



## Numerische Simulation elektrothermischer Prozesse

Technische Universität Darmstadt  
**Institut für Elektrische Energiewandlung**

**Dr.-Ing. Jörg Neumeyer**

**CADFEM Germany GmbH, Hannover**

Die Vorlesungsunterlagen basieren auf Vorlagen von:  
Prof. Dr.-Ing. Bernard Nacke, Leibniz Universität Hannover  
Institut für Elektroprozessstechnik



# Inhalt der Vorlesung

## Numerische Simulation elektrothermischer Prozesse



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

1. Einführung / Übersicht über Verfahren / Simulation zur Wirtschaftlichkeitsanalyse
2. Grundlagen der Wärmelehre, Simulation von Temperaturfeldern
3. Energieeffizienz / Konduktive Erwärmung (Praxis und Simulation)
4. Maxwell-Gleichungen / Leistungsumsetzung / Wirkungsgrad
5. Induktionserwärmung 1: Umrichter, Schmelzöfen, Schmieden
6. Induktionserwärmung 2: Querfeld, Härten, Schweißen
7. Induktionserwärmung 3: Simulation (Praxis und Übung)
8. Indirekte Erwärmung / Hybrid-Verfahren
9. Dielektrische Erwärmung (Praxis und Simulation)
10. Organisatorisches, Übungen, Fragen & Antworten



# Inhalt der Vorlesung

## Numerische Simulation elektrothermischer Prozesse



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

1. Einführung / Übersicht über Verfahren / Simulation zur Wirtschaftlichkeitsanalyse  
**Vorteile, Eigenschaften, Einsatzbereiche, Sonderverfahren, Energiewirtschaftliche Bedeutung**
2. Grundlagen der Wärmelehre, Simulation von Temperaturfeldern
3. Energieeffizienz / Konduktive Erwärmung (Praxis und Simulation)
4. Maxwell-Gleichungen / Leistungsumsetzung / Wirkungsgrad
5. Induktionserwärmung 1: Umrichter, Schmelzöfen, Schmieden
6. Induktionserwärmung 2: Querfeld, Härten, Schweißen
7. Induktionserwärmung 3: Simulation (Praxis und Übung)
8. Indirekte Erwärmung / Hybrid-Verfahren
9. Dielektrische Erwärmung (Praxis und Simulation)
10. Organisatorisches, Übungen, Fragen & Antworten



# Elektrothermische Verfahren - Übersicht

Widerstands-  
Erwärmung

Induktive  
Erwärmung

Dielektrische  
Erwärmung

Funkenerosion

Elektrothermische  
Verfahren

Lichtbogen-  
Erwärmung

Laserstrahl-  
Erwärmung

Elektronenstrahl-  
Erwärmung

Plasmastrahl-  
Erwärmung

# Klassifizierung Elektrothermischer Verfahren



Verfahren	Art der Erwärmung		Art der Energiezufuhr in das Gut	Anwendungs- beispiele
	direkt	indirekt		
Widerstands- Erwärmung	+		direkter Stromdurchgang	konduktive Drahterwärmung
			+	Konvektion Wärmestrahlung Wärmeleitung
Induktive Erwärmung	+		elektromagnetisches Wechselfeld	Induktions-Rinnen- Ofen, Ind.-Ofen mit keram. Tiegel
			+	Wärmestrahlung Wärmeleitung
Dielektrische Erwärmung	+		elektromagnetisches HF-Feld	HF-Papiertrocknung Mikrowellenofen



# Klassifizierung Elektrothermischer Verfahren



Verfahren	Art der Erwärmung		Art der Energiezufuhr in das Gut	Anwendungs- beispiele
	direkt	indirekt		
Lichtbogen- Erwärmung		+	Wärmestrahlung	Lichtbogen- Stahlschmelzofen
	+		elektrischer Strom Wärmestrahlung	Reduktionsofen
Plasmastrahl- Erwärmung		+	Wärmestrahlung	Plasmaschmelz- ofen
Elektronenstrahl- Erwärmung	+		Elektronenbeschuss	Elektronenstrahl- schmelzofen
Laserstrahl- Erwärmung		+	elektromagnetische Strahlung	Schneiden mit Laser
Funkenerosion		+	elektrische Entladung	Trennen und Senken von Metallen



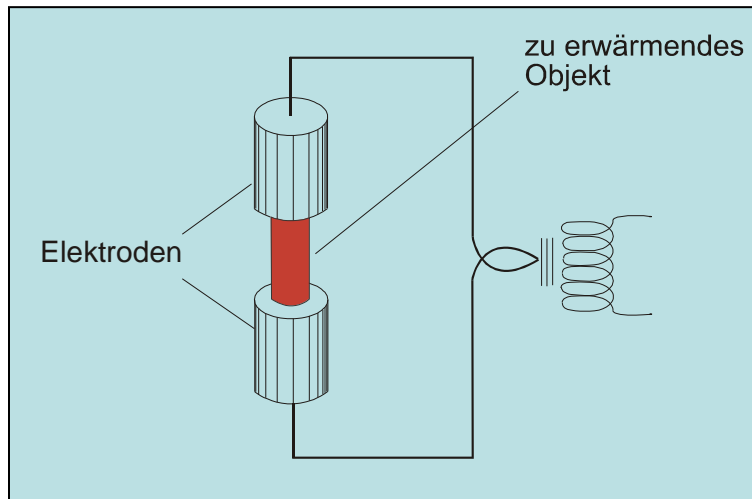
# Vorteile elektrothermischer Verfahren



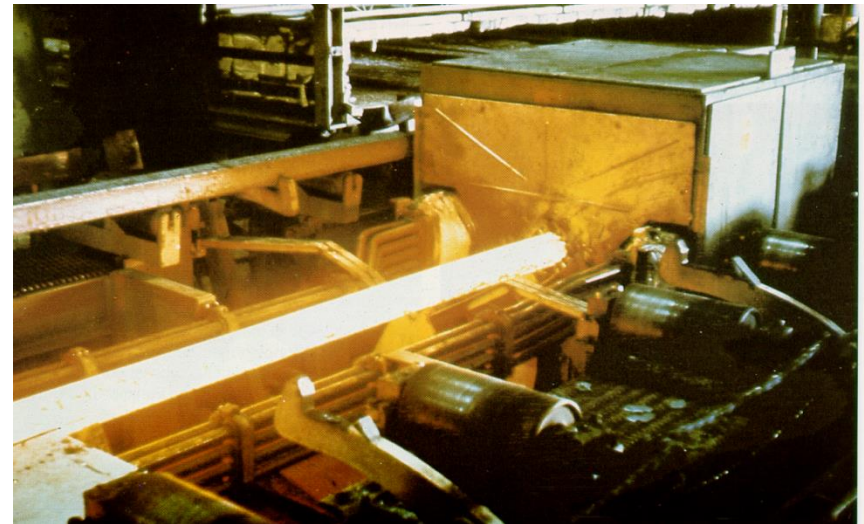
- Wärmebereitstellung ohne Flamme
- Höchste Sicherheit
- Keine Schadstoffbelastung am Arbeitsort
- Hohe Wärmeleistungsdichten
- Hohe Prozesstemperaturen
- Große Erwärmungsgeschwindigkeiten
- Hervorragende Dosierbarkeit der Leistung
- Direkte Erwärmung innerhalb des Gutes
- Ermöglichung neuer zukunftsweisender Technik



## Prinzip der Erwärmung



## Knüppel-Erwärmungsanlage



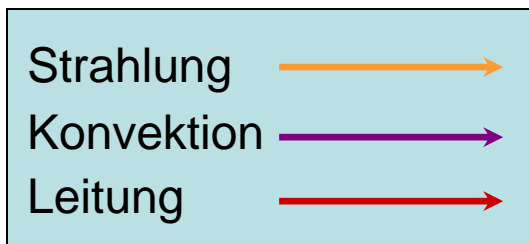
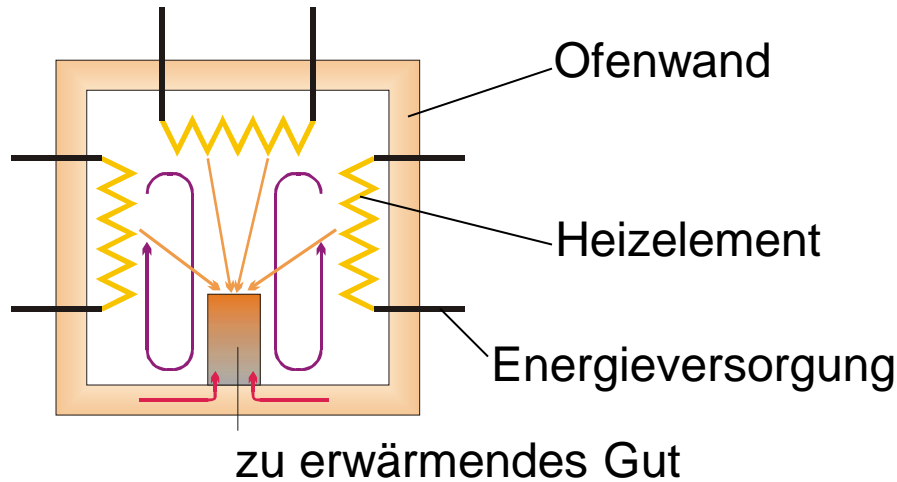
Quelle: ABB

- Werkstück ist Teil des Stromkreises
- Entstehung Joulescher Wärme im Gut
- Temperaturabhängige Werkstoffeigenschaften
- Begrenzung der Stromübertragung durch Kontakte

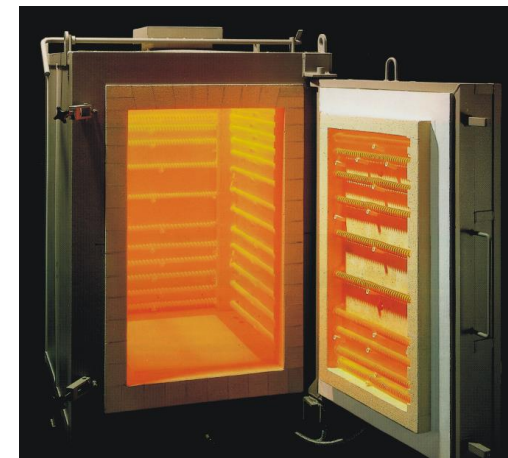


# Mittelbare Widerstandserwärmung

## Prinzip der Erwärmung



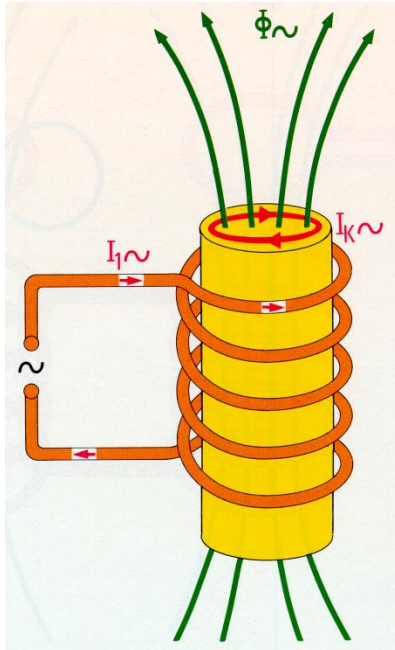
Brennofen für Glas,  
Keramik, Porzellan



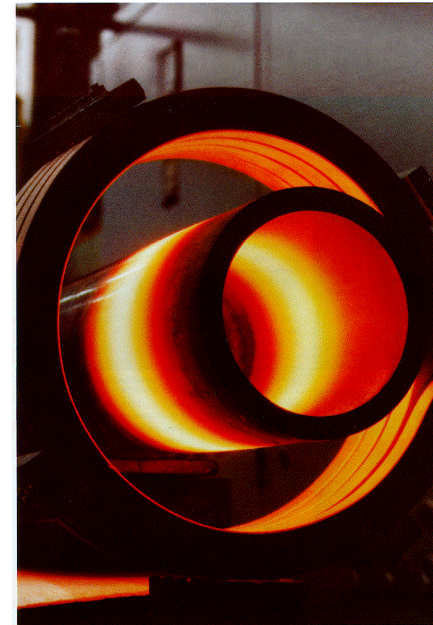
© Werkbild Nabertherm

- Schmelzen und Warmhalten von Metallen, Glas, Silizium
- Trocknen von Stoffen wie Farben, Lacke, Papier u. a.
- Wärmebehandlung wie Härten, Glühen, Anlassen, Aufkohlen

## Prinzip der Erwärmung



## Durcherwärmung eines Rohres

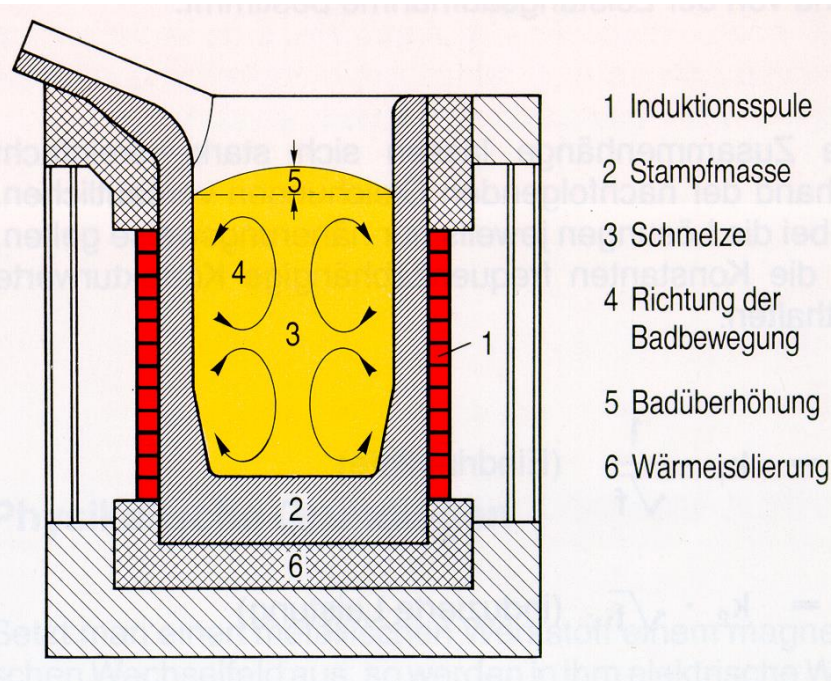


- Schmelzen und Warmhalten von Metallen
- Durcherwärmen zum anschließenden Umformen
- Wärmebehandlung von Metallen wie Härten, Glühen, Anlassen
- Schweißen von Rohren

Quelle: RWE-Information Prozesstechnik

# Induktives Schmelzen

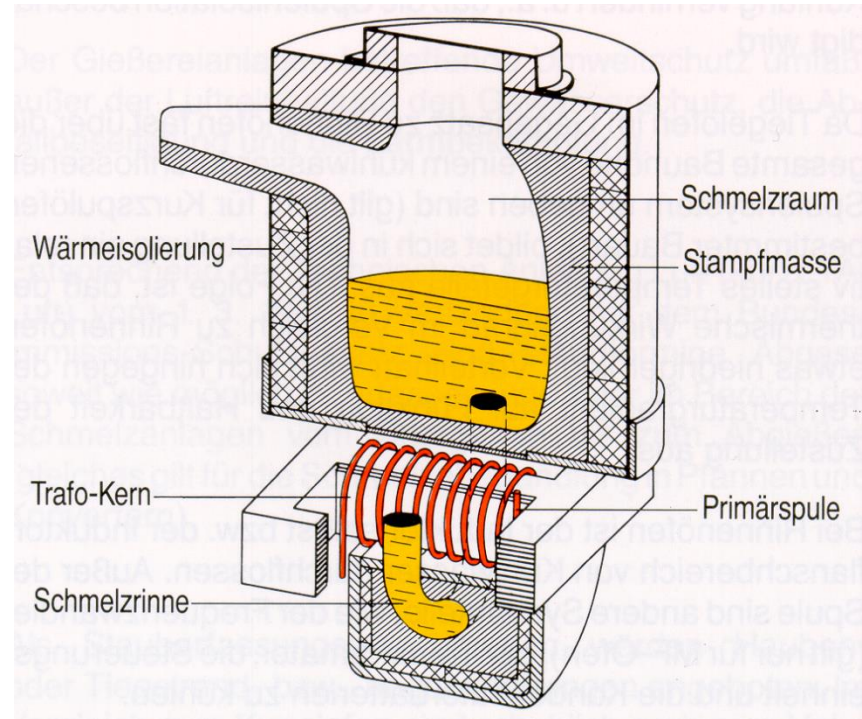
## Induktions-Tiegelofen



Quelle: RWE-Information Prozesstechnik

- Überwiegend Schmelzaggregat
- Mittlerer Wirkungsgrad
- Frequenzen: 50 ... 1000 Hz

## Induktions-Rinnenofen



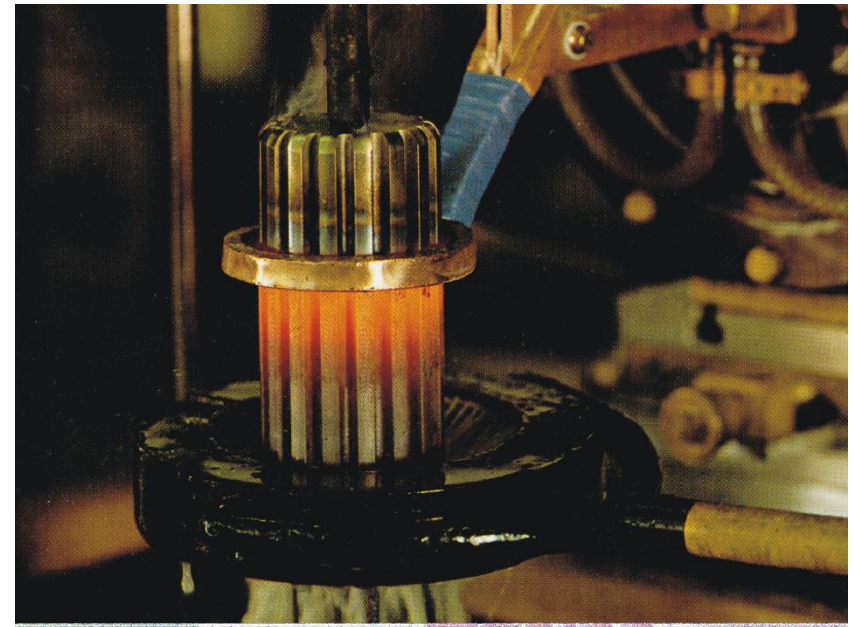
- Überwiegend Warmhalteaggregat
- Hoher Wirkungsgrad
- Frequenzen: 50 Hz, 60 Hz



## Induktive Randschichthärtung

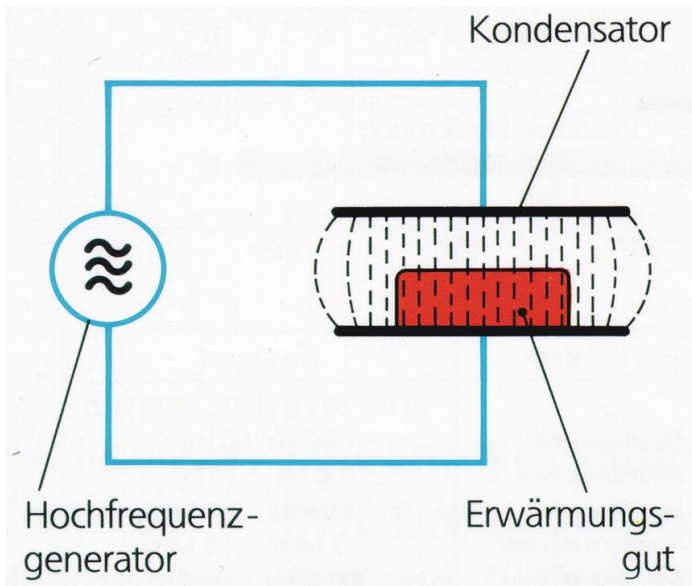
- Qualitätssteigerung von Bau- und Konstruktionsteilen
- Sehr schnelles Erwärmen und sofortiges Abschrecken
- Erwärmungstiefe gezielt beeinflussbar über:
  - Frequenz
  - elektrische Leistung
  - Einwirkzeit

## Induktionshärteanlage mit Induktor, Brause und Werkstück



Quelle: RWE-Information Prozesstechnik

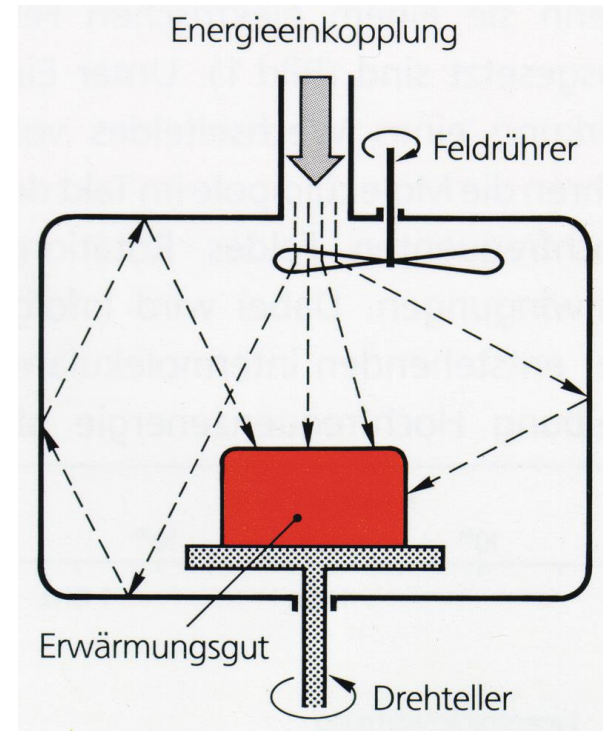
## Kondensatorfeld-Erwärmung



Quelle: RWE-Information Prozesstechnik

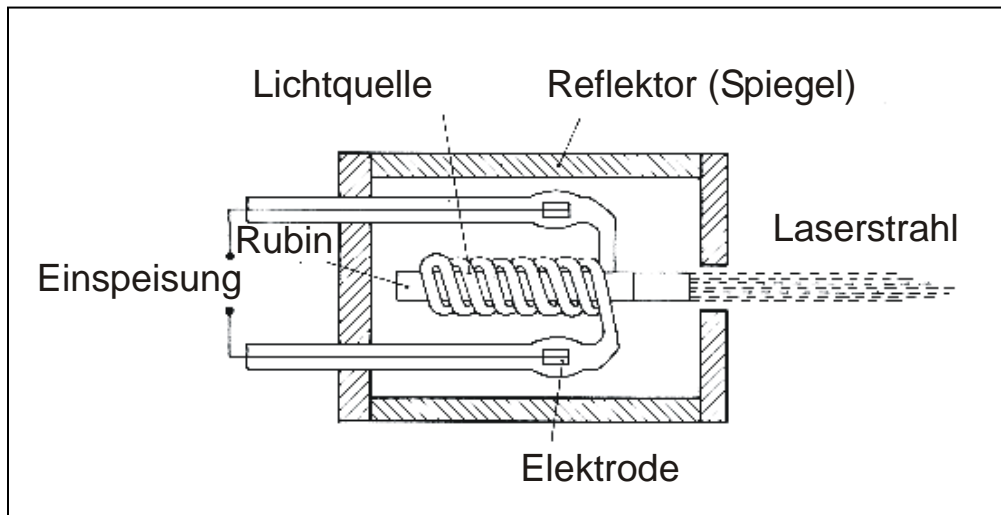
- Frequenzen: 13,56 MHz  
27,12 MHz  
40,68 MHz
- Energiezufuhr: über el. Leitung

## Mikrowellen-Erwärmung

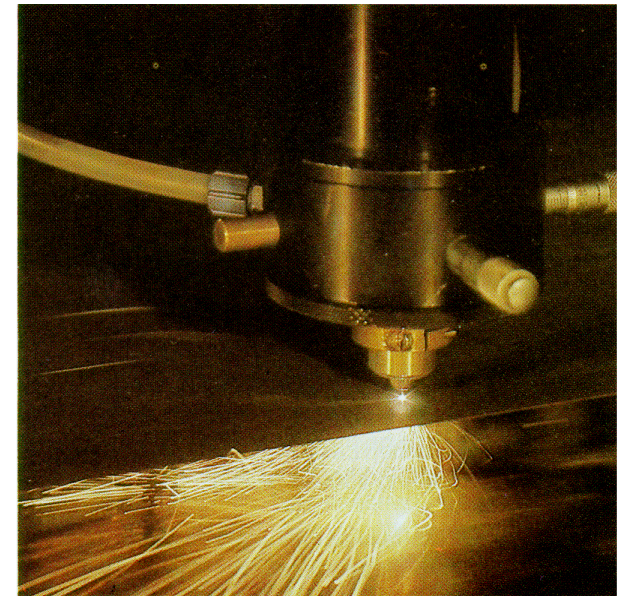


- Frequenz: 2,45 GHz
- Energiezufuhr: über Hohlleiter

## Prinzip der Erwärmung



## Laserschneiden von Transformator-Blechen

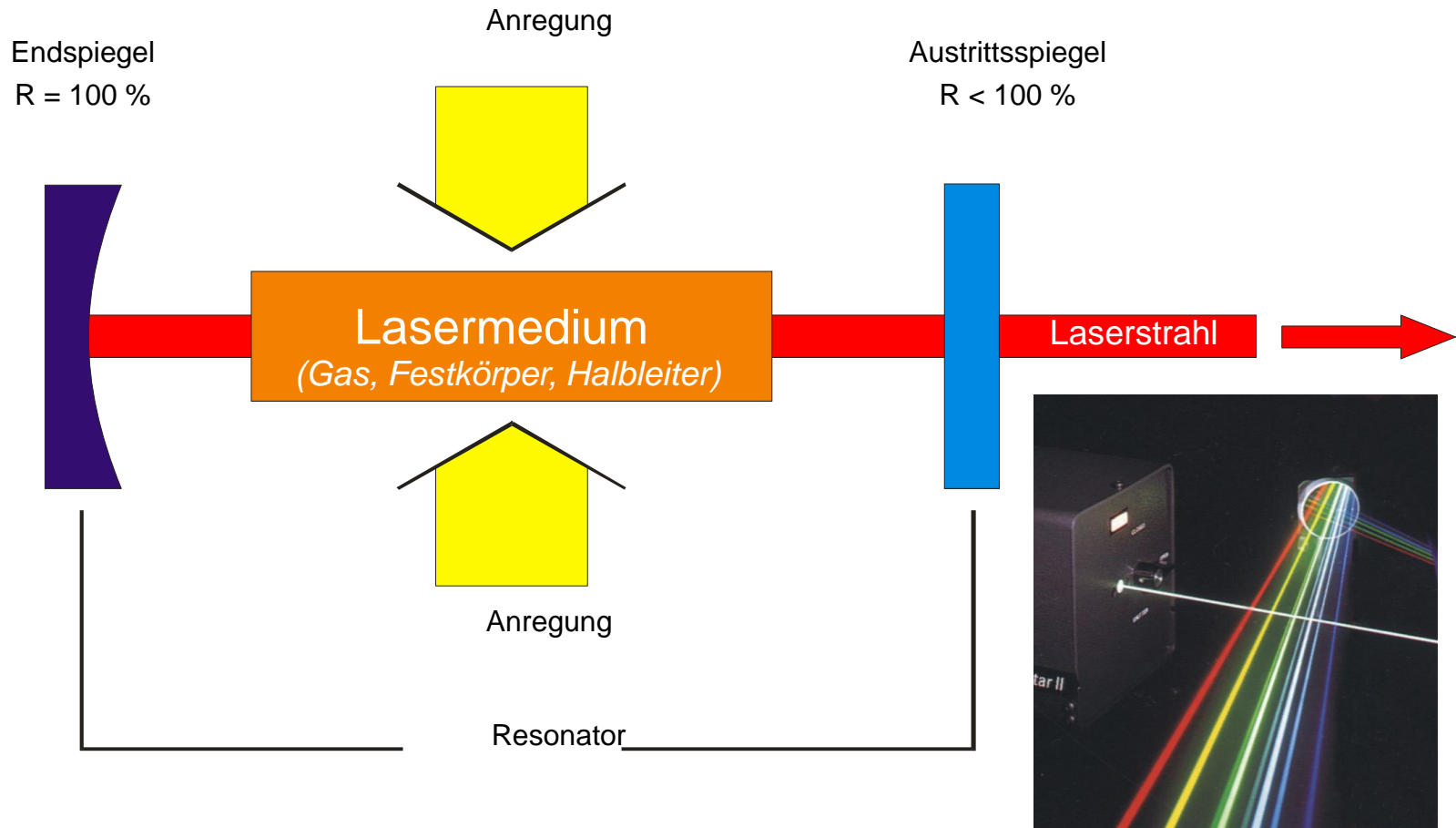


## Anwendungsgebiete

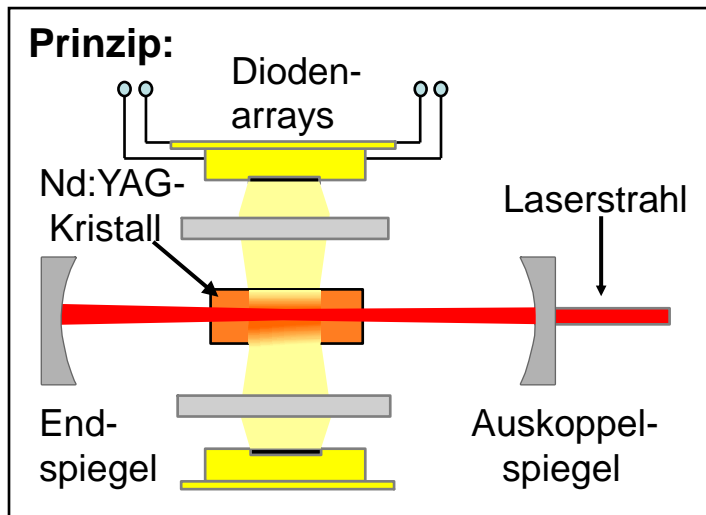
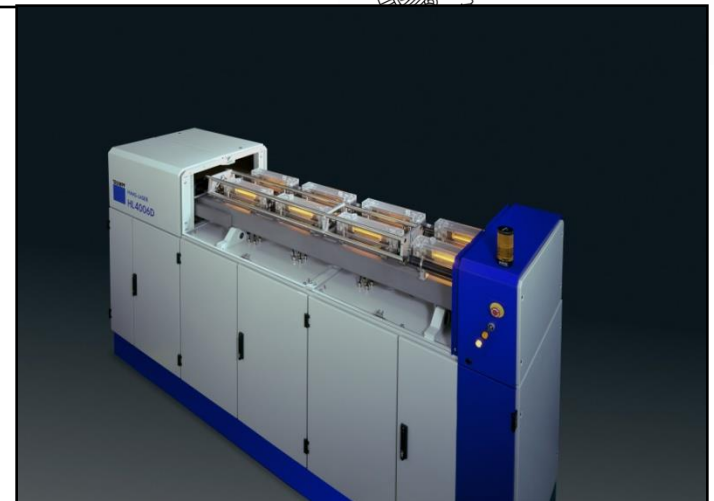
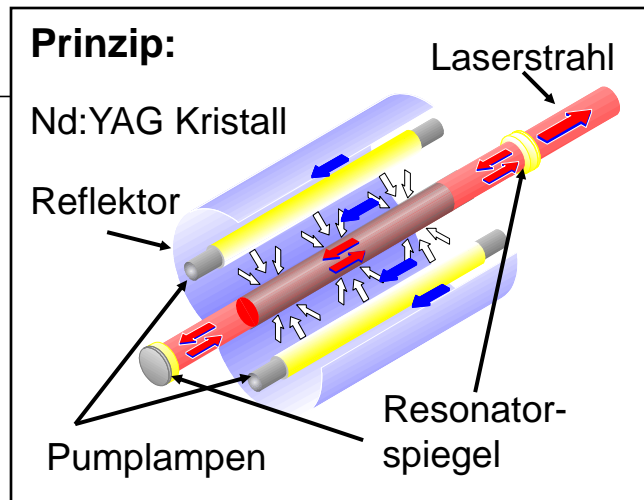
- Schneiden
- Schweißen
- Löten
- Härten
- Bohren

Quelle: Industrielle Elektrowärmetechnik, Vulkan-Verlag

# Laserstrahl-Erwärmung



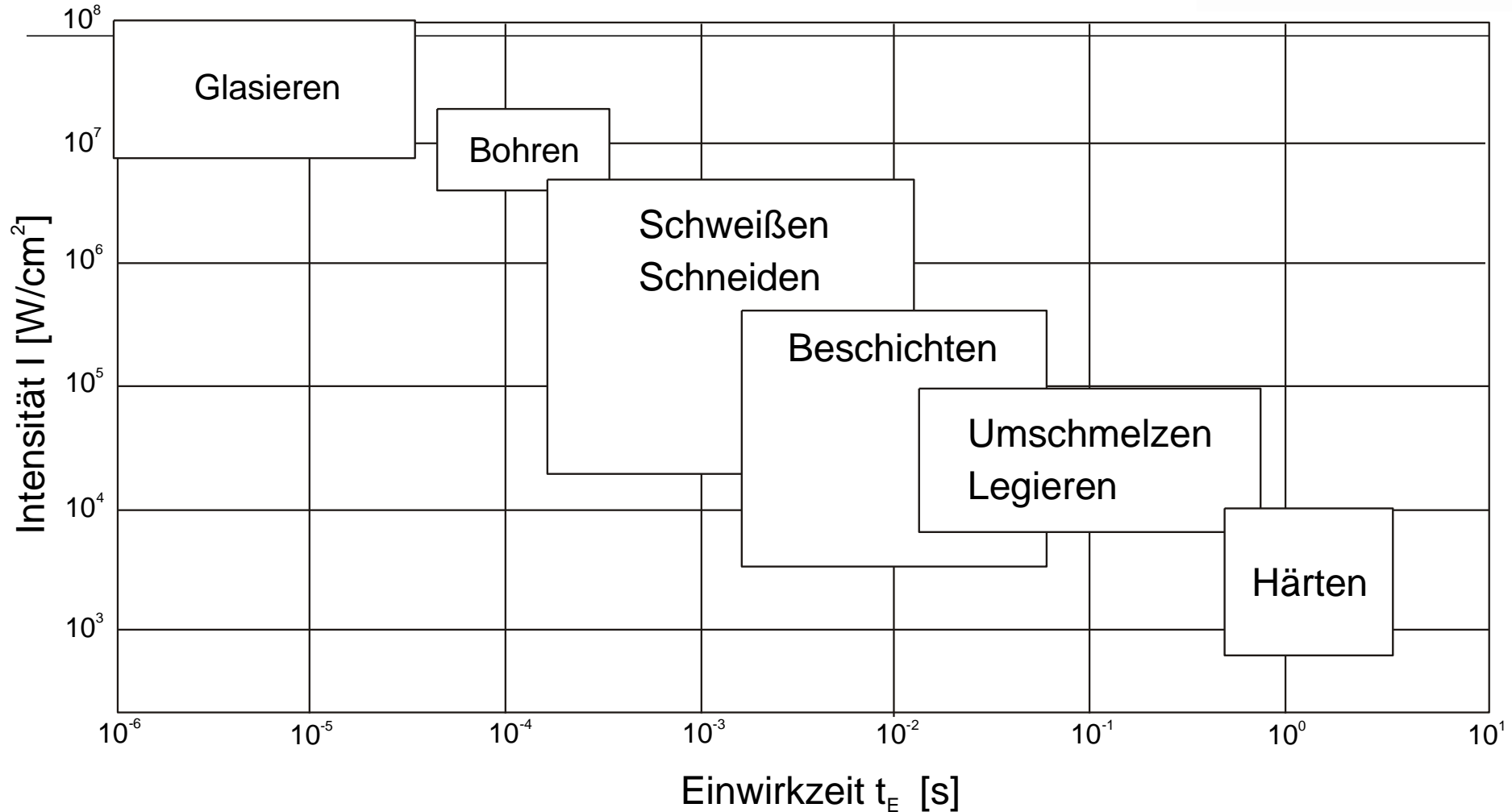
# Nd:YAG-Laserstrahlquellen





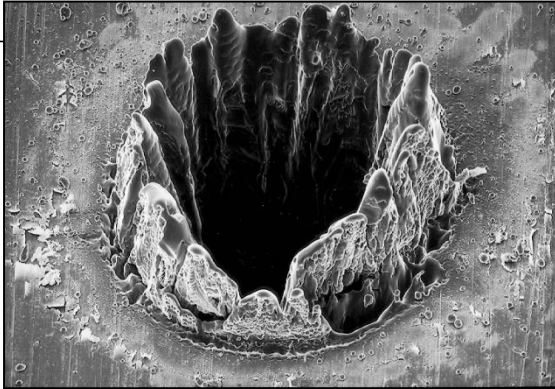


# Einsatzbereich des Lasers zur Materialbearbeitung

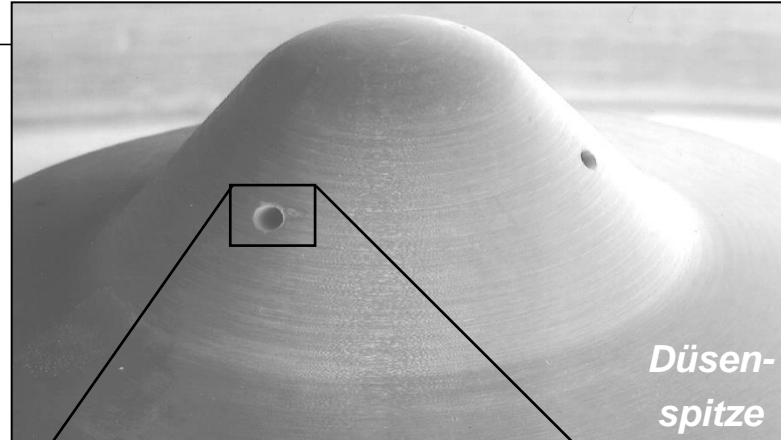


# Einfluss der Pulslänge beim Laserstrahlbohren

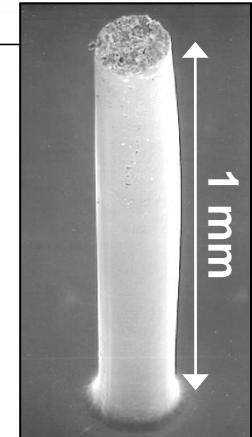
## Beispiel: Einspritzdüsen



Nanosekunden-Abtrag



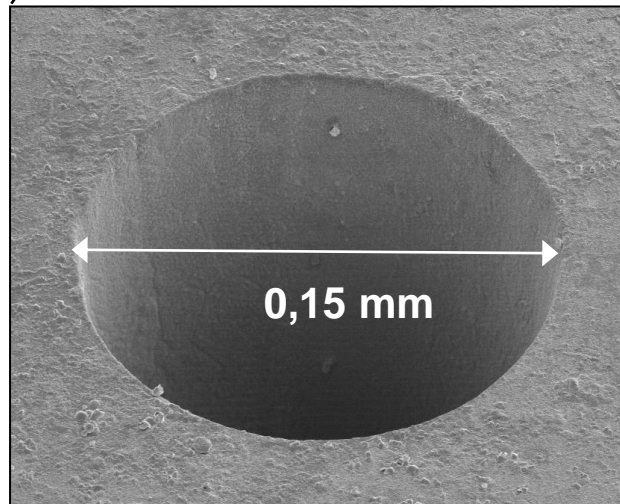
Düsen-  
spitze



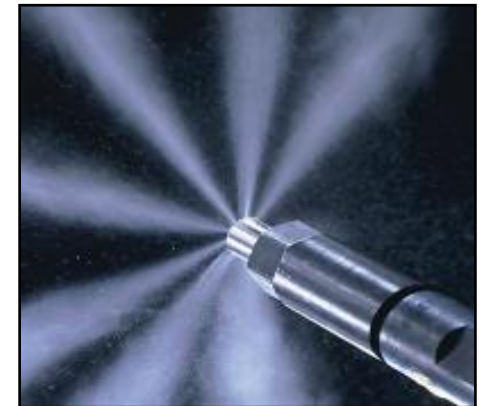
1 mm



Femtosekunden-Abtrag

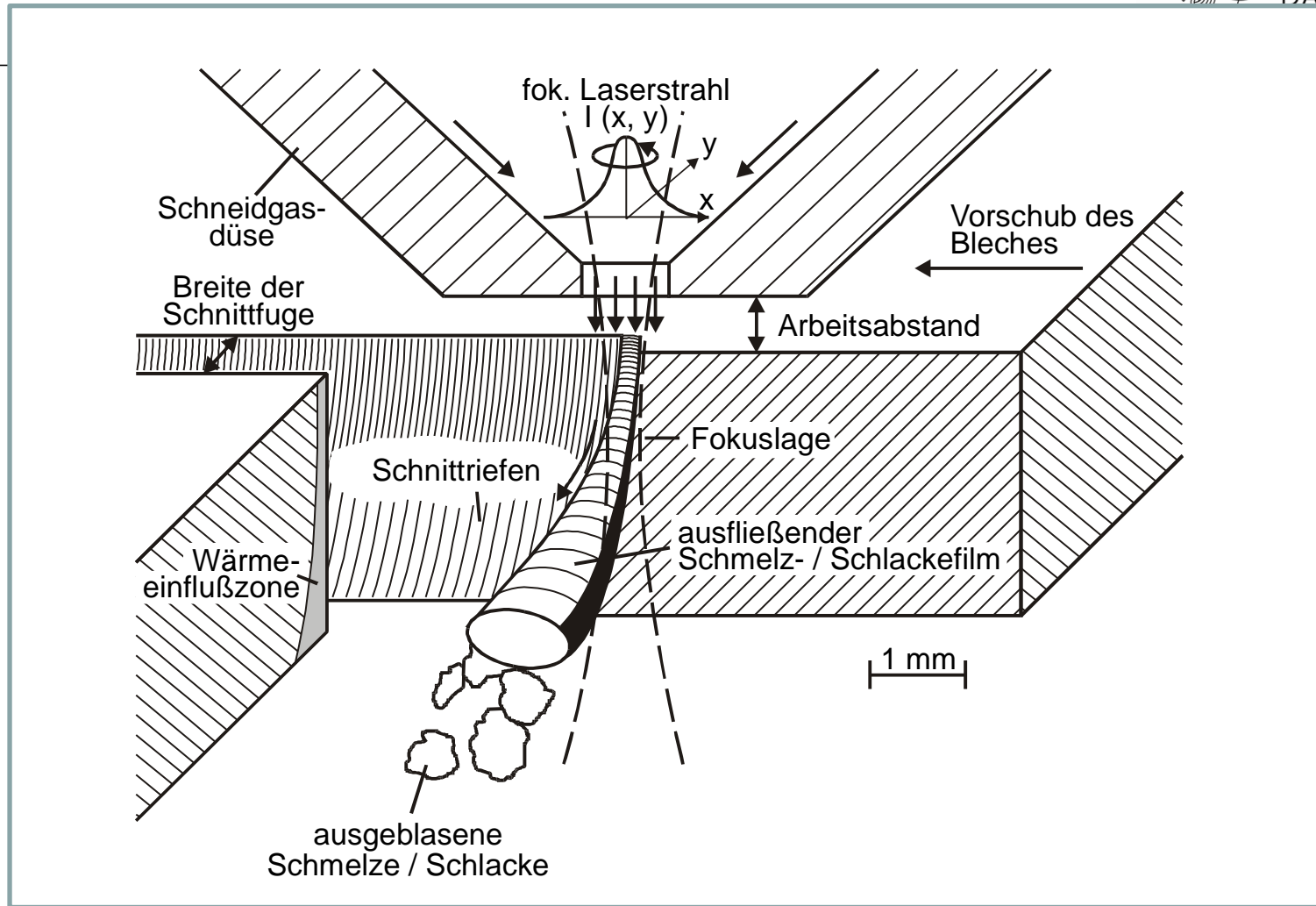


0,15 mm

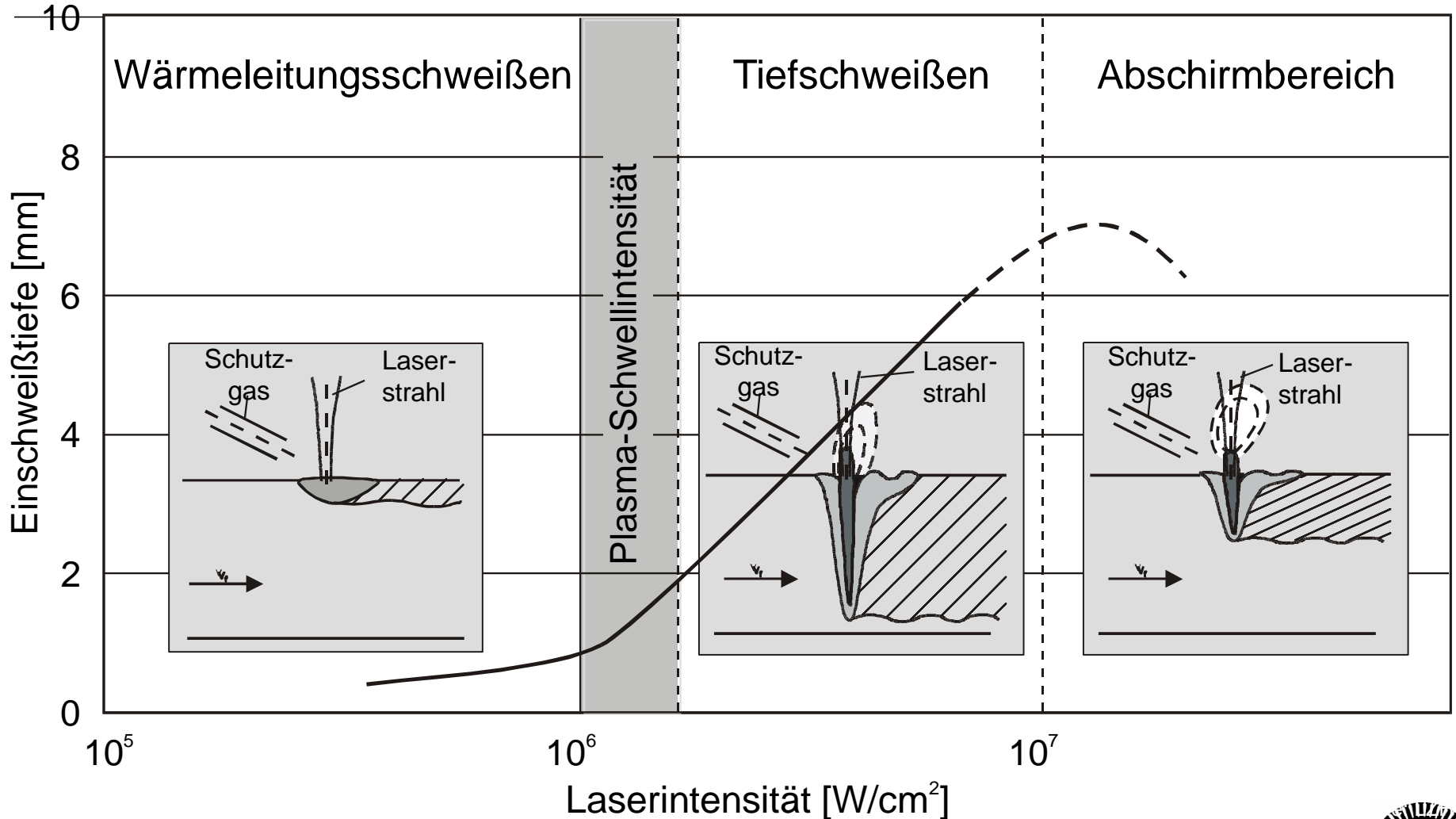


Einspritzdüse mit  
8 Mikrobohrungen

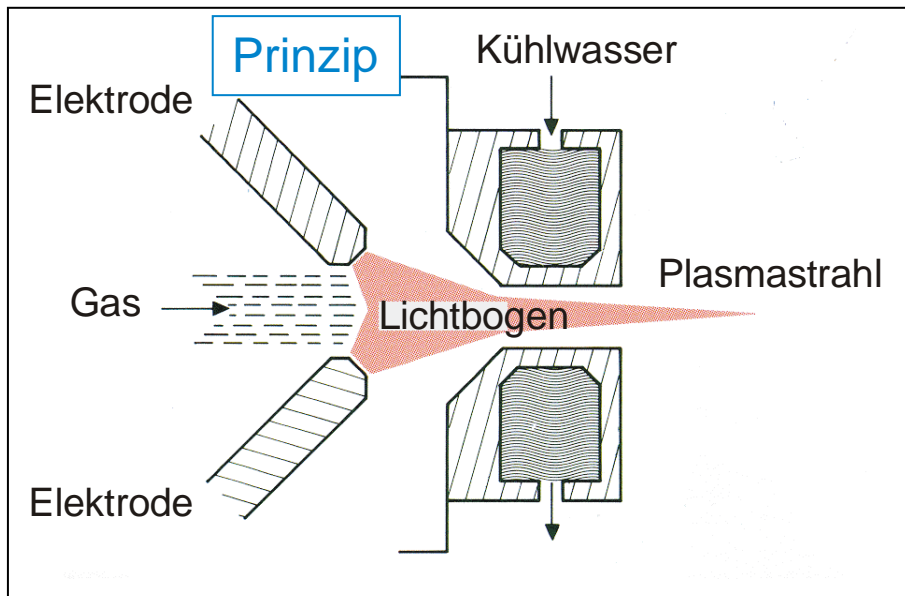
# Laserstrahlschneiden



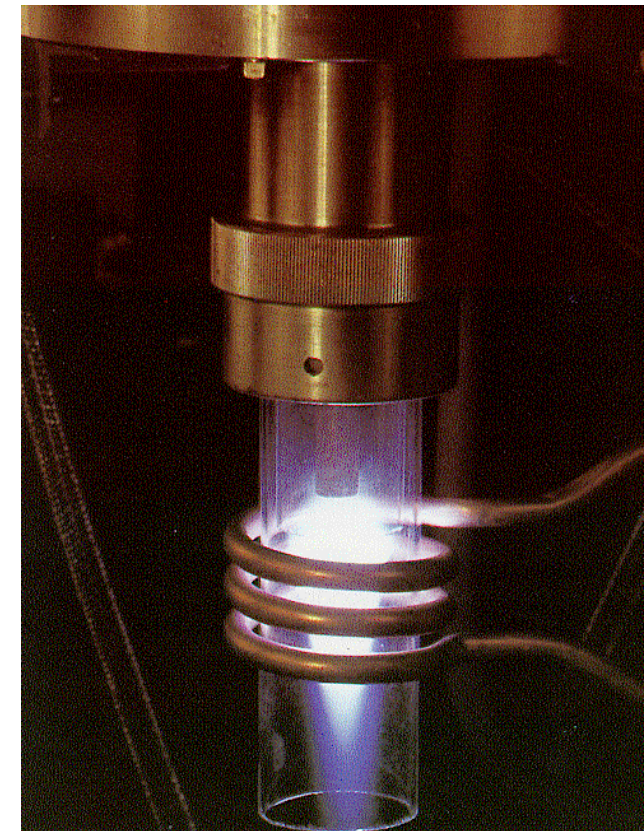
# Beispiel Laserschweißen: Einfluss der Leistungsdichte auf den Schweißprozess







Plasmaflamme einer HF-Induktionsplasmaanlage

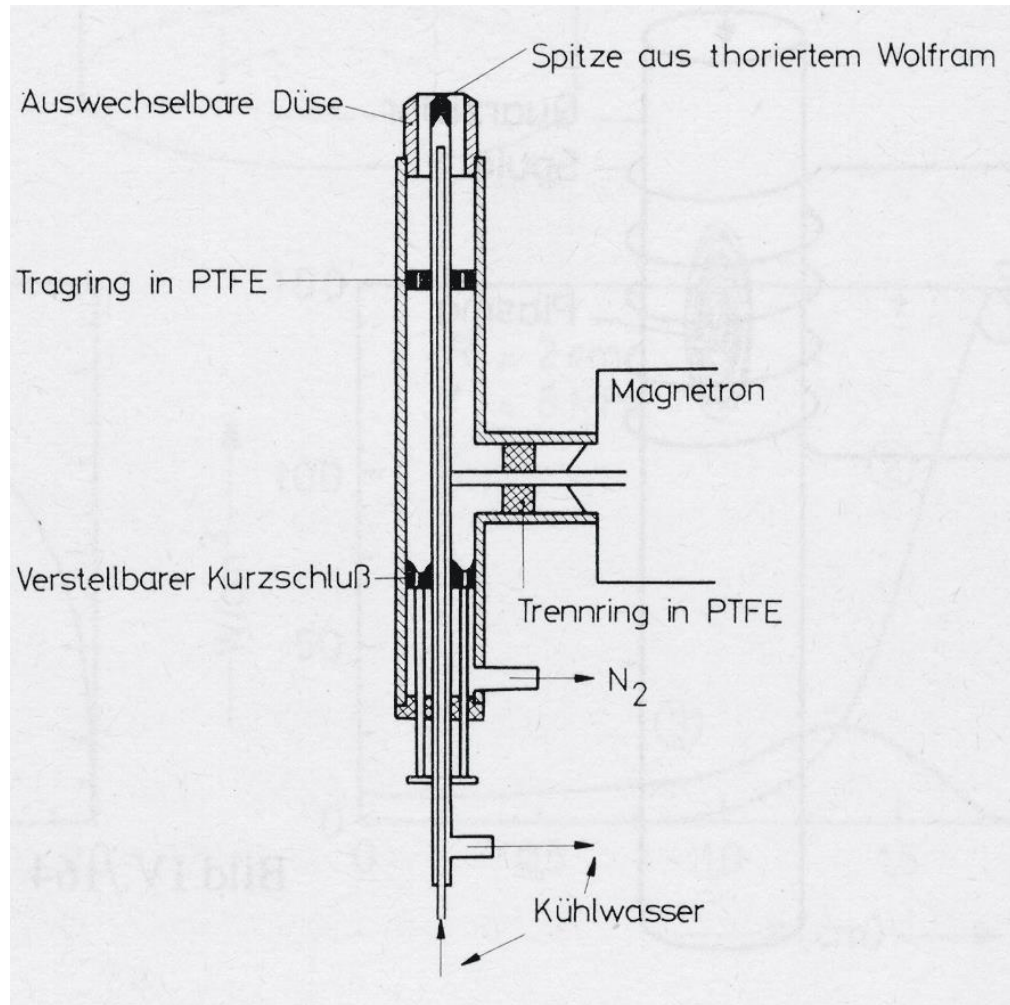


## Anwendungsgebiete

- Schmelzen von Metallen und hochschmelzenden Materialien
- Schweißen und Schneiden von Metallen
- Aufdampfen und Aufspritzen von Stoffen wie Metalle, Oxide und Karbide

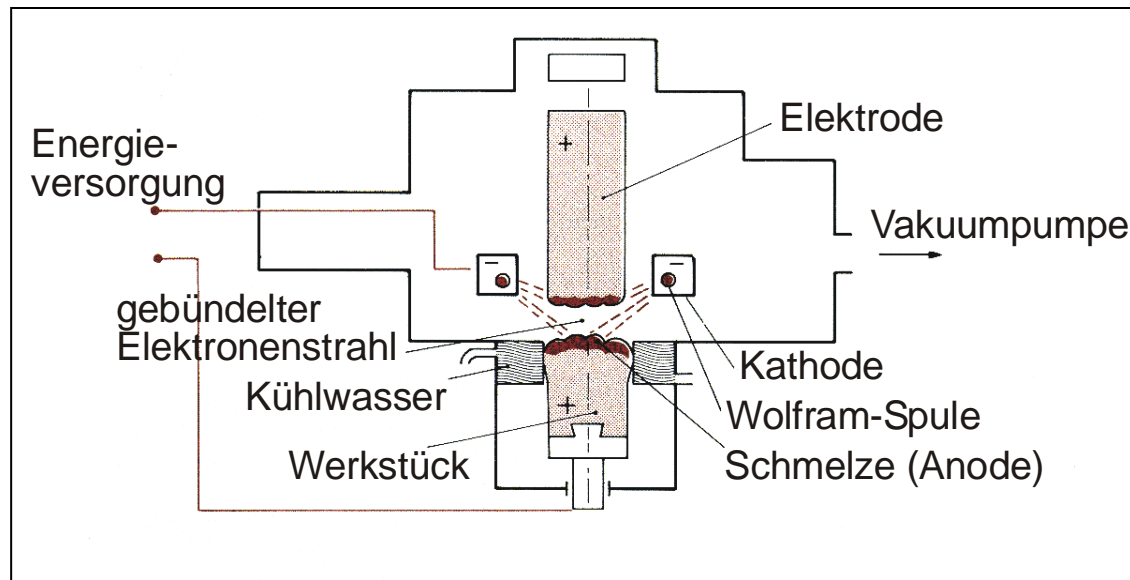
Quelle: Industrielle Elektrowärmetechnik, Vulkan-Verlag

# Kapazitive Plasmafackel, $f = 2450 \text{ MHz}$



Quelle:  
*Elektrowärme - Theorie  
u. Praxis, Verlag Giradet*

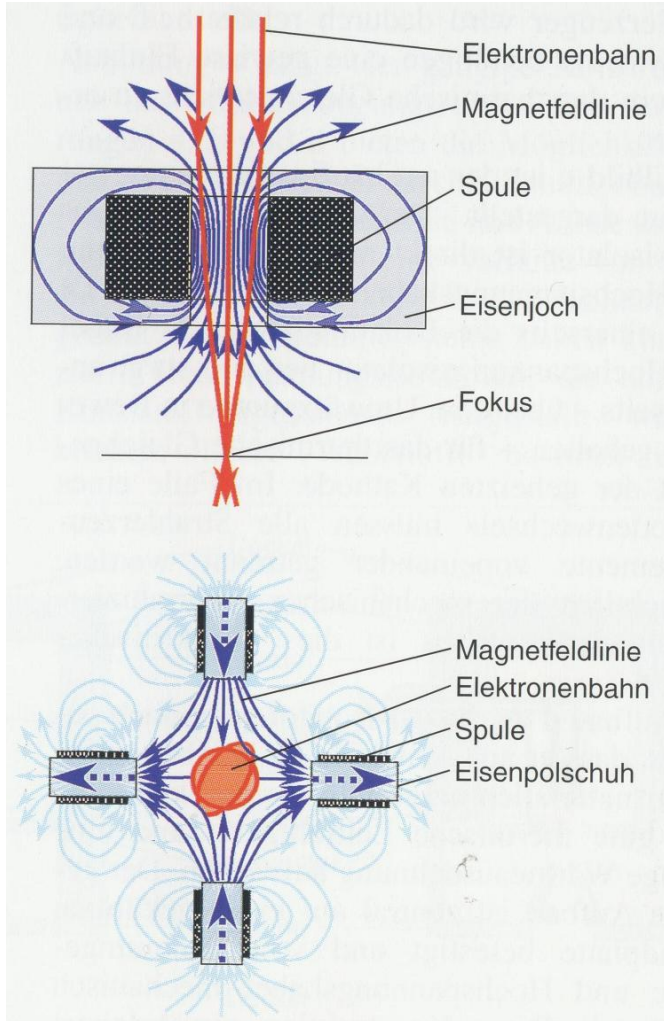
## Prinzip



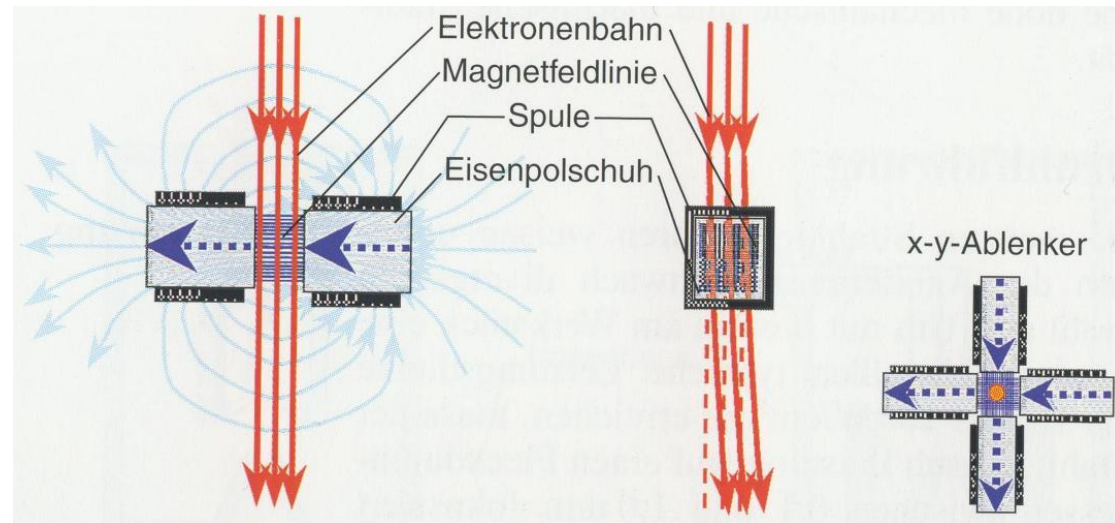
## Anwendungsgebiete

- Schmelzen von hochschmelzenden Metallen großer Reinheit
- Schweißen bei gleichzeitiger Entgasung der Schmelzzone und großer Schweißtiefe
- Aufdampfen von hochreinen Schichten in Optik und Elektronik
- Bohren, Perforieren

# Elektronenstrahl-Erwärmung



- Links oben: fokussierende elektromagnetische Linse
- Links unten: Stigmator
- Rechts unten: Strahlablenker

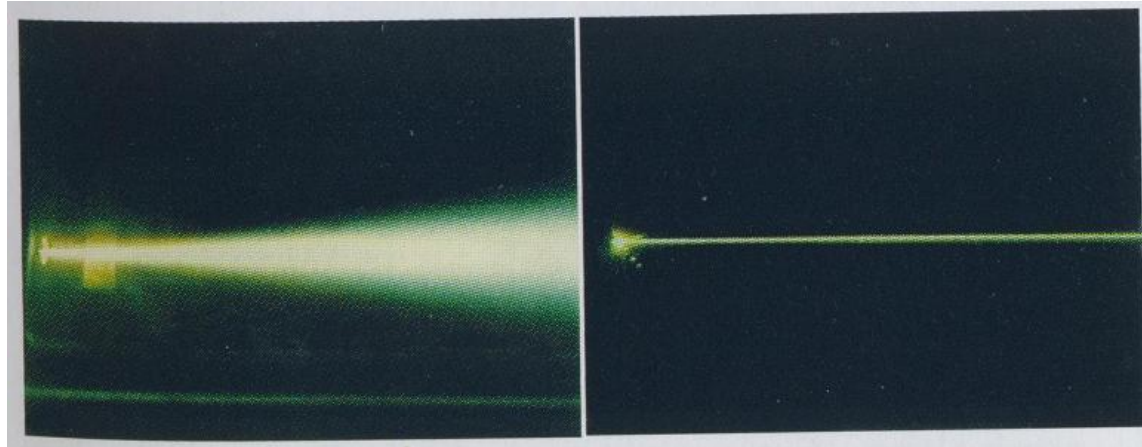




# Elektronenstrahl-Erwärmung

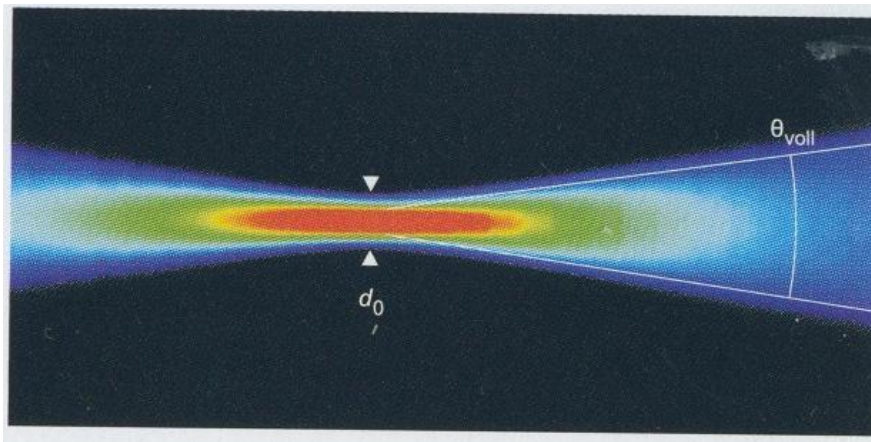
- Elektronenstrahlverfahren müssen unter Vakuum betrieben werden

Aufweitung des  
Strahls in Restgas  
bei 500mbar



Aufweitung des  
Strahls bei  
50mbar

- Strahlbewertung



$$4 \cdot \varepsilon = d_0 \cdot \Theta_{\text{voll}}$$

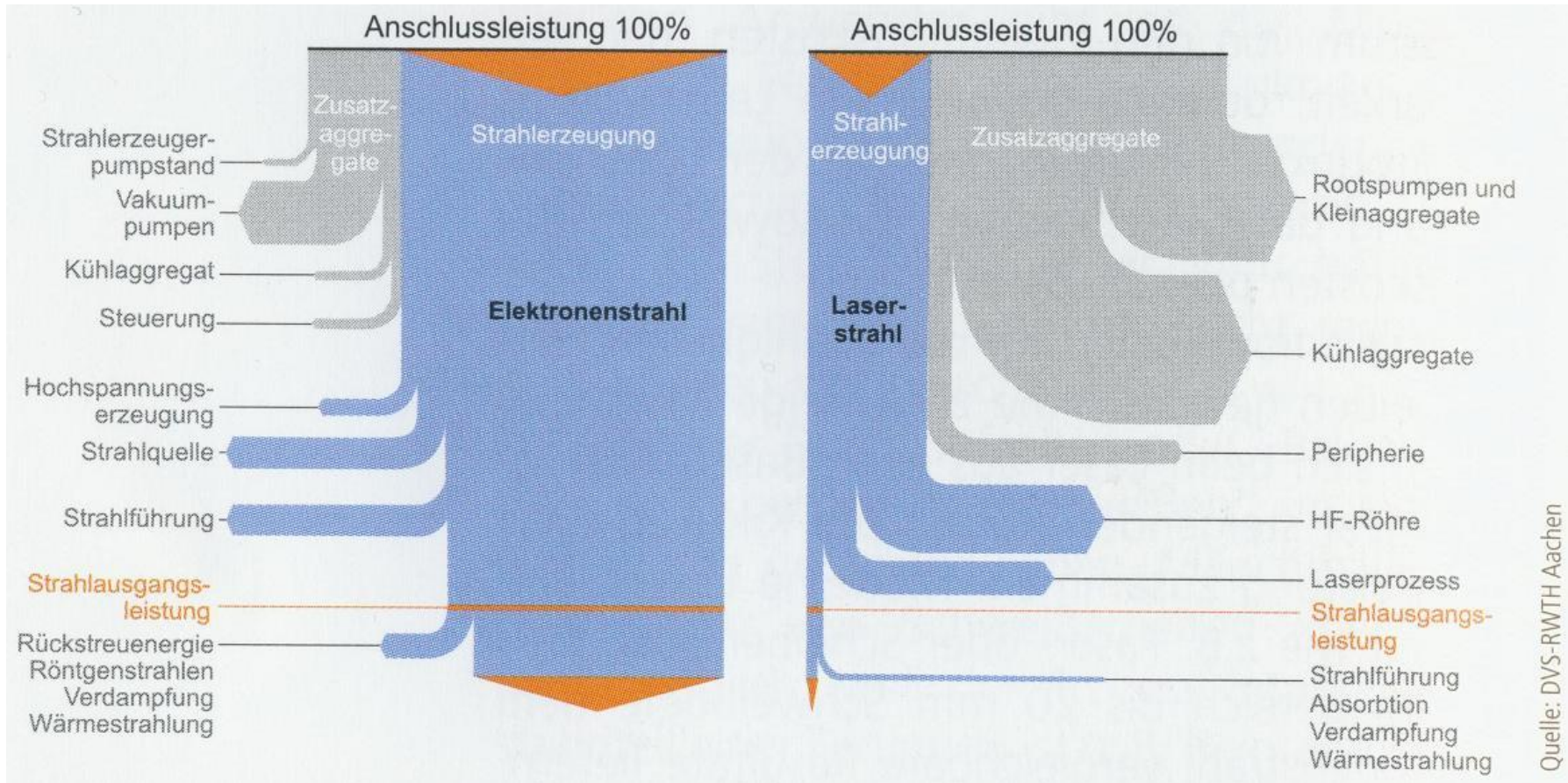
$\varepsilon$  : Beam Parameter Product

$d$  : Strahldurchmesser

$\Theta$  : Divergenz

$\varepsilon$  ist abhängig von der Strahlquelle

# Elektronenstrahl-Erwärmung



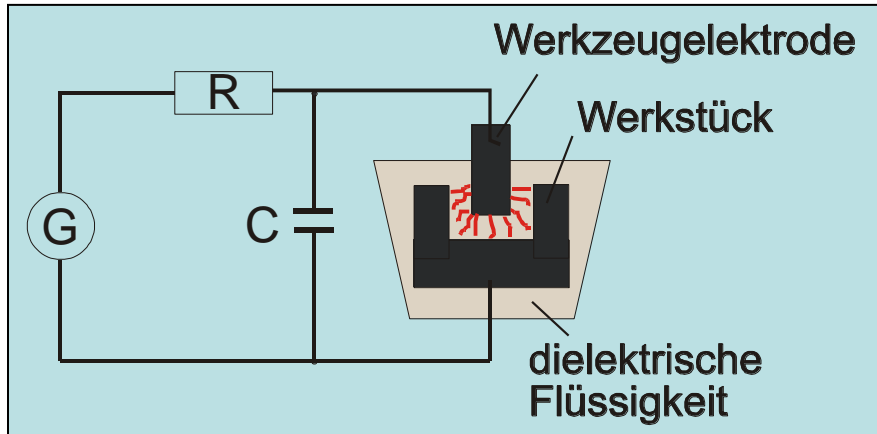
Wirkungsgrad Elektronenstrahl:  
60 - 70%

Wirkungsgrad Laserstrahl:  
4 - 30%



- Vakuum benötigt
- Fokussierung über magnetische Linsen, gezielte Ablenkung über hochfrequente elektrische Felder
- Hohe Leistungsdichten:
  - bis  $10^9$  W/m<sup>2</sup> im Dauerbetrieb
  - während kurzer Impulse wesentlich mehr
- Höherer Wirkungsgrad als Laseranwendungen

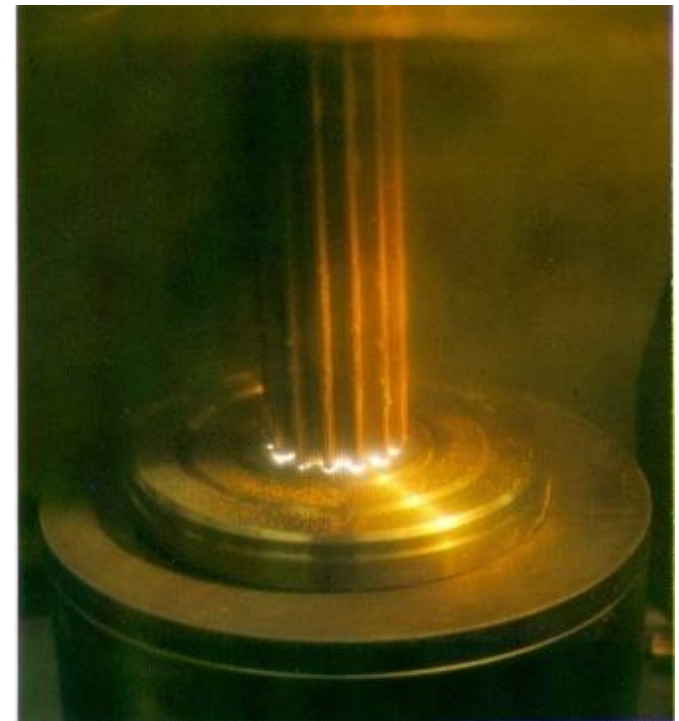
## Prinzip



## Anwendungsgebiete

- Herstellung von Werkzeugen wie Matrizen
- Bearbeiten von komplexen Einzelteilen wie Kugellager und Automobilventilen
- Herstellen von Durchbrüchen wie Profil-Bohrungen und schmalen Schlitten
- Gravieren, Nacharbeiten, Polieren

## Funkenerosive Zahnkranzherstellung



Werkbild AEG-Elotherm

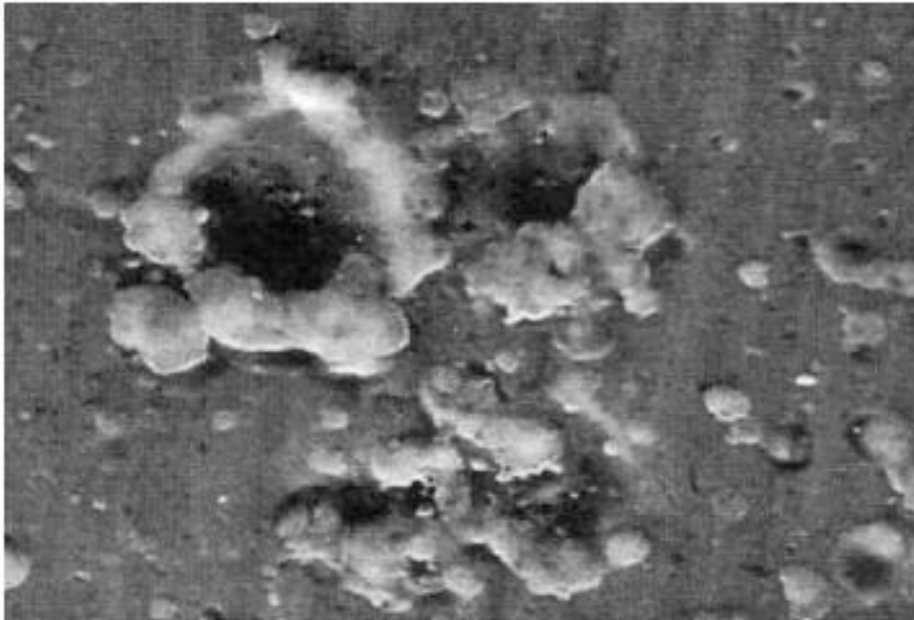


# Funkenerosion

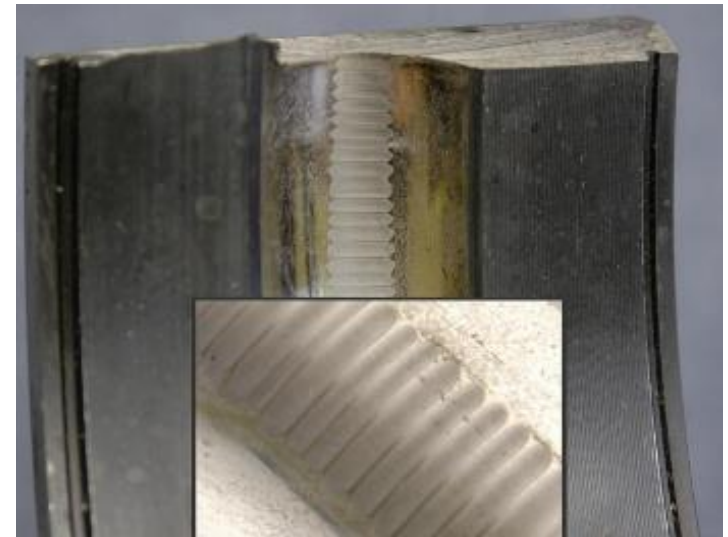


TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Prinzip der Funkenerosion bei Lagerschädigung



Typisches Riffelmuster bei  
Abrollbewegung der Wälzkörper



Ursache:

Hochfrequente Ströme durch Wechselrichteransteuerung bei elektrischen Maschinen

Quelle: <http://www.zvrrail.de/news/schutz-von-frequenzgesteuerten-traktionsmotoren-vor-schaedlichen-lagerstroemen>  
Aufgerufen am 30.06.2017, 11:55 Uhr





1. Einführung
  1. Elektrothermische Verfahren: Vorteile, Eigenschaften, Einsatzbereiche
  2. Technische und energiewirtschaftliche Bedeutung elektrothermischer Verfahren



# Energiebedarf in der Bundesrepublik Deutschland in 2017



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Energieträger im Folgenden aufgeteilt nach:

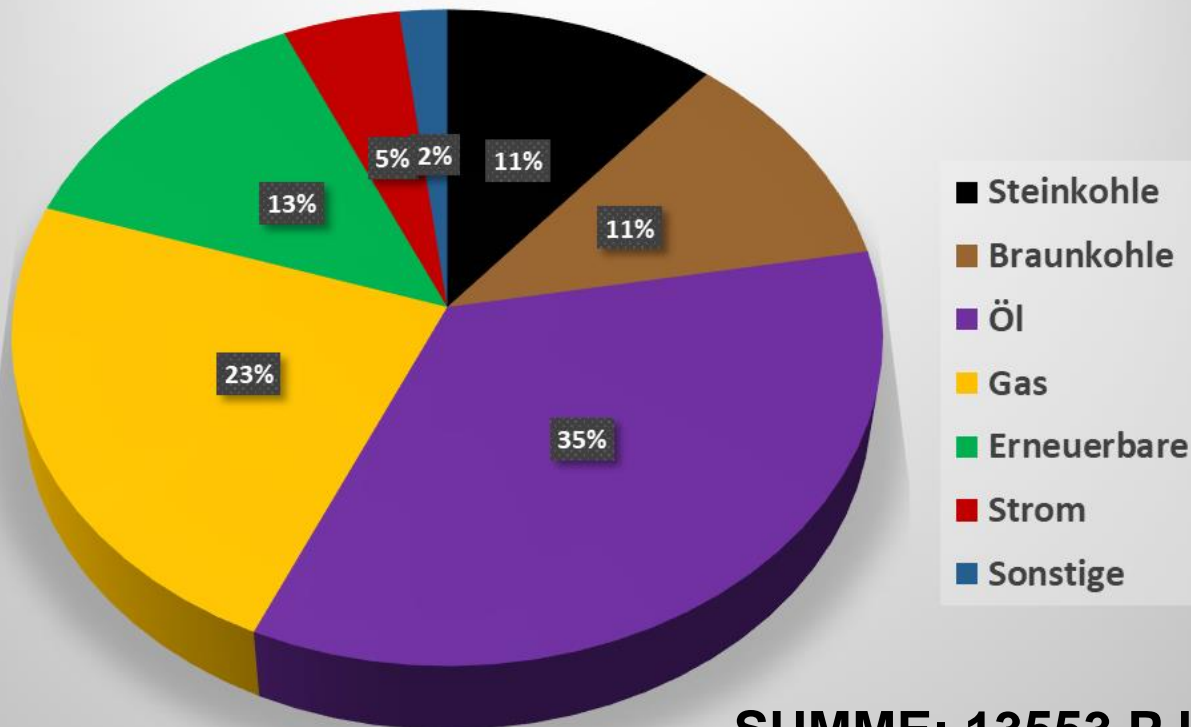
- **Steinkohle**: Kohle, Briketts, Koks, Sonstige
- **Braunkohle**: Kohle, Briketts, Sonstige
- **Mineralöle**: Rohöl, Diesel, Benzin, Kerosin, Heizöl, Sonstige
- **Gase**: Erdgas, Grubengas, Sonstige
- **Erneuerbare Energien**: Wasserkraft, Windkraft, Photovoltaik, Biomasse, Sonstige
- **Strom und andere Energieträger**: Strom, Kernenergie, Fernwärme
- **Sonstige Energieträger**

Quelle: AG Energiebilanzen „Bilanz 2017“, <https://ag-energiebilanzen.de/7-0-Bilanzen-1990-2017.html> (10.12.2019)



# Energiebedarf in der Bundesrepublik Deutschland in 2017

## Primärenergieverbrauch



**SUMME: 13553 PJ**

Strom ist kein Primärenergieträger. Statistisch gilt aber importierter Strom als Primärenergie.

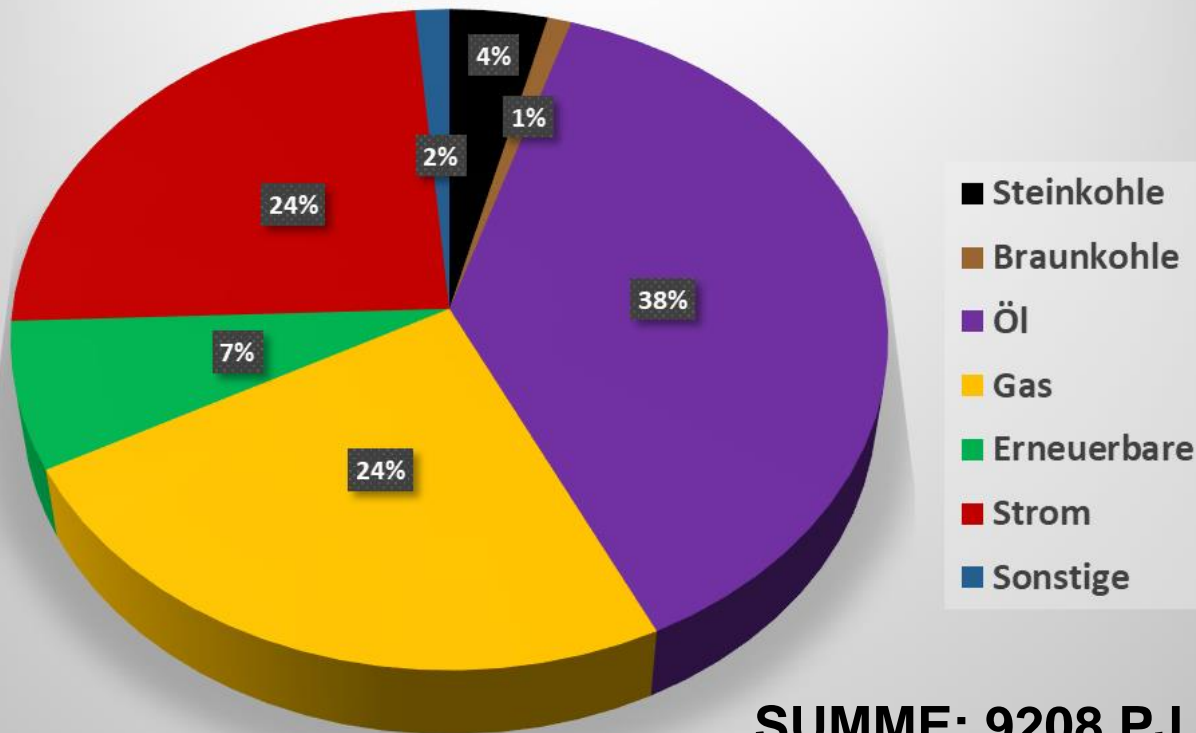
Der hier aufgeführte Anteil beschreibt größtenteils importierten Strom aus Kernenergie.

Quelle: AG Energiebilanzen „Bilanz 2017“, <https://ag-energiebilanzen.de/7-0-Bilanzen-1990-2017.html> (10.12.2019)



# Energiebedarf in der Bundesrepublik Deutschland in 2017

## Endenergieverbrauch

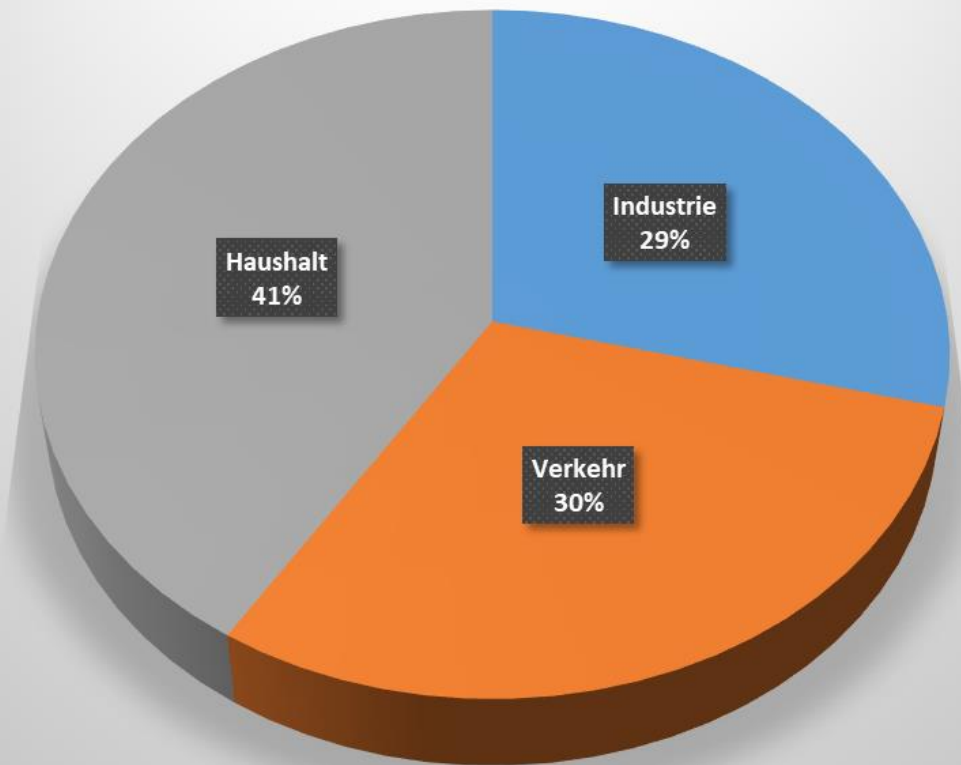


Anteil des Stroms hat sich deutlich erhöht, wohingegen Kohlen stark zurückgegangen sind. Hintergrund: Stromerzeugung in Kohlekraftwerken.

Quelle: AG Energiebilanzen „Bilanz 2017“, <https://ag-energiebilanzen.de/7-0-Bilanzen-1990-2017.html> (10.12.2019)

# Energiebedarf in der Bundesrepublik Deutschland in 2017

## Endenergieverteilung



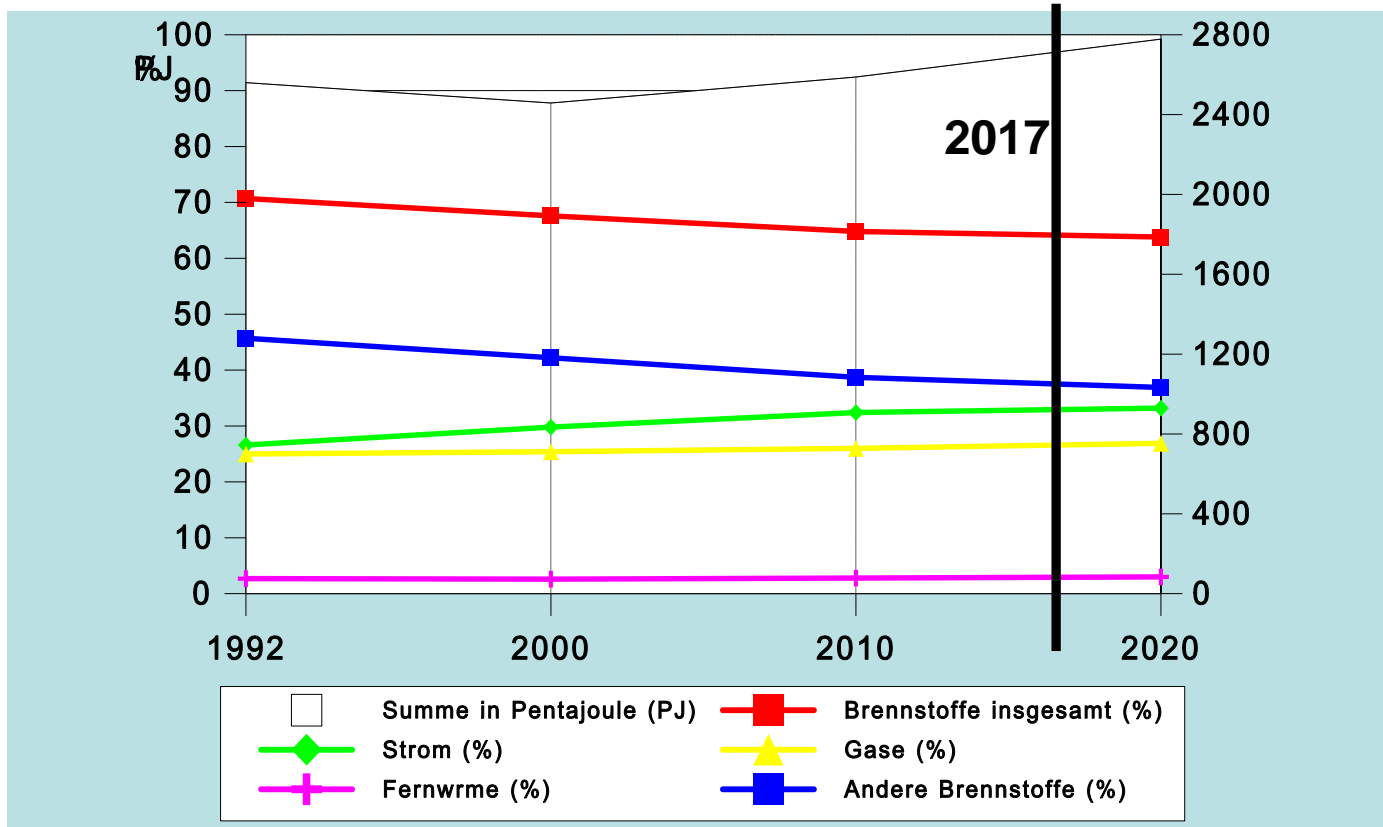
**SUMME: 9208 PJ**

Verkehr fasst ausschließlich durch Mineralöl.  
Haushalt (inkl. Handel, Gewerbe und Dienstleistungen) große Anteile an Gas, Strom und Öl.

Industrie:  
Absolut: 2666 PJ  
Davon durch Kohle, Öl, Gas: 1558 PJ  
Durch Erneuerbare und Strom: 1108 PJ

Quelle: AG Energiebilanzen „Bilanz 2017“, <https://ag-energiebilanzen.de/7-0-Bilanzen-1990-2017.html> (10.12.2019)

# Endenergiebedarf der deutschen Industrie Prognose aus 2006



Quelle: Prognos

- Anteil der Brennstoffe von 71% auf 64% rückläufig
- Substitution einiger fester Brennstoffe durch Gase
- Anstieg des Strombedarfs von 27% auf 33%



# Endenergiebedarf der deutschen Industrie

## Prognose aus 2006

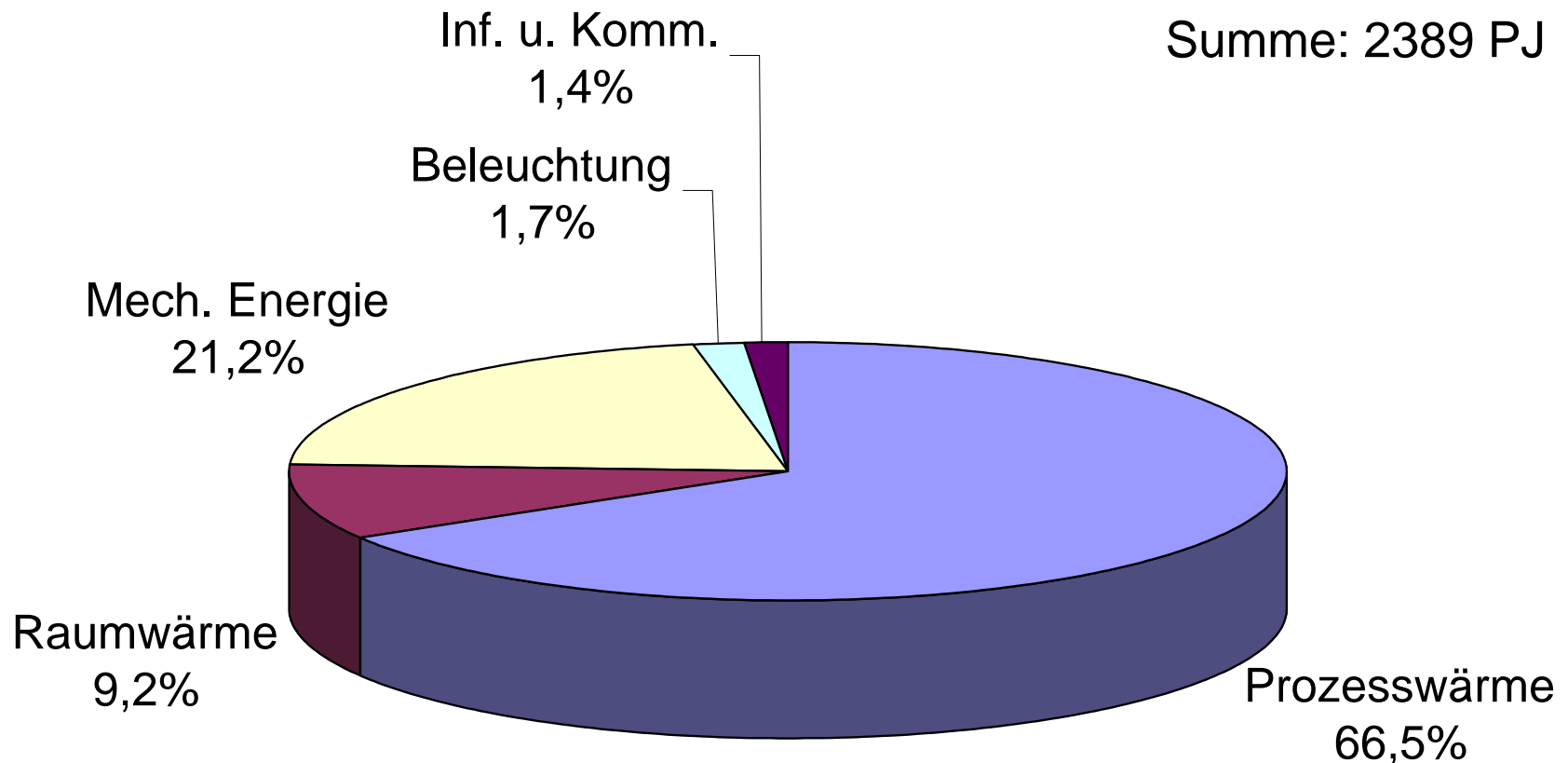


TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

In PJ	Prognose	Werte 2017
Gesamt	2700	2666
Gase	800	940
Sonstige Brennstoffe	950	648
Fernwärme, Ern.Energ.	100	115
Strom	850	993



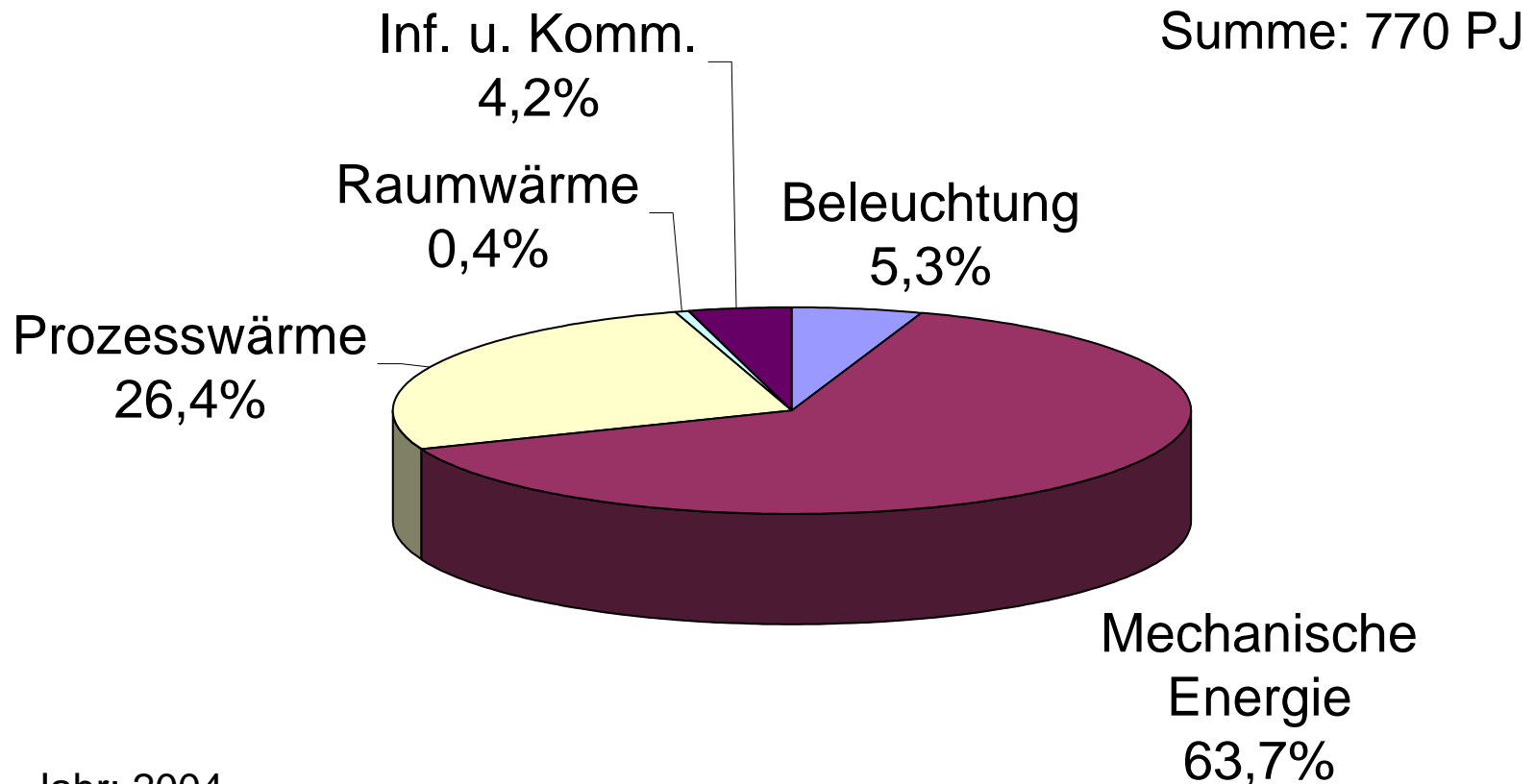
# Endenergiebedarf der deutschen Industrie



Jahr: 2004

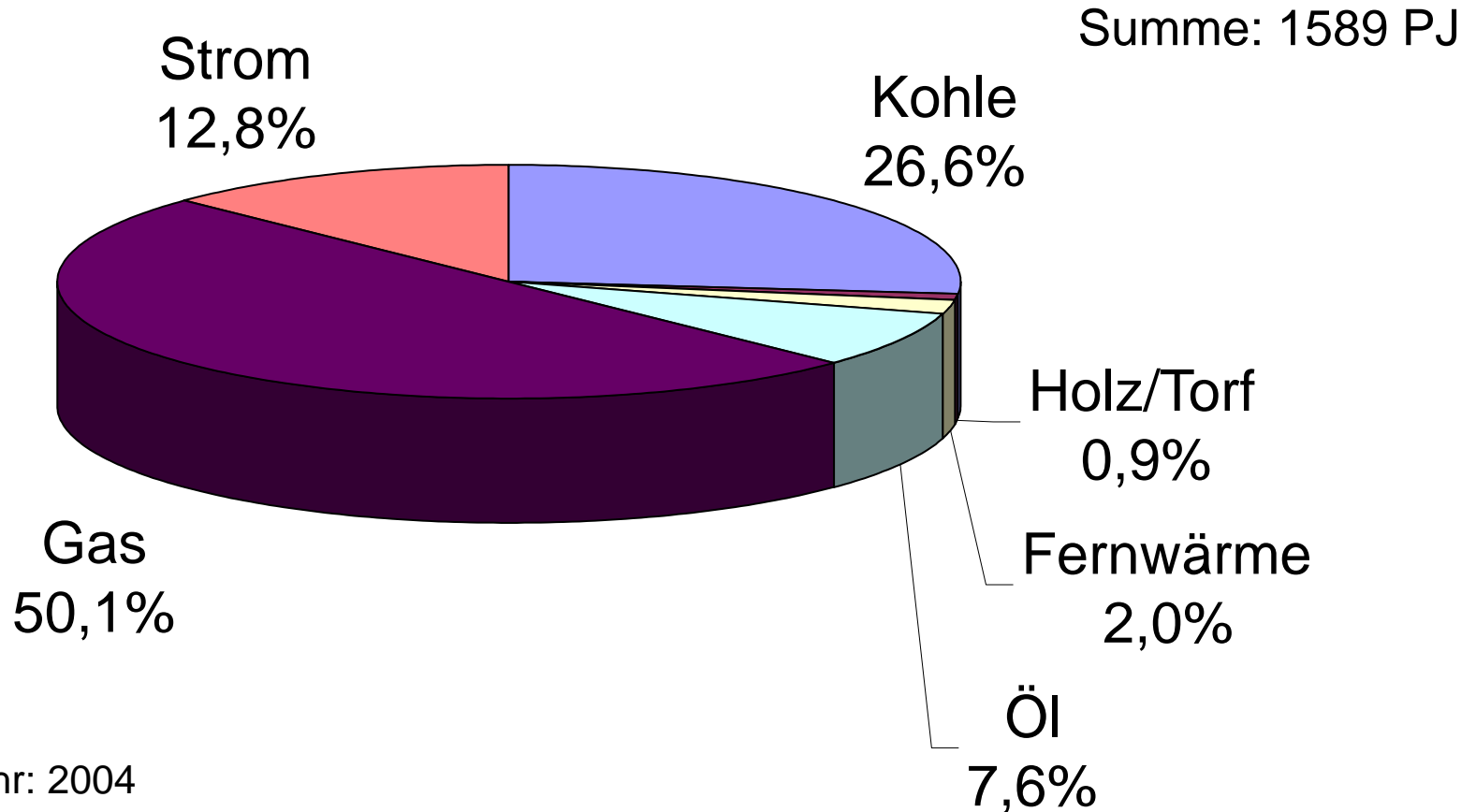
Quelle: AG Energiebilanzen, VDEW-Projektgruppe Nutzenergiebilanzen, IfE / TU München (2006)

# Anwendungsbereiche elektrischer Energie in der deutschen Industrie



Quelle: AG Energiebilanzen, VDEW-Projektgruppe Nutzenergiebilanzen, IfE / TU München (2006)

# Energiestruktur im Bereich industrielle Prozesswärme

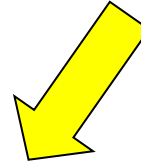
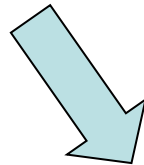


Quelle: AG Energiebilanzen, VDEW-Projektgruppe Nutzenergiebilanzen, IfE / TU München (2006)

# Bewertungskriterien für ein Prozesswärmeverfahren

- Wirtschaftlichkeitskennzahlen
  - Investitionsausgaben
  - Energiekosten
  - Betriebsnebenkosten

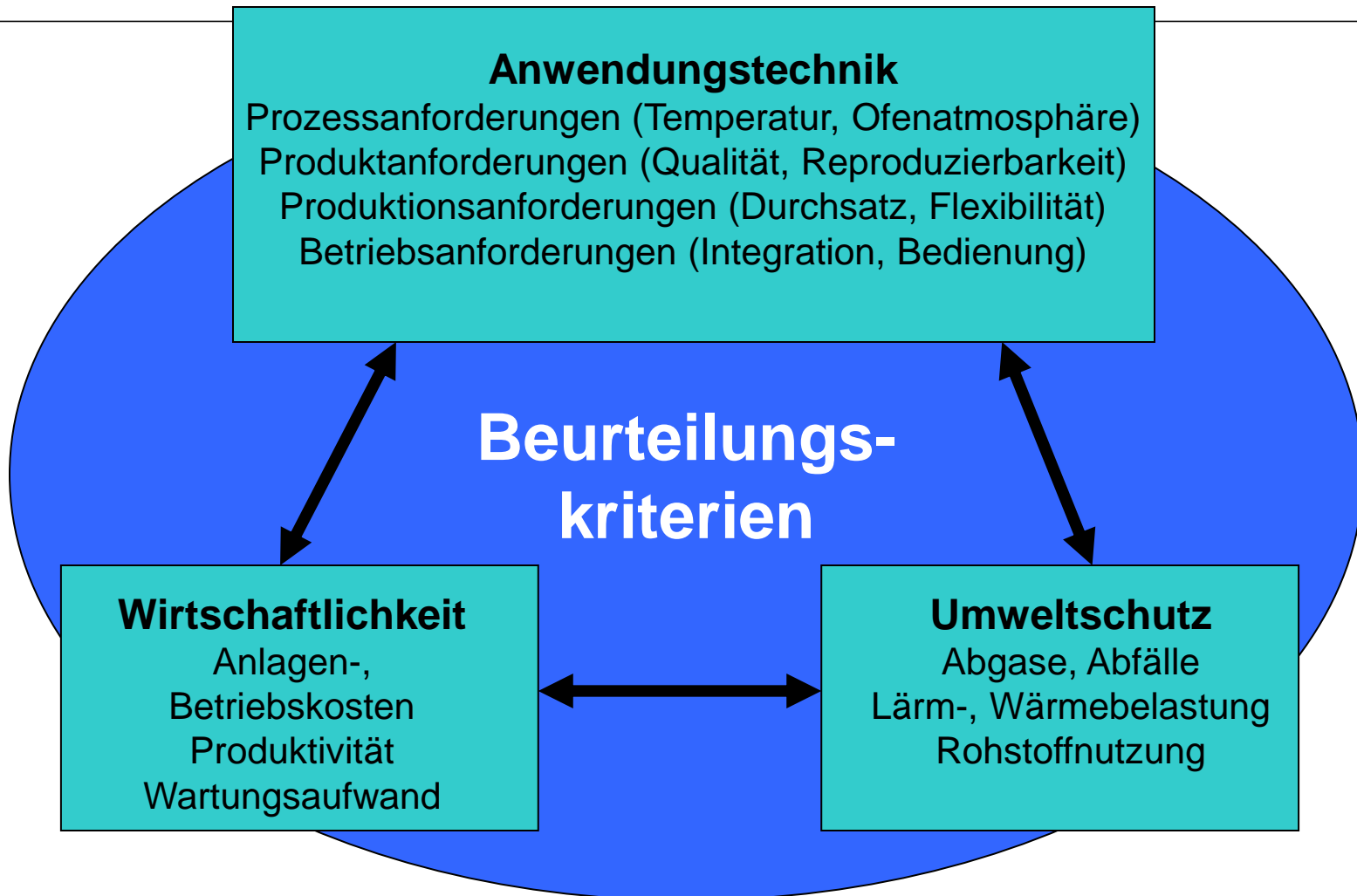
- Energie- und Rohstoffnutzung
- Produktqualität
- Betriebsflexibilität
- Stoffrecycling
- Umweltverträglichkeit
- Arbeitsbedingungen



steigende Wertschätzung  
und zunehmender Einsatz  
industrieller elektrothermischer Verfahren



# Aspekte beim Vergleich konkurrierender Prozesswärmeverfahren



Für die Kostenanalyse zu berücksichtigende **Eigenschaften** der konkurrierenden Verfahren bzw. Anlagen

- **Prozesstechnische** Eigenschaften
- Eigenschaften des **Produktes**
- Art und Menge des benötigten **Energieträgers**
- **Betriebsverbrauch**

Für die Kostenanalyse zu berücksichtigende **Kostenanteile**:

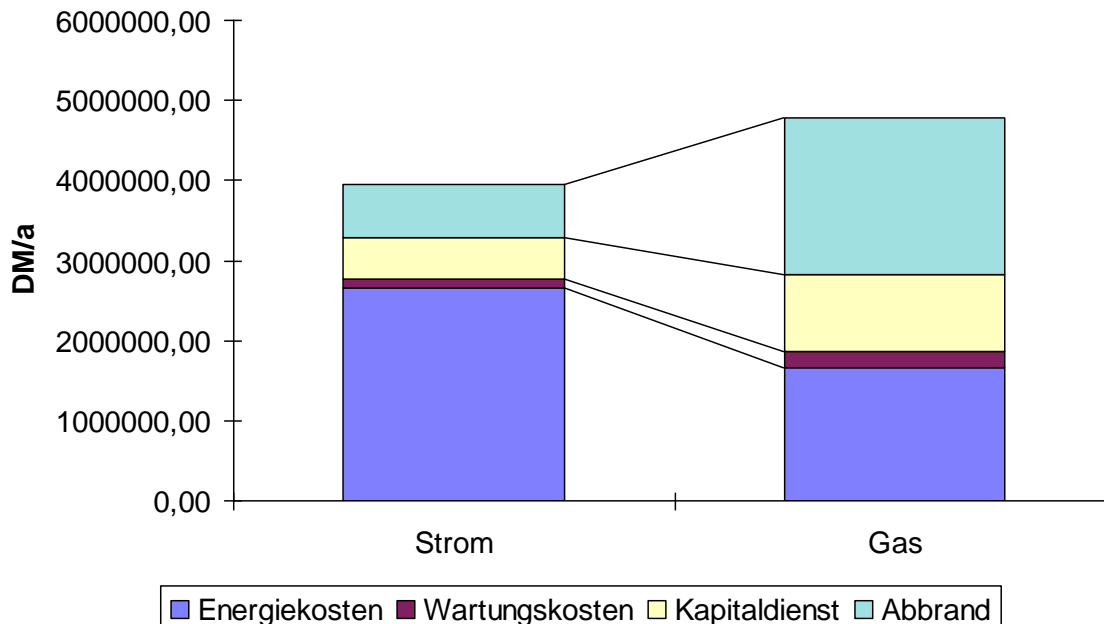
- **Investitionskosten**
- **Materialkosten**
- **Betriebskosten**
- **Personalkosten**

**Wichtig:** Prüfung und Bewertung muss für jeden Einzelfall *separat* erfolgen!

# Jahreskostenvergleich beim Schmelzen von Aluminium

Berechnungsgrundlage: Schmelzleistung 7 t/h  
Jahresbetriebszeit 5000 h

**Jahreskostenvergleich**  
Induktions-Rinnenofen / Erdgas-Zweikammerofen



**Induktions-Rinnenofen:**

**Metallabbrand: 1 %**

Strompreis: 0,07 €/kWh  
(Leistung 4 MW, Jahresbetriebsdauer 5000 h)

**Erdgas-Zweikammerofen:**

**Metallabbrand: 3 %**

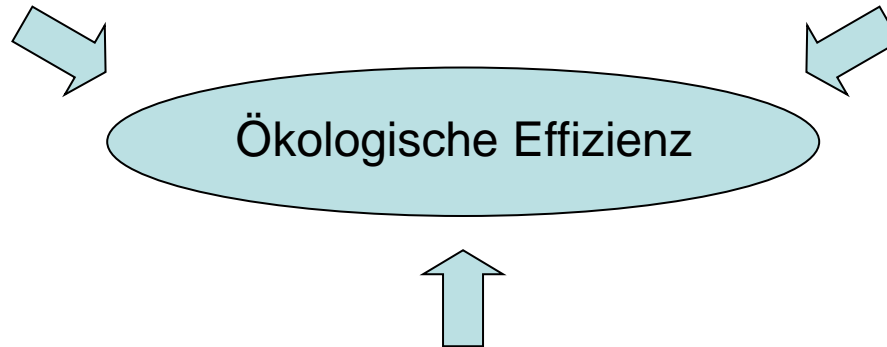
Gaspreis: 0,017 €/kWh  
Strompreis: 0,075 €/kWh  
(Leistung 2 MW, Jahresbetriebsdauer 5000 h)

## Energie und Rohstoffe

- ressourcenschonende Energienutzung
- gute Abwärmenutzung
- gute Rohstoffnutzung
- Recyclingmöglichkeiten

## Emissionen

- Reduzierung von CO, CO<sub>2</sub> und CH<sub>x</sub>
- Reduzierung von NO<sub>x</sub> und SO<sub>x</sub>
- Verringerung von Rauch und Staub
- Vermeidung von Abfällen



## Arbeitsbedingungen

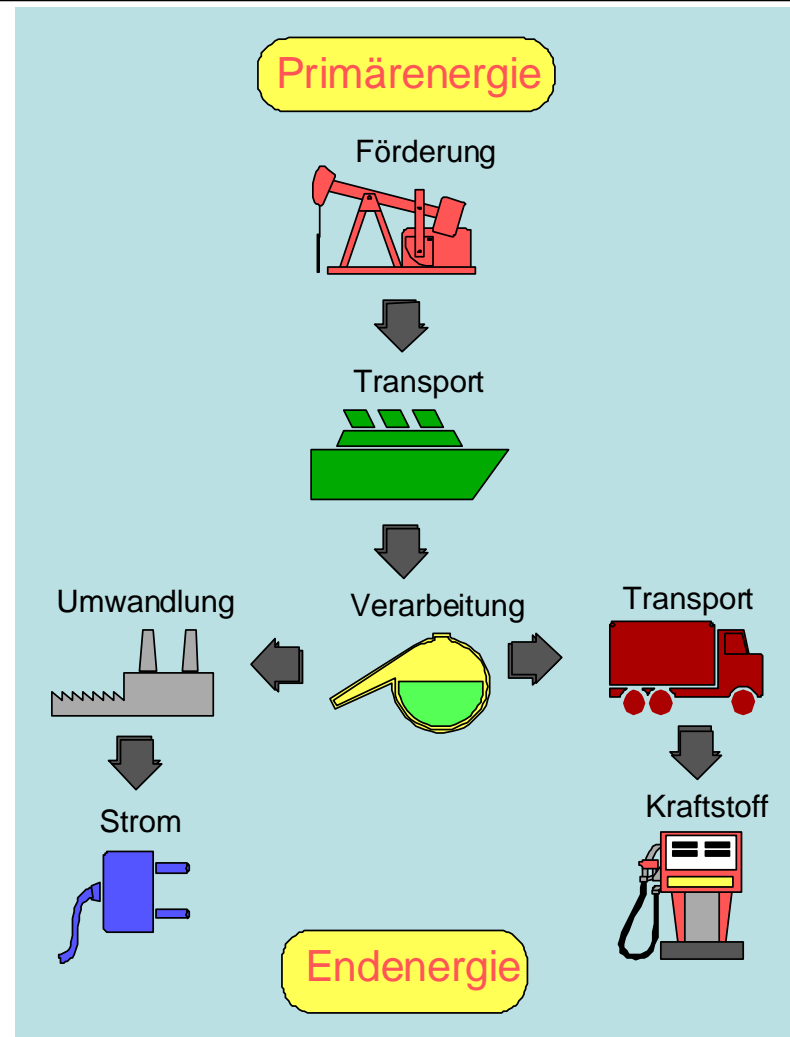
- verringerte Wärmeabgabe
- Lärmreduzierung
- Reduzierung der Abgase
- einfache Anlagenbedienbarkeit

- Endenergie
- Primärenergie
- CO<sub>2</sub>-Emissionen
  
- Direkter Energiebedarf
  - Energiebedarf einzelner Prozessschritte, z. B. Schmelzen von Metallen, Erwärmen zur anschließenden Umformung
  
- Vergegenständlichte Energie
  - energetische Beurteilung von Materialverlusten, z. B. Abbrand beim Schmelzen, Zunder bei der Schmiede-Erwärmung
  - kumulative Energie eines Materials bzw. eines Produktes
  - Bestimmung durch Prozesskettenanalyse (VDI 4600)

# Energetische Prozesskette



Energetische Prozesskette  
zur Umrechnung zwischen  
End- und Primärenergie sowie  
endenergiebezogener  
CO<sub>2</sub>-Emissionen





# Elektrothermische Verfahren im Vergleich zu konkurrierenden Verfahren

- Wesentliche Eigenschaften Elektrothermischer Verfahren (EV)
  - Erzeugung sehr hoher Temperaturen möglich
  - sehr hohe Leistungsdichten
  - Wärmeentwicklung unmittelbar im Werkstück
- Spezifische Eigenschaften der elektrischen Energie beim Einsatz für EV
  - Verfügbarkeit, unabhängig von Ort und Zeit  
(Einschränkungen beim Benötigen sehr hoher Leistungen möglich)
  - gleichbleibende Energieeigenschaften
  - leichte Messbarkeit der Energie
  - leichte Dosierbarkeit

# Elektrothermische Verfahren im Vergleich zu konkurrierenden Verfahren



- Technisch-wirtschaftliche Vorteile
  - anpassungsfähige und genaue Temperaturregelung
  - einfacher Betrieb und leichte Automatisierbarkeit
  - hohe Materialqualitäten erreichbar
  - hohe Wirkungsgrade erreichbar
  - hohe Materialdurchsätze möglich
  - Flexibilität
  
- Spezifische Eigenschaften Elektrothermischer Verfahren
  - Erwärmung im Volumen selbst
  - Begrenzung auf genau definierte lokale Erwärmung im Volumen
  - Durchmischung von Schmelzen
  - Wahl der Ofenatmosphäre, Vakuum





Historische Legitimation laufender, konventioneller Prozesse

→ Umstellung auf EV-Prozess nur möglich, wenn (langfristig) wirtschaftlich

Kriterien:

1a.) Prozess muss TROTZ Wechsel auf EV gewährleistet bleiben

1b.) Prozess soll WEGEN Wechsel auf EV ermöglicht werden

2.) Kosten für Prozess dürfen (langfristig) nicht die Kosten übersteigen, die durch den Einsatz eines konventionellen Prozesses entstünden

3.) Rechtliche Rahmen müssen eingehalten werden

4.) Wettbewerbsfähigkeit soll gestärkt werden (Innovationsvorsprung, Kosten, Attraktivität für Mitarbeiter, usw.)





Ob ein Prozess realisiert/umgestellt werden kann und welcher Benefit dadurch entsteht, lässt sich durch numerische Simulation analysieren.

Da Entwicklungsschritte/Prototypen/Energiebedarf usw. bereits an Computermodellen untersucht werden können, lässt sich eine Prognose auf die Wirtschaftlichkeit ableiten.

Simulation hilft dabei:

- Entwicklungskosten zu reduzieren
- Entwicklungszeiten zu kürzen
- Komplexität zu beherrschen
- Innovation voranzutreiben
- Produktrisiken zu vermeiden
- Produktqualität zu erhöhen



- Elektrothermische Verfahren (EV) stark im industriellen Bereich verbreitet
- EV ebenfalls stark im Haushalt verbreitet, Verfahren jedoch weniger hoch technisiert
- EV haben Zukunft:
  - weniger klassische Verfahren (Schmelzen, Rohmaterial-Erzeugung)
  - mehr innovative Verfahren (Ind. Erwärmung, HF-Erwärmung)
  - abhängig vom Verhältnis Strompreis / Preis fossiler Brennstoffe
- EV beinhalten oft hoch komplexe Vorgänge:
  - Beherrschbarkeit mit modernen Rechenmethoden
  - Lösung häufig nur interdisziplinär möglich  
(Elektrotechnik, Physik, Werkstoffkunde, Verfahrenstechnik)
- Simulation als Werkzeug zur Auslegung/Verbesserung von Prozessen und Produkten