

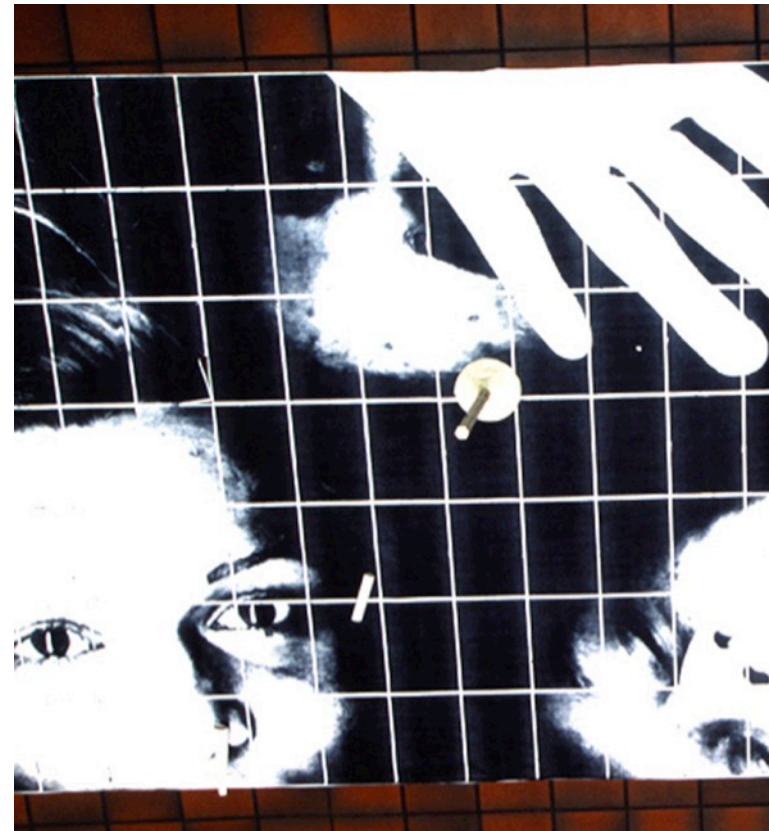
# Die Fachhochschule Düsseldorf

Dr. Dirk Ebling  
Forschung und Transfer



## Die Fachhochschule hat...

1. **Rund 9000 Studierende,**
2. **Rund 200 Professuren,**
3. **271 wissenschaftliche und nicht wissenschaftliche Mitarbeiter/innen,**
4. **2 Stiftungsprofessuren**
5. **118 Partnerhochschulen weltweit**
6. **intensive Kontakte**
  - zu Industrie und Wirtschaft
  - künstlerischen und sozialen
  - Einrichtungen
7. **> 5,5 Mio. EUR Drittmittel (2014)**



## Die Fachbereiche

Gestaltung



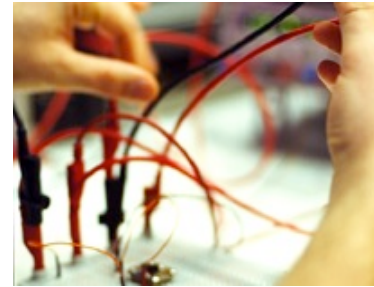
Architektur  
Design

Soziales



Sozial- und  
Kulturwissen-  
schaften

Technik



Elektrotechnik  
Maschinenbau  
Medien

Wirtschaft



Wirtschaft

Insgesamt 36 Studiengänge, davon 4 Dual

z.Z. über 30 laufende Promotionen

## Querschnittsthemen und Schwerpunkte

Gestaltung

Technik

Soziales

Wirtschaft



FB 1 Architektur



FB 2 Design



FB 3 Elektrotechnik



FB 4 Maschinenbau



FB 5 Medien



FB 6 Sozial- und  
Kulturwissenschaften



FB 7 Wirtschaft

Energie und Umwelt

Altersgerechtes Leben

3D-Gestaltung

Kommunikation & Medien

Schwingungstechnik

Automatisierung technischer Prozesse

soziale Teilhabe und politische Partizipation

# Strom aus Strahlungswärme: thermoelektrische Energiewandler in der Schmiedeindustrie



D. Ebling, A. Krumm, J. Bruchmann, M. Adam, J. Gottschald, B. Pfeifermann, C. Benim

University of applied Science Düsseldorf, Germany

R. Herbertz, R. Labs

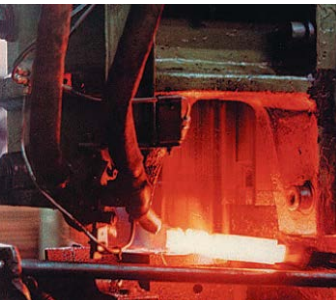
Fachhochschule Südwestfalen University of Applied Sciences ,  
Iserlohn, Germany

A. Stunz, M. Rösemann

SEISSENSCHMIDTAG Precision Components, Plettenberg,  
Germany



EUROPÄISCHE UNION  
Investition in unsere Zukunft  
Europäischer Fonds  
für regionale Entwicklung



## Wärmerückgewinnung in industriellen Prozessen





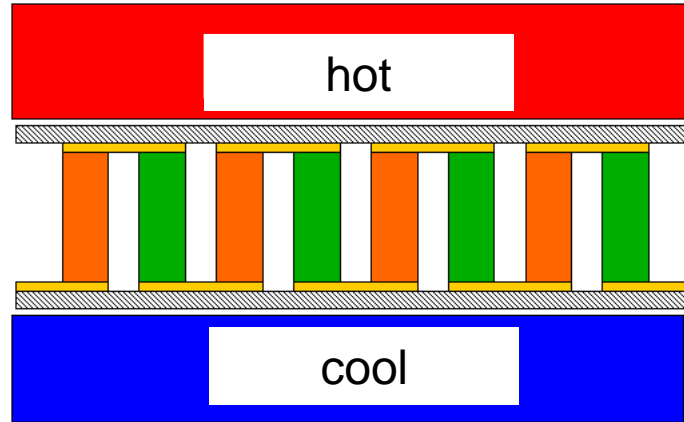
J. C. A. Peltier (1834)



Electrical current  $\Rightarrow$  cooling

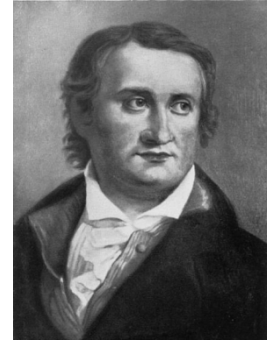
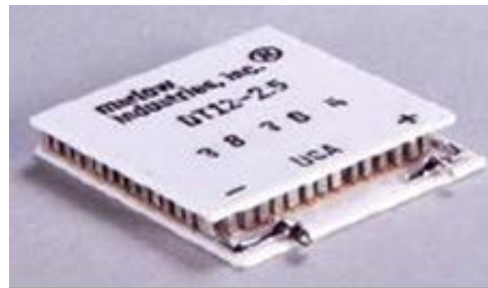


# Was sind Thermogeneratoren?

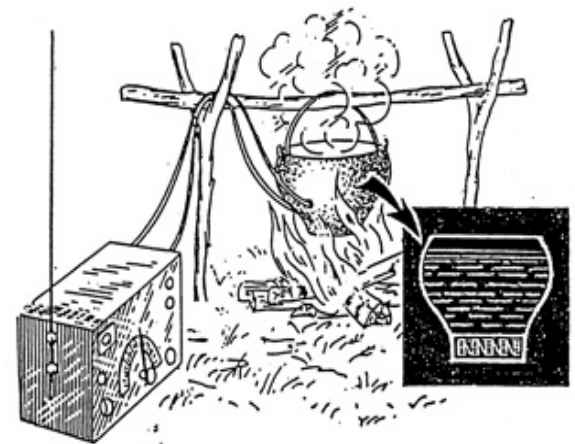


temperature gradient

$\Rightarrow$  generators



T. Seebeck (1821)



# Warum Thermogeneratoren?

## Wärmehaushalt im Auto

- 35% Abwärme Abgas
- 30% weitere Abwärme
- ~15 % für's „Fahren“

## Energieeinsparpotential

- 50 Mio Fahrzeuge (100kW Motor)
- 1 kW Rückgewinnung/Fahrzeug
- bei 200 h/a  $\Rightarrow$  10TWh/a
- Entspricht der Leistung eines Kernkraftwerkes



**Freedom CAR Programm USA**

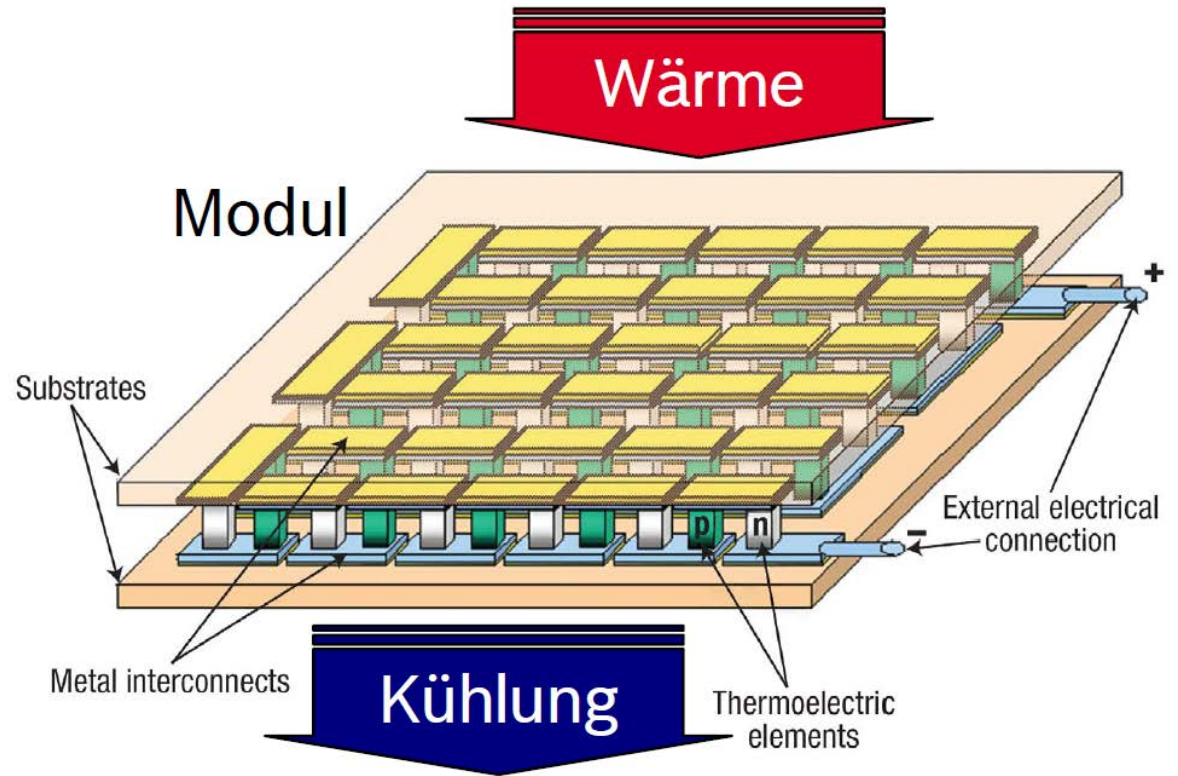
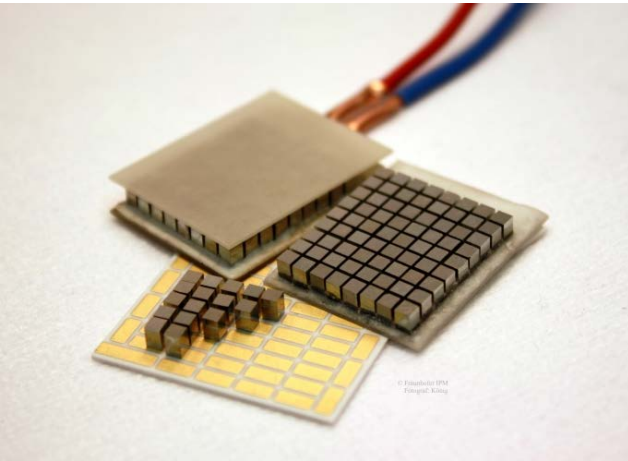


BMW 5-er Serie (190 KW)

2011: 750 Watt TE-Generator



## Grundlagen der Thermoelektrik



## Seebeck-Koeffizient

$S_n$  und  $S_p$

## Elektrische Leitfähigkeit

$\sigma_n$  und  $\sigma_p$

## Thermische Leitfähigkeit

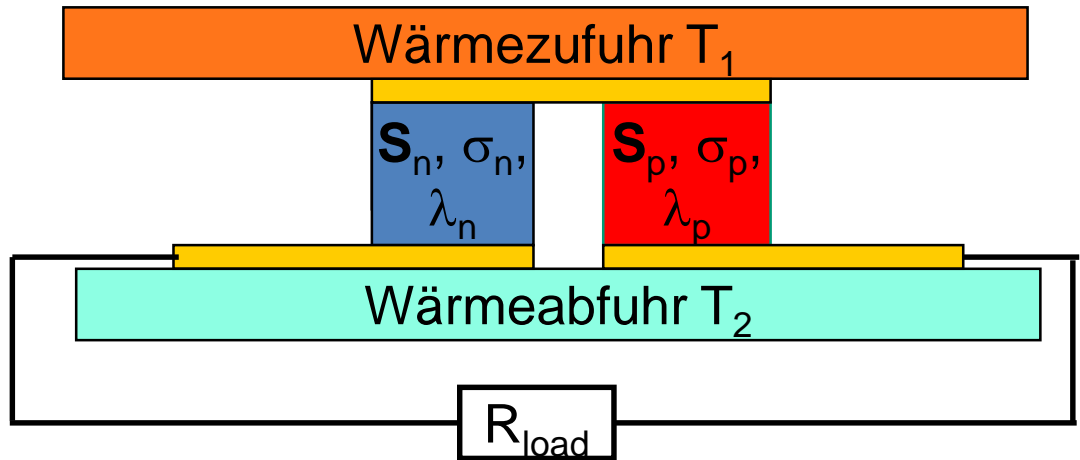
$\lambda_n$  und  $\lambda_p$

## Dimensionlose

## Figure of Merit ZT

$$ZT = \frac{S^2 \sigma}{\lambda} T$$

## Grundlagen der Thermoelektrik



Entwicklungsparameter:

- Materialeigenschaften TE-Material
- Entwicklung von Hochtemperaturkontakten (große T-Gradienten, Kontakt von Keramik, Metall und TE-Material)
- thermisch-elektrische Simulation von Wärmestrom, Potentialverlauf und Geometrie zur Optimierung unabdingbar



## Beispiel: Schmiede-Prozess



**Schmiedetemperatur von Stahl:**

**Bis zu 1200° C**

**Aufheizen von RT benötigt 500000 kJ/t**

**Oder etwa 0.5 MWh/t**

**20% wird in den ersten Minuten nach dem Prozess als Strahlung abgegeben!**



## Bedeutung für Europa

Deutschland 50% **2008 - Production per specialities**

2 10<sup>6</sup> MWh

EUROFORGE

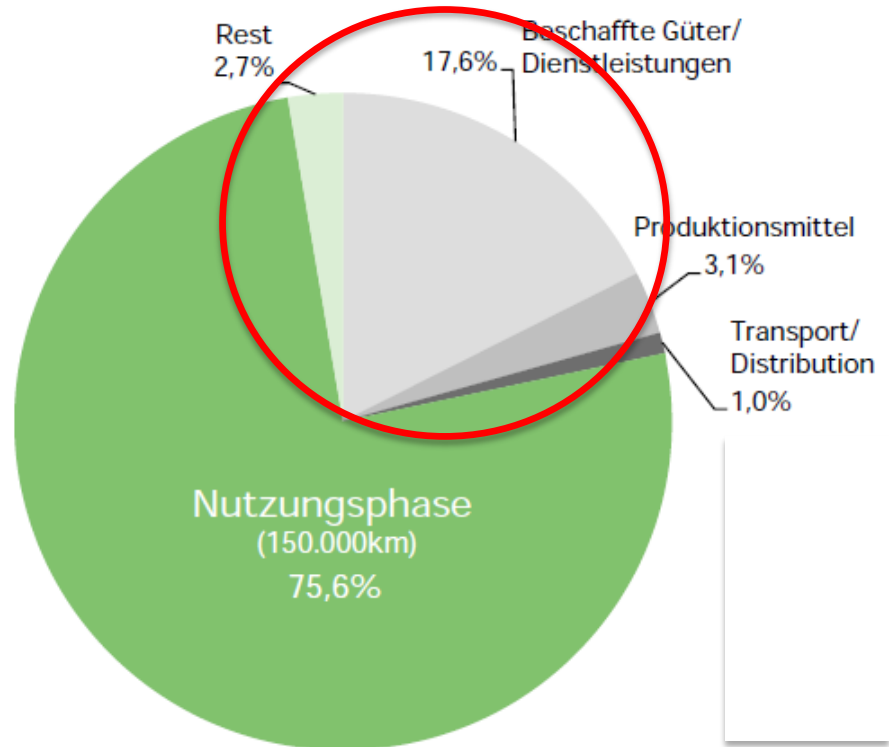
these global figures include members and non members producers, dates from National Associations

Total Production of Forgings (metric net tons x 1 000)	Germany	Italy	France	Spain	United Kingdom	Belgium	Sweden	Czech Republic	Poland	Slovenia	Finland	Turkey	EUROFORGE members
<b>1. Closed die forging, press and upset forging, TOTAL</b>	2.106	895	413	237	255	0	77	113	175	24	0	121	4.416
from it:													
- production of forging industry (subcontracting)	1.471	610	300	193	255		77	68	175	5		105	3.257
- inhouse production of the automotive industry	236	0	113					14		19			382
- inhouse production of the finished assembly subcontracting	180	125						7				14	306
- forged catalogue items (i.e. producers of flanges & fittings, piping, connectors, armatures, tools, machineries, etc...)	239	160		44				27				2	472
<b>2. Cold forging, TOTAL</b>	298	0	50	12	20	11	0	0	4	3	0	1	399
from it:													
- production of cold forging industry	208		50	12	20	11		0	4	3		1	309
- inhouse production of the final consumer industries	90							0					90
<b>3. Open die forging, TOTAL</b>	549	442	60	85	43	0	0	315	136	0	0	5	1.635
from it:													
- ring rolling	279	134		37	22			5	26				503
- other open die forging (excluding forged steel bar, blanks and railway rolling stocks)	270	308	60	48	21			310*	110			5	1.132
<b>4. Closed die forging of non ferrous metal, TOTAL</b>	53		20		7	2		9	5			2	98
<b>Total PRODUCTION of the year</b>	3.006	1.337	543	334	325	13	77	437	320	27	0	129	6.548
<b>nb of FORGE PLANTS (global) :</b>	250	119	76	34	55	8	6	29	30	4	10	20	641
<b>nb of employees (global) :</b>	31.400	11.500	10.264	3.580	5.500	650	850	6.035	4.600	800	240	2.300	77.719
established	July 08	July 08	July 08	July 08	July 08	July 08	July 08	July 08	Sep 08	Aug 08		Sep 08	

\*including  
100 tone drop forged railway products  
131 tone open die forged railway products

# Weitere Motivation: Footprint der Automobilindustrie














## CO<sub>2</sub> - Emissionen Konzern

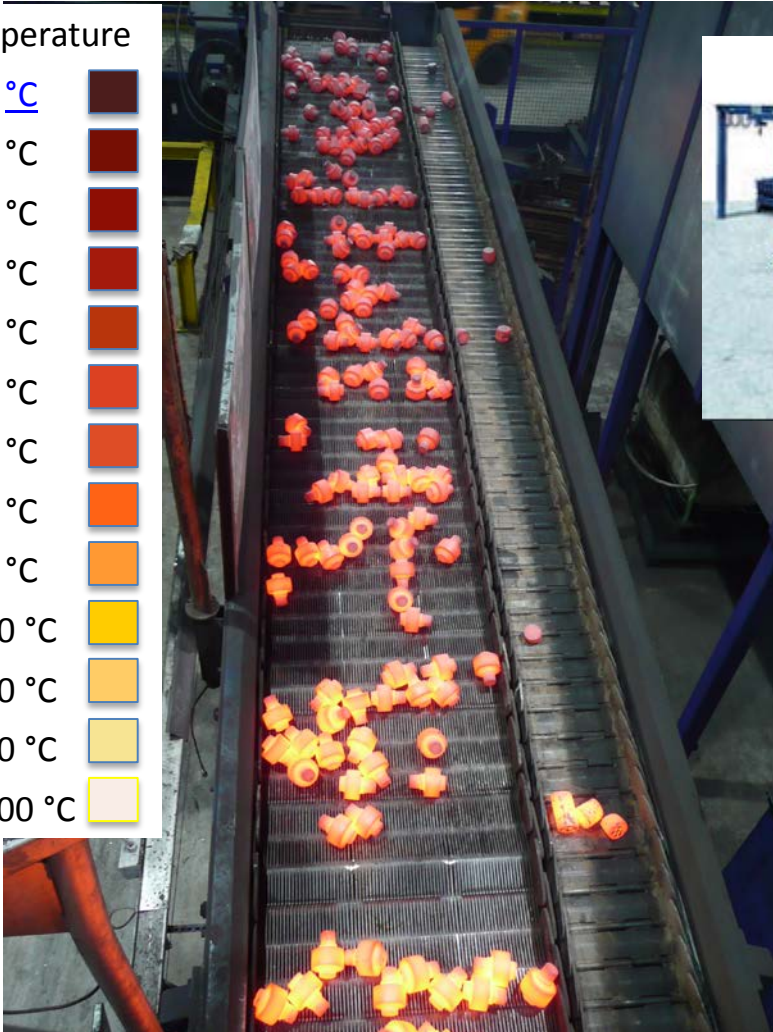


Thank you:  
J. Buric, Skoda

## Schmiede-Prozess

temperature

550 °C	
630 °C	
680 °C	
740 °C	
780 °C	
810 °C	
850 °C	
900 °C	
950 °C	
1000 °C	
1100 °C	
1200 °C	
>1300 °C	

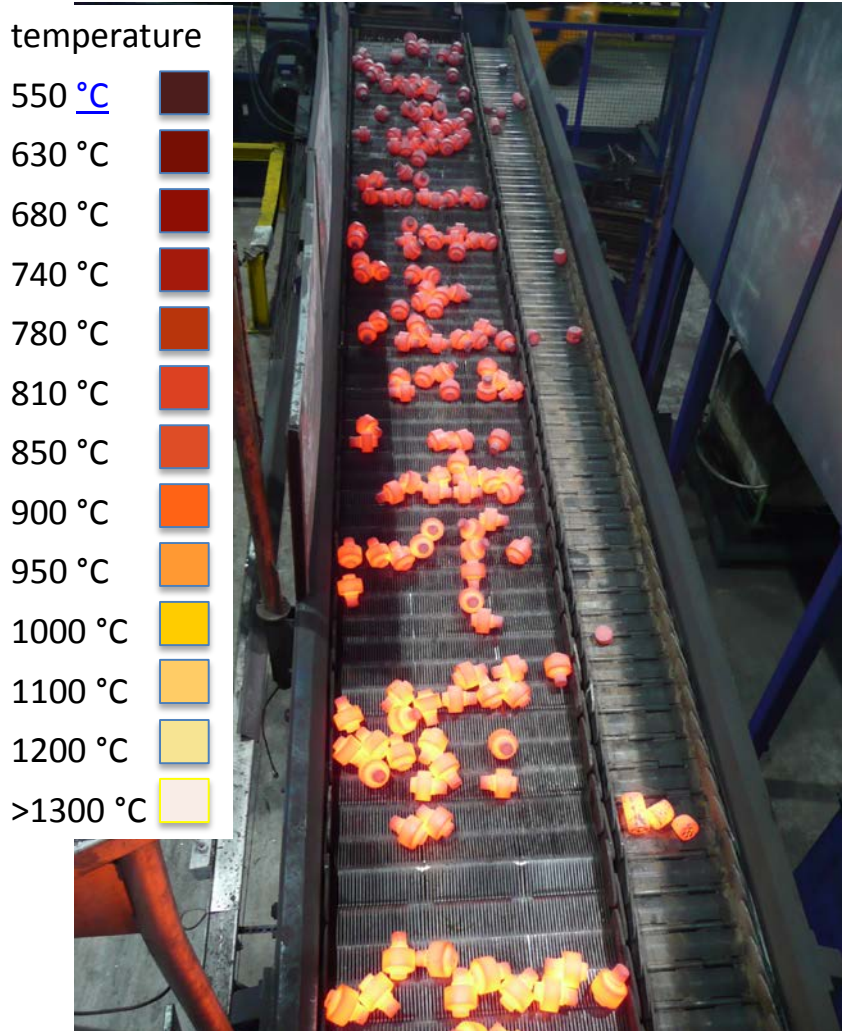


## Prozessdaten



- a) Materialzuführung und Magazin
- b) Induktivheizung
- c) Schmiedeeinheit
- d) Teileabführung und Abkühlstrecke

## Schmiede-Prozess



## Prozessdaten

- Ca. 200 Teile mit einem Gewicht 3kg gleichzeitig auf dem Band
- Abkühlung von 1200°C auf 800°C
- Wärmeverlust:

$$E_{\text{loss}} = C_{\text{steel}} * m * \Delta T$$

$$0,477\text{kJ}/(\text{kg K}) * 600\text{kg} * 400\text{K}$$

$$= 114480 \text{ kJ}$$

- 90% als Strahlungswärme
  - 5m<sup>2</sup> Fläche,
  - Abkühlzeit ca. 60s
- ergibt bis zu 400kW/m<sup>2</sup> Strahlungswärme



## Schmiede-Prozess

temperature

550 °C

630 °C

680 °C

740 °C

780 °C

810 °C

850 °C

900 °C

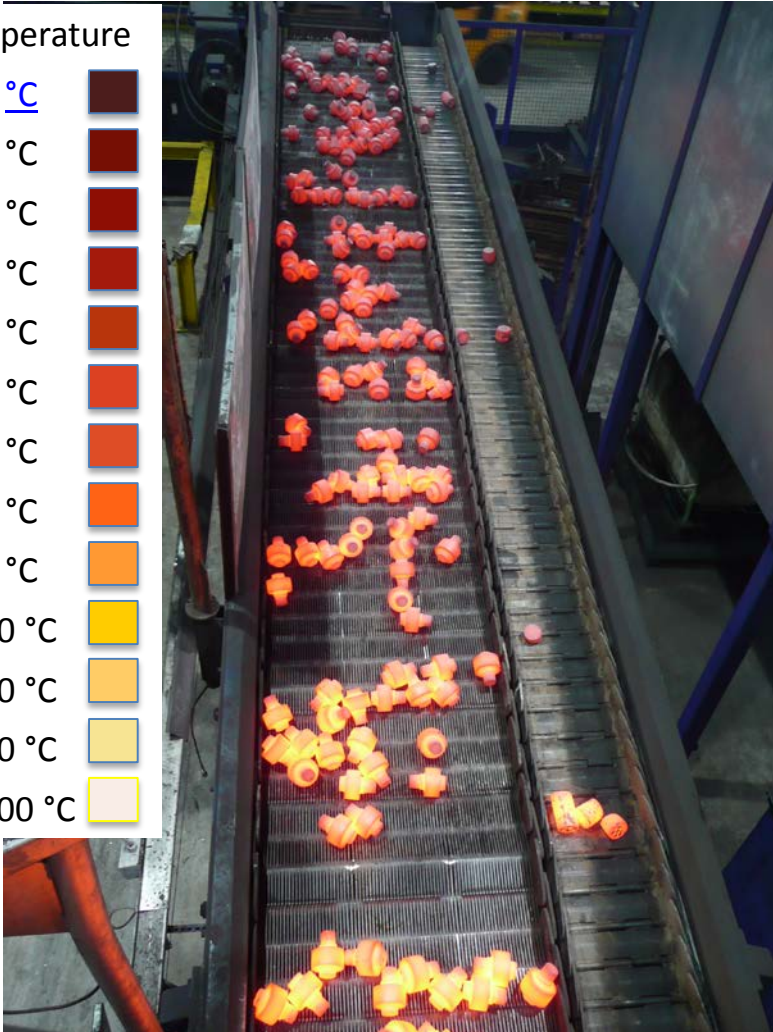
950 °C

1000 °C

1100 °C

1200 °C

>1300 °C
















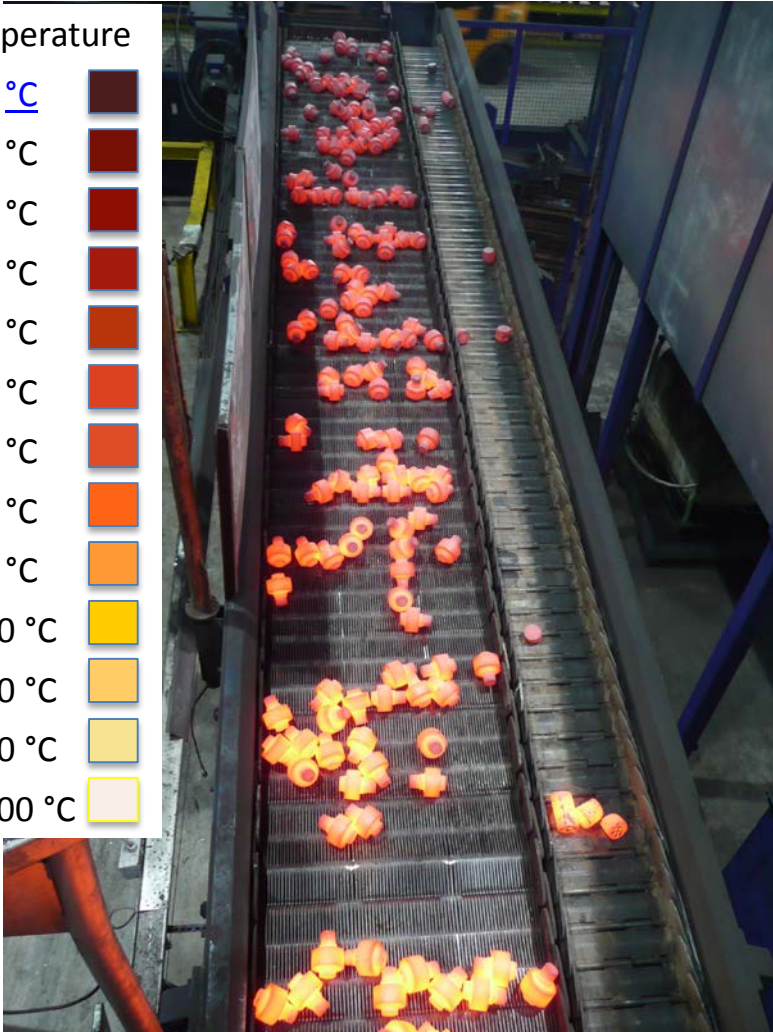
## Abdeckung zur thermischen Steuerung



## Schmiede-Prozess

temperature

550 °C	
630 °C	
680 °C	
740 °C	
780 °C	
810 °C	
850 °C	
900 °C	
950 °C	
1000 °C	
1100 °C	
1200 °C	
>1300 °C	

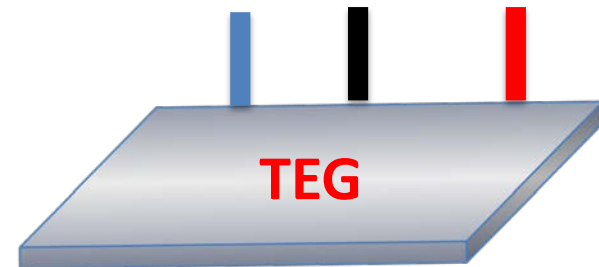


## Abdeckung zur thermischen Steuerung

TEG: einfaches Ersetzen der Abdeckung?

Fläche: 1 m<sup>2</sup>

Verbindungen: Kühlwasser  
Stromkabel



## Erwartete Temperaturen

Artikel 33-307



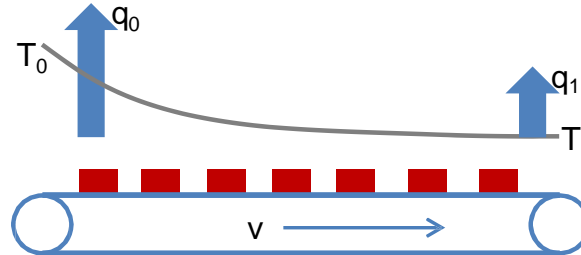
Artikel 33-932



Artikel 33-505



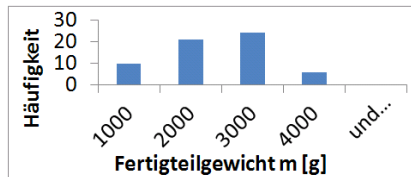
# Gemessene Wärmemengen: 20 – 60 kW/m<sup>2</sup>



61 Artikel (55 Artikel ohne BY)

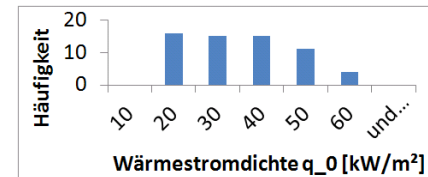
$$m_1 < m_n$$

578.....3895g



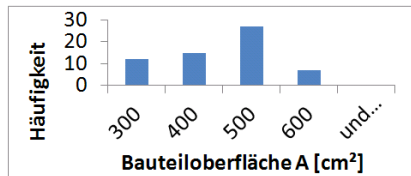
$$q_{01}^* < q_{0n}^*$$

11.....58 kW/m<sup>2</sup>  
 (berechnet\*\*)



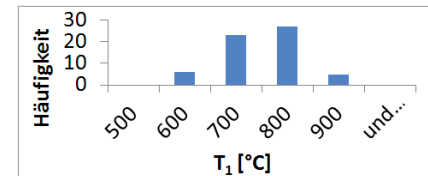
$$A_1 < A_n$$

251.....515 cm<sup>2</sup>



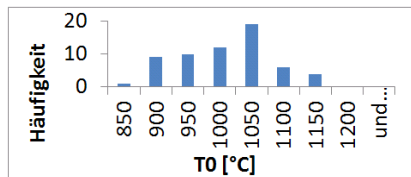
$$T_{11} < T_{1n}$$

545.....859 °C  
 (berechnet)



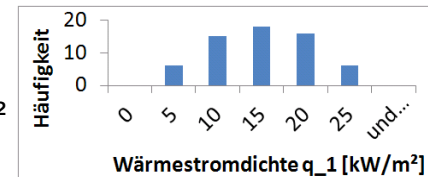
$$T_{01} < T_{0n}$$

846.....1124 °C  
 (berechnet)



$$q_{11}^* < q_{1n}^*$$

4.....24 kW/m<sup>2</sup>  
 (berechnet\*\*)



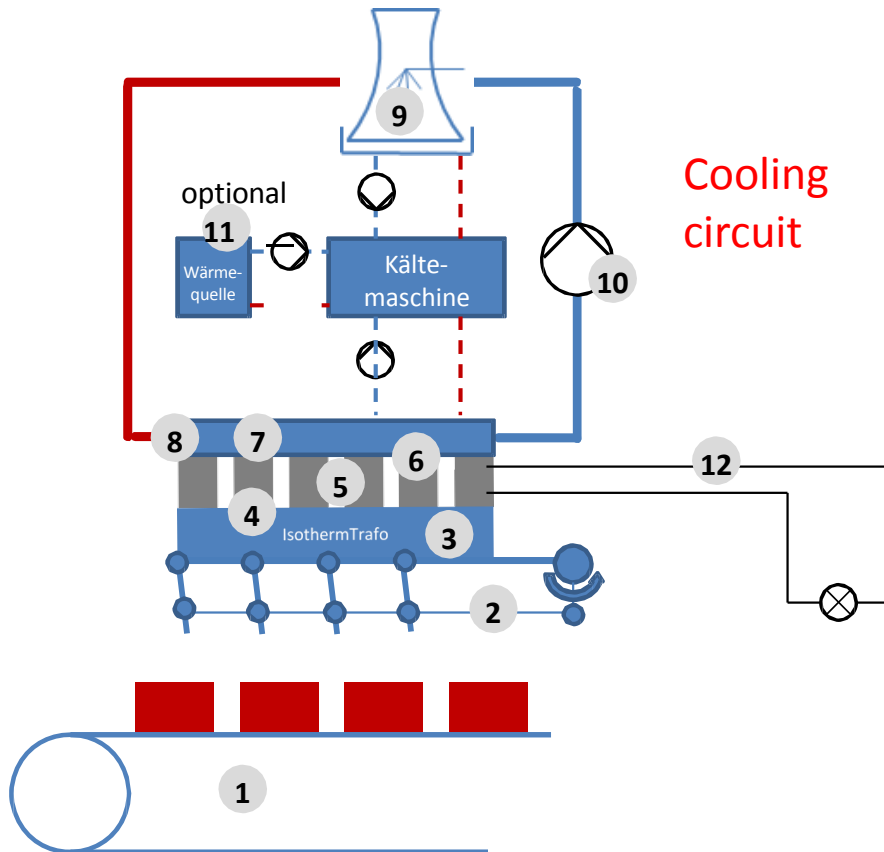
$$v_1 > v_n$$

3,8.....1,2 m/min

$v$  = variabel bei BY-Teilen;  
 sonst immer 3,8 m/min (kann  
 bei Bedarf aber geändert  
 werden)

\* bezogen auf die Fläche des Transportbandes  
 \*\* 50% der gesamten abgegebenen Energie

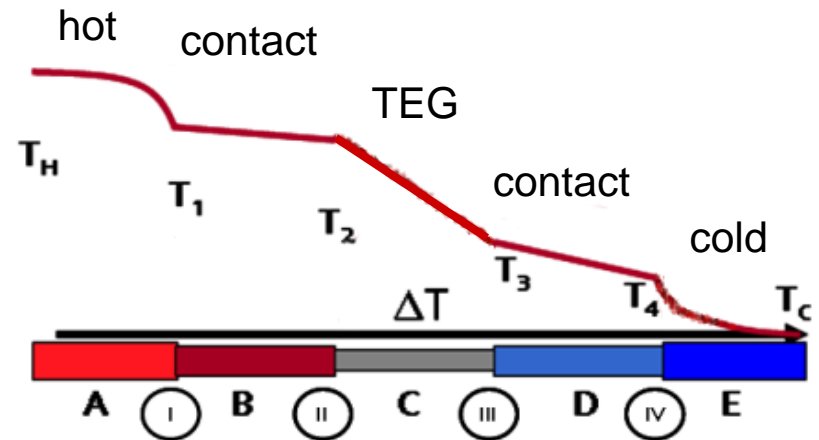
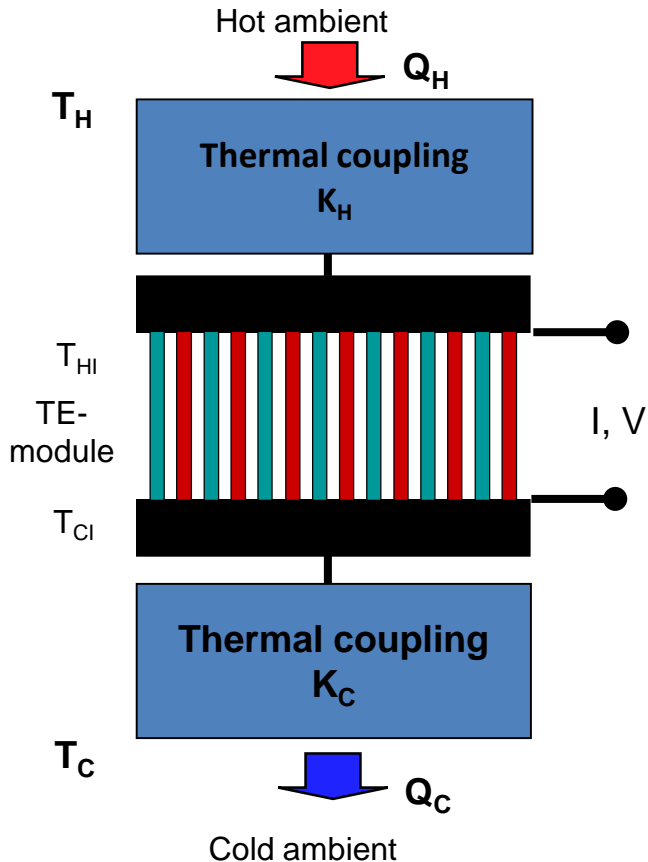
# Gemessene Wärmemengen: 20 – 60 kW/m<sup>2</sup>



- (1) Transportband
- (2) Abschattung Isothermtransformator
- (3) Isothermtransformator
- (4) Schnittstelle Isothermtransformator – TEG
- (5) TEG
- (6) Schnittstelle TEG – Kühlkörper
- (7) Kühlkörper
- (8) Schnittstelle Kühlkörper – Kühlkreislauf
- (9) Kühlturm
- (10) Pumpe Kühlung
- (11) optionaler Kühlkreislauf (Kältemaschine)
- (12) Stromkreis

powerline

## Einbindung TEG



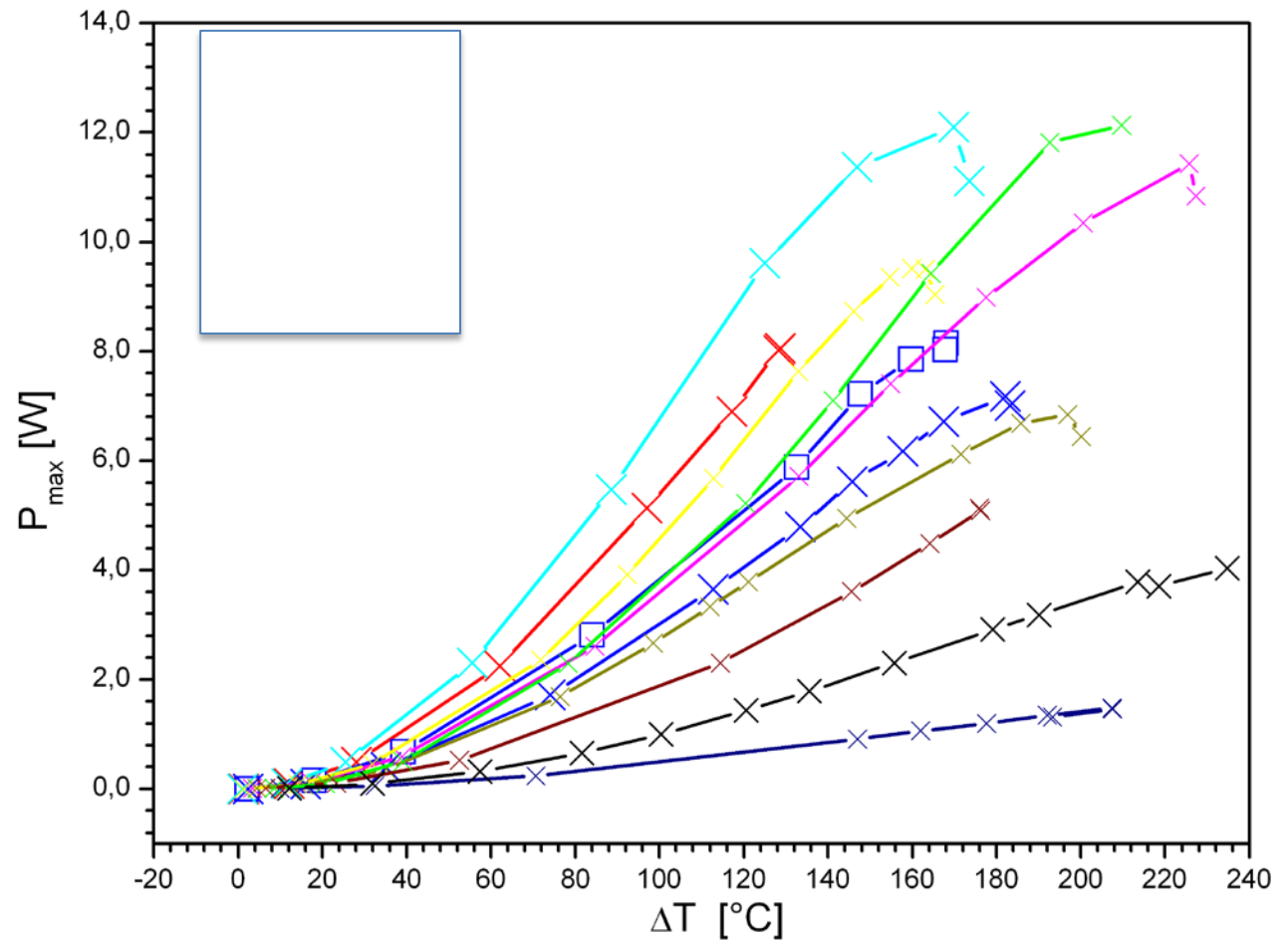
Heiß-Seiten Temperatur  $< 300^\circ\text{C}$

Kaltseite stark von der Kühlung abhängig

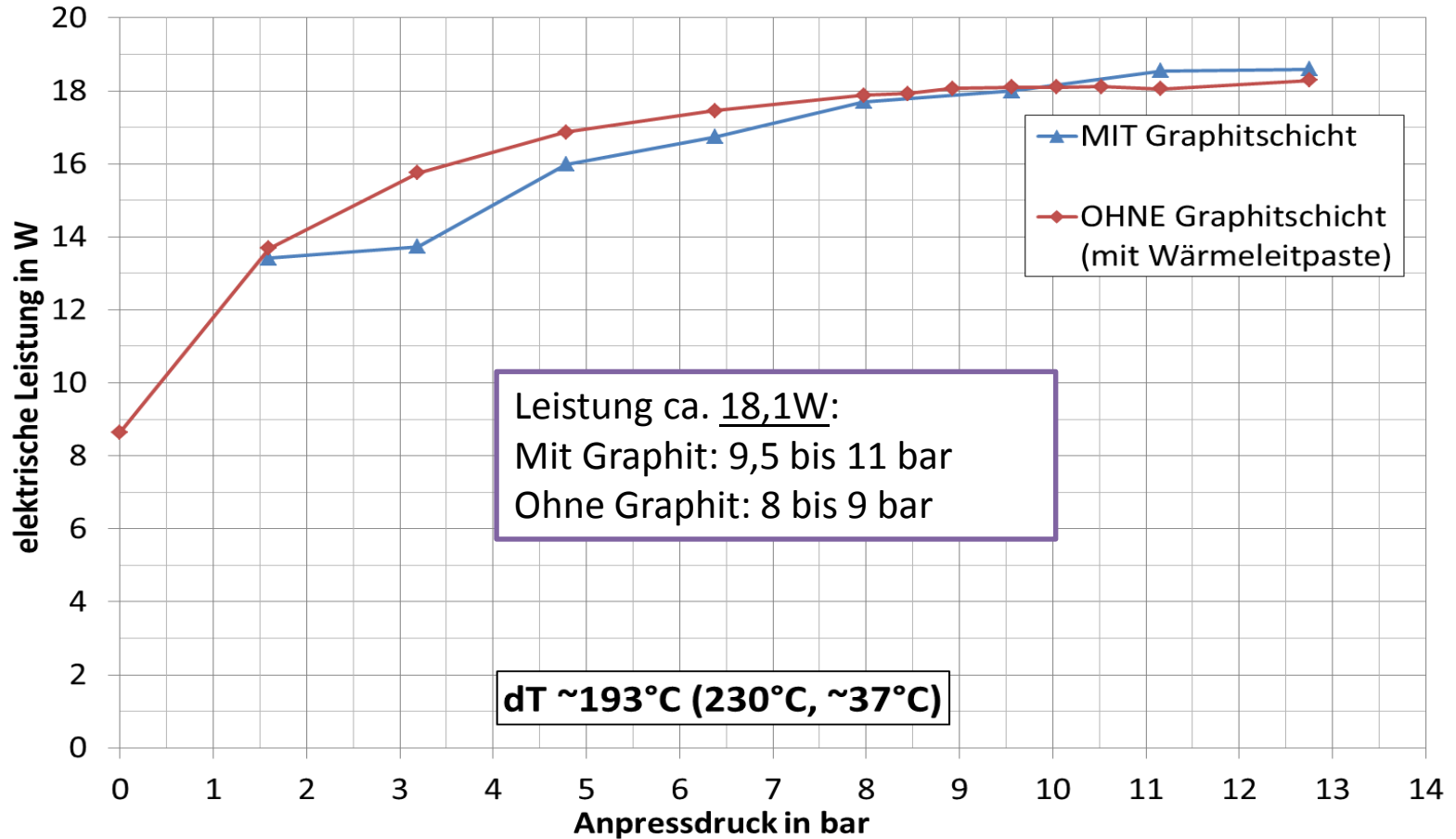
kommerzielle TEG  $\rightarrow T_{\max} = 200 - 250^\circ\text{C}$

## power of commercial TEG (16 – 25 cm<sup>2</sup>)

→ ca. 100 TEGs

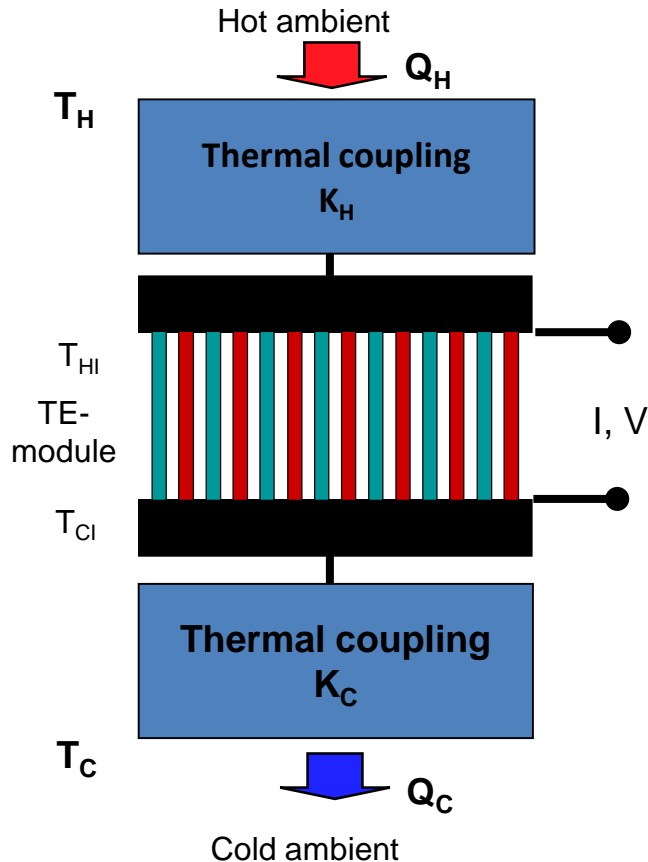


## Druckabhängigkeit der Leistung P





# Wärmeabsorption TEG – Heißseite

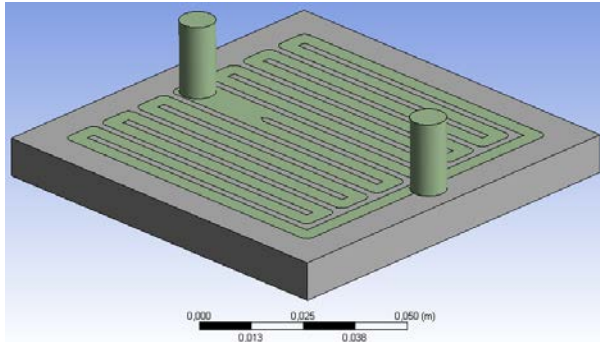


Strahlungsabsorption durch beschichtete Cu-Absorber:

Absorption >90%, Emissivity <10%

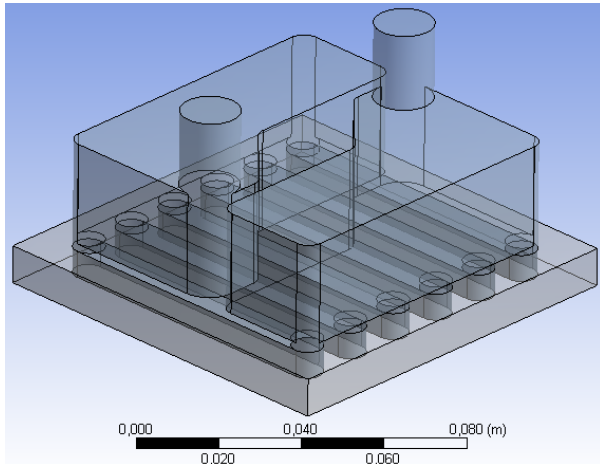
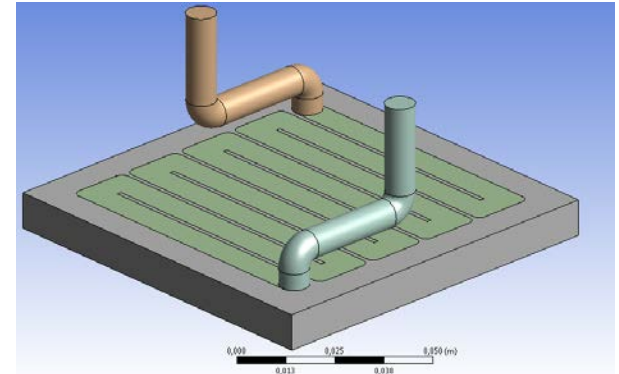
→ Wird durch selektive Beschichtung erreicht

# Simulation TEG-Kühlung



- Doppelmäander

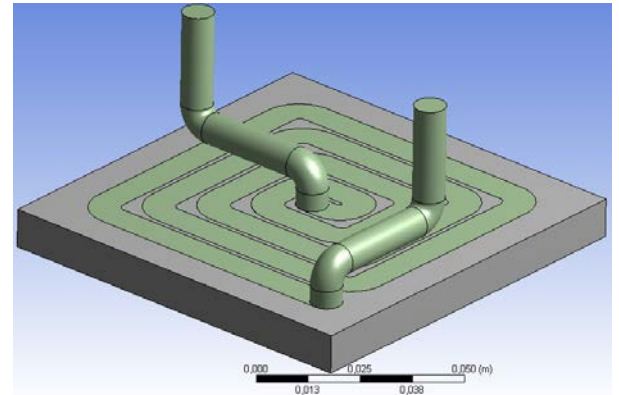
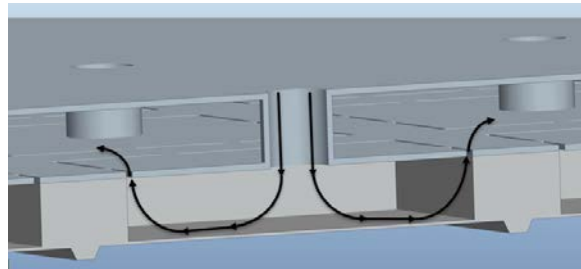
- Mäander



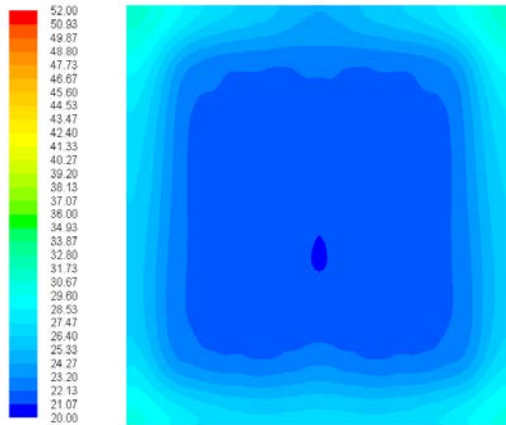
- Harfe

- Schnecke

- Prallströmung

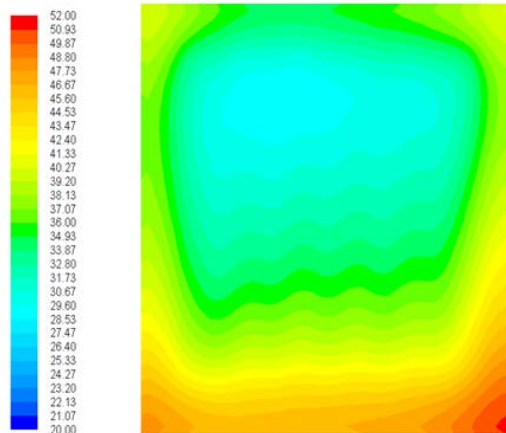
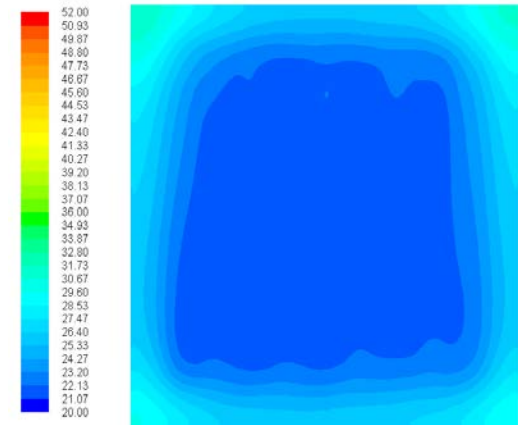


### Temperaturverteilung in °C auf der Kühler Unterseite



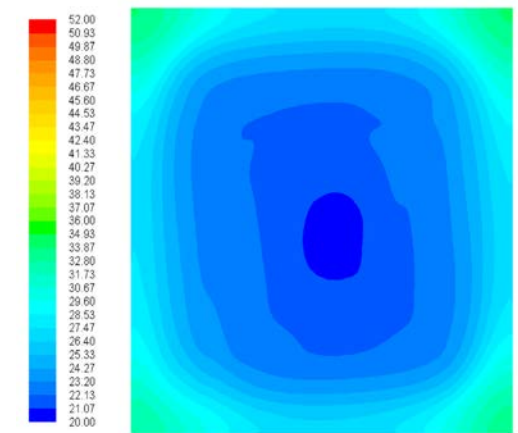
- Doppelmäander

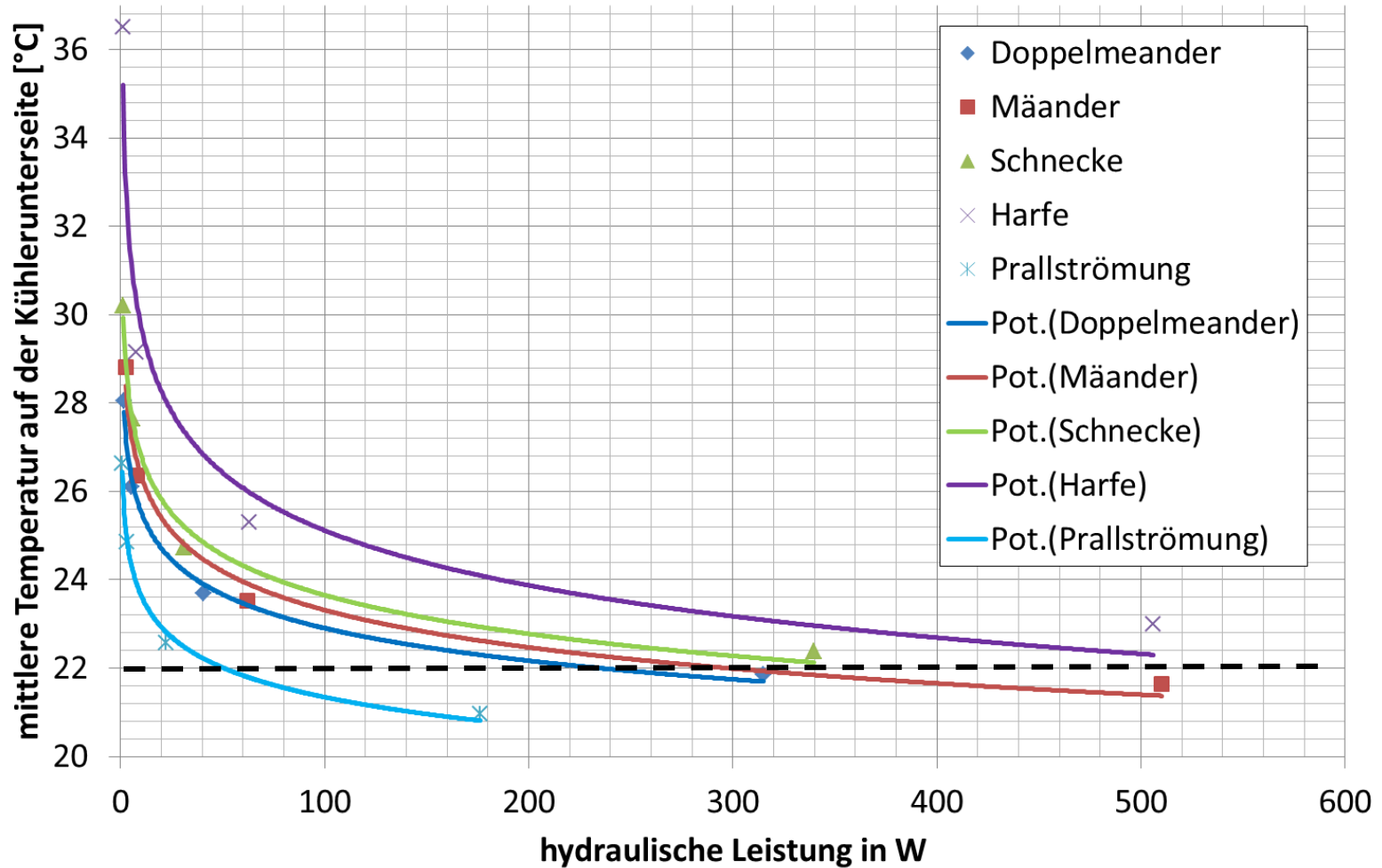
- Mäander



- Harfe

- Schnecke





# Auslegung und Bestückung des Energiewandlers

## 1. Anzahl an TEG abhängig...

- vom zur Verfügung stehendem Wärmestrom (Schmiedeteil)
- vom gewünschten Arbeitspunkt des TEG (Temperaturen, Spannung...)
- von der zur Verfügung stehenden Fläche
- von Verkabelung und Isolierung zwischen den TEG

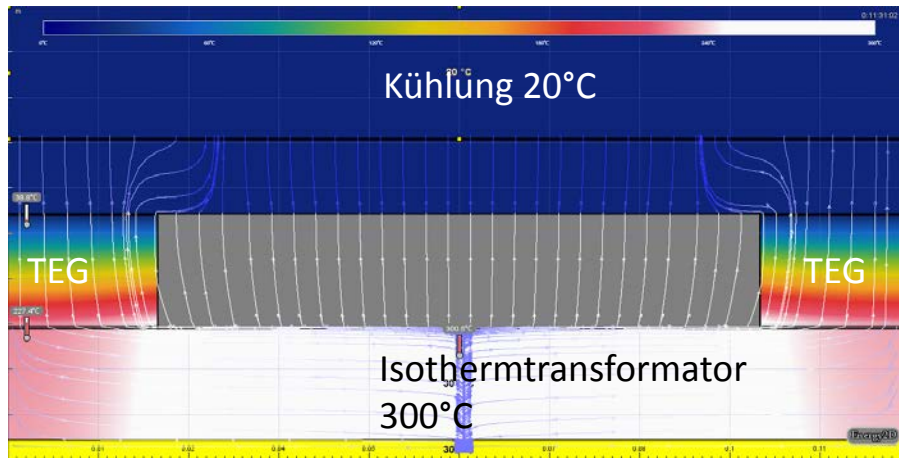


**Viele Faktoren beeinflussen die optimale Anzahl an TEG!**

# Ankopplung und Entwicklung eines Kühlers zur Wärmeableitung an den TEG

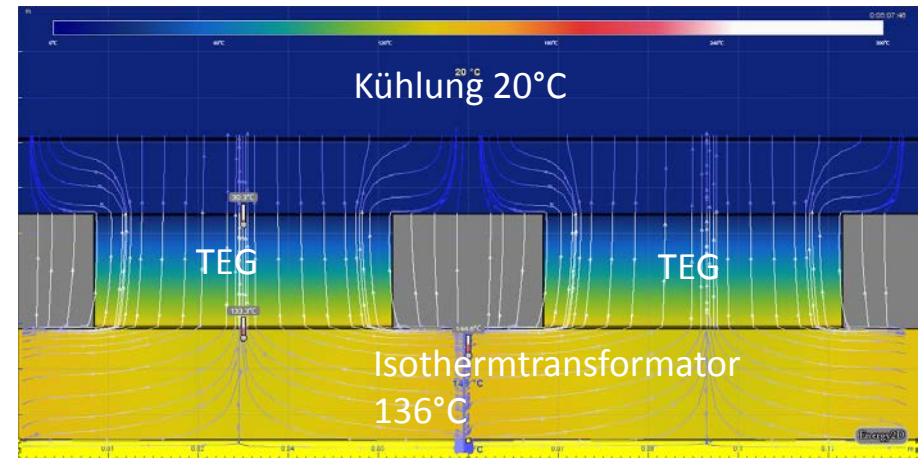
## Auslegung und Bestückung des Energiewandlers Annahme: konstanter Wärmestrom durch das System

Geringe TEG-Anzahl



→ hoher Wärmestrom pro TEG

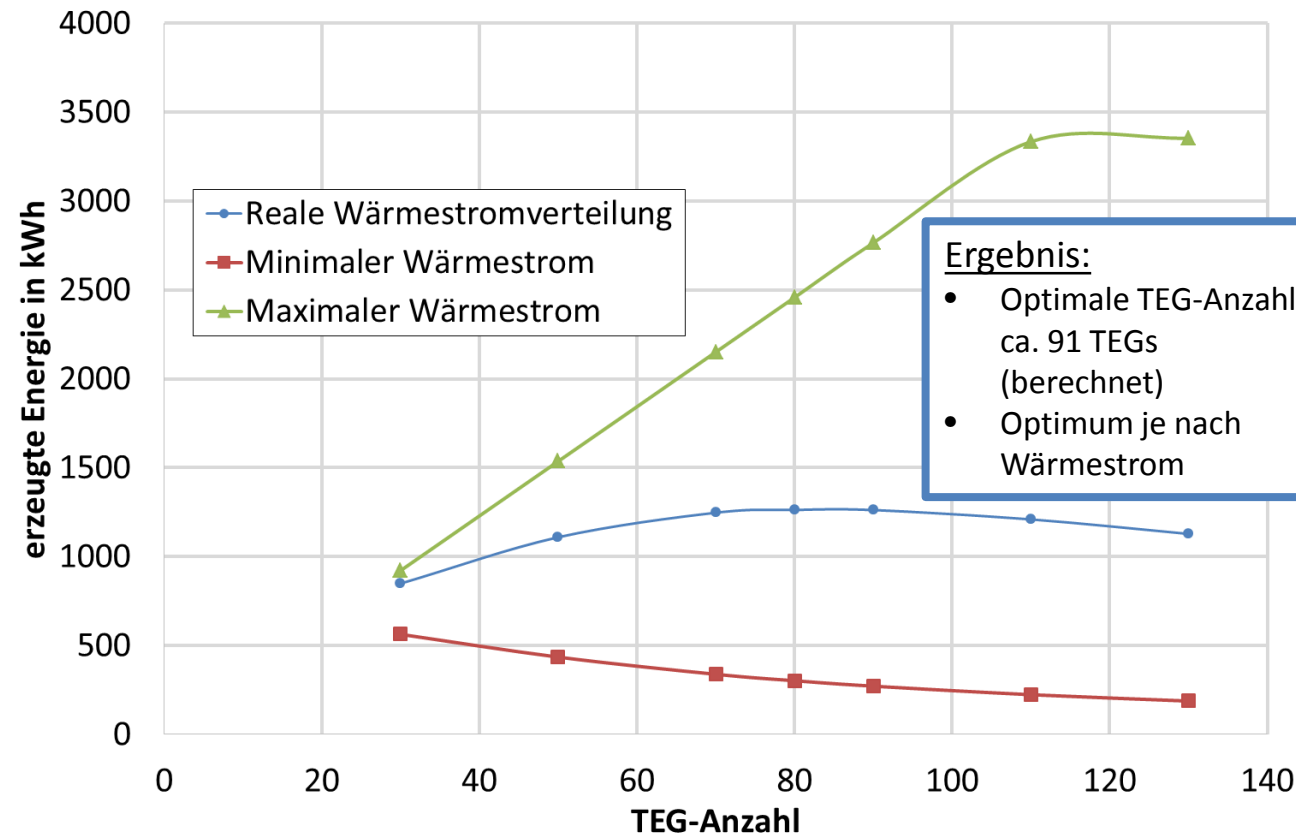
Hohe TEG-Anzahl



→ Kleinere Temperaturdifferenz und geringerer Wärmestrom pro TEG

# Ankopplung und Entwicklung eines Kühlers zur Wärmeableitung an den TEG

## Optimale TEG-Anzahl in Abhängigkeit der zu erwartenden Wärmeströme (theoretische Berechnung)



**Ergebnis:**

- Optimale TEG-Anzahl: ca. 91 TEGs (berechnet)
- Optimum je nach Wärmestrom

### Basis der Berechnungen:

- Messungen zu Wärmeströmen der Hartebur 8 (AMP70)
- Produktionszeiten der verschiedenen Artikel
- Ideale Wärmeverteilung und Wärmeübertragung des Isothermtransformators
- Messungen zu charakteristischen Kenngrößen des TEG ( $\eta_{TEG_{i,j}}, \Delta T, \dot{Q}, P$ )

**Umsetzung:**

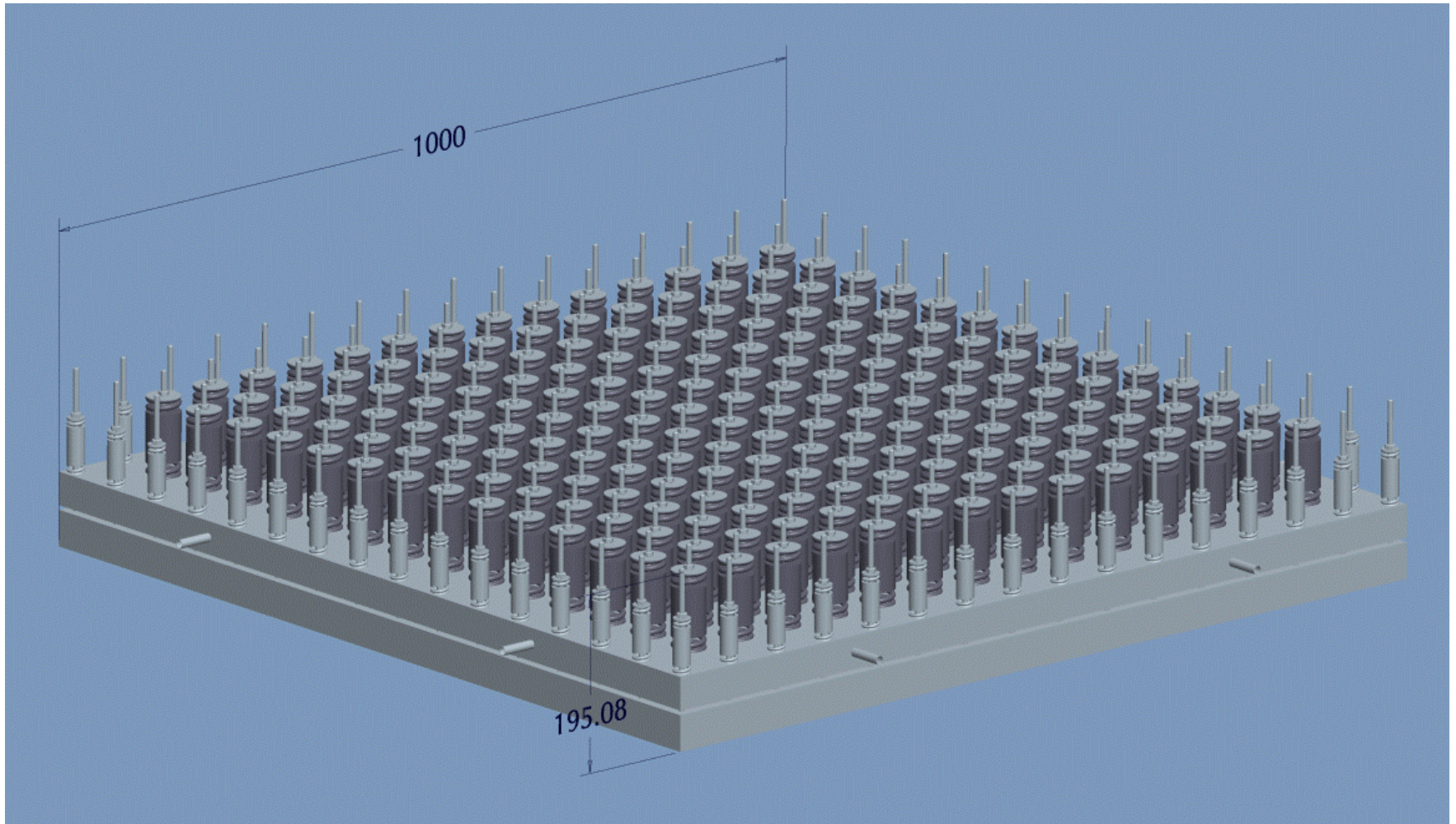
- **Gewünschte Anzahl: 100 TEG**
- **Gründe: Test unterschiedlicher TEG-Verteilungen sowie Schaltungsvarianten**

## Auslegung und Bestückung des Energiewandlers für 1m<sup>2</sup>

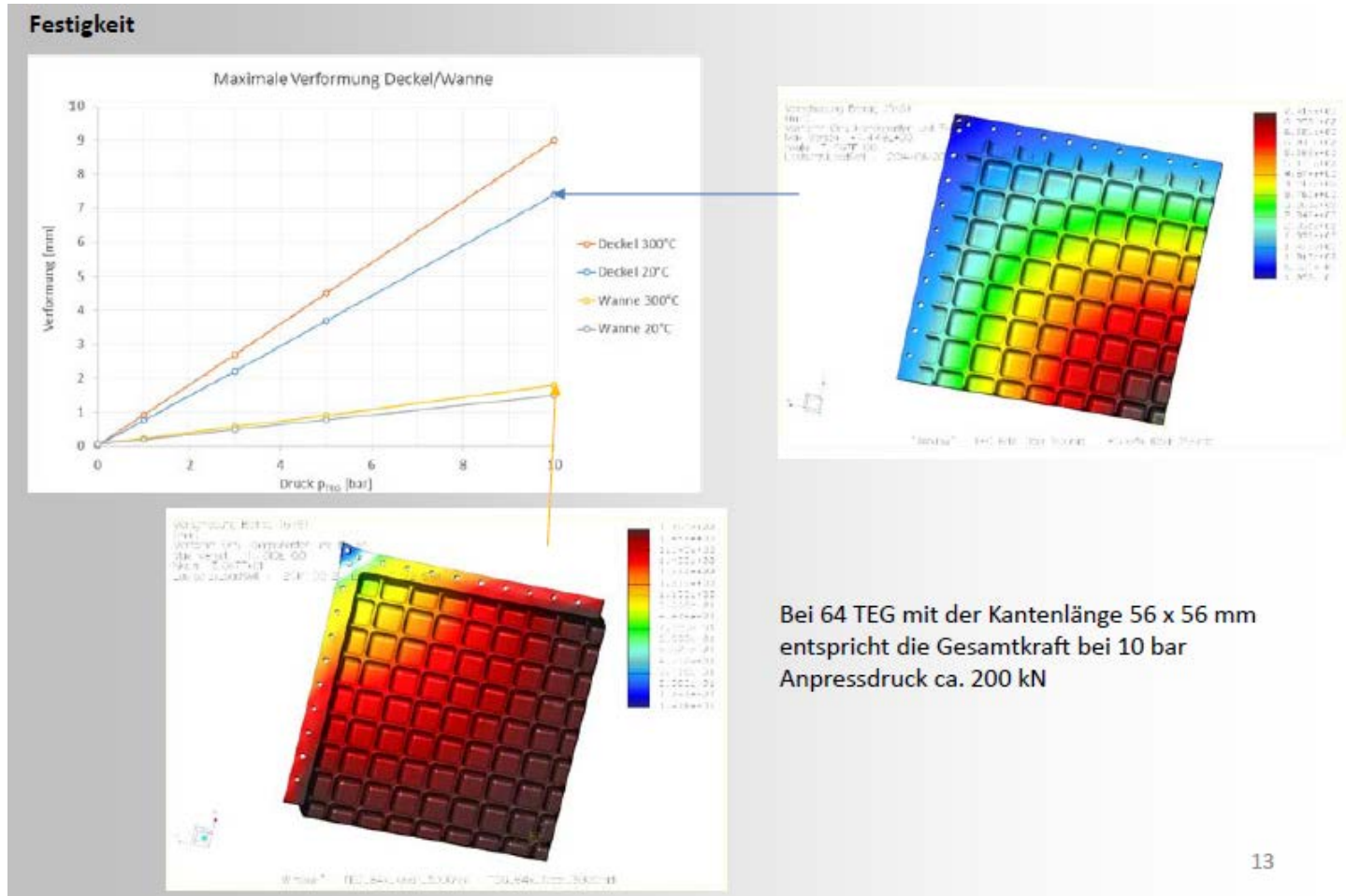
TEG	Anzahl an TEG bei Auslegung auf:		Leistung des Demonstrators bei:		TEG Kosten ca.	
	58 kW/m <sup>2</sup>	11 kW/m <sup>2</sup>	58 kW/m <sup>2</sup>	11 kW/m <sup>2</sup>	max.	min.
<b>1</b>	96	18	1,694 kW	0,318 kW	5606 €	1051 €
<b>2</b>	225	44	2,036 kW	0,398 kW	8167 €	1597 €
<b>3</b>	324	56	2,056 kW	0,355 kW	20288 €	3506 €
<b>4</b>	98	18	1,605 kW	0,298 kW	5952 €	1092 €
<b>5</b>	96	18	1,451 kW	0,272 kW	5867 €	1100 €
<b>6</b>	200	38	1,4 kW	0,266 kW	100000 €	19000 €
<b>6a</b>	<b>200</b>	<b>38</b>	<b>1,4 kW</b>	<b>0,266 kW</b>	<b>4000 € ?</b>	<b>760 € ?</b>



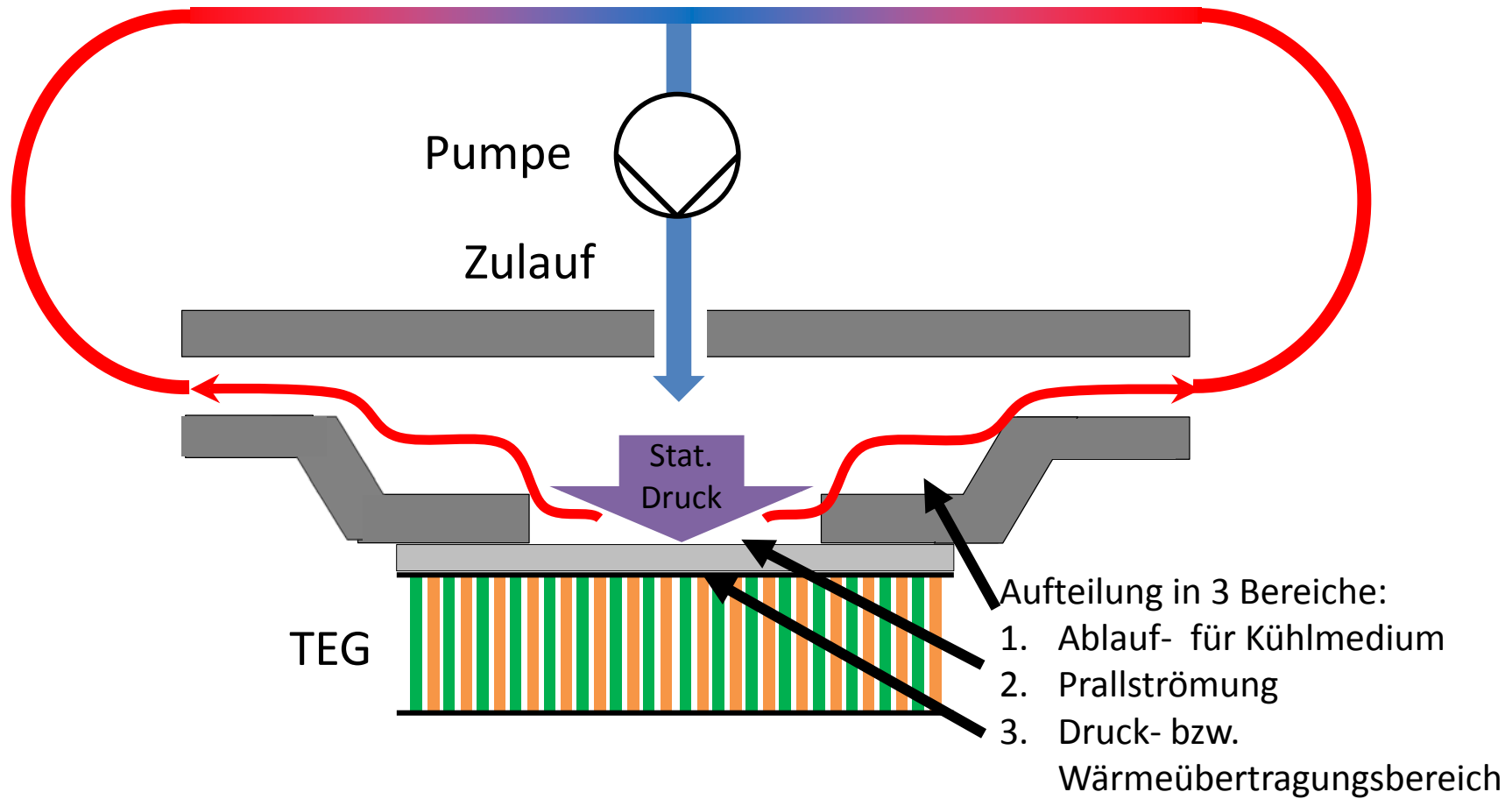
# Konstruktive Überlegungen - Höhenverstellbar



## Stability

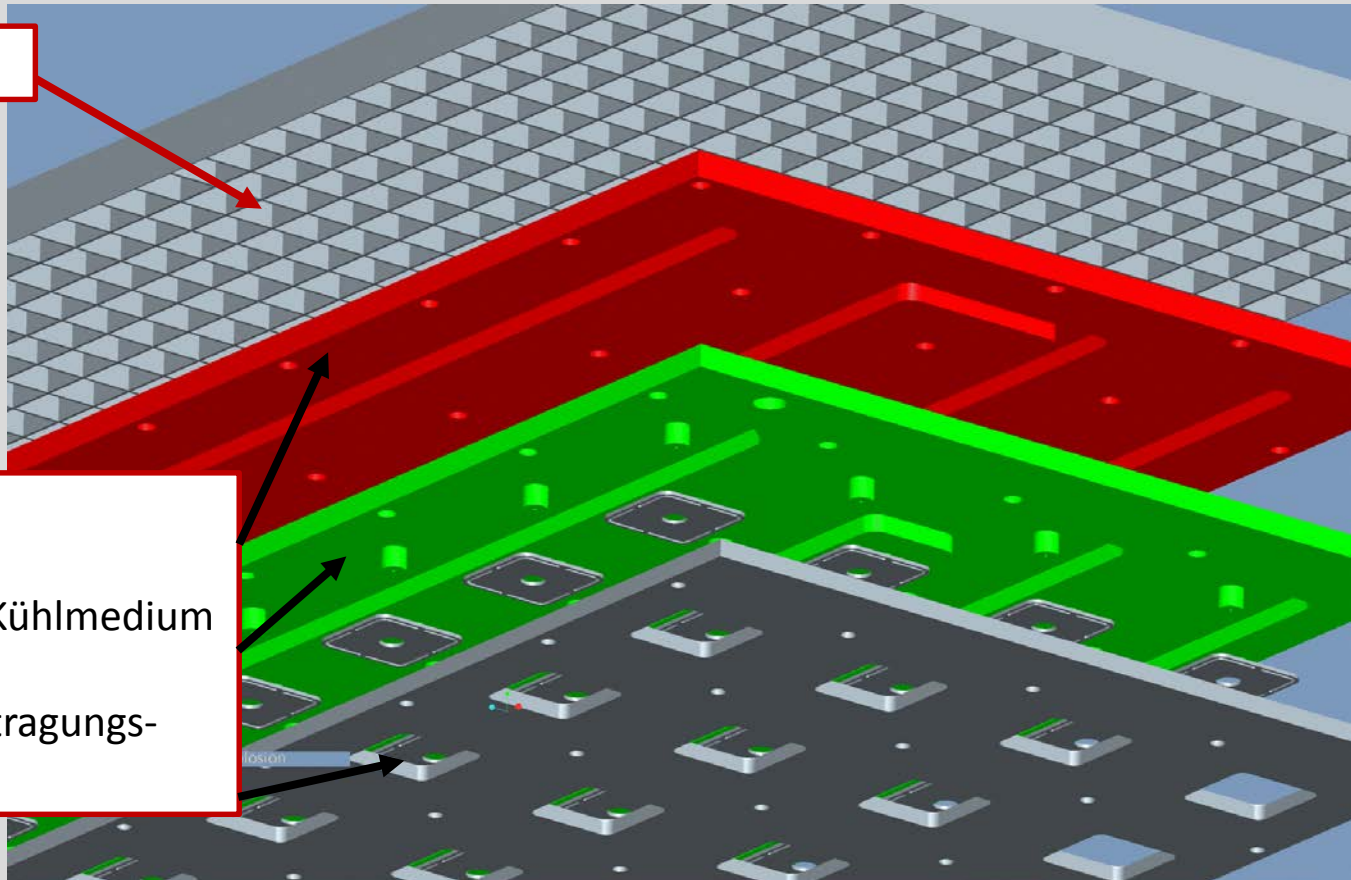


## Grundlegender Aufbau



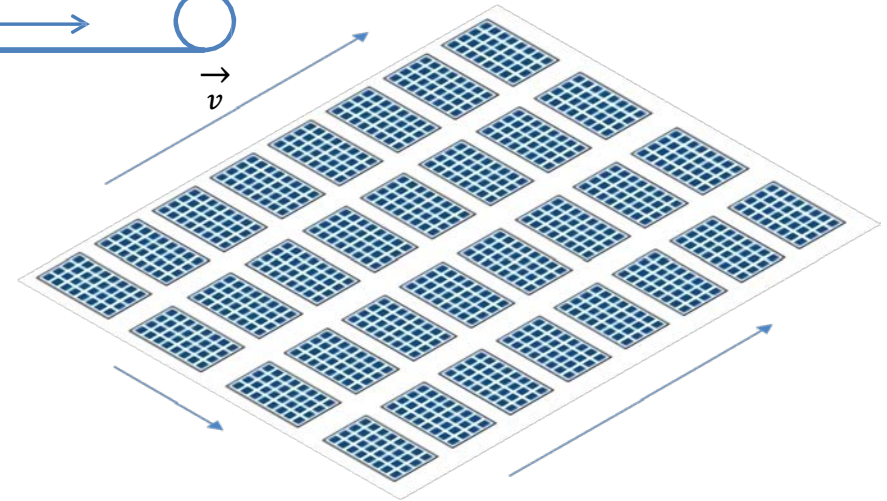
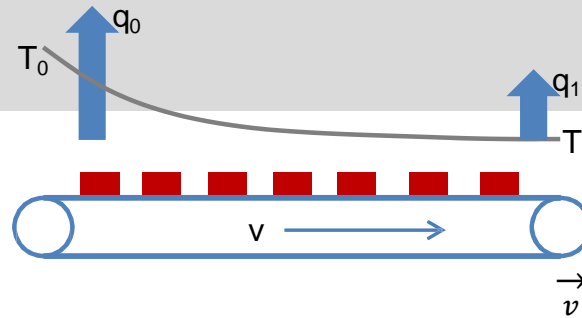
## Kühlsystem - priorisierte Variante

Schwerlastgitter



Die 3 Bereiche:

1. Zulauf-,
2. Ablauf- für Kühlmedium
3. Druck- bzw. Wärmeübertragungs-  
bereich



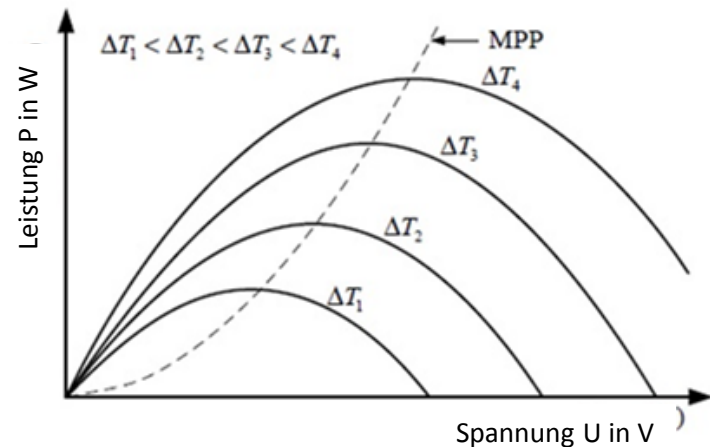
$$\eta_{\text{Wandler},i} = f(\eta_{\text{TEG},i}, \Delta T, \dot{Q}, \dots)$$

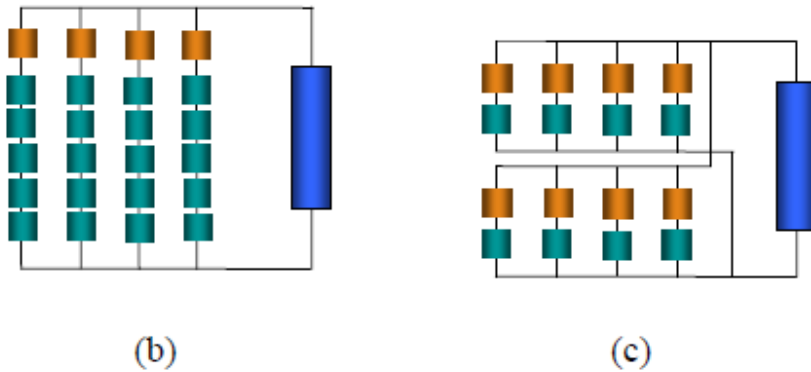
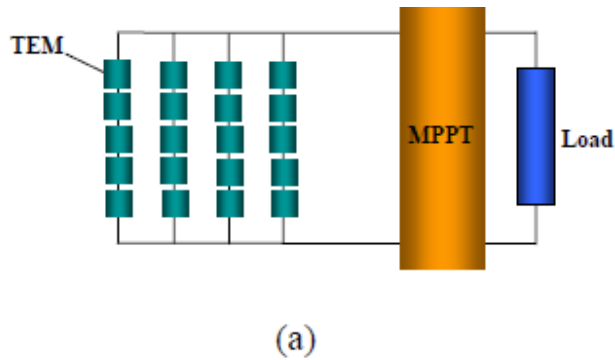
## Betriebszustand:

1.  $\eta_{\text{TEG}1}$  ungleich  $\eta_{\text{TEG}2}$
2.  $\eta_{\text{Wandler},i} = ?$

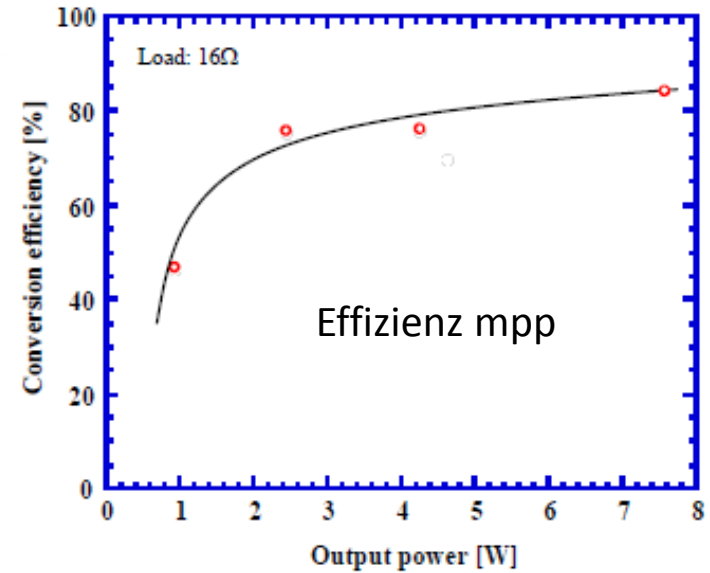
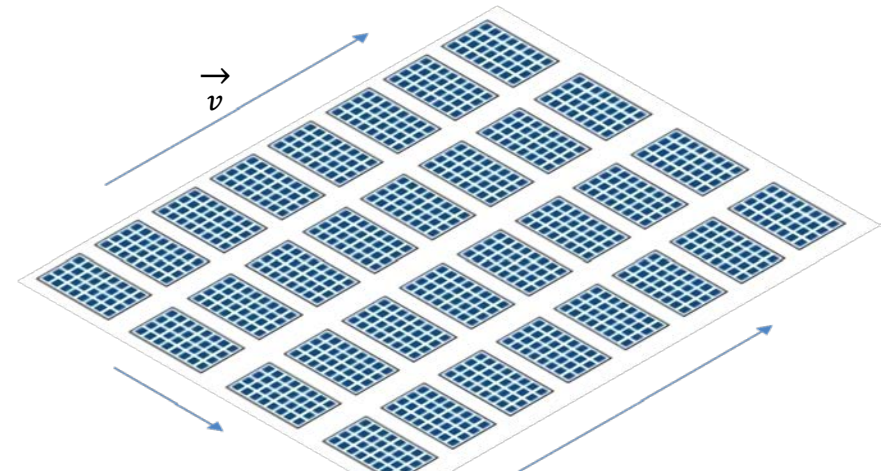
## Verschaltungsmöglichkeiten:

1. **Reihenschaltung der TEG**  $\rightarrow \sum U_{\text{TEG},i}$ 
  - Der TEG mit dem niedrigsten  $\eta$  bestimmt den Strom
2. **Parallelschaltung der TEG**  $\rightarrow \sum I_{\text{TEG},i}$ 
  - Der TEG mit dem niedrigsten  $\eta$  bestimmt die Spannung
3. **Eine Mischung aus beiden Varianten**



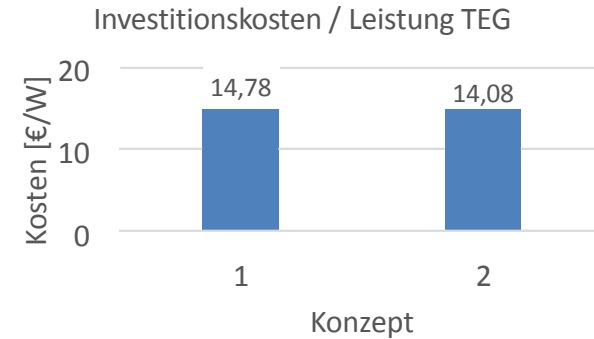


1. a: kostengünstigste Variante
2. c: effizienteste Variante
3. b: Kompromiss aus Effizienz und Kosten



## Investitionskosten Serienanlage

<i>Heutige Kosten</i>		Konzept 1	Konzept 2
Investitionskosten			
Wärmerückgewinnung	€	67.410	42.000
Energieumwandlung	€	136.236	102.177
Kühlung	€	36.988	27.741
<b>Σ Investkosten</b>	<b>€</b>	<b>240.634</b>	<b>171.918</b>



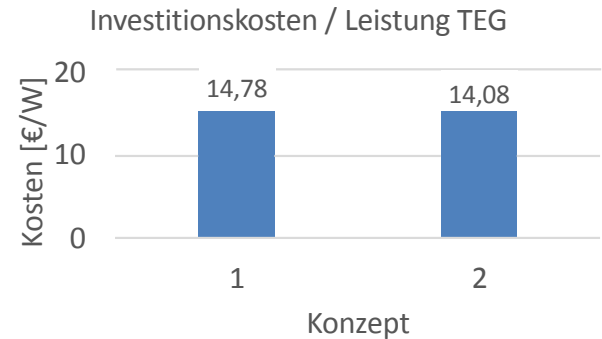
**Ungünstiges Kosten / Leistungs-Verhältnis**

**Die folgenden zukünftigen Entwicklungen sind zu erwarten:**

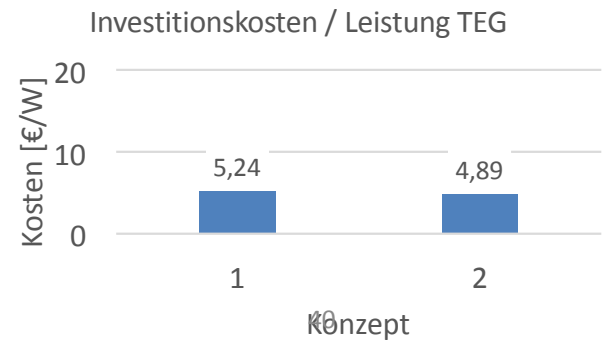
		Heute	Zukünftig
Strompreis	€/kWh	0,12	0,24
$\eta$ TEG	%	5	10
Kosten Energieumwandler	%	100	50
$\eta$ Pumpe <sub>Thermoöl</sub>	%	15	30

## Investitionskosten Serienanlage

<i>Heutige Kosten</i>		Konzept 1	Konzept 2
Investitionskosten			
Wärmerückgewinnung	€	67.410	42.000
Energieumwandlung	€	136.236	102.177
Kühlung	€	36.988	27.741
<b>Σ Investkosten</b>	€	<b>240.634</b>	<b>171.918</b>

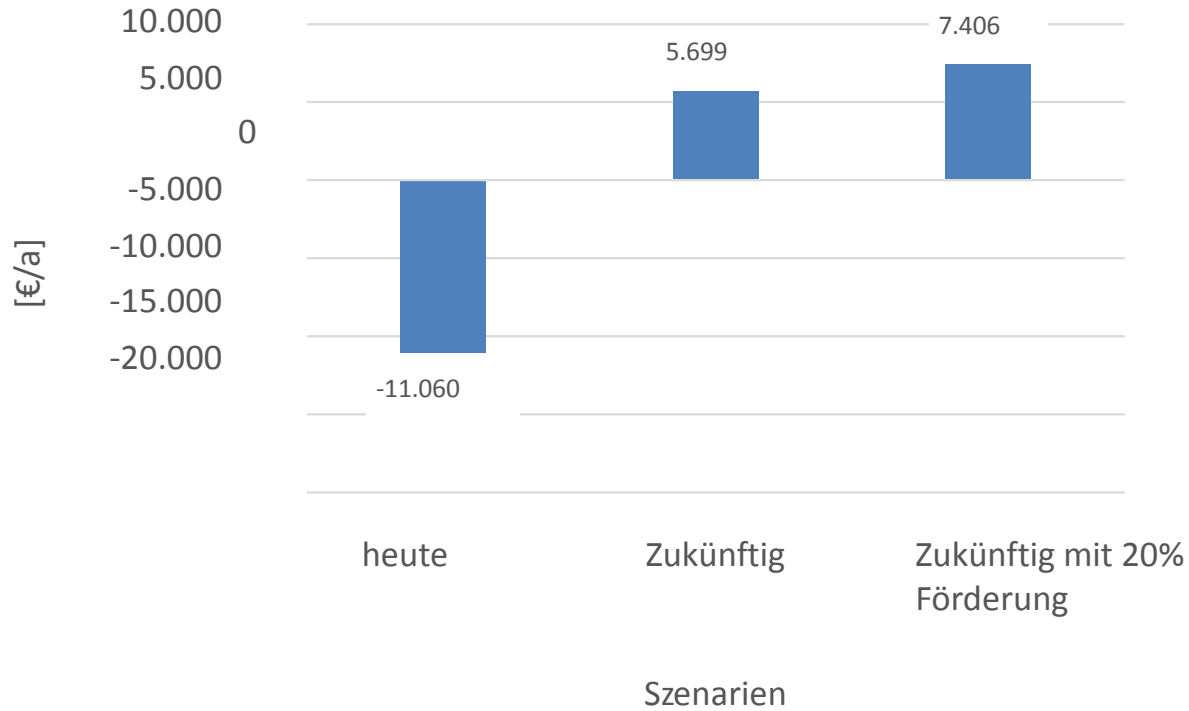


<i>Zukünftige Kosten</i>		Konzept 1	Konzept 2
Investitionskosten		67.410	42.000
Wärmerückgewinnung	€		
Energieumwandlung	€	68.118	51.089
Kühlung	€	35.041	26.281
<b>Σ Investkosten</b>	€	<b>170.570</b>	<b>119.370</b>

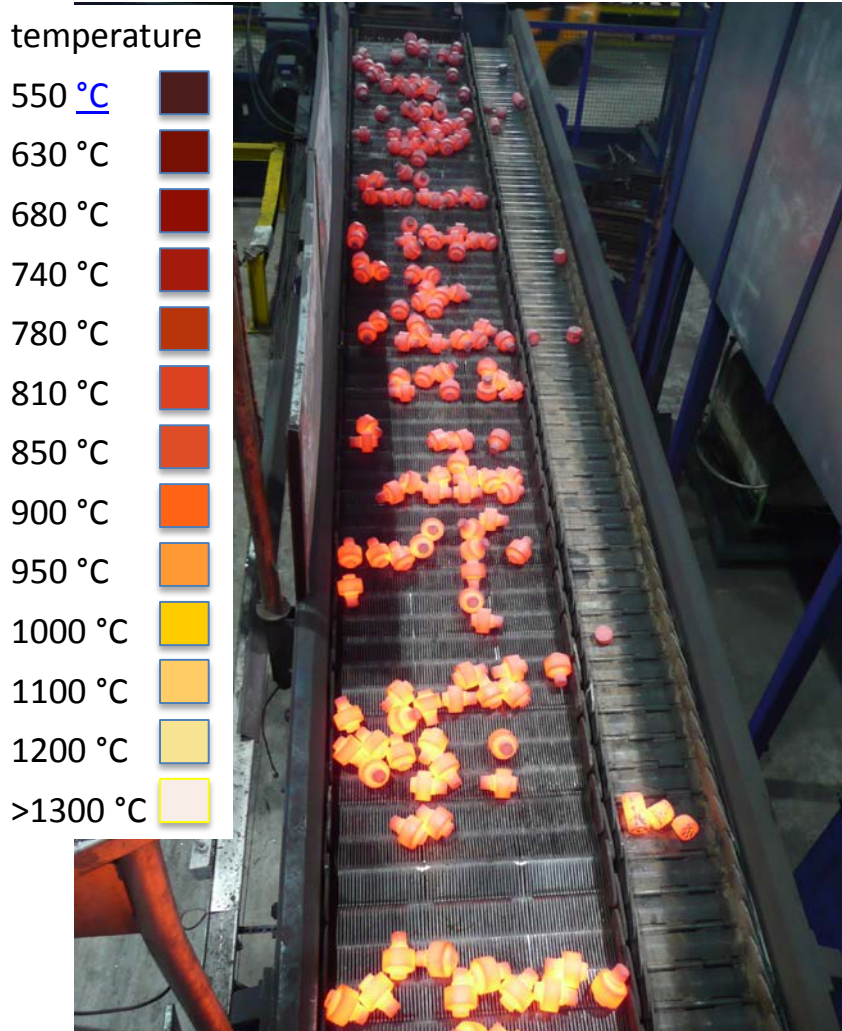




# Erträge pro installiertem kW



## Schmiedeprozess



## Zusammenfassung

- 20-60 kW stehen als Strahlungswärme zur Verfügung
  - >4% Effizienz ist erreichbar  
→  $2 \text{ kW}_{\text{electr.}}/\text{m}^2$  mit kommerziellen TE
- Eine Variation der Geometrie kann über  $1 \text{ m}^2$  angepasst werden
- System ist rentabel bei Entwicklung hochwertiger TE-Module und weiterem Anstieg der Strompreise
- Große Perspektive für viele andere Prozesse mit Abwärmemperaturen bis zu  $200^\circ\text{C}$
- System kann leicht an andere Industrieprozesse angepasst werden.