Verteilte Sensornetzwerke

Mit Datenaggregation und Sensorfusion

PD Stefan Bosse

Universität Bremen - FB Mathematik und Informatik

Sensoren (Teil 2)

Ziele

- Verständnins der Definition und Klassifikation von Sensoren, Fokus mechanische Sensoren
- Rolle im Material-integrierten Sensorsystem erkennen
- Fähigkeit zur Abgrenzung: Material- vs. Struktureffekte
- Sensormaterialien und direkt materialbasierte Sensoren
- Mikrosystemtechnische Sensoren (Struktureffekte)
- Anwendung von Optische Sensoren

SHM: Materialintegrierte Dehnungssensoren

Fibre-Bragg-Gratings (FBG)

- FBGs können in Materialien eingebettet werden (Verbindung)
- Es tritt eine Gitterkon.- und Wellenlängenänderung im reflektierten Spektrum aufgrund einer mechanischen Dehnung der Faser auf
- Beispiel für einen Sensor der kein eletrisches Signal direkt liefert
  - Photodioden oder CCD Arrays wären dann Sekundärwandler

[E]

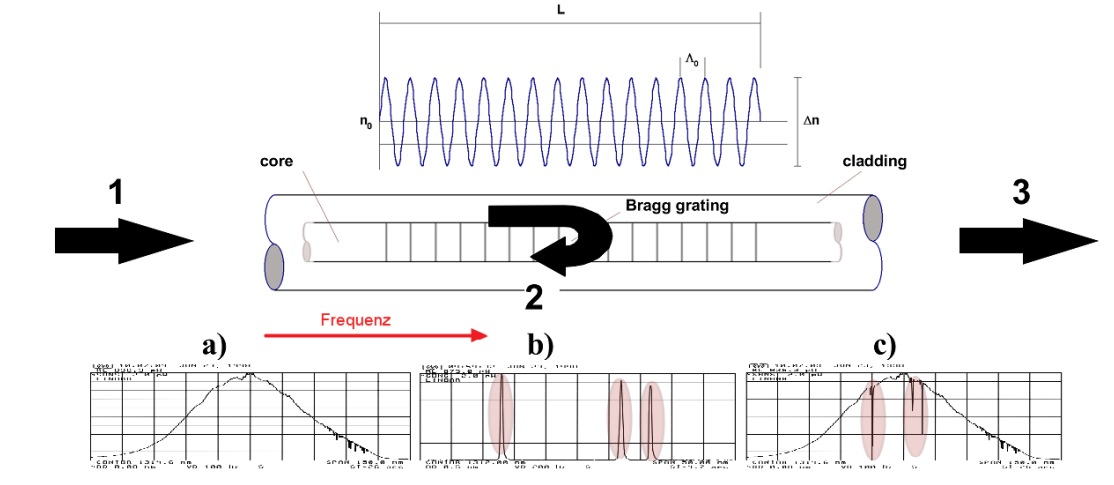


Abb. 1. Schema eines Faser-Bragg-Gitter- und Funktionsprinzips. a) Intensitätsspektrum einer in die Faser eingebrachten Breitbandquelle. b) Spektren werden von drei Faser-Bragg-Gittern reflektiert. c) Transmissionsspektrum nach Passieren der drei Bragg-Gitter

SHM: Materialintegrierte Dehnungssensoren

- Es können mehrere Sensoren örtlich getrennt in Materialien und Strukturen verlegt werden
- Die Signale können einzelnen über einen Multiplexer ausgewertet werden oder man verwendet verschiedene FBG die sich in der Gitterkonstanten unterscheiden
- Eine Lichtfaser kann dabei zudem aus mehereren hintereinander angeordneten FBG bestehen die ebenfalls unterschiedliche Gitterkonstanten und somit Inteferenzfrequenzen besitzen → quasi-gleichzeitge Auswertung mehrerer Frequenzen

[E]

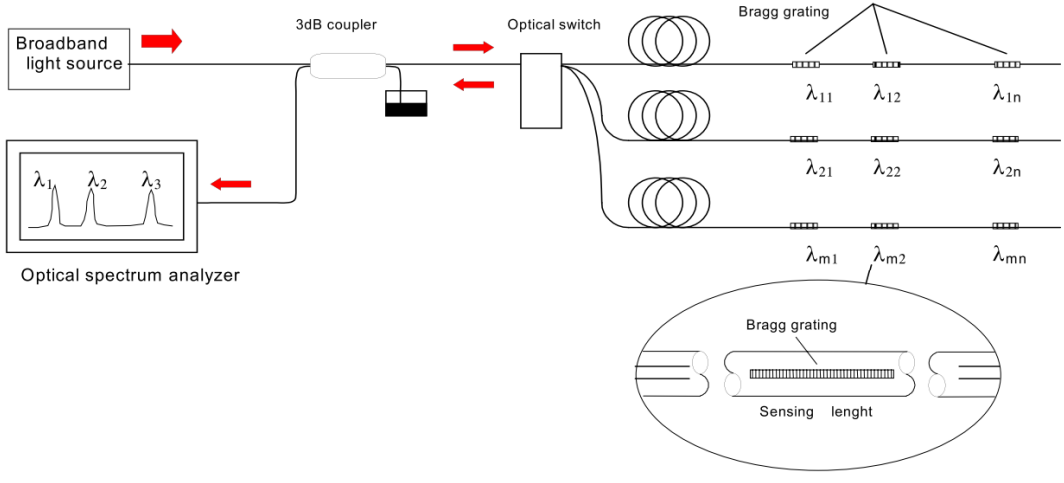


Abb. 2. Multiplexing und Multifrequenzfasern

SHM: Materialintegrierte Dehnungssensoren

- Die relative Wellenlängenänderung δλ eines FBG durch axiale Dehnung ε ist gegeben durch:

$$\frac{\delta\lambda}{\lambda_0} = k_\varepsilon \Delta\varepsilon + k_T \Delta T$$

- Dabei gibt ebenso eine Temperaturabhängigkeit T die rechnerisch kompensiert werden muss → Sensorfusion

[E]

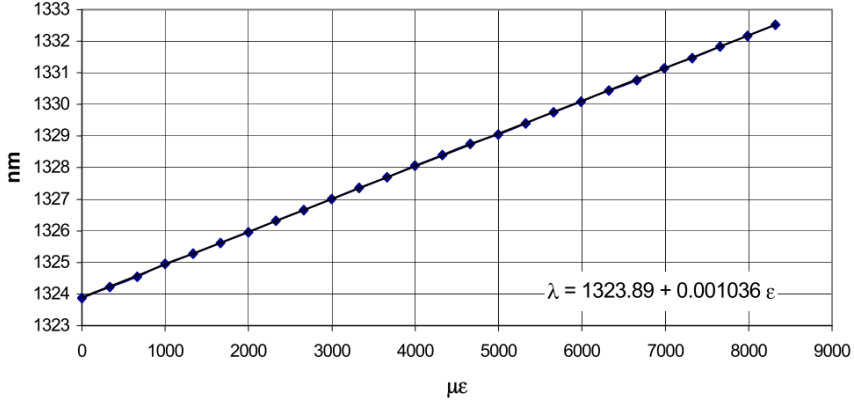
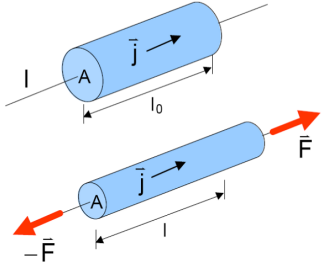


Abb. 3. Beispiel einer Wellenlängenverschiebung durch Dehnung

Piezoresistivität

- Piezoresistivität ist die durch Dehnung verursachte Änderung des elektrischen Widerstands
- Beispiel: Dehnungsmessstreifen

Widerstandsänderung infolge mechanischer Belastung (passiver, modulierender Effekt).



Quelle: Vorlesung IZFM, Universität Stuttgart

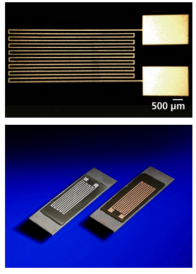
$$R = \rho \cdot \frac{l_0}{A_0}$$

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

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

$$\Delta R / R = K \Delta l / l$$

k-Faktor: Empfindlichkeit des DMS



Gedruckte Dehnungsmessstreifen, Fraunhofer IFAM

Fraunhofer IFAM

Piezoresistivität

- Dabei gibt es verschiedene Beiträge (Terme) zu relativen Widerstandsänderung durch:
  - Änderung des spezifischen WIderstandes
  - Änderung der Länge
  - Änderung des Querschnitts (Fläche)

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{1}{R} \cdot \left[\frac{\partial R}{\partial \rho} \cdot \Delta\rho + \frac{\partial R}{\partial l} \cdot \Delta l + \frac{\partial R}{\partial r} \cdot \Delta r \right] = \frac{\Delta\rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{2 \cdot \Delta r}{r} = \left[\frac{\Delta\rho/\rho}{\varepsilon} + 1 + 2 \cdot \mu \right] \cdot \varepsilon = k \cdot \varepsilon$$

Beitrag der Radius- bzw. Querschnittsänderung

Beitrag der Längenänderung

Beitrag der Änderung des spez. Widerstandes

Längendehnung	$\varepsilon = \Delta l / l$
Dehungsempfindlichkeit	k
Poisson-Zahl	$\mu = -\frac{\Delta r/r}{\Delta l/l}$

Piezoresistivität

Metallische Dehnungsmessstreifen (DMS)

- Widerstandsänderung dominiert durch Geometrieänderung.
- gute Linearität in einem weiten Temperaturbereich (-50 ... 200°C, Pt-DMS bis ca. 1000°C)
- relativ große Dehnungen (ca. 0,5 %) zulässig
- geringe Empfindlichkeit (k-Faktoren: Konstantan 2.05, Ni80Cr20 2.2, Pt92W8 4.0, Pt 6.0)
- S-T-C: Self-temperature-compensated, d. h. Auswahl des DMS-Materials für einen best. Werkstoff des Messobjektes zur Kompensation unterschiedlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten durch Temperaturabhängigkeit von ρ

Piezoresistivität

Halbleiter-DMS

- Widerstandsänderung dominiert durch Änderung des spezifischen Widerstandes ρ: Änderung der Besetzungswahrscheinlichkeit/dichte von Valenz- und Leitungsbändern und der Ladungsträgerbeweglichkeit durch mechanische Spannung,
- zusätzliche Abhängigkeit der Änderung von ρ von der kristallographischen Orientierung (u. a. bei Si).
- höhere Temperaturempfindlichkeit als bei vielen Metall-DMS
- relativ geringe Dehnungen (ca. 0,1 %) zulässig
- hohe Empfindlichkeit (k-Faktoren: Si B-dot./p 80...190, Si P-dot./n -25...-100)

Piezoelektrizität

- Piezoelektrizität bedeutet dass bei einer Dehnung bzw. Verformung ein elektrisches Feld an der Oberfläche aufgebaut wird

Der Begriff Piezoelektrizität beschreibt die Ausbildung eines elektrischen Feldes in einem Material durch mechanische Belastung. Der Effekt ist umkehrbar, d.h. aus einem äußeren elektrischen Feld folgt eine mechanische Dehnung des Materials. Basis ist der Aufbau des Materials aus Ionen oder polaren Molekülen und die Kristallstruktur, die nicht zentrosymmetrisch sein darf.

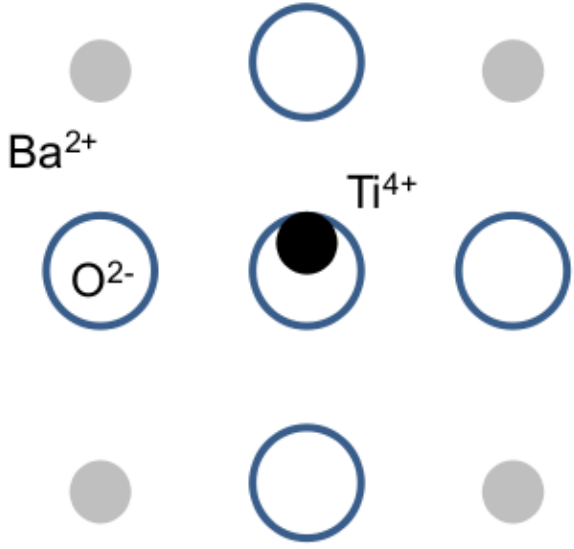


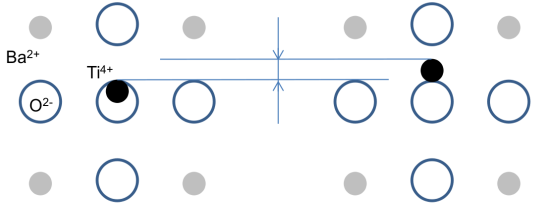
Abb. 4. Klassisches Materialbeispiel ist Bariumtitanat BaTiO3. In der Elementarzelle kann das Ti4+-Ion eine von 6 verschiedenen Positionen minimaler Energie annehmen, die alle nicht zentrisch sind und damit zu einem Dipol-Charakter der Elementarzelle führen.

Piezoelektrizität

- Oberhalb der Curie-Temperatur sind die Dipolmomente der einzelnen Elementarzellen zufällig verteilt.
- Unterhalb der Curie-Temperatur (BaTiO3 ca. 380 K) treten die Dipole in Wechselwirkung, richten sich aneinander aus und nehmen dabei bevorzugte Orientierungen ein:
  - Damit kommt es zur Ausbildung von Domänen im Kristall, die aber noch zufällig verteilt sind und sich bezogen auf den Gesamtkristall ausgleichen.
- Wird das Material einem äußeren elektrischen Feld ausgesetzt, wachsen die Domänen, deren Dipole parallel zum Feld ausgerichtet sind, auf Kosten der anderen: Das Material wird polarisiert.

Piezoelektrizität

- Wird ein derart polarisiertes piezoelektrisches Material einer mechanischen Belastung ausgesetzt, verändert sich die azentrische Lage der Ionen in den Elementarzellen
  - Wenn diese in Folge einer vorherigen Polarisierung parallel gerichtet sind, geschieht dies in allen Elementarzellen in gleicher Richtung und damit verstärkt.
- Dies führt zu einem messbaren elektrischen Spannungsausschlag, dessen Höhe von der der mechanischen Belastung abhängt.



Ferroika

- Ferroika sind Materialien, die unterhalb der sog. Curie-Temperatur spontane Ordnungszustände mit langer Reichweite zeigen (Ausbildung einer Domänenstruktur).
- Die Bereichsgrenzen/Domänenwände sind dabei durch äußere Einflüsse veränderbar.

Ferromagnetismus (Einflussgröße magnetisches Feld)
Ausrichtung der magnetischen Momente, u. a. Fe, Ni, Co.

Ferroelektrizität (elektr. Feld)
Ausrichtung elektrischer Dipolmomente, u. a. piezoelektrische Materialien wie $BaTiO_3$, PZT.

Ferroelastizität (mech. Spannung)
Übereinstimmende kristallographische Orientierung in durch Zwillingsgrenzen begrenzten Domänen, makroskopische Dehnung als Folge einer Gleichrichtung über den gesamten Kristall, mechanisch induzierte martensitische Phasenumwandlungen, z. B. in Formgedächtnislegierungen.

Piezoelektrizität vs. Ferroelektrizität

- Piezoelektrizität benennt die Verknüpfung zwischen elektrischem Feld und mechanischer Dehnung. Besondere Piezoelektrika sind Pyroelektrika, die bei Temperaturänderung Ladungstrennung zeigen.
- Technisch für Aktor-/Sensoranwendungen interessante Piezoelektrika sind gewöhnlich Ferroelektrika, eine Untergruppe der Pyroelektrika, die als einzige die parallele Ausrichtung der Domänen mittels eines elektrischen Feldes erlaubt.

Beispiel

- Bariumtitanat BaTiO3, Blei-Zirkon-Titanat Pb(ZrxTi1-x)O3 (PZT)

[Lehmhus, 2018]

Wandler- und verknüpfte Effekte

- Grundsätzlich ist der Zustand eines Kristalls in Bezug auf seine thermischen, elastischen und elektrischen Eigenschaften durch die Angabe je einer (entsprechenden) Zustandsgröße bestimmt [F]:
  - Die **thermische Zustandsgröße** ist ein Skalar, die
  - **elektrische Größe** ein Vektor [3 Vektorkoordinaten], die
  - **elastische Größe** ein symmetrischer Tensor zweiter Stufe (6 Tensorkoordinaten, d.h. 10 unabhängige Vari- ablen zur vollst. Beschreibung).

Heckmann-Diagramm

- Darstellung linearer Beziehungen (über Materialkonstanten) zwischen
  - mechanischen,
  - elektrischen und
  - thermischen Zustandsgrößen in dielektrischen Materialien.

Äußeres Dreieck, Ecken

Intensive, d. h. materialmengenunabhängige Zustandsgrößen.

Inneres Dreieck, Ecken

Extensive, d. h. materialmengenabhängige Zustandsgrößen.

Wandler- und verknüpfte Effekte

- Markierte Verbindungen: Thermische, dielektrische und elastische Haupteffekte.

[Nye, 1985; Sutter, 2005]

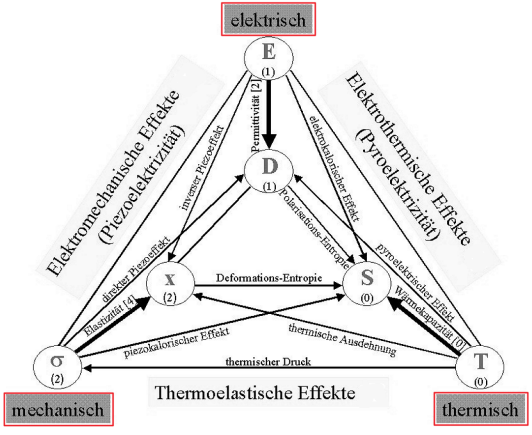


Abb. 5. Heckmann-Diagramm

Wandler- und verknüpfte Effekte

Linearisiertes Heckmann-Diagramm

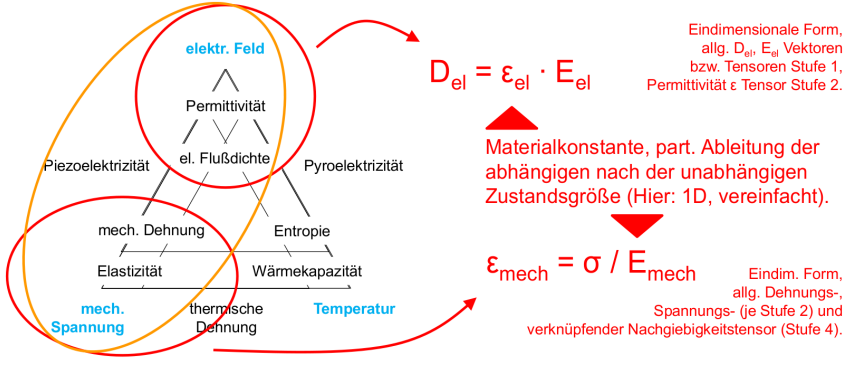


Abb. 6. Heckmann-Diagramm: Beispiele für Haupteffekte, linearisierte Form.

Wandler- und verknüpfte Effekte

Piezoelektrischer Effekt im Heckmann-Diagramm

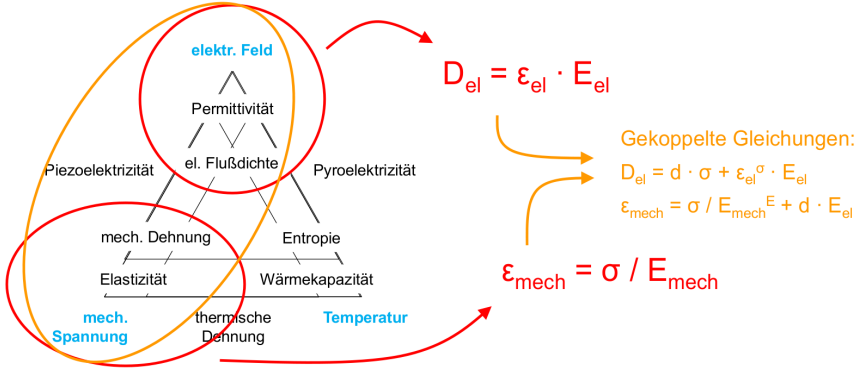


Abb. 7. Heckmann-Diagramm: Piezoelektrischer Effekt.

Wandler- und verknüpfte Effekte

Magnetische Effekte im Heckmann-Diagramm

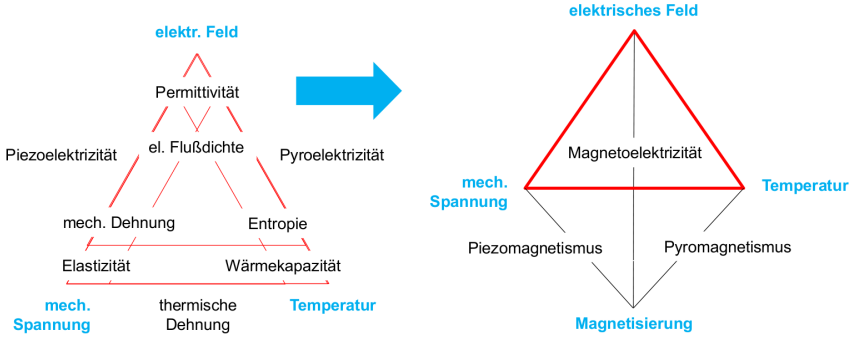


Abb. 8. Heckmann-Diagramm: Erweiterung um magnetische Effekte.

Wandler- und verknüpfte Effekte

Eigenschaftsverknüpfungen

- Verknüpfung in der Form: *Response* = *f*(*Input*).

[Uchino, Giniewicz, 2003]

Input	Charge / Current	Magnetization	Strain	Temperature	Light
Electric Field	Permittivity Conductivity	Electromagnet. Effect	Converse Piezo-electric Effect	Electrocaloric Effect	Electrooptic Effect
Magnetic Field	Magnetoelectric Effect	Permeability	Magnetostriction	Magnetocaloric Effect	Magnetooptic Effect
Stress	Piezoelectric Effect	Piezomagnetic Effect	Elastic Constants	Friction	Photoelastic Effect
Heat	Pyroelectric Effect	Curie-Weiss Effect	Thermal Expansion	Specific Heat	Thermo-luminescence
Light	Photovoltaic Effect	(Absorption + Pyroelectric)	Photostriction	Absorption + Curie Weiss	Refractive Index

Abb. 9. Die Darstellung entspricht dem Heckmann-Diagramm erweitert um magnetische/optische Effekte, aber ohne Transportphänomene. Diagonale analog Haupteffekten im Heckmann-Diagramm

Wandler- und verknüpfte Effekte

Transportphänomene

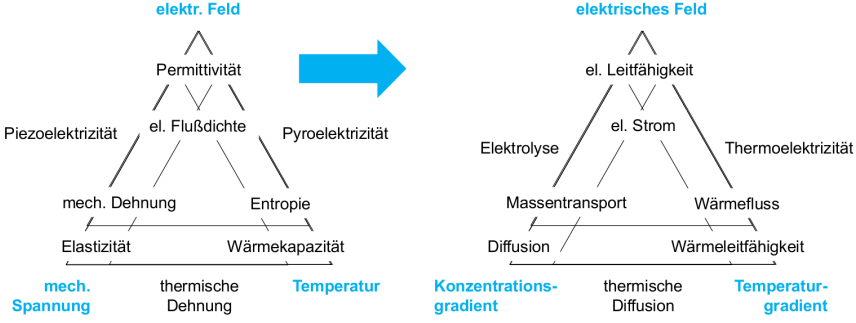


Abb. 10. Heckmann-Diagramm: Analoge Darstellung für Transportphänomene.

Thermoelektrizität

Seebeck-Effekt

- Spannungsabfall in einem Stromkreis aus zwei unterschiedlichen elektrischen Leitern bei Vorliegen einer Temperaturdifferenz zwischen den Kontaktstellen.
- Umkehrbarer Effekt, nutzbar zur Energiegewinnung aus Temperaturdifferenzen oder zur aktiven Kühlung (Peltier-Elem.)
- Wirkungsgrade werden ausgedrückt durch Gütefaktor ZT, derzeit noch beschränkt.

[Leipner, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg]

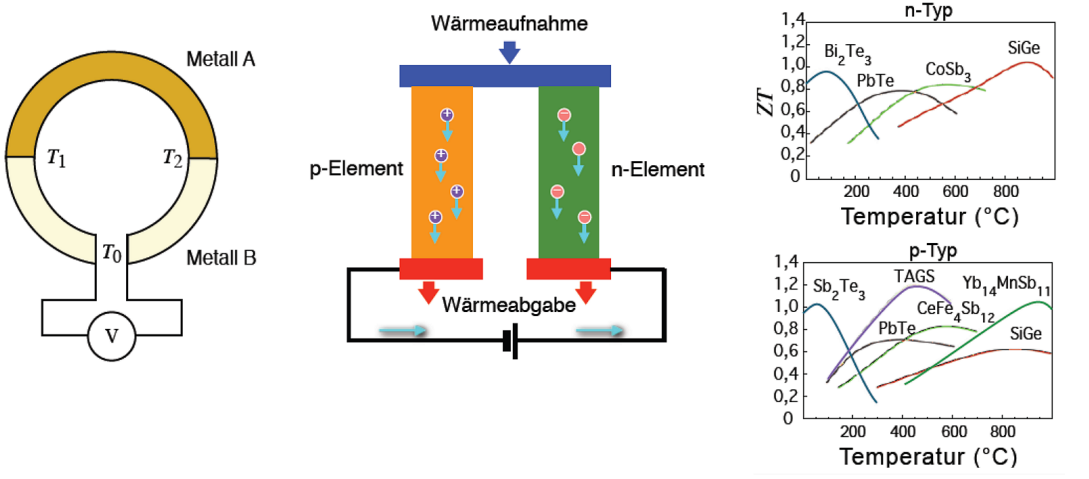


Abb. 11. Vergleich metallischer und halbleitender Thermoelektrizität

Thermoelektrizität

- Höhe des Spannungsabfalls U ist abhängig von Temperaturdifferenz T_2-T_1 und Seebeck-Koeffizient S
- Der thermoelektrischer Gütefaktor ZT als Ausdruck für den Wirkungsgrad ist abhängig vom der mittleren Arbeitstemperatur T, der elektischen leitfähigkeit σ, und der Wärmeleitfähigkeit λ:

$$U = \int_{T_1}^{T_2} S dT, ZT = \frac{S^2 \sigma}{\lambda} T$$

- Effiziente thermoelektrische Materialien erfordern hohe elektrische und geringe thermische Leitfähigkeit – scheinbarer Widerspruch zu Wiedemann-Franz-Gesetz.
  - Konstituiert einen linearen Zusammenhang zwischen elektrischer und thermischer Leitfähigkeit;
  - Allerdings nur für den elektronischen Anteil;
  - Der phononische Anteil kann unabhängig von der elektrischen Leitfähigkeit beeinflusst werden.

Material- vs. Struktureffekte

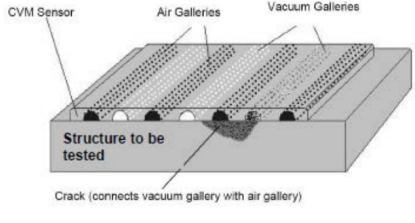
"Binäre Sensoren": Reißdraht

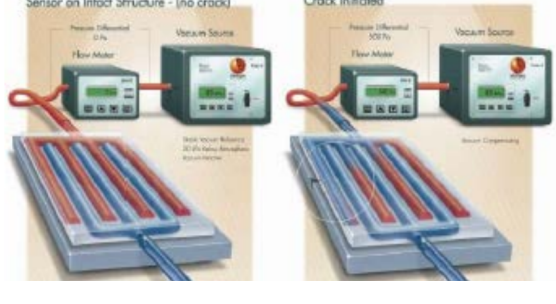
- Reißdrähte sind die einfachste Form einer Schadenssensorik im Bereich Strukturüberwachung:
  - Es handelt sich um elektrische Leiter, die an kritischen Bereichen einer mechanisch belasteten Struktur angebracht sind und die bei Auftreten eines Schadens (Rissinitiierung, Überdehnung o. ä.) reißen.
- Damit wird die elektrische Verbindung getrennt, der Sensor liefert mithin eine binäre Information, je nach Auslegung z.B. hinsichtlich Überschreitung einer Belastungsgrenze.

Material- vs. Struktureffekte

Comparative Vaccuum Monitoring

- Der Sensor wird in der Regel auf eine Strukturoberfläche aufgebracht, die im rissgefährdeten Bereich liegt.
  - Ein Riss, der z.B. durch Vakuum- und Referenzdruck-Galerien verläuft, führt dazu, dass in den ersteren kein Vakuum mehr gehalten wird.

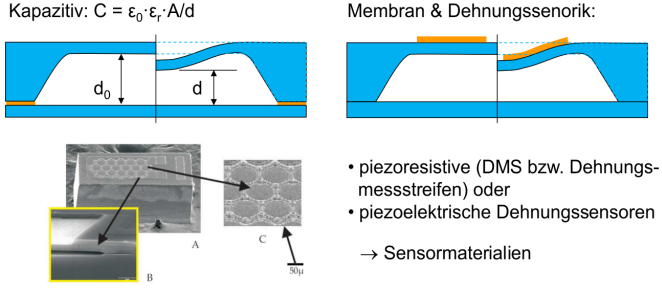




Material- vs. Struktureffekte

Drucksensoren

1. Drucksensorik mit einem Sensoreffekt als Struktureigenschaft (MEMS)



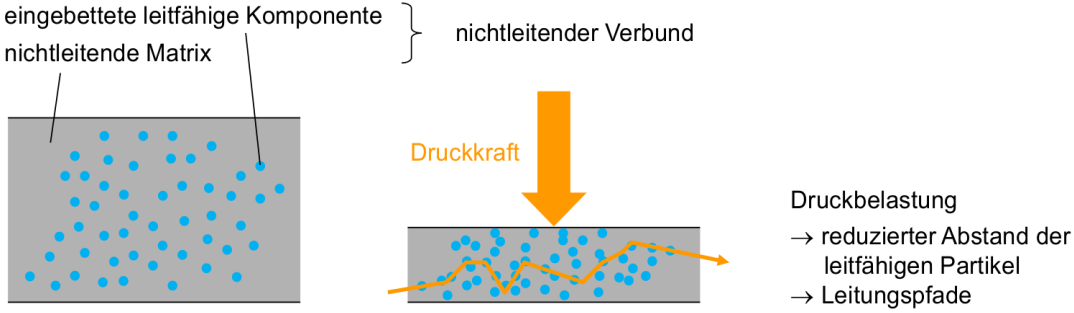
- Prinzipiell materialunabhängige Eigenschaften einer Struktur:
  - kapazitiver Drucksensor

- Intrinsische Materialeigenschaft des Sensormaterials:
  - klassischer piezoresistiver Effekt, z. B. in Halbleiterwerkstoffen
  - piezoelektrischer Effekt

Material- vs. Struktureffekte

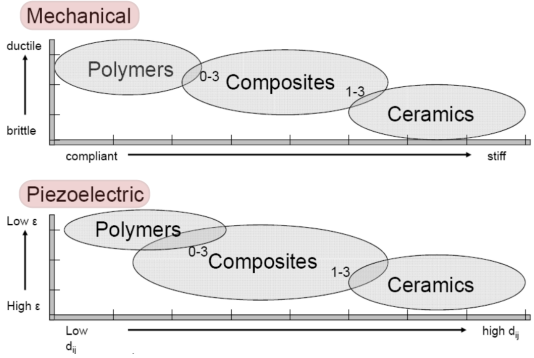
2. Drucksensorik: Sensoreffekt durch Strukturierung

- Verbundwerkstoffe als Sensormaterialien und Verbundstruktur als Basis von Sensoreffekten (Perkolation)



Material- vs. Struktureffekte

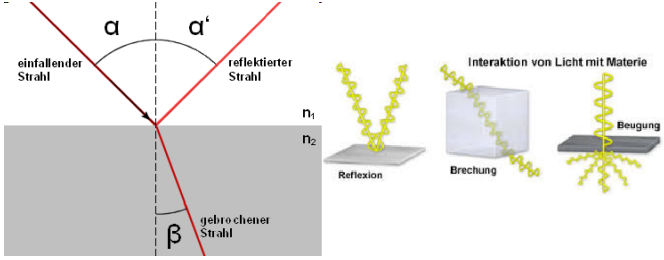
- Verbundwerkstoffe als Sensormaterialien und Verbundstruktur zur Anpassung sekundärer Eigenschaften an Messaufgabe und -umgebung
  - Beispiel piezoelektrische Polymermatrix-Verbunde;
  - Erhöhte Duktilität gegenüber Keramik;
  - Höhere Temperaturstabilität, Feuchteresistenz und Steifigkeit gegenüber Polymeren.



[Zwaag et al., 2010]

Optische Sensoren

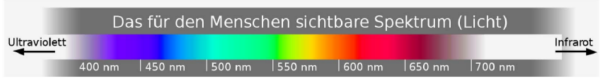
- Prinzip: Nutzung einer Beeinflussung des Lichts
- Voraussetzung: Kontrolle über den Weg des Lichts.
- Phäomene u. a.:
  - Brechung: Richtungsänderung an Grenzflächen
  - Reflexion: Spiegelung an Grenzflächen
  - Beugung: Interferenzeffekte



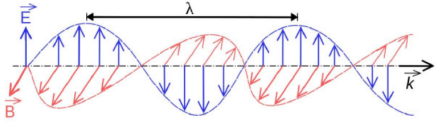
[Wikipedia]

Optische Sensoren

- Nutzung einer Beeinflussung des Lichts als Sensor:
  1. Intensität
  2. Farbe (Wellenlänge λ)
  3. Polarisation (Schwingungsrichtung)



[Wikipedia]



Optische Sensoren

Lichtwellenleiter

- Häugigster mechano-optischer Sensor ist der Lichtwellenleiter (Glasfaser)
- Ein Lichtwellenleiters besteht aus unterschiedlichen Bereichen:
  - Mantel und
  - Kern, mit jeweils unterschiedlichen optischen Eigenschaften (Brechungsidnex)

[E]

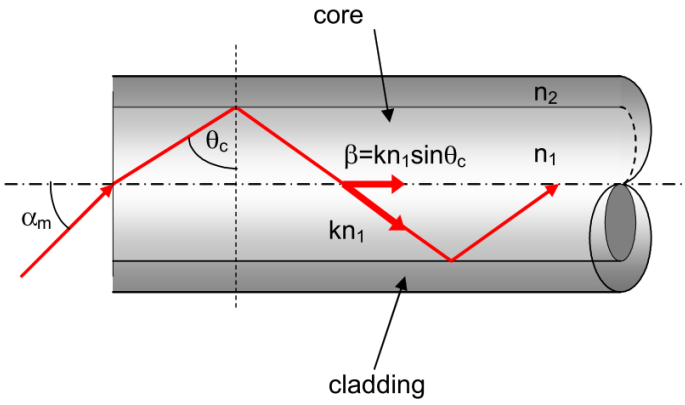


Abb. 12. Schematischer Aufbau eines Lichtwellenleiters mit Mantel und Kern

Optische Sensoren

Intensitätsbasierte Sensoren

- Abstände von LWL können durch Intensitätsänderung detektiert werden

[E]

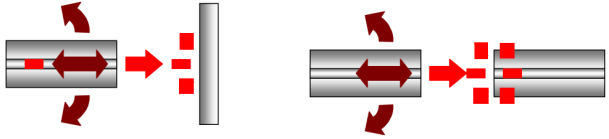


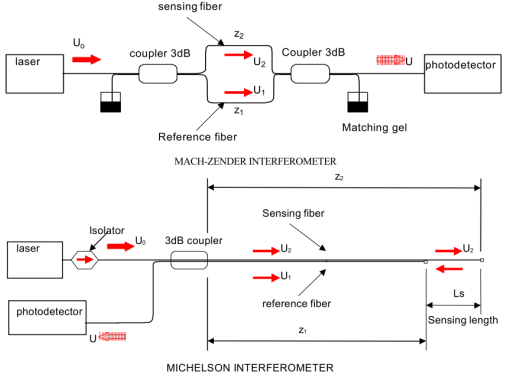
Abb. 13. Faseroptischer Näherungssensor

Optische Sensoren

Phasenmodulierte Sensoren

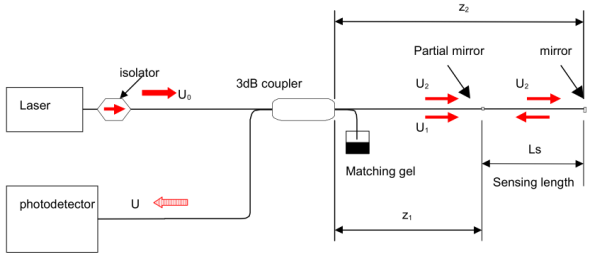
- Basieren auf Interferenzeigenschaften des Lichtes → Interferometer
- Interferrenz ist eine ortsaufgelöste Eigenschaft → mechanischer Sensor

[E]



Optische Sensoren

[E]

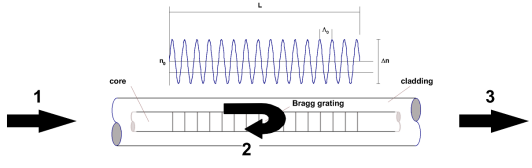


FABRY-PEROT INTERFEROMETER

Optische Sensoren

Wellenlängenbasierte Sensoren

- Fasergitter (FBG)
  - Die Gitter können mittels Laserstrukturiering in die Faser eingebschrieben werden
  - Das Gitter ist i.A. auf einen kleinen Abschnitt zwecks Lokalisierung der Dehnung begrenzt
  - Es können eine Vielzahl von Gitter entlang der Faser in Reihe angeordnet werden, die sich durch ihre Gitterkonstante und somit die Resonanzfrequenzen unterscheiden → Multispektrale Messung an mehreren Orten gleichzeitg



Zusammenfassung

- Sensoren müssen hinsichtlich Material- und Struktureffekten unterschieden werden
- Es gibt eine Vielzahl verschiedener Sensortechnologien und Messverfahren die materialintegrierbar sind
- Das Heckmann Diagramm bietet die Darstellung linearer Beziehungen (über Materialkonstanten) zwischen
  - mechanischen,
  - elektrischen und
  - thermischen Zustandsgrößen in dielektrischen Materialien.
- Wichtige phy. Effekte sind:
  - piezoresistiv und piezoelektrisch,
  - ferroelektisch
  - thermoelektrisch