



Technische  
Universität  
Braunschweig

Institut für Werkzeugmaschinen  
und Fertigungstechnik **iWF**



# Vorlesung Fertigungstechnik

Prof. Dr.-Ing. Klaus Dröder, 28. Mai 2018

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik



Technische  
Universität  
Braunschweig

Institut für Werkzeugmaschinen  
und Fertigungstechnik **iWF**



## Kapitel 4.4: Abtragen

Dr.-Ing. Anke Müller, 28. Mai 2018

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik

# Einheiten der Vorlesung Fertigungstechnik

## Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580



# Einheiten der Vorlesung Fertigungstechnik

## Trennen – Abtragen



# Ziele der heutigen Vorlesung



## ZIELE

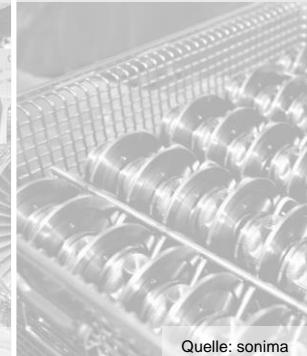
- Verfahrenseinteilung erlernen
- Kennenlernen der Wirkprinzipien
- Kennenlernen der unterschiedlichen Verfahren

Quelle: Gabele Formenbau

# Unterteilung des Fertigungsverfahrens Trennen

## Gruppen des Trennens nach DIN 8580

### Unterteilung der Hauptgruppe Trennen nach DIN 8580

Zerteilen	Spanen mit geom. bestimmter Schneide	Spanen mit geom. unbestimmter Schneide	Abtragen	Zerlegen	Reinigen
					

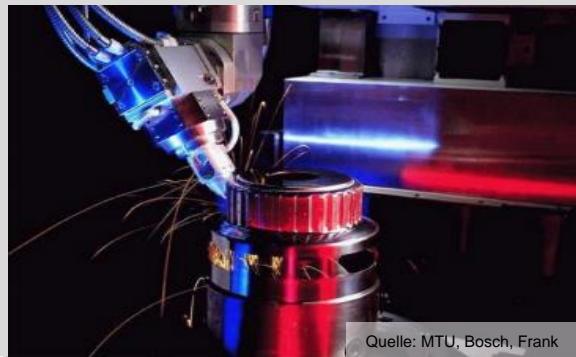
**Fertigen durch Abtrennen** von Stoffteilchen von einem festen Körper auf nichtmechanischem Wege bezieht sich auf das Entfernen von Werkstoff-Schichten sowie Abtrennen von Werkstückteilen.

# Definition und Einordnung in die Fertigungsverfahren

## Ausgewählte Untergruppen des Abtragens nach DIN 8590

### Abtragen

#### Thermisch



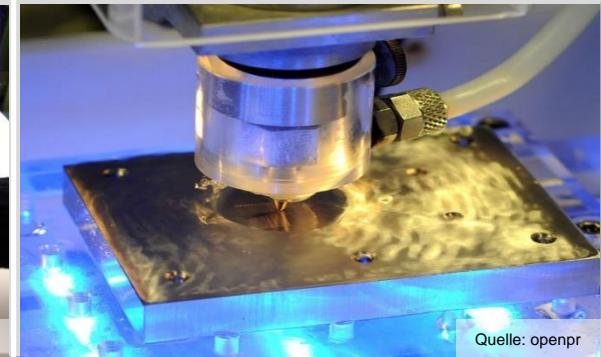
Quelle: MTU, Bosch, Frank

#### Chemisch



Quelle: wikipedia

#### Elektrochemisch



Quelle: openpr

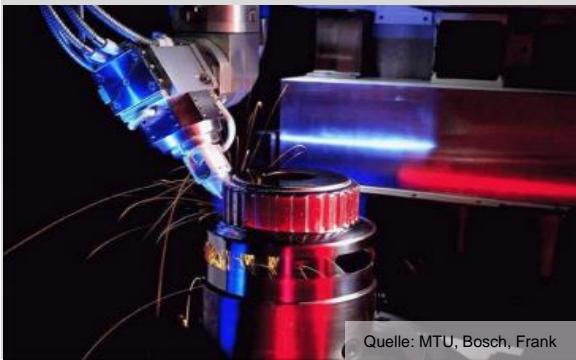
**Fertigen durch Abtrennen** von Stoffteilchen von einem festen Körper auf nichtmechanischem Wege bezieht sich auf das Entfernen von Werkstoff-Schichten sowie Abtrennen von Werkstückteilen.

# Definition und Einordnung in die Fertigungsverfahren

## Ausgewählte Untergruppen des Abtragens nach DIN 8590

### Abtragen

#### Thermisch



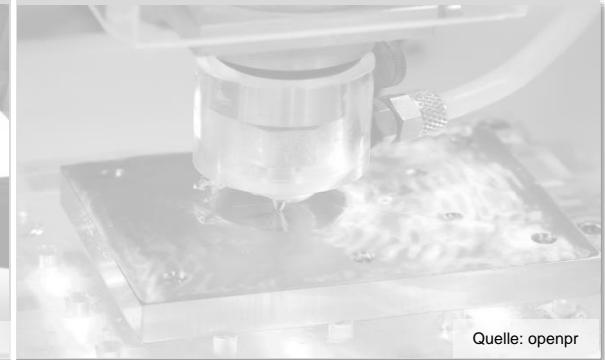
Quelle: MTU, Bosch, Frank

#### Chemisch



Quelle: wikipedia

#### Elektrochemisch



Quelle: openpr

**Abtrennen** von Werkstoffteilchen in festem, flüssigem oder gasförmigem Zustand durch Wärmevorgänge sowie Entfernen dieser durch mechanische und/oder elektromagnetische Kräfte.

# Thermisches Abtragen

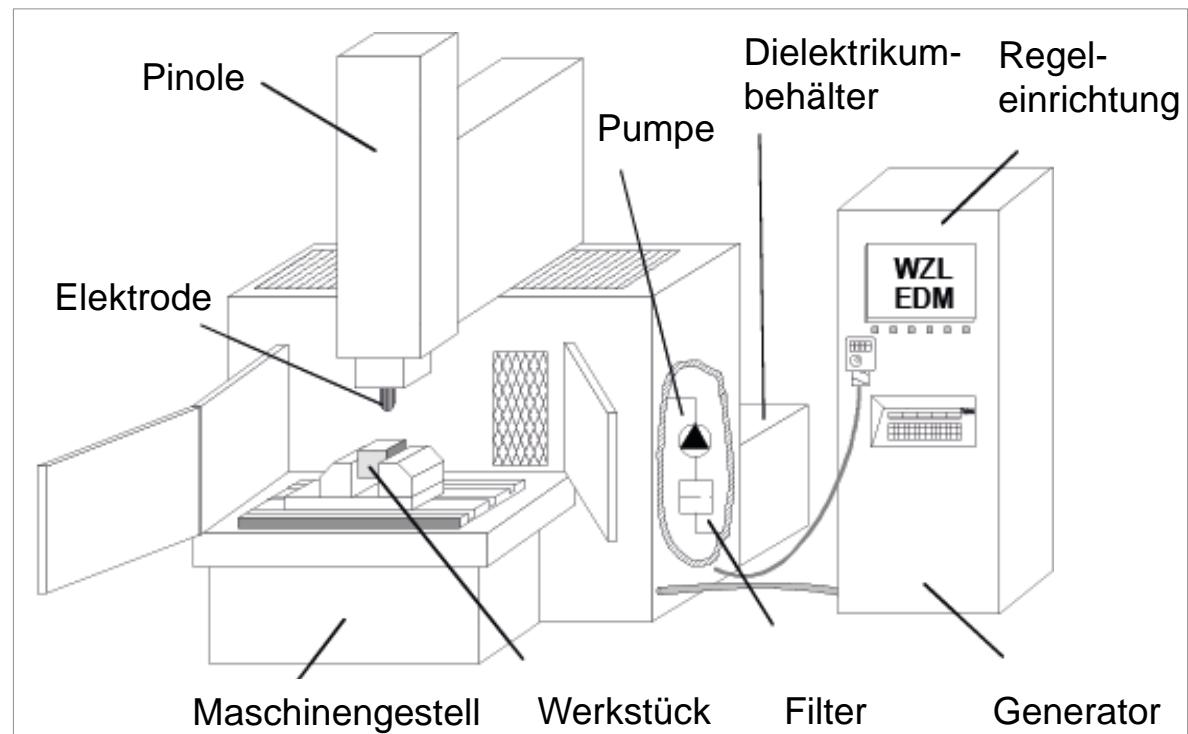
## Funkenerosion | Electrical Discharge Machining (EDM)

### Anlagenaufbau und Eigenschaften:

Thermisches Abtragverfahren, bei dem die an der Wirkstelle erforderliche Wärme durch eine elektrische Funkenentladung auf das Werkstück übertragen wird.

### Eigenschaften der EDM:

- Unabhängig von mechanischen Eigenschaften der Werkstückmaterialen (z. B. E-Modul, Härte)
- zu bearbeitender Werkstoff muss elektrisch Leitfähig sein



Quelle: Mayr

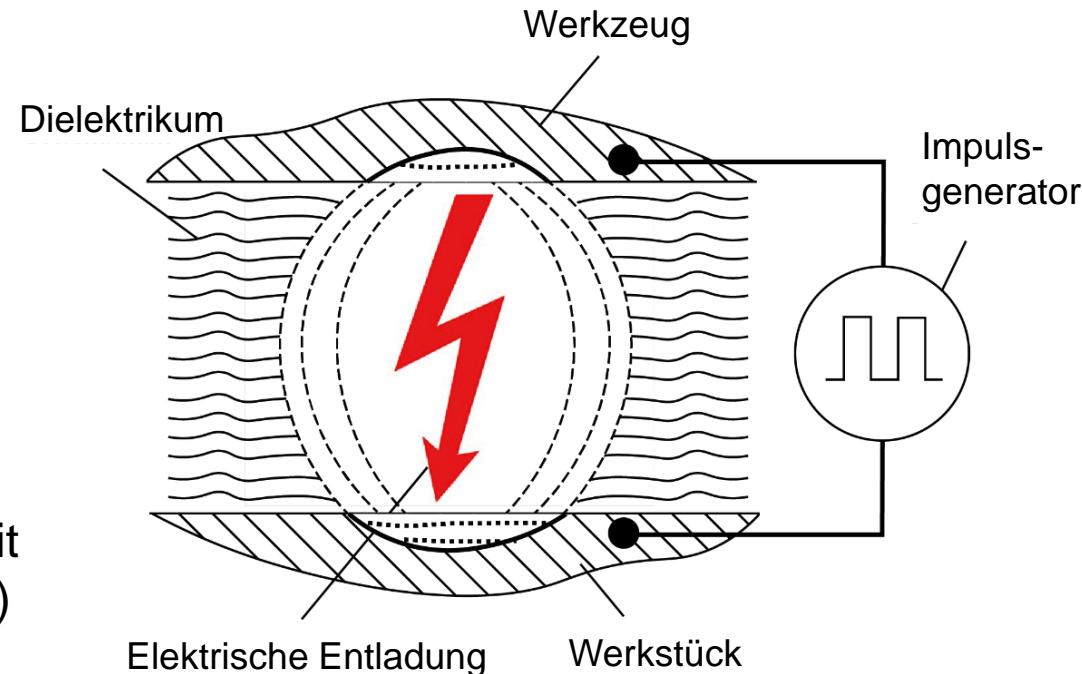


# Thermisches Abtragen

## Funkenerosion | Electrical Discharge Machining (EDM)

### Abtragprinzip bei der Funkenerosion:

- Der Abtragprozess findet in einer elektrisch nichtleitenden (dielektrischen) Flüssigkeit statt.
- Werkstück und Werkzeug werden in Arbeitsposition gebracht (mit einem verbleibenden Arbeitsspalt dazwischen)
- Bei Anlegung elektrischer Spannung an der Elektrode kommt es nach Überschreiten der Durchschlagfestigkeit des Arbeitsmediums zur Bildung eines energiereichen Plasmakanals  
(Die Durchschlagfestigkeit ist durch den Elektrodenabstand und die elektrische Leitfähigkeit des Dielektrikums vorgegeben)



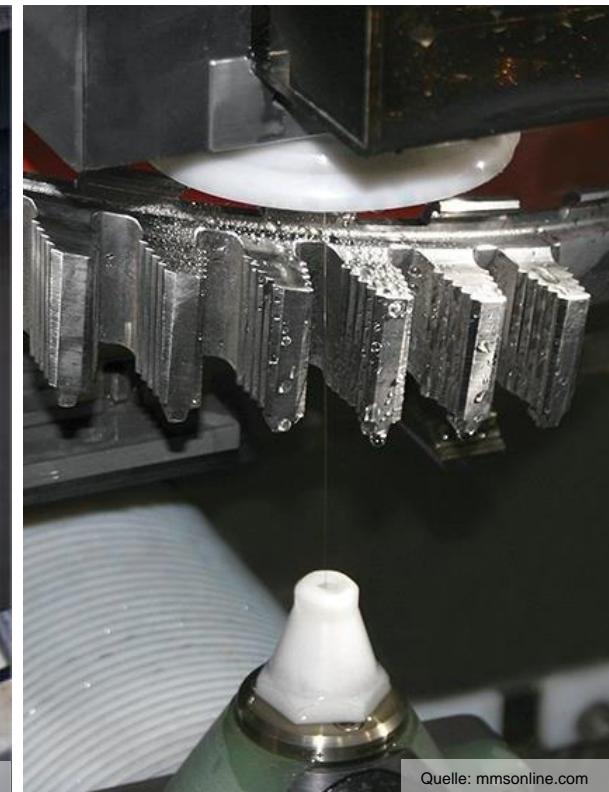
Quelle: Klocke

# Thermisches Abtragen

## Funkenerosion | Electrical Discharge Machining (EDM)

### Verfahrenseigenschaften:

- Abbildendes Verfahren
- Abtrag durch elektrische Entladungen
- Abtragsprozess in dielektr. Flüssigkeit
- Funkenentladung nach Überschreiten der Durchschlagsfestigkeit des Dielektrikums
- Lokales erwärmen von Materialoberflächen über Schmelzpunkt



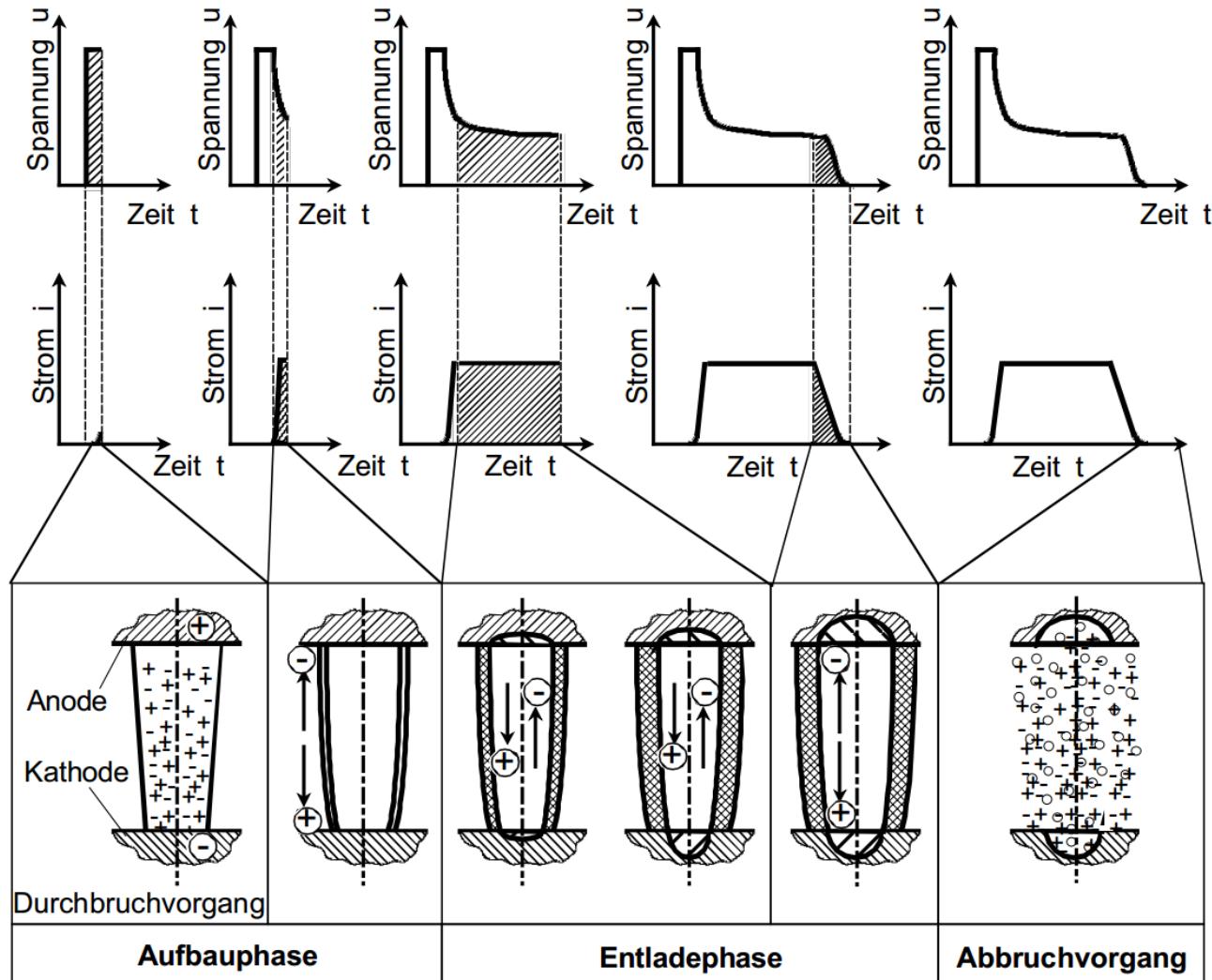
Turbinenscheibenfertigung mit EDM

# Thermisches Abtragen

## Funkenerosion | Electrical Discharge Machining (EDM)

Die drei Hauptphasen:

- Aufbauphase
- Entladephase
- Abbruchvorgang

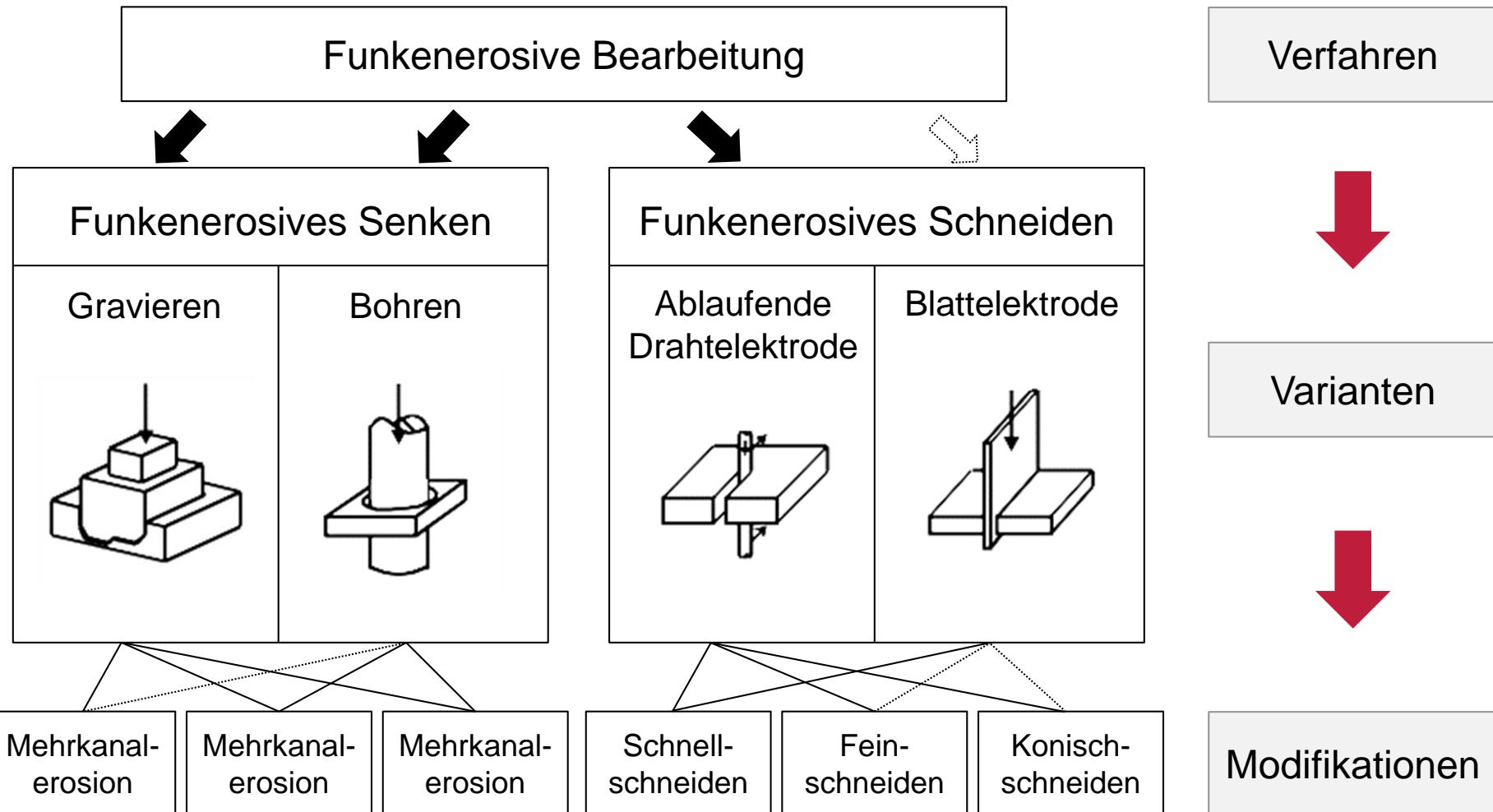


Quelle: Klocke



# Thermisches Abtragen

## Varianten funkenerosiver Bearbeitung



# Thermisches Abtragen

## Funkenerosives Senken | Die-Sinking

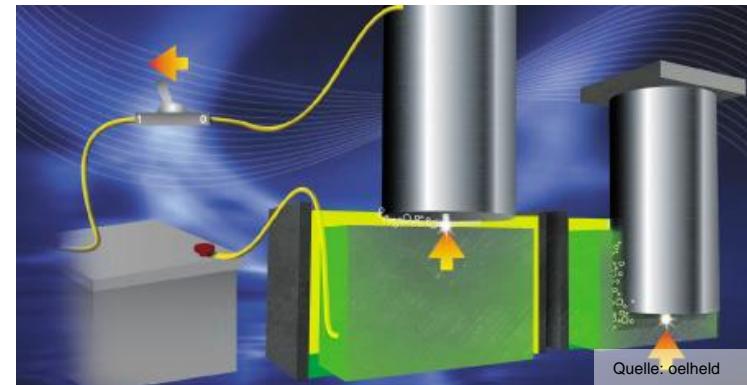
Herstellung von Gravuren und Durchbrüchen mit einer entsprechenden Formelektrode

### Mehrkanalerosion

Höhere Abtragrate

### Planetärerosion

erhöhte Formenvielfalt



Quelle: oelheld

### Bahnerosion

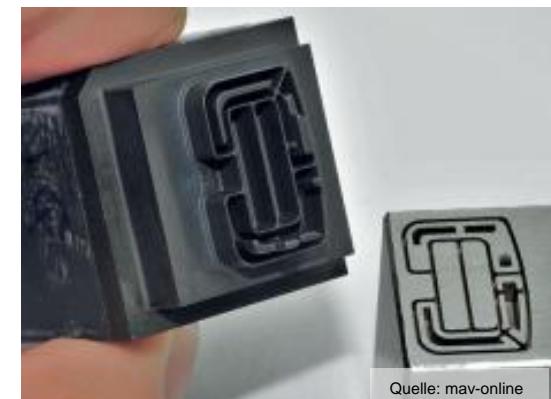
Elektrodenanzahl und –Komplexität verringert

### Prinzip Senkerosion:

Werkzeugelektrode erzeugt Negativform in Werkstück

### Bearbeitungsspektrum:

3D-Formen, Kavitäten, Freiformflächen



Quelle: mav-online

# Thermisches Abtragen

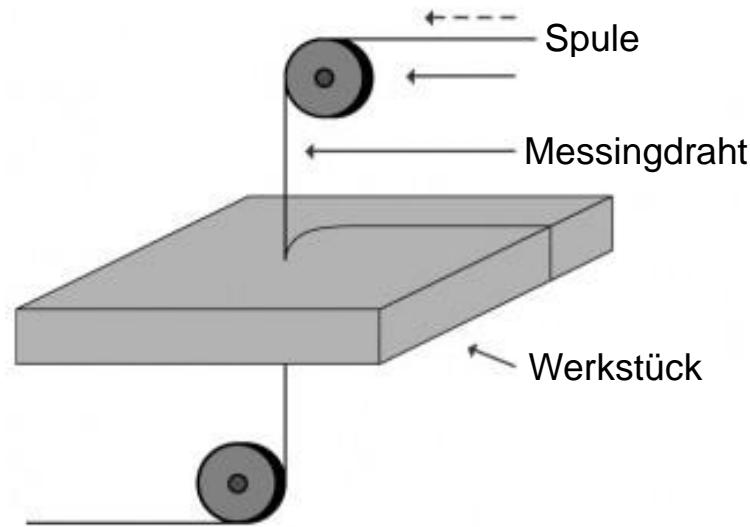
## Drahterosion (Wire-EDM)

### Prinzip Drahterosion (Wire-EDM):

- Ablaufende Drahtelektrode erzeugt Form des Werkstücks durch eine konturgleiche Bahnbewegung
- Kinematik vergleichbar mit Prinzip einer Bandsäge

### Bearbeitungsspektrum:

- 2D-Formen
- Innen- und Außenkonturen
- konische Konturen



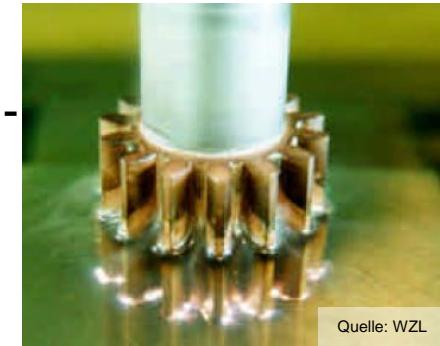
Quelle: erodierzentrum-solingen

# Thermisches Abtragen

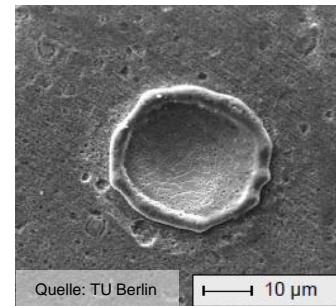
## Funkenerosives Abtragen - Anwendungsbeispiele

### Senkerodieren:

- Spritzgießformen für Zylinderdeckel, Kunststoffflaschen, Uhrengehäuse, PKW-Armaturenbretter
- Spritzdüsen für Tintenstrahldrucker
- Formeinsätze für Mikrogetrieberäder
- Katalysatoren für Mikroreaktoren



Quelle: WZL



Topographie eines bearbeiteten Materials

### Drahterodieren:

- Feinschneidmatrizen (Stanzwerkzeuge)
- Scherköpfe für Rasierapparate
- Profildrehmeißel



Quelle: WZL

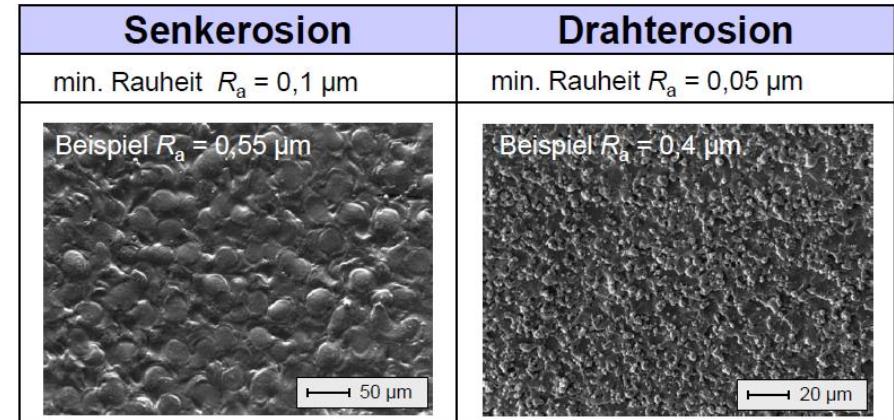
Spritzgusswerkzeug für ein Tropferbauteil einer Bewässerungsanlage

# Thermisches Abtragen

## Vor- und Nachteile des funkenerosiven Abtragens

### Vorteile:

- + Bearbeitung ist unabhängig von Härte und Festigkeit des Werkstückmaterials
- + hohe geometrische Komplexität
- + geringe Fertigungstoleranz
- + Oberflächenrauheit bis zu  $R_a = 0,05 \mu\text{m}$
- + hoher Automatisierungsgrad



Oberflächentopographie -> überlagerte Krater

### Nachteile

- Geringe Abtragrate, deshalb nicht einsetzbar für die Massenproduktion  
(Ausnahme z.B. Fertigung Einspritzdüsen)
- thermische Beeinflussung der Bauteilrandzone
- Entstehung von Sondermüll

# Thermisches Abtragen

## Laser - Definition des Lasers

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

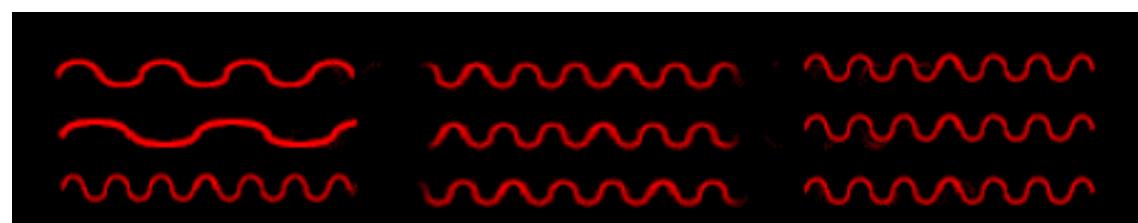
Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung

### Definition nach DIN 8590:

Abtragen, bei dem die an der Wirkstelle erforderliche Wärme durch Energieumsetzung energiereicher Strahlen am oder im Werkstoff entsteht. Als unmittelbarer Energieträger wird hierbei der Laserstrahl verwendet.

### Eigenschaften des Laserstrahls:

- monochromatisch
- kohärent
- hohe Intensität
- geringe Divergenz



Normales Licht

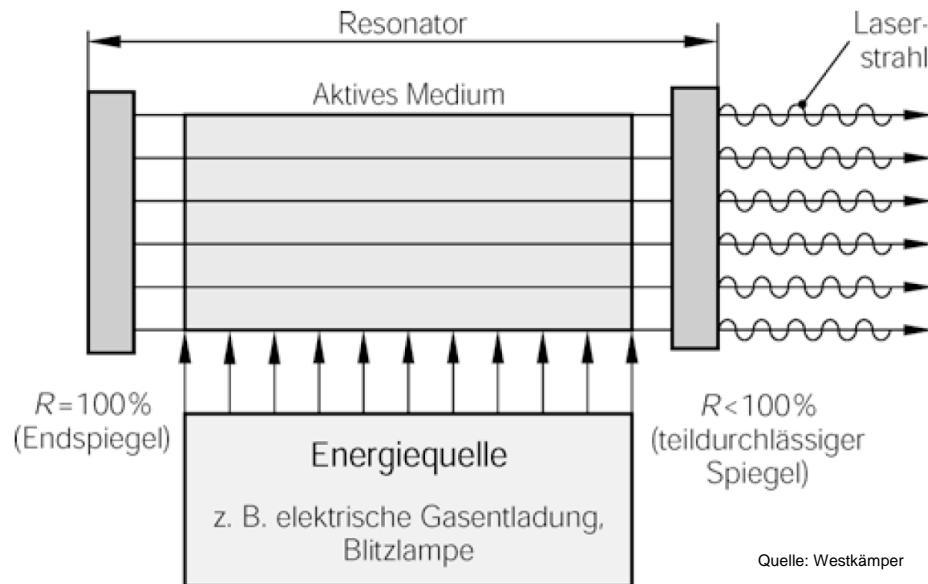
monochromatisch,  
nicht kohärent

monochromatisch  
kohärent

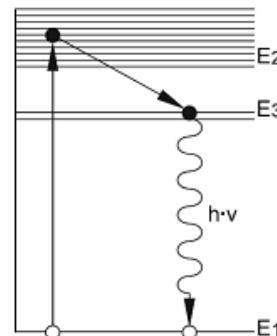
# Thermisches Abtragen

## Erzeugung von Laserstrahlung

- Im Resonator: aktives Lasermedium wird durch Energiezufuhr in E2 überführt (Verweilzeit auf E2 ist sehr kurz)
- Von E2 gehen die Atome ohne Ausstrahlung von Licht in E3 über (Verweilzeit auf E3 ist länger)
- Rücksprung von E3 in E1: Energie in form eines Lichtquants wird umgesetzt
- Wellenlänge des emittierten Lichts: Charakteristisch für das jeweilige Lasermedium
- Pumpen: Zuführen von Energie in form eines E-Feldes oder von optischer Strahlung
- Besetzungsumkehr: Prozess, bei dem durch Energiezufuhr das obere Energieniveau stärker besetzt wird als das untere



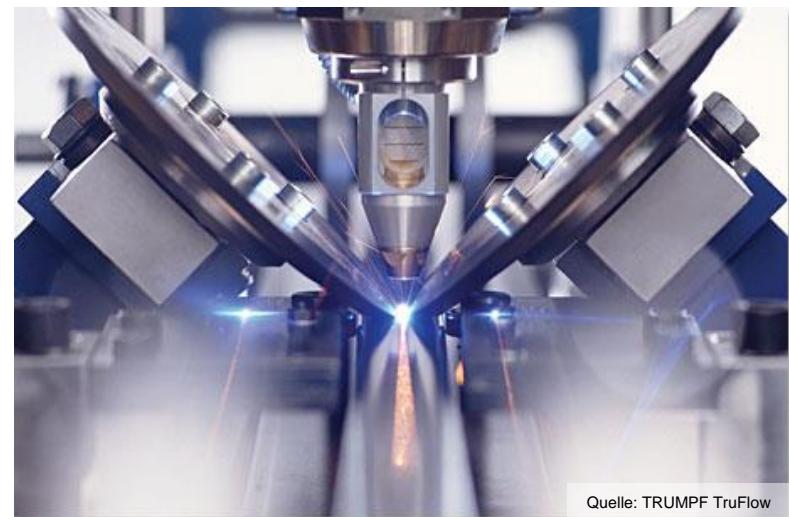
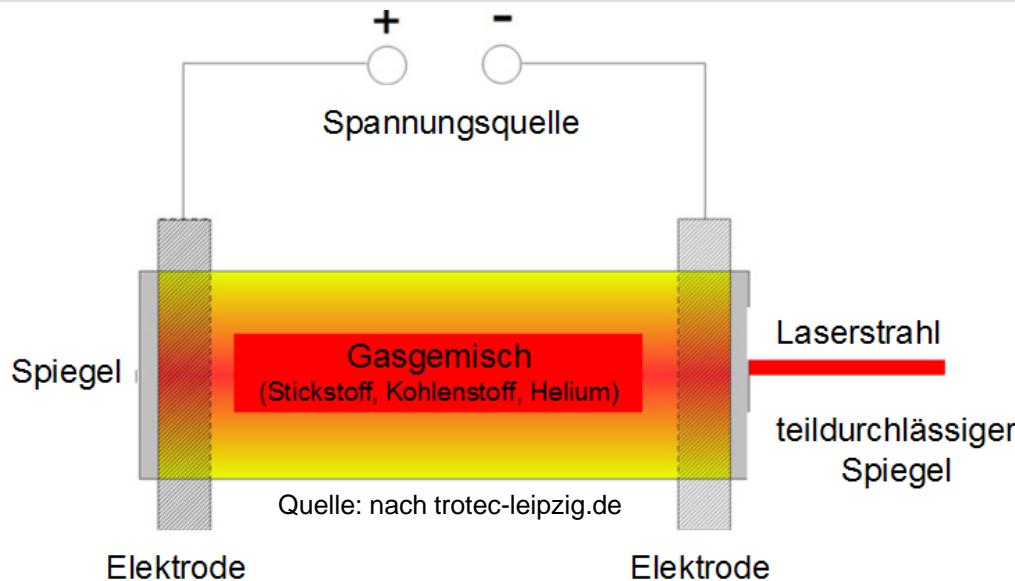
Quelle: Westkämper



$E_1$ : Energetischer Grundzustand  
 $E_2$ : angeregter Zustand  
 $E_3$ : metastabiler Zustand  
 $h \cdot v$  = Photonenenergie

# Thermisches Abtragen

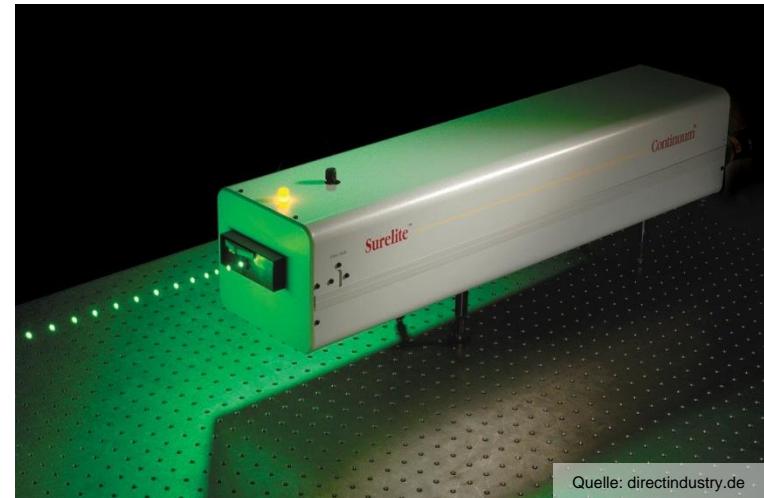
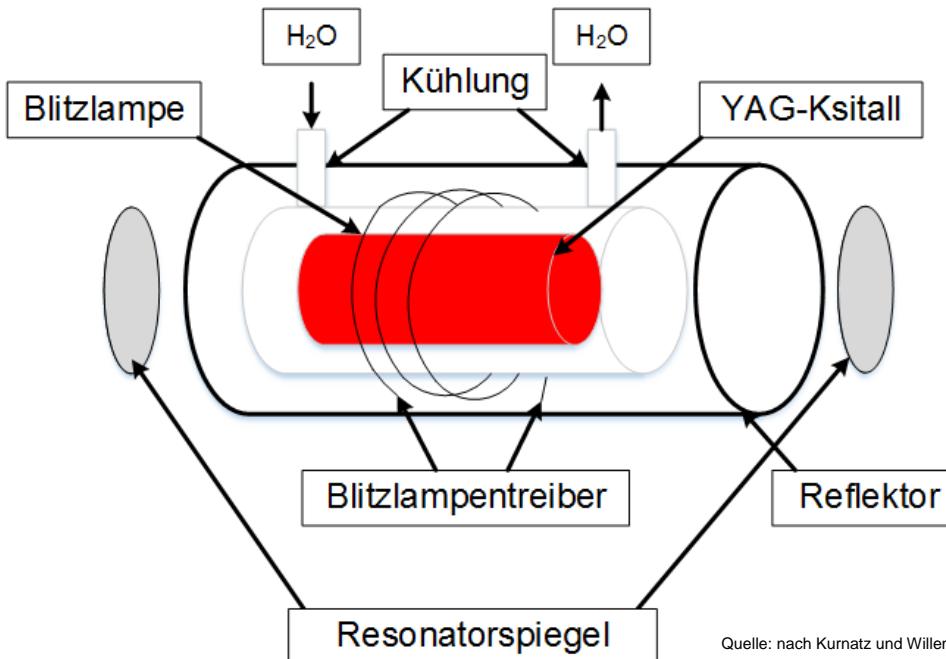
## Aufbau und Funktion des CO<sub>2</sub>- Lasers (Gaslaser)



- Gasgemisch aus He, N<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub>; Laseraktives Medium: CO<sub>2</sub> (Wellenlänge 10,6 µm)
- hohe Gleichspannung oder Hochfrequenz-Wechselspannung → freie Elektronen entstehen durch Gasentladung
- Stöße mit N<sub>2</sub>-Molekülen führen zu Schwingungsanregung
- Energieabgabe der N<sub>2</sub>-Moleküle durch Stöße mit CO<sub>2</sub>-Molekülen
- Anheben in höheres Energieniveau → bei Übergang zurück in das niedrigere Energieniveau senden die CO<sub>2</sub>-Moleküle Laserlicht aus
- Anwendung: Schneiden, Markieren, Schweißen, Bohren, Oberflächen-behandlung

# Thermisches Abtragen

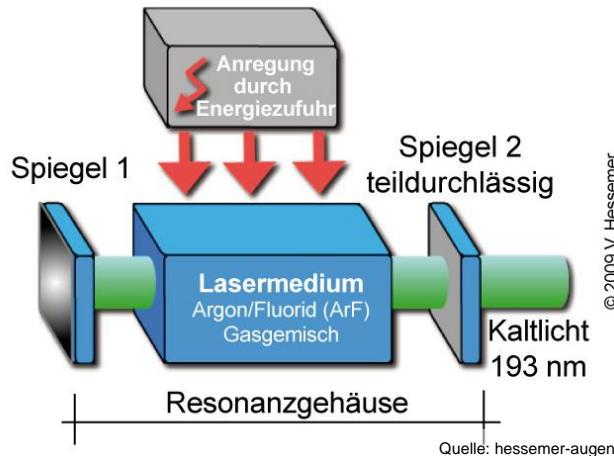
## Aufbau und Funktion des Nd:YAG-Lasers (Festkörperlaser)



- Mit Neodymionen dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Kristall (Wellenlänge 1,06 µm)
- Blitzlampen entwickeln sehr viel Licht
- Energie der Lichtblitze sorgt für die Anregung der Neodymionen
- Neodymionen emittieren bei Rückfall in niedrigeres Energieniveau Laserlicht
- Sobald die Intensität hoch genug ist, tritt der Strahl durch die teilverspiegelte Fläche aus
- Anwendung: Schneiden, Markieren, Schweißen, Bohren, Oberflächen-behandlung

# Thermisches Abtragen

## Aufbau und Funktion des Excimer-Lasers (gepulster Gaslaser)

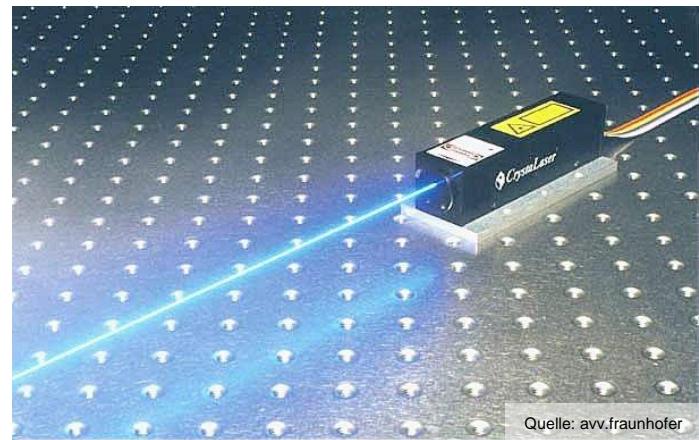
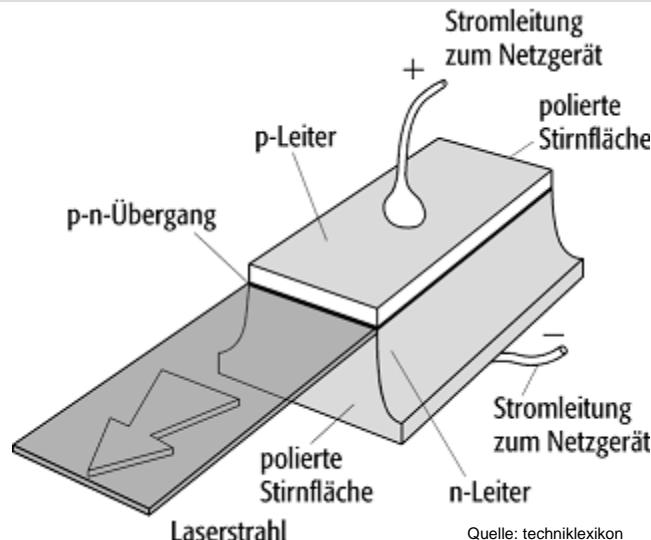


- Excimer Laser: abgeleitet von „excited dimmer“ = zweiatomige Moleküle im angeregten Zustand (strenge Definition)
- Heutige Excimer-Laser müssten eigentlich Edelgashalogenid-Laser heißen, da sie zwar einen leicht dissoziierenden Grundzustand aufweisen, aber keine Dimere sind
- Edelgase werden erst durch Anregung von Elektronen bzw. Ionisation reaktionsfreudig, sodass sich Edelgashalogenidmoleküle bilden können
- Anwendung: Strukturieren, Markieren, Abtragen, Mikrobearbeitung

Gasgemisch	ArF	KrF	XeCl	XeF
Wellenlänge [nm]	193	248	308	351

# Thermisches Abtragen

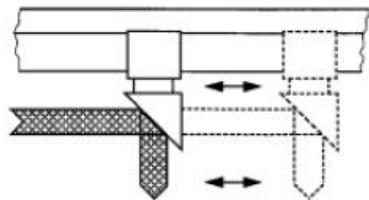
## Aufbau und Funktion des Diodenlasers (Laserdiode o. Halbleiterlaser)



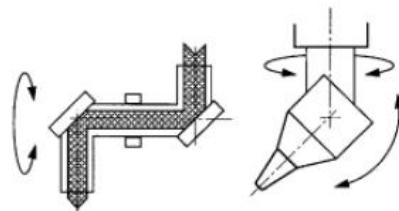
- Kombination von dotierten Halbleitern
- Durch Aneinanderfügen eines p- und eines n-Halbleiters entsteht eine schmale p-n-Übergangsschicht mit lokal gegeneinander verschobenen Energiebändern.
- Schaltung in Durchlassrichtung (positiver Pol an die p- und negativer Pol an die n-Schicht): Löcher aus der p- Schicht und Elektronen aus der n-Schicht werden in die Übergangszone injiziert
- Elektronen und Löcher rekombinieren dort unter Aussendung von Photonen (spontane Emission)
- Wellenlänge: Abhängig von Energielücke
- Anwendung: Schneiden, Schweißen, Löten, Bohren, Oberflächen-behandlung

# Thermisches Abtragen

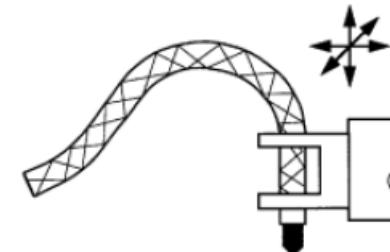
## Strahlführungssysteme



Linearachsen (Spiegel)



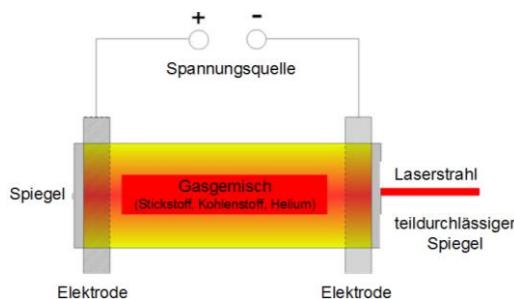
Rotationsachsen (Spiegel)



Lichtwellenleiter

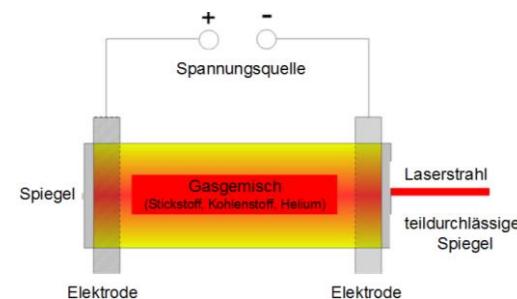
Anwendung in:

- CO<sub>2</sub>-Laser



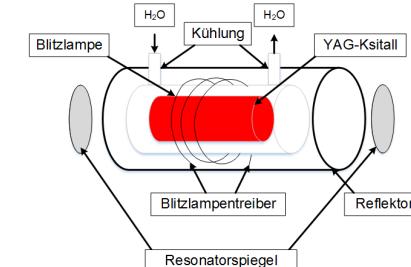
Anwendung in:

- CO<sub>2</sub>-Laser



Anwendung u.a. in:

- Festkörperlaser
- Diodenlaser

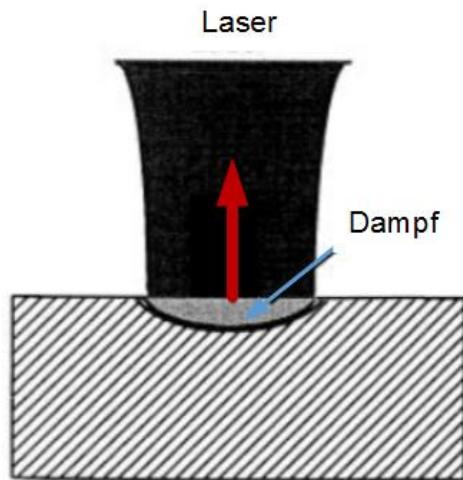


# Thermisches Abtragen

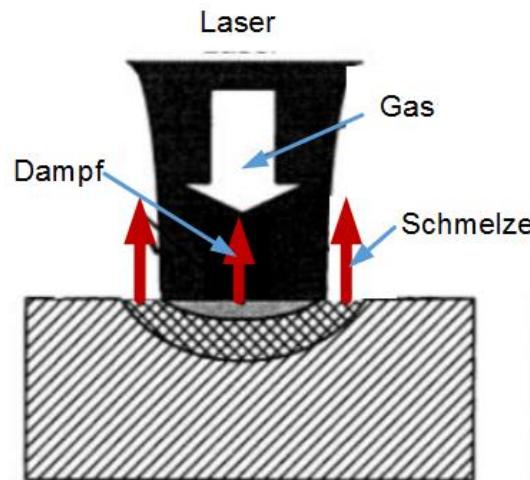
## Abtragen durch Laserstrahlung

### Abtragsmechanismen :

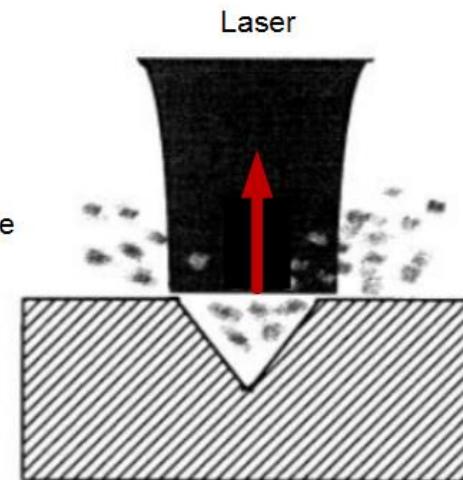
- Sublimationsabtrag
- Schmelzabtrag
- Abtrag von festem Werkstoff



Sublimationsabtrag



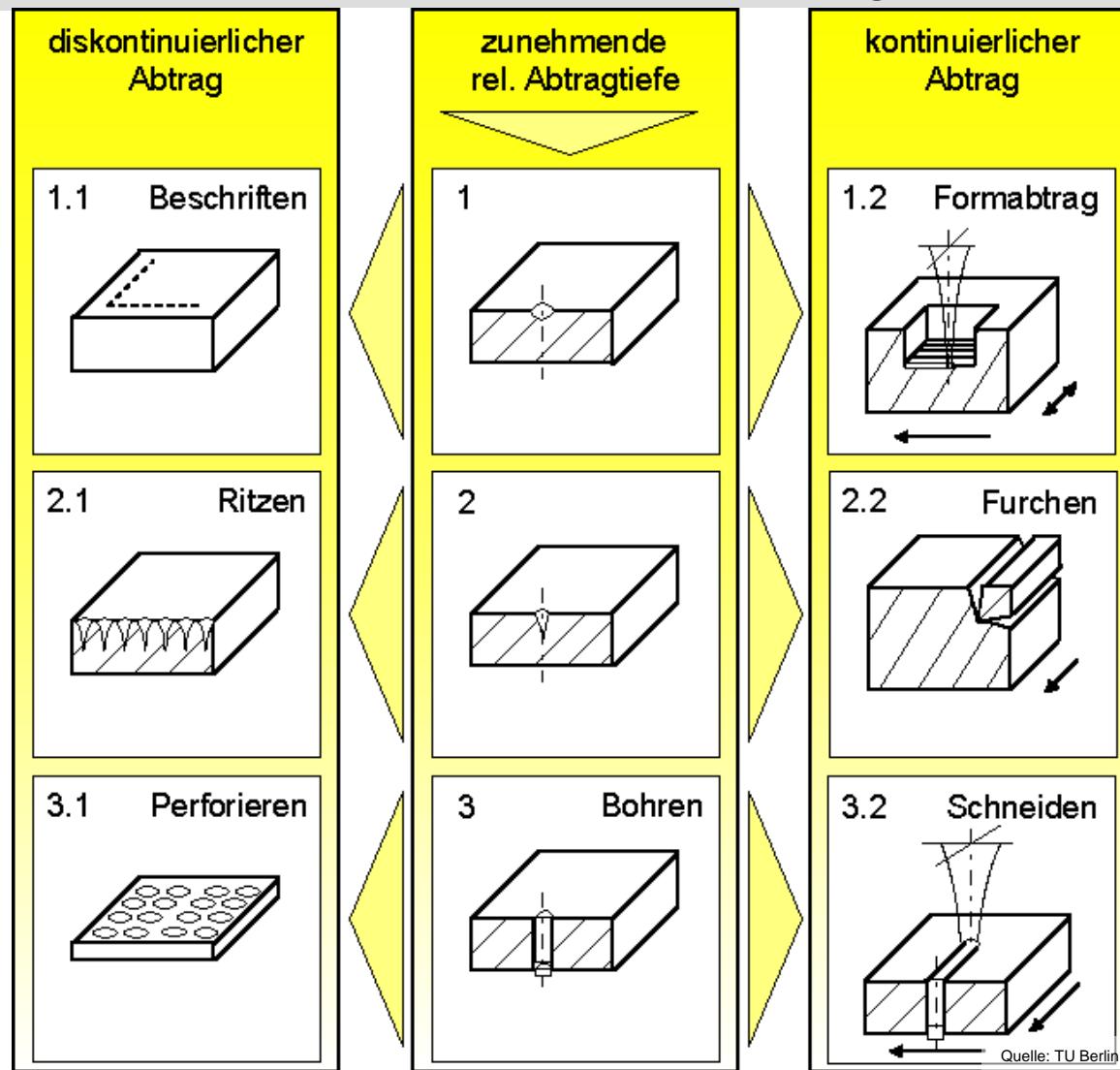
Schmelzabtrag



Abtrag von festem Werkstoff

# Thermisches Abtragen

## Verfahrensvarianten mit fokussierter Strahlung



# Thermisches Abtragen

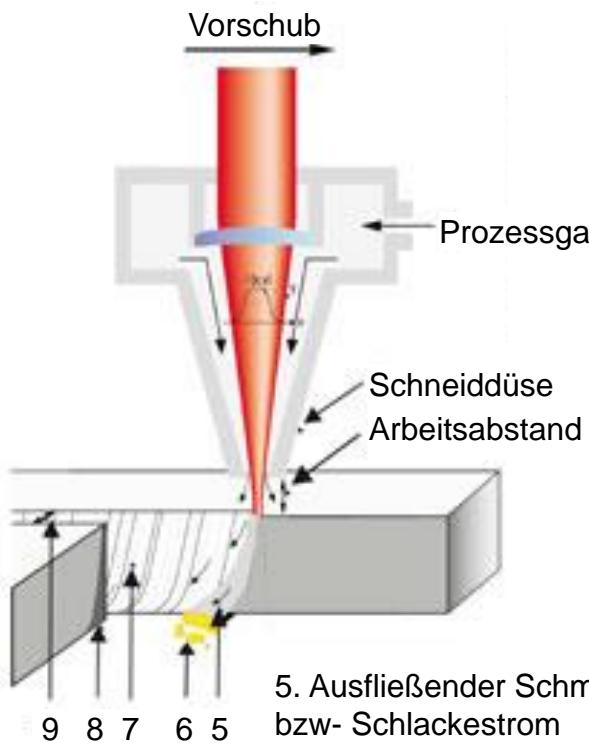
## Verfahrenseinteilung des Laserstrahlschneidens

Laser-Brennschneiden	Laser-Schmelzschnieden	Laser-Sublimierschneiden
<ul style="list-style-type: none"><li>Der Werkstoff wird bis auf Zündtemperatur erhitzt und durch Sauerstoff zufuhr verbrannt.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Der Werkstoff wird durch Laserstrahl aufgeschmolzen und mit Hilfe eines reaktionsträgen Gases aus der Schnittfuge geblasen.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Der Werkstoff wird auf Sublimations-temperatur erhitzt und mit Hilfe eines reaktionsträgen Gases aus der Schnittfuge geblasen.</li></ul>
<b>Anwendung:</b> Trennen von Metallen	<b>Anwendung:</b> Hochlegierte Stähle, Nichteisenmetalle	<b>Anwendung:</b> Holz, Papier, Keramik, Kunststoffe

# Thermisches Abtragen

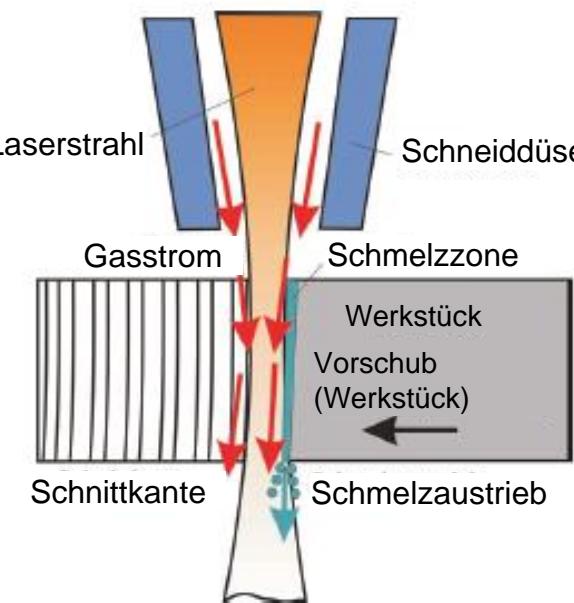
## Verfahrenseinteilung des Laserstrahlschneidens

### Laser-Brennschneiden

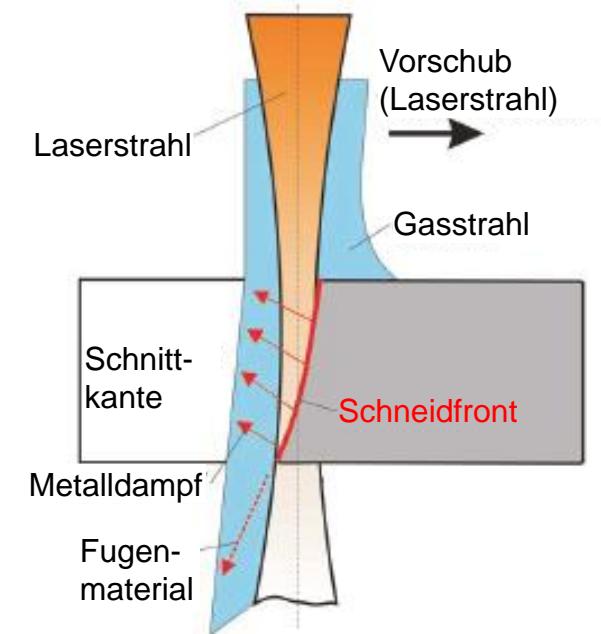


5. Ausfließender Schmelze- bzw- Schlackestrom
6. Ausfließender Schmelze- bzw- Schlacke
7. Schnitttiefe
8. Wärmeeinflusszone
9. Schnittfugenbreite

### Laser-Schmelzschnieden



### Laser-Sublimierschneiden



Quelle:Bliedtner

# Thermisches Abtragen

## Beispiele



Lasergeschnittene Spanplatte,  
Schneidgeschwindigkeit: 720 mm/s  
Prozessgas: Helium  
Gasdruck: 5 bar

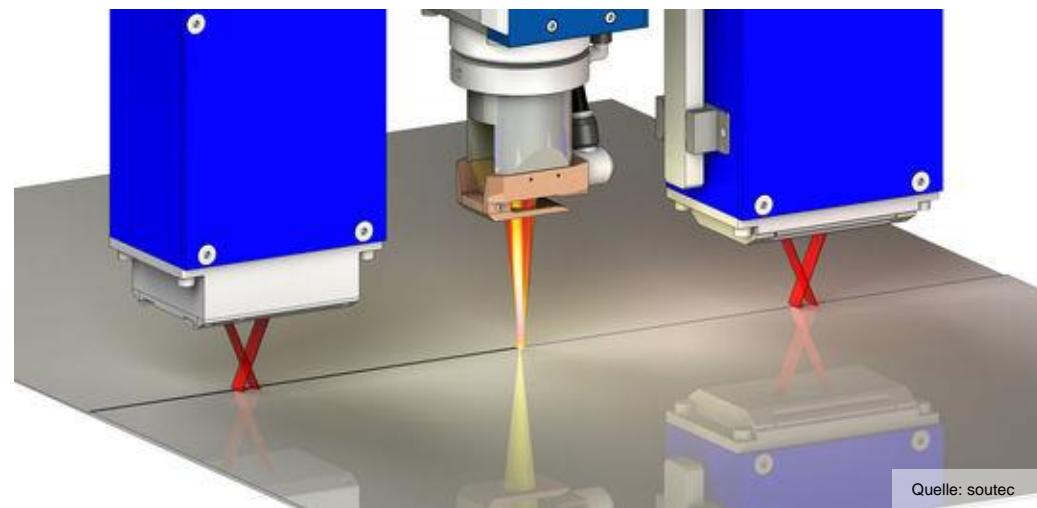
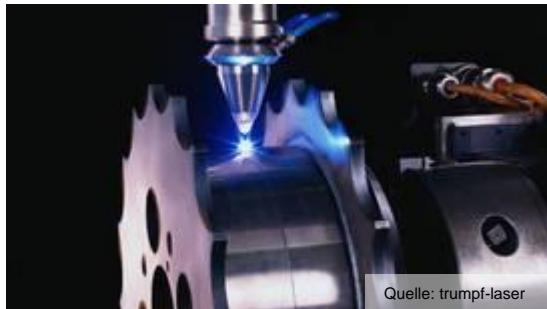


Lasergeschnittene Ebenholz,  
Schneidgeschwindigkeit: 720 mm/s  
Prozessgas: Helium  
Gasdruck: 5 bar

# Thermisches Abtragen

## Andere Anwendungen

### Laserschweißen



### Beschichten mit Laser

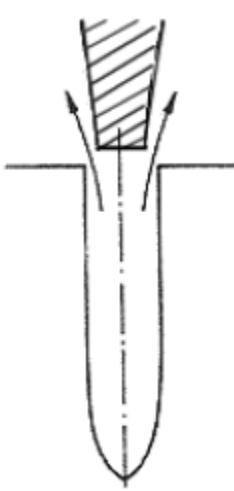


# Thermisches Abtragen

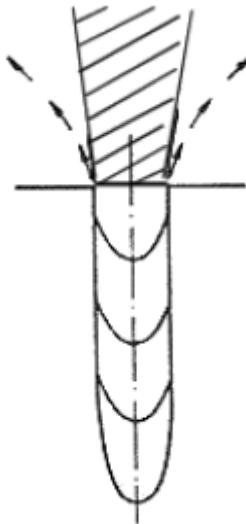
## Laserbohren

### Verfahrensvarianten:

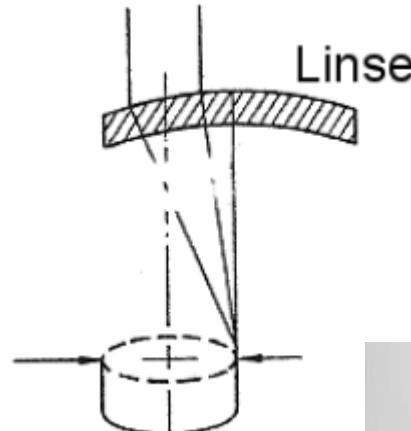
- Einpulsbohren → Bohrungsdurchmesser 0,02 mm bis 0,25 mm, Tiefe bis 2 mm
- Mehrfachpulsbohren → Bohrungsdurchmesser 0,1 mm bis 0,5 mm, Tiefe bis 10 mm
- Trepanierbohren → Führung eines Lasers entlang einer Kreisbahn, Bohrungs-Ø < 4mm



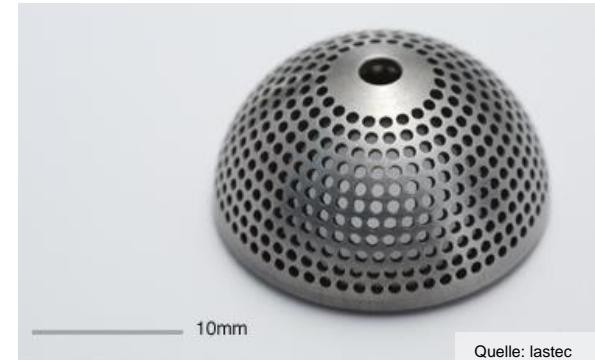
Einpuls  
-bohren



Mehrfach-  
pulsbohren



Trepanier  
-bohren



Quelle: lastec



Quelle: lastec

# Thermisches Abtragen

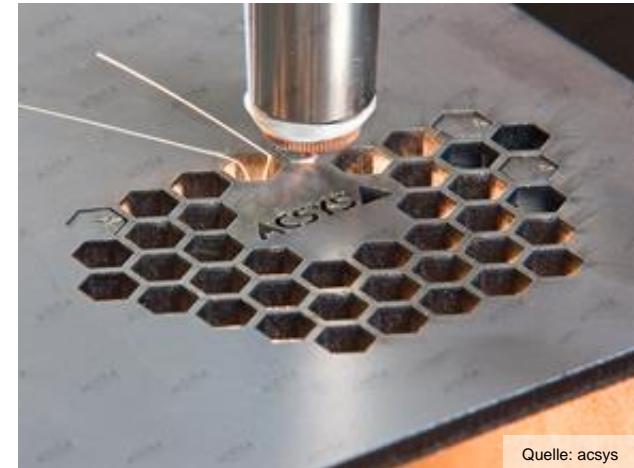
## Vor- und Nachteile der Laserstrahlverfahren

### Vorteile:

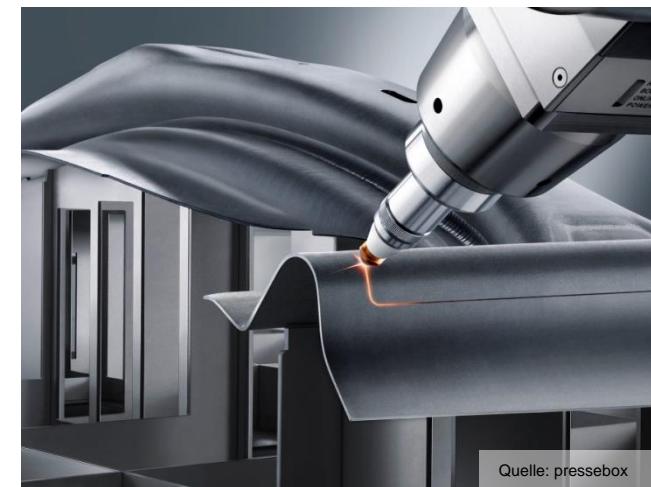
- + Bearbeitung unabhängig von Härte und Festigkeit
- + kein Werkzeug → Kein Verschleiß
- + keine Prozesskräfte → keine Vorrichtungen
- + unabhängig von der Geometrie
- + hohe Maß- und Formgenauigkeit
- + filigrane Strukturen mit hohen Geschwindigkeiten
- + gratfrei und geringe Rauheiten

### Nachteile:

- Geringer energetischer Wirkungsgrad
- hohe Investitionskosten
- thermisch induzierte Spannungen
- giftige und krebserregende Verbrennungs- und Pyrolyseprodukte



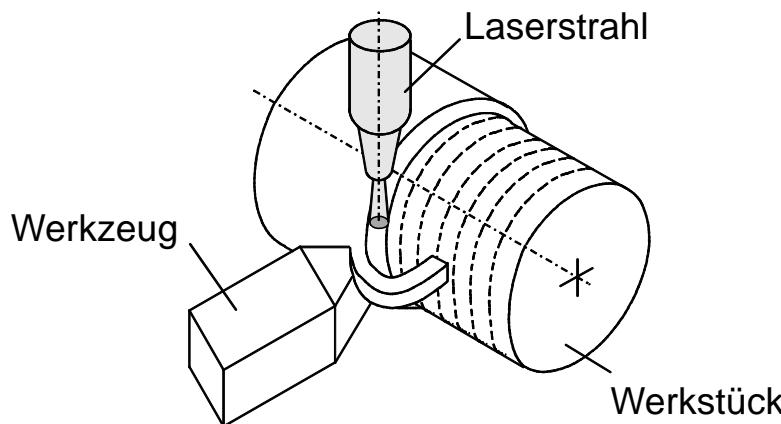
Brennschneiden von 4mm Stahl



Quelle: pressebox

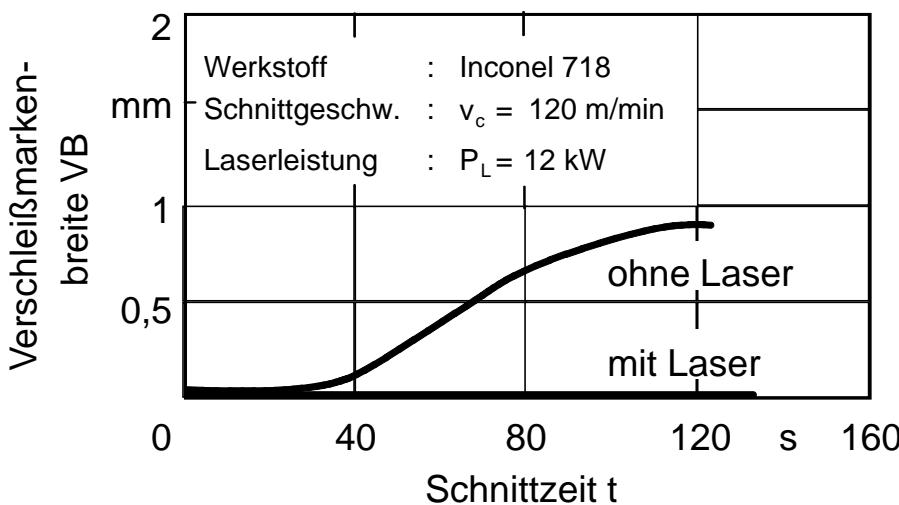
# Thermisches Abtragen

## Laserunterstützte Zerspanung



### Einsatzgebiete:

- Zerspanung hochfester Werkstoffe (Inconel, Titan, Keramik)
- Gleichzeitige Oberflächenbehandlung



### Vorteile:

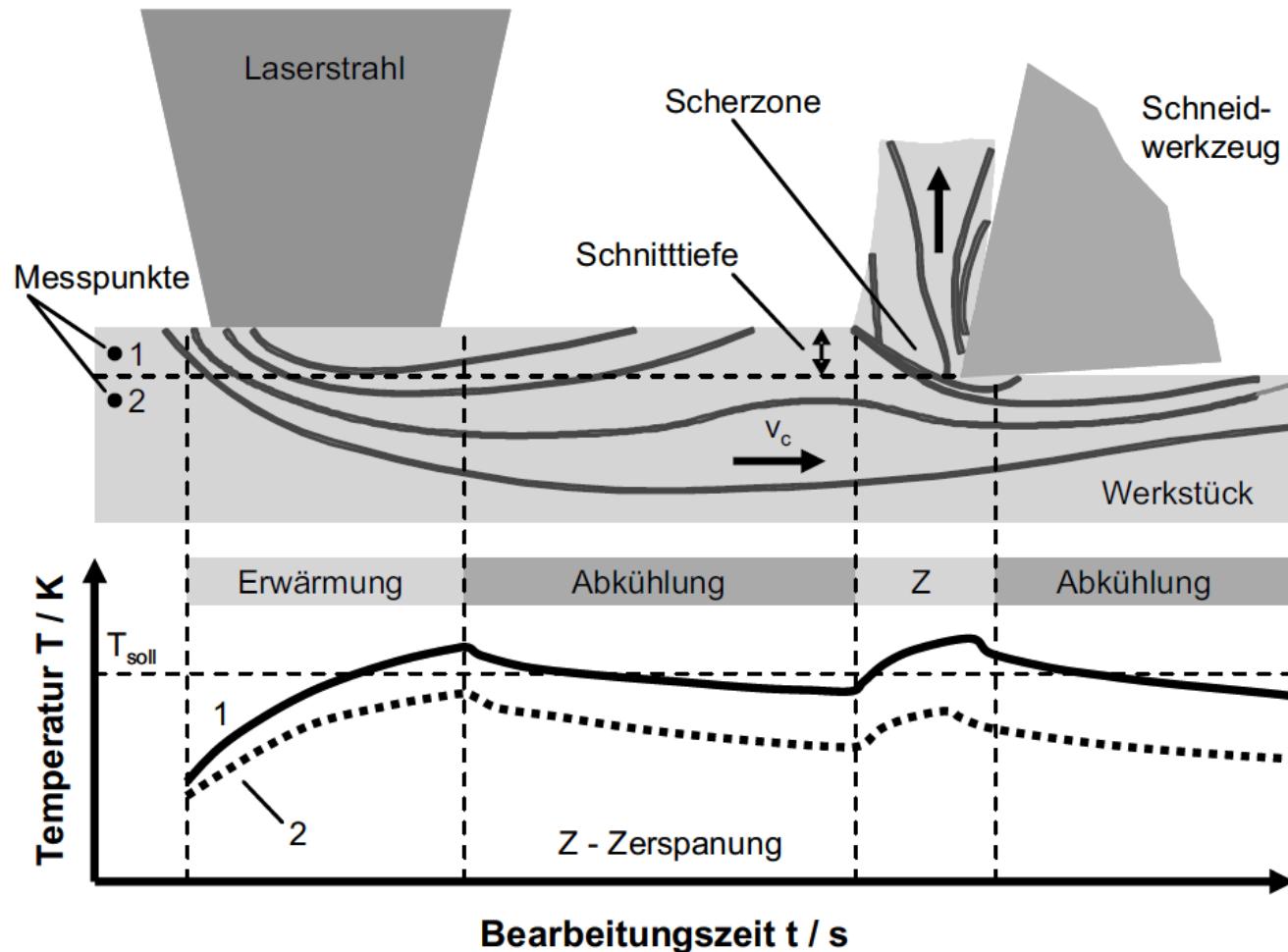
- höhere Werkzeugstandzeiten
- geringere Schnittkräfte
- geringere Rauheit

214-02-00  
nach LZH 1989



# Thermisches Abtragen

## Prinzip der laserunterstützten Zerspanung

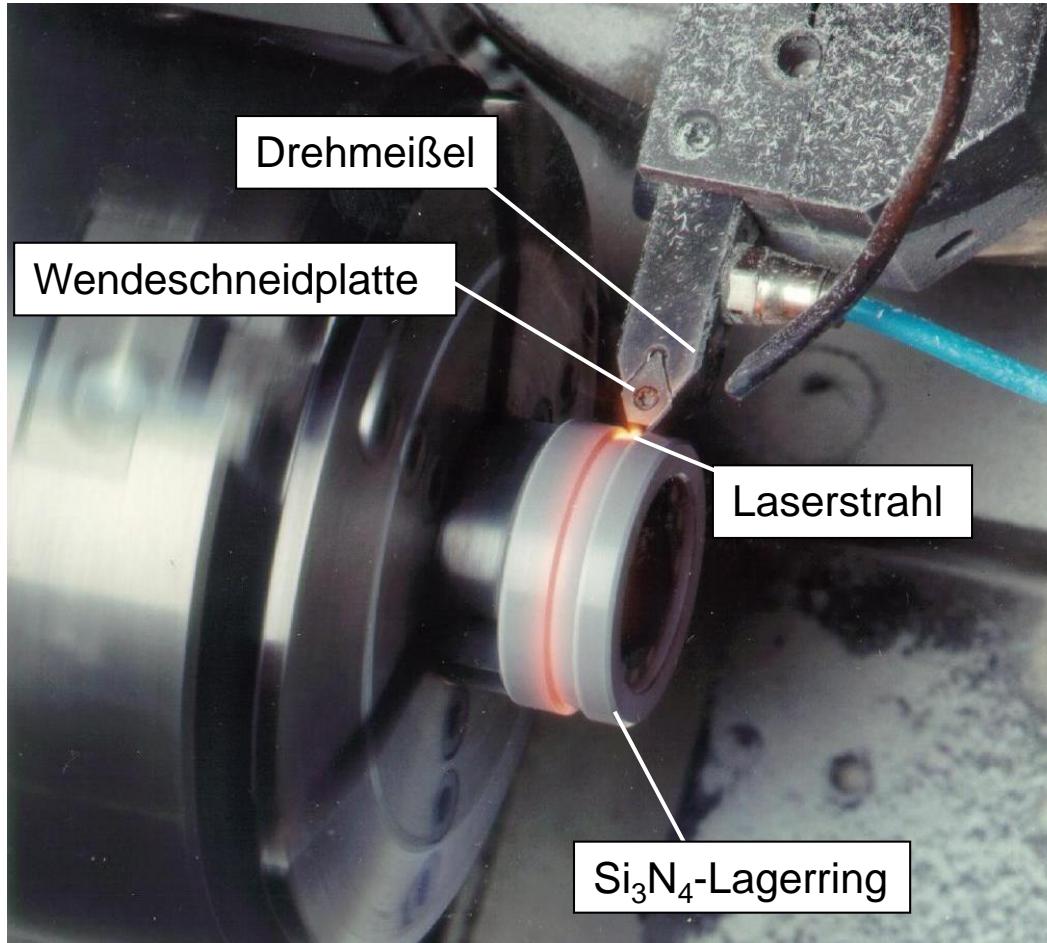


Quelle: Klocke

# Thermisches Abtragen

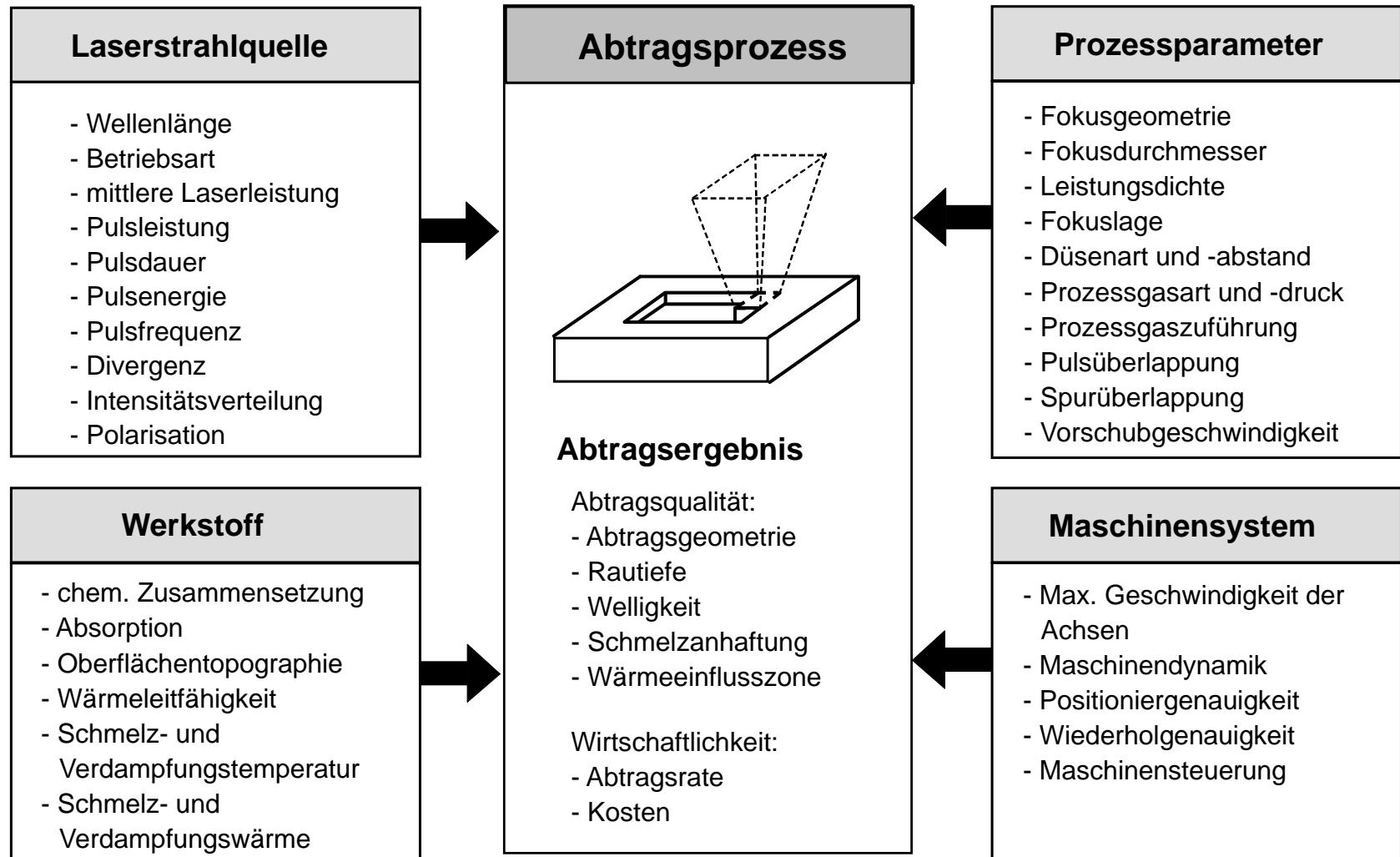
## Laserunterstützte Zerspanung

Drehen – Konturbearbeitung durch Laser



# Thermisches Abtragen

## Abtragen durch Laserstrahl - Einflussgrößen

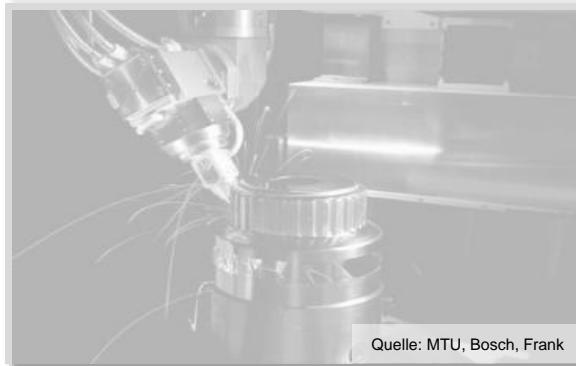


# Definition und Einordnung in die Fertigungsverfahren

## Ausgewählte Untergruppen des Abtragens nach DIN 8590

### Abtragen

#### Thermisch



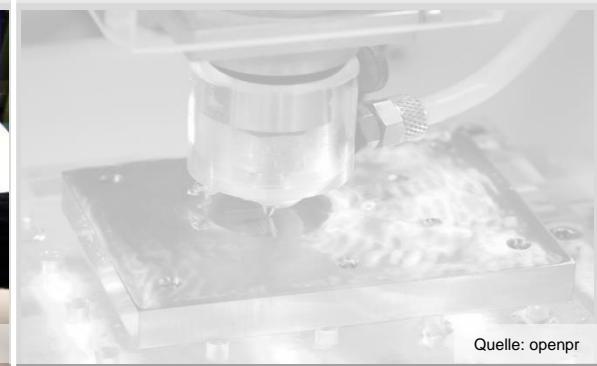
Quelle: MTU, Bosch, Frank

#### Chemisch



Quelle: openpr

#### Elektrochemisch



Quelle: openpr

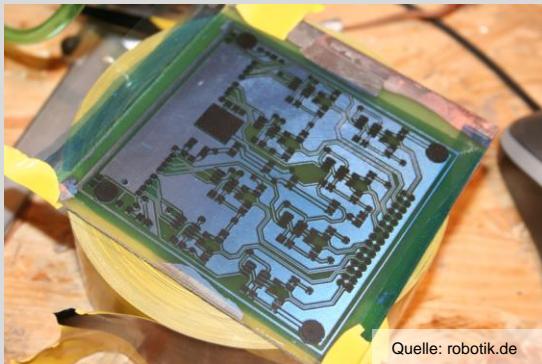
**Chemisches Abtragen** beruht auf einer chemischen Reaktion des Werkstückwerkstoffs mit einem Wirkmedium zu einer Verbindung, die flüchtig oder leicht entfernbare ist. Dabei ist mindestens ein Reaktionspartner, entweder das Wirkmedium oder der Werkstückwerkstoff (oder beide), elektrisch nichtleitend.

# Chemisches Abtragen

## Einteilung des chemisches Abtragens

### Chemisches Abtragen

#### Ätzabtragen



Quelle: robotik.de

#### Thermisch - chemisches Abtragen



Quelle: mav.industrie

- Abtragen durch direkte chemische Reaktion eines nicht leitenden Werkstoffs mit einem flüssigen Wirkmedium

- Abtragen durch chemische Reaktion, meist mit Sauerstoff, bei dem die Werkstoffteilchen überwiegend abgebrannt werden.

# Chemisches Abtragen

## Ätzabtragen

**Das Ätzabtragen** ist definiert als ein Abtragen durch direkte chemische Reaktion eines elektrisch nichtleitenden Werkstoffes mit einem flüssigen Wirkmedium [DIN8590].

Ein Beispiel für das Ätzabtragen ist das Glasätzen, mit dem Ornamente, Beschriftungen usw. durch Ätzen mit Fluorwasserstoff (HF) unter Bildung von gasförmigem Siliziumtetrafluorid ( $\text{SiF}_4$ ) in Glas eingebracht werden können.



Nichtleitender  
Reaktions-  
partner Glas

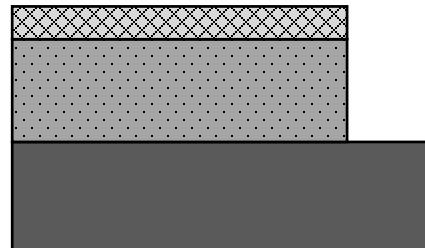
+ Wirkmedium

→ Flüchtiges  
Reaktionsmedium

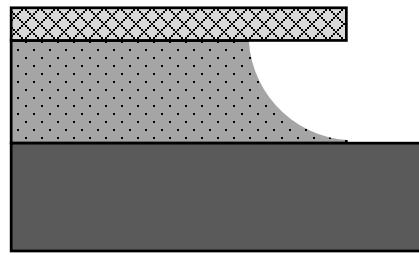
+ Wasser

# Chemisches Abtragen

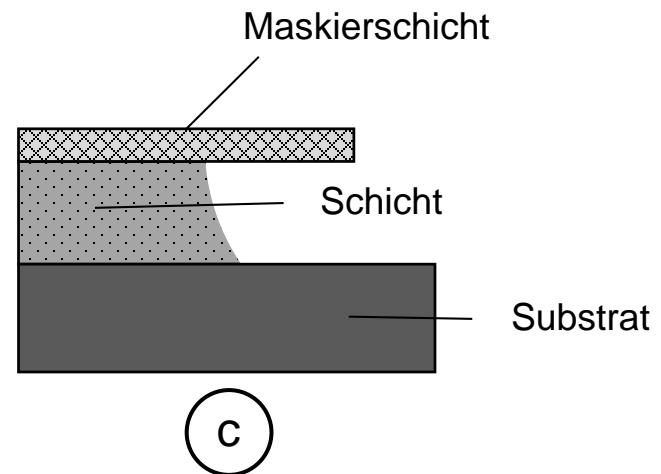
## Schematische Darstellung verschiedener Ätzprofile



a



b



c

A

vollständig anisotrop

b

vollständig isotrop, kein Überätzen

c

vollständig isotrop, Überätzen

# Chemisches Abtragen

## Abscheiden und Trockenätzen -

- am Beispiel der Herstellung einer Ringdüse



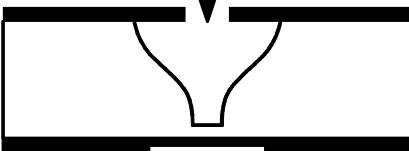
Silizium-Scheibe, beidseitig poliert



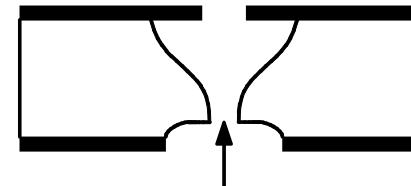
beidseitige Kupfer-Beschichtung



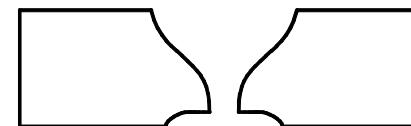
beidseitige Kupfer-Strukturierung



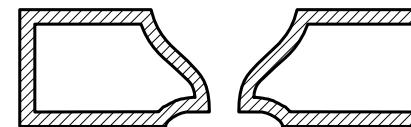
einseitige Tiefenätzung



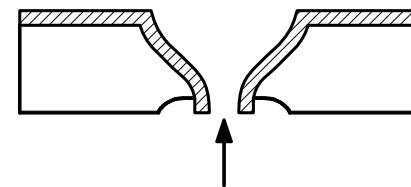
rückseitige  
Frei- und Teilätzung



Kupfer entfernen



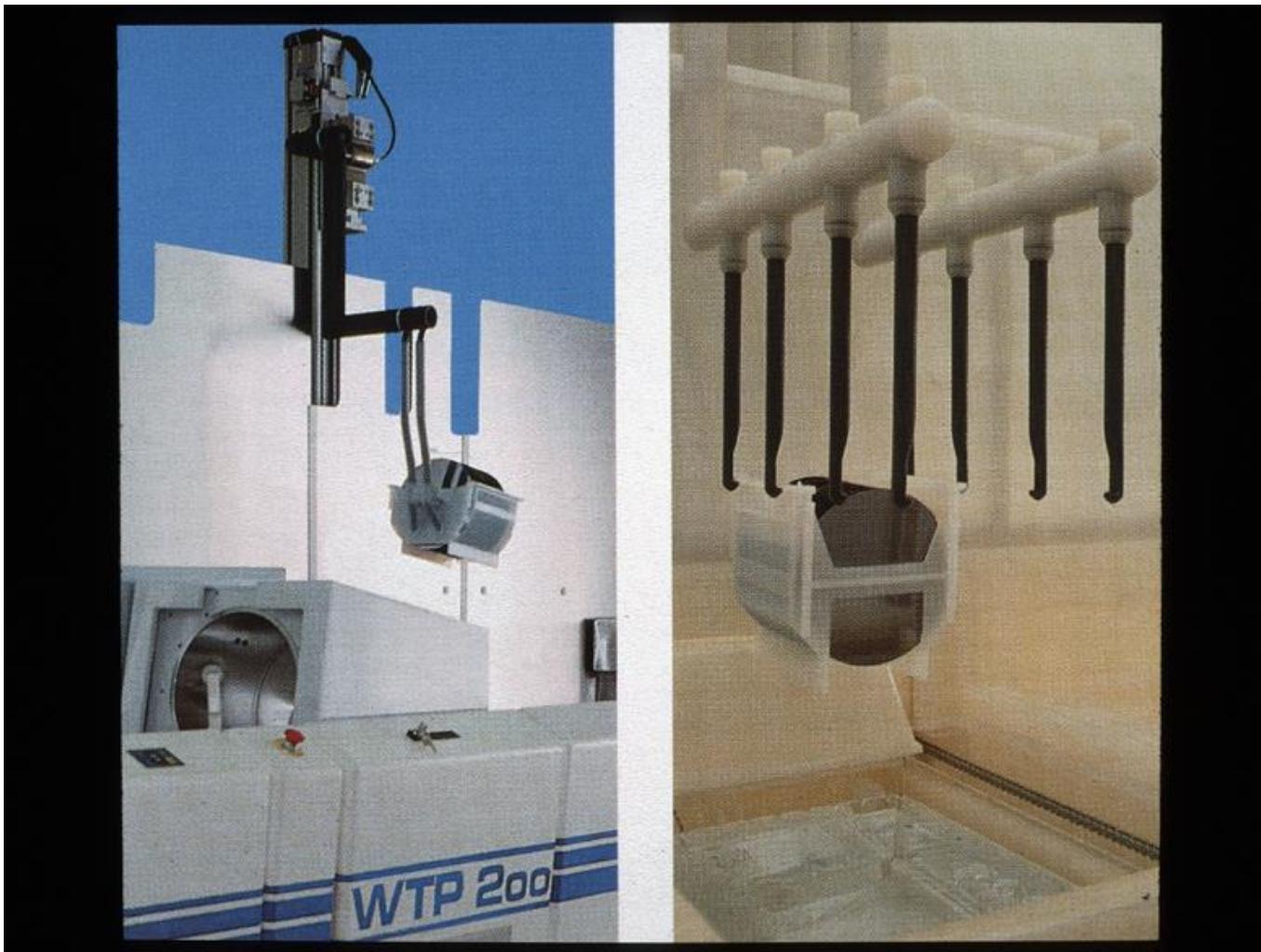
allseitig oxidieren



rückseitige Fertigätzung

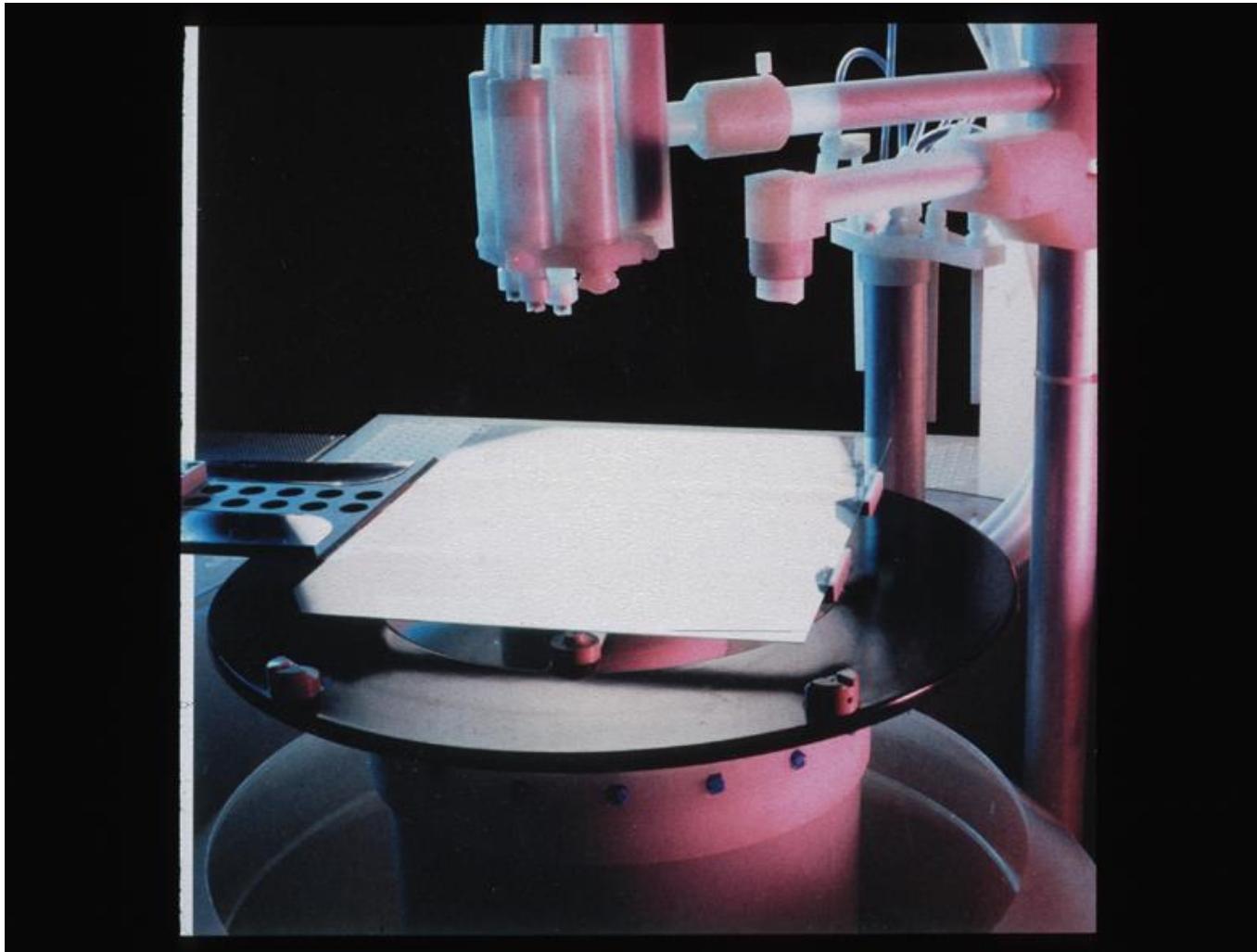
# Chemisches Abtragen

## Tauchätzanlage



# Chemisches Abtragen

## Sprühätzanlage



# Chemisches Abtragen

## Prinzipieller Ablauf der Lithographie

Strukturierung mittels fokussierter Strahlung (Licht-, Röntgen-, Elektronen/Ionenstrahlung):

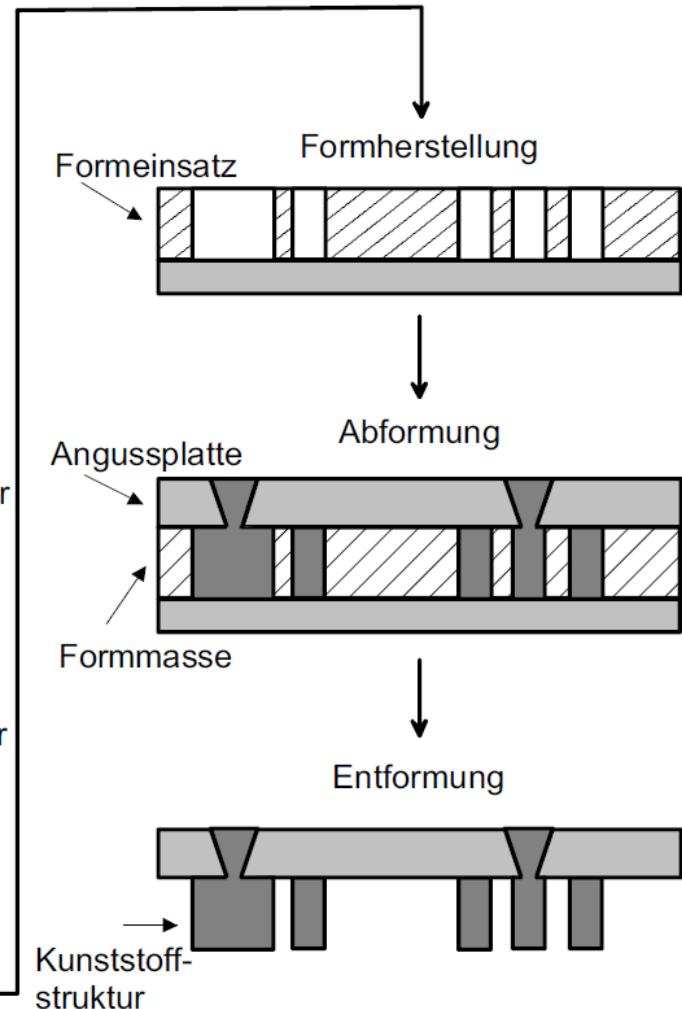
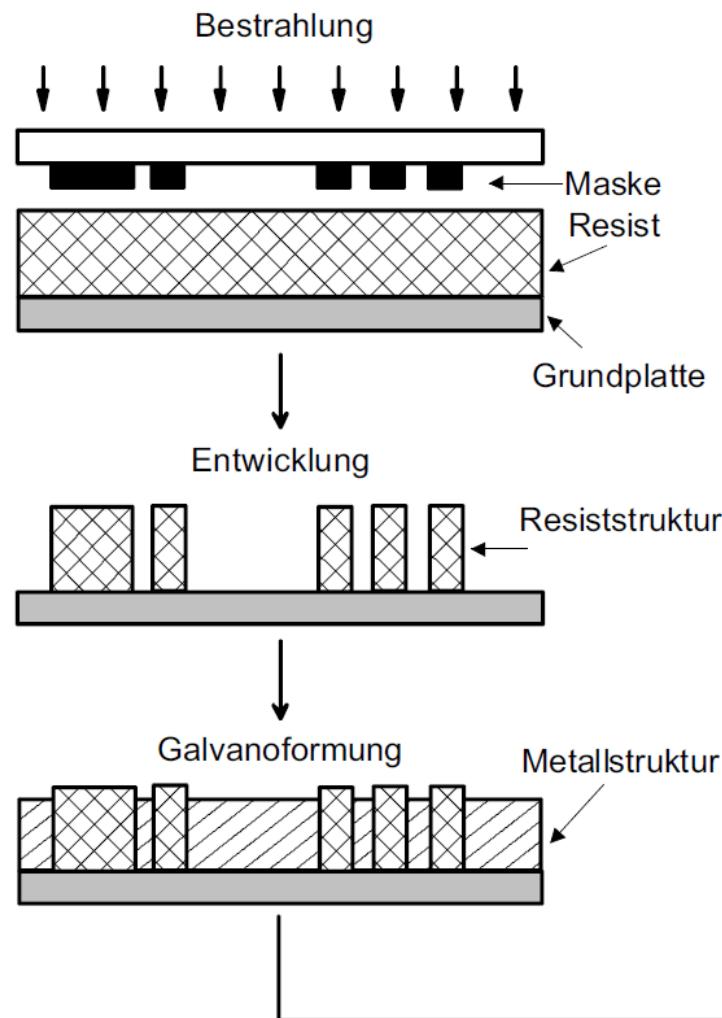
- ein Substrat (z.B. Siliziumwafer) wird mit einem Resist beschichtet
- Teile der Kunststoff-/Resistschicht werden nach Vorgabe durch einen CAD-Entwurf hochgenau belichtet bzw. bestrahlt
- durch die Bestrahlung ändert der Resist seine chemischen Eigenschaften
- bestrahlte und unbestrahlte Bereichen besitzen eine unterschiedliche Beständigkeit gegenüber Lösungsmitteln (Entwickler)
  - Positiv-Resist: bestrahlter Bereich wird herausgelöst
  - Negativ-Resist: unbestrahlter Bereich wird herausgelöst
- Resist ist unempfindlich (resistent) gegen spätere Galvanik- oder Ätzprozesse

### Mögliche Nachfolgeschritte:

- Abtragen (Nassätzen/Trockenätzen)
- Aufbau neuer Materialien (Galvanische Abscheidung)
- Verändern der Oberfläche (Oxidieren, Dotieren mit Fremdatomen)

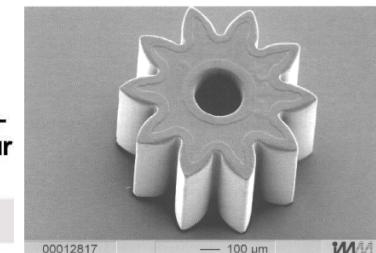
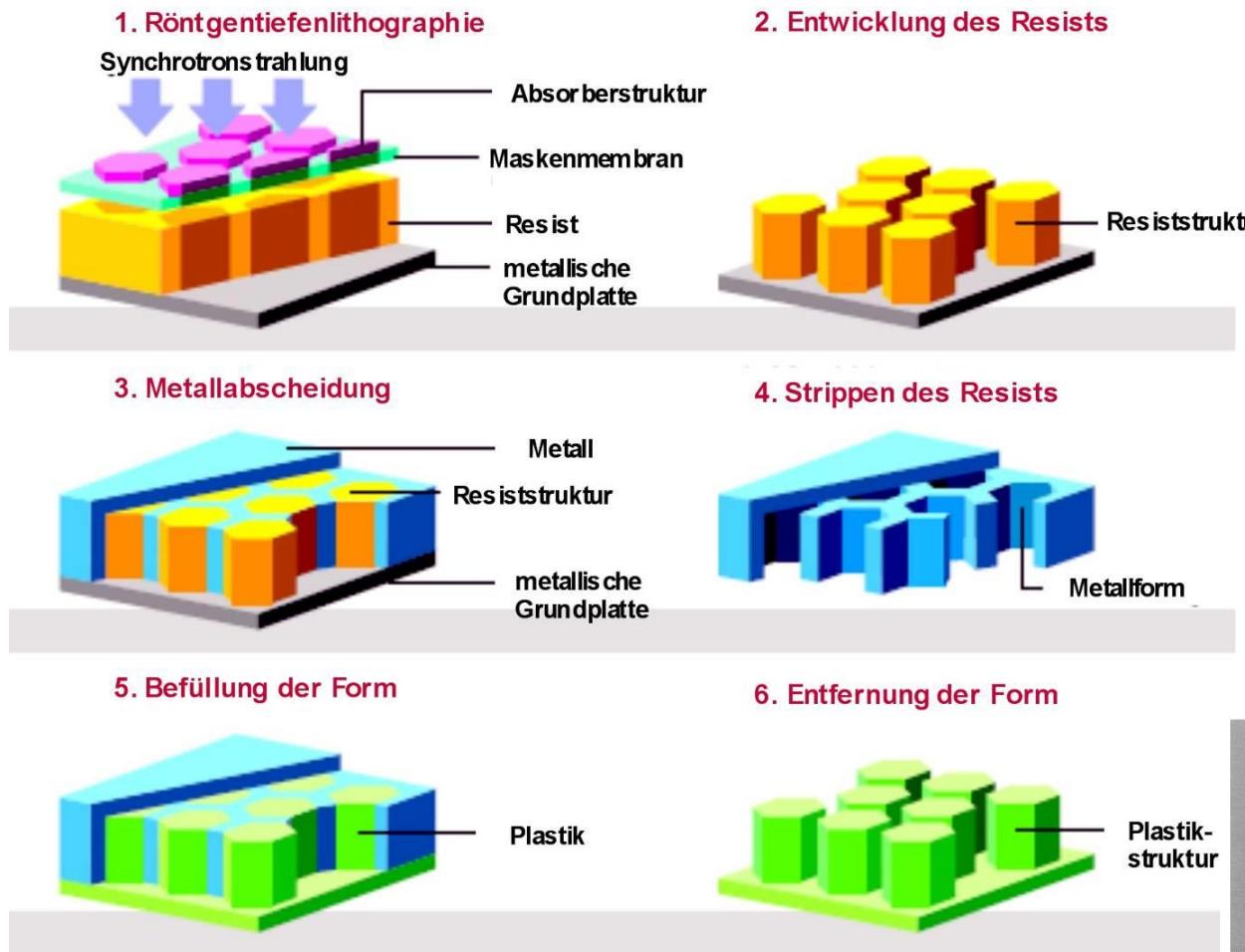
# Chemisches Abtragen

## Prinzipieller Ablauf der Lithographie



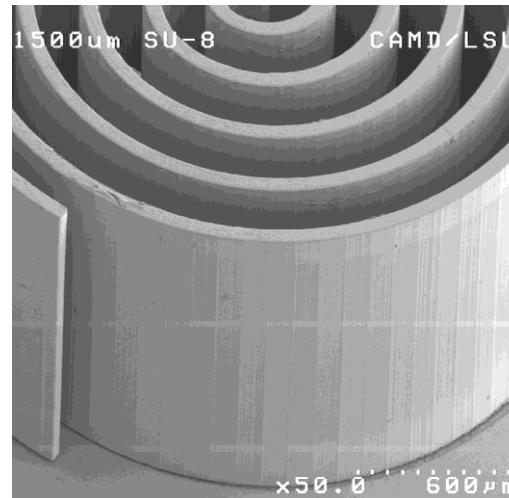
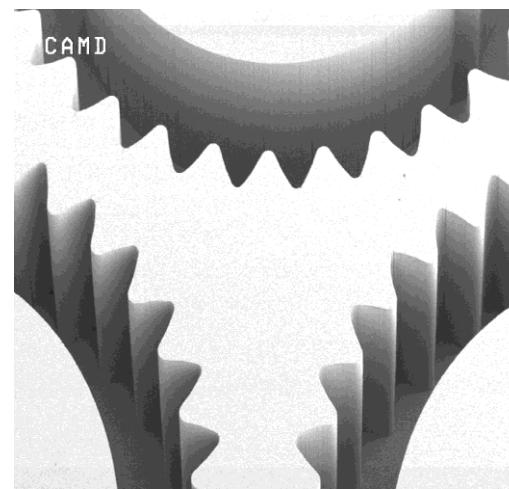
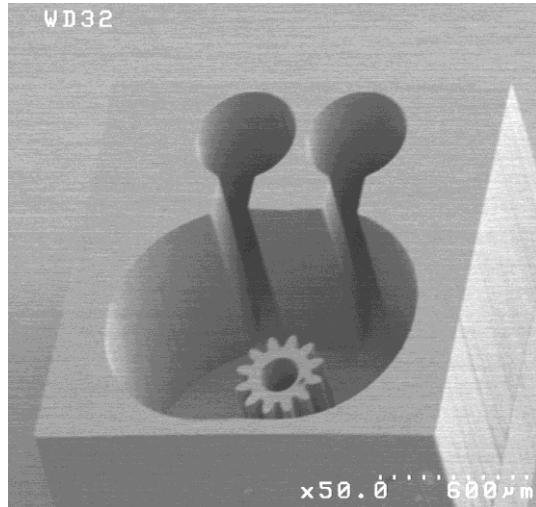
# Chemisches Abtragen

## LIGA - Lithographie und Galvanik und Abformtechnik



# Chemisches Abtragen

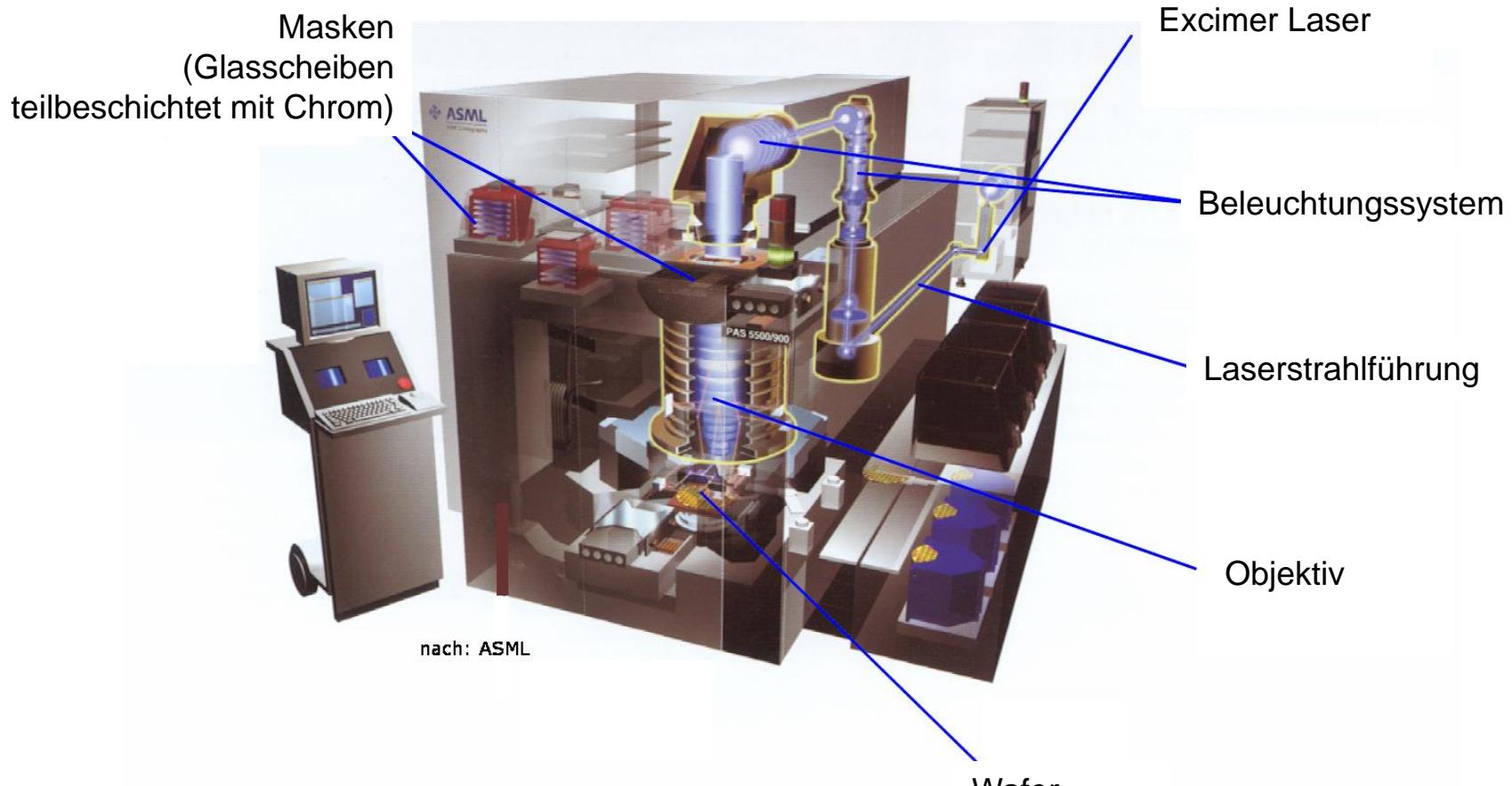
## LIGA-Verfahren - Beispiele



Quelle: Ehrfeld

# Chemisches Abtragen

## Mikrolithographie - Waferbelichtungsanlage



# Chemisches Abtragen

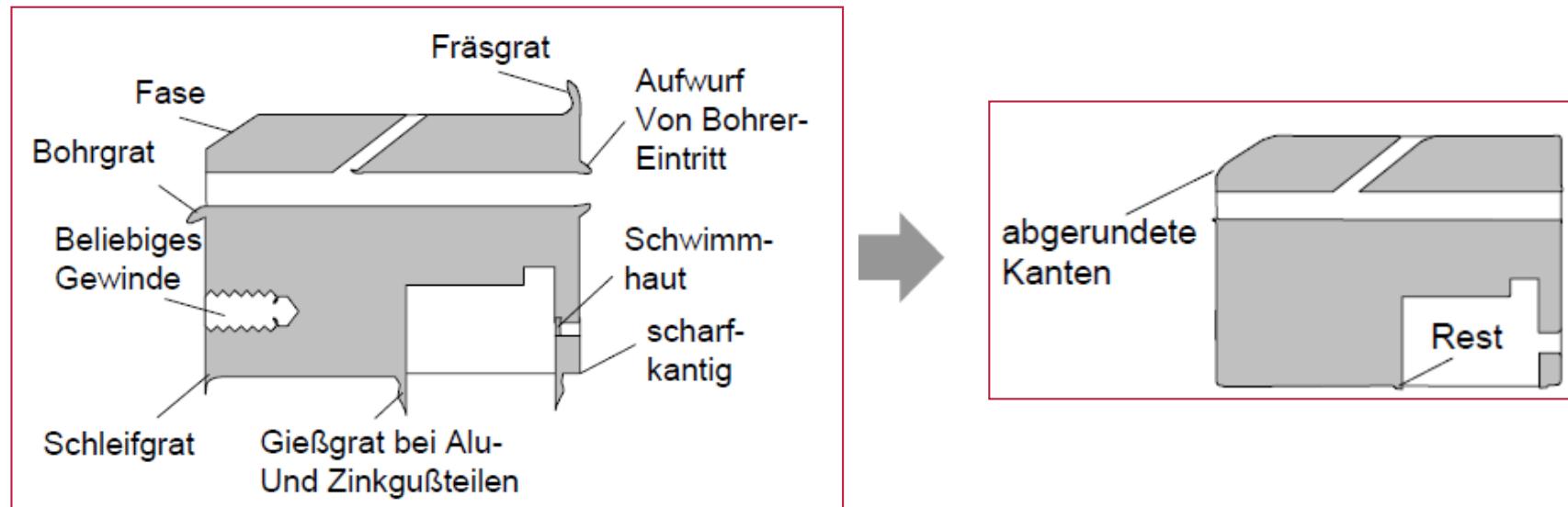
## Thermisch-chemisches Abtragen

Grate an metallischen und nichtmetallischen Werkstoffen durch Knallgas-Reaktion abgebrannt:



Die entstehende Reaktionswärme (bis T = 3500 °C) leitet die Oxidation des Gratwerkstoffes ein.

Typische Anwendungs-Grade:



Quelle: WZL Aachen

# Festigung des Lehrinhalts

Formulieren Sie eine **geeignete Klausuraufgabe** zu den bisherigen Inhalten des heutigen Themas auf einem gesonderten Blatt!



Tauschen Sie die Fragen untereinander und lösen Sie!



Geben Sie die Aufgaben und Lösungen beim Verlassen des Hörsaals nach der Vorlesung ab!



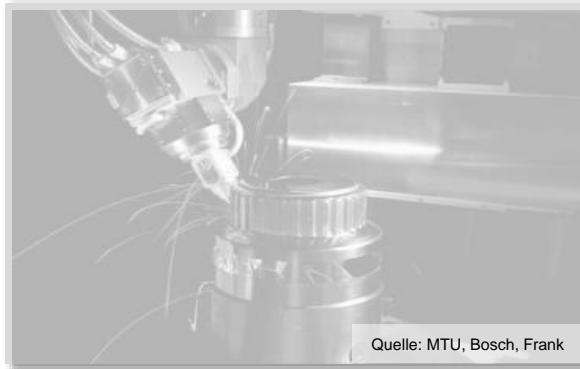
Etwa 30 % der von Ihnen formulierten Fragen werden in der Klausur verwendet!  
Eine Zusammenfassung aller von Ihnen formulierten Fragen finden Sie am Ende des Semesters auf StudIP!

# Definition und Einordnung in die Fertigungsverfahren

## Ausgewählte Untergruppen des Abtragens nach DIN 8590

### Abtragen

#### Thermisch



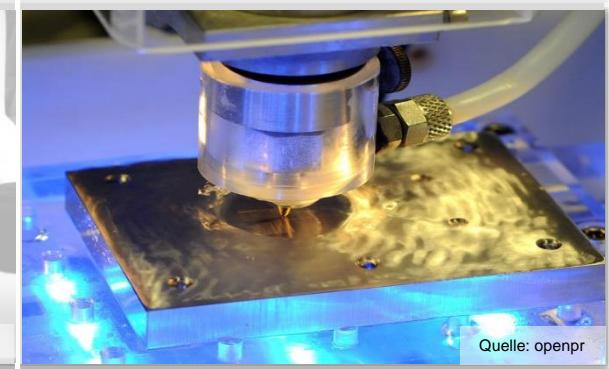
Quelle: MTU, Bosch, Frank

#### Chemisch



Quelle: wikipedia

#### Elektrochemisch

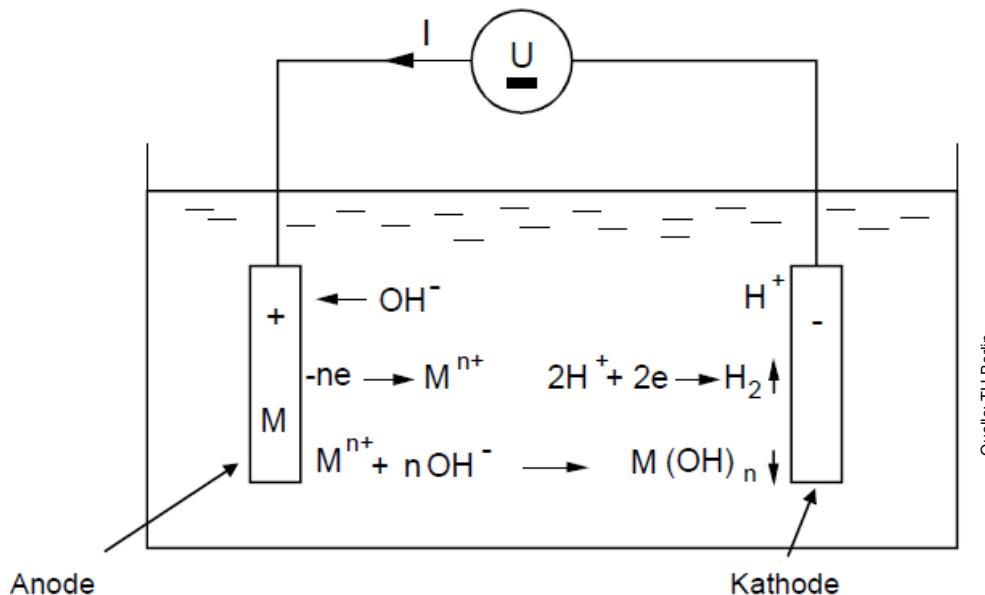


Quelle: openpr

**Auflösung** eines metallischen Werkstoffes unter Einwirkung von elektrischen Strom und einer Elektrolytlösung (aniodische Auflösung). Unter Elektrolyse werden dabei alle chemischen Vorgänge und chemischen Veränderungen eines Stoffes, die bei einem Stromdurchgang durch einen Elektrolyten auftreten, verstanden.

# Elektrochemisches Abtragen

## Grundlagen Elektrolyse | Electro Chemical Machining (ECM)



$$V = \frac{M}{\rho \cdot z \cdot F} \cdot I \cdot t$$

$V$  abgetragenes Materialvolumen

$M$  Molmasse in g/mol

$\rho$  Dichte in kg/m<sup>3</sup>

$I$  Stromstärke in A

$t$  Bearbeitungszeit in s

$z$  elektrochemische Wertigkeitsänderung

$F$  Faradaykonstante (96487 As/mol)

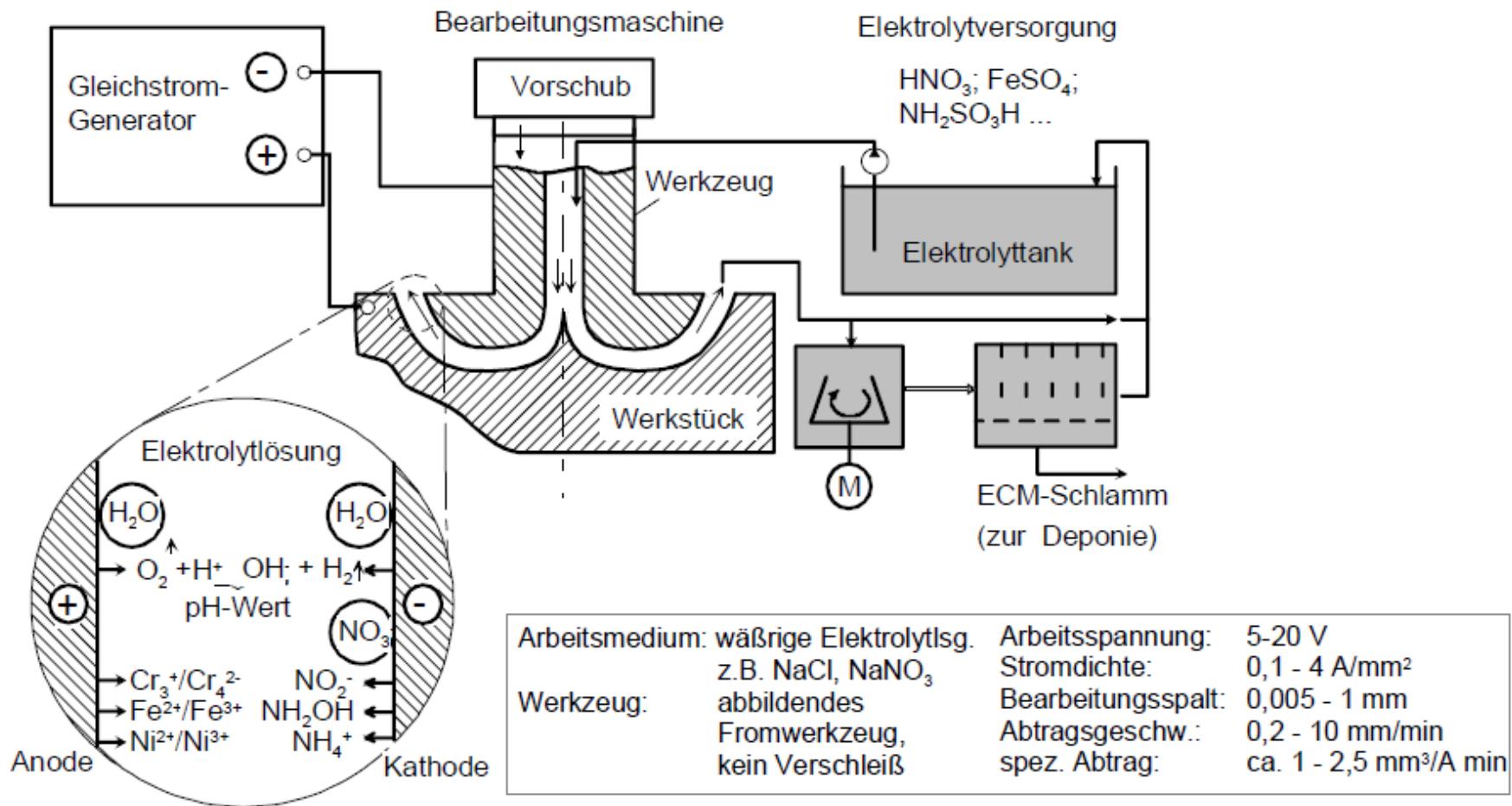
Quelle: TU Berlin

### Anodische Metallauflösung:

- wässriges, elektrisch leitendes Medium
- abzutragende metallischer Werkstoff, Anode
- metallische Kathode
- es wird eine Gleichspannung zwischen Anode und Kathode angelegt
- an der Anode geht das Metall unter Abgabe von Elektronen als Metallionen in die Elektrolytlösung über

# Elektrochemisches Abtragen

## Elektrochemisches Formabtragen



# Elektrochemisches Abtragen

## Turbinenläufer aus dem Vollen ausgearbeitet



Anwendung:

Vorteil:

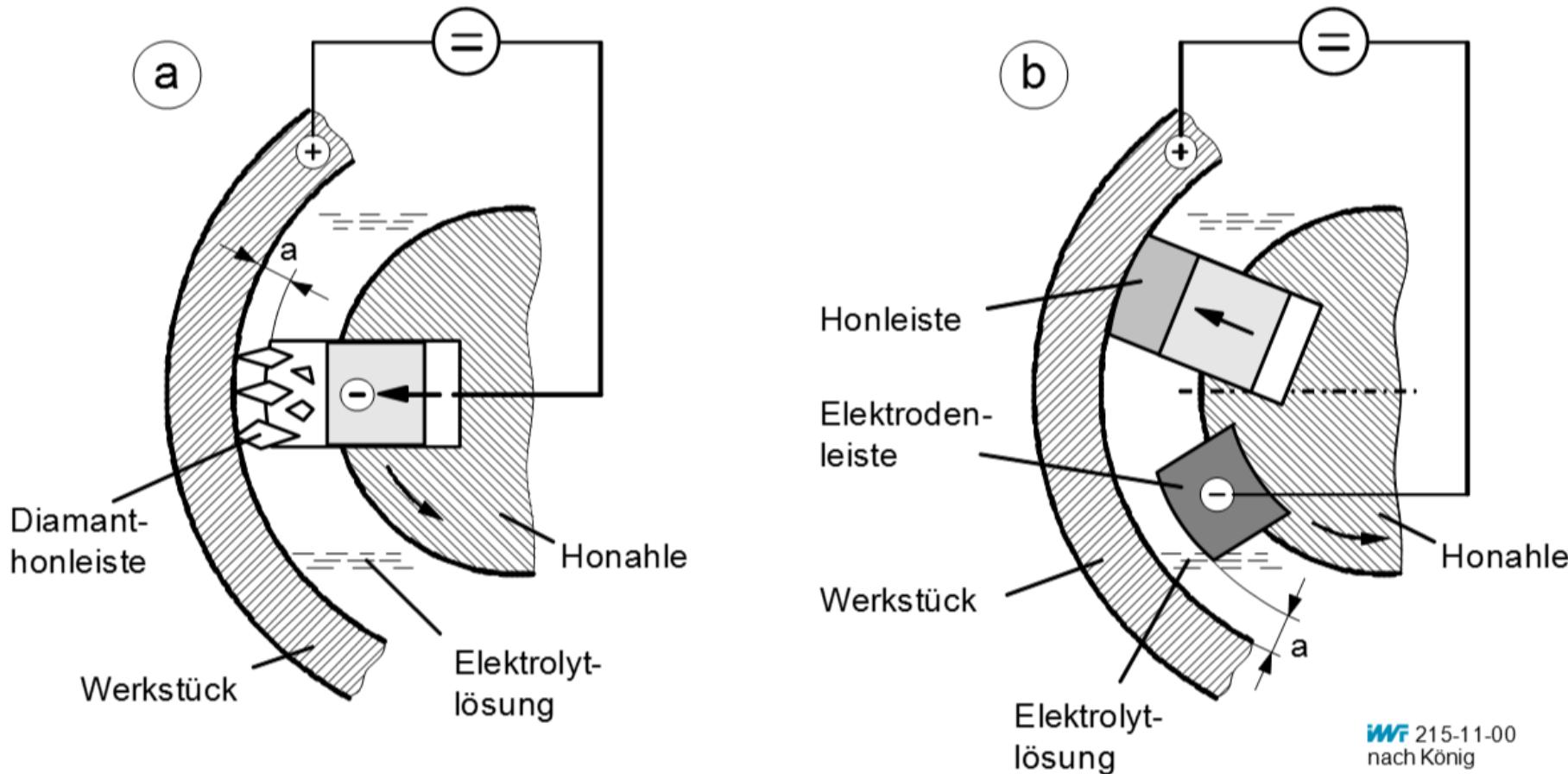
Werkstoff:

Gas- und Dampfturbinen  
Besserer Spannungsverlauf  
im Schaufelfuß als bei  
gesteckten Schaufeln  
z.B. X22 CrMoV 12 1

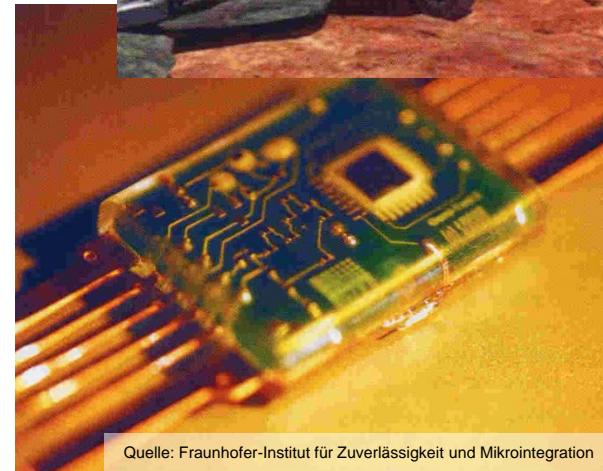
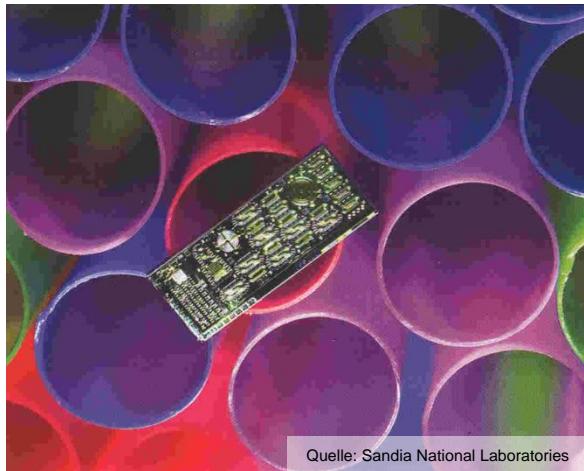
Quelle: Körpenn

# Elektrochemisches Abtragen

## Sonderverfahren - Elektrochemisches Honen

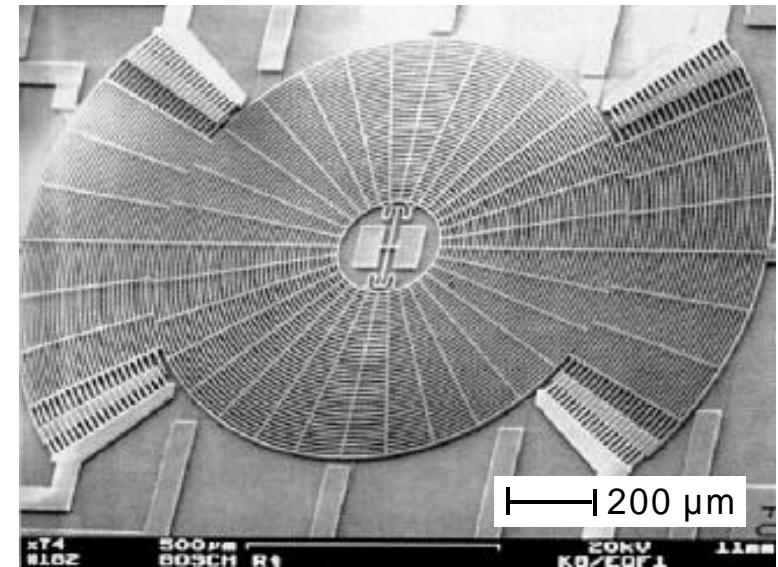
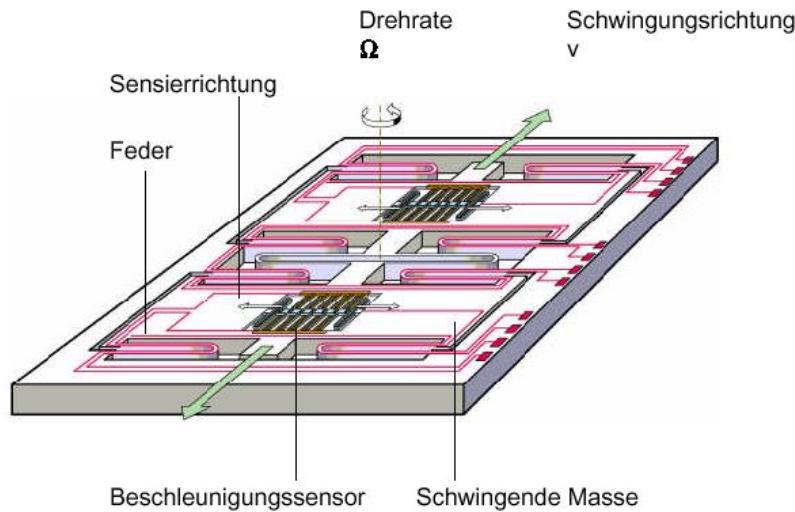


# Abtragende Verfahren für die Mikrobearbeitung



# Mikromechanischer Drehratensor

## Funktionsprinzip



# Denkanstöße

## Vertiefungen

1. Wie ist das Abtragen definiert?
2. Was ist EDM und wie funktioniert es?
3. Nennen Sie je zwei Vor- und Nachteile funkenerosiver Verfahren!
4. Welche Laserarten gibt es?
5. Wie funktioniert ein CO<sub>2</sub>-Laser? Welche Wellenlänge ist charakteristisch?
6. Nennen Sie die drei Abtragsmechanismen, die mit einem Laser auftreten können!
7. Nennen Sie je zwei Vor- und Nachteile von Laserstrahlverfahren!
8. Was ist ECM und wie funktioniert es?
9. Was versteht man unter Lithographie und wie ist der prinzipielle Ablauf?



Technische  
Universität  
Braunschweig

Institut für Werkzeugmaschinen  
und Fertigungstechnik **iWF**



# Vorlesung Fertigungstechnik

Prof. Dr.-Ing. Klaus Dröder, 28. Mai 2018

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik