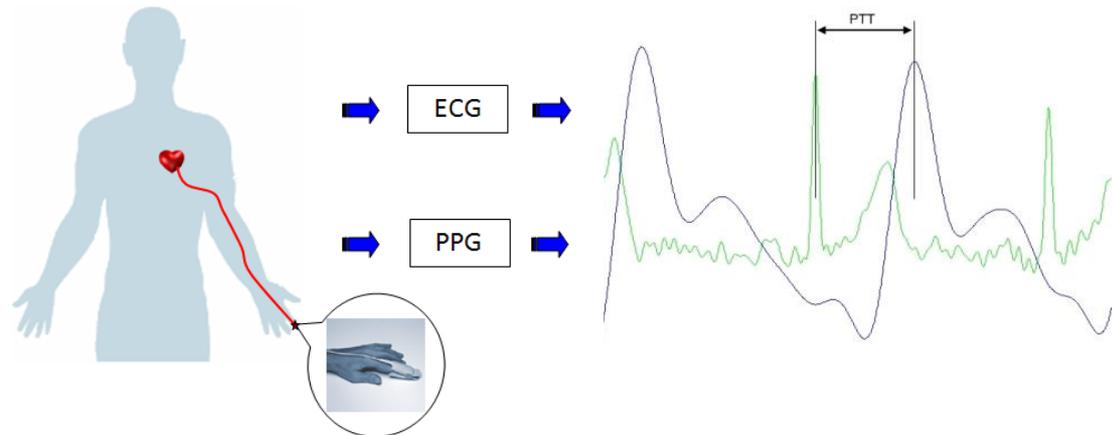


Vorlesung Mikrosystemtechnik Teil 7: Lithographie

Stefan Hey

Institut für Technik der Informationsverarbeitung



Gliederung

- Wiederholung
- Lithographie
 - Grundprinzip
 - Ablauf
 - Resist-Technik
 - Optische Lithographie (Photolithographie)
 - Laserlithographie
 - Elektronen-, Ionenstrahlithographie
 - Röntgenlithographie
- Mikromechanik

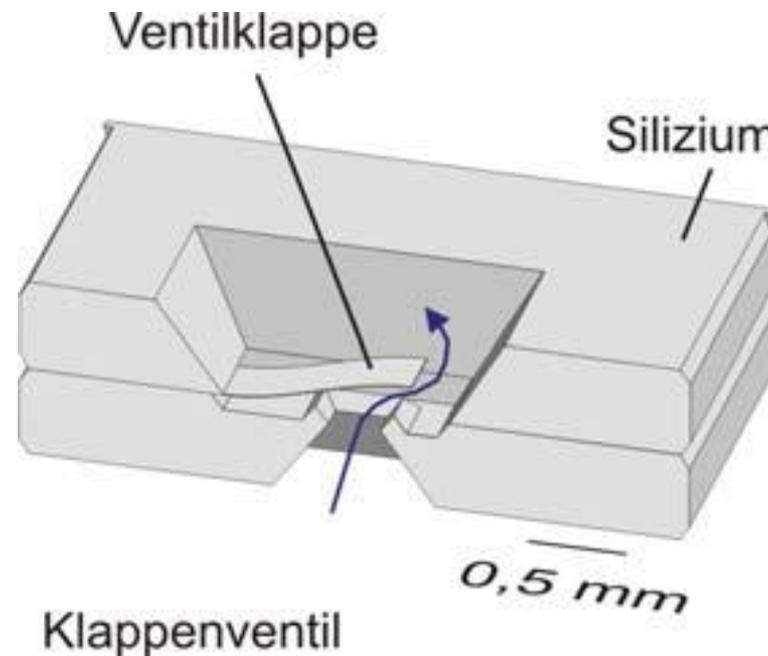
ÄTZSTOPPVERFAHREN

Ätzstoppverfahren

- Grundlegende Frage:

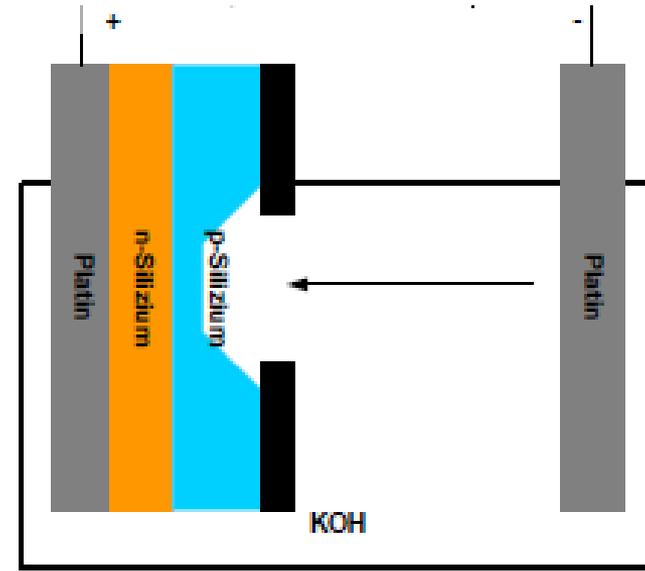
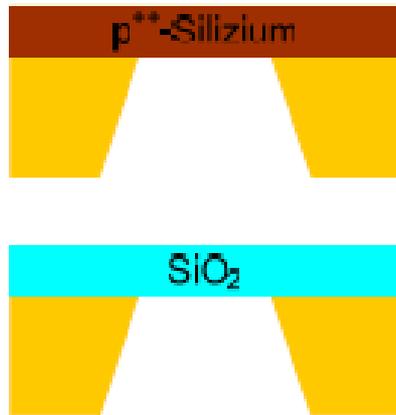
“Wie kann ich eine Membran oder einen Balken mit einer exakt definierten Dicke herstellen?”

- z.B. zur Herstellung eines Rückschlagventils mit einer Ventilklappe



Ätzstoppverfahren

- Anisotroper Ätzstopp
- Ätzstopp nach Zeit
- Selektiver Ätzstopp an Isolatorschicht
- Selektiver Ätzstopp an hochdotierter p^{++} Schicht
- Elektrochemischer Ätzstopp



Herstellung einer Membran mit Ätzstoppschicht

■ 1. Dotierung



Bor dotierte Ätzstopp-Schicht
(100) Silizium

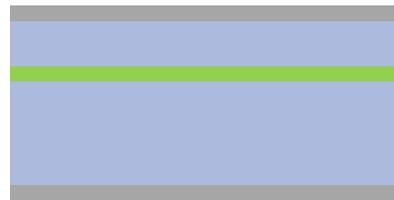
■ 2. Epitaxie

Deposition von Silizium



(100) Silizium

■ 3. Oxidation

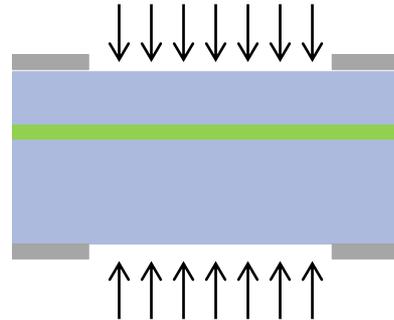


SiO₂ Resist

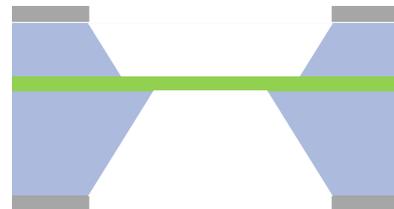
SiO₂ Resist

Herstellung einer Membran mit Ätzstoppschicht

■ 4. Lithographie



■ 5. Anisotropes Ätzen



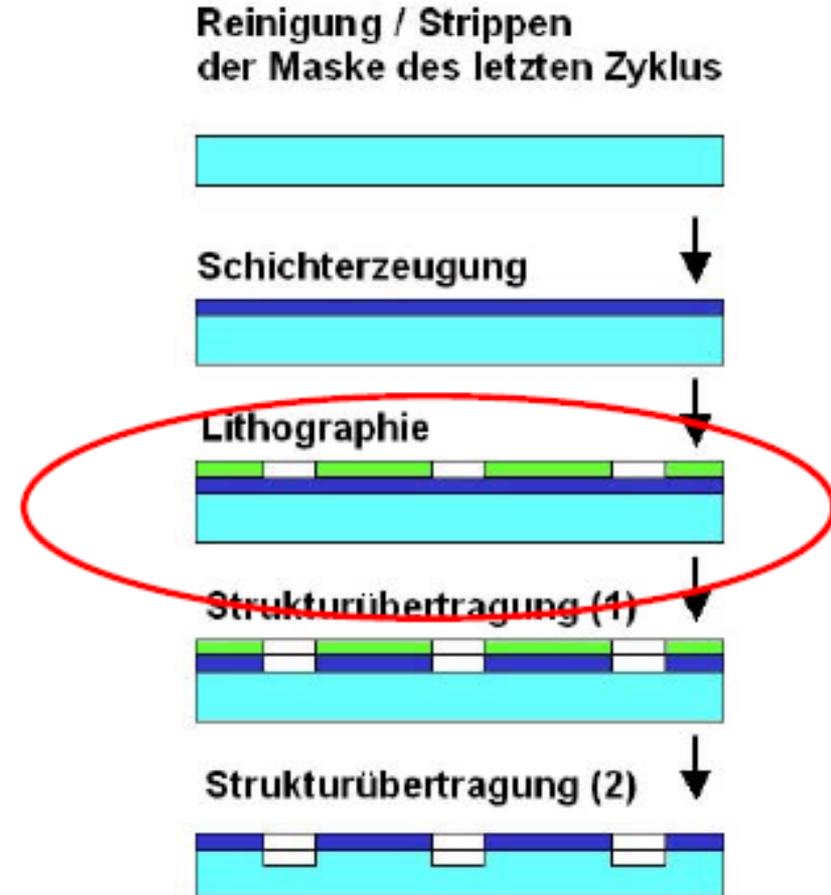
Aufgabensammlung

- Beschreiben sie den Unterschied zwischen Anisotropie und Isotropie.
- Was ist der Anisotropiefaktor?
- Was ist Selektivität?
- Warum kann man Silizium anisotrop ätzen?
- Wie kann man die verschiedenen Ätzprozesse einteilen?
- Was ist Sputterätzen? Wie funktioniert das Prinzip?

LITHOGRAPHIE

Grundprinzip

- Ziel:
 - Strukturierung von Schichten oder Substraten durch selektiven Materialabtrag
- Idee:
 - Strukturierbarer Lack als Schutz („Resist“) gegen die Prozesse der Strukturübertragung
- Methode:
 - Strahlungsempfindliche Hilfsschicht
 - Kann durch Strahlung strukturiert werden
 - Ist resistent gegen nachfolgende Prozesse der Strukturübertragung



Bildquelle: <http://www.imtek.de>

Ablauf der Lithographie

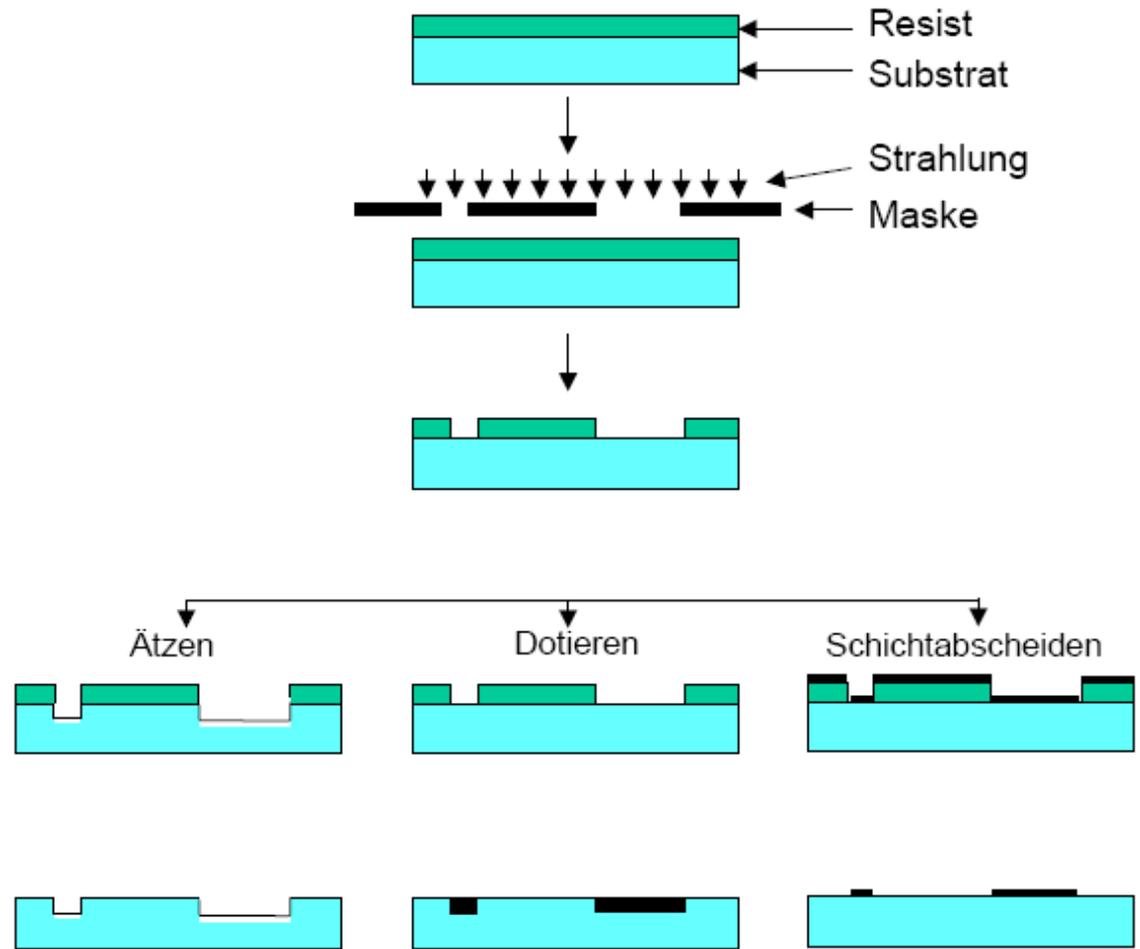
Resist aufbringen

Belichtung

Entwicklung

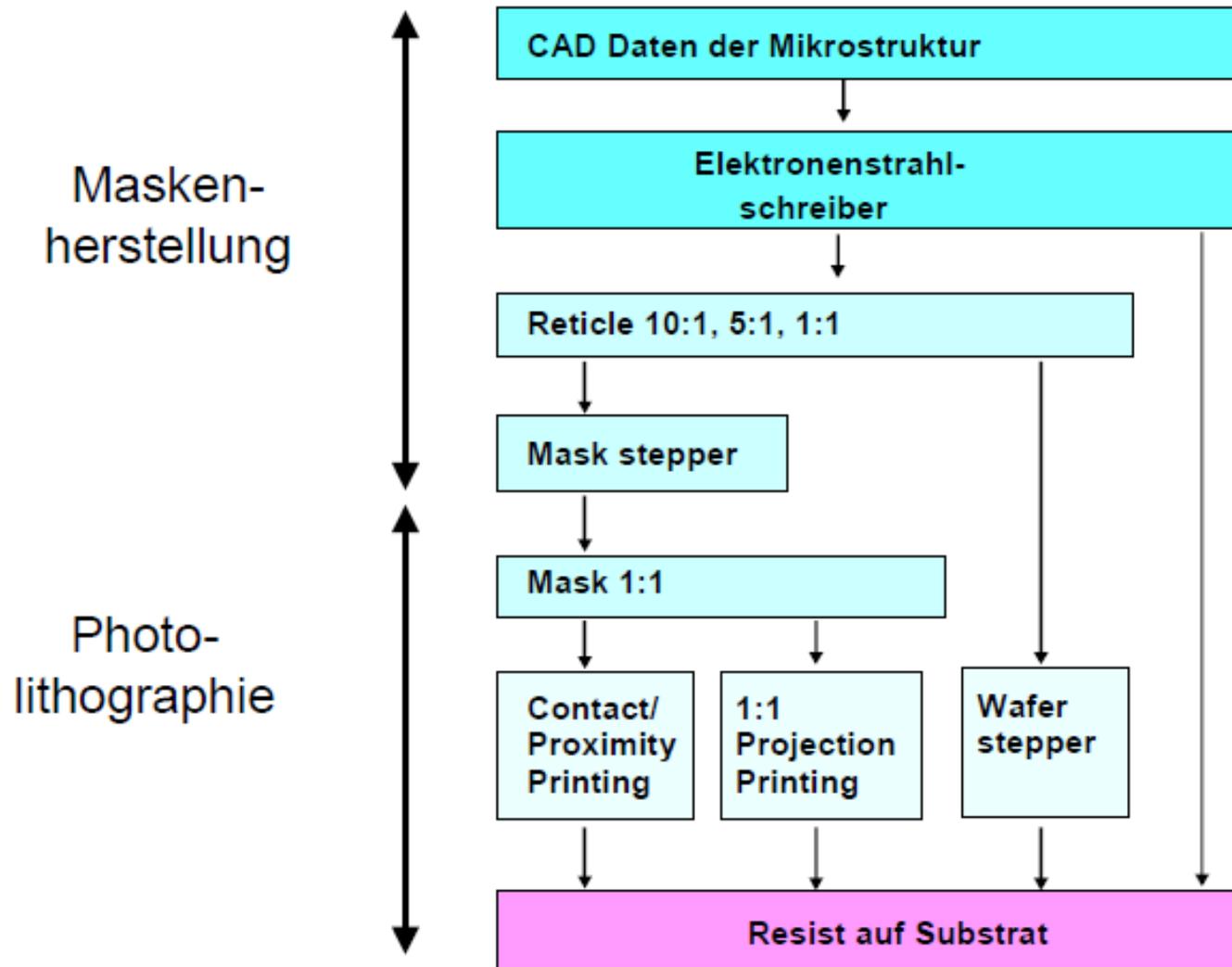
Strukturübertragung

Resist entfernen



Bildquelle: <http://www.imtek.de>

Prozessfolge bei der Photolithographie



Resist (Fotolack)

- Strahlungsempfindliches Polymer
- Selektiv strukturierbar
- Resistent gegen weitere folgende Strukturierungsprozesse

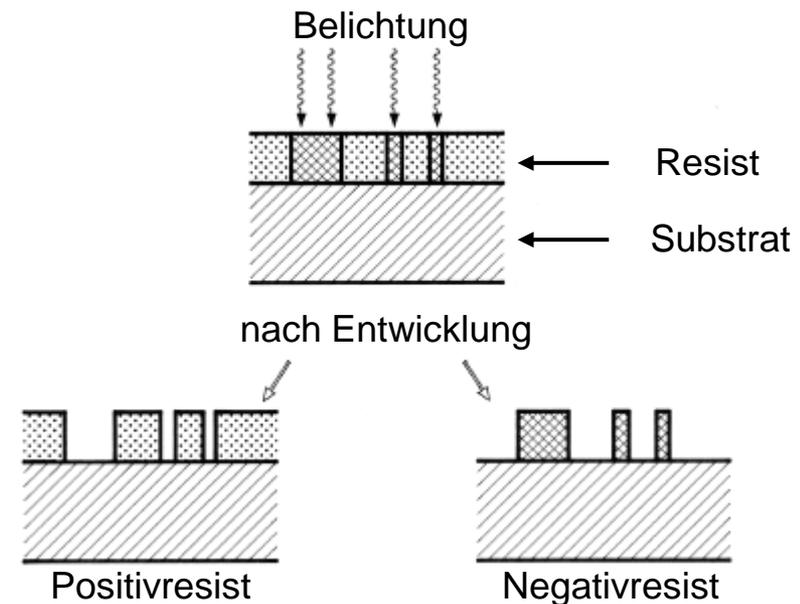
■ Unterscheidung in:

■ Positivresist

- unbelichtete Bereiche bleiben stehen
- belichtete Bereiche werden beim Entwickeln aufgelöst

■ Negativresist

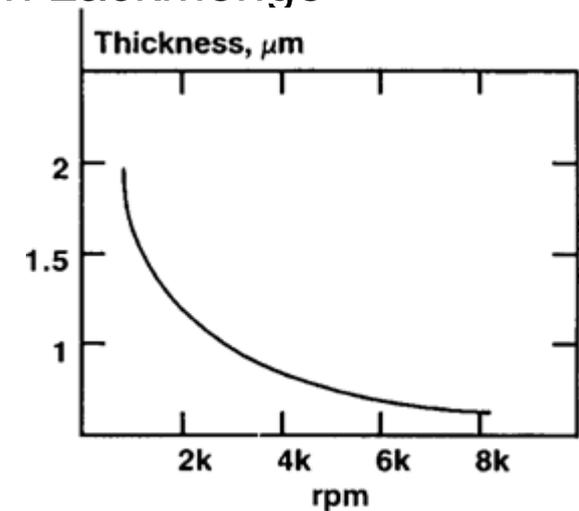
- belichtete Bereiche bleiben stehen
- unbelichtete Bereiche werden beim Entwickeln aufgelöst



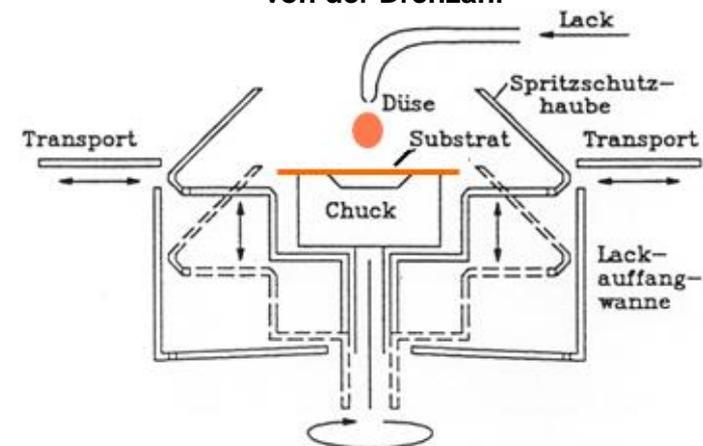
Bildquelle: <http://www.imtek.de>

Aufschleuder (Spin-On)-Verfahren zur Herstellung von Fotolackschichten

- Die Lackdicke ist unabhängig von der dosierten Lackmenge
 - Genauigkeit der Schichtdicke : $\pm 1\%$
- Typische Lackschichten auf Wafern:
 - Standard Dünnschichtprozesse (Ätzen, Implantieren) : 1-2 μm
 - Spezialprozesse (Galvanik,...): 30-90 μm
 - Lackdicke auf "Chrom-Masken": 0,5 μm
- Prozessablauf:
 - Lack dosieren einige cm^3
 - Lack verteilen
 - Lack abschleudern
 - Zentrifugalkraft wirkt gegen Viskosität, Adhäsion
 - Das Abdampfen des Lösungsmittels stoppt das Abdünnen



Abhängigkeit der Lackdicke von der Drehzahl



Vergleich Positiv- und Negativ-Resist

	Positiv-Resist	Negativ-Resist
Minimale Strukturbreite	< 0.5 μm	ca. 2 μm
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
Adhäsion zu Si	gut	sehr gut
Kosten	teurer	günstiger

Lithographie - Übersicht

- Unterschied nach Art der Strahlung
 - Elektromagnetische Strahlung
 - Photolithographie
 - Röntgenlithographie
 - Partikelstrahlung
 - Ionenstrahlolithographie
 - Elektronenstrahlolithographie

Lithographie - Übersicht

- Elektromagnetische Strahlung
 - Photolithographie
 - Begrenzt in der minimalen Strukturgröße
 - Belichtung großer Flächen möglich
 - Am weitesten verbreitetes Verfahren
 - Einsatz in Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik
 - Effiziente und produktive Belichtung
 - Minimale Strukturgrößen momentan bei ca. 22 nm
 - Wellenlänge 193 nm (EUV, extreme UV)
 - Röntgenlithographie
- Partikelstrahlung
 - Ionenstrahlolithographie
 - Elektronenstrahlolithographie

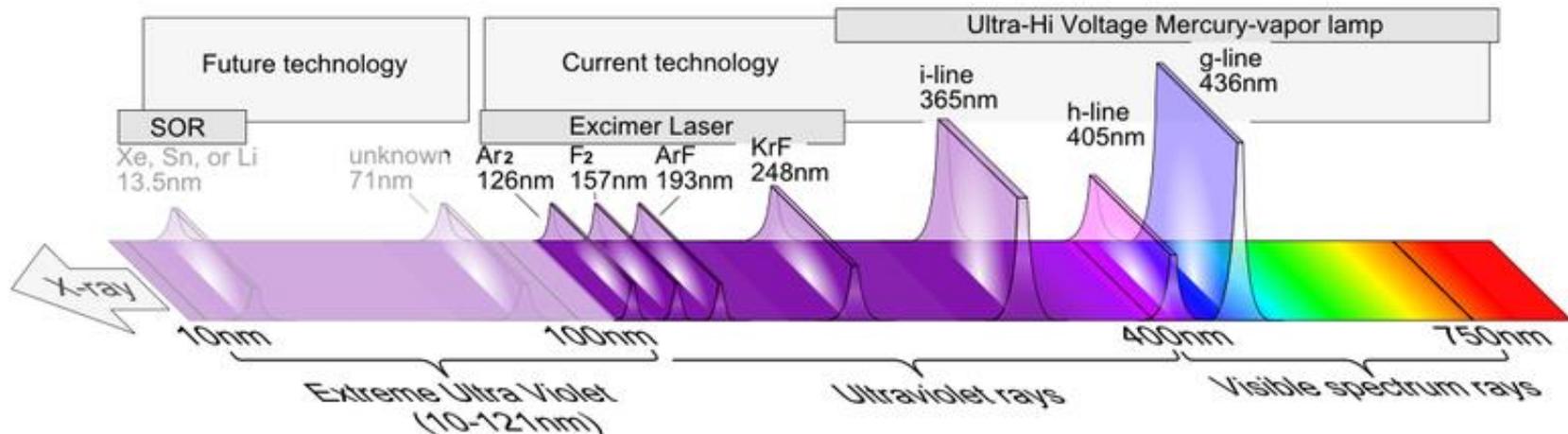
Lithographie - Übersicht

- Elektromagnetische Strahlung:
 - Photolithographie
 - Röntgenlithographie
- Partikelstrahlung:
 - Ionenstrahlolithographie
 - Elektronenstrahlolithographie
 - Sehr geringe Wellenlänge (8 pm)
 - Sehr kleine Strukturgrößen
 - Serielle Belichtung durch einen Strahl
 - Hohe Schreibzeit (mehrere Stunden)
 - Herstellung von Masken
 - Herstellung von kleinen Stückzahlen (ASICs)

OPTISCHE LITHOGRAPHIE

Wellenlänge

- UV-Strahlung kommt zum Einsatz (UV - Lithographie)
- Verwendete Strahlungsquellen für UV- und Deep UV-Licht
 - Quecksilberdampf Lampen
 - 436 nm (G - Linie), 405 nm (H-Linie), 365 nm (I - Linie)
 - Excimerlaser (Gaslaser)
 - KrF: 248 nm, ArF: 193 nm, F₂: 157 nm
- Excimer-Laser und bessere Belichtungsverfahren erweitern den Einsatzbereich bis zu 22 nm Linienbreite



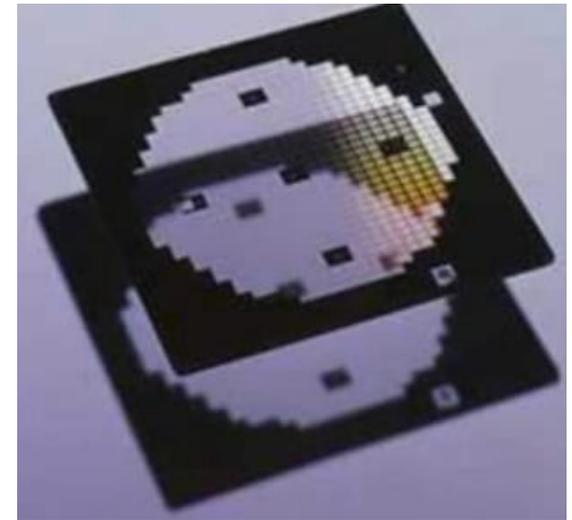
Masken

■ Chrommaske

- Quarzglasplatte mit einer strukturierter Chromschicht (Absorber)
 - Dicke Quarzplatte: mm
 - Dicke Chromschicht: nm
 - Quarzplatte ist transparent für UV
 - Chrom absorbiert UV

■ Typische Kosten

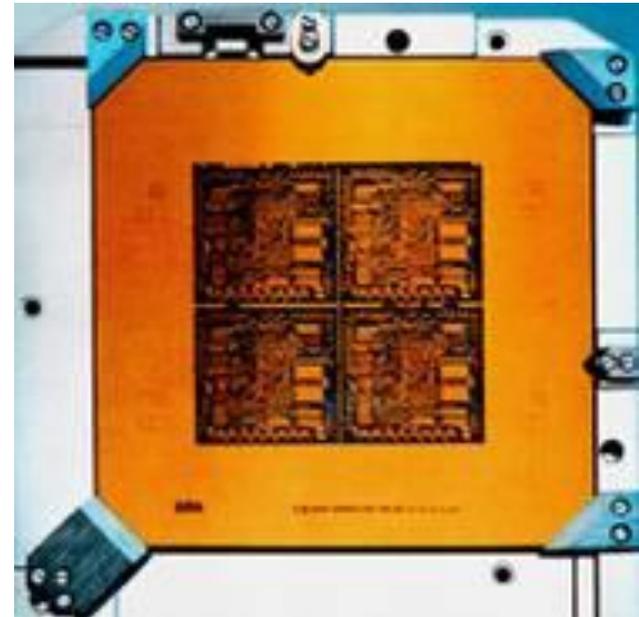
- 30 €/cm² für Strukturen > 5 mm
 - 75 €/cm² für Strukturen 1-5 mm
- Maske für 4"-Wafer: circa 500 – 2500 €



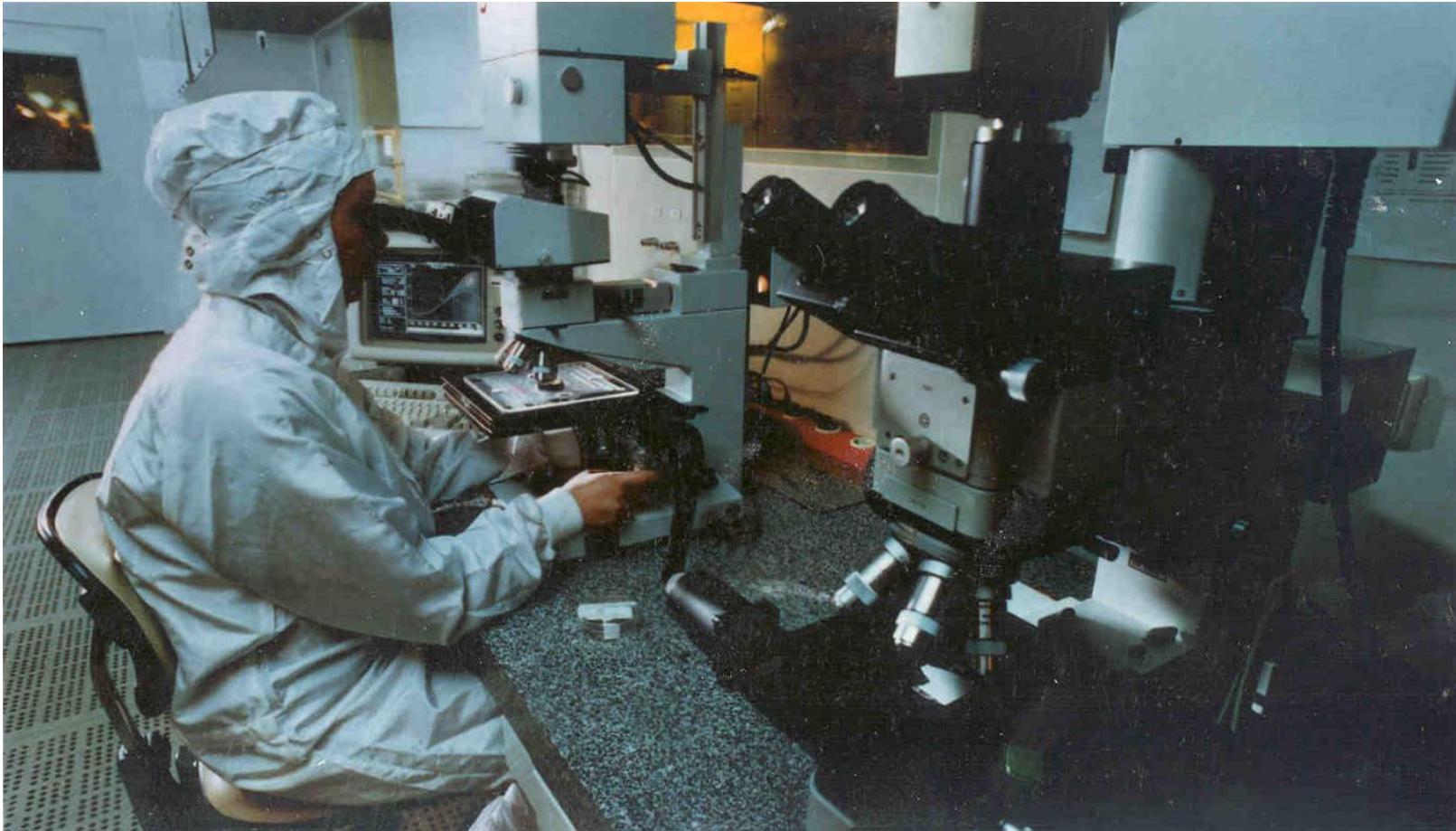
Bildquelle: <http://www.imtek.de>

Herstellung von Chrommasken

- Resist auf Chrombeschichtete Quarzplatte (Maskenblank)
- Resist mit E-Beam strukturieren
- Resist entwickeln
- Chrom (nasschemisch) ätzen
- Resist stripen



Maskenlabor für die Mikrotechnik



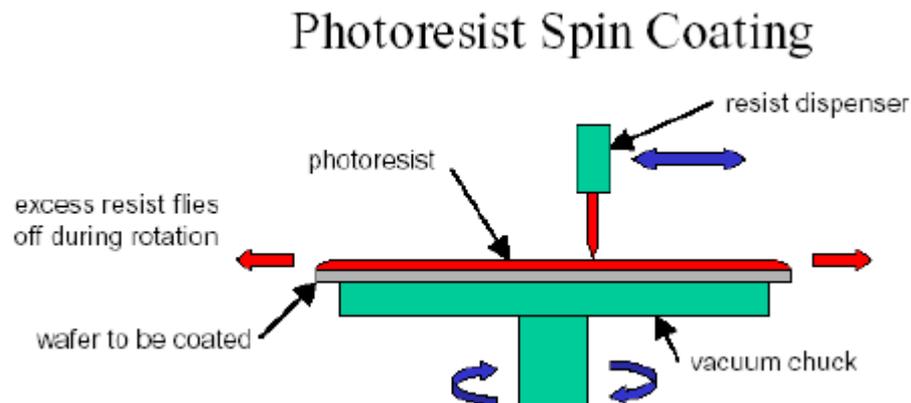
Forschungszentrum Karlsruhe
Technik und Umwelt

Mask Aligner



Ablauf einer Photolithographie

- Reinigung der Wafer
- HMDS – Beschichtung
 - Der Resist haftet nicht oder nur schlecht auf Si, SiOH oder SiO₂
 - Verbesserung der Haftung von Resist zu Substrat
- Resist aufbringen (Spin-Coating)
 - Aufschleudern des Resists
 - Standard: Resist dispensieren bei $U = 800$ rpm
 - Resistdicke definieren bei $U = 4000$ rpm



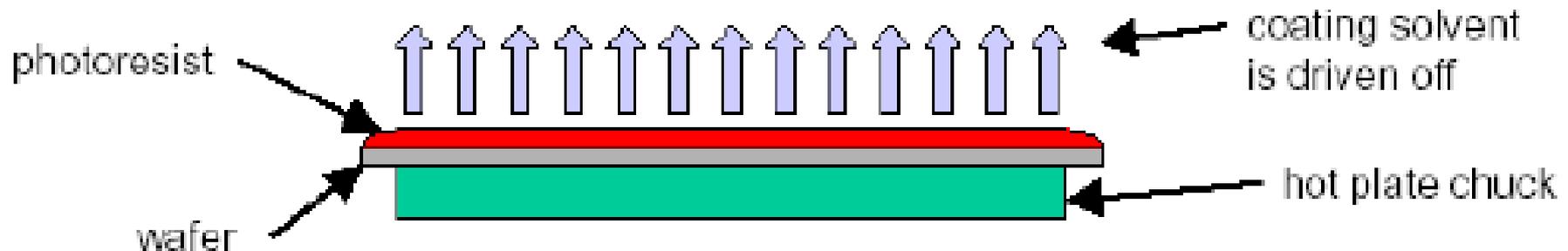
Bildquelle: <http://www.imtek.de>

Ablauf einer Photolithographie

■ Softbake

■ Austreiben des Lösungsmittel

- Hotplate: $T = 90 \text{ }^\circ\text{C}$, $t = 45 \text{ Sec}$
- Ofen: $T = 90 - 100 \text{ }^\circ\text{C}$, $t = 20 \text{ min}$



■ Alignment und Belichten

- Parameter: Belichtungszeit, Energiedosis und Wellenlänge
- Proximity, Kontakt oder abbildende Belichtung

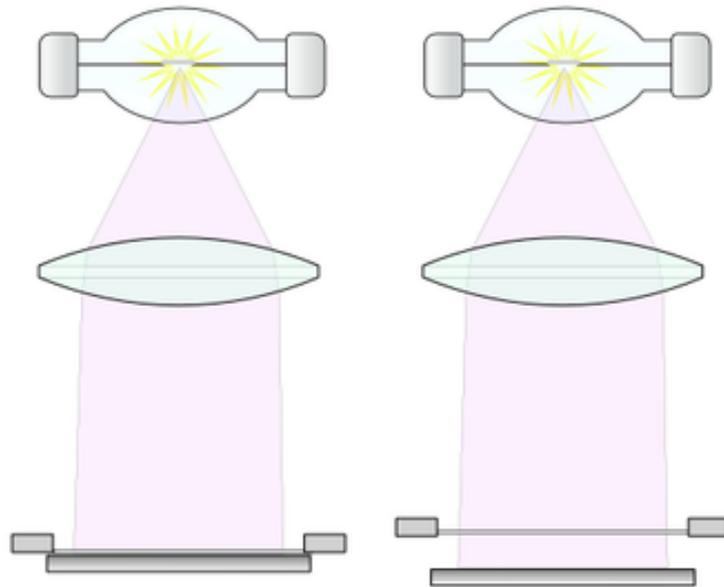
Bildquelle: <http://www.imtek.de>

Ablauf einer Photolithographie

- Entwicklung
 - Entwicklung in speziellem Entwickler
 - Parameter: Entwicklungsdauer (Standard: ca. 50 sec)
 - Überentwicklung führt zu schlechten Kanten
 - Unterentwicklung führt zu Rückständen des zu entfernenden Resists
- Postbake
 - Austreiben des restlichen Lösungsmittel
 - Stabilisierung und Aushärten der Polymer-Matrix
 - Hotplate: $T = 115\text{ °C}$, $t = 45\text{ Sec}$
 - Ofen: $T = 115 - 130\text{ °C}$, $t = 20\text{ min}$
- Strukturierung
- Resist entfernen (Strippen)
 - Wafer in Aceton ($t \sim 5\text{ min}$), Isopropanol, DI-Wasser
 - Oder: Wafer ins O_2 -Plasma
 - Resist wurde beim Strukturierungsprozess komplett verbraucht

Belichtungsverfahren

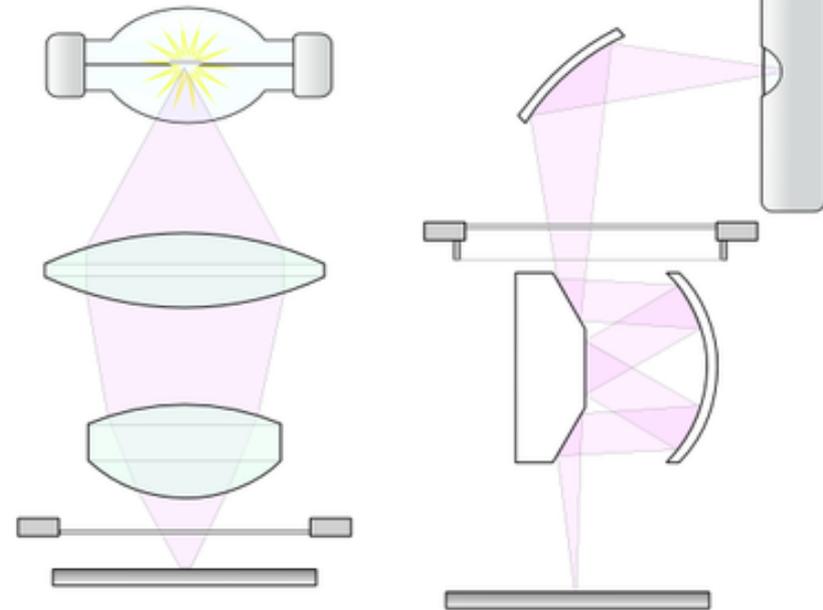
Schattenprojektion



**Kontakt-
belichtung**

**Proximity-
belichtung**

Abbildende Projektion



**Projektions-
belichtung**

**Projektions-
belichtung**

Bildquelle: <http://www.imtek.de>

Kopierverfahren – ohne Optik

Kopierverfahren (Schattenwurf)

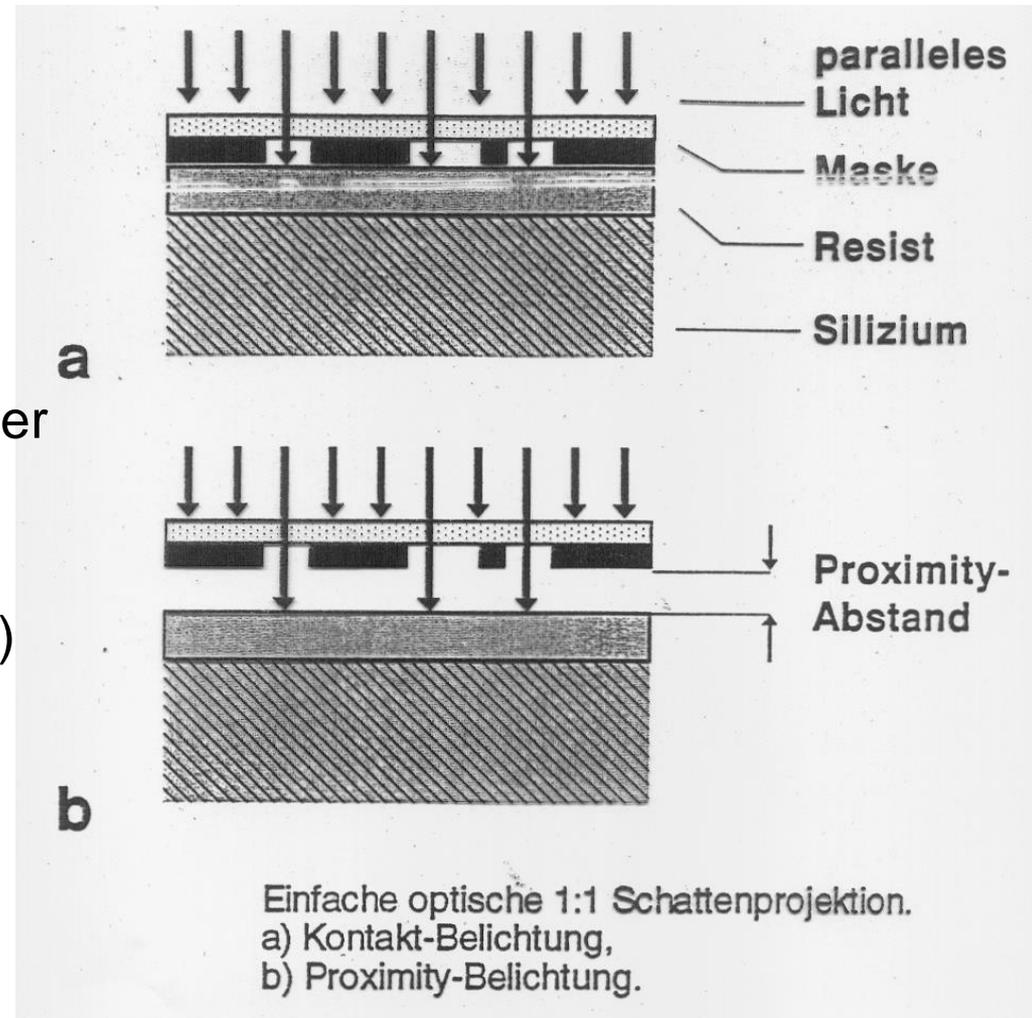
- Kontakt-Verfahren
- Proximity-Verfahren

Merkmale

- Großflächige Belichtung, hoher Durchsatz
- Verwenden von Masken
- Beugungsbegrenzte (laterale) Auflösung:
 $(\delta x^2 \approx \lambda d)$

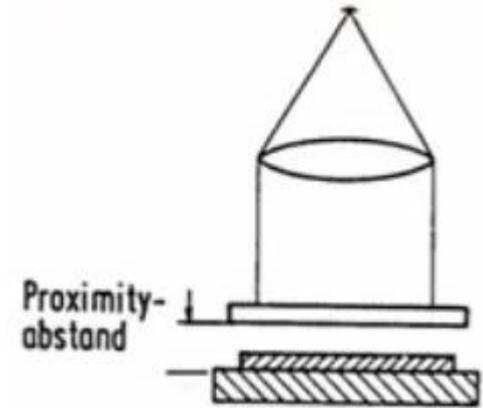
λ : Wellenlänge

d : Abstand Maske - Wafer

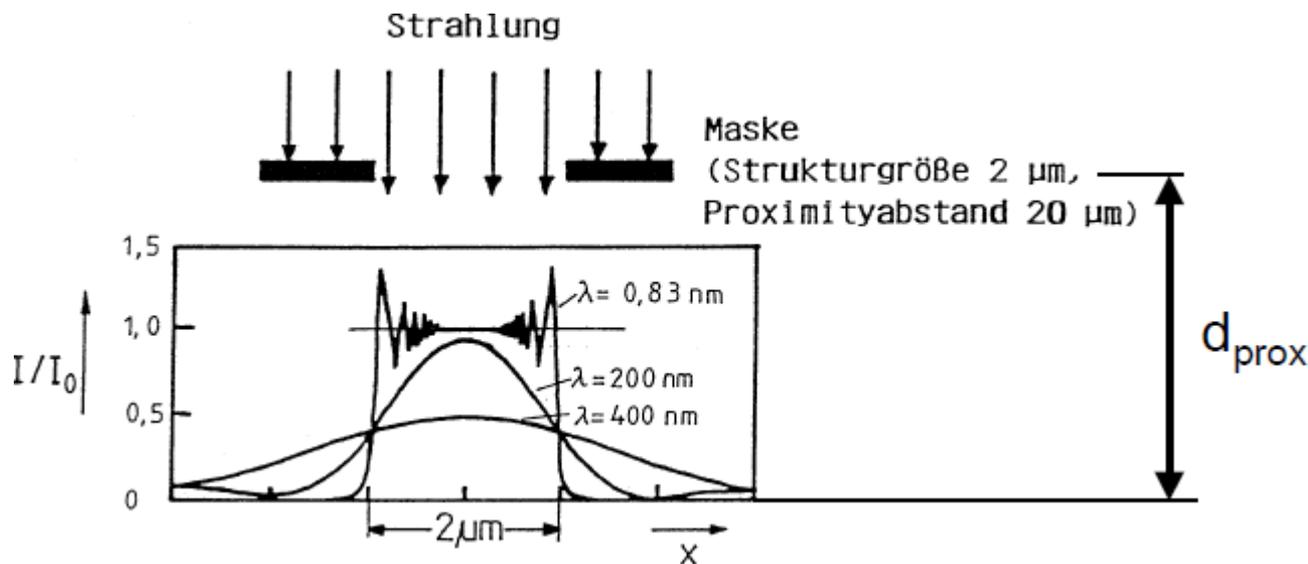


Auflösung bei der Schattenprojektion

- Physikalische Grenze aufgrund Wellennatur des Lichtes
- Beugung das Lichtes an der Maske abhängig von:
 - Wellenlänge λ
 - Abstand d_{prox} (Proximity Abstand + Lackdicke)
- Intensitätsverteilung im Lack



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



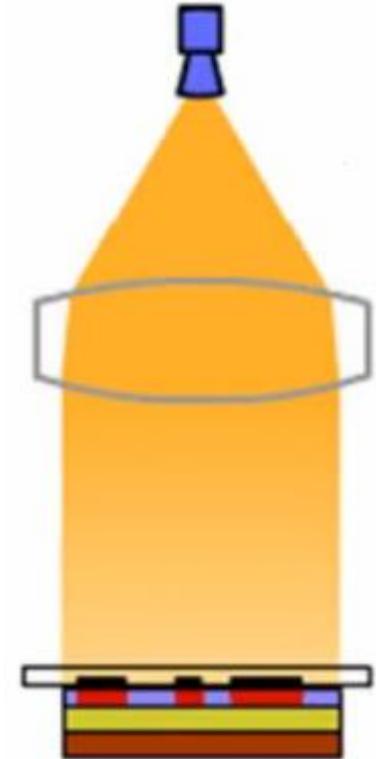
Bildquelle: <http://www.imtek.de>

Kontakt - Belichtung

- Maske liegt auf Wafer bzw. wird angepresst

- Vorteile
 - Strukturen im Sub- μm -Bereiche sind möglich
 - Geringe Abbildungsfehler
 - Full-Wafer-Verfahren
 - Höher Durchsatz

- Nachteile
 - Verschmutzung der Maske
 - Maskendefekte durch Staubteilchen sind unvermeidbar



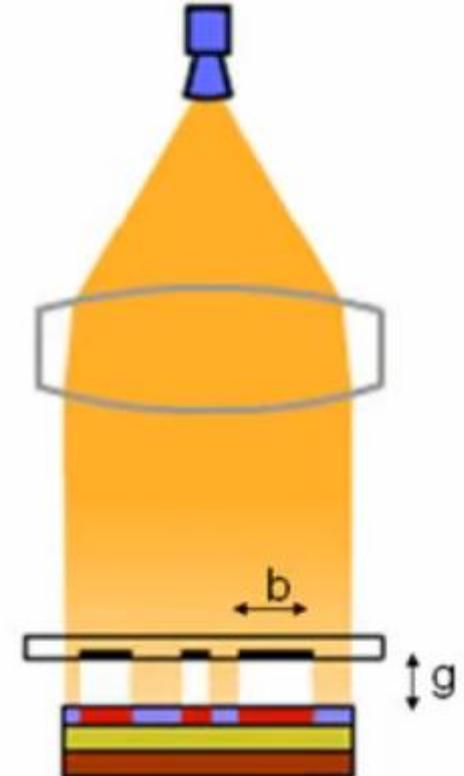
Bildquelle: <http://www.imtek.de>

Proximity-Belichtung

- Kein direkter Kontakt zwischen Maske und Substrat (Proximity-Gap: $10\ \mu\text{m} \leq g \leq 30\ \mu\text{m}$)

- Vorteile:
 - Höhere Maskenlebensdauer
 - Full-Wafer-Verfahren
 - Höherer Durchsatz

- Nachteil:
 - Geringere Strukturauflösung



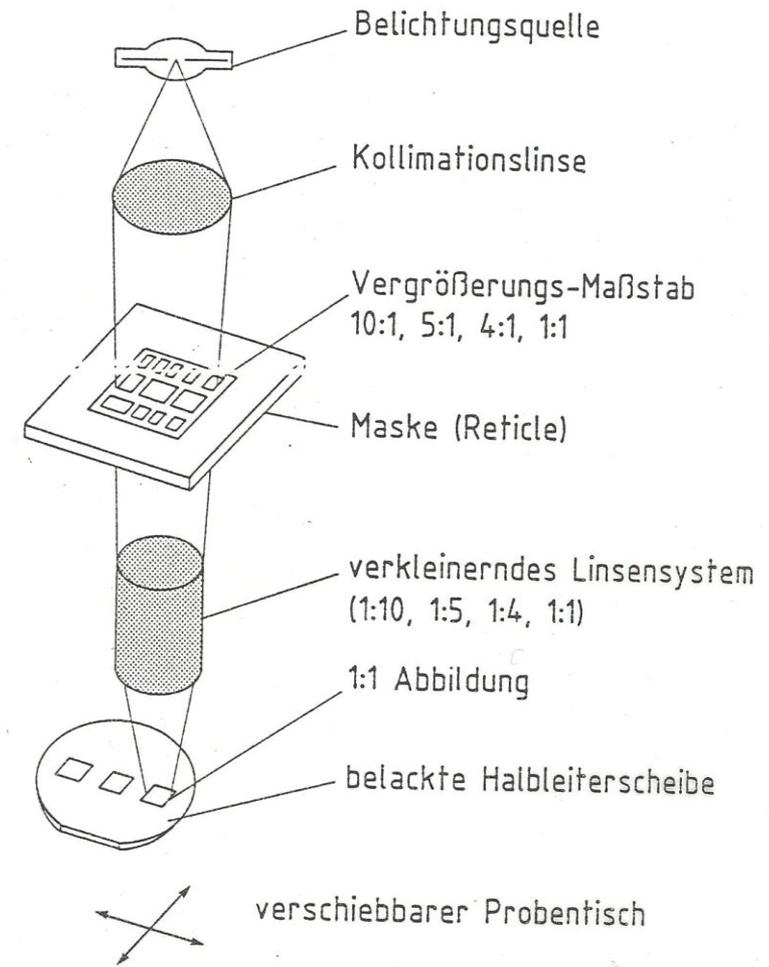
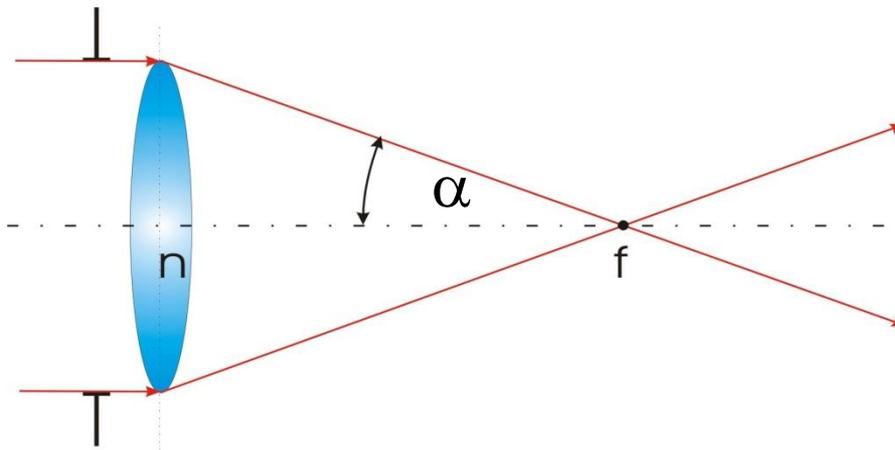
Standard Verfahren in der
 Mikrostrukturtechnik

Bildquelle: <http://www.imtek.de>

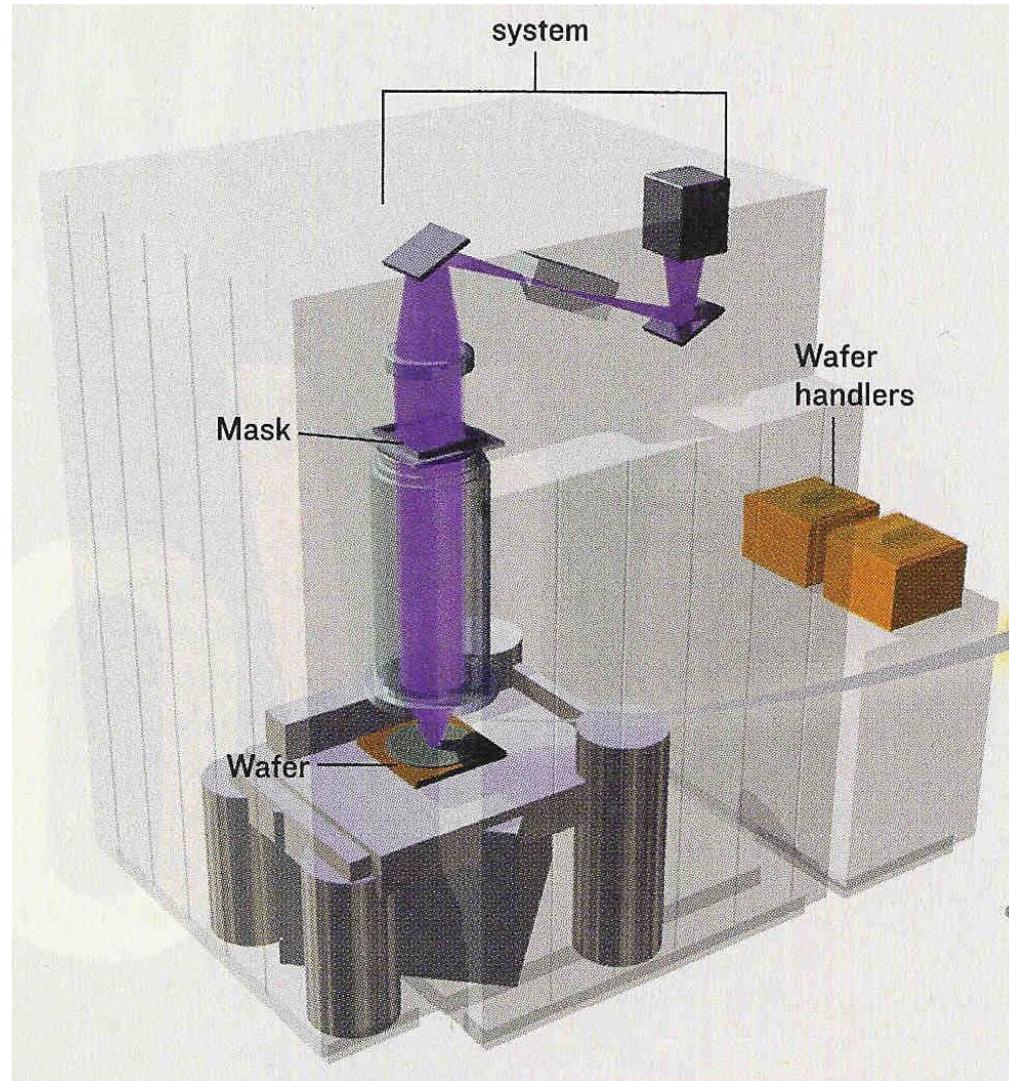
Abbildende Projektion

Merkmale

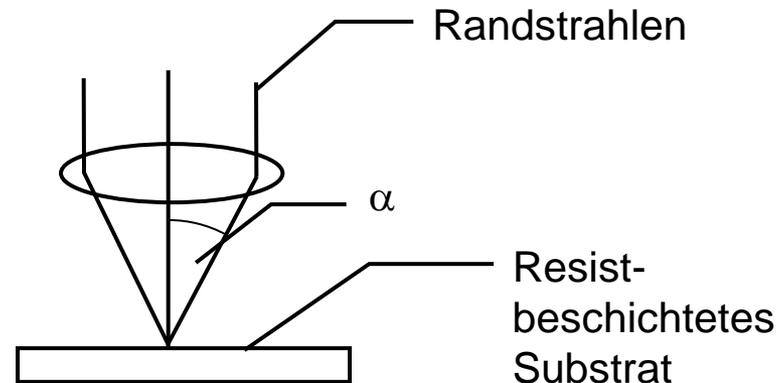
- Abbilden über (Verkleinerungs-) Optik
- Numerische Apertur
 $NA = n \sin(\alpha)$
- Auflösung und Schärfentiefe durch Optik bestimmt



Belichtungssystem



Numerische Apertur und Auflösung optischer Systeme



$$NA = n \times \sin(\alpha)$$

(NA: numerische Apertur, n: Brechungsindex, α : Einfallswinkel des Randstrahls)

$$\text{Kleinste Struktur: } \delta x \approx \frac{\lambda}{2NA}$$

$$NA \approx 0,35 \lambda = 0,35 \mu\text{m} \quad \Rightarrow \quad \delta x \approx \frac{0,35}{2 \cdot 0,35} \mu\text{m} = 0,5 \mu\text{m}$$

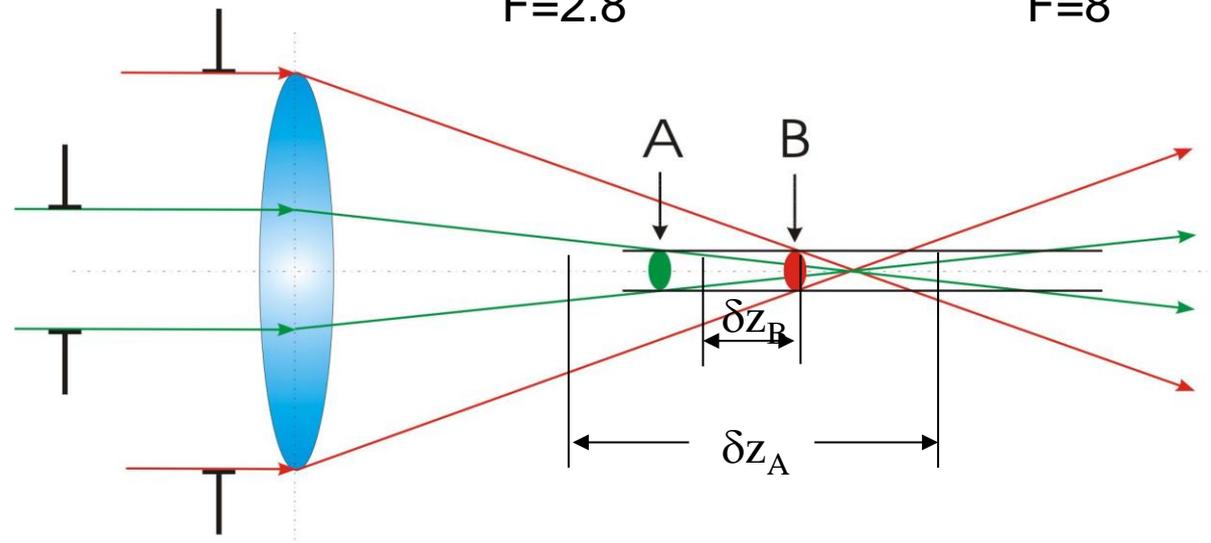
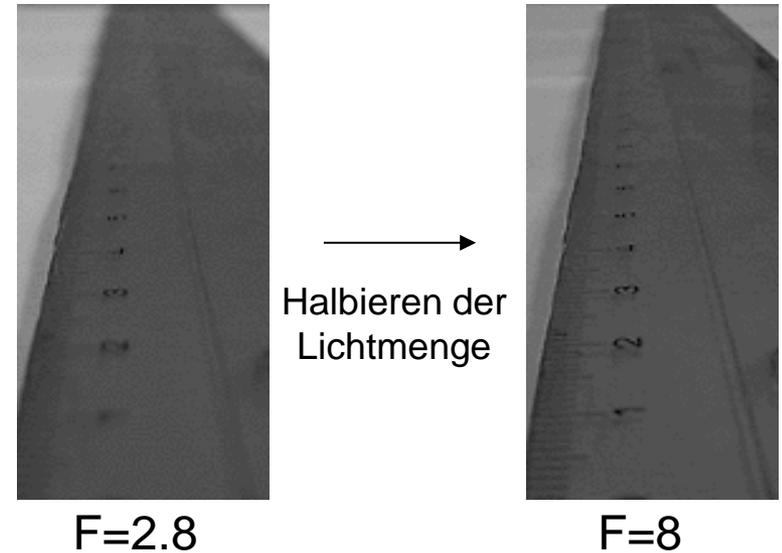
Optische Abbildungen: Schärfentiefe

- Schärfentiefe Abhängig von:

- Wellenlänge λ
- numerischer Apertur NA

- $\delta z \approx \lambda \setminus NA^2$

- Qualitätsmaß für akzeptable Abbildung

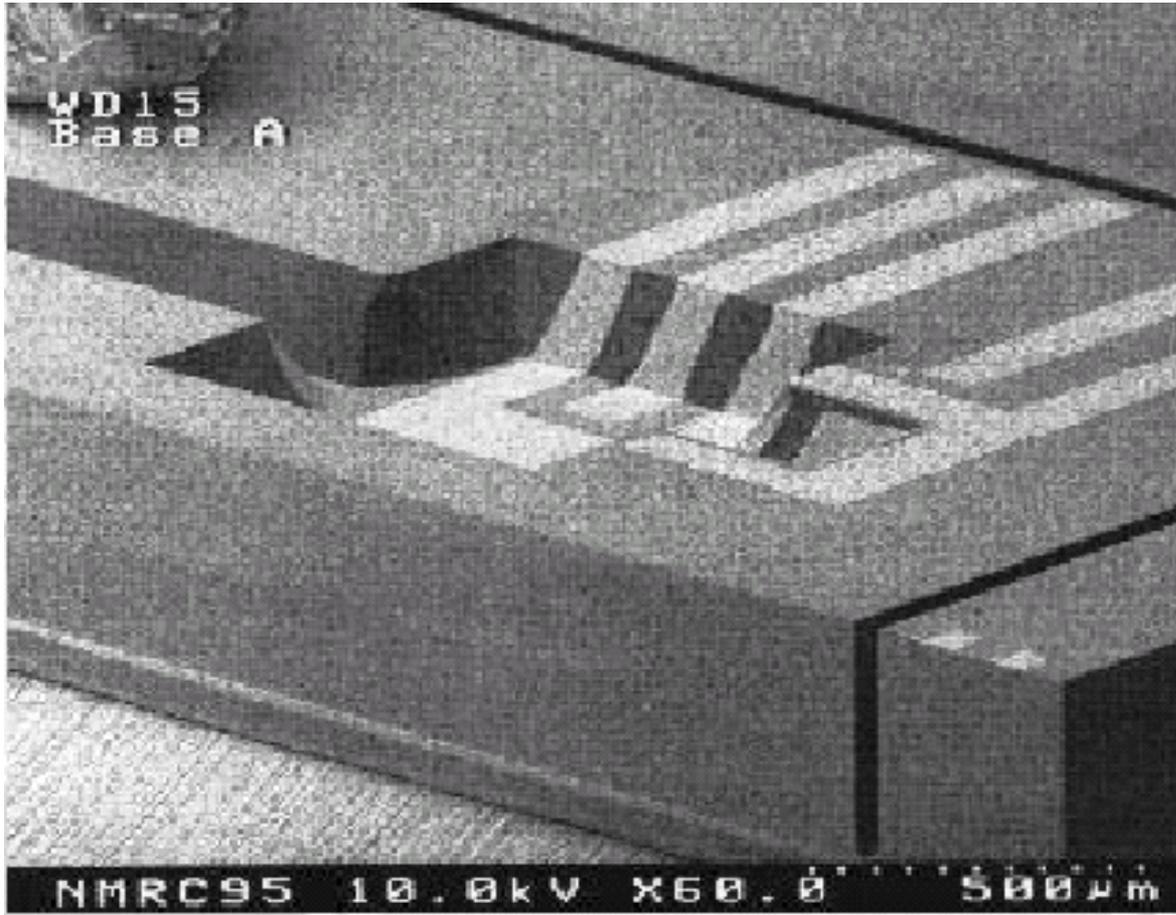


Optische Abbildungen: Schärfentiefe

- Je größer der Winkel unter dem sich Strahlen vereinigen, desto größer die numerische Apertur und desto kleiner die Schärfentiefe
- Die Schärfentiefe ist ein Maß für eine Defokussierung welche für ein Objekt möglich ist, bevor es optisch unakzeptabel wird



3D-Strukturen für MEMS – Große Schärftiefe



Abbildende Projektion

■ Vorteile:

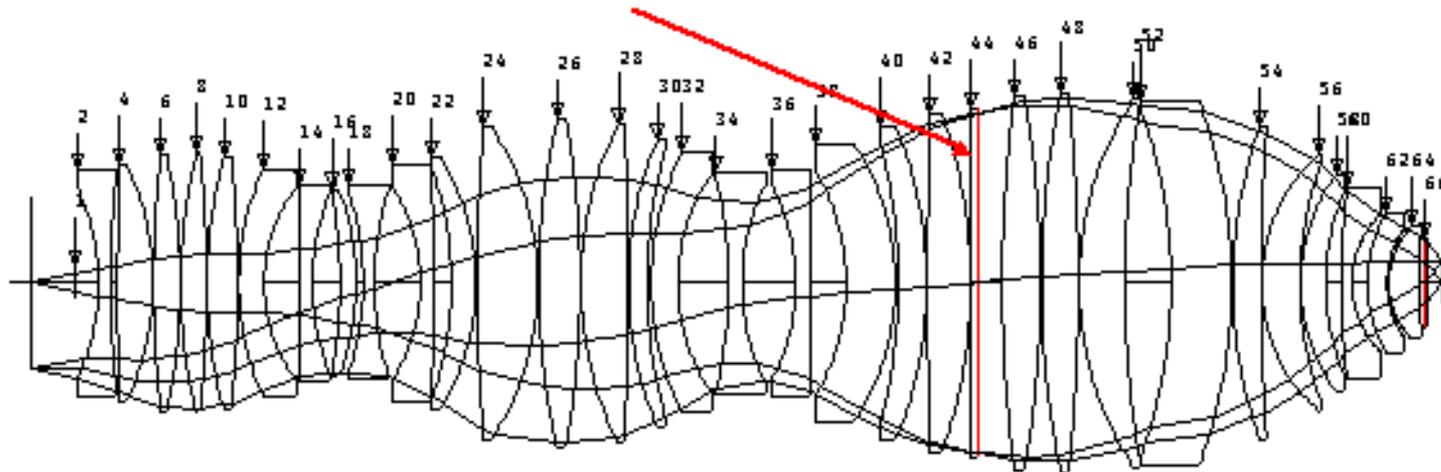
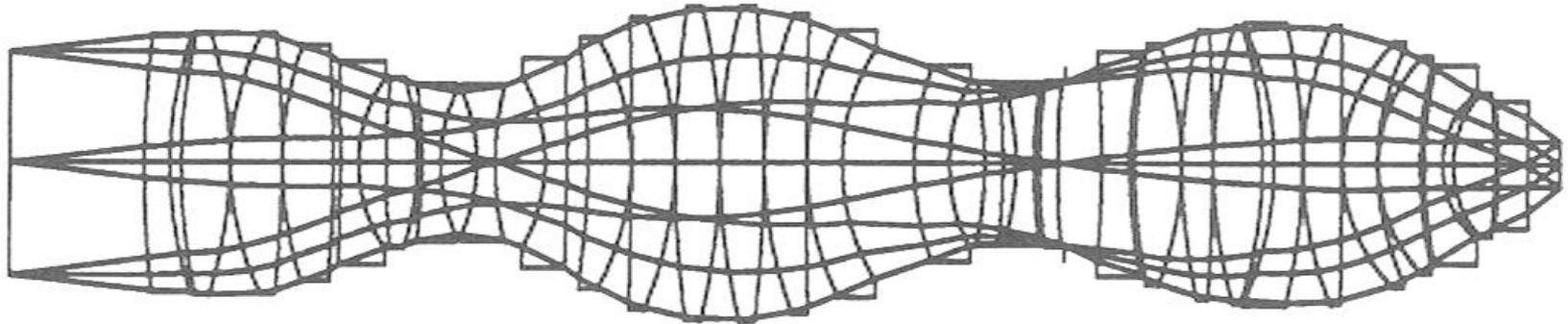
- Vergrößerte Masken sind leichter herstellbar
→ bessere Kontrollierbarkeit
- Einzelchipbelichtung („Step and repeat“):
→ nichtlinearer Waferverzug ist korrigierbar



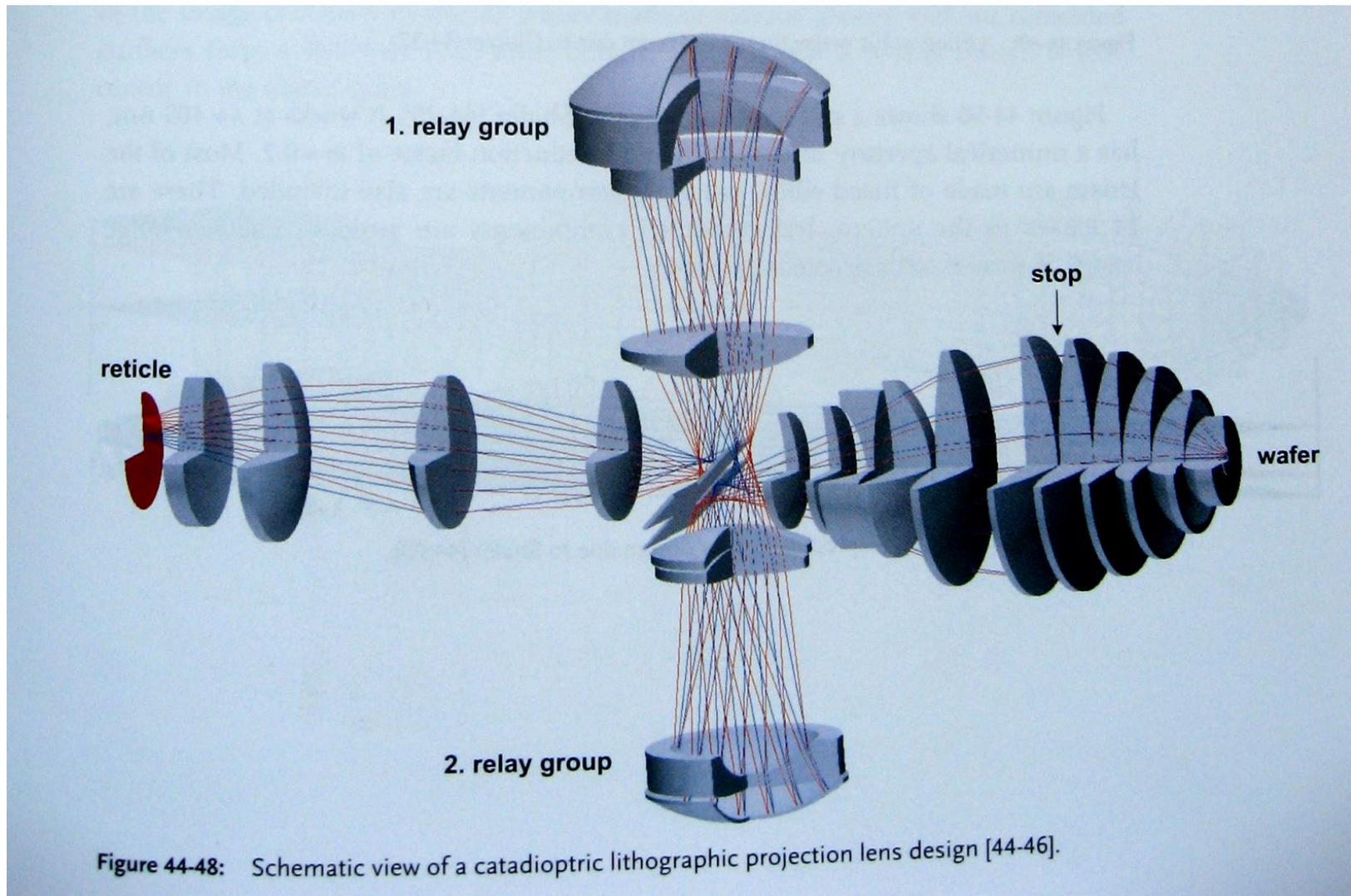
■ Nachteile:

- Geräte sind sehr teuer (extrem korrigierte Optiken)
- Objektiv habe Numerische Apertur ($NA < 0.6$)
- Geringer Durchsatz → Justage für jeden einzelnen Chip
- Geringe Tiefenschärfe → geringeres Aspektverhältnis

Lithographie Objektiv



Lithography objective with reflecting elements



Lithographieobjektiv



Hochpräzise und sündhaft teuer:
Belichtungsanlage für Chipstrukturen

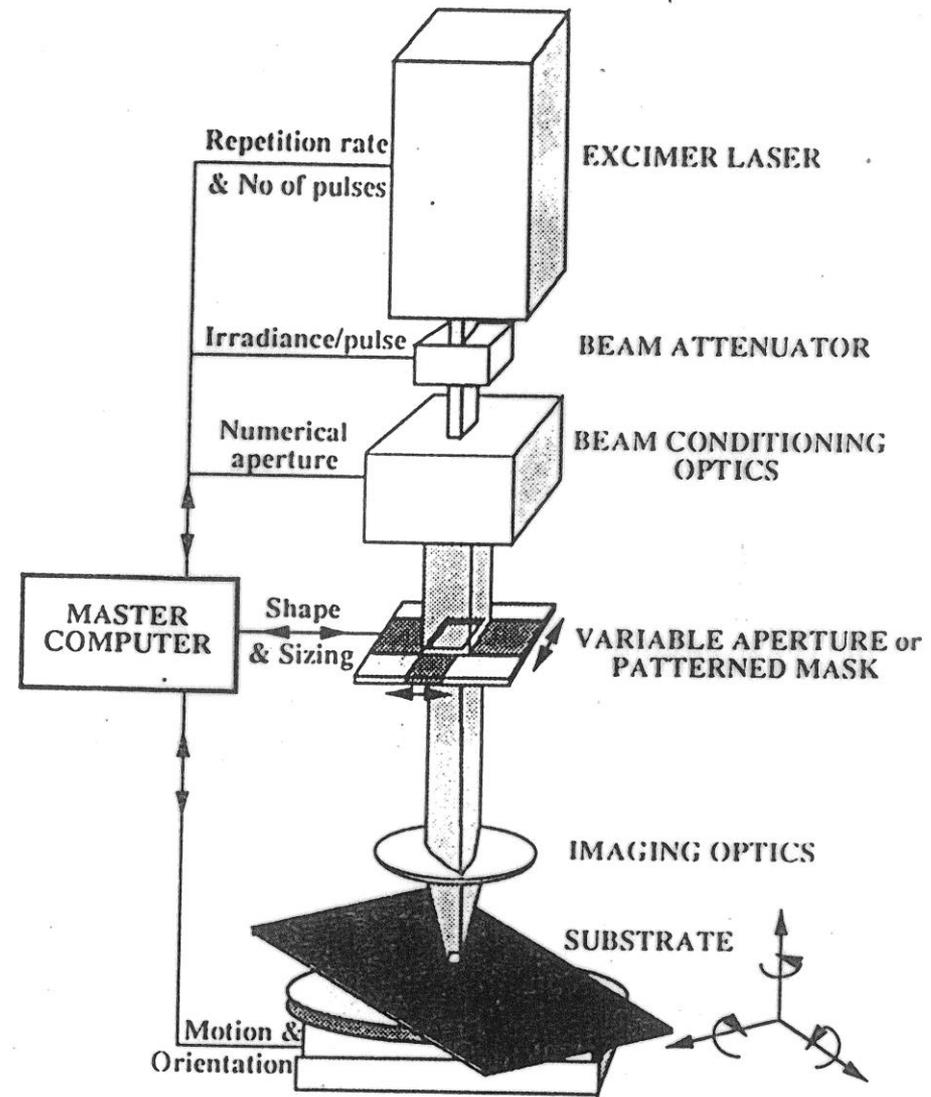


LASERLITHOGRAPHIE

Laserlithographie

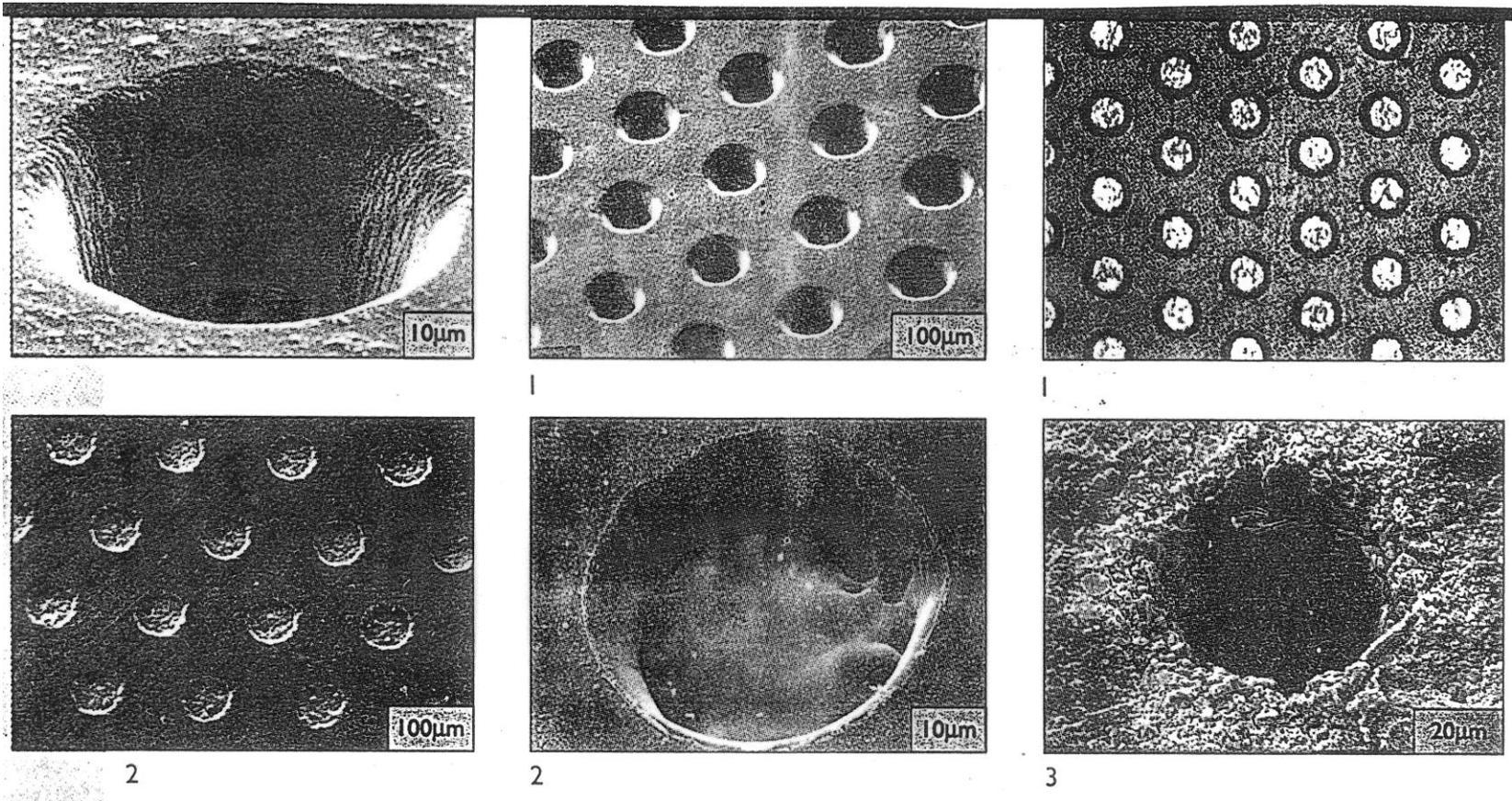
Prinzip

- Laserschreiben (DUV)
- Eximer-Laser
- Auftrennen von Molekülbindungen
- Verkleinerungen über Linsen
- Kurze Pulse



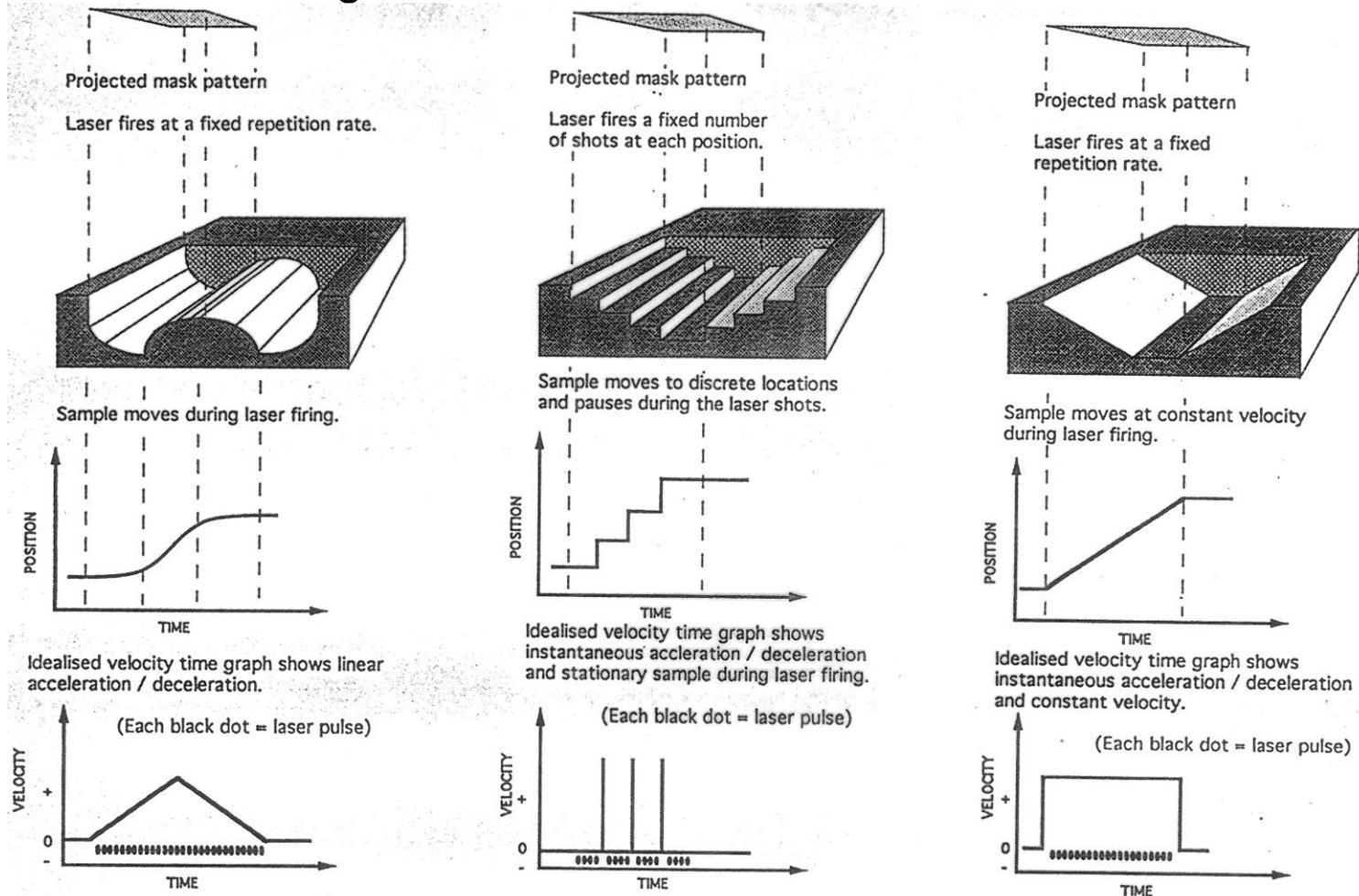
Laserlithographie

■ Beispiel: Löcher



Laserlithographie

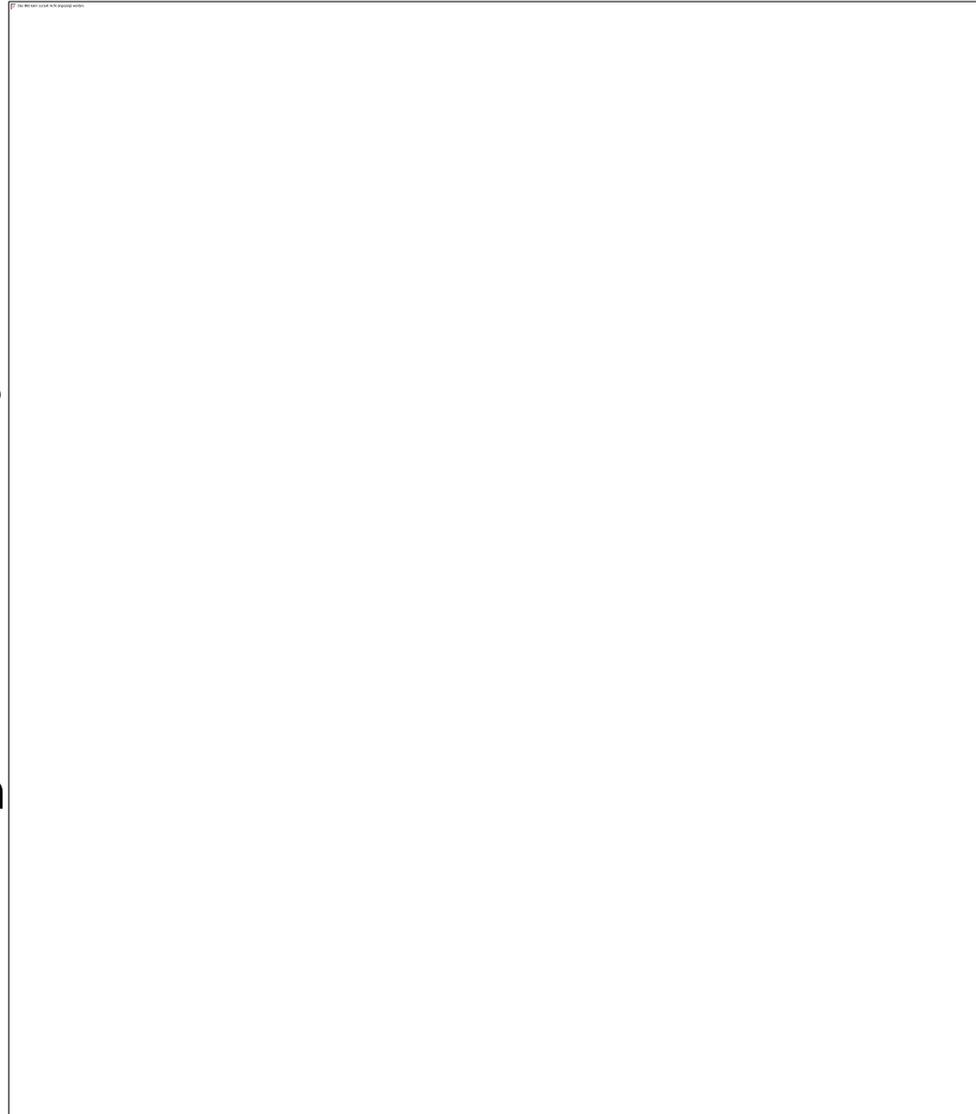
■ Mikrostrukturierung



Laserlithographie

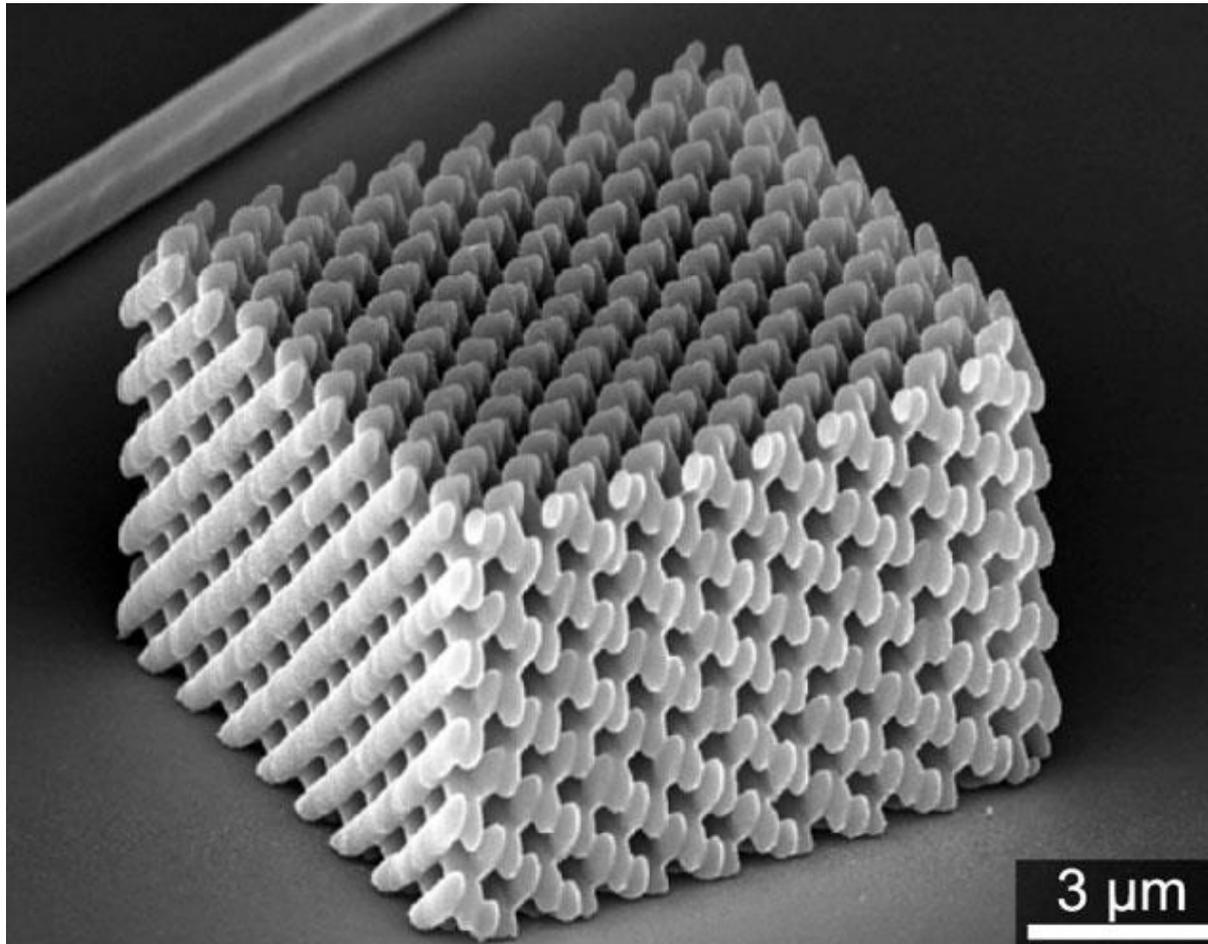
- 3D Laserschreiben
- fs- Faserlaser
- Energie einzelner Photonen unterhalb der Anregungsschwelle des Resist
- Im Fokus Energie ausreichend (Mehrphotonenanregung)
- Beliebige 3D-Strukturen herstellbar

- Nanoscribe GmbH, KA



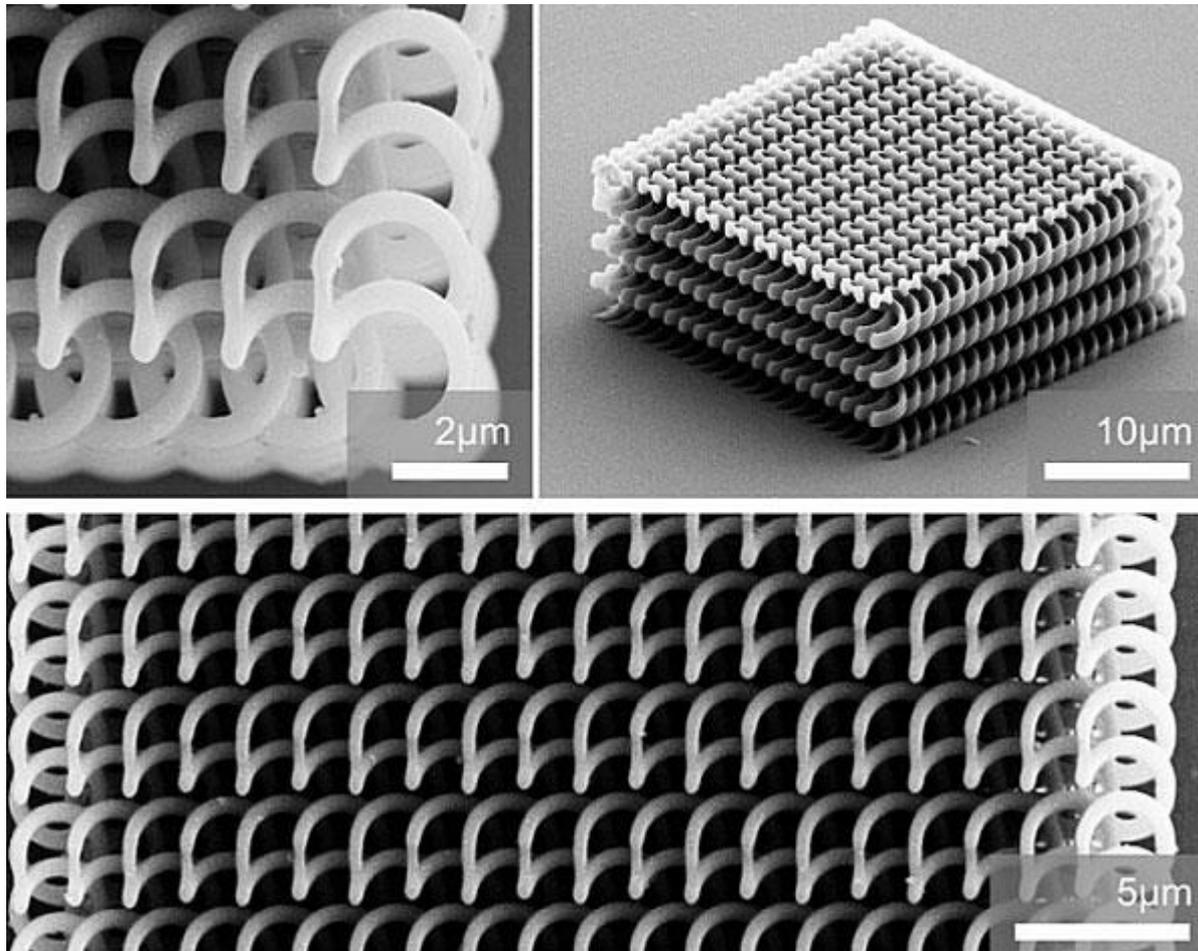
Laserlithographie

- 3D photonic crystal



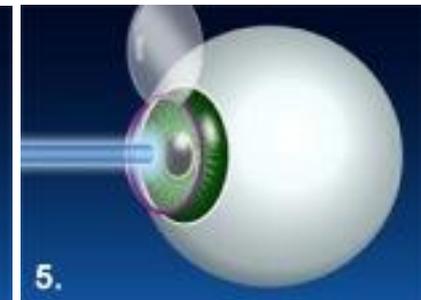
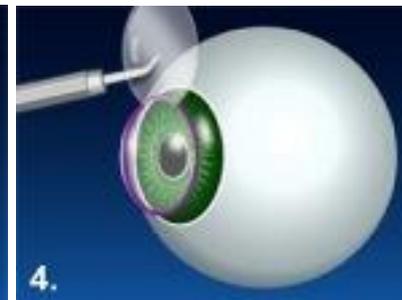
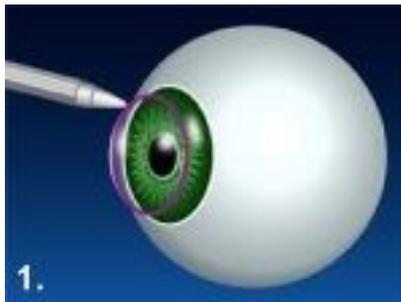
Laserlithographie

■ 3D Strukturen aus Spiralen



Laserlithographie

- Beispiel: LASIK
 - Korrektur von Fehlsichtigkeit
 - Ablation: $0,25 \mu\text{m}/\text{Puls}$
 - ca. 2000 € / Auge



RÖNTGENLITHOGRAPHIE

Warum Röntgenlithographie

- Verdopplung der Komponenten auf integrierten Schaltkreisen alle 1-2 Jahre
- Halbierung der Prozessgröße alle 2-4 Jahre
- Wellenlänge der Strahlung ist entscheidend für die minimale Strukturauflösung
- Optische Lithographie:
 - Wellenlänge von 426 nm – 157 nm
- Röntgenlithographie
 - Wellenlänge von 2 - 0.2 nm sind nutzbar
→ wesentliche Verringerung der Strukturweite

Jahr	Prozessgröße (min. möglich)
1971	10 µm
1974	6 µm
1977	3 µm
1982	1.5 µm
1985	1 µm
1989	800 nm
1994	600 nm
1995	350 nm
1997	250 nm
1999	180 nm
2001	130 nm
2004	90 nm
2006	65 nm
2008	45 nm
2010	32 nm
2012	22 nm
2014	14 nm
2016	10 nm
2018	7 nm
2020	5 nm

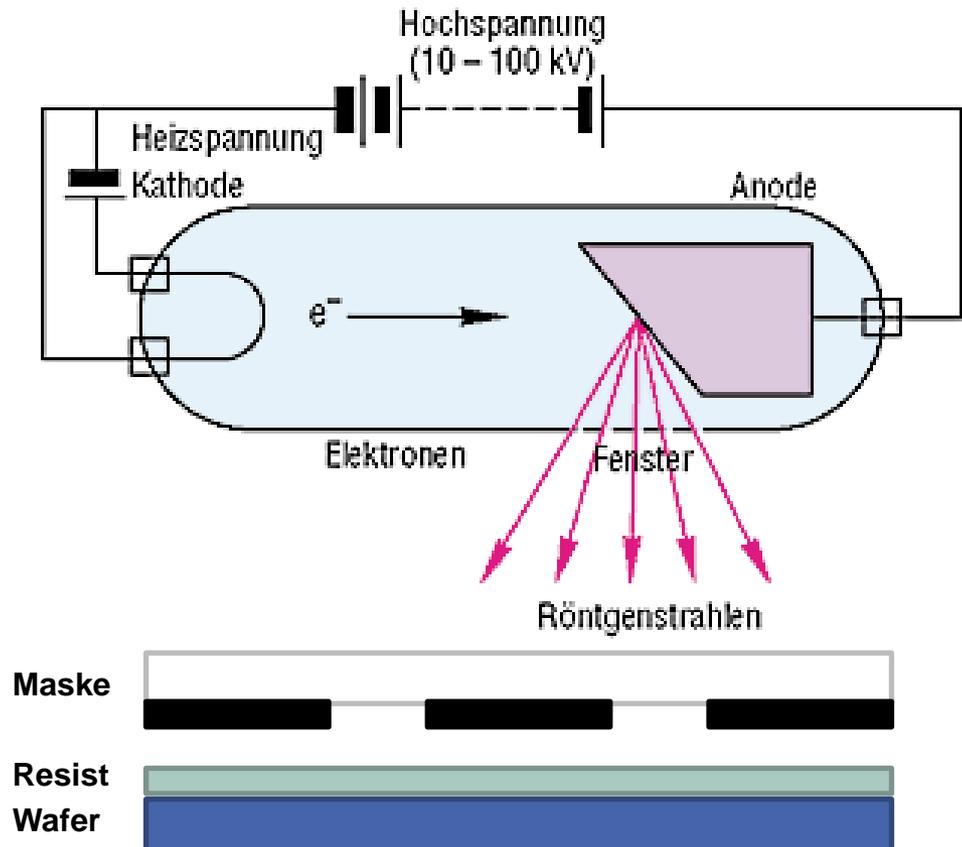
Röntgenquellen

- Anforderung:
 - Hohe Intensität
 - kurze Belichtungszeit → hoher Scheibendurchsatz
 - Hohe Parallelität der Strahlung
 - hohe Strukturauflösung
 - hohes Aspektverhältnis

- Röntgenquellen:
 - Hochleistung – Röntgenröhren
 - Plasmaquellen
 - Synchrotron

Strahlerzeugung der Röntgenröhren

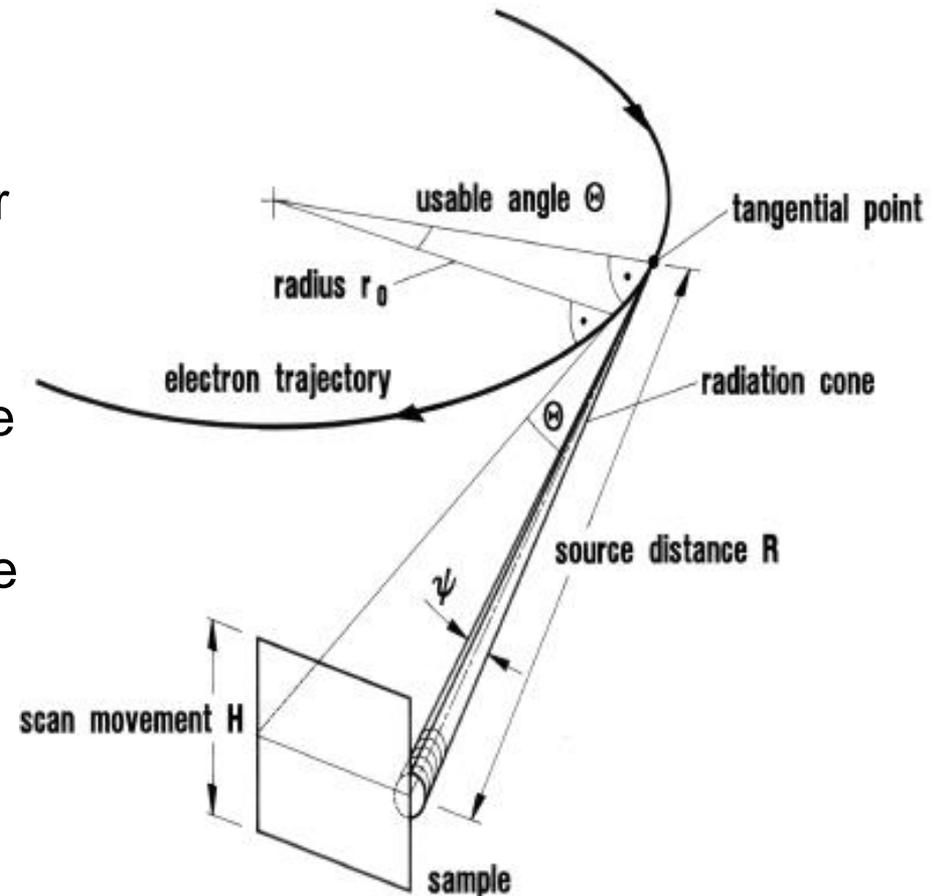
- Glühender Metalldraht (Kathode) sendet e^- aus
- Anode beschleunigt e^-
- Abbremsen der Elektronen am Target
 - Bremsstrahlung + Wärme
- Nachteile:
 - Starke Wärmeentwicklung am Substrat
 - Zu geringe Intensität
 - Nicht parallel
- Keine Bedeutung in der MST



Prinzip des Synchrotron

- Strahlung strahlt tangential ab
- Horizontal: Streifenförmig
- Vertikal: Bewegung durch Scanner
- Proben müssen mit Scanner über den Strahl gelenkt werden
- Komplette Ausleuchtung der Probe
- Periodischer Energieeintrag
- Periodische Erwärmung der Maske

- **Typische Werte:**
 - Halbwertsbreite (1σ): ca. 1 mm
 - Scannerhub H: max. 200 mm

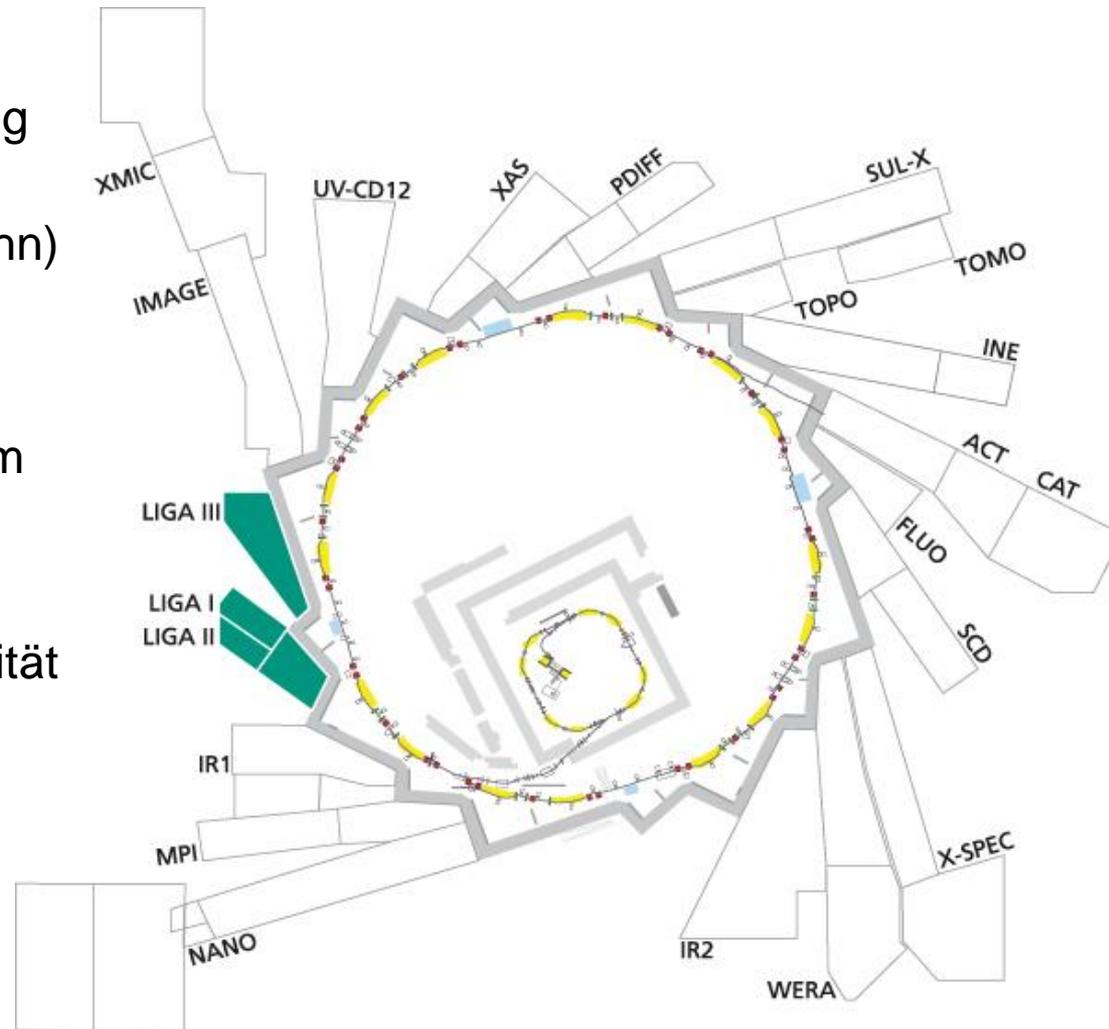


Bildquelle: <http://www.imtek.de>

Synchrotron-Strahlung

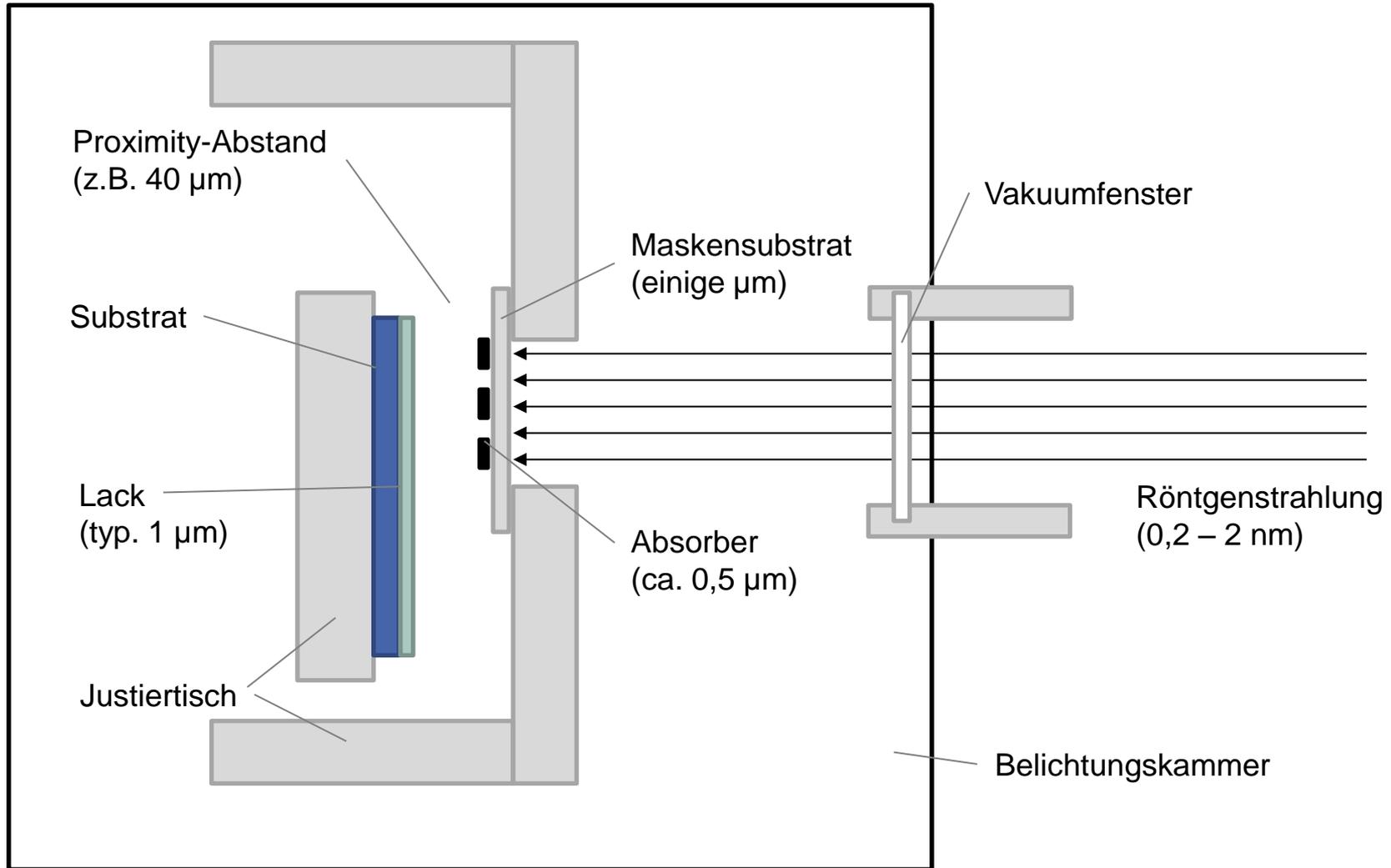
- Elektronen auf Kreisbahn
 - Zentripetalbeschleunigung
 - Synchrotron-Strahlung (tangential zur Umlaufbahn)

- Eigenschaften
 - Kontinuierliches Spektrum
 - Hochparallel
 - Polarisiert
 - Sehr hohe Langzeitstabilität
 - Technisch geeignet für Lithographie

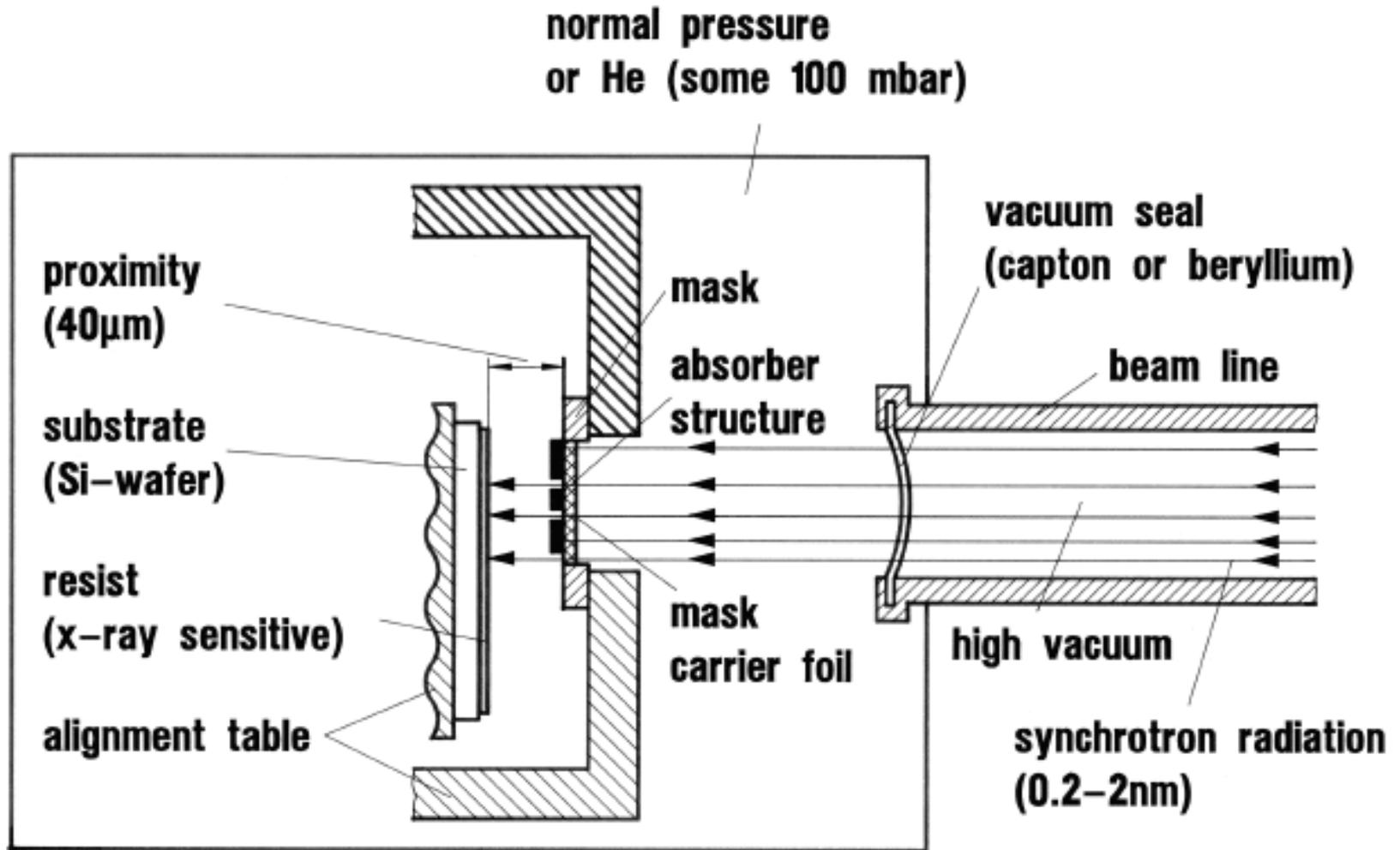


Bildquelle: <https://www.anka.kit.edu/>

Synchrotron Lithographie



Synchrotron Lithographie



Bildquelle: <http://www.imtek.de>

Röntgenlithographie

- Vorteile:
 - Sehr kleine Wellenlänge
 - Beugungseffekte sind vernachlässigbar
 - Strukturbreiten im nm-Bereiche sind möglich
- Nachteile:
 - Synchrotron-Strahlung sehr aufwendig (Teilchenbeschleuniger)
 - Hohe Anforderungen an die Röntgenmasken
 - Sehr teures Verfahren
 - Für die Mikroelektronik noch keine Bedeutung
- Aspektverhältnis:
 - Hochenergetische, parallele Strahlung
 - Belichtung von Resist bis zu einer Dicke von 3 mm möglich
 - Hohe Strukturen, Verwendung für den Spritzguß (LIGA)
 - Interessant für die MST