

# Lithografie und LIGA

---

- **Lithografie**

- **Einführung Lithografie, Prozeßschritte**
- **Resiste** (Schutzharz)
- **Photolithographie**
  - Masken
  - Belichtungsverfahren
  - Prozessablauf
- **Elektronenstrahlithographie**
- **Röntgenlithographie**

- **LIGA-Verfahren**

- **Einführung**
  - **Galvanische Abscheidung**
  - **Kunststoffabformung**
    - Spritzguß und Prägeverfahren
    - Herstellung metallischer Strukturen
-

# Einführung in die Lithographie

---

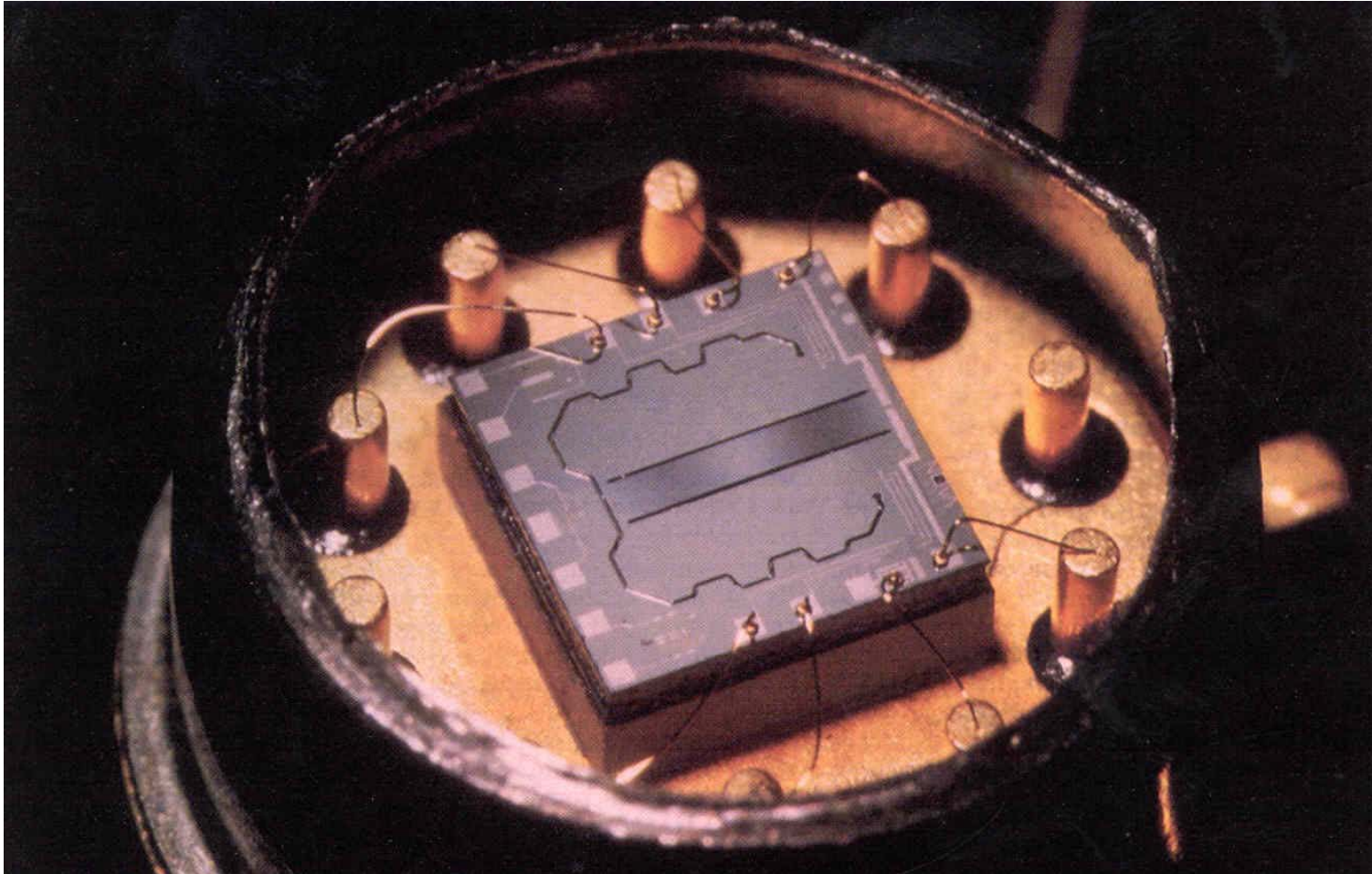
Wie kommt die Mikrostruktur auf den Siliziumwafer ?

---

# Einführung in die Lithographie

---

Wie kommt die Mikrostruktur auf den Siliziumwafer ?



# Einführung in die Lithographie

---

Wie kommt die Mikrostruktur auf den Siliziumwafer ?

Griechisch: Lithographie  $\approx$  Steinschrift (Flachdruckverfahren)

Ziel: Übertragen einer (Mikro-)Struktur in das Substrat bzw. eine aufgebraute Schicht.

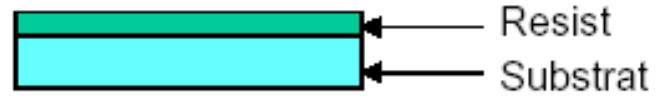
Idee der Lithographie:

Strukturierbarer Lack als Schutzschicht (Resist) gegen die Prozesse der Strukturübertragung

---

# Grober Ablauf der Lithographie

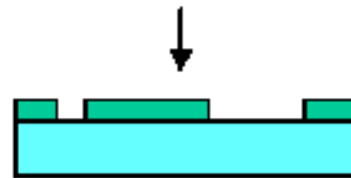
Resist aufbringen



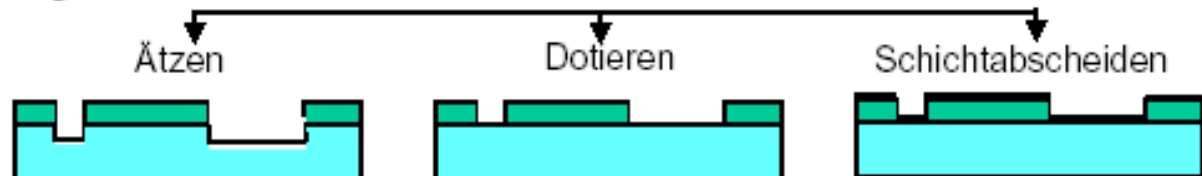
Belichtung



Entwicklung



Strukturübertragung

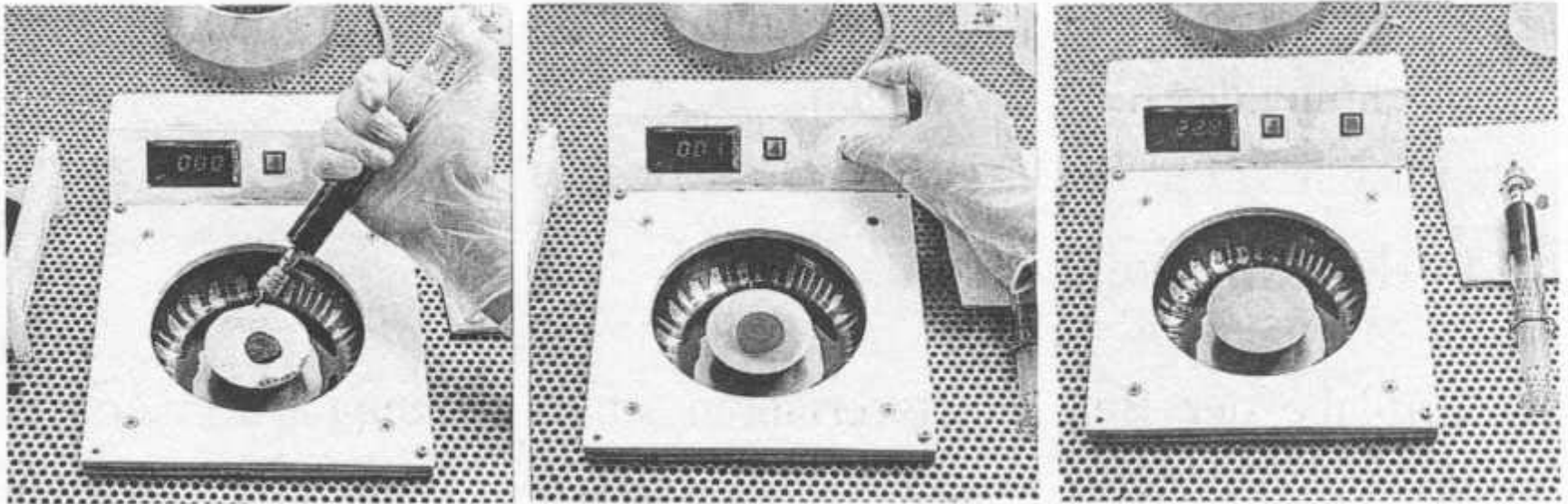


Resist entfernen



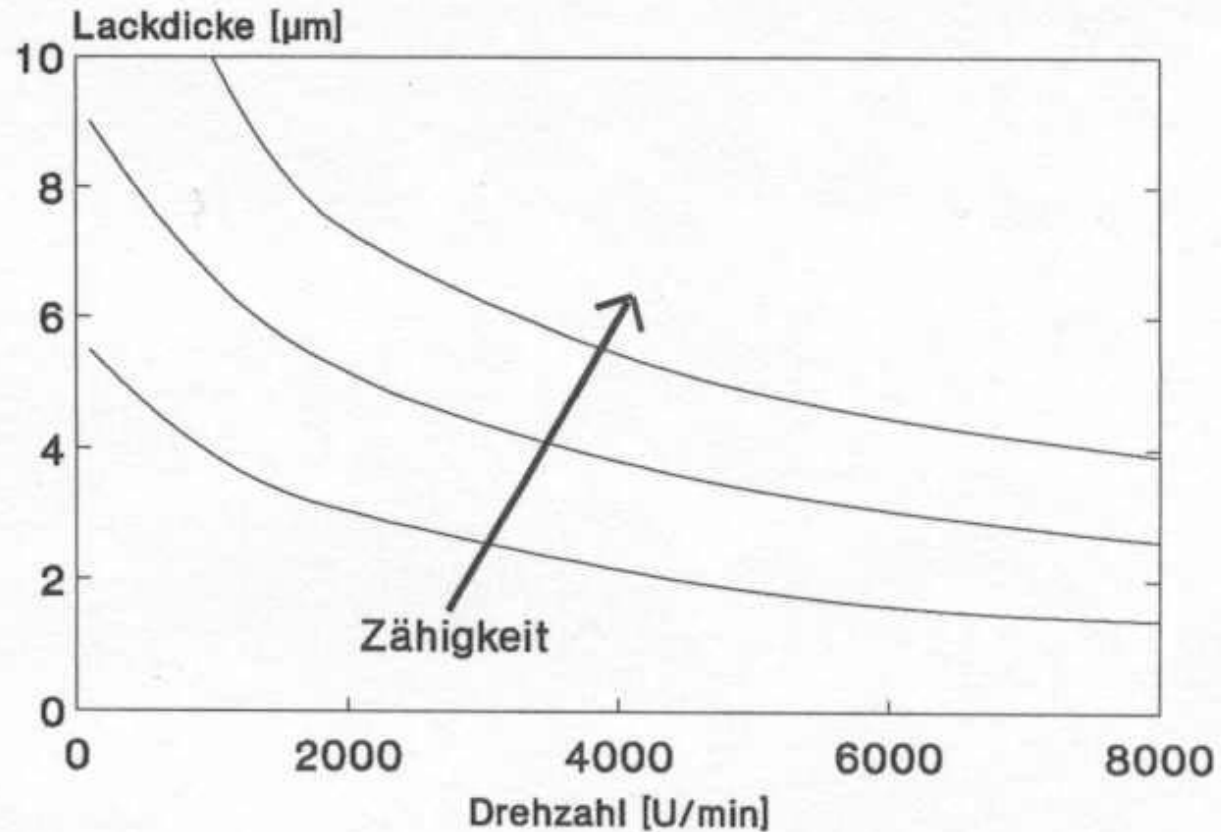
# Belackung der Siliziumscheibe

---



**Bild 4.3:** Belackung der Siliziumscheibe durch Schleuderbeschichtung

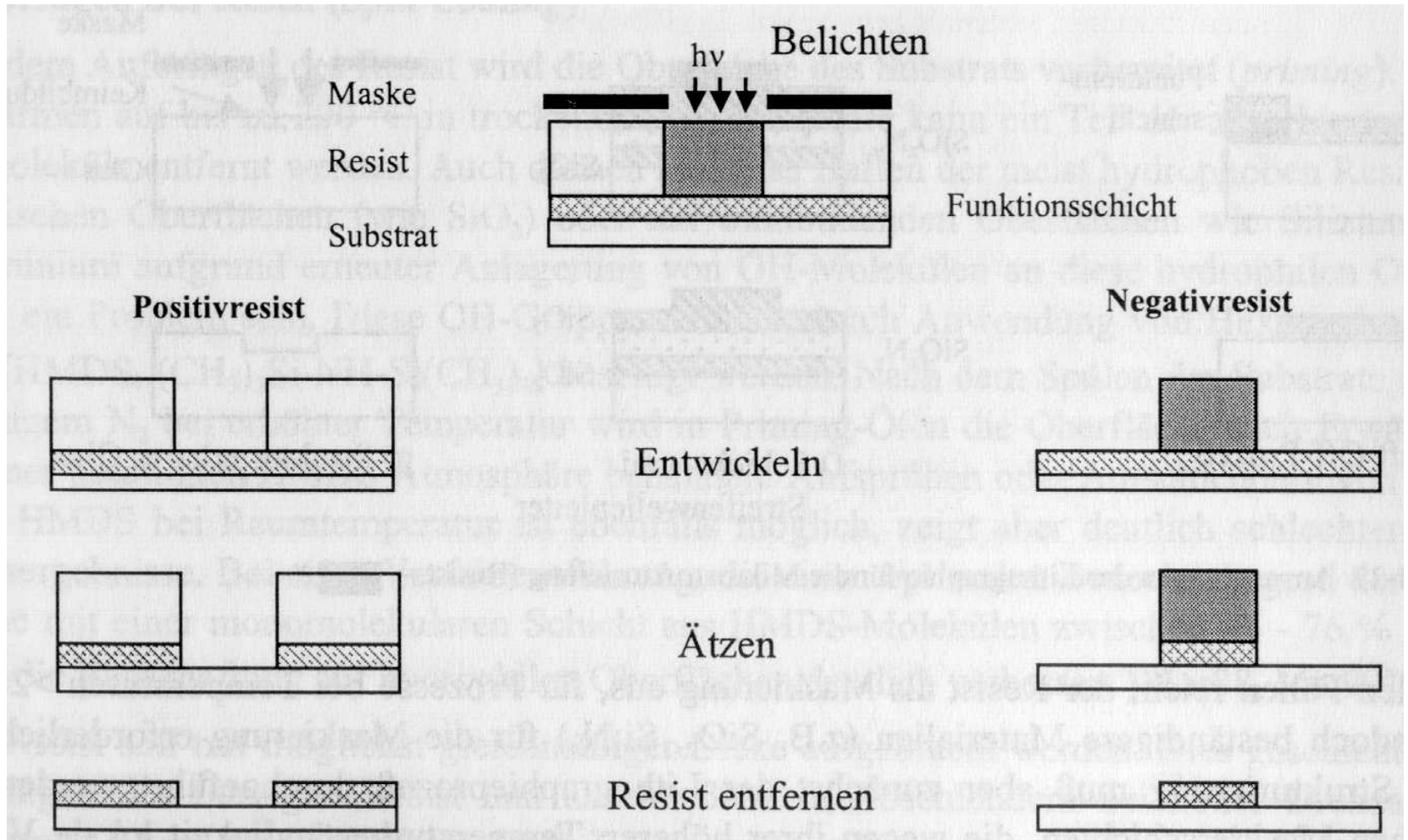
# Lackdicken als f(Schleuderdrehzahl)



**Bild 4.4:** Lackdicke in Abhängigkeit von der Schleuderdrehzahl für verschiedene Lackviskositäten

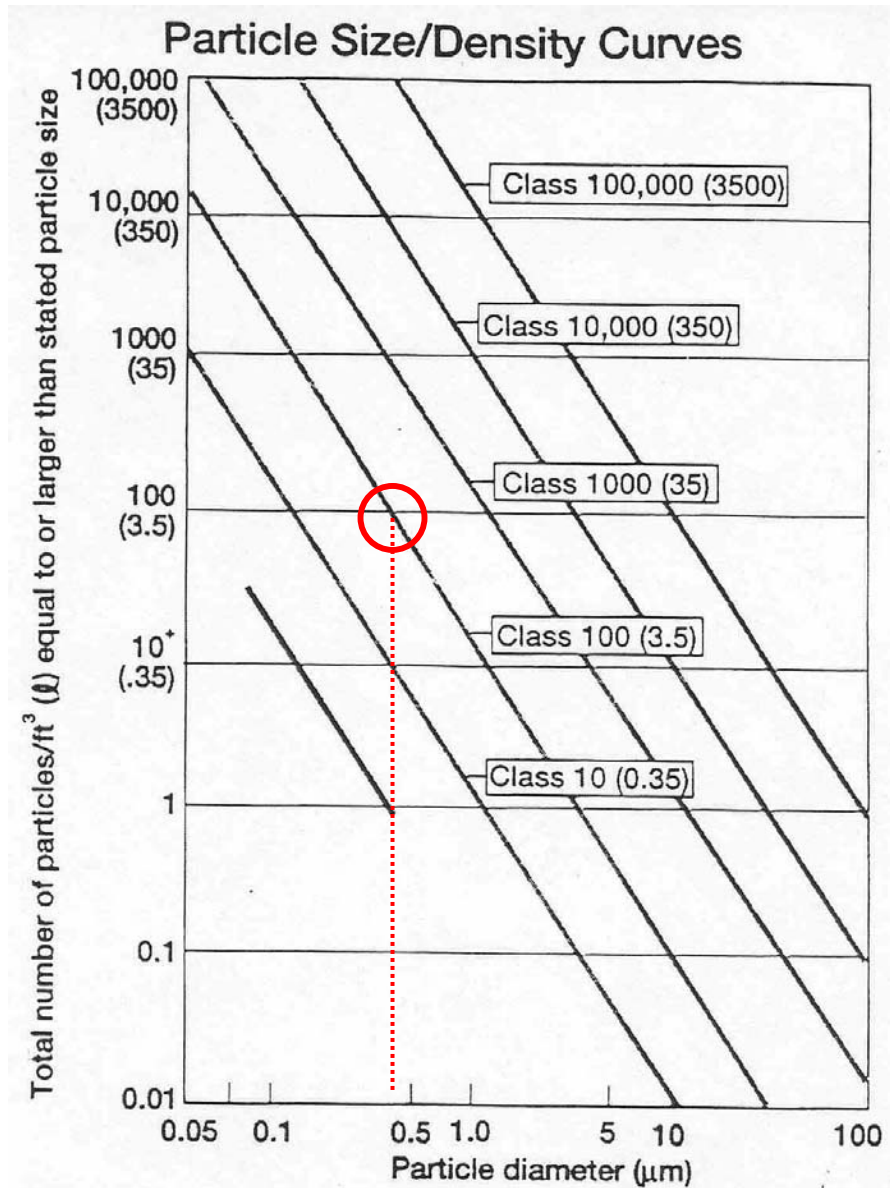
Quelle: Hilleringmann

# Positiv/Negativ - Lacke





# Cleanroom Classes



# Bedeutung der Lithographie

---

- Lithographie – Prozeß kommt in jedem Zyklus vor
    - Die Lithographie ist das Herzstück der Mikrostrukturierung
  - Einteilung nach Wellenlängen
    - Optische Lithographie ( = Photolithographie )
    - Elektronenstrahl Lithographie
    - Ionenstrahl Lithographie
    - Röntgenlithographie
  - Minimale Größe der lateralen Strukturen wird maßgeblich bestimmt durch die Wellenlänge
  - Optische Lithographie ist Standardverfahren
-

---

## •Lithografie

- Einführung Lithographie, Prozeßschritte

- **Resiste** (Schutzharz)

- **Photolithographie**

  - Masken

  - Belichtungsverfahren

  - Prozessablauf

- **Elektronenstrahlithographie**

- **Röntgenlithographie**

## •LIGA-Verfahren

- **Einführung**

- **Galvanische Abscheidung**

- **Kunststoffabformung**

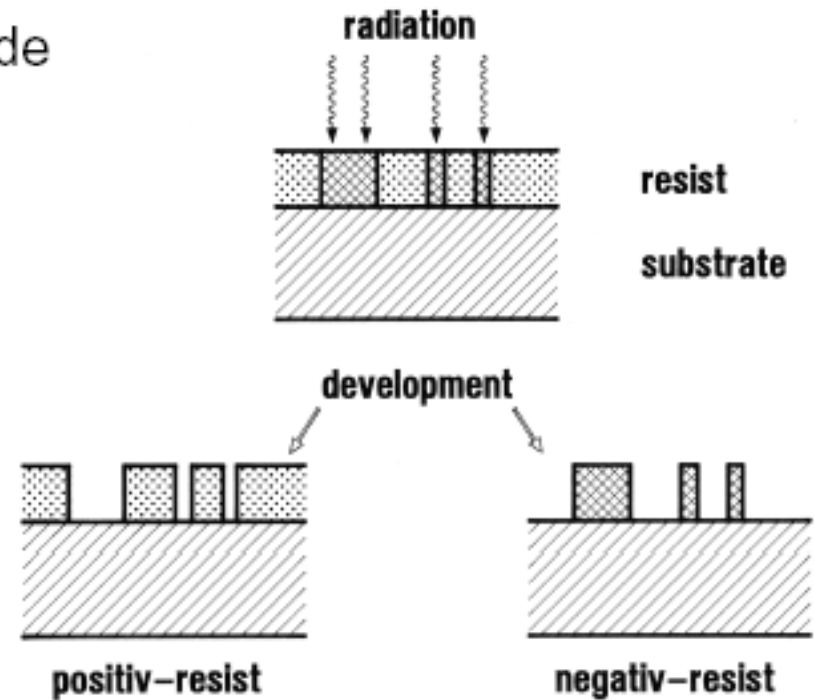
  - Spritzguß und Prägeverfahren

  - Herstellung metallischer Strukturen

---

# Was ist ein Resist?

- strahlungsempfindliches Polymer
- selektiv strukturierbar
- resistent gegen weitere, folgende Strukturierungsprozesse
- Unterscheidung in Positiv- und Negativ – Resists



# Positivresist

- die unbelichteten Bereiche bleiben stehen, die belichteten Bereiche werden beim Entwickeln aufgelöst

## Mehrkomponentenresist ( Standard bei Photolithographie)

- Lösungsmittel
- photochemisch inerte Matrixbildner z.B. Novolak
- Photoaktive Komponente z.B. Diazonaphthochinon

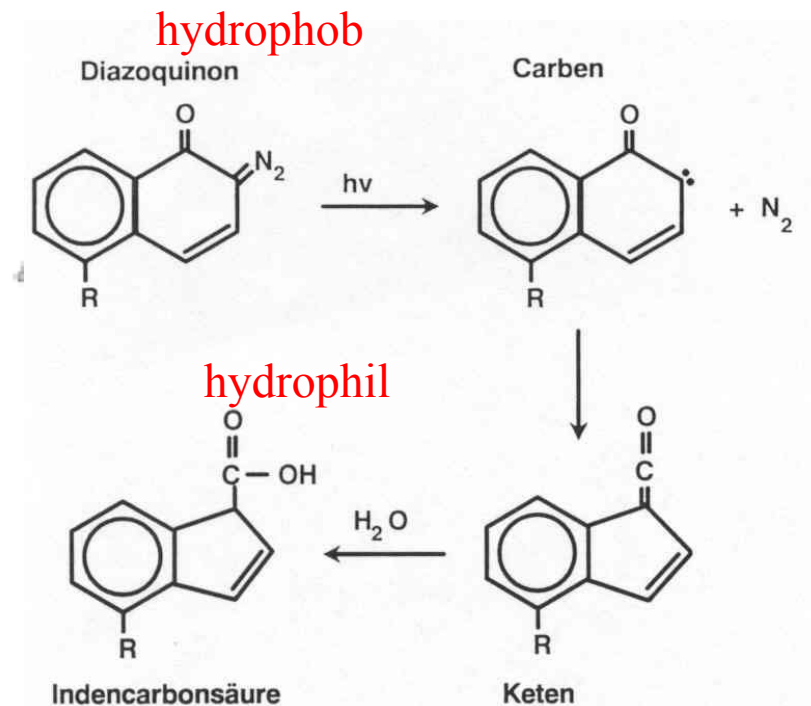
**Bestrahlung (opt.  $\lambda$ )**

**→ Absorption**

**→ Wolff-Umwandlung**

Überführung in  
alkalilösliche Form

**→ Aufnahme von Entwickler möglich**



# Negativresist

---

- **die belichteten Bereiche bleiben stehen, die unbelichteten Bereiche werden beim Entwickeln aufgelöst**

Photoempfindliche Komponente in einem Polymergerüst,  
Lösungsmittel

Bestrahlung → Absorption der Strahlung

Anregung der Photokomponente

→ Energieübertragung auf Polymergerüst

→ Vernetzungsreaktion (Bildung von Polymerketten)

→ Entwickler löst nicht vernetzte Bereiche auf

→ Belichtete Bereiche bleiben stehen

Besonderes Problem bei Negativ-Lacken:

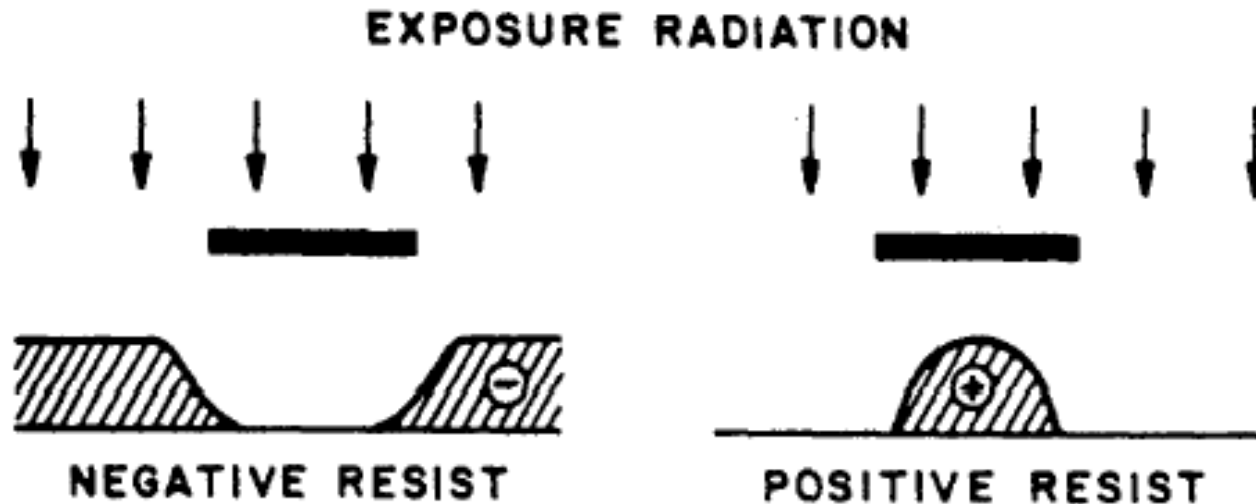
→ Entwickler diffundiert auch in belichtete Bereiche und verursacht Quellen des Lacks

---

# Lackprofil der Resiste

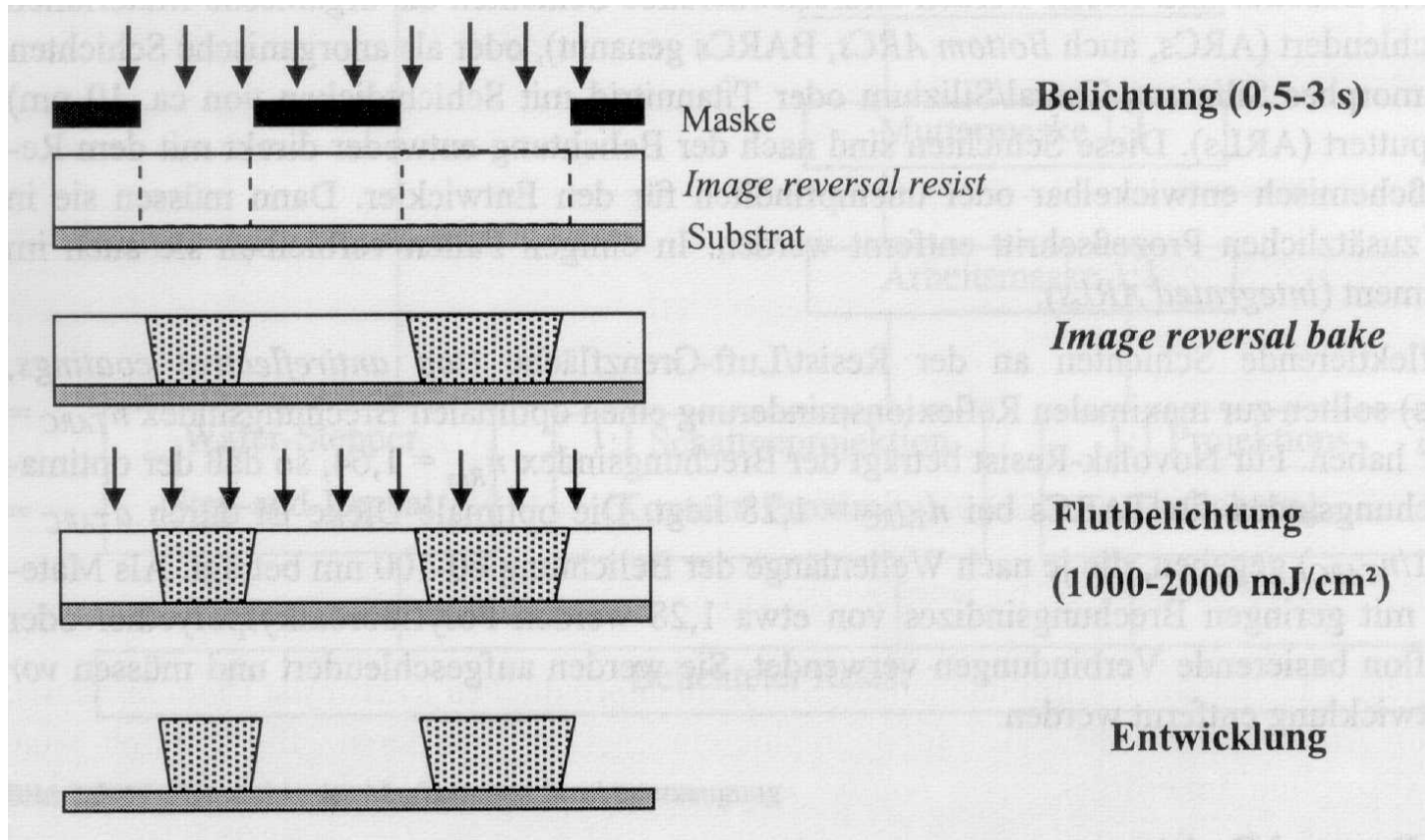
---

Lackprofile der einzelnen Resisttypen nach der Entwicklung



- Die belichteten und entwickelten Resistprofile weichen durch Kantenverrundung vom Rechteckprofil ab
-

# Image Reversal im Positivresist



## Trick:

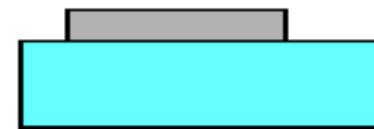
- Resist wird zweimal belichtet und zwischen den Belichtungen chemisch modifiziert
- Positivresist verhält sich wie hochauflösender Negativresist



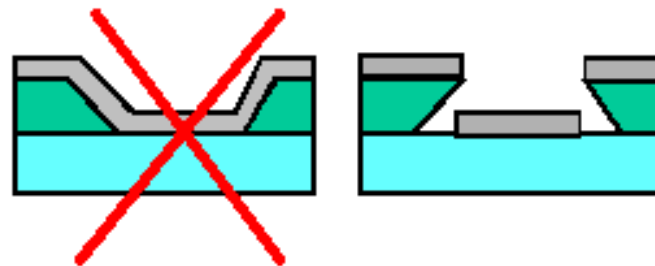
# Lift – Off Prozess

**Ziel: Strukturierung von Metallen ohne Ätzung**

- Strukturierung von Photoresist
- Ganzflächige Metallabscheidung (z.B. Pt)
- Strippen des Photoresists  
→ Metall auf Photoresist wird entfernt
- Metall auf Substrat bleibt stehen



- **Wichtig:** Umkehr des Kantenprofils durch Image Reversal



# Vergleich Positiv- / Negativresist

---

	Positiv - Resist („gleich Resist weg“)	Negativ - Resist
Minimale Strukturbreite	< 0.5 $\mu\text{m}$	ca. 2 $\mu\text{m}$
Quellen beim Entwickeln	nein	ja
Aspektverhältnis	gut	mäßig
Lift-off	möglich	nicht möglich
Thermische Stabilität	gut (bis 200 °C)	mäßig
Staubpartikel	kaum Einfluß	bewirken Löcher
Passivierung bei Plasma-Ätzung	sehr gut	mäßig
Passivierung bei Naßchemie	mäßig	sehr gut
Adhesion zu Si	gut	sehr gut
Kosten	teurer	günstiger

---

---

## •Lithografie

- Einführung Lithographie, Prozeßschritte

- Resiste (Schutzharz)

- **Photolithographie**

  - Masken

  - Belichtungsverfahren

  - Prozessablauf

- Elektronenstrahlithographie

- Röntgenlithographie

## •LIGA-Verfahren

- Einführung

- Galvanische Abscheidung

- Kunststoffabformung

  - Spritzguß und Prägeverfahren

  - Herstellung metallischer Strukturen

---

# Wellenlängen der Photolithographie

---

- UV-Strahlung kommt zum Einsatz (UV - Lithographie)
  - Verwendete Strahlungsquellen für UV- und Deep UV- Licht
    - **Quecksilberdampflampen**
      - 436 nm (G - Linie)
      - 365 nm (I - Linie)
    - **Excimerlaser**
      - KrF: 248nm
      - ArF: 193nm
      - F<sub>2</sub> : 157nm
  - Excimerlaser und bessere Belichtungsverfahren erweitern den Einsatzbereich bis zu 140nm Linienbreite
  - Die optische Lithographie ist das Arbeitspferd der Mikrotechnik
-

# Masken in der optischen Lithographie

---

## Chrommaske

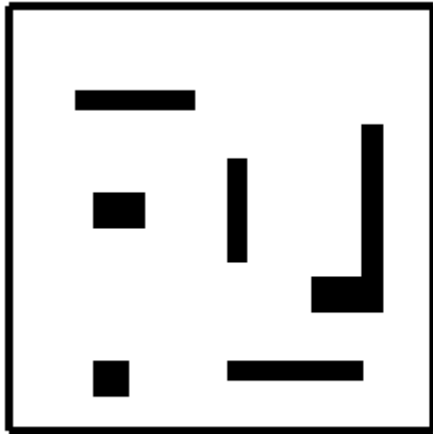
- Quarzglasplatte mit einer strukturierter Chromschicht (Absorber)
  - Kosten einer Chrommaske:
    - 30 €/cm<sup>2</sup> für Strukturen > 5µm
    - 75 €/cm<sup>2</sup> für Strukturen 1 – 5 µm
- Maske für 4“-Wafer: circa 500 – 2500 €

## Herstellung

- Resist auf chrombeschichtete Quarzplatte (Maskenblank)
  - Resist mit **E - Beam** strukturieren
  - Resist entwickeln
  - Chrom (nasschemisch) ätzen
  - Resist stripfen
-

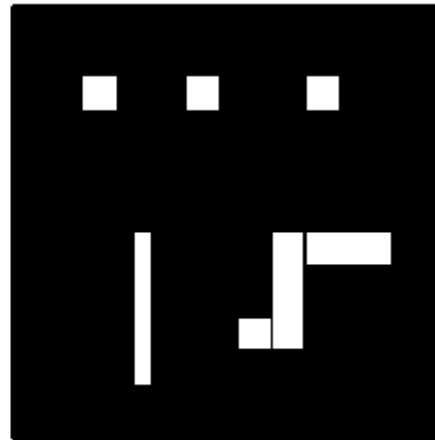
# Unterscheidung der Masken

---



light field

hellfeld



dark field

dunkelfeld

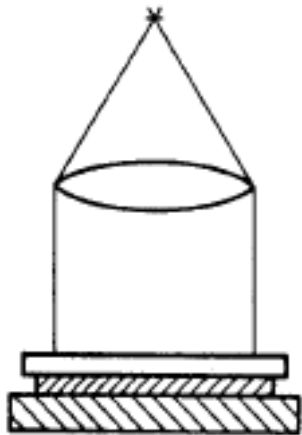
---

# Belichtungsverfahren

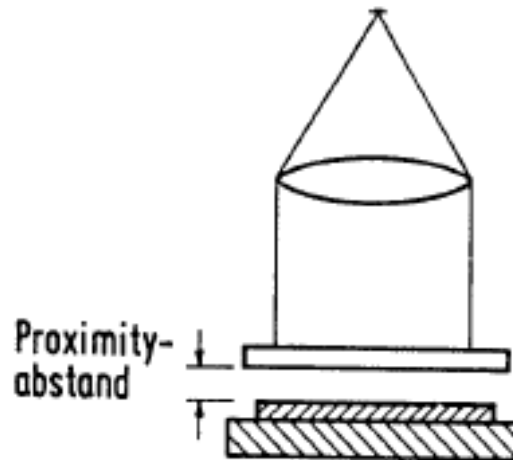
## Schattenprojektion



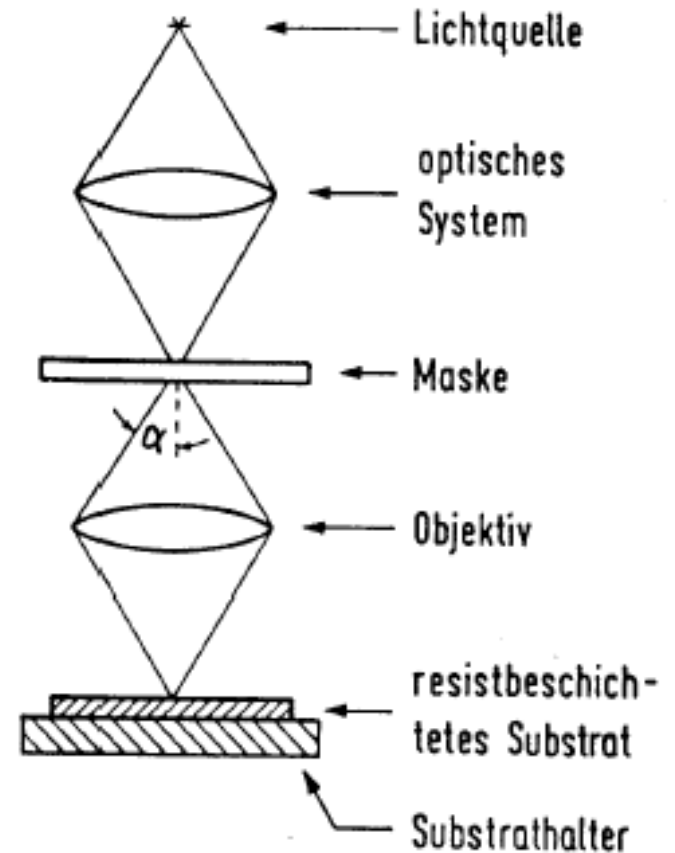
### Kontakt-Belichtung



### Proximity-Belichtung



## Abbildende Projektion



# Auflösung bei der Schattenprojektion

- Physikalische Grenze gegeben durch Wellennatur des Lichtes

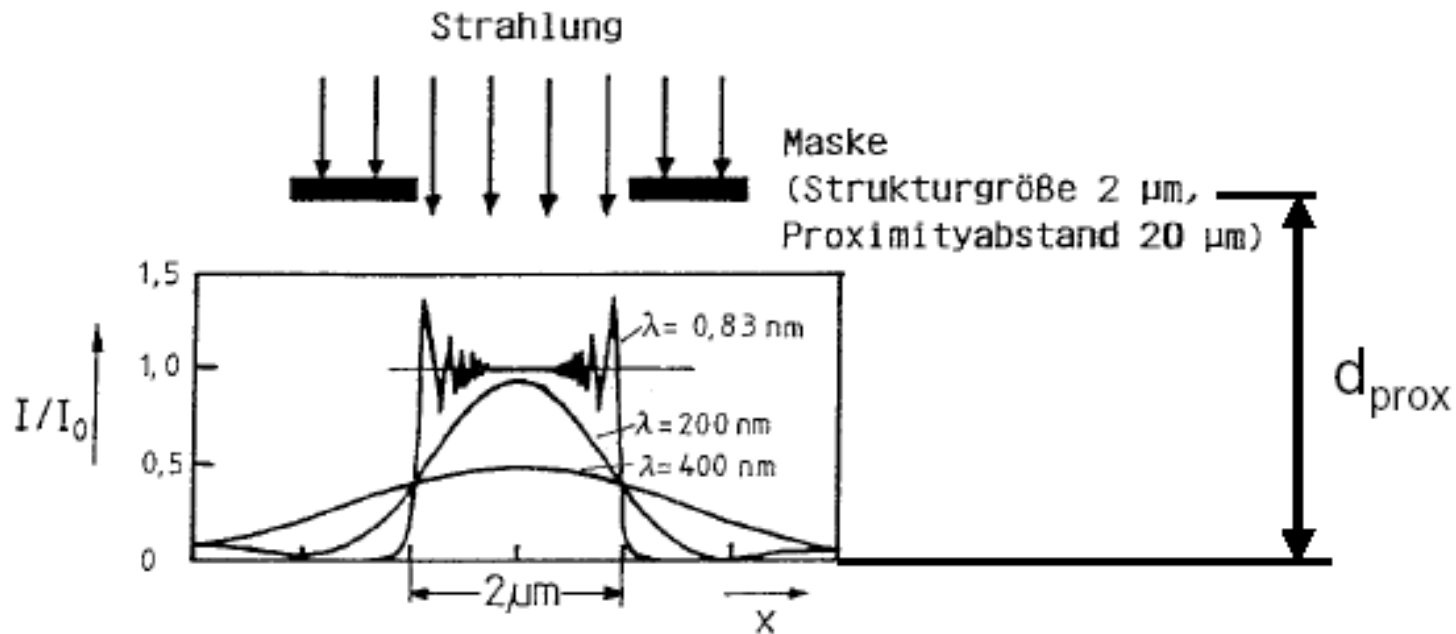
→ Beugung

→ Intensitätsverteilung

$$b_{\min} = \sqrt{\lambda d_{\text{prox}}}$$

Wellenlänge

Proximity-  
Abstand

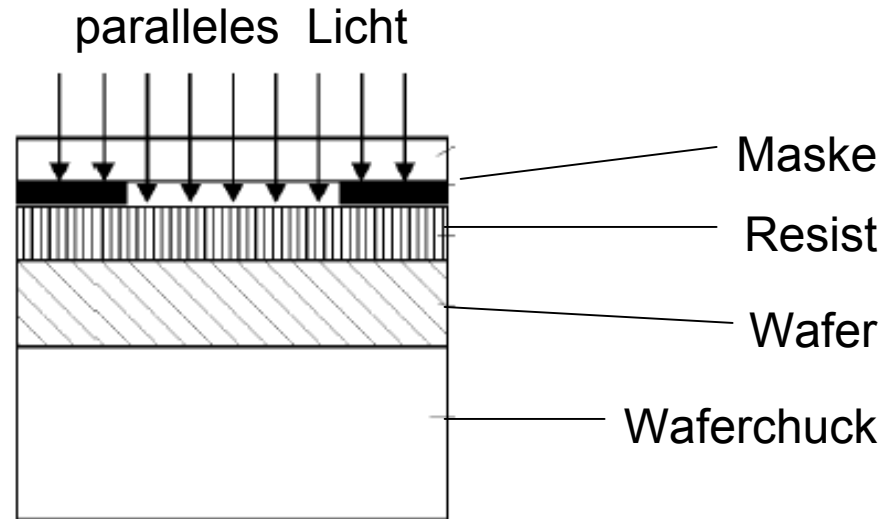


**Achtung:** es existieren unterschiedliche Näherungsformeln für  $b_{\min}$



# Kontakt-Belichtung

- Maske liegt auf Wafer / wird angepresst
  - Geringe Abbildungsfehler
  - Strukturen im Sub- $\mu$ -Bereich sind möglich
- Full-Wafer-Verfahren
  - Hoher Durchsatz
- Verschmutzung der Maske
- Maskendefekte durch Staubteilchen sind unvermeidbar

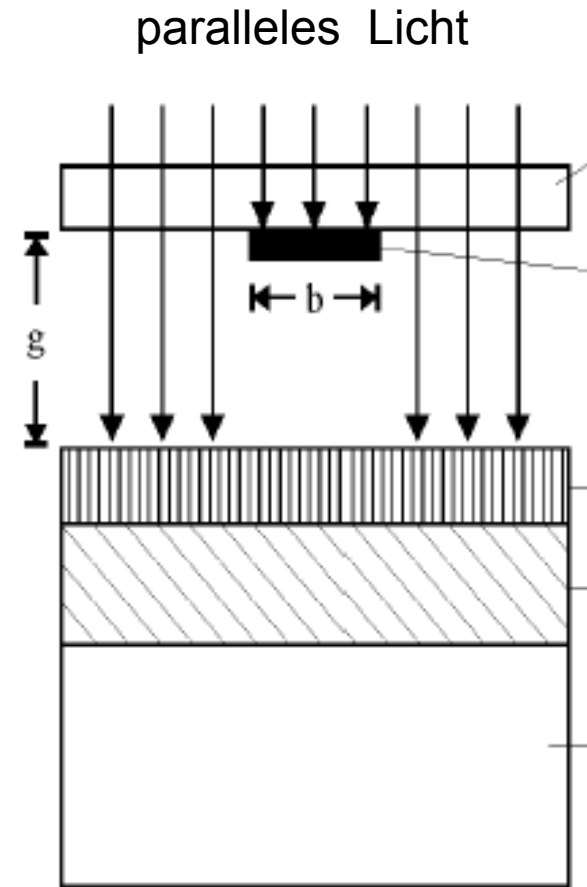


## Varianten:

- Soft-Kontakt
- Hard-Kontakt
- Vakuum-Kontakt

# Proximity-Belichtung

- Kein direkter Kontakt zwischen Maske und Substrat
  - Höhere Maskenlebensdauer
  - Geringere Strukturauflösung
- Proximitygap:  
 $10 \mu\text{m} \leq g \leq 30 \mu\text{m}$ .
- Full-Wafer-Verfahren:  
→ Hoher Durchsatz
- Standardverfahren in der Mikrostrukturtechnik



# Abbildende Projektion

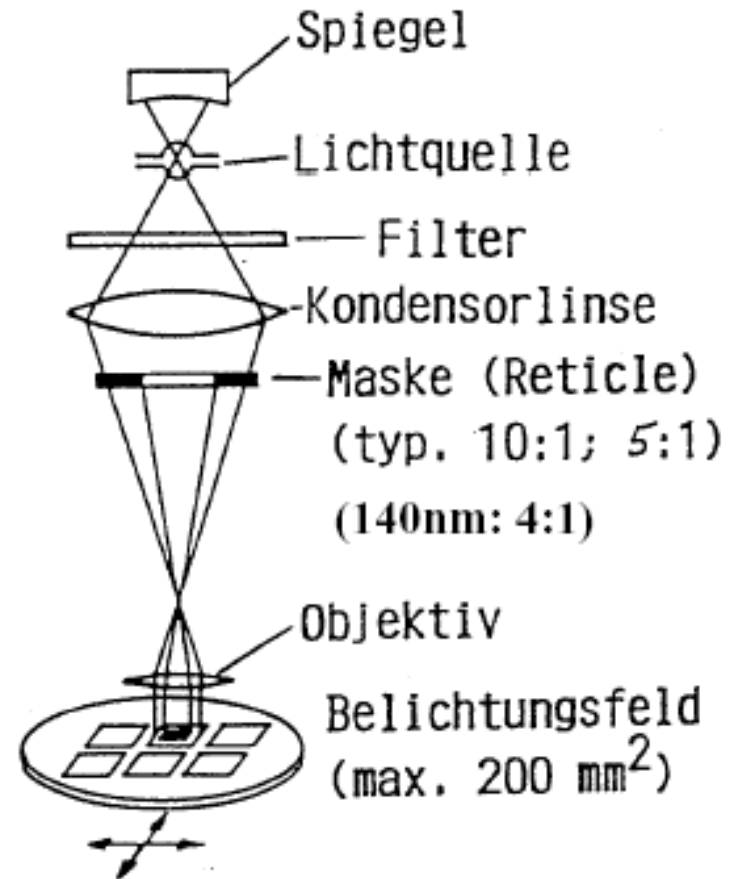
- Verkleinerung der Struktur auf Maske durch Objektiv
- abschnittsweise Projektion der Maske auf den Wafer  
→ Maske enthält nur eine funktionelle Einheit z. B. einen Chip  
→ „step and repeat“-Verfahren

- $b_{\min} = 0.5 \cdot \lambda / NA$

NA: numerische Apertur des Systems

- Tiefenschärfe  $\Delta f = \lambda / NA^2$

- $\Delta f / b_{\min} \sim 1 / NA$



verschiebbarer Probenstisch  
(step and repeat)

# Rechenbeispiele zur Strukturauflösung

---

Wellenlänge: 400 nm

Numerische Apertur NA: 0,5

Proximityabstand: 30  $\mu\text{m}$

Lackdicke: 2  $\mu\text{m}$

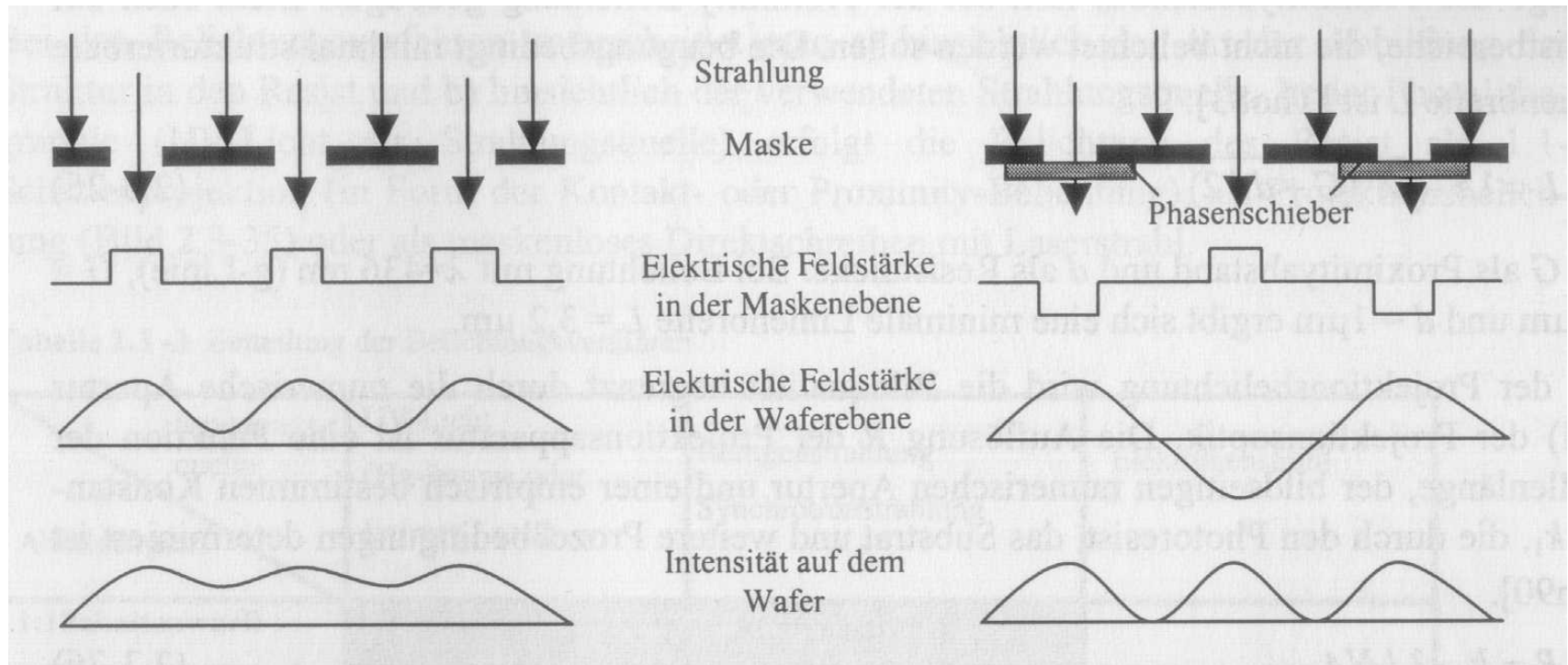
Kontaktbelichtung:  $b_{\text{min}} = 0,6 \mu\text{m}$

Proximitybelichtung:  $b_{\text{min}} = 5,5 \mu\text{m}$

Projektion:  $b_{\text{min}} = 0,4 \mu\text{m}$

---

# Phasenmasken



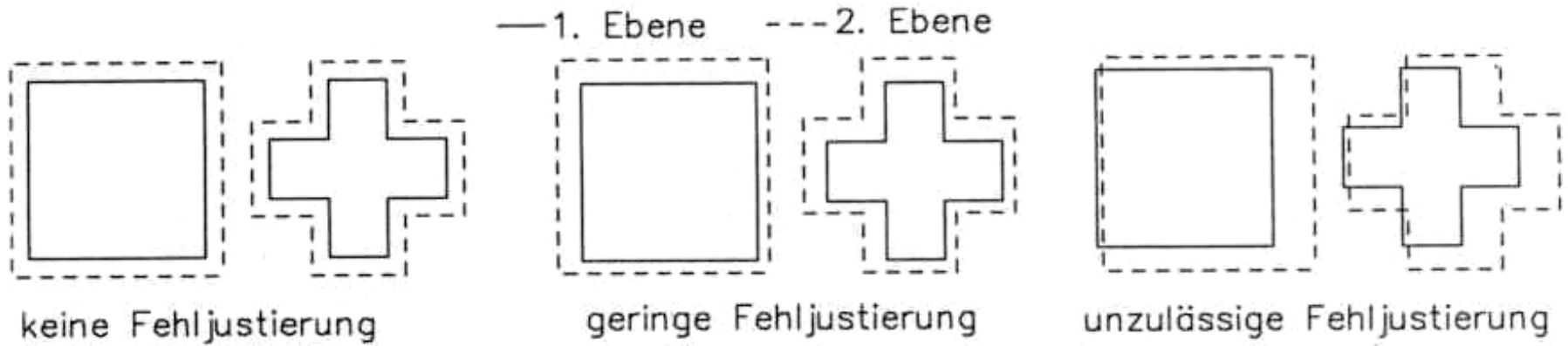
Phasenverschiebung um  $180^\circ$  durch Gangunterschied  $\lambda/2$

→ Destruktive Interferenz

→ Verbesserung von Kontrast und Auflösung

# Justiermarken

---



**Bild 4.9:** Justiermarken zum Ausrichten der Scheiben und zur Kontrolle der Überlagerungsgenauigkeit

---

# Prozessablauf Lithographie

---



# Überblick Lithographie

	Photolithographie	Elektronen-Strahl	Synchrotron-Strahl
Maske	→ Cr-Maske	→ serielles Verfahren!	→ Röntgenmaske Ti-Folie + Au-Absorber
Resist	→ Standard: 3 Komp. Pos. oder Neg. → SU-8 (hohe Aspekt- verhältnisse)	→ PMMA	→ Röntgenreist (PMMA)
Belichtungs- verfahren	→ Proximity → Kontakt → Abbildende Projektion → Phasenschieber/ Mehrlagen-Resists	→ Gaußscher Strahl → Raster – Scan → Vector – Scan → Geformter Strahl	→ Proximity

**Standard in der  
Mikrotechnik**

**Herstellung von  
Cr-Masken**

**LIGA**



---

## •Lithografie

- Einführung Lithographie, Prozeßschritte

- Resiste (Schutzharz)

- Photolithographie

  - Masken

  - Belichtungsverfahren

  - Prozessablauf

- Elektronenstrahlithographie

- Röntgenlithographie

## •LIGA-Verfahren

- Einführung

- Galvanische Abscheidung

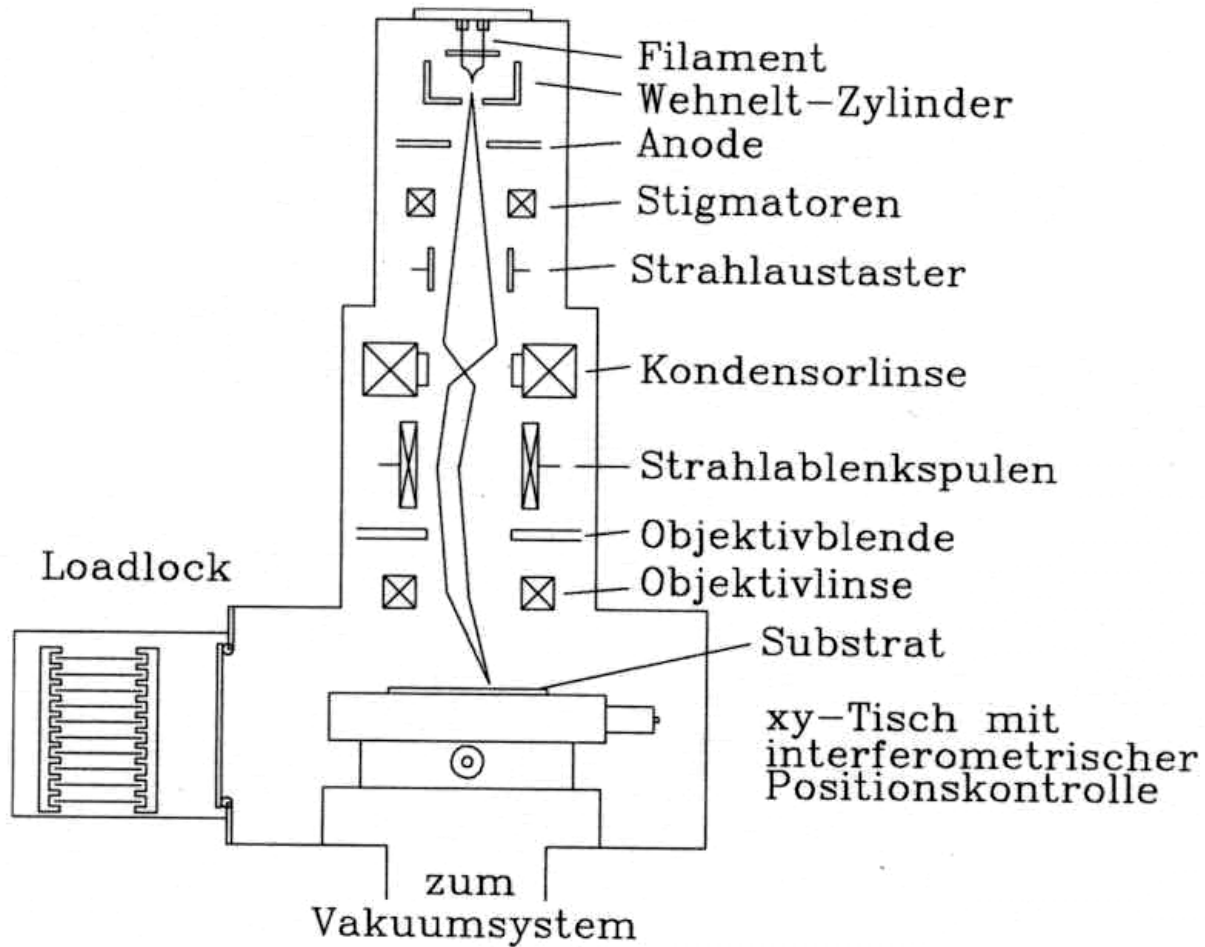
- Kunststoffabformung

  - Spritzguß und Prägeverfahren

  - Herstellung metallischer Strukturen

---

# Elektronenstrahlschreiber



**Bild 4.7:** Schnittbild der elektronenoptischen Säule eines Elektronenstrahlschreibers (nach /4/)

# Schreibstrategien beim Gauß'schen Strahl

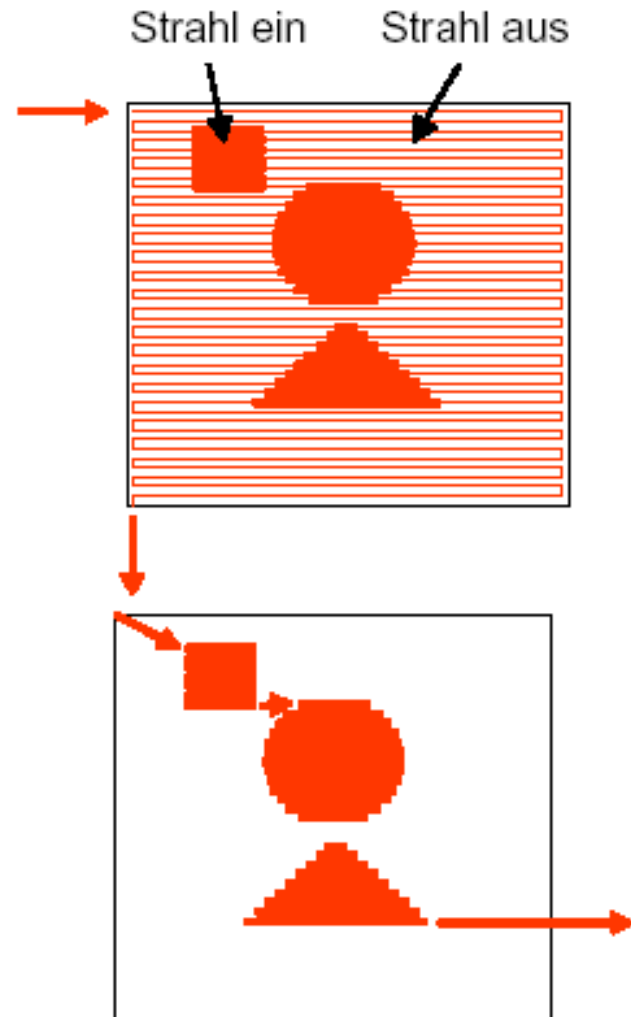
**Ziel: Minimierung der Schreibzeit**

## Raster – Scan

- E-Strahl wird mäanderförmig über gesamte Fläche geführt
- Strahl nur an den zu belichtenden Stellen eingeschaltet

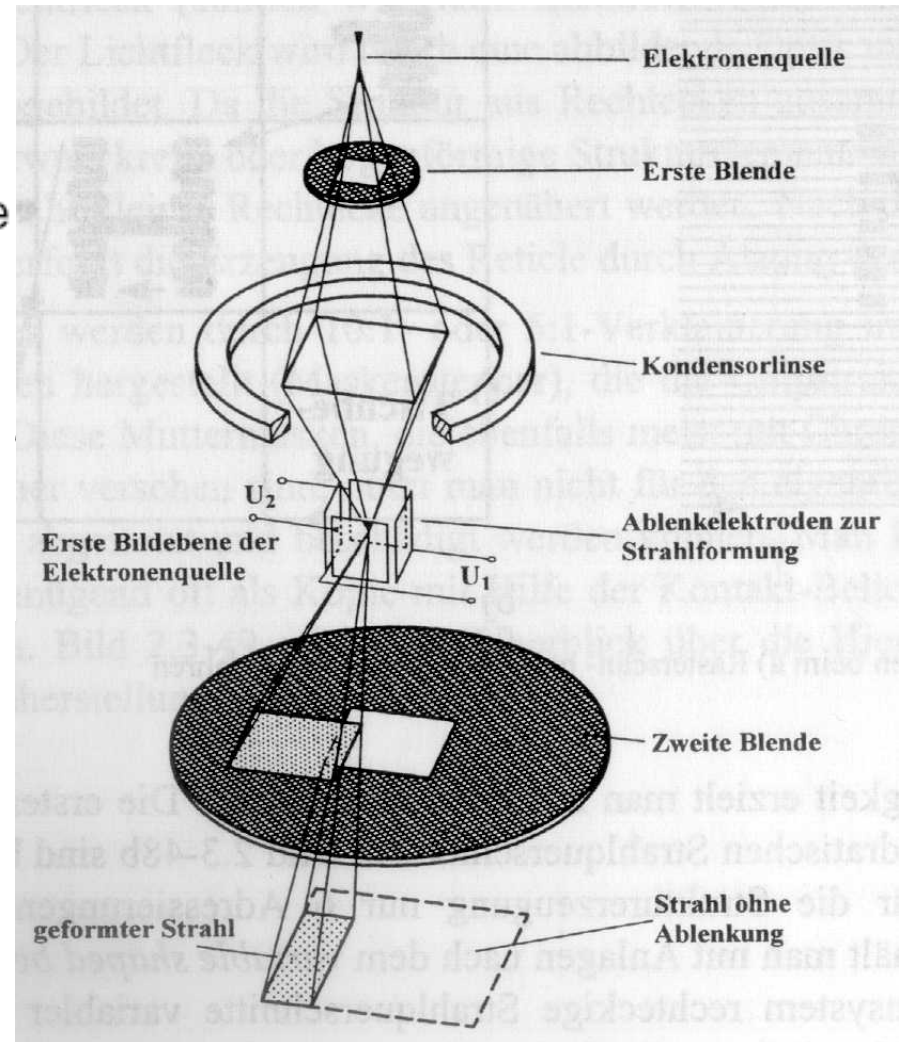
## Vektor – Scan

- Nur die zu belichtenden Stellen werden angefahren
- Zeitersparnis



# Geformter Strahl

- Abbildung der ersten Blende auf die zweite → Rechteckige Strahlform
- Vergrößerung der belichteten Fläche → deutlich geringere Schreibzeiten
- Nachteil:  
Abzubildende Struktur muß gut in Rechtecke aufzuteilen sein  
→ oft ein Problem in der MST



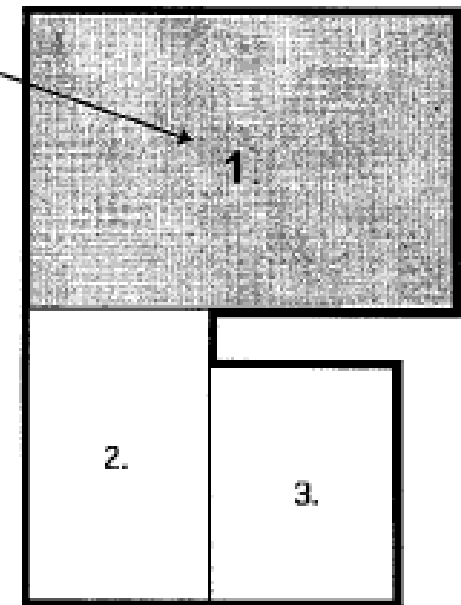
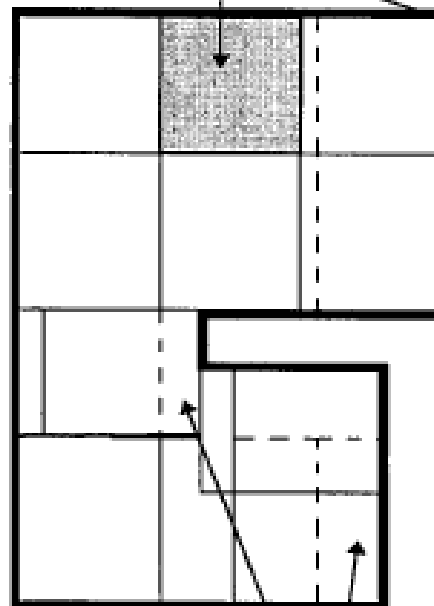
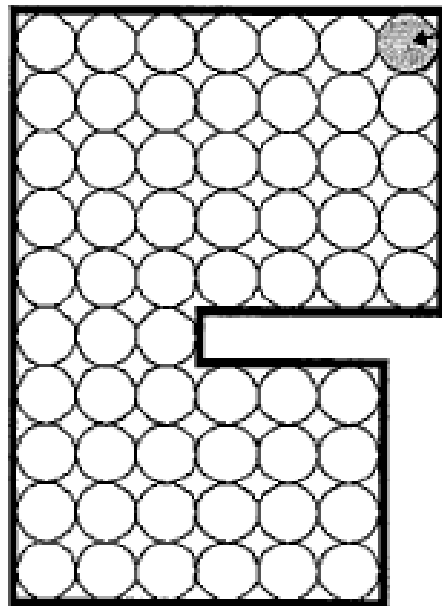
# Vorteil des geformten Strahls

Focused "Gaussian-Beam"

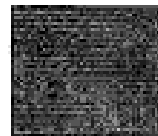
Fixed - Shape Beam

Variably - Shaped Beam

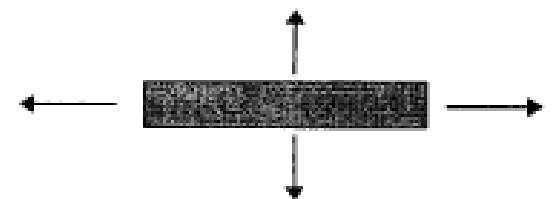
One Exposure Shot



Beam Shape :



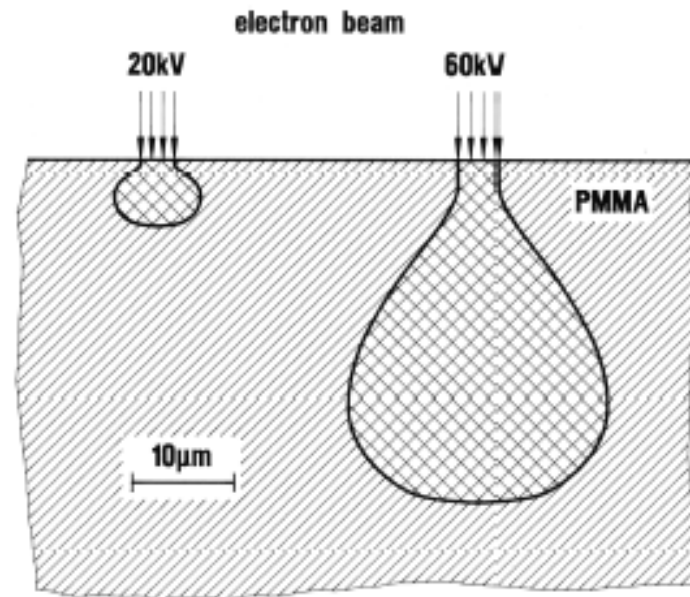
Overlappings



# Auflösung der Elektronenstrahlithographie

Kleinste Strukturgeometrie wird bestimmt durch Wechselwirkung zwischen Elektronen, Resist und Substrat

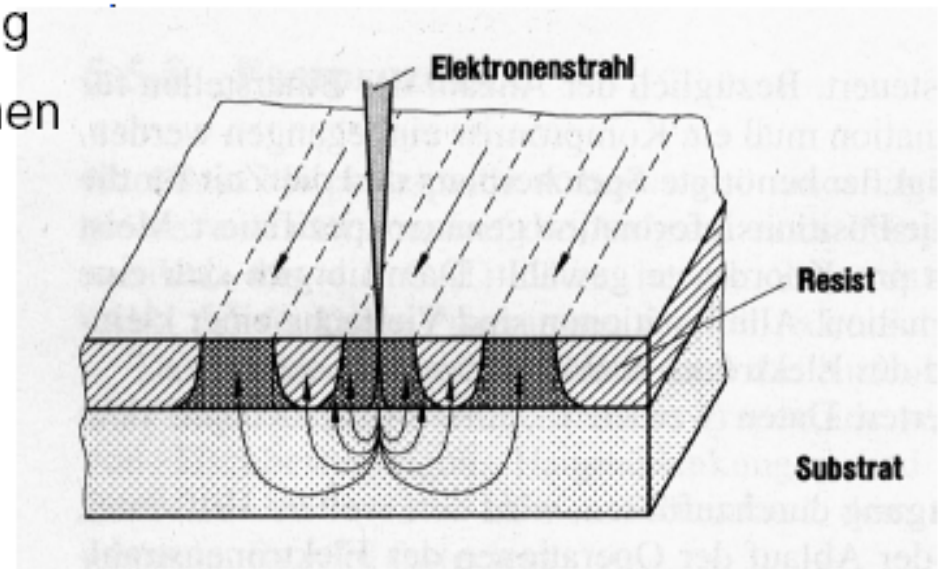
- Strahldurchmesser ( $\sim$  nm) nicht entscheidend
- Vorwärtsstreuung der Elektronen **im Resist**  
→ keulenförmige Verteilung



# Auflösung der Elektronenstrahlithographie

**Kleinste Strukturgeometrie wird bestimmt durch Wechselwirkung zwischen Elektronen, Resist und Substrat**

- Strahldurchmesser ( $\sim$  nm) nicht entscheidend
- Vorwärtsstreuung der Elektronen **im Resist**
  - keulenförmige Verteilung
- Rückstreuung der Elektronen vom Substrat
  - Belichtung des Resists von unten



# Auflösung der Elektronenstrahlithographie

---

## **Proximity-Effekt:**

Elektronen-Rückstreuung:

- niedrigere Elektronendosis für große, zusammenhängende Gebiete als für kleine, isolierte Gebiete (schmale Linien)
  - eng beieinanderliegende Linien können nicht mehr aufgelöst werden
  - begrenzte minimal erreichbare Strukturbreite
-



---

## •Lithografie

- Einführung Lithographie, Prozeßschritte

- Resiste (Schutzharz)

- Photolithographie

  - Masken

  - Belichtungsverfahren

  - Prozessablauf

- Elektronenstrahlithographie

- Röntgenlithographie

## •LIGA-Verfahren

- Einführung

- Galvanische Abscheidung

- Kunststoffabformung

  - Spritzguß und Prägeverfahren

  - Herstellung metallischer Strukturen

---

# Röntgenlithographie

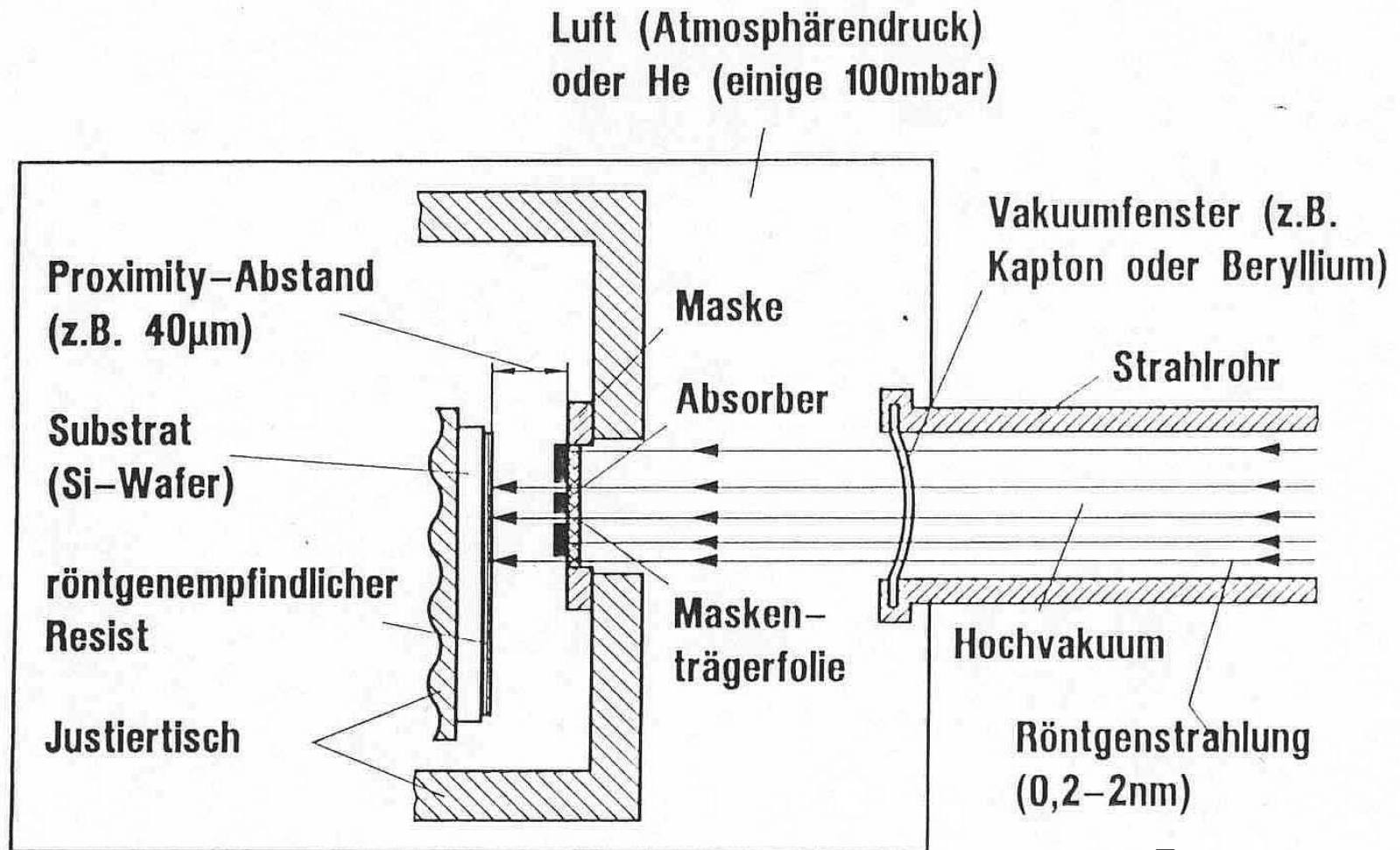
---

- Wellenlänge der Strahlung ist entscheidend für die minimale Strukturauflösung
- Optische Lithographie:  
Wellenlängen von 436 nm – 157 nm
- Röntgenlithographie:  
Wellenlängen von 2 – 0.2 nm sind nutzbar !!  
→ wesentliche Verringerung der Strukturweite

Photolithographie:

$$b_{\min} = \sqrt{\lambda d_{\text{prox}}}$$

# Synchrotron (Röntgen-) Strahlung



Fenster:  
30x30 mm<sup>2</sup>

# Masken für die Röntgenlithographie

---

## Anforderungen

- Transmission einer Schicht

$$T(\lambda) = e^{-\alpha(\lambda) \cdot d} \quad \alpha : \text{Absorptionskoeff.}, d: \text{Schichtdicke}$$

- Absorber

- Absorption der Strahlung im best. Bereich
- Material mit hohem Atomgewicht (Au, Ta, W),  
hoher Absorptionskoeffizient
- Gold – Schicht mit Dicke bis zu 10  $\mu\text{m}$

- Trägerfolie

- idealerweise keine Absorption
  - Material mit geringem Atomgewicht (Be, Ti, Si)
  - Dünne Schicht (wenige  $\mu\text{m}$ !), mechanische Stabilität ?
-

# Bedeutung der Röntgenlithographie

---

## Minimale Strukturbreite

- sehr kleine Wellenlängen
    - Beugungseffekte sind vernachlässigbar !
    - Strukturbreiten im nm – Bereich sind möglich
  - Nachteil
    - Synchrotron – Strahlung sehr aufwendig (Teilchenbeschleuniger)
    - hohe Anforderungen an die Röntgenmasken
    - sehr teures Verfahren
    - Für die Mikroelektronik (noch) keine Bedeutung
-

# Röntgentiefenlithographie

---

- Verwendung dicker Resists: bis mehrere 100  $\mu\text{m}$
- Erzeugen von 3D-Strukturen mit hohem Aspektverhältnis

Weiterentwicklung:

LIGA (Röntentiefenlithographie, Galvanoformung, Abformung)

---

---

## •Lithografie

- Einführung Lithographie, Prozeßschritte

- Resiste (Schutzharz)

- Photolithographie

  - Masken

  - Belichtungsverfahren

  - Prozessablauf

- Elektronenstrahlithographie

- Röntgenlithographie

## •LIGA-Verfahren

- Einführung

- Galvanische Abscheidung

- Kunststoffabformung

  - Spritzguß und Prägeverfahren

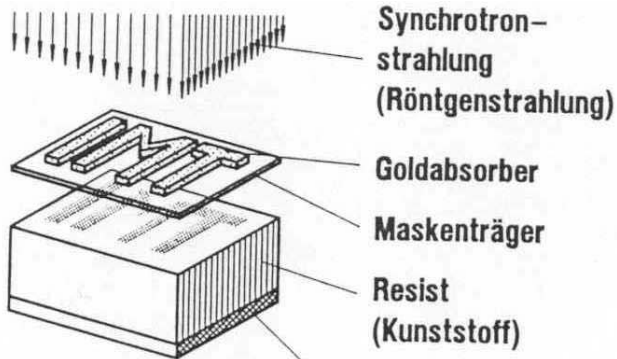
  - Herstellung metallischer Strukturen

---

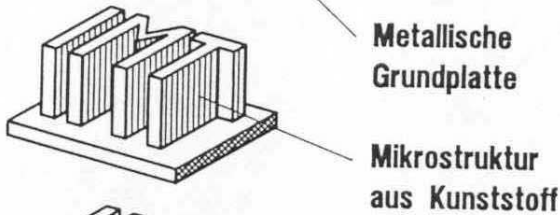
# LIGA Prozess

## 1. Lithographie

Bestrahlung

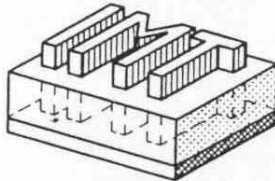


Entwicklung des Resists

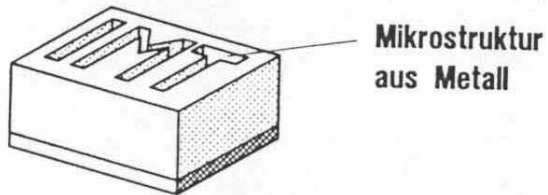


## 2. Galvanik

Metallabscheidung

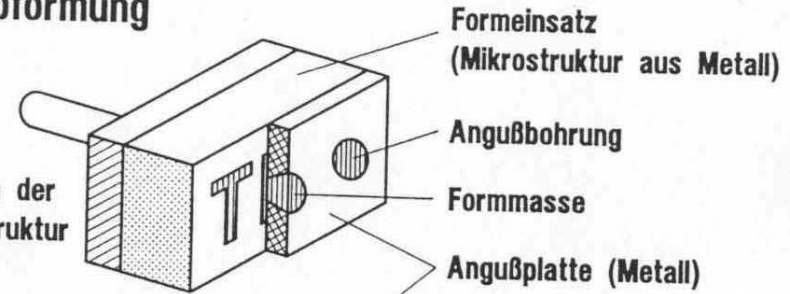


Entfernen des unbelichteten Resists

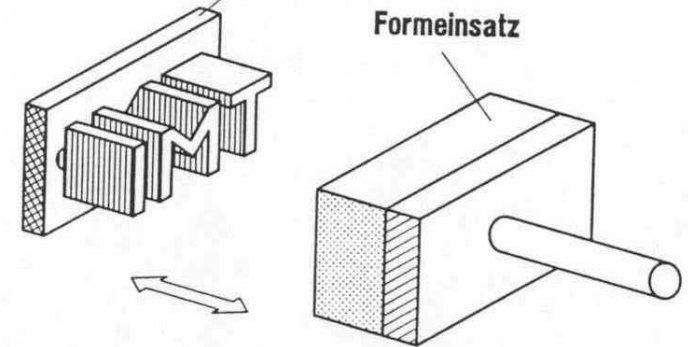


## 3. Abformung

Befüllen der Mikrostruktur

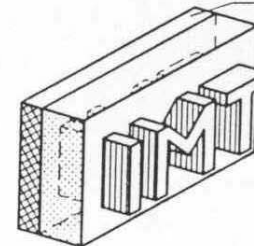


Entformen



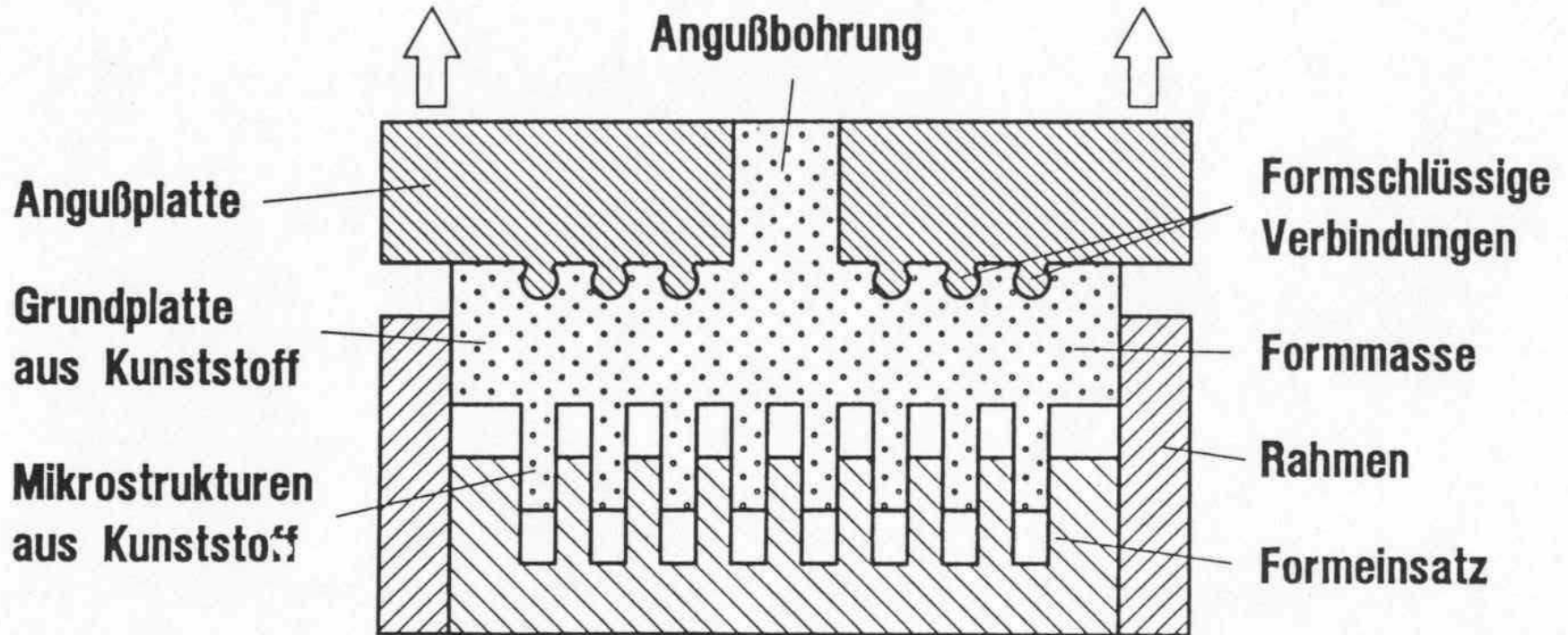
## 4. Zweite Galvanik

Angußplatte=Elektrode



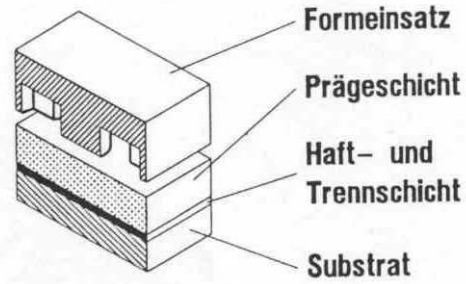


# LIGA Abformung Kunststoff

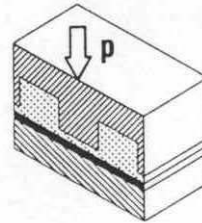


# Prägeverfahren

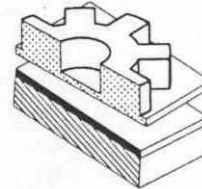
Vorbereiten des  
Prägeprozesses



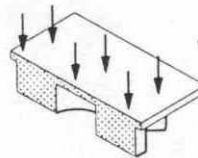
Warmumformen



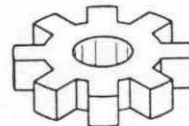
Abtrennen



Reaktives Ätzen



Vereinzelte  
Struktur



**Ende**

---

---