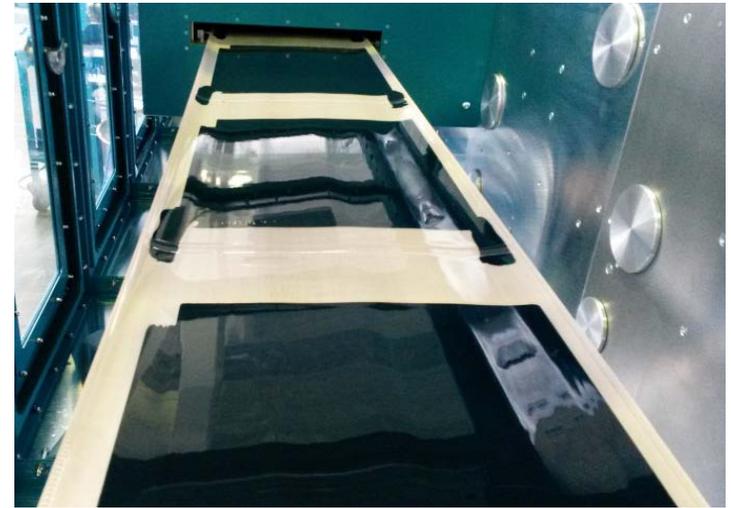


# Elastomere für generatorische Anwendungen

Dr. Raman Rabindranath, Fraunhofer ISC

Energie-Symposium der Fraunhofer-Institute IISB, IIS und ISC  
Energietechnik im Wandel-  
Bayerische Energieforschungsprojekte



# Inhalt

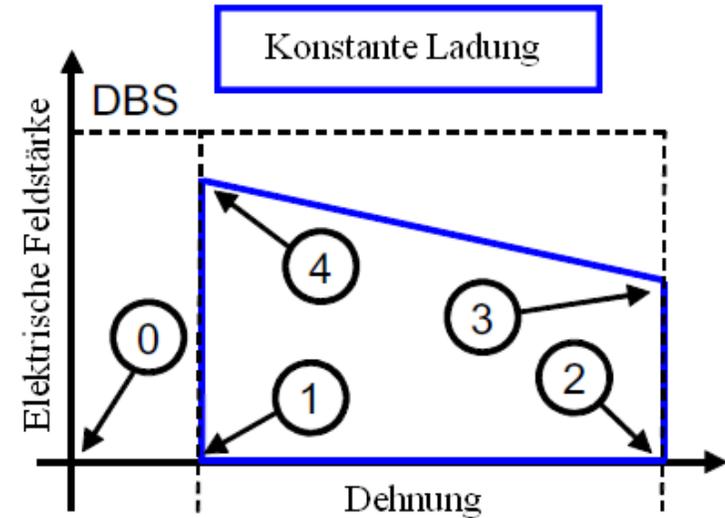
---

- **Anforderungen an Elastomere für Dielektrische Elastomer Generatoren (DEG)**
- **Allgemeine Eigenschaften von Elastomeren**
- **Materialentwicklung in DEGREEN**
- **Herstellung von DEG über das Schlitzdüsenverfahren**
- **Anwendung als Sensoren und Aktoren**
- **Ausblick**

# Funktionsprinzip dielektrischer Elastomer Generatoren

Elektrische Spannungserhöhung  
durch mechanische Dehnung

$$\Rightarrow W_{el} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$$

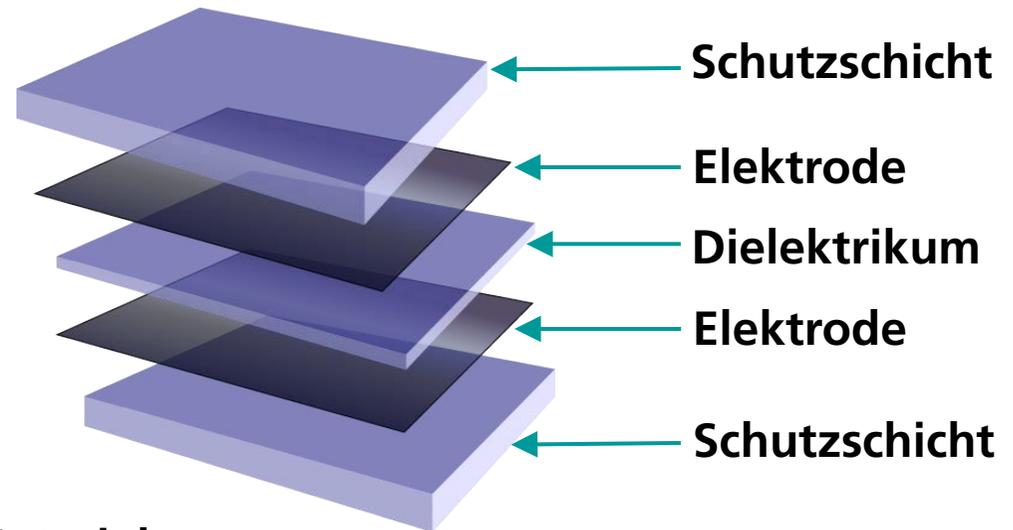


DEG - Generator

# Anforderungen an Elastomere für Generatoren

---

- Hohe Dielektrizitätszahl  $\epsilon_r$  ( $>3$ )
- Hohe Durchschlagsfeldstärke  $E_B$  ( $> 60 \text{ kV/mm}$ )
- Geringes E-Modul ( $\sim 400 \text{ kPa}$ )
- Niedriger mech. Verlust  $\tan\delta$
- Reißdehnung:  $\geq 300 \%$
- Ökolog. Unbedenklichkeit des Materials
- Gute Verarbeitbarkeit (Rakeln etc.)
- Viskosität des unvernetzten Kautschuks ( $\leq 50.000 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ )
- Hohe Dauerstabilität bei 100% Dehnung (200 Mio. Zyklen)



## Elastomerklassen:

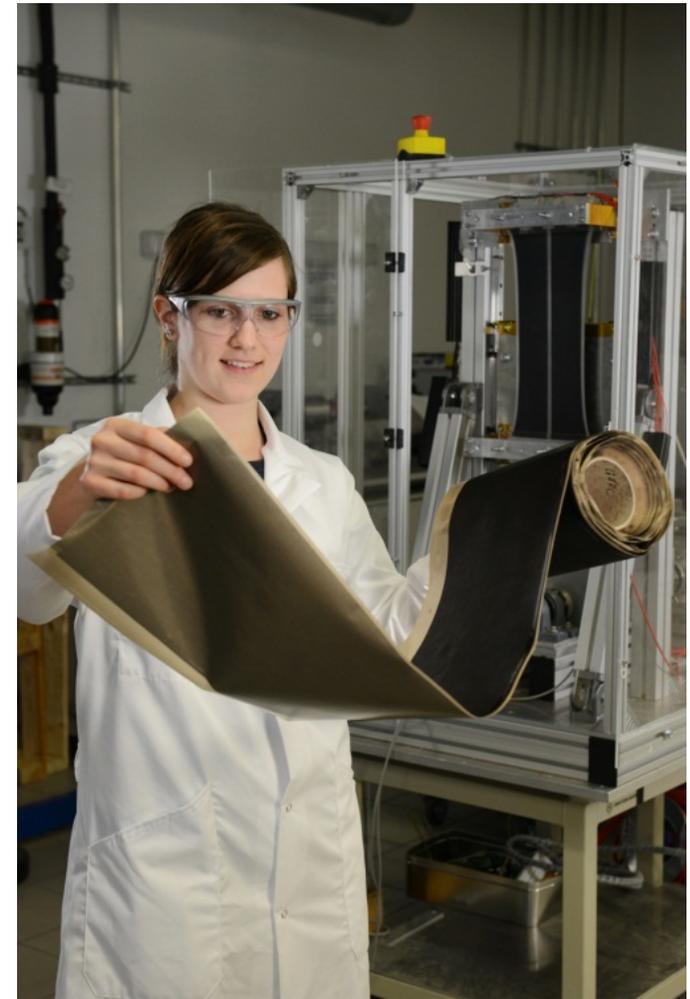
**Silicone, Naturkautschuk, Acrylate, Polyurethan**

---

# Allgemeine Eigenschaften von Elastomeren

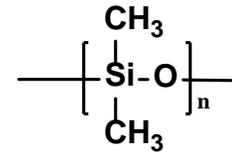
---

- 3D-verknüpftes Netzwerk von Polymerketten
- Hohe Dehnbarkeit, Entropieelastizität
- Unlöslich, aber quellbar
- Komplexer Schubmodul:  $G^* = G' + iG''$
- Verschiedenste polymere Vorstufen und Verknüpfungsarten
- Naturkautschuk, Silicon, SBR, Chloropren, PU



# Allgemeine Eigenschaften von Siliconen und NR

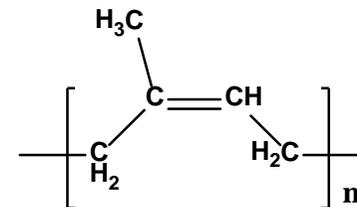
## Silicon (PDMS, Polydimethylsiloxan)



**Vorteil:** Reinheit, Verarbeitung (Mischen, Formgebung), Eigenschaftseinstellung, Variabilität der Rohstoffe, Reproduzierbarkeit, kein Volumenschwund, chem. Beständigkeit, Hydrophobie, viele herausragende Eigenschaften

**Nachteil:** Vernetzung reagiert empfindlich auf Katalysatorgifte, Weiterreißfestigkeit schlecht, Energieaufwand

## Naturkautschuk (NR, cis-1,4-Polyisopren)

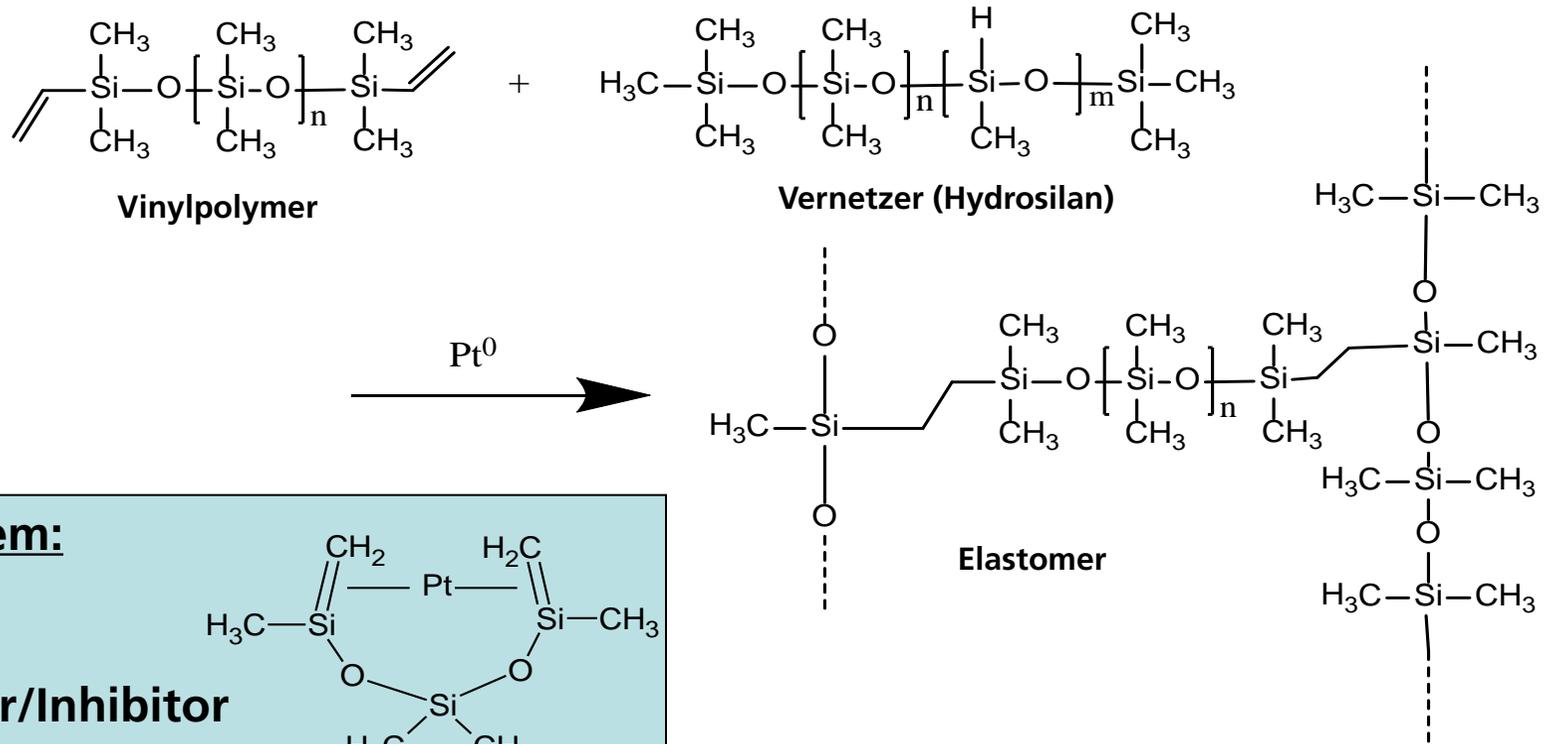


**Vorteil:** Nachwachsender Rohstoff, Dehnbarkeit, Preis Rohstoffe, ökolog. unbedenklich

**Nachteil:** Witterungsbeständigkeit, Quellung durch Wasser, Reproduzierbarkeit

# Vernetzung von Siliconen

## Additionsvernetzendes Siliconelastomer via Hydrosilylierung

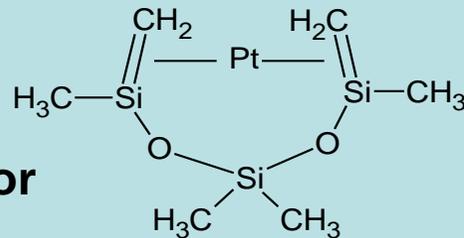


### Kat.-System:

**Pt(0)**

**+ Ligand**

**+ Retarder/Inhibitor**



# Materialentwicklung

---

## Materialentwicklung

- Übersetzung des Anforderungsprofils in eine additionsvernetzende Siliconformulierung
- Leitfähige elastomere Elektroden

## Prozessentwicklung

- Viskosität
- Topfzeit (Verarbeitungszeit)

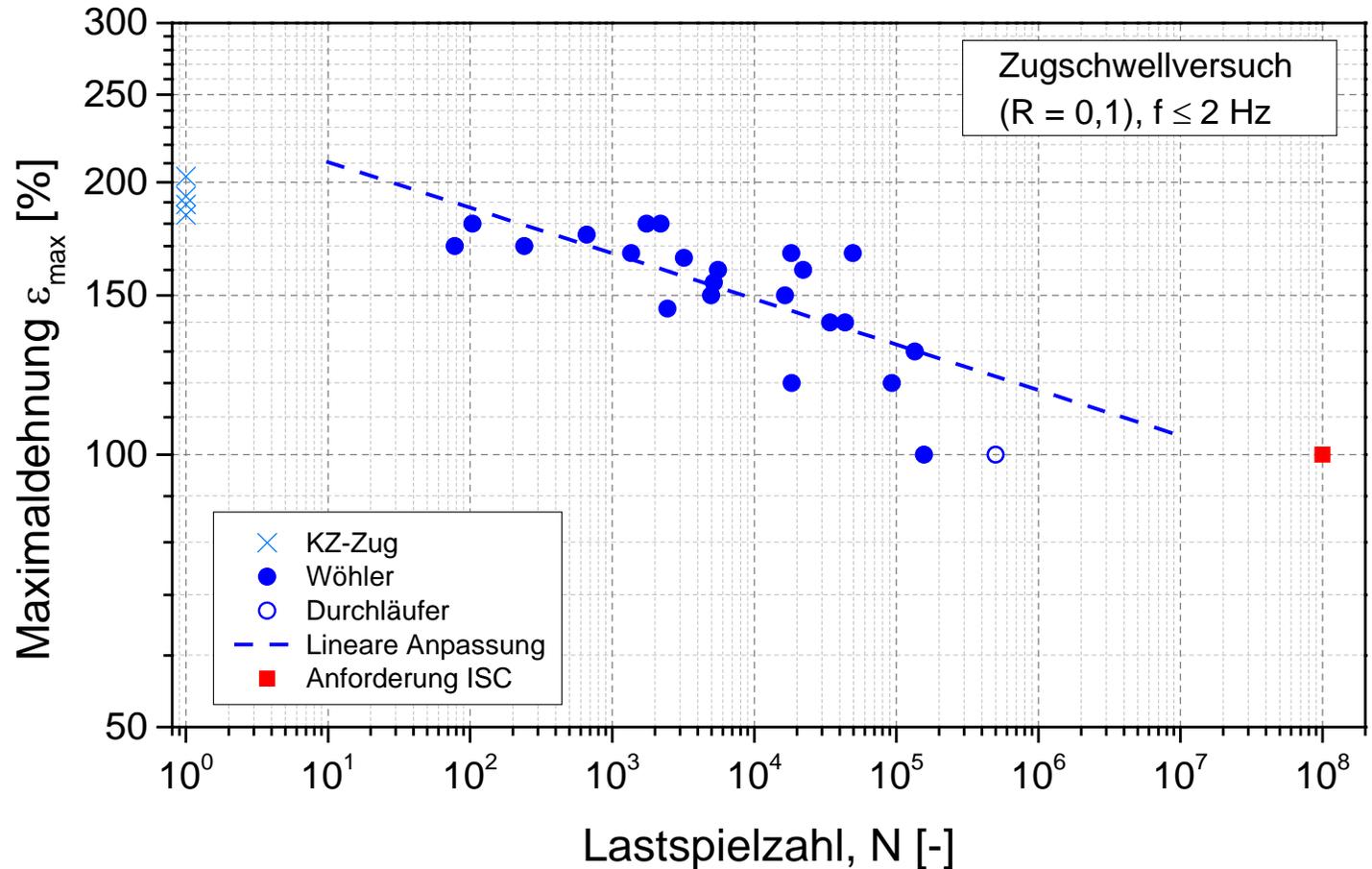
## Benchmark ISC-Elastomere

	Silicon	NR
Durchschlagsfestigkeit / kV/mm	80	65
E-Modul / kPa	380	550
Lastspielzahl	$10^6$	$< 10^5$
Reißdehnung / %	250	400
Verlustfaktor	0,07	0,06

# Materialentwicklung: Mechan. Zyklischerbeständigkeit Dielektrikum

Versuche am Süddeutschen Kunststoffzentrum (SKZ) zur Ermittlung der Wöhlerkurve

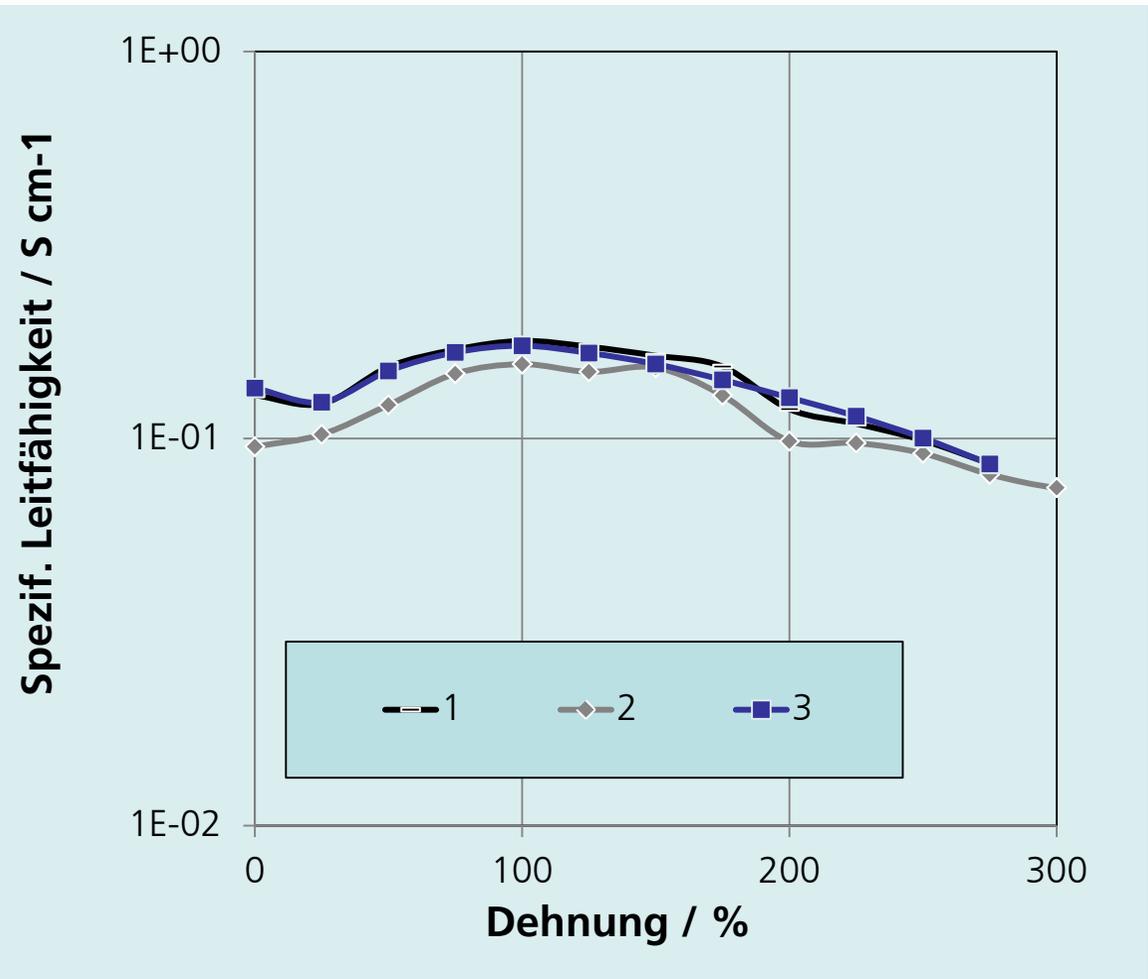
- Schulterstäbe S2 (DIN 53504)
- ISC-Silicon
- Einspannlänge 35 mm
- max. Zyklischerfrequenz 2 Hz (Pneumatik)



# Materialentwicklung: Dehnbare Elektroden

**Material:**

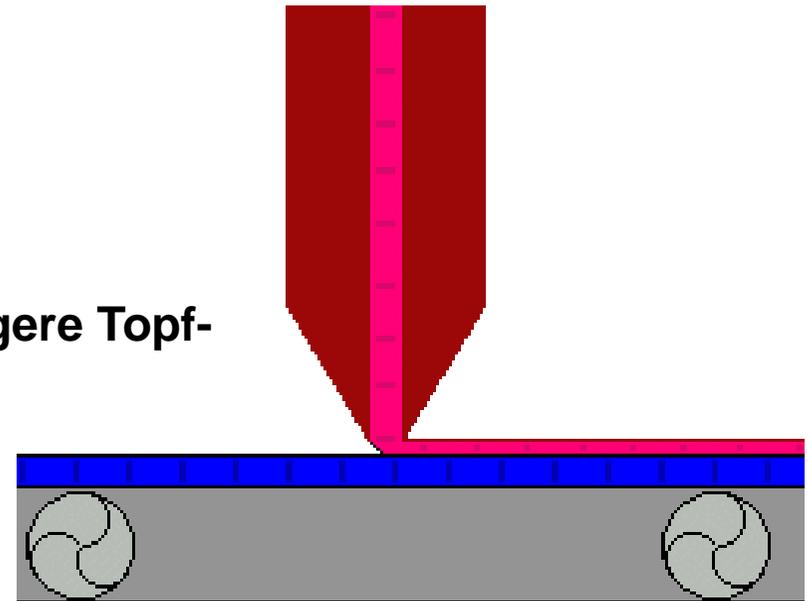
- Leitruß in Siliconbinder
- Schichtdicke ~ 10  $\mu\text{m}$



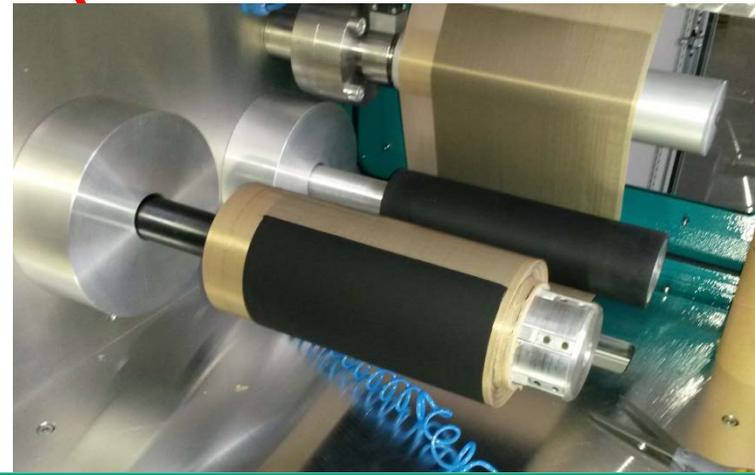
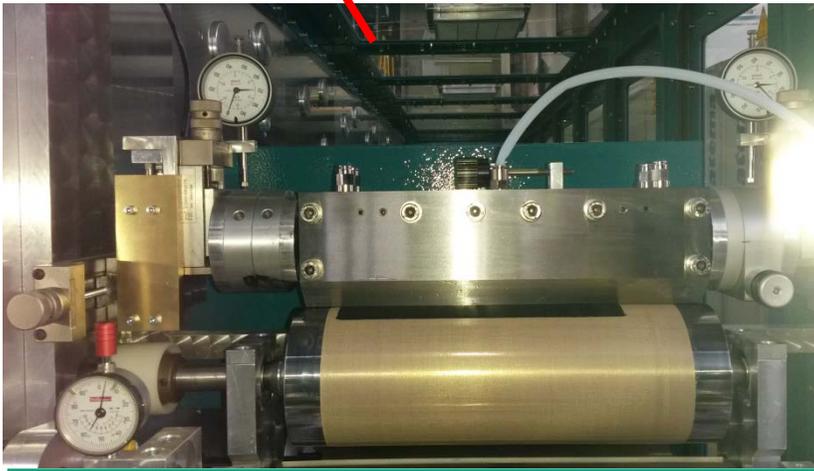
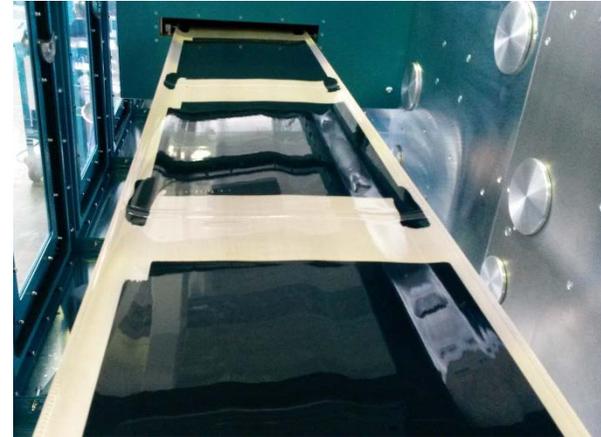
# DEG-Herstellung: Schlitzdüsenverfahren

---

- Für DEG werden zahlreiche Folien benötigt
- Nicht im Labor herstellbar
- Schlitzdüsenherstellverfahren („slot die coating“) grundsätzlich für große Folienflächen geeignet
- Schlitzdüsenverfahren erfordert geringe Verarbeitungsviskosität und längere Topfzeiten
- Einstellung der Foliendicke über Viskosität, Abziehggeschwindigkeit, Düsenpalt und Materialförderdruck
- Lamination von mehrschichtigen Verbänden

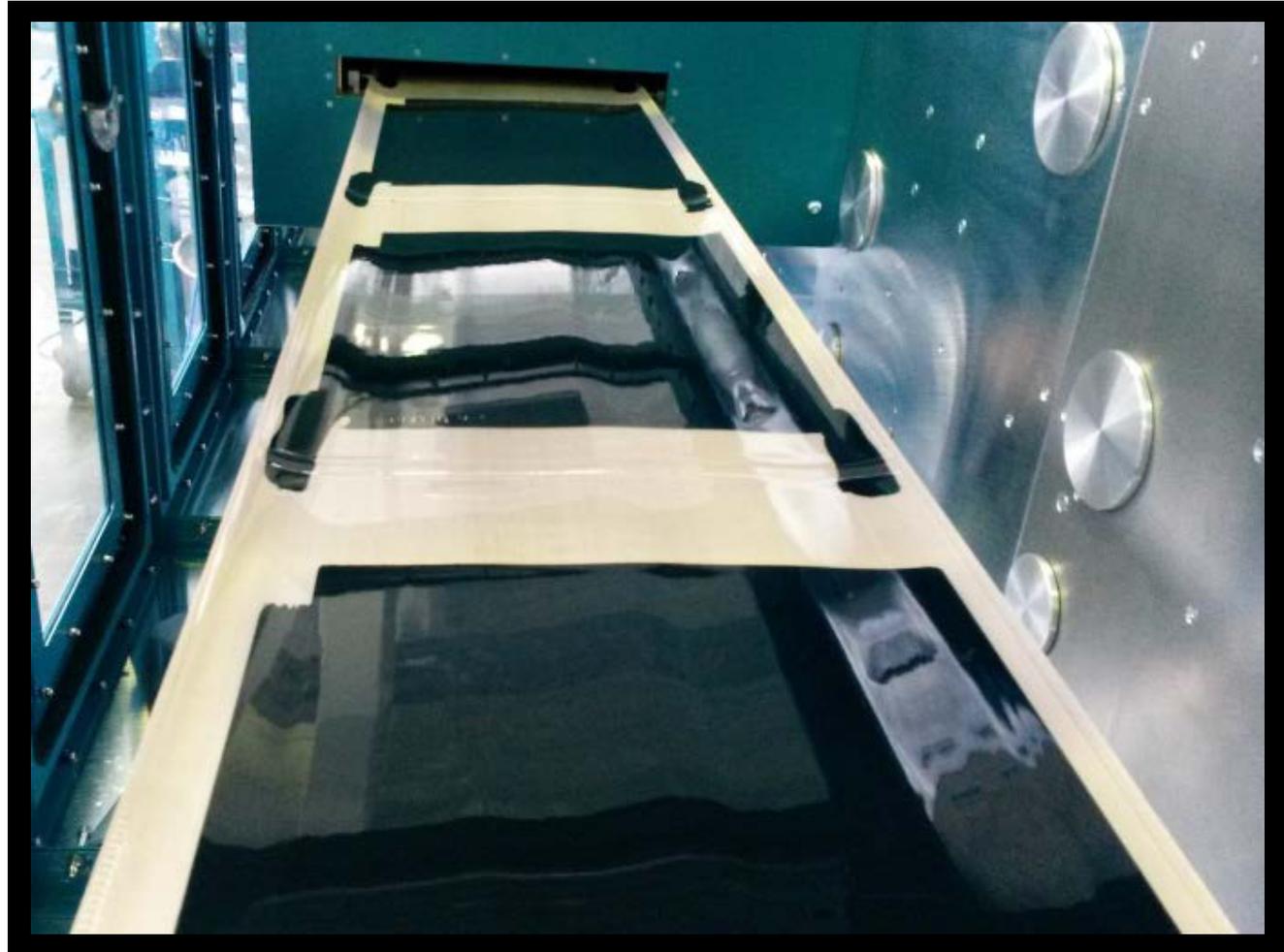


# DEG-Herstellung: Schlitzdüsenverfahren



# DEG-Herstellung: Schlitzdüsenverfahren

---



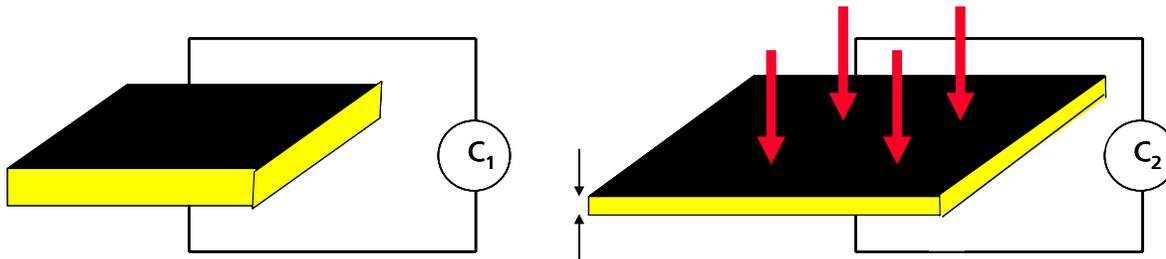
# DEG-Herstellung: Schlitzdüsenverfahren

- großflächig als Bänder (0,5 m breit, ca. 100 m lang) von Rolle zu Rolle kostengünstig herstellbar



# Anwendung als Sensor

- Neue Klasse mechanischer Sensoren zur Druck- oder Dehnungsmessung
- Funktionsprinzip:  
Bei einer Verformung verringert sich die Dicke der Folie bei gleichzeitiger Vergrößerung der Fläche, woraus eine elektrische Kapazitätserhöhung als Messgröße resultiert



⇒ großflächige, flexible und integrierbare Sensorik

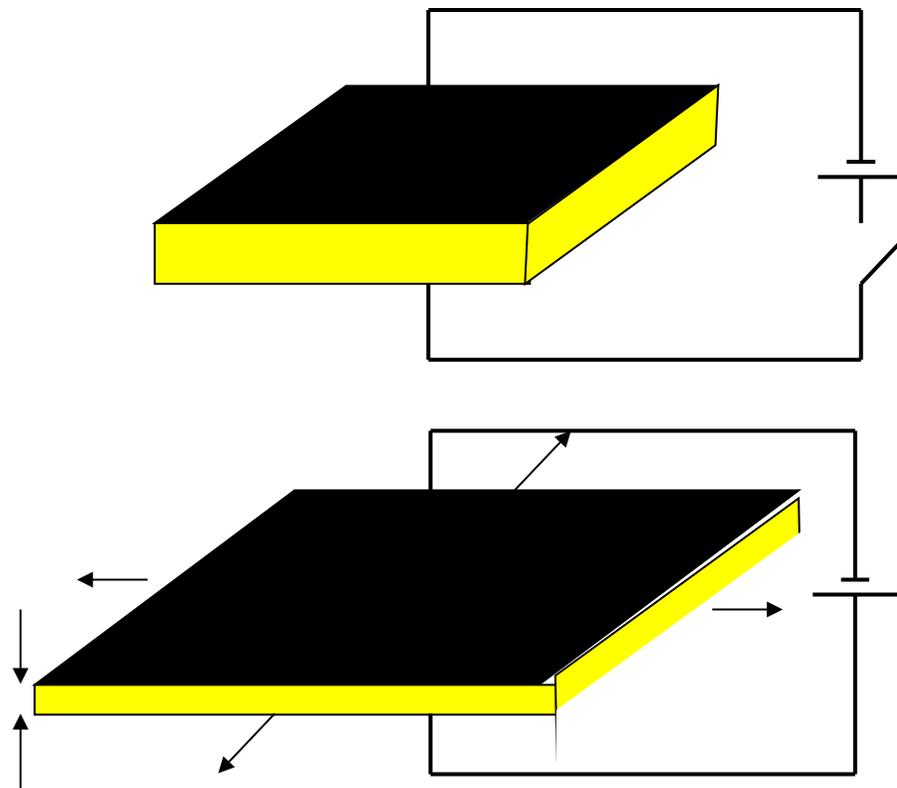
⇒ ortsaufgelöste Sensorfläche durch strukturierte Elektroden



# Anwendung als Aktor

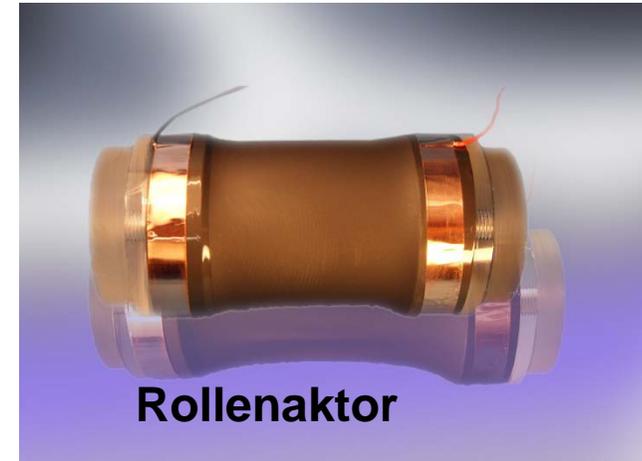
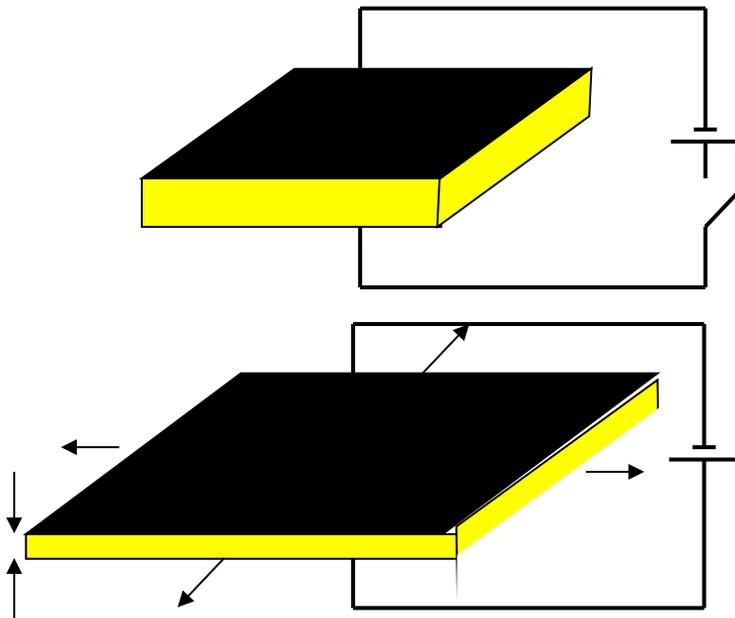
## Dielektrische Elastomeraktoren:

### Flächenänderung durch elektrisches Feld



# Funktionsprinzip dielektrischer Elastomer Aktoren

## Flächenänderung durch elektrisches Feld



Rollenaktor



DEA - Lautsprecher

# Ausblick

---

- **Miniaturisierung des Schichtaufbaus**
- **Multischichtaufbau**
- **Optimierung der Betriebsfestigkeit der Elastomere unter zyklischer Last**
- **Erhöhung Leitfähigkeit der Elektroden**
- **Vertiefung der Prozessentwicklung**

**Vielen Dank für die Förderung durch das Bayerische  
Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und  
Technologie**



**und  
Ihre Aufmerksamkeit!**

**Dr. Raman Rabindranath  
Fraunhofer ISC  
Neunerplatz 2  
97082 Würzburg**

**Tel.: +49 (0)931 4100 - 238  
Raman.rabindranath@isc.fraunhofer.de  
www.isc.fraunhofer.de**