

# Thermische Sensoren







Energiegewinnung für  
autarke Mikrosysteme



Mikrosystem  
Funkuhr mit  
Thermo-  
elektrischem  
Generator

## Art der zur Verfügung stehenden Energie

Mechanische Energie

Strahlungsenergie

Chemische Energie

„Biologische“ Energie

Thermische Energie

## Methode der Umsetzung

- piezoelektrische
- elektromagnetische
- kapazitive
- photovoltaisch
- RF Empfang
- Brennstoffzelle
- Bio-Brennstoffzelle
- thermophotovoltaisch
- thermomechanisch
- thermoelektrisch

## Mechanische Energie

- piezoelektrische
- elektromagnetische
- kapazitive

## Strahlungsenergie

- photovoltaisch
- RF Empfang

## Chemische Energie

- Brennstoffzelle

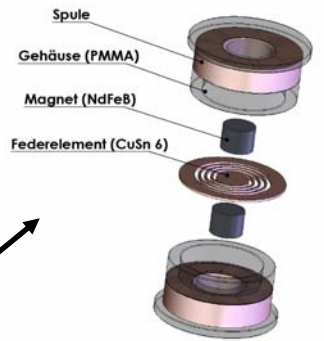
## „Biologische“ Energie

- Bio-Brennstoffzelle

## Thermische Energie

- thermophotovoltaisch
- thermomechanisch
- thermoelektrisch

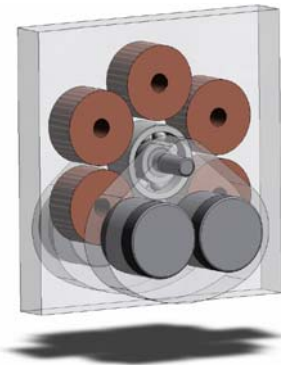
## Induktive Generators



### M1IT

#### Mode One Induktion Transducer

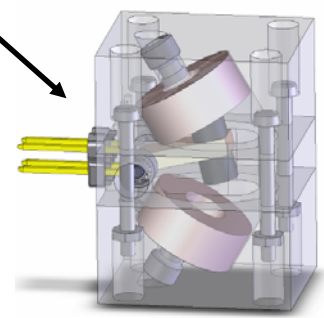
wenn Vibrationsfrequenz bekannt und nahezu konstant ist



### NMRT

#### No Mode Rotation Transducer

wenn Vibrationsfrequenz unbekannt ist und sich mit der Zeit ändert

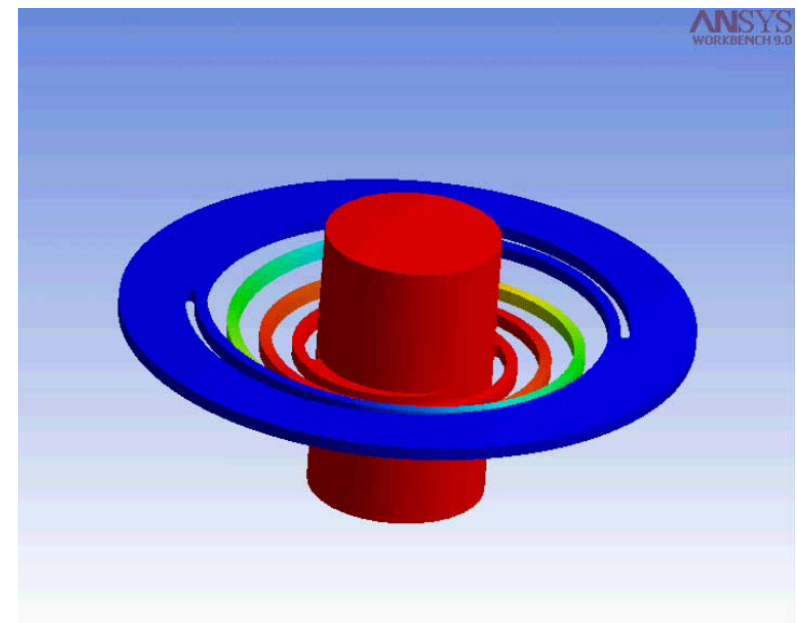
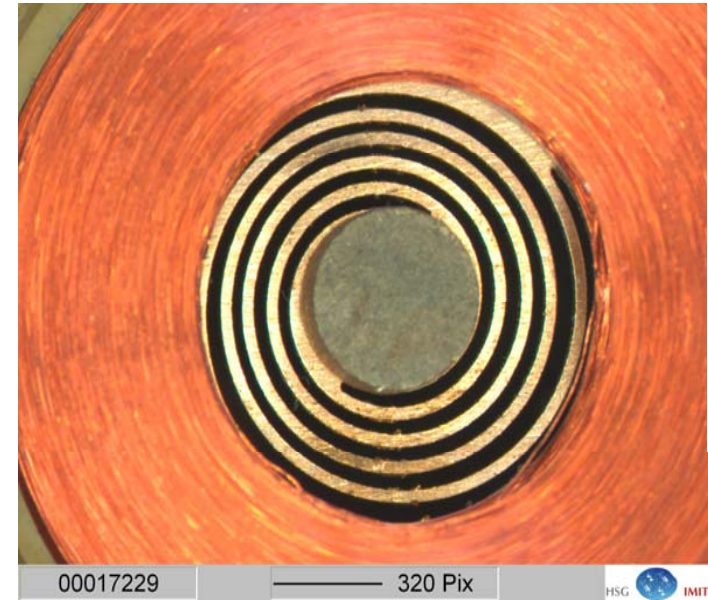
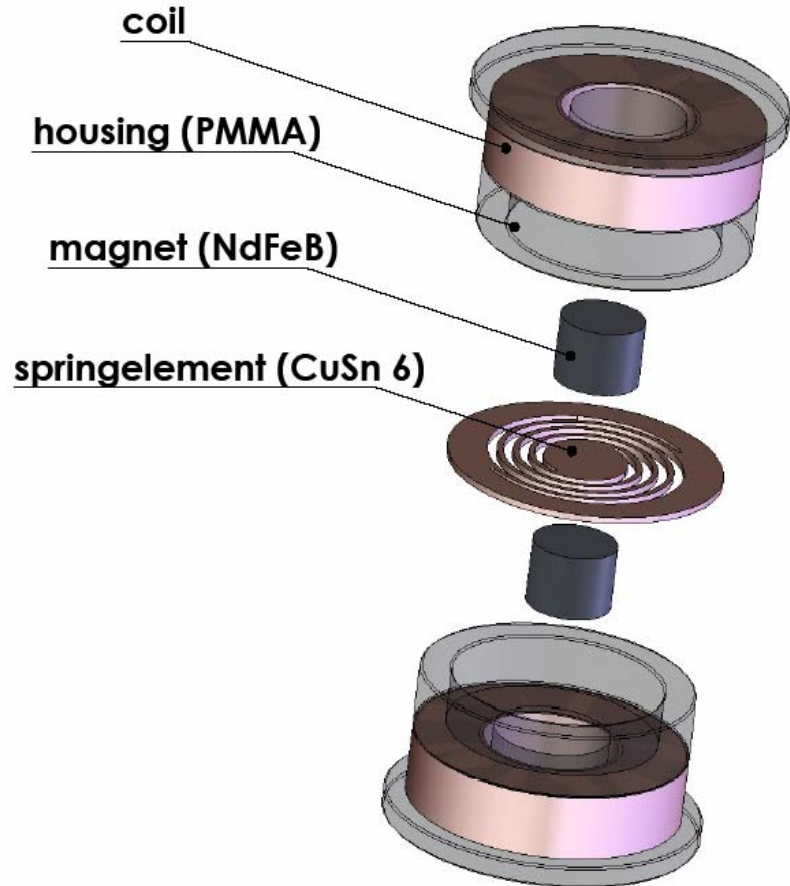


### LFTT

#### Low Frequency Tunable Transducer

Konversion von variablen niederen Frequenzen und Stößen bei kleinem Generatorvolumen

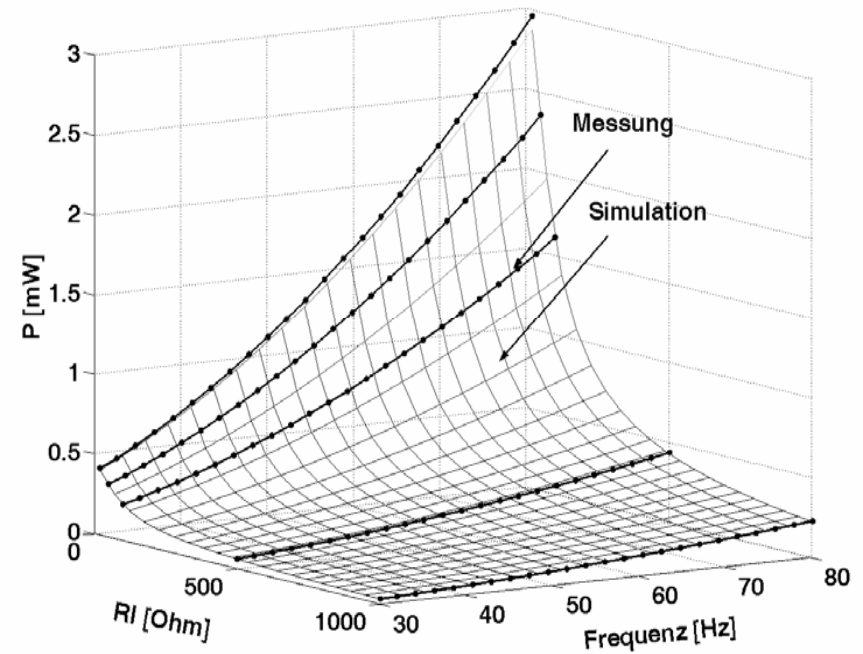
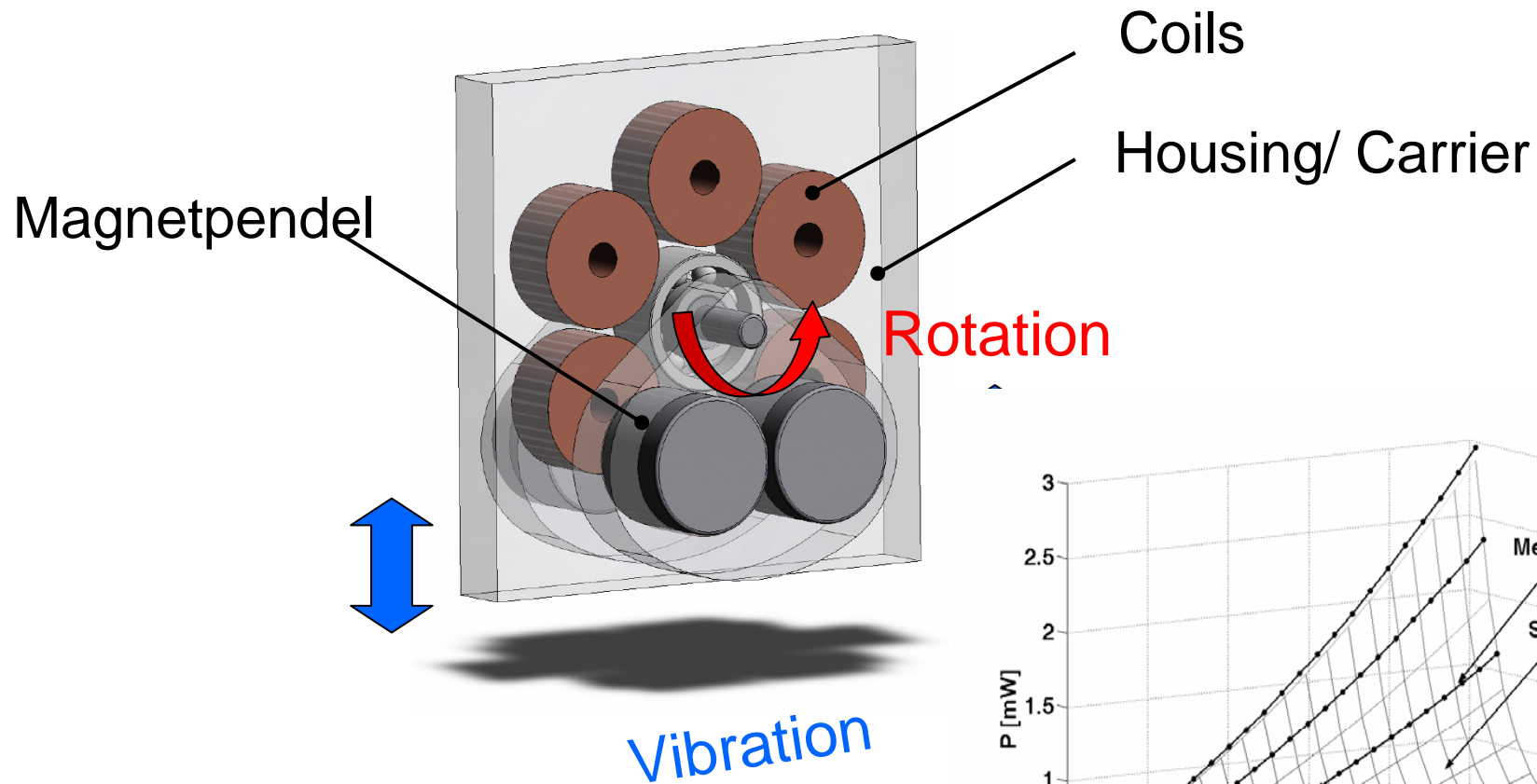
# M1IT principle



Resonantes Prinzip geeignet wenn  
Vibrationsfrequenzen bekannt sind

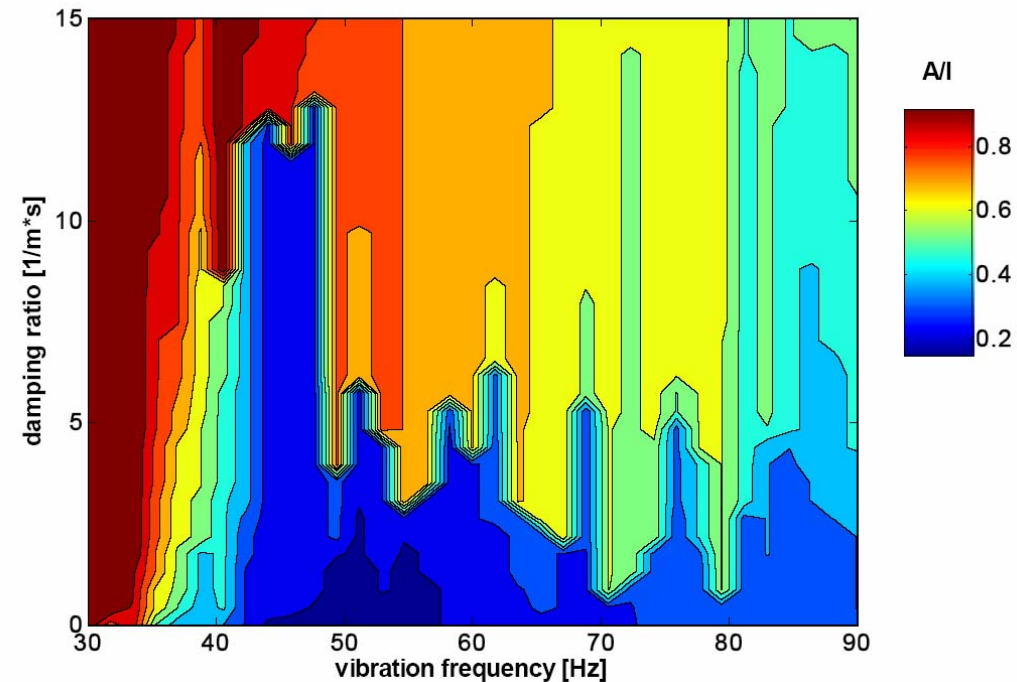
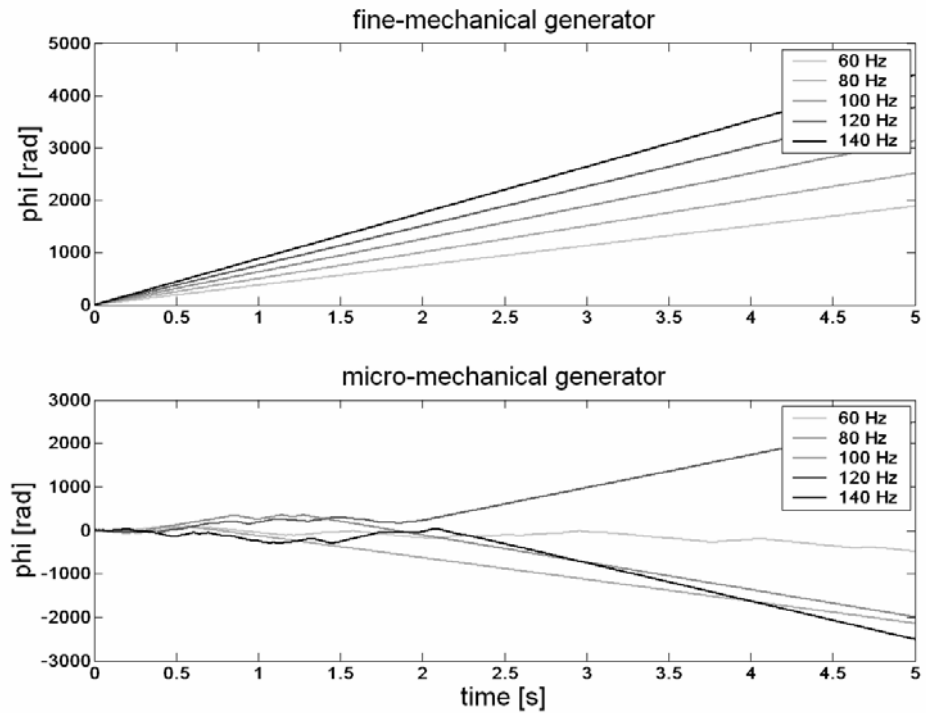


# NMRT principle





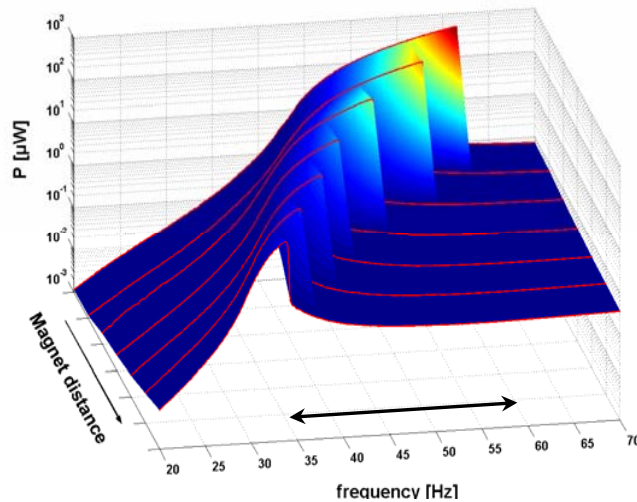
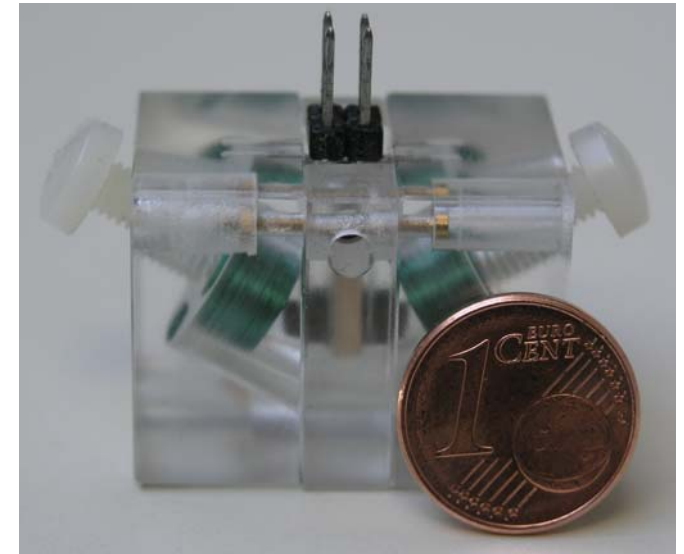
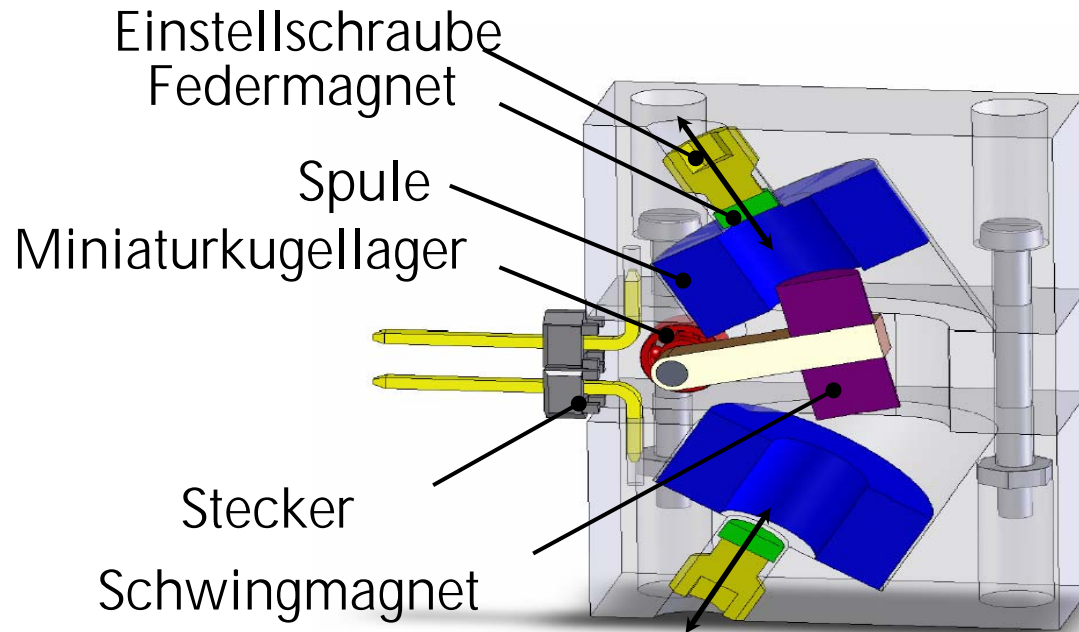
# NMRT prototype performance



✓ Ist die Amplitude der Vibration im Bereich der Pendellänge wird das System chaotisch

⇒ Rotation ohne Anfangsbedingung

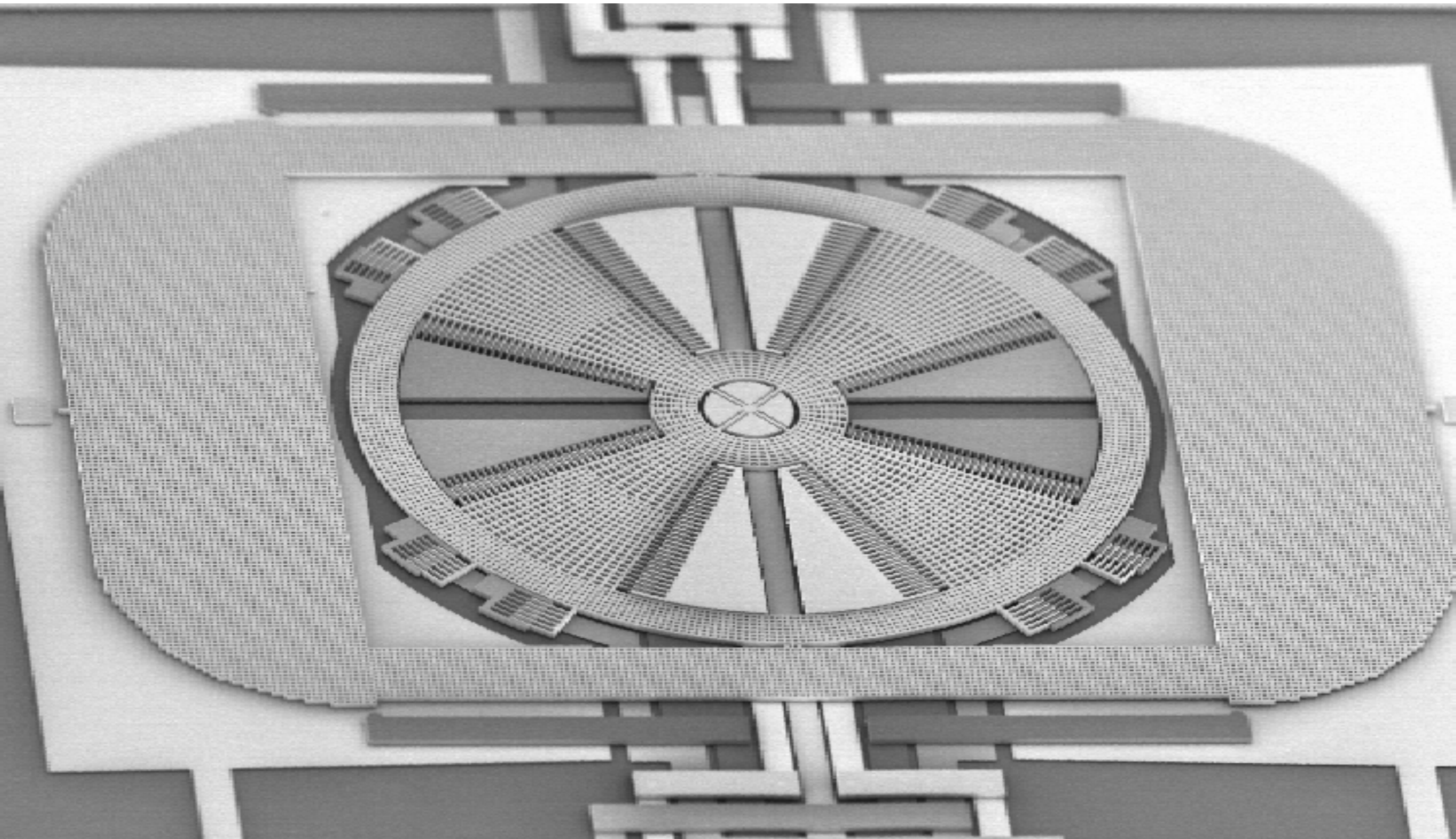
# LFTT prototype performance



Resonanzpeak in weitem Frequenzband verschiebbar



# Kapazitiv – mögliche Strukturen



500  $\mu\text{m}$



Mechanische Energie

- piezoelektrische
- elektromagnetische
- kapazitive

Strahlungsenergie

- photovoltaisch
- RF Empfang

Chemische Energie

- Brennstoffzelle

„Biologische“ Energie

- Bio-Brennstoffzelle

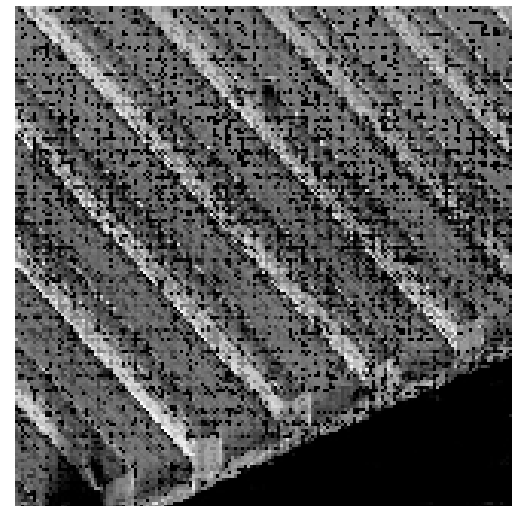
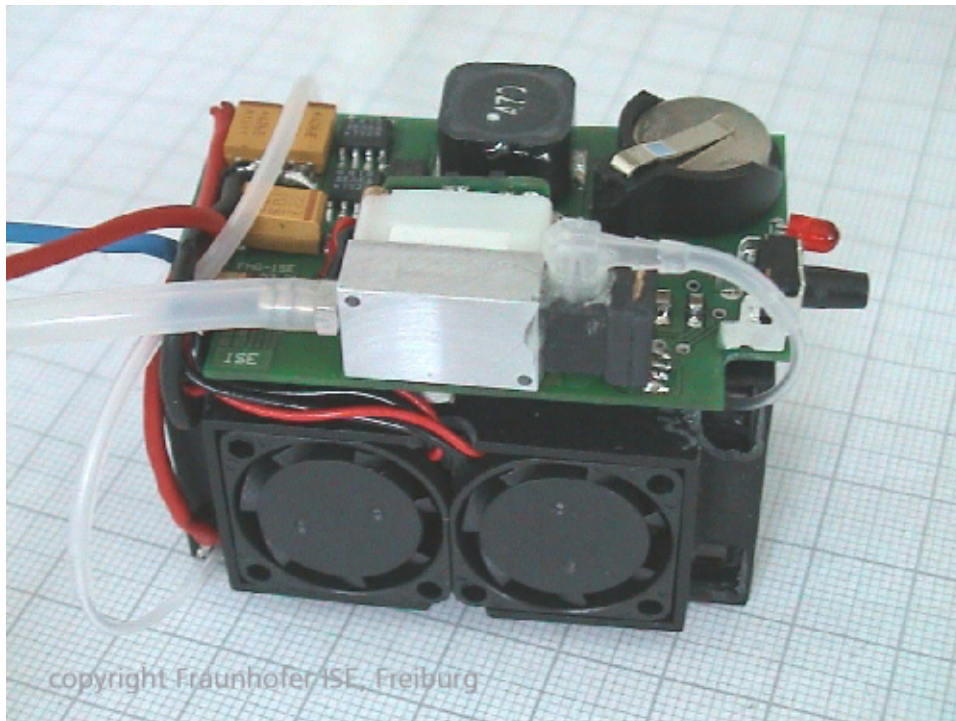
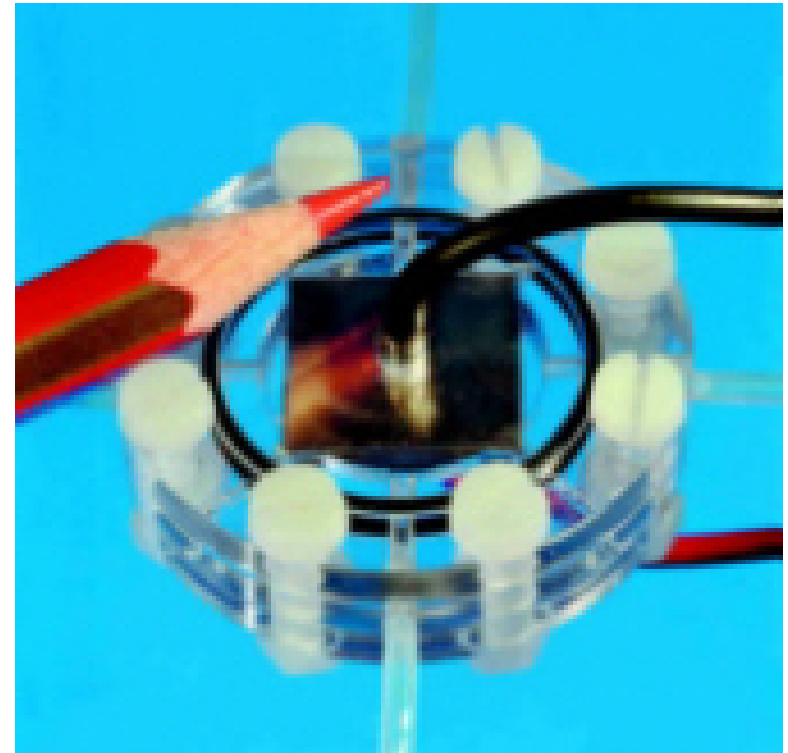
Thermische Energie

- thermophotovoltaisch
- thermomechanisch
- thermoelektrisch



# Mikrobrennstoffzelle

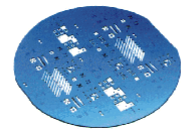
- mikrostrukturierte Strömungskanäle
- Bipolarplatten aus Metallfolie
- Betrieb mit Wasserstoff und Luft
- keine Diffusionsschicht (5er Stapel 2,5mm)
- Leistungsdichte  $> 1 \text{ W/cm}^3$
- Wasserstoffversorgung problematisch
- Betrieb (Pumpen, Regler, Lüfter ...)



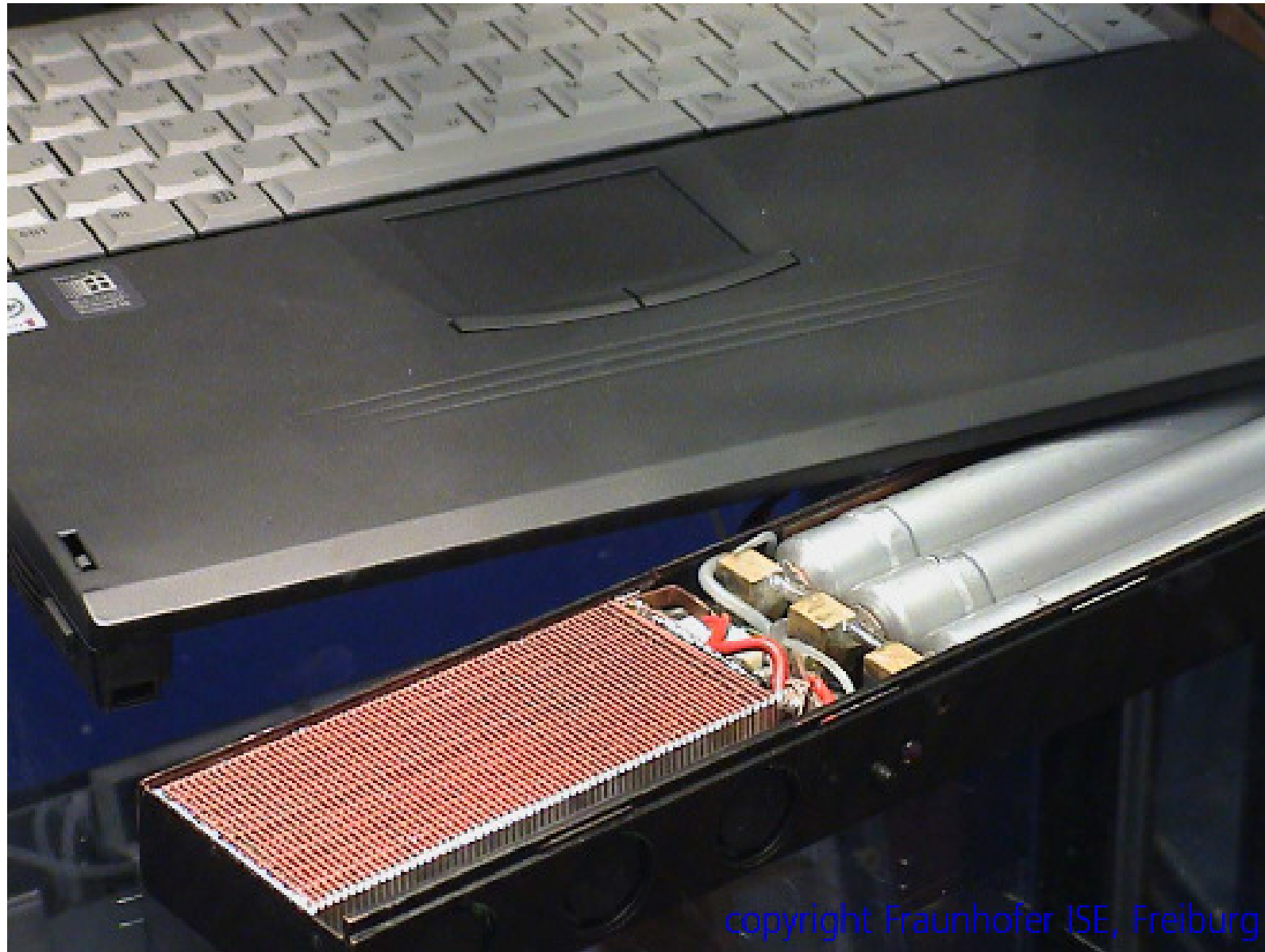
FhG ISE,  
IMTEK

# Mikrobrennstoffzelle – derzeitiger Stand

HSG



IMIT



50 W

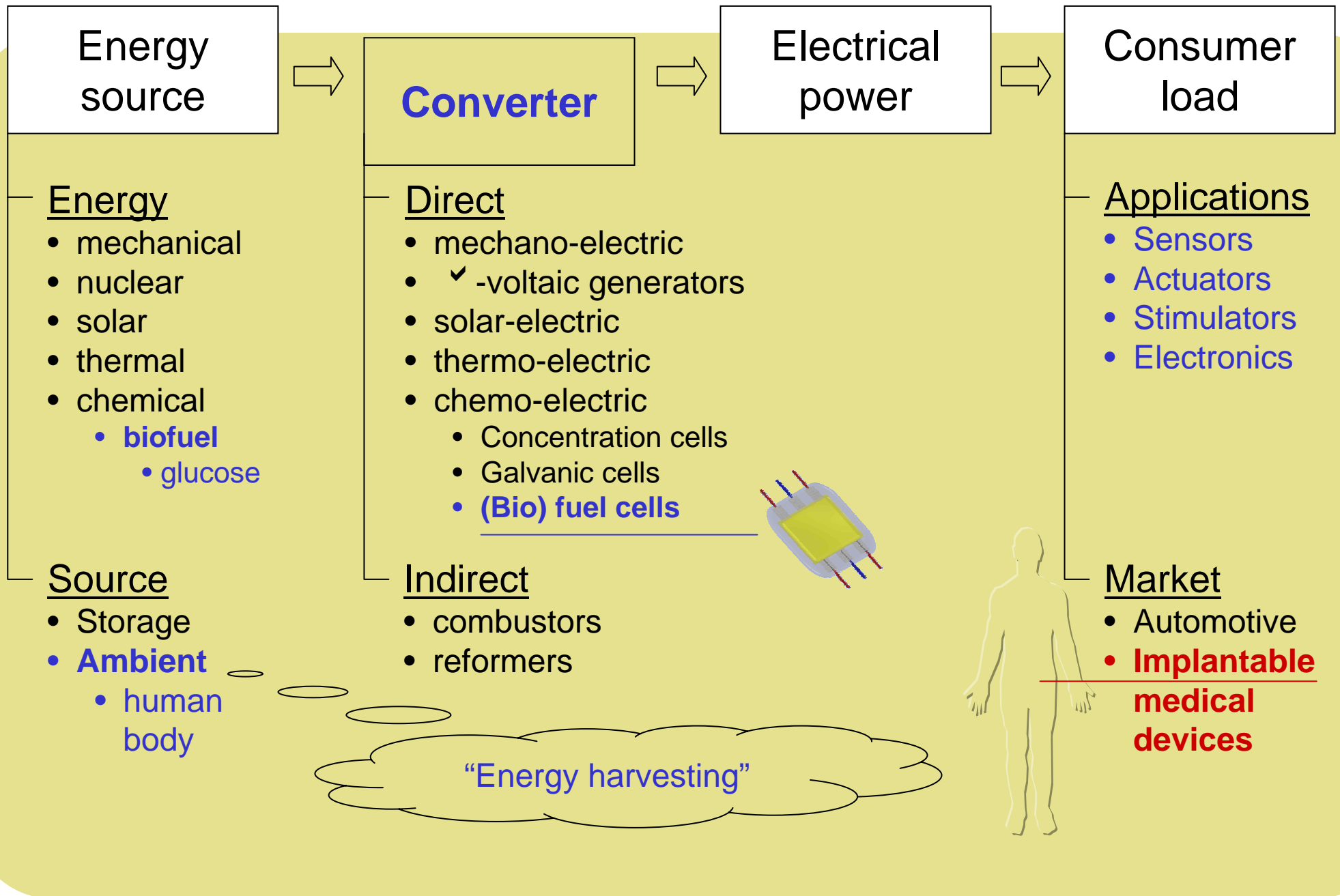
40 Wh

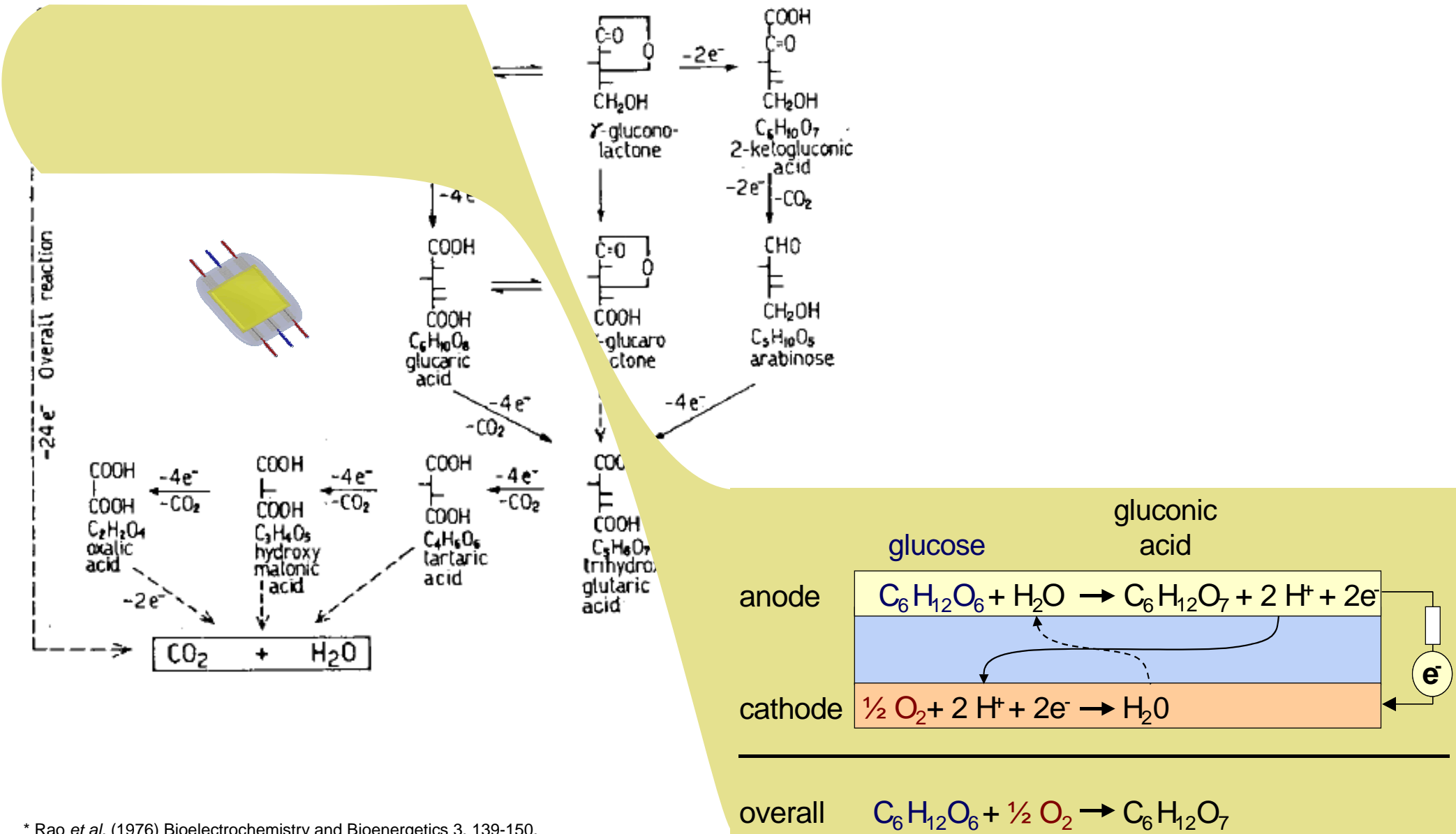
Metall-  
hydrid-  
speicher

27 Zellen  
Stack

Incl.  
Spannungs-  
wandler

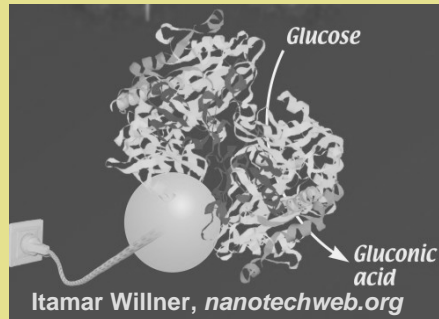
copyright Fraunhofer ISE, Freiburg



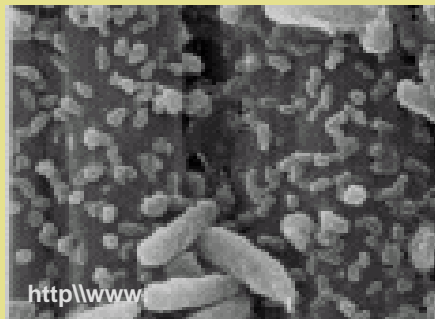


\* Rao et al. (1976) Bioelectrochemistry and Bioenergetics 3, 139-150.





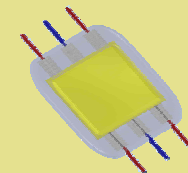
1. **Enzymatically** catalyzed biofuel cells
  - + power output up to 60  $\mu$ W in physiological solution
  - limited long-term stability

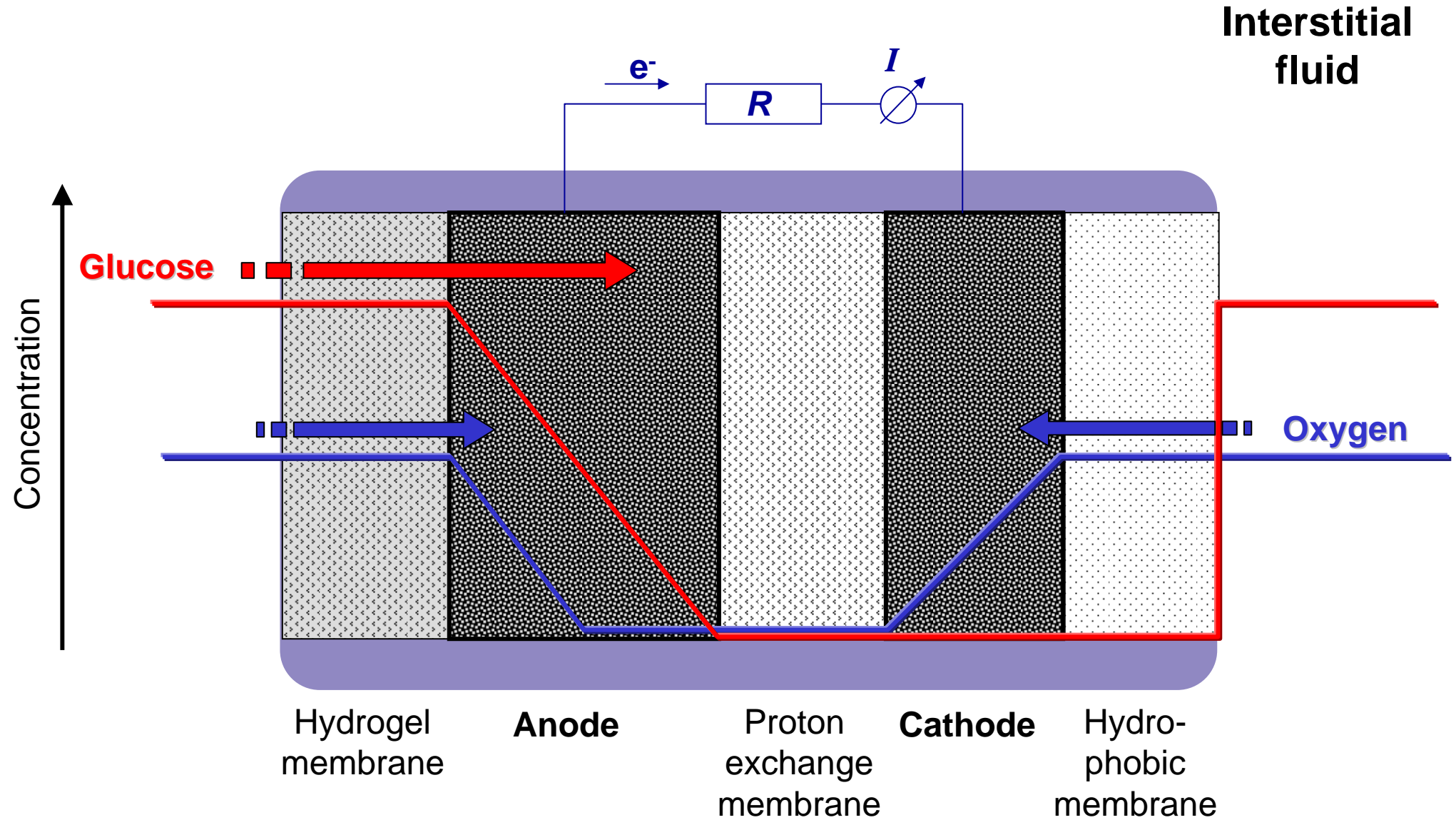


2. **Microbially** catalyzed biofuel cells
  - + self regenerating
  - + superior life-time > 5 years reported (in vitro)
  - control of cell growth, immune system

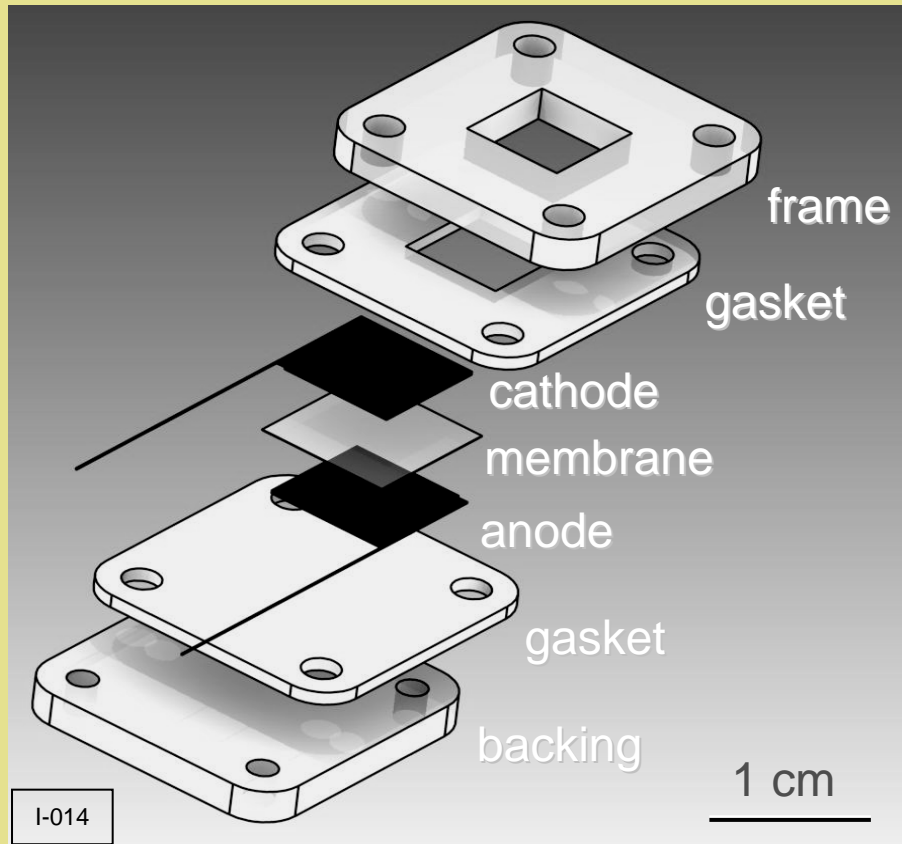


3. [REDACTED]
  - + robust approach
  - + biocompatible concept
  - + lifetime in vivo > 5 month demonstrated

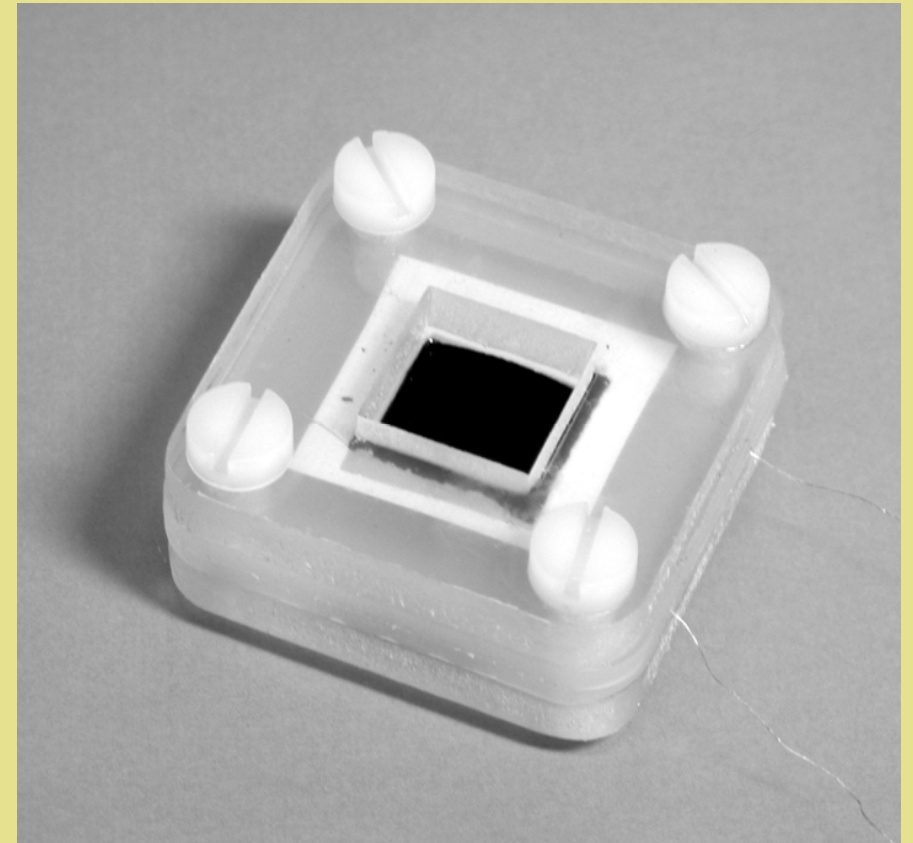




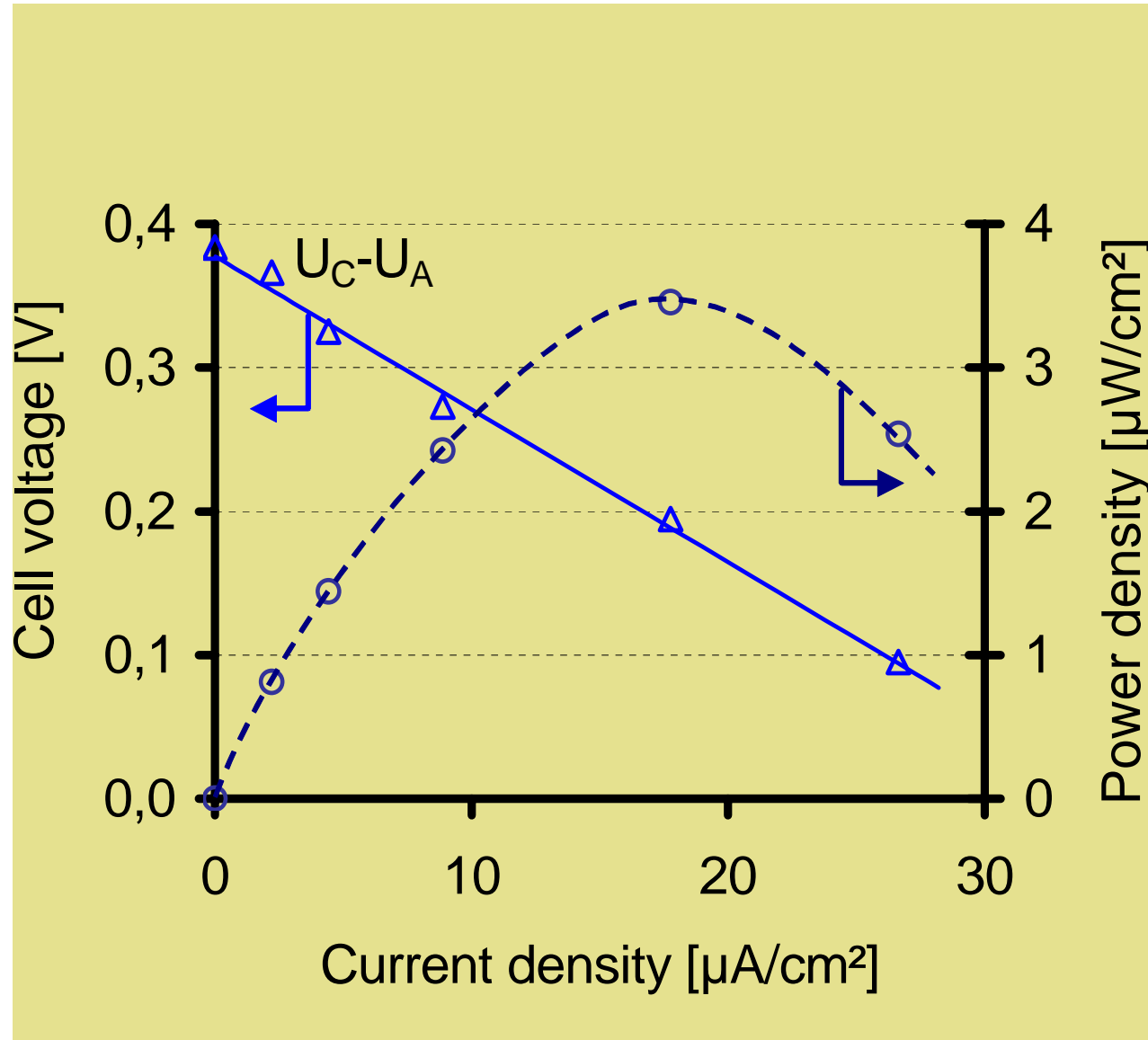
1970 RF Drake *et al.*, *Trans Amer Soc Artif Int Organs*, 16: 199-205.



**Components**



**Assembled fuel cell**



I-013



- Abiotically catalyzed glucose fuel cell**
  - Power output  $3.5 \mu\text{W cm}^{-2}$** 
    - Sufficient to operate a  $30 \mu\text{W}$  pace maker with  $10 \text{ cm}^2$  surface area**
  - Use for future low power MEMS implants**
    - Integrated circuits for implantable sensors ( $20 \mu\text{W}$ )**
    - “Bionic Ear” ( $200 \mu\text{W}$ )**
- Advantages of biofuel cells as micro power generators for implantable devices**
  - Use ambient energy**
  - Sustainable and constant power output**
  - Biocompatible**
  - Stability over 5 month in vivo**

Mechanische Energie

- piezoelektrische
- elektromagnetische
- kapazitive

Strahlungsenergie

- photovoltaisch
- RF Empfang

Chemische Energie

- Brennstoffzelle

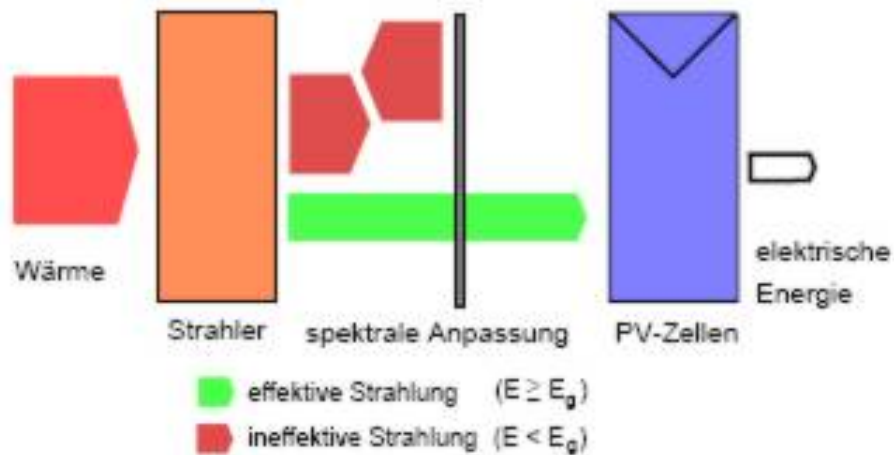
„Biologische“ Energie

- Bio-Brennstoffzelle

Thermische Energie

- thermophotovoltaisch
- thermomechanisch
- thermoelektrisch

# Thermophotovoltaische Wandler



+ große Energien möglich

- wenn Energiequelle verfügbar

+ PV-Zellen vorhanden

- im Mikrobereich wird thermische Isolation immer problematischer



Midnight Sun & Stove

Propane-fired

100 W elektrisch

25 kBTU/h = 7,3 kW

JX Crystals Inc.

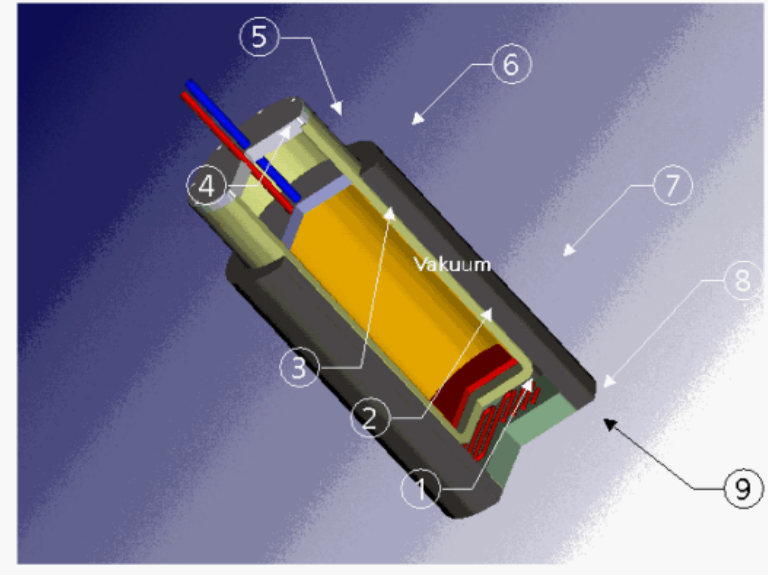
(photovoltaic cells)



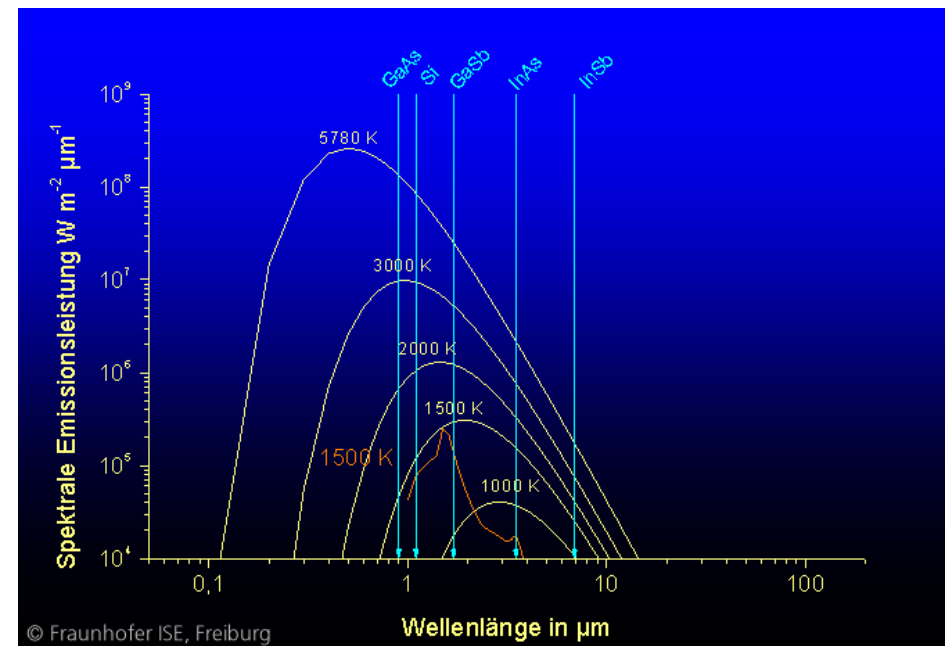
M.Zenker, Dis 2001, Uni Freiburg

# Thermophotovoltaische Wandler → Miniaturisierung

- 1 Strahler,  $T=1200 - 1500\text{ °C}$
  - 2 Reflektor
  - 3 GaSb-Modul
  - 4 Kühlleitungen
  - 5 Vakuumsflansch
  - 6  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Rohr
  - 7 Isolierung
  - 8 Kanthal-Heizelement
  - 9 Hochtemperatur-Faserisolation
- © Fraunhofer ISE, Freiburg

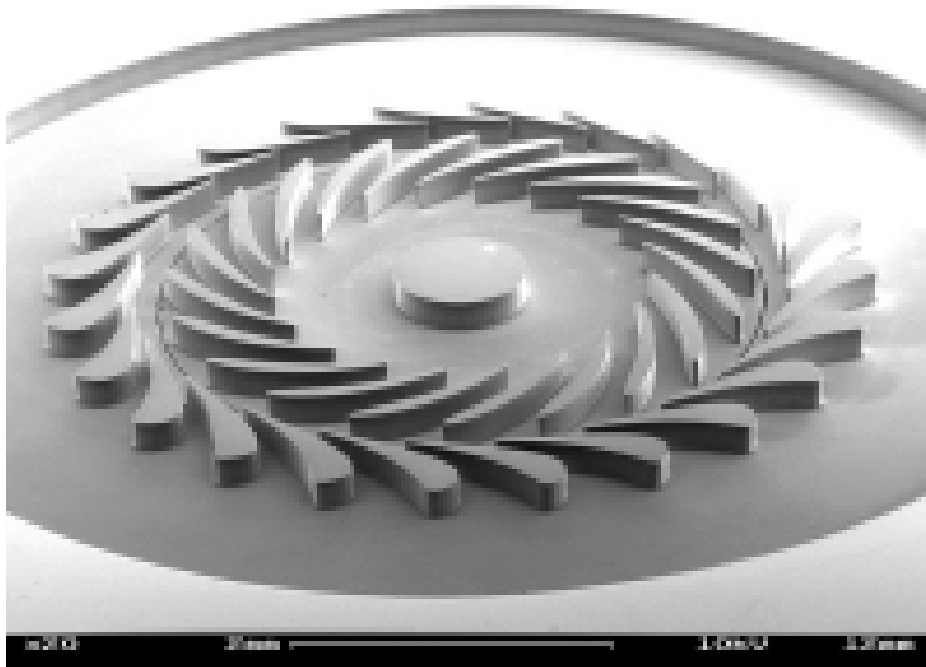


- Hohe Leistungsdichten von über  $1\text{ W/cm}^2$
- Wirkungsgrade ca. 10 %
- Hohe Zuverlässigkeit
- Leiser und schadstoffarmer Betrieb
- Miniaturisierte Bauweise
- Kombinierte Wärme- und Stromerzeugung





# Thermomechanische Wandlerprinzipien - Turbinen



thermische Energie →

mechanische Energie →

elektrische Energie

Mikroturbinen / Generatoren

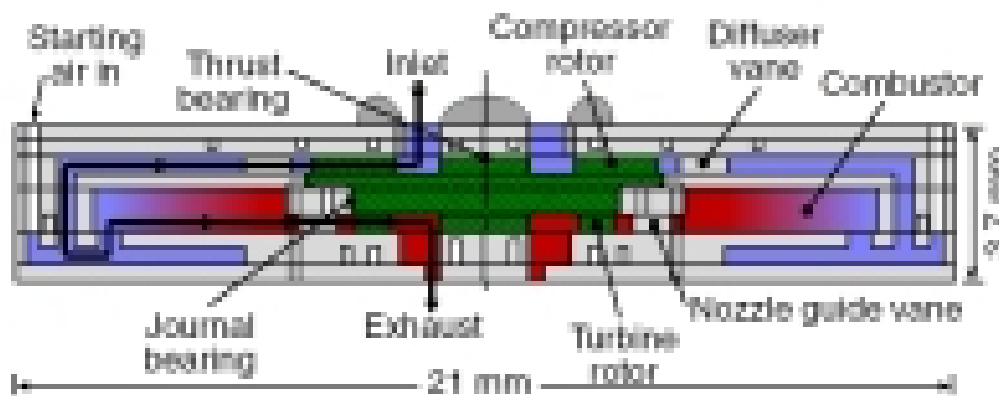
+ hohe Leistungsdichte

- Wirkungsgrad  $< 3\%$   
(parasitärer Wärmefluss)

- Lebensdauer

- bisher nur Prototypen

- Lärmemissionen



# Thermomechanische Wandlerprinzipien – neue Konzepte

## Mikro-Stirlingmaschine

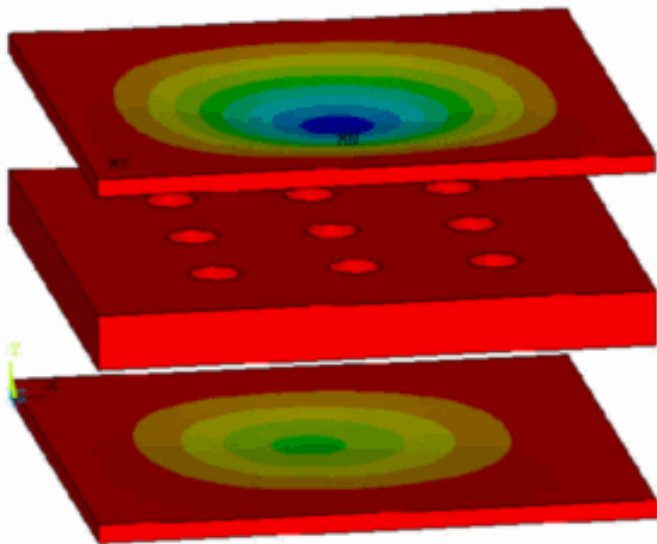
Umwandlung: Temperaturunterschied  $\leftrightarrow$  mechanische Energie

+ hoher Wirkungsgrad

+ universeller Einsatz

- Versuchsstadium

- parasitärer Wärmefluss



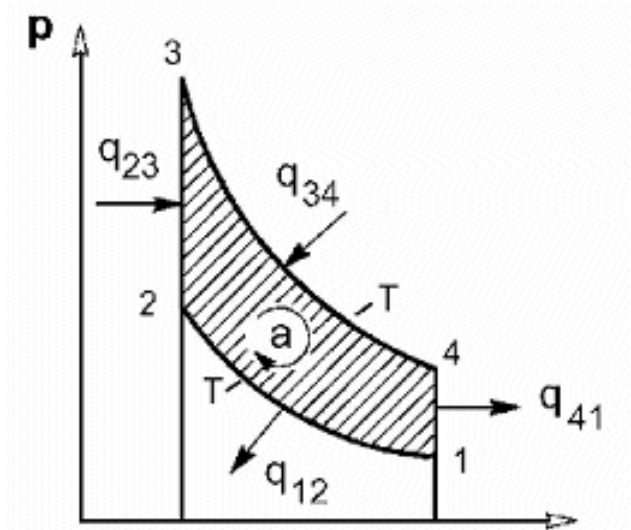
kalte Membran (Si geätzt)

Gasraum

Regenerator  
(Si, geätzt/laserstrukt.)

Gasraum

Heisse Membran (Si geätzt)



Mechanische Energie

- piezoelektrische
- elektromagnetische
- kapazitive

Strahlungsenergie

- photovoltaisch
- RF Empfang

Chemische Energie

- Brennstoffzelle

„Biologische“ Energie

- Bio-Brennstoffzelle

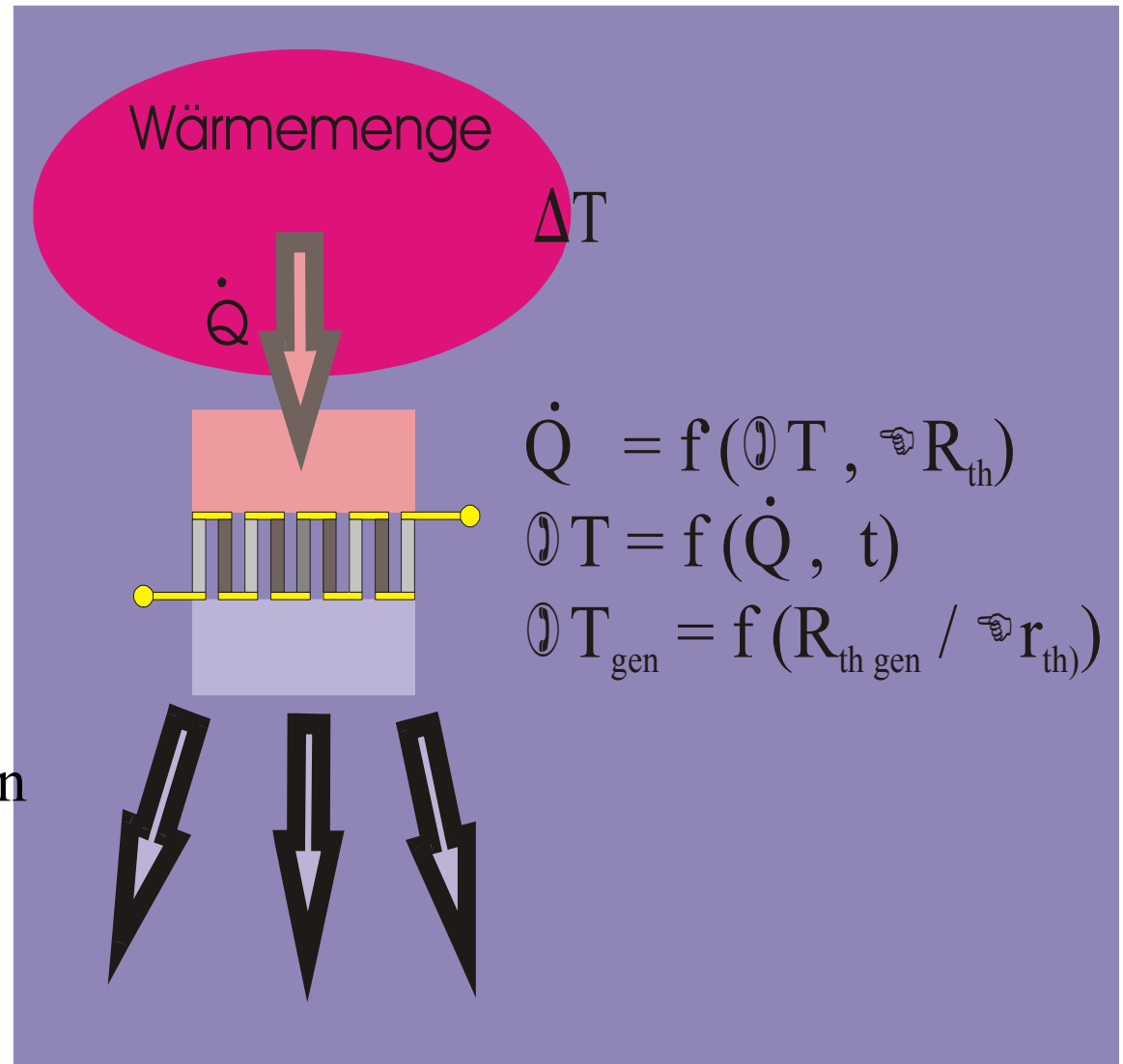
**Thermische Energie**

- thermophotovoltaisch
- thermomechanisch
- **thermoelektrisch**

Von einer **Wärmemenge**, mit einer höheren Temperatur als die der Umgebung, fließt ein Wärmestrom über den Generator und erzeugt über ihm einen Temperaturunterschied

## Seebeck-Effekt:

In einem offene Stromkreis aus zwei unterschiedlichen Materialien entsteht eine Spannung, wenn die zwei Kontaktstellen auf unterschiedlicher Temperatur gehalten werden.





## Wesentliche Parameter für den Anwender

$P_{el}$

$$U = \alpha * \Delta T \quad (\text{Seebeck-Koeffizient})$$

$$P_L = \frac{1}{4} U^2 / R_i \quad (\text{bei Anpassung } R_i = R_L)$$

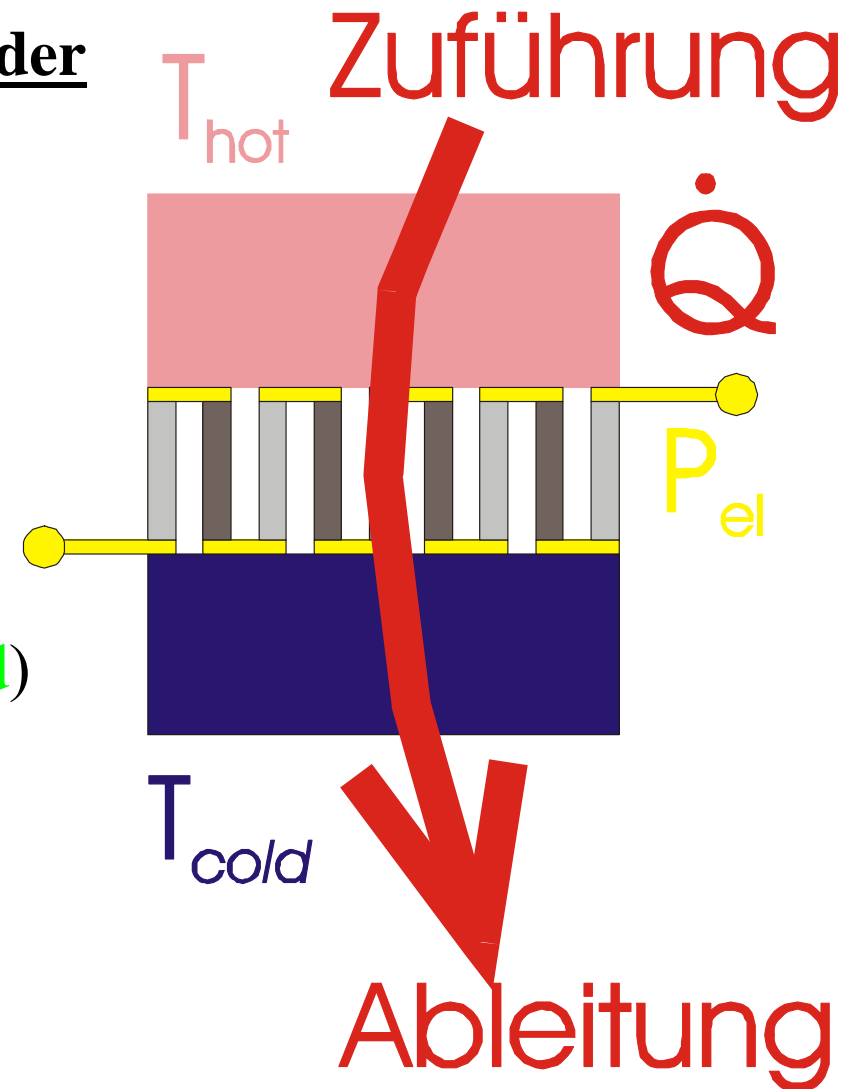
$$P_L = \frac{1}{4} (\alpha * \Delta T)^2 / R_i$$

$$R_i = f(\text{👉}) \quad (\text{spezifische el. Widerstand})$$

$Q$  zur Erzeugung von  $\Delta T$

$$Q = \Delta T / R_{Th}$$

$$R_{Th} = f(\text{🕒}) \quad (\text{spez. Wärmewiderstand})$$



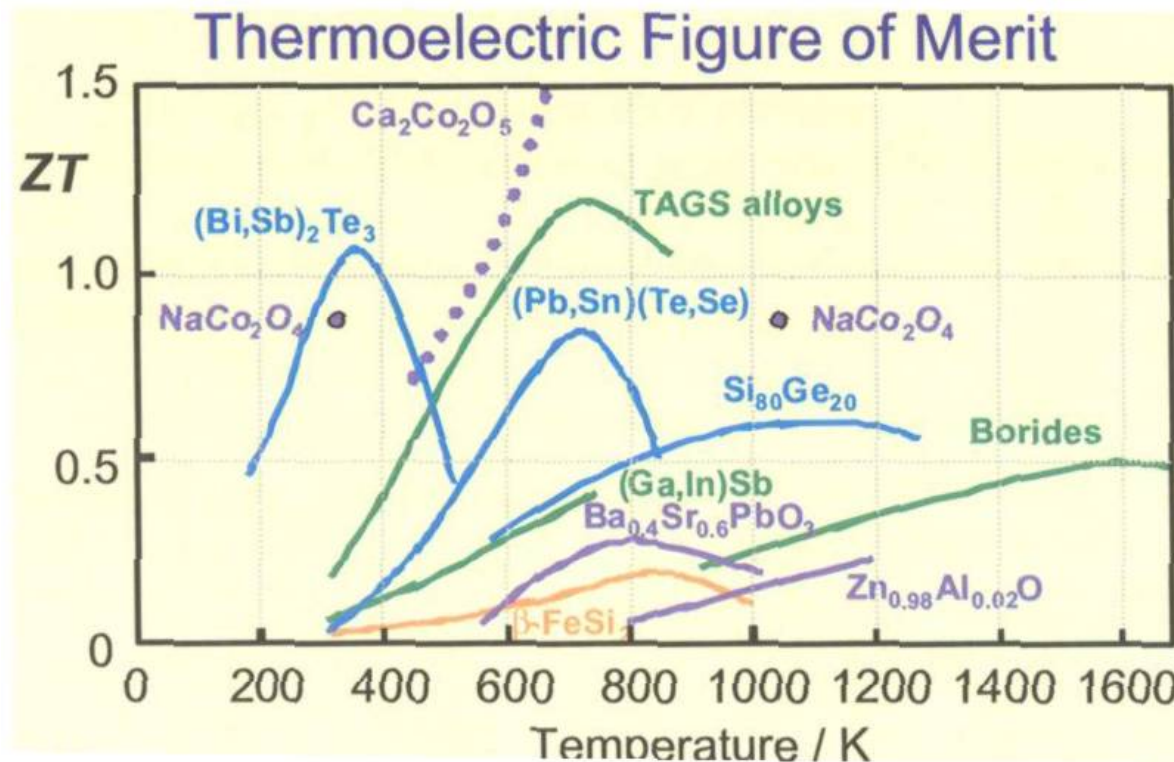
Seebeckkoeffizient  $\uparrow$

Wärmeleitfähigkeit  $\downarrow$

elektr. Leitfähigkeit  $\uparrow$

## Figure of Merit

$$Z = \alpha^2 * \text{[Hand Icon]} / \text{[Hourglass Icon]}$$



$Z * T$

wegen

$$P = f(\text{[Hand Icon]} T^2)$$

© DLR – Inst. für  
Werkstoff-Forschung

Der Wirkungsgrad theoretisch ist nur ein Bruchteil (ca. 17 %) des Carnot-Wirkungsgrades. Gebräuchliche Materialien sind  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ,  $\text{PbTe}$ ,  $\text{SiGe}$ ,  $\text{BiSb}$  oder  $\text{FeSi}_2$  mit realen Wirkungsgraden zwischen 3% und 8%.

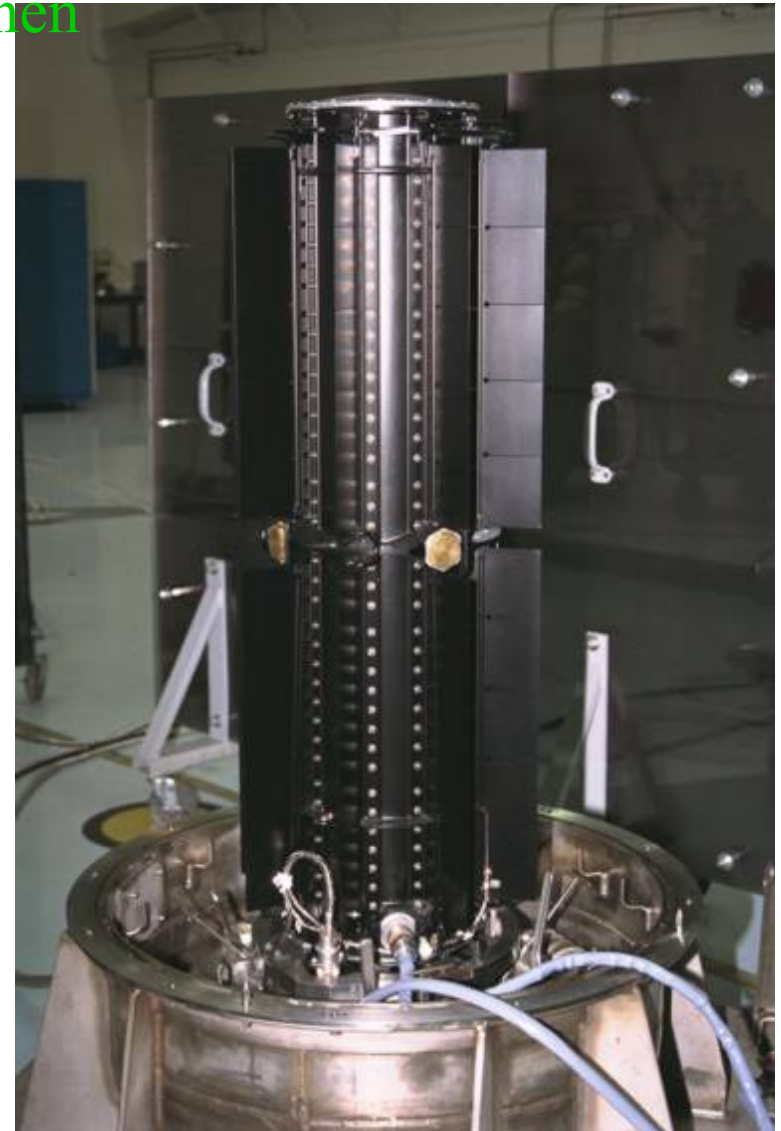
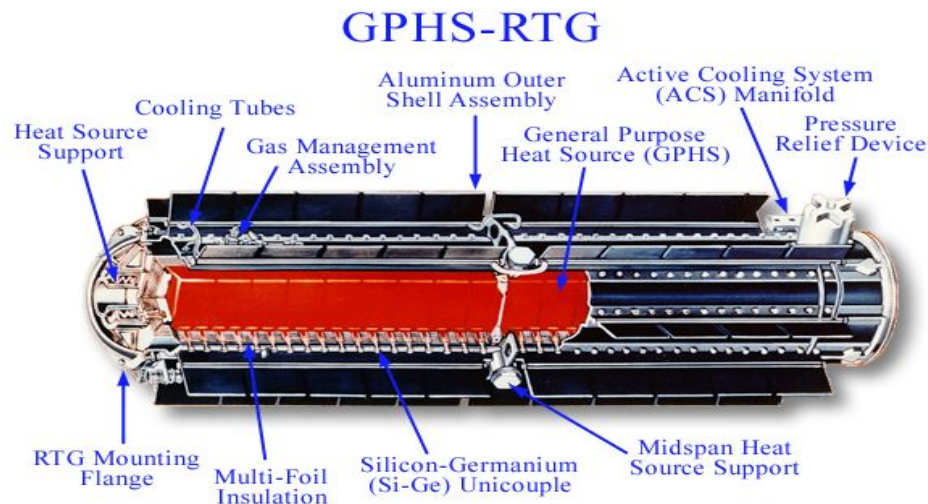
# Radioisotopengenerator (RTG)

Umwandlung der Wärme aus dem natürlichen  
Zerfall eines radioaktiven Isotopes (keine  
Kernspaltung!)  
in elektrische Leistung über einen  
thermoelektrischen Generator

Energiedichte  $^{238}\text{Pu} = 100 * \text{Benzin}$ , Wirkungsgrad = 8%

→ 1kg  $^{238}\text{Pu}$  liefert in 10 Jahren ca. 3 MWh el.

- Raumsonden
  - ( Funkfeuer )
  - ( Implantate )
- ! Verschmutzungsgefahr !**  
**Sehr leichte Miniaturisierung**

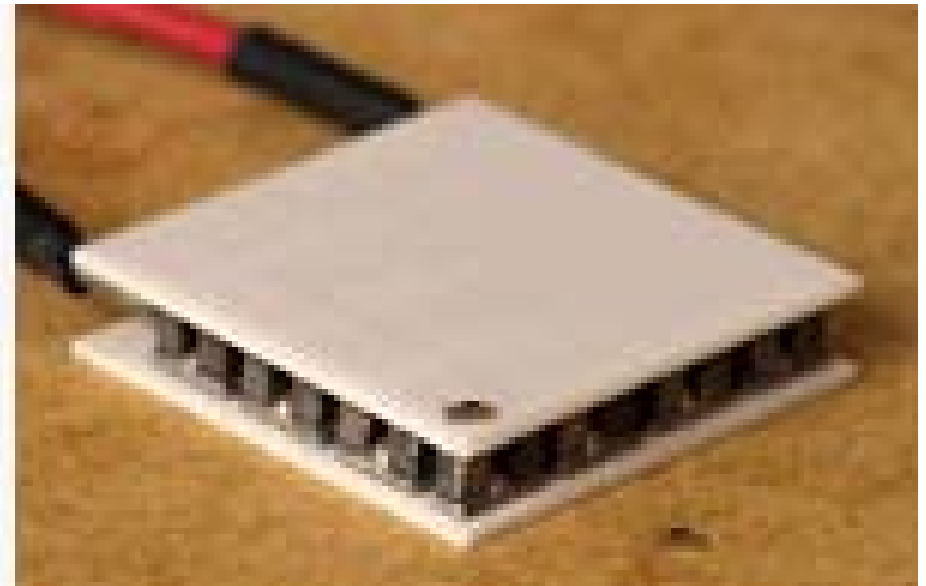


# Makroskopische Anwendungen



Global Thermoelectric Inc.  
Offshore, telecommunication

Raumfahrt:  
Space nuclear reactor

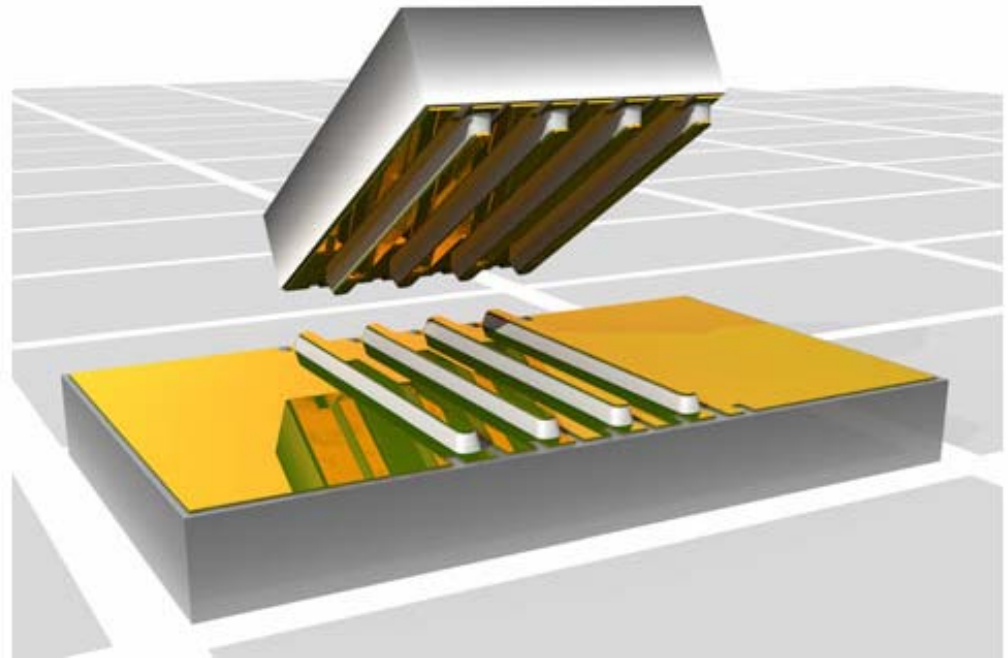
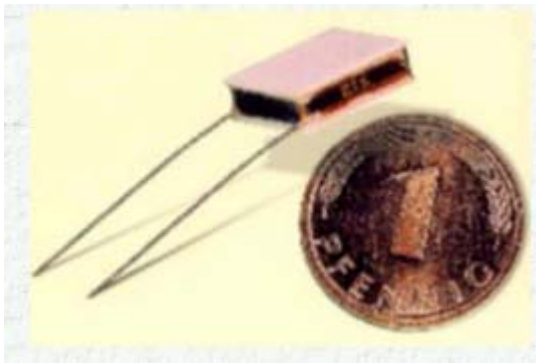
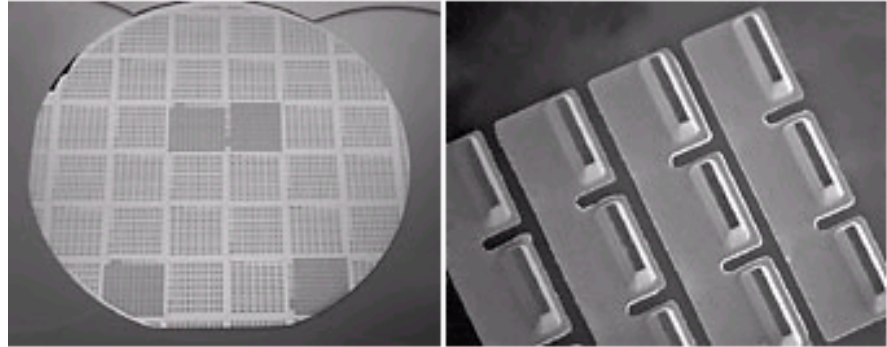


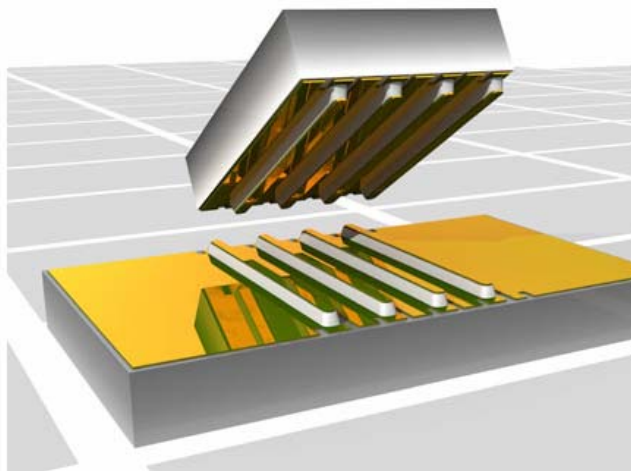
Hersteller von  
Elementen:

Russland  
USA  
China



- Siemens / FhG IPM:  
Micropelt,  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  gesputtert
- DLR (Raumfahrt)
- IPHT Jena (Bi, BiSb)
- IMIT (Silizium)
- \* DTS Halle





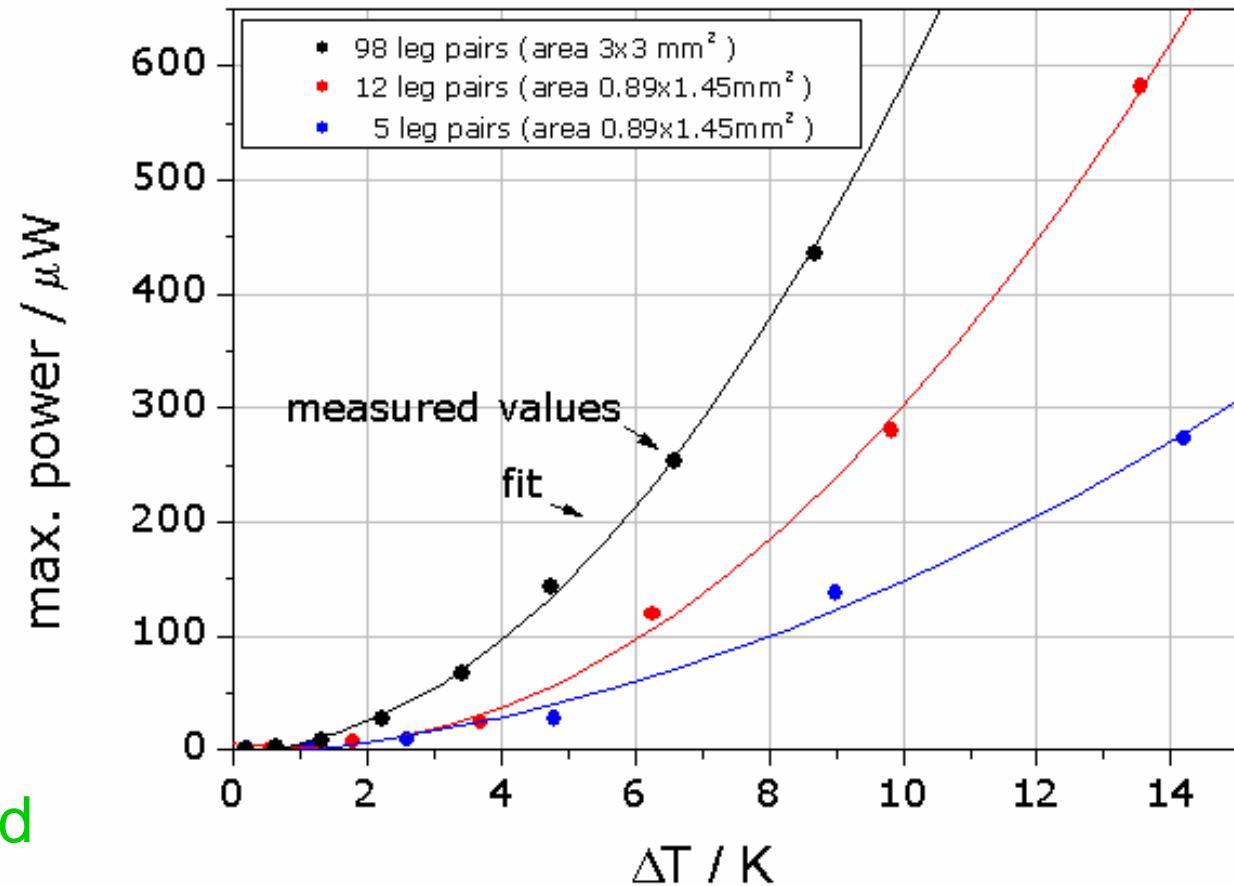
MPG-D602

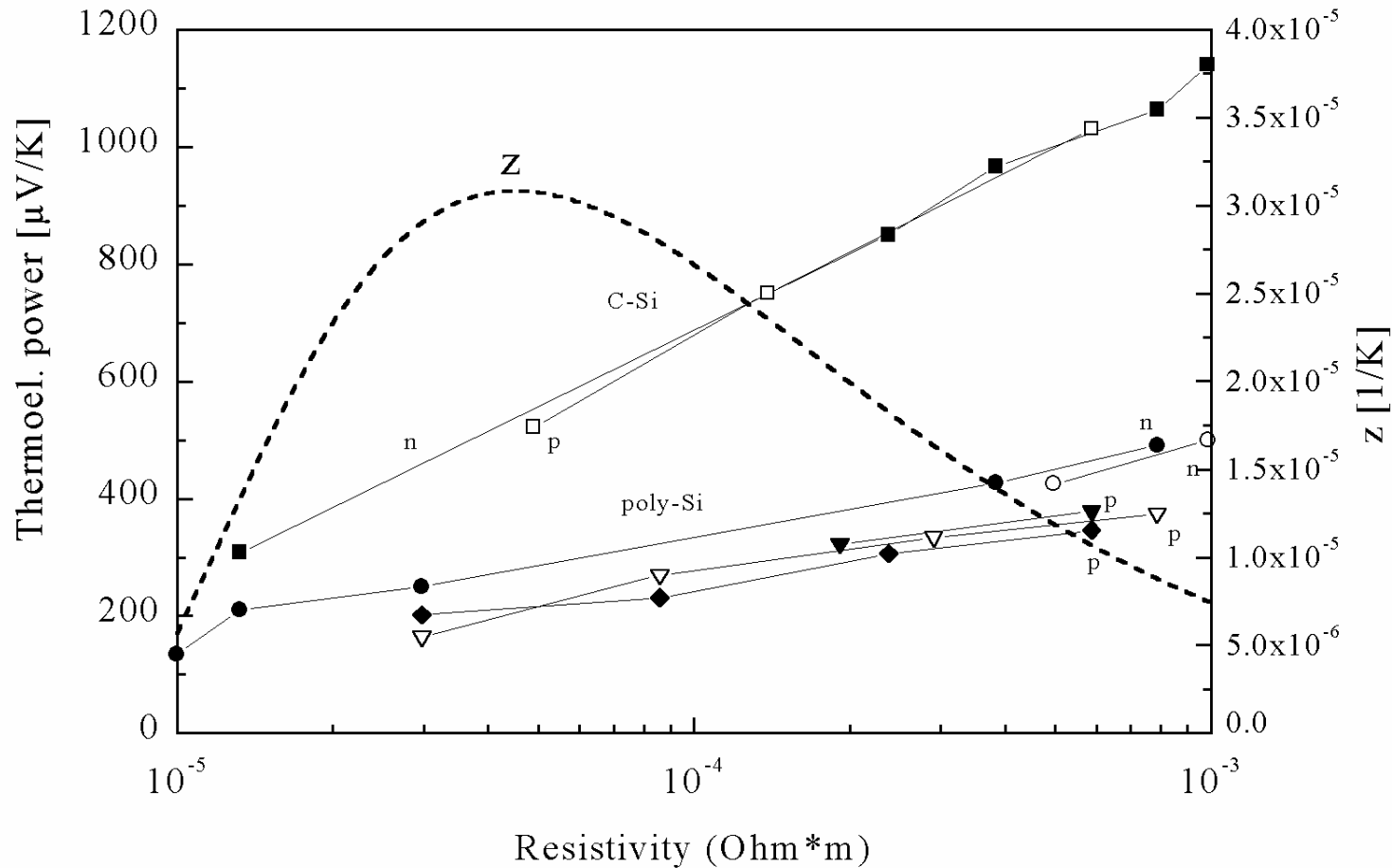
Out: 1,9V , 1,8 mW

@ 20K , 1,2W Load

Exotische Technologie

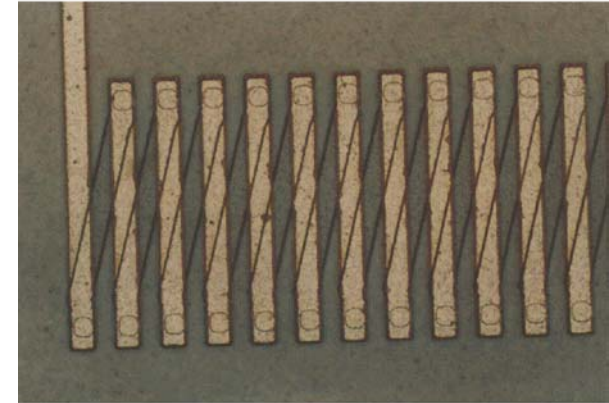
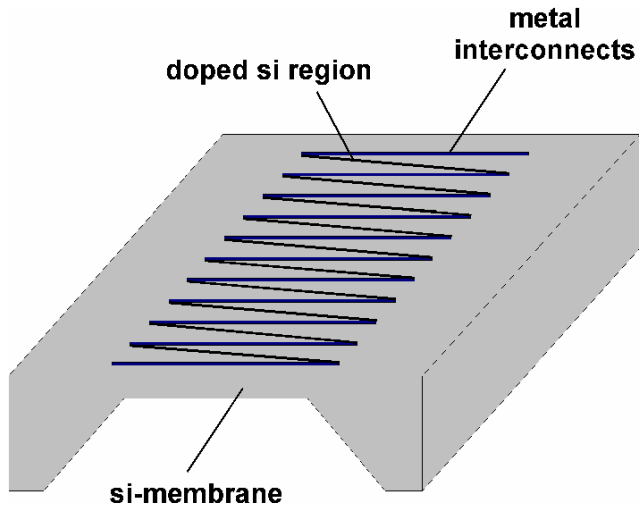
power per device vs.  $\Delta T$



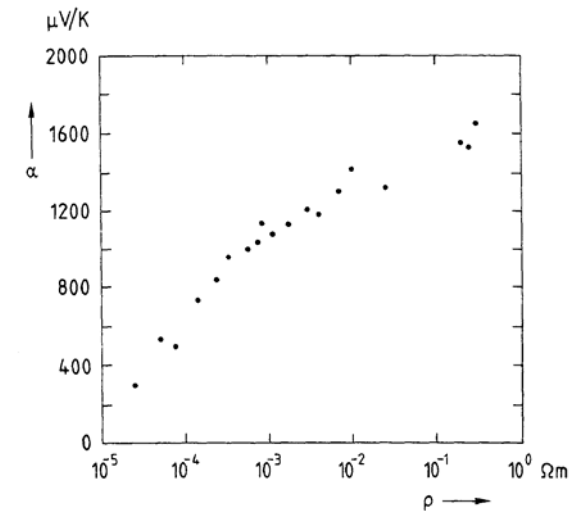
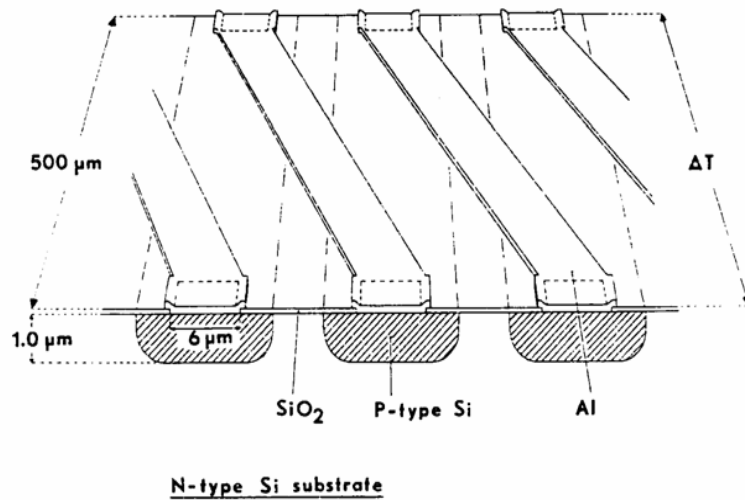


Liegt bei Raumtemperatur um den Faktor 50-100  
Schlechter als die z.Zt. besten Materialien

# Entwicklung am IMIT (Silizium)



**Load: 300 mW/K**

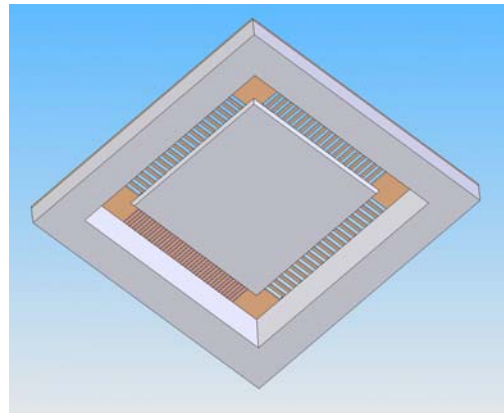
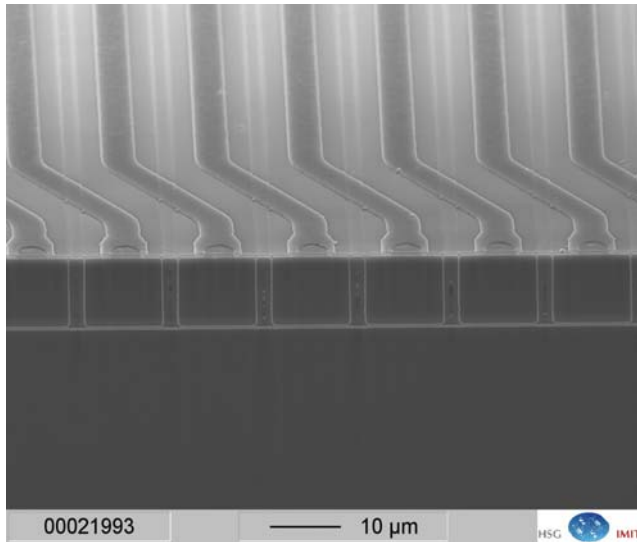
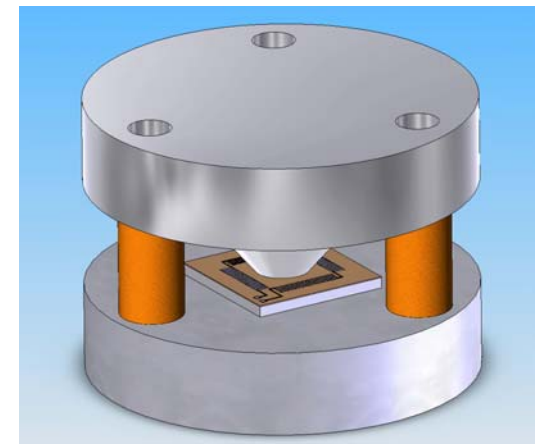
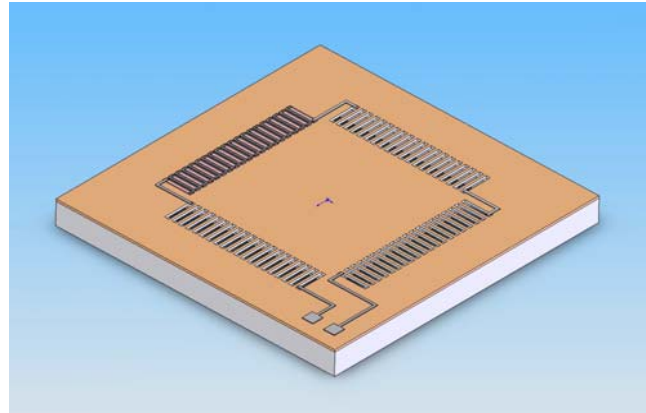
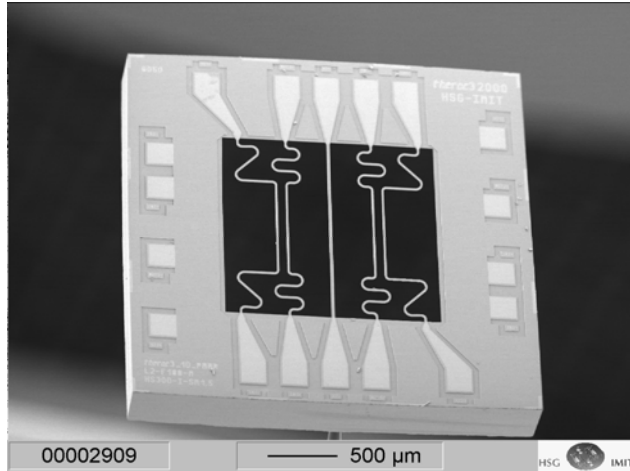




## Technologie

## Geometrie (Layout)

## AVT



# Ergebnisse

## TEG 1000

5 V 0,125W @ 20K 0,6 W Load

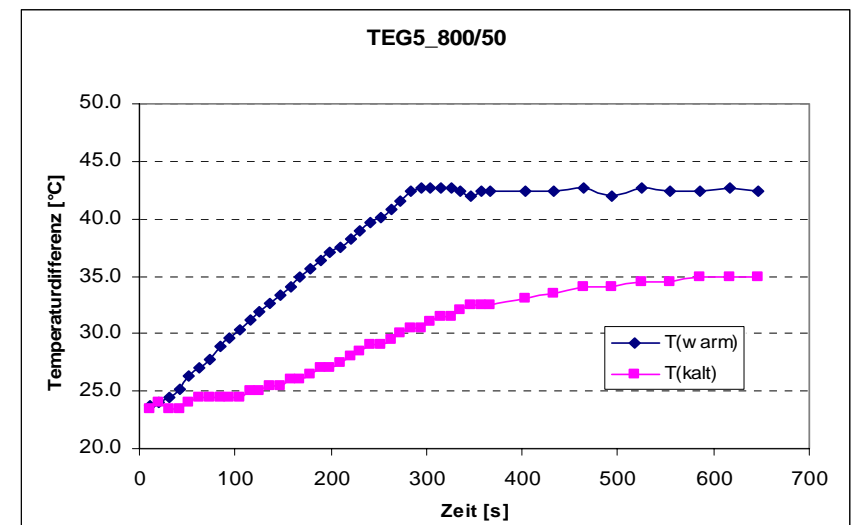
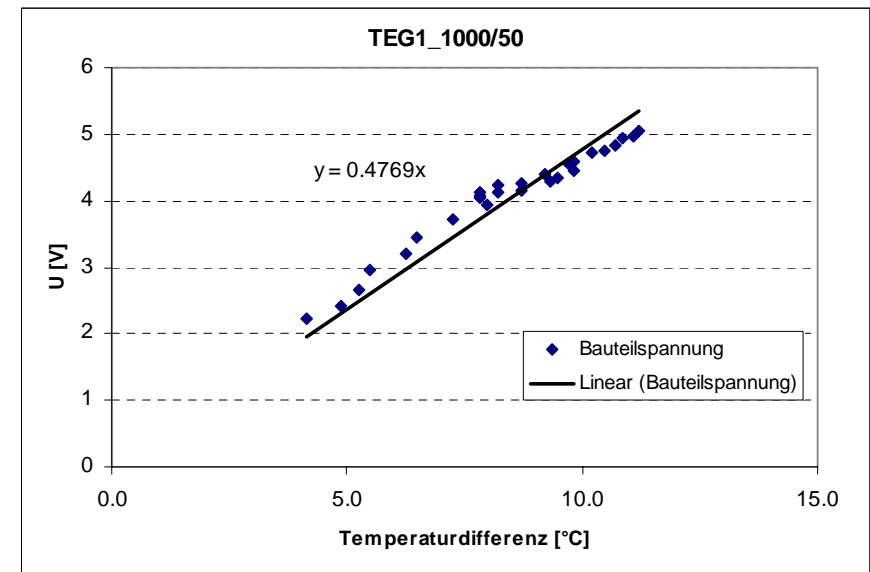
Standardsiliziumtechnologie

Chipkosten < 5€ @ 10 TStück/a

IMIT (umgerechnet) 0,25 mW

Micropelt 1,80 mW

1,9V @ 20K 1,2 W



Mechanische Energie

- piezoelektrische
- elektromagnetische
- kapazitive

Thermische Energie

- thermoelektrisch
- thermophotovoltaisch
- thermomechanisch

Strahlungsenergie

- photovoltaisch
- RF Empfang

Chemische Energie

- Brennstoffzelle

„Biologische“ Energie

- Bio-Brennstoffzelle

# Danke für Ihre Aufmerksamkeit



Dipl.-Ing. Matthias Ashauer

Hahn-Schickard-Gesellschaft, Institut für Mikro und Informationstechnik

matthias.ashauer@hsg-imit.de    Tel.: 07721 943 229    0174 3165264

---