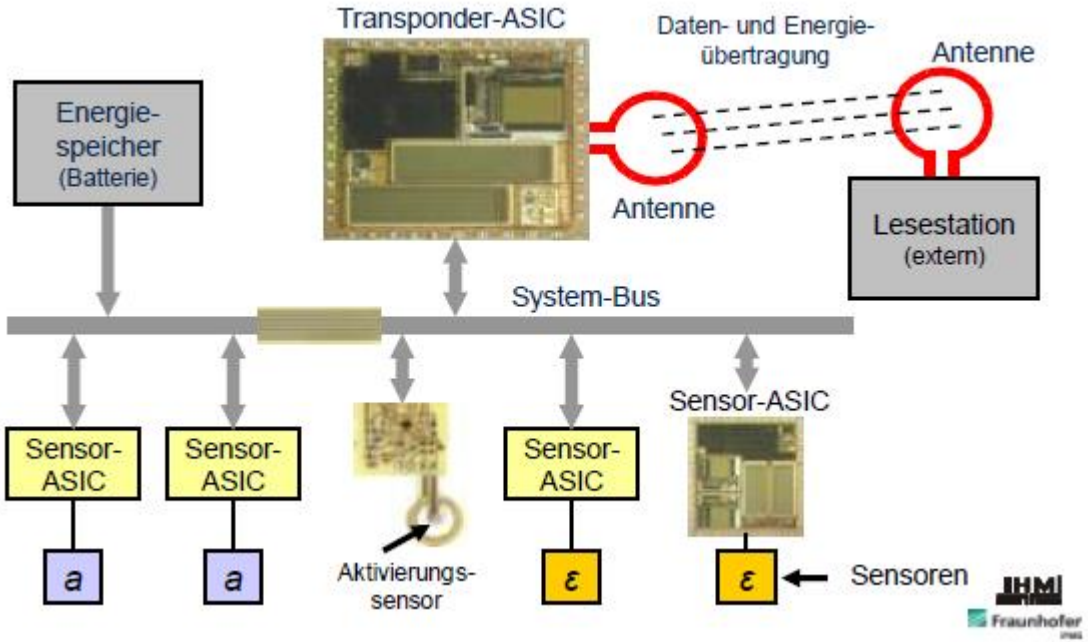

W. Hufenbach et. al.: *Serienfähige Integration von Sensornetzwerken in langfaser- und textilverstärkte Leichtbaukomponenten*. 14th Leibniz Conference of Advanced Sience, Sensorsysteme 2012, 18.-19. Oktober 2012, Lichtenwalde (D).

# Fallstudien

## FS III: Sensoren/Aktoren in FVK, Übersicht

FVK-integriertes Sensornetzwerk:

Komponenten.

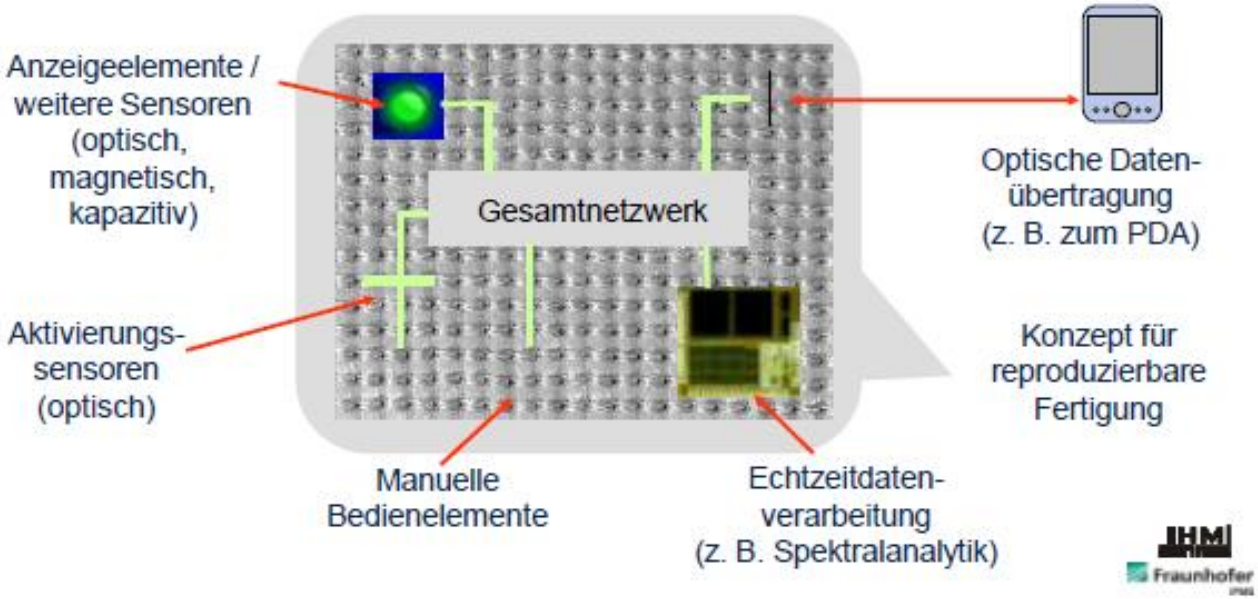



W. Hufenbach et. al.: *Serienfähige Integration von Sensornetzwerken in langfaser- und textilverstärkte Leichtbaukomponenten*. 14th Leibniz Conference of Advanced Sience, Sensorsysteme 2012, 18.-19. Oktober 2012, Lichtenwalde (D).

# Fallstudien

## FS III: Sensoren/Aktoren in FVK, Übersicht

FVK-integriertes Sensornetzwerk: Komponenten.

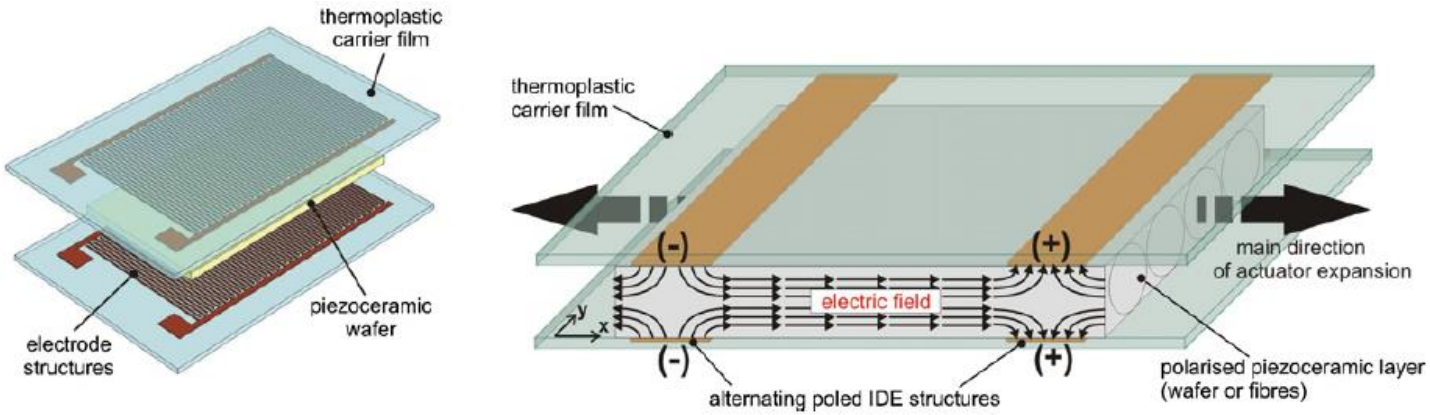



W. Hufenbach et. al.: *Serienfähige Integration von Sensornetzwerken in langfaser- und textilverstärkte Leichtbaukomponenten*. 14th Leibniz Conference of Advanced Sience, Sensorsysteme 2012, 18.-19. Oktober 2012, Lichtenwalde (D).

# Fallstudien

## FS III: Beispiel TPM – Piezomodule in FVK

Integration von Piezofaser-Aktuatoren in FVK mit thermoplastischer Matrix. Ansteuerung der Piezofaser-Module über beidseitige Inter-digitalelektroden (IDE), Substratwerkstoffs identisch mit Matrix des aufnehmenden FVK, Verschmelzen während der Fertigung des FVKs.

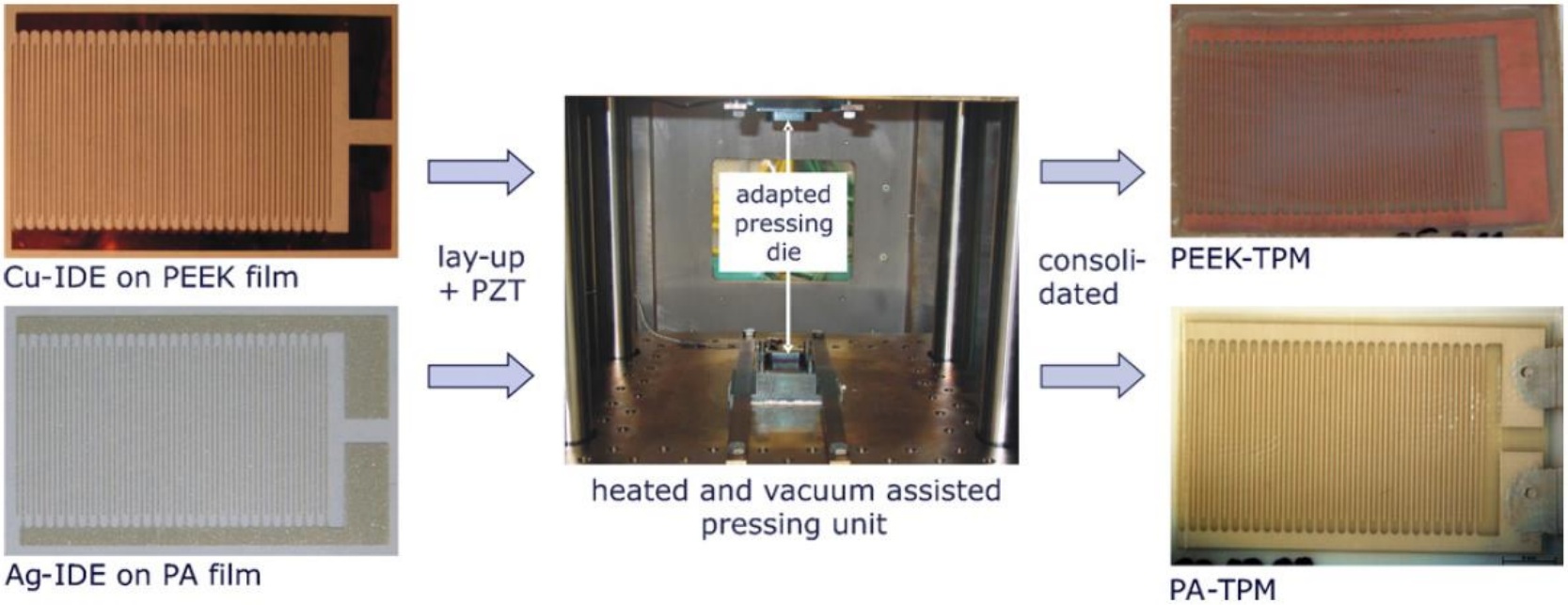



W. Hufenbach et. al.: *Development of novel piezoceramic modules for adaptive thermoplastic composite structures capable for series production*. Sensors and Actuators A156 (2009) 20-27.

# Fallstudien

## FS III: Beispiel TPM – Piezomodule in FVK

Fertigungskonzept für TPM-Module im Labormaßstab:

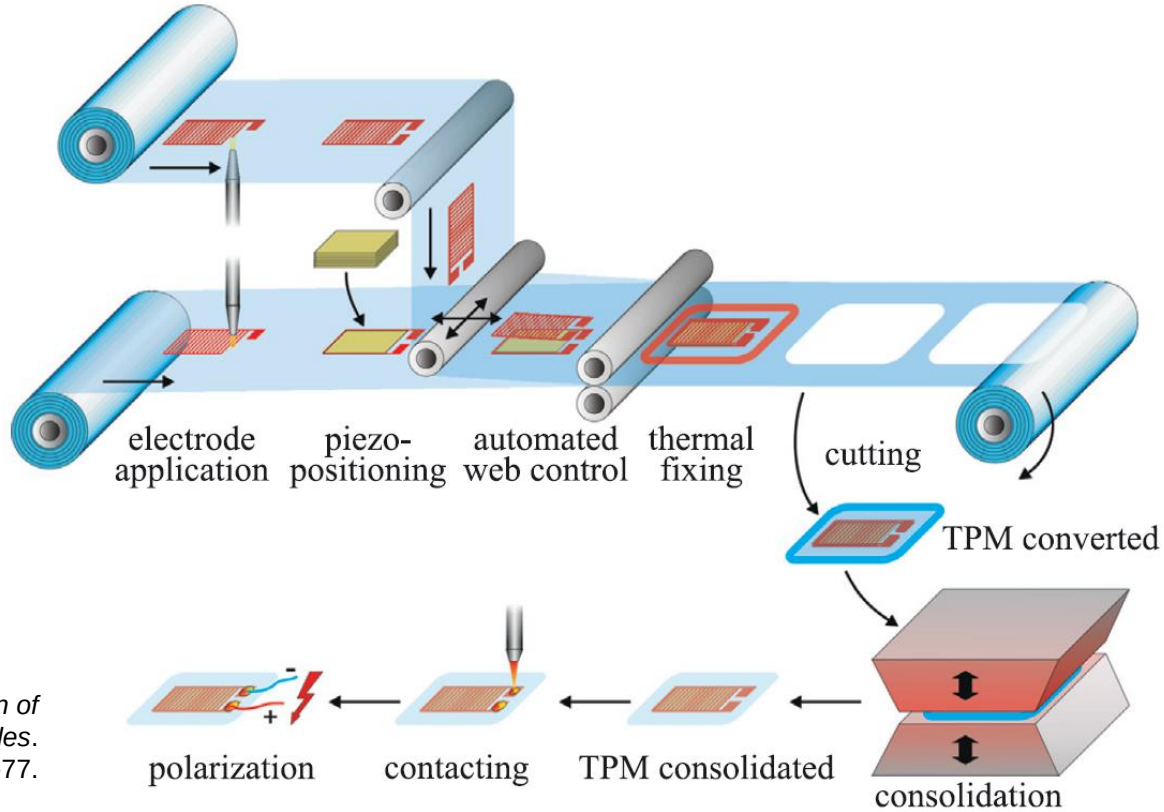



W. Hufenbach et. al.: *Development of novel piezoceramic modules for adaptive thermoplastic composite structures capable for series production*. Sensors and Actuators A156 (2009) 20-27.

# Fallstudien

## FS III: Beispiel TPM – Piezomodule in FVK

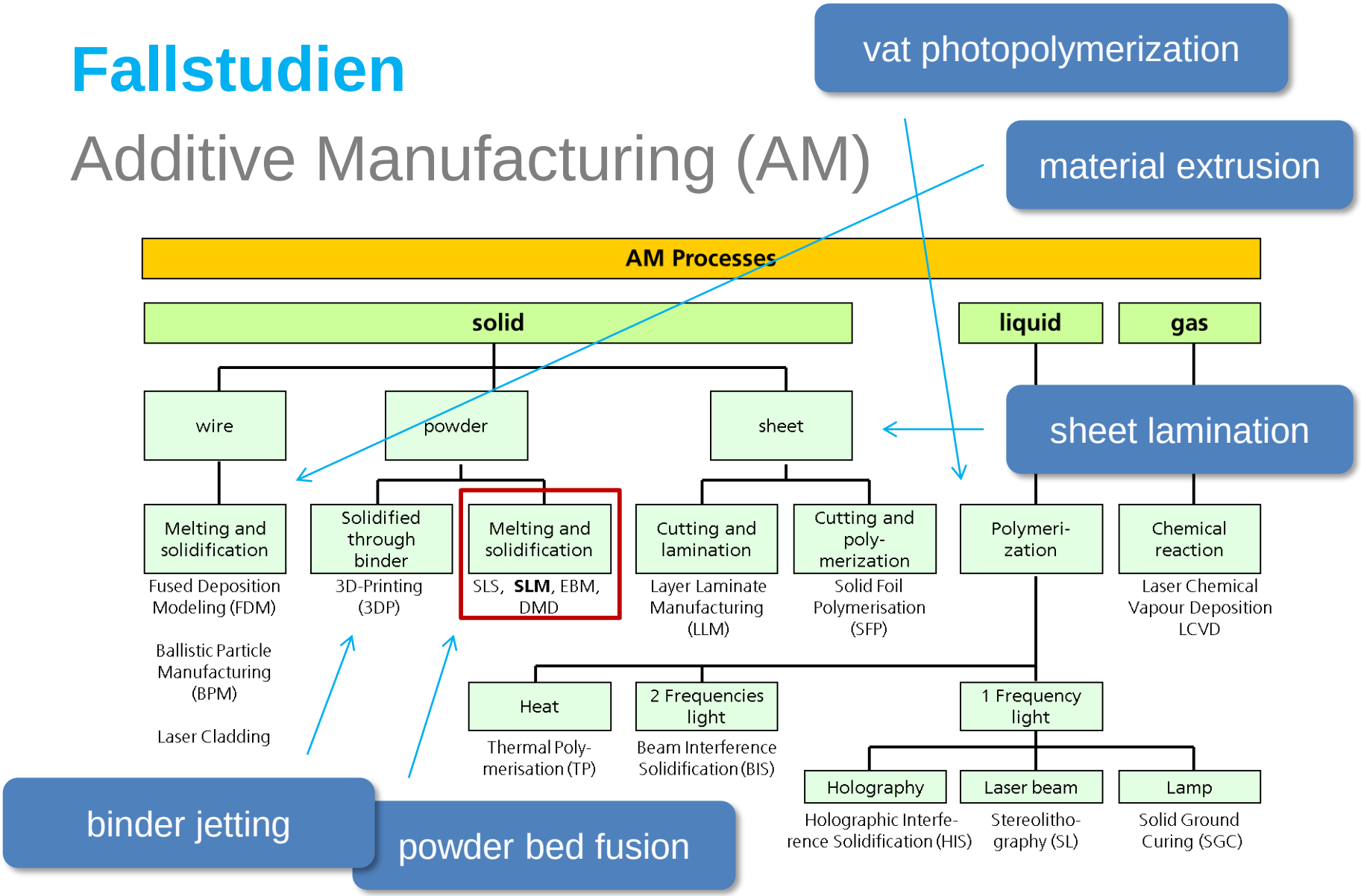
Folienbasiertes Konzept für eine Massenproduktion von TPM-Modulen:




T. Heber et al.: *Production process adapted design of thermoplastic-compatible piezoceramic modules*. Composites Part A 59 (2014) 70-77.

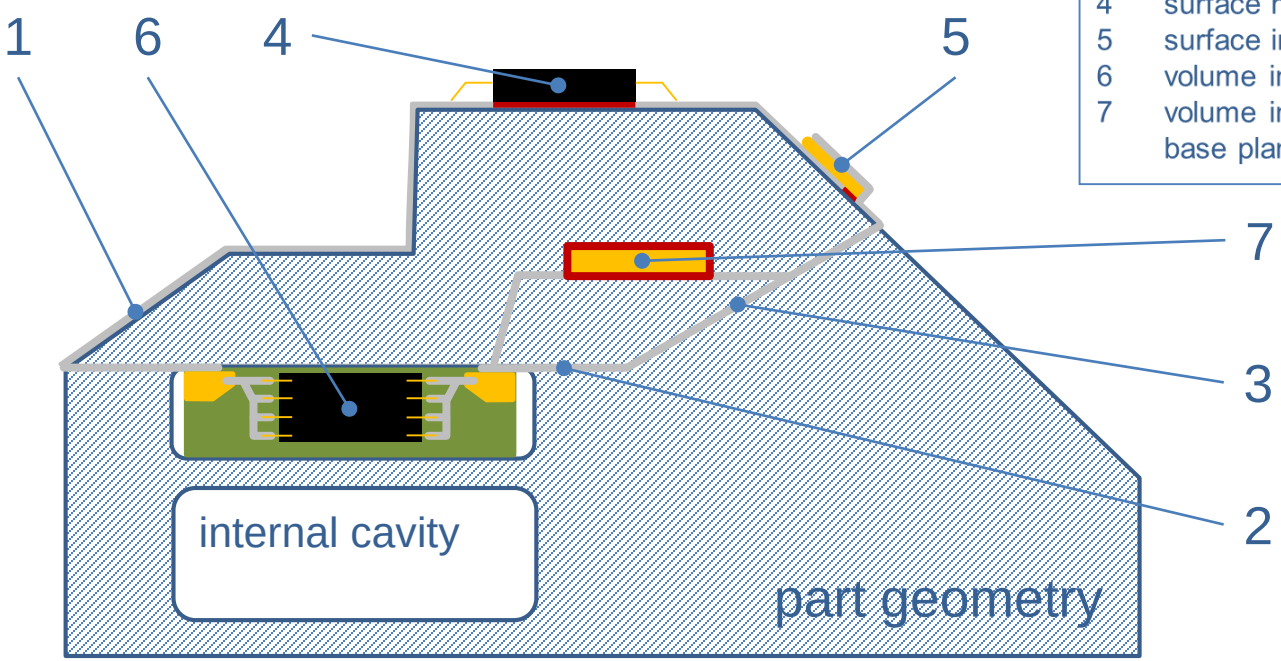
# Fallstudien

## Additive Manufacturing (AM)



# Fallstudien

## Additive Manufacturing (AM)




1 surface applied/integrated conductive path
2 internal conductive path, on building plane
3 cross-plane internal conductive path
4 surface mounted sensor/electr. device
5 surface integrated (printed) sensor
6 volume integrated sensor/electr. device
7 volume integrated (printed) sensor, base plane equaling building plane

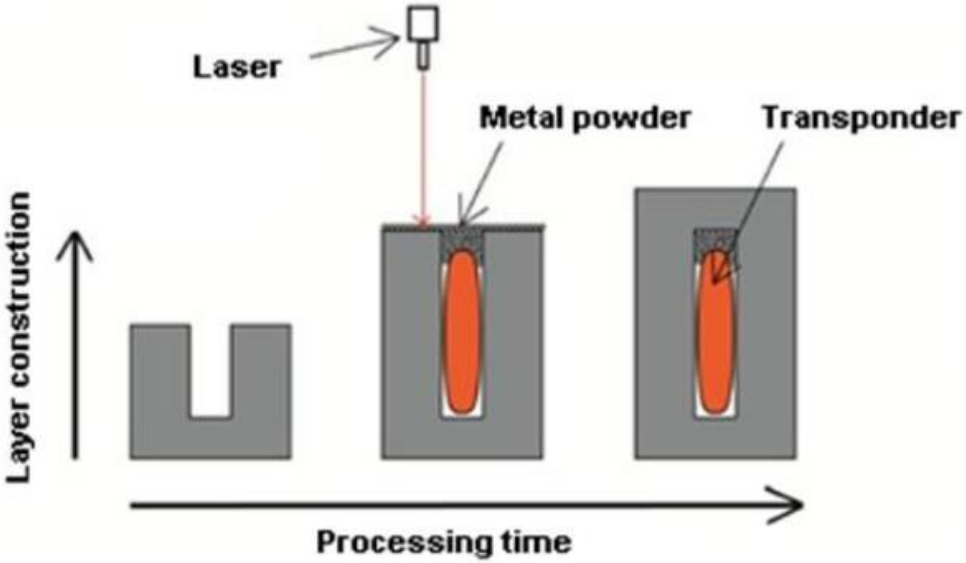
Basic concept with some application scenarios discussed to be submitted for publication soon: Watch out in Sensors (http://www.mdpi.com/journal/sensors) for an OpenAccess-paper by T. Wuest, S. Wellsandt, D. Lehmhus, S. Bosse et al., hopefully to be published autumn this year.

# Fallstudien

## FS IVa: Sensorintegration in AM

Application background: Already today, in surgery, there are approaches towards automatically tracking all instruments and objects that might „get lost“.

Additional scenarios for RFID integration include scenarios in logistics as well as measures against product counterfeiting.



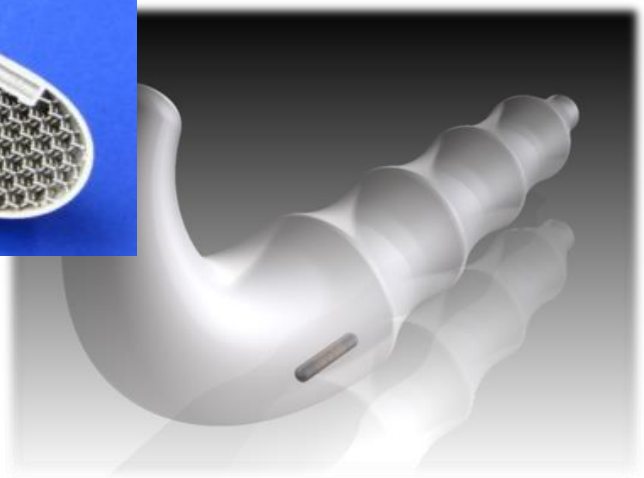

Fraunhofer IFAM

# Fallstudien

## FS IVa: Sensorintegration in AM

Application background: Already today, in surgery, there are approaches towards automatically tracking all instruments and objects that might „get lost“.

Additional scenarios for RFID integration include scenarios in logistics as well as measures against product counterfeiting.



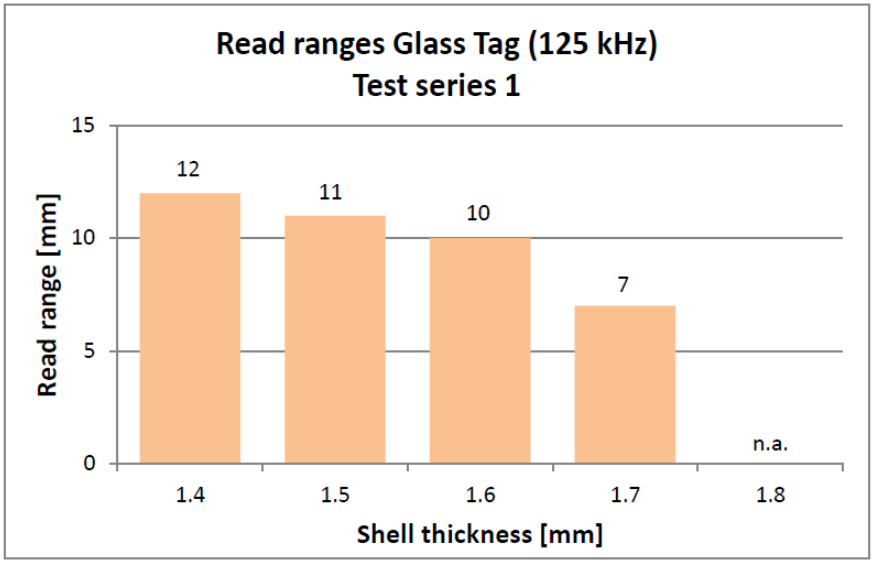
Fraunhofer IFAM

# Fallstudien

## FS IVa: Sensorintegration in AM

Application background: Already today, in surgery, there are approaches towards automatically tracking all instruments and objects that might „get lost“.

Additional scenarios for RFID integration include scenarios in logistics as well as measures against product counterfeiting.




| Material | | | $\mu_r$ | $\sigma\ [\frac{1}{\Omega m}]$ | δ [mm] (125 kHz) | δ [mm] (13,56 kHz) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Name | European material no. | DIN | | | | |
| EOS IN718 | 2.4668 | NiCr19Fe19Nb5Mo3 | 1.0011 | $0.8 \cdot 10^6$ | 1.59 | 0.15 |
| EOS 17-4 | 1.4542 | X5CrNiCuNb16-4 | 95 (RT) | $1.41 \cdot 10^6$ | 0.12 | 0.01 |
| 316L | 1.4404 | X2CrNiMo17-12-2 | 1.02 | $1.33 \cdot 10^6$ | 1.22 | 0.12 |

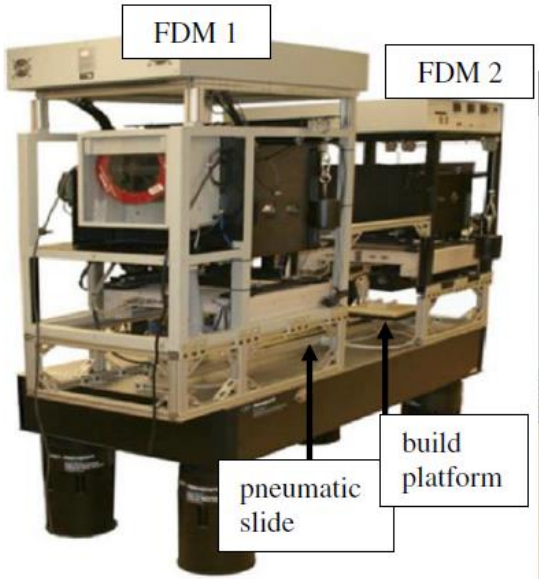
# Fallstudien

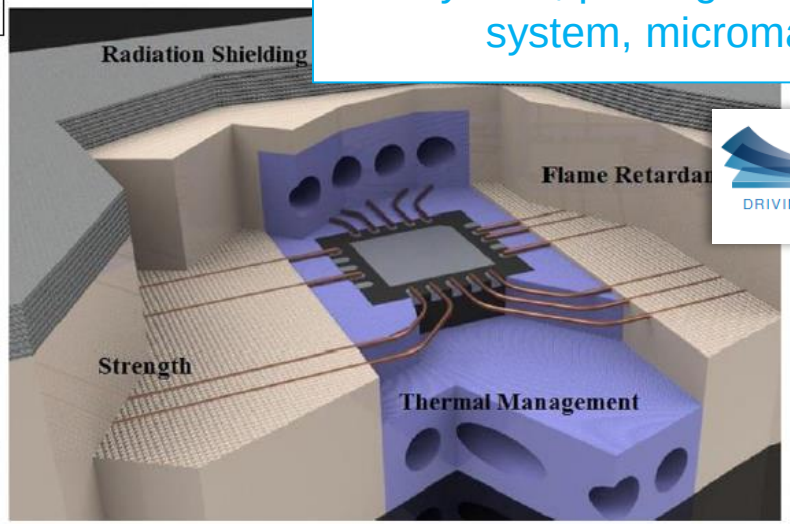
## FS IVb: Sensorintegration in AM

Many activities in this field by University of Texas at El Paso, Ryan B. Wicker.

**UTEP/Keck integrated manufacturing system:**

Combining 2 FDM systems, wire embedding, component pick-and-place system, printing and/or microdispensing system, micromachining system etc.



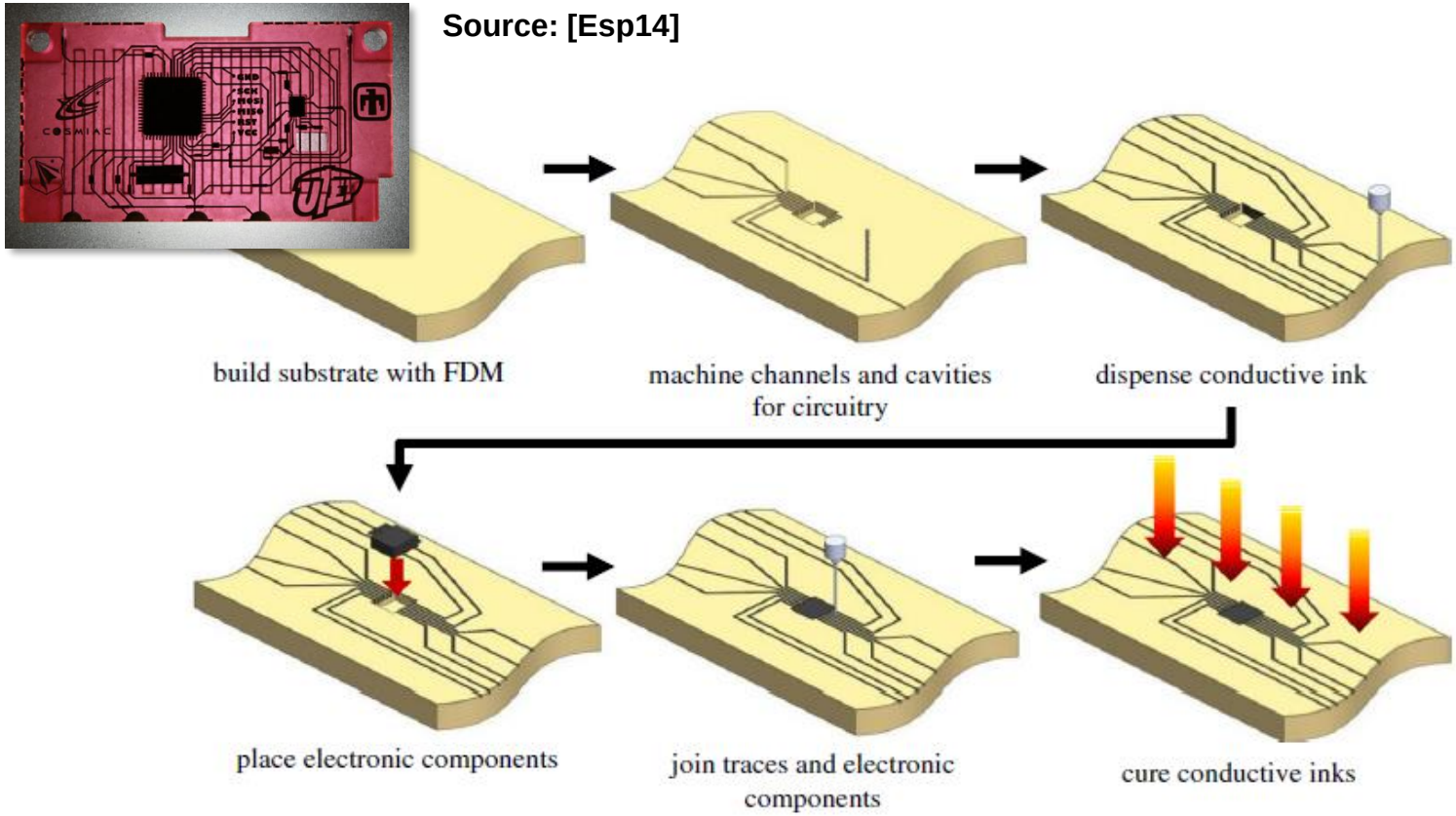




W.M. KECK CENTER FOR 3D INNOVATION
DRIVING THE ADDITIVE MANUFACTURING REVOLUTION
2014-2015

Source: Espalin et al., 3D printing multifunctionality: structures with electronics. Int. J. Adv. Manuf. Techn. 72 (2014) 963-978.

# Fallstudien

## FS IVb: Sensorintegration in AM




**Source: [Esp14]**

# Fallstudien

## FS IVb: Sensorintegration in AM

Source: [Esp14]

Source: [Esp14]

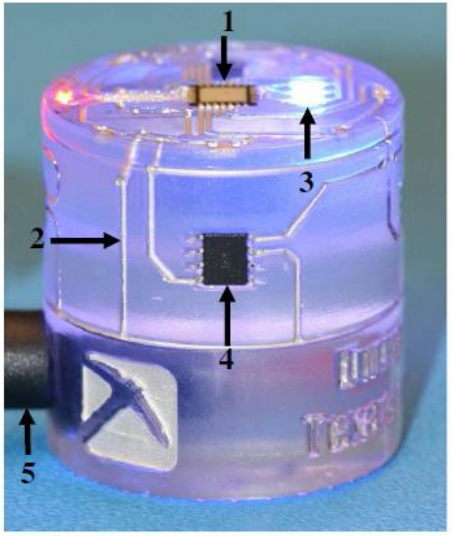



Fig. 2 Fourth generation of magnetic flux sensor system with curved surfaces and modern miniaturized electronic components (surface mount), *1* microcontroller, *2* conductive ink interconnect, *3* LEDs, *4* Hall effect sensors, and *5* power supply plug/connector

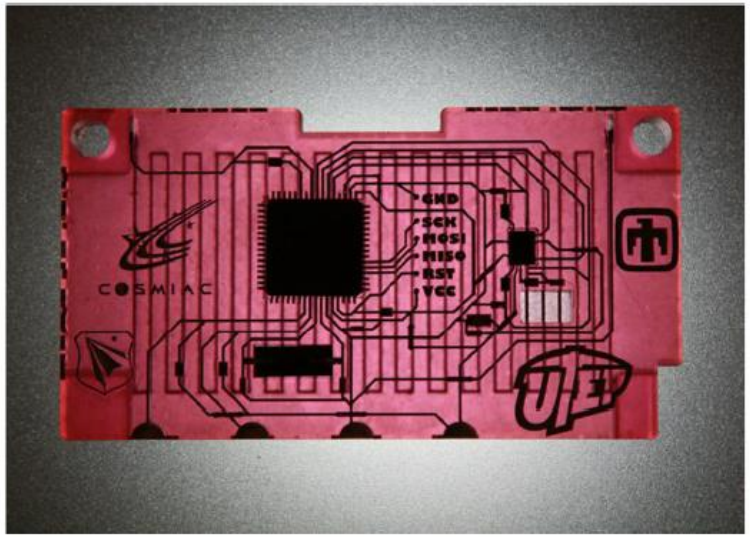



Fig. 3 Back illumination of CubeSat 3D-printed module produced by using stereolithography and direct print technologies

W.M. KECK CENTER FOR 3D INNOVATION
DRIVING THE ADDITIVE MANUFACTURING REVOLUTION
2014-2015

# Zusammenfassung

## Fazit und Ausblick

- Grundprinzipien bezüglich mechanischer Anpassung Nutzung der neutralen Ebene, bieg- und/oder dehnbare Komponenten oder starre Inseln mit dehnbaren Verbindungen (Interconnects).
- Vorstellung diverser Fertigungskonzepte zur Realisierung von (a) starren Bauelementen wie Mikrochips auf flexiblem Substrat (b) und flexiblen Leiterbahnen.
- Betrachtung des Aspekts thermische Inkompatibilität durch Abweichungen im thermischen Ausdehnungskoeffizienten (CTE).
- Fallstudien zum Thema materialintegrierte Sensorik und Elektronik aus den Bereichen Gießereitechnologie, Faserverbundwerkstoffe, Blechumformung und additive Fertigung (Additive Manufacturing).

# 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