

Von UV zu EUV - Der Weg von ZEISS an die Weltspitze der Lithografie-Optik

Silicon Saxony

Bernhard Kneer



23. Juni 2026



Exponentielles Wachstum der Rechenleistung – seit 5 Jahrzehnten



1976

Cray 1 – Supercomputer
(Simulation der Lebenszyklen
von Sternen, Wettervorhersage)

Cray 1: The first supercomputer
160 MIPS

8 megabytes of memory

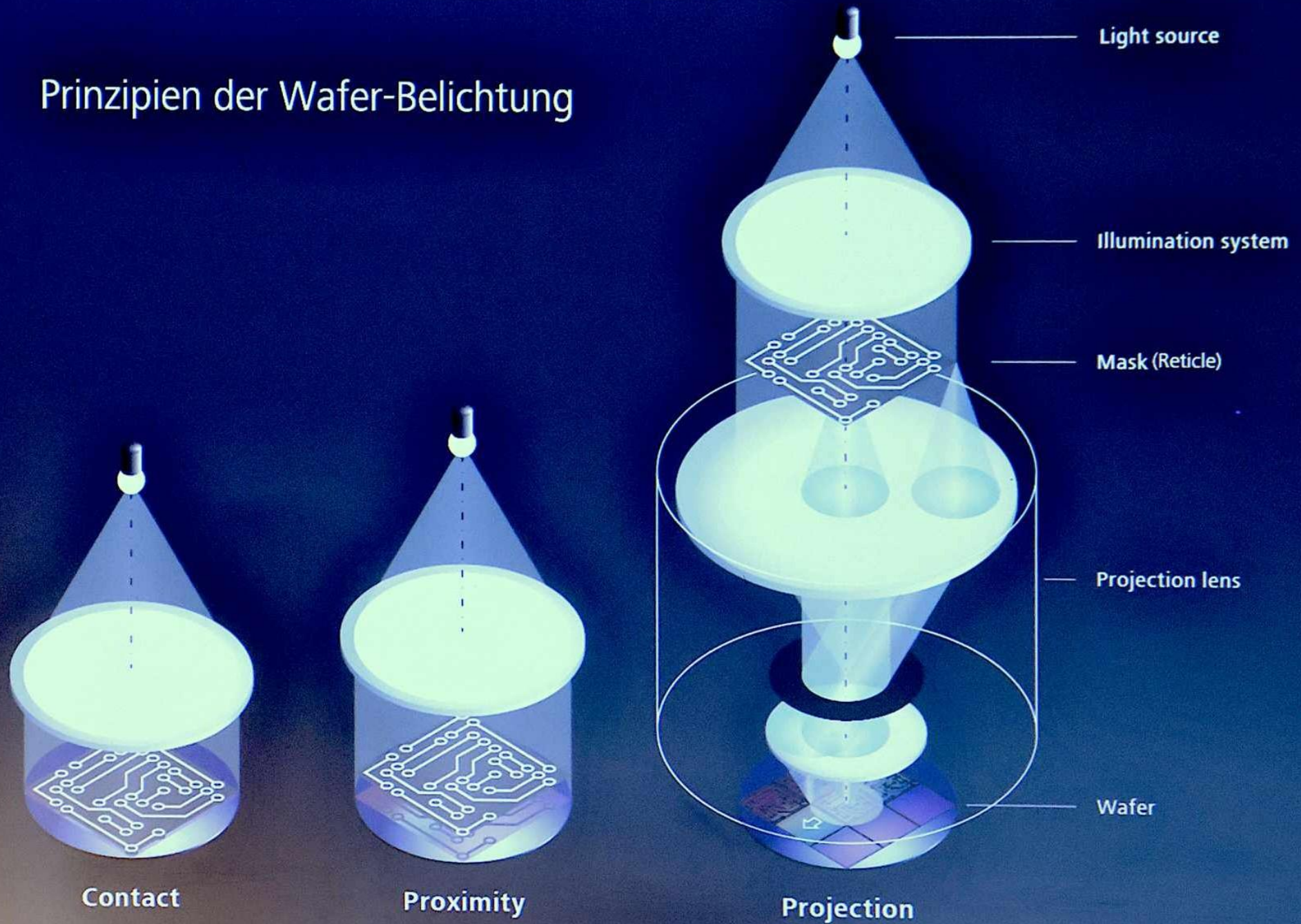
Weight of an elephant (5.5 tons)

150 kilowatt power supply
(enough for 50 households)

Freon cooling system

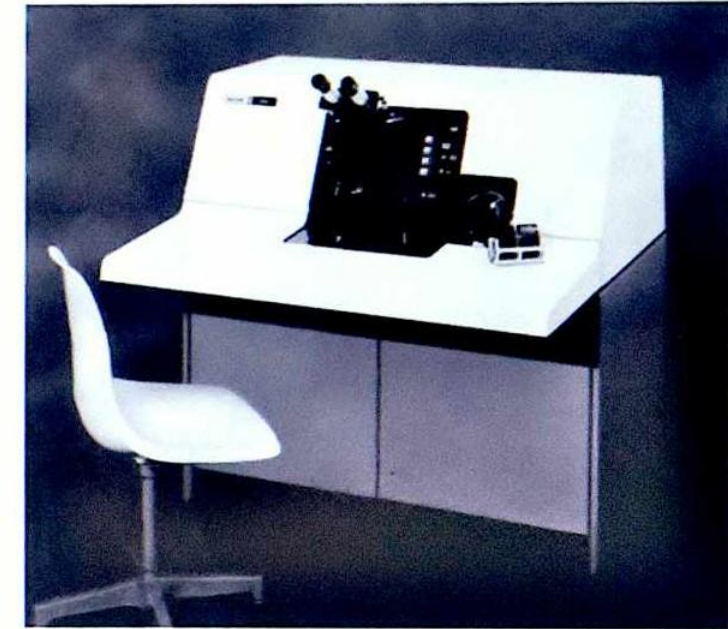
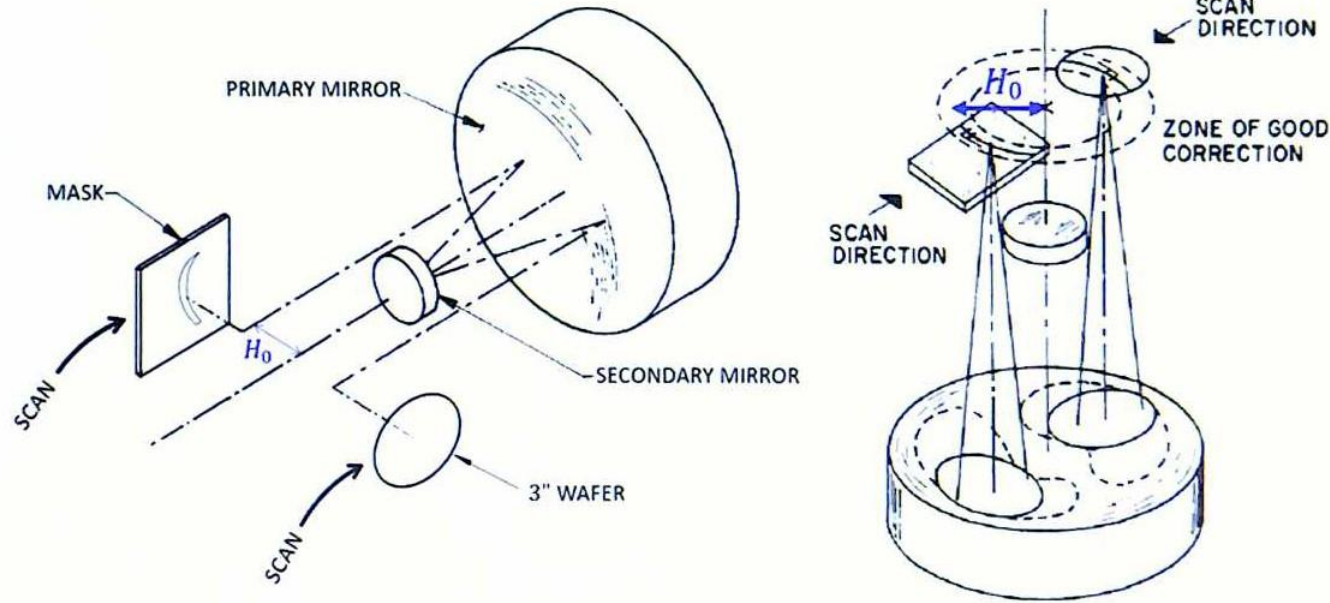
\$8.8 million (\$30 million in today's
dollars)

Prinzipien der Wafer-Belichtung



Erster kommerziell erfolgreicher Projektions-Scanner, 1973

Perkin Elmer Micralign: 1:1 Maßstab, reflektive Abbildung, Ringfeld



Geliefert an Texas Instruments am 26.10.1973 für 95000 US\$

Optikdesign von Abe Offner

- Zwei Spiegel → Ringfeld → korrigierte Abbildung
- Sphärische Spiegel → einfach zu fertigen
- Alles reflektiv → Breitband-Lichtquelle möglich

Bauteil	Größe	Contact-printing Yield	Micralign Yield
Intel 8088 Microprocessor	0.2" x 0.2"	20%	60%

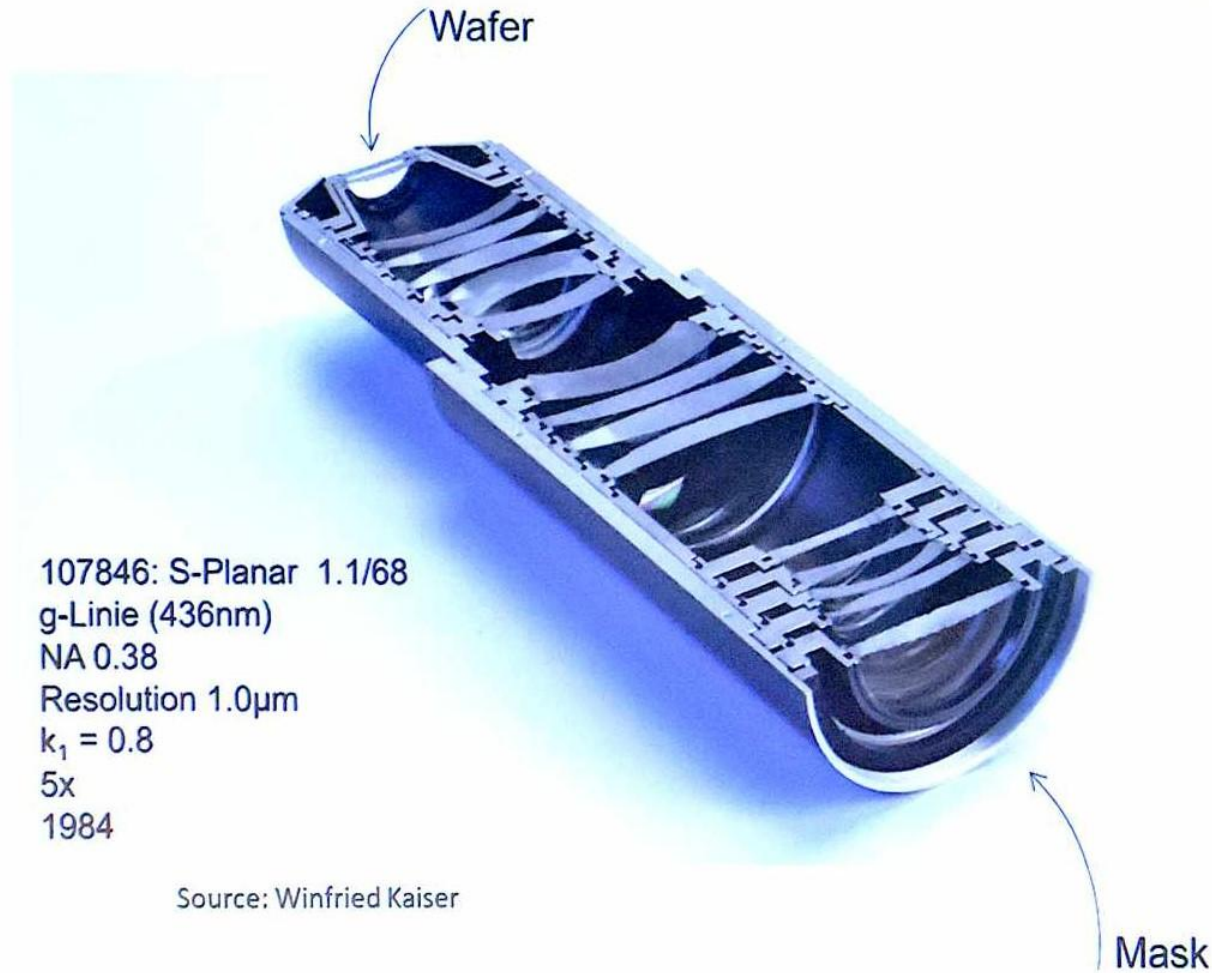
Innovation & Technology 1999 Daniel Burbank

A. Yen, W. Kaiser and A. Suzuki, "Development of Photolithography for Semiconductor Manufacturing – A Review," in IEEE Electron Devices Reviews, vol. 3, pp. 66-101, 2026.

Nach 10:1 kam 5:1

Ermöglicht höheren Durchsatz

Dieser Objektivtyp war der erste, den ZEISS für ASML fertigte.



A. Yen, W. Kaiser and A. Suzuki, "Development of Photolithography for Semiconductor Manufacturing – A Review," in IEEE Electron Devices Reviews, vol. 3, pp. 66-101, 2026.

Carl Zeiss SMT GmbH, Bernhard Kneer



ASML PAS 2500/10 wafer stepper
Field size = 20 mm in diameter

Maskenherstellung

- Automatischer Neunfach-Repeater (ANR)
- Universal-Einfach-Repeater (UER)
- Automatischer Einfach-Repeater (AER)

ANR (1971): 546 nm, 4x-15x

UER (1977): 436 nm, 5x-10x-15x, 0,25-0,50 NA, BFD 2,8-10,5 mm

AER (1980): 436 nm, 10x, BFD 14,2 mm, R 1,0 μm

Waferbelichtung

- Justier- und Belichtungseinheit (JuB) PM50 / PM80
- Masken-Projektions-Überdeckungs-Repeater (MPÜR)
- Automatischer Überdeckungs-Repeater (AÜR)
- Automatischer Scheiben-Repeater (ASR)

JuB PM50 (1974): 436 nm, 1x, 0,14 NA, BFD 50 mm, R 3,0 μm

JuB PM80 (1975): 436 nm, 1x, 0,11 NA, BFD 80 mm, R 4,0 μm

MPÜR (1979): 436 nm, 5x, 0,40 NA, BF 6*6 mm², R 0,80 μm

AUR (1982): 436 nm, 5x, 0,25-0,40 NA, BF 20*20 – 8*8 mm², R 0,80-1,6 μm

ASR (1988): 436 nm, 5x, 0,40 NA, BF 16*16 mm², R 0,80 μm

Optische Anlagen bei Carl Zeiss Jena

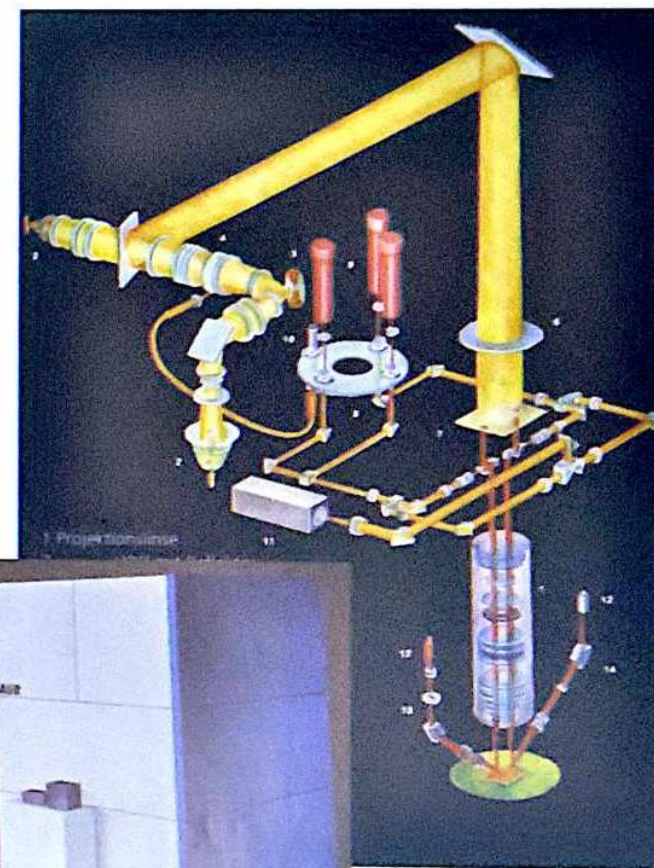
Automatischer Überdeckungs-Repeater (AÜR)



Projektionsobjektiv	5x, g-Linie (436 nm)
Beidseitig telezentrisch	
Austauschbarer Kondensor:	0.6 – 0.8 sigma
NA:	0.25 – 0.40 frei wählbar
Bildfeldgrößen:	20*20 – 8*8 mm ²
Auflösung:	0.8 – 1.8 µm
Verzeichnung:	0.2 – 0.3 µm
Inhomogenität Intensität:	2.5 %

Weitere Parameter

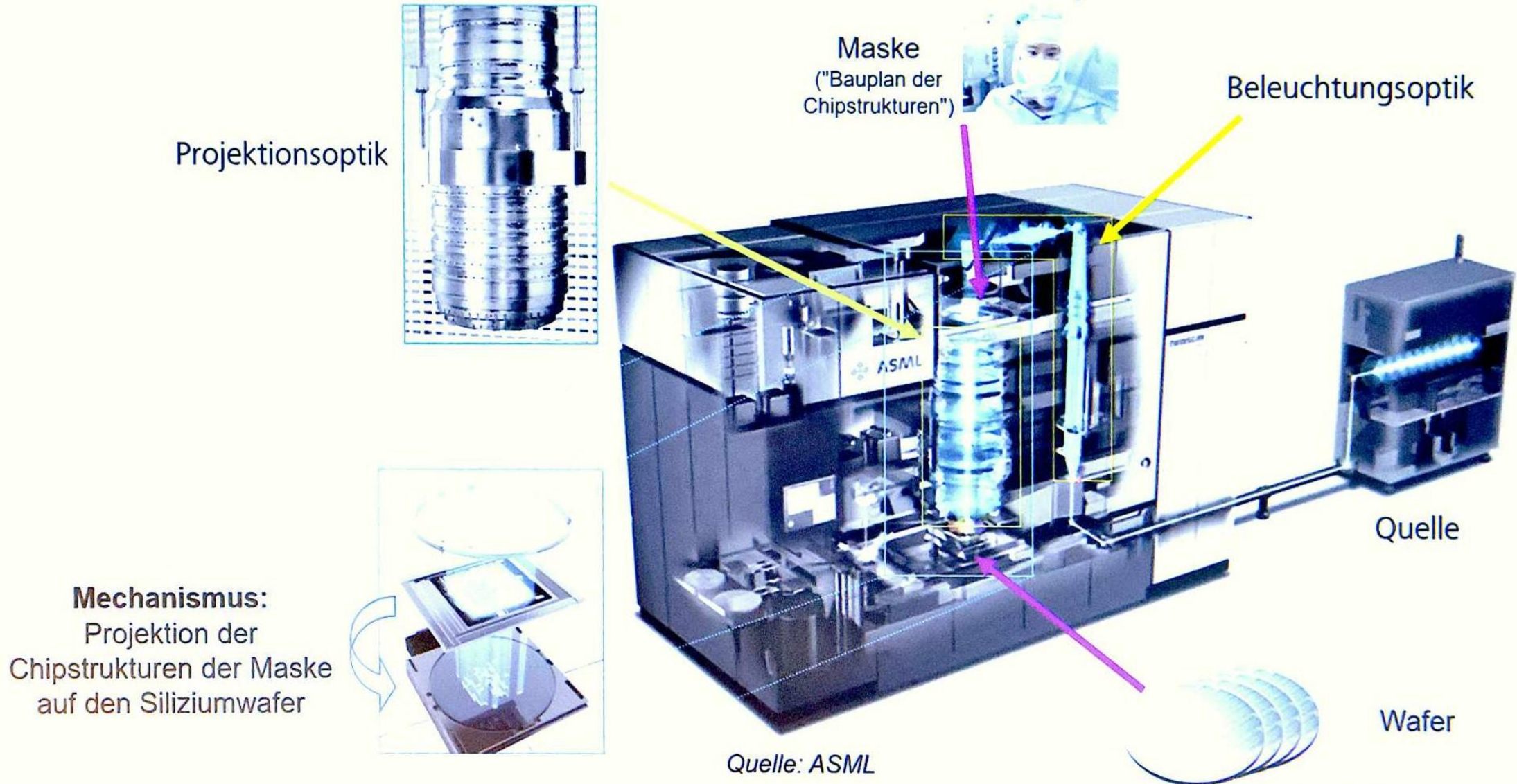
Automatisches Überdeckungssystem (TTL)	
Wellenlänge:	578 nm
Positioniergenauigkeit:	0.1 µm
Bildfeldweise Fokussierung	0.2 µm
Waferdurchmesser:	100 / 125 / 150 mm



Quelle: Jenaer Rundsch

Layout des Lithografie-Wafer-Scanners von ASML

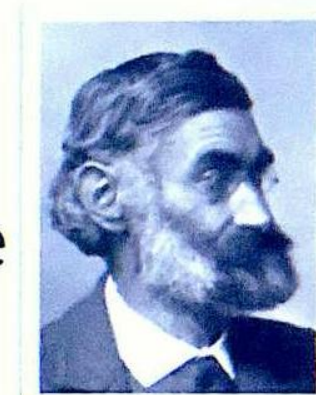
ZEISS Beleuchtungs- und Projektionsoptik



Die Auflösung ist der Schlüssel



1873 – Ernst Abbe formuliert die optische Auflösung eines Abbildungssystems



Auflösungsgrenze (Periodizität)

$$d = \frac{\lambda}{2n \cdot \sin(\alpha)} = \frac{1}{2} \frac{\lambda}{NA}$$

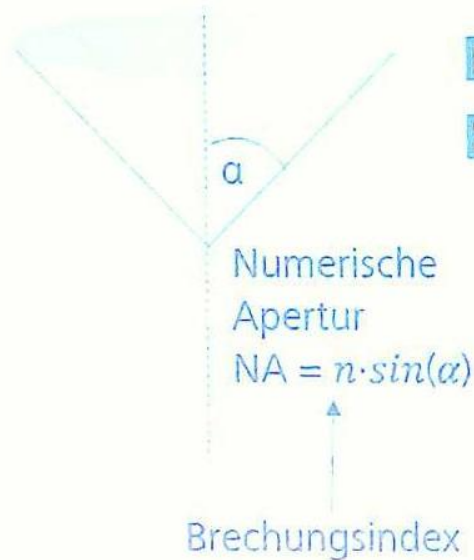
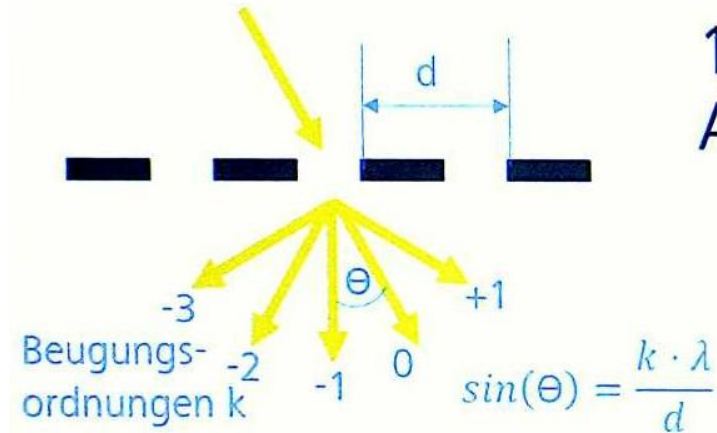
Das Objektiv muss wenigstens 2 Beugungsordnungen einfangen

Moderne Formel:

Critical Dimension (half-pitch)

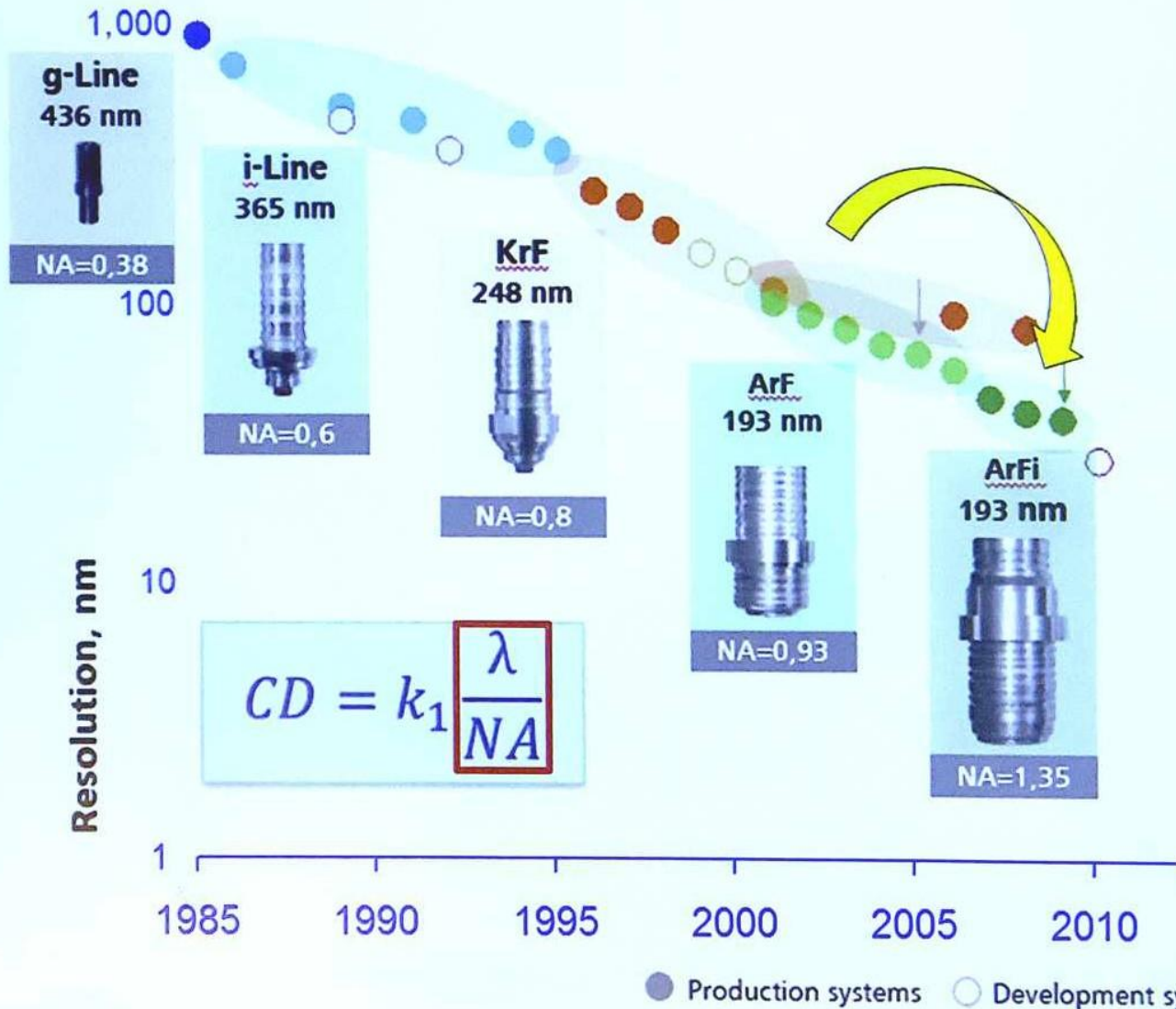
$$CD = k_1 \frac{\lambda}{NA}$$

k_1 = Process Factor (>0.25)

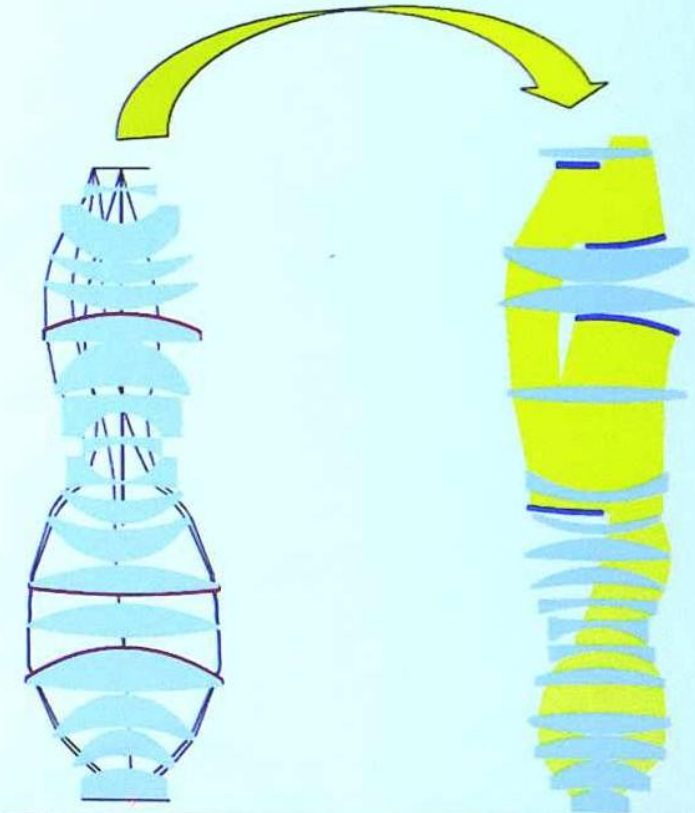


Lithografie-Roadmap

Kontinuierliche Innovation über Wellenlänge, Numerische Apertur und Material



Revolution
Katadioptrische Designs
Immersionshyper-NA >1



ArF trocken 193 nm

ArF Immersion 193 nm

Ein neues Objektiv für hohen Durchsatz der KrF-Lithographie

NXT:870B mit höherem Durchsatz



TWINSCAN NXT:870B

The dual-stage KrF dry lithography system exposes 300 mm wafers with an industry-first throughput of 400 wafers per hour.

248 nm

KrF light source

≤ 110 nm

Resolution

0.80 NA

Projection lens

≥ 400

Wafers per hour

Key features & benefits

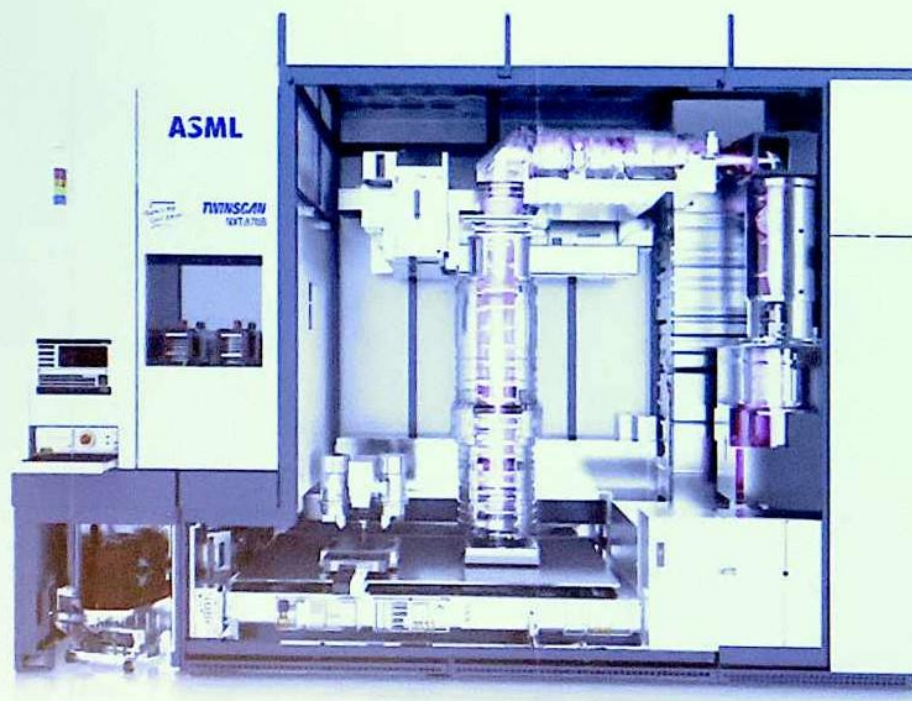
The TWINSCAN NXT:870B is the successor to the NXT:870. Innovative optics and mechatronics improvements enable the system to offer 20% higher throughput while maintaining overlay and imaging performance.

The NXT:870B lowers chipmakers' cost per wafer exposure and maximizes the value that they can get out of the space in their fabs. KrF lithography systems are industry workhorses that enable chips in multiple market segments, and with its higher throughput, the NXT:870B will enable chipmakers to cost efficiently continue their technology and capacity roadmaps.

Like its predecessor, the NXT:870B uses KrF technology on the same NXT platform used for ArF dry and immersion scanners. This improves overlay by facilitating excellent alignment of chip layers printed using these different technologies.

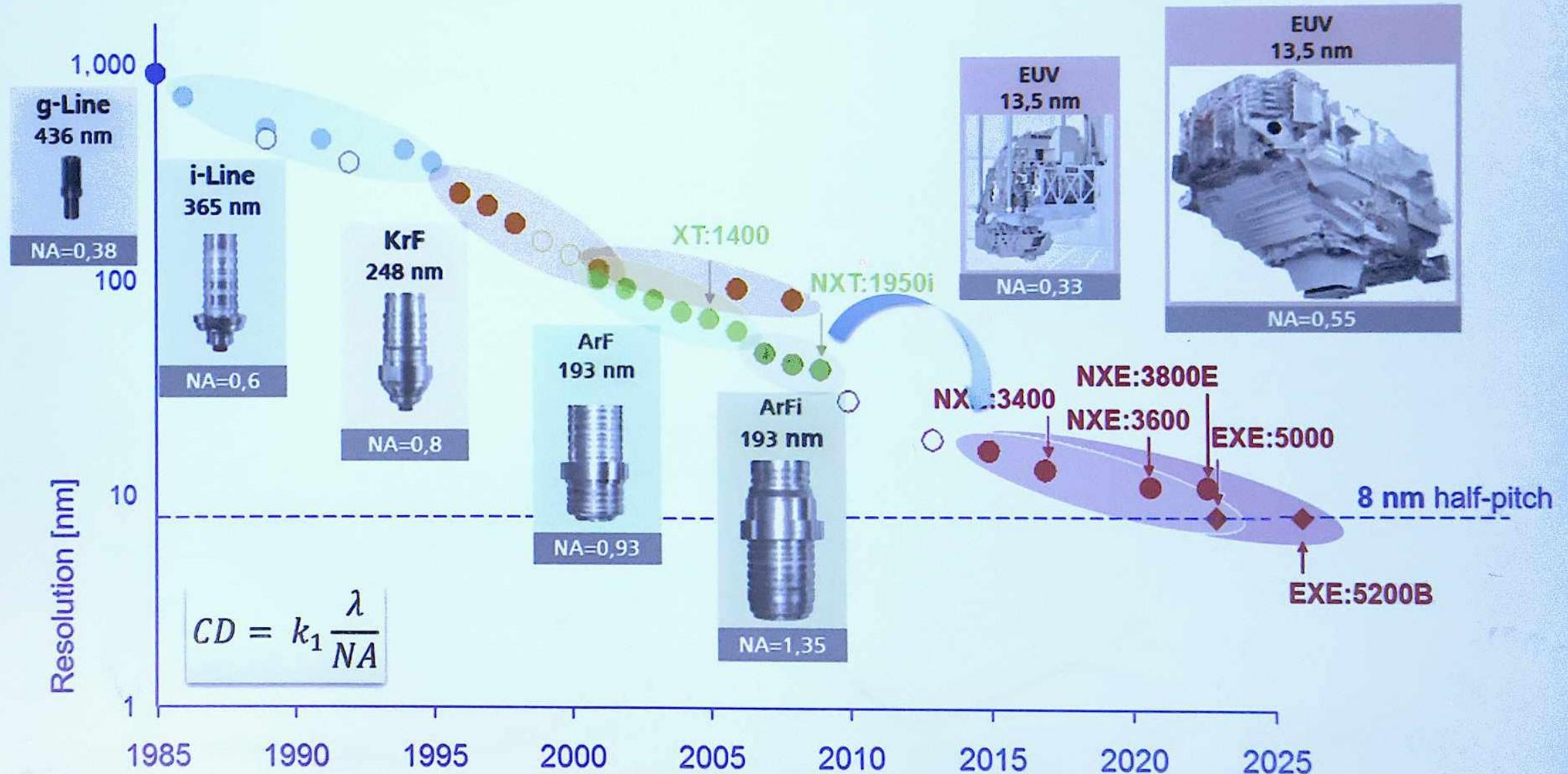
Faster stages, enabled by extending our mechatronics capabilities, were key to reaching 400 wafers per hour. Innovative solutions were needed to maintain overlay and imaging performance at that speed. For example, the reticle – the blueprint of the chip layer being printed – can slip as it quickly moves back and forth. That's why we added reticle pushers that prevent slipping to maintain the system's precise overlay.

The NXT:870B is equipped with our most advanced KrF lens, which comes with additional manipulators that correct for heating effects customers may encounter in critical process layers. Moreover, the additional manipulators pave the way for future options to fit customer-specific requirements in each respective market segment.



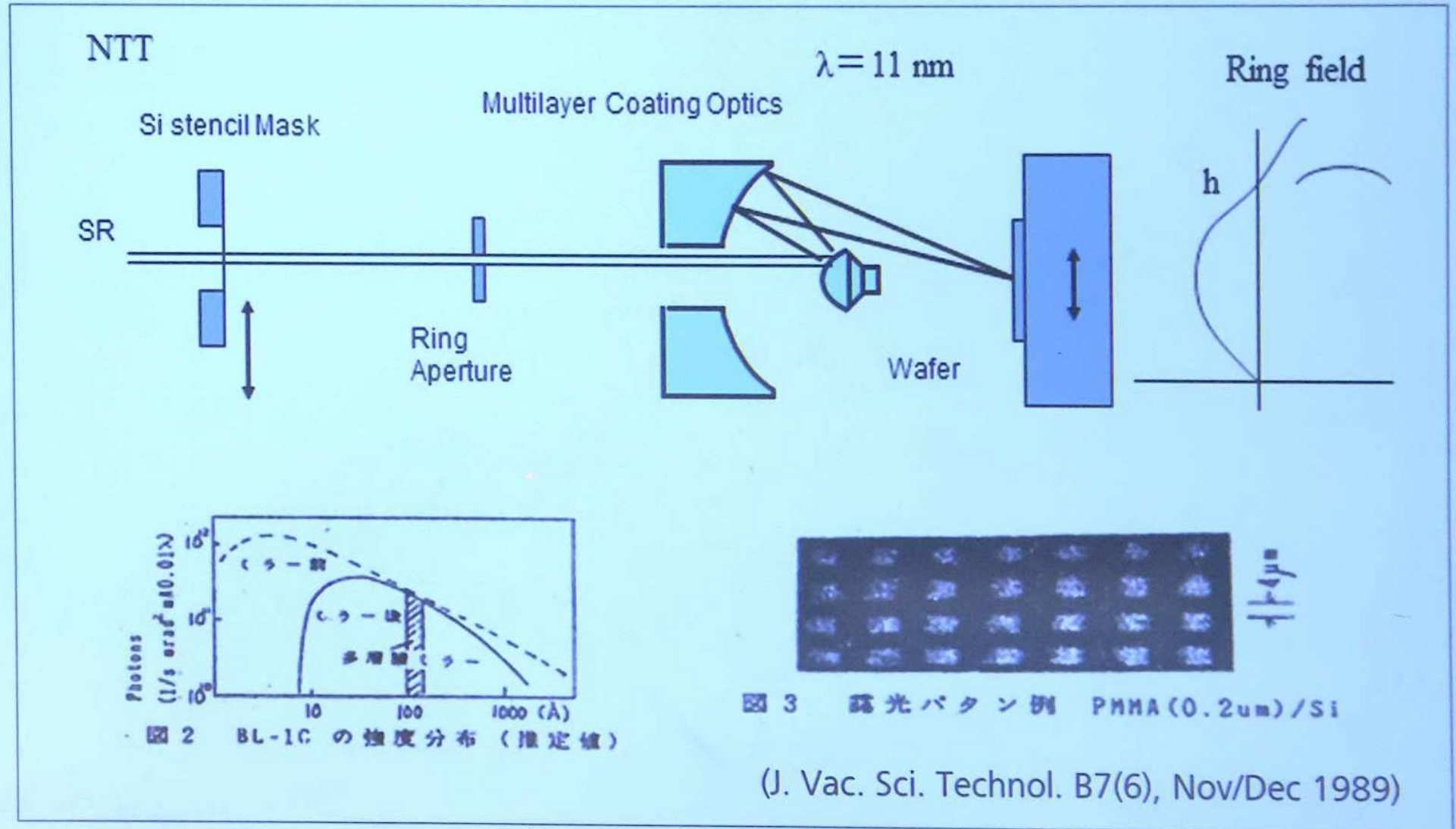
Lithography roadmap

Kontinuierliche Innovation über Wellenlänge, Numerische Apertur und Material



Anfang: Die frühe Entwicklungsphase

Prof. Kinoshita schlug 1985 die EUV-Lithografie vor

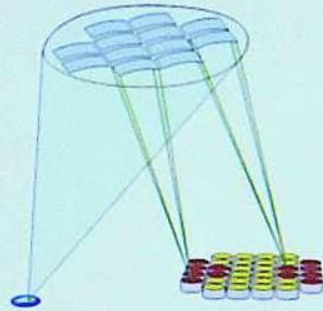


Der optische Strahlengang



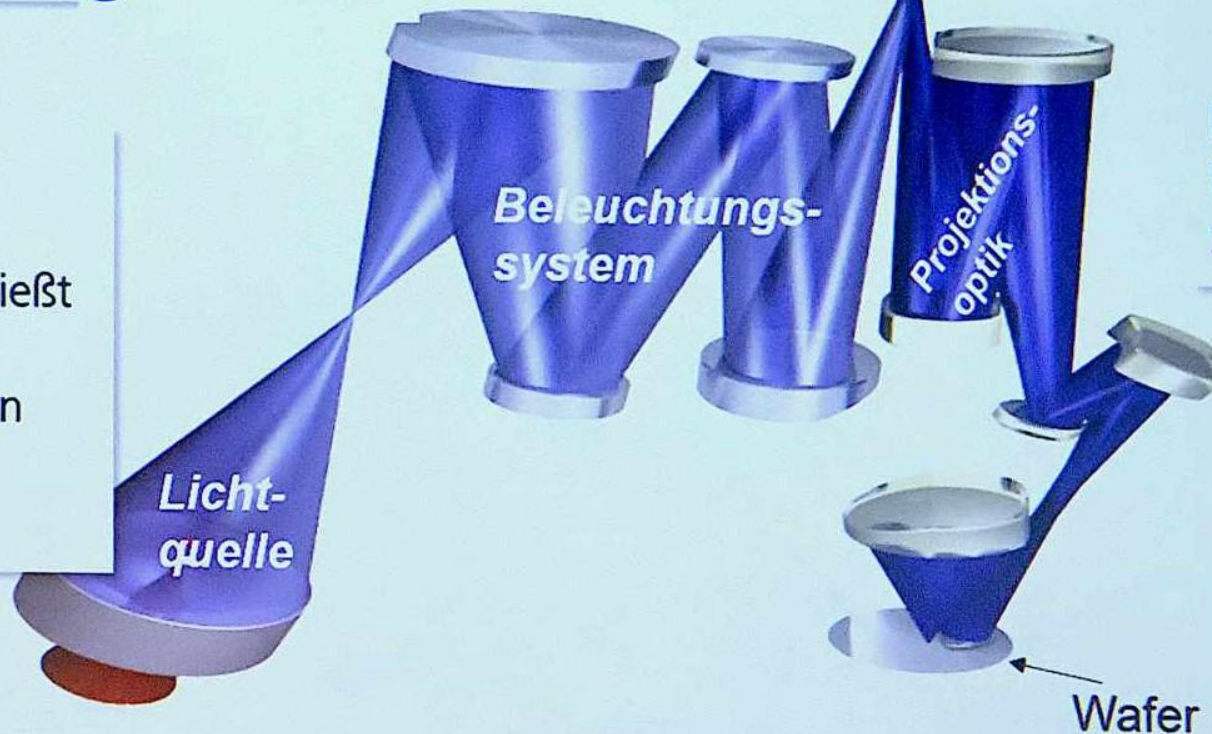
Beleuchtungssystem

Wabenkondensor
Schaltbare Facetten
für flexible spezifische
Lichtverteilung



Plasma Lichtquelle

400W
~20 kW CO₂-Laser beschießt
Zinntropfen mit
50 kHz zur Erzeugung von
EUV mit
 $\lambda = 13.5 \text{ nm}$



Projektionsoptik

Nur Spiegel
Scanfeldgröße 26 x 33 mm²

Die Wellenlänge des EUV Lichts ist $\lambda = 13.5\text{nm}$

Optiken für EUV müssen anspruchsvolle Randbedingungen erfüllen



- EUV-Licht wird von bekannten Materialien stark absorbiert.
 - ◆ Vakuum
 - ◆ Nur Spiegel – auch die Fotomaske
- Für EUV-Licht liegt der Brechungsindex nahe bei 1.
 - ◆ Multi-Lagen-Schichten (Bragg-Reflektoren)
- Materialabsorption begrenzt eine Reflexion auf ~70 %.
 - ◆ Minimierung der Spiegellanzahl
 - ◆ Asphären
- Wellenlänge ist 13.5 nm.
 - ◆ Enge Oberflächentoleranzen

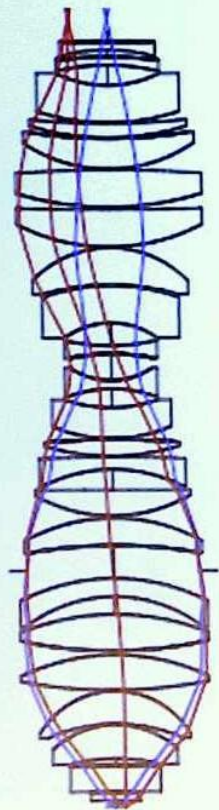
In der EUV-Welt sind Spiegel die einzige Lösung

Hochreflektierende Beschichtungen sind unerlässlich

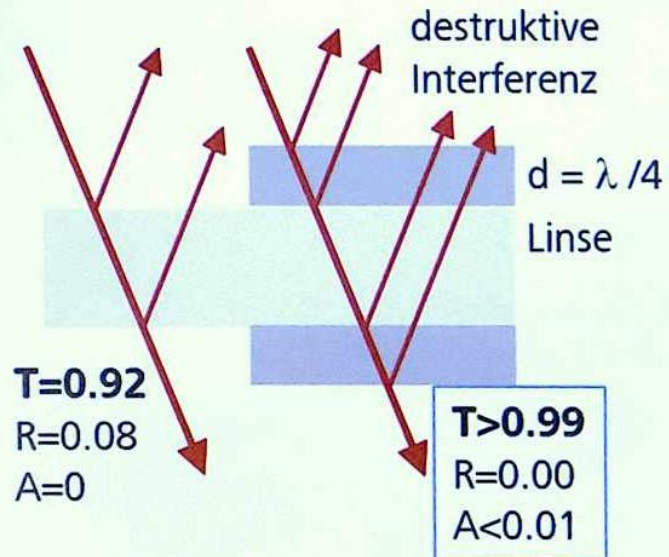
DUV, 193 nm

z.B. 22 Linsen, 44 Flächen, ohne Schicht $R=0.04$ je Fläche

→ Systemtransmission $0.96^{44} = 17\%$



Antireflexionsschicht



→ Systemtransmission $> 0.99^{44} = 64\%$

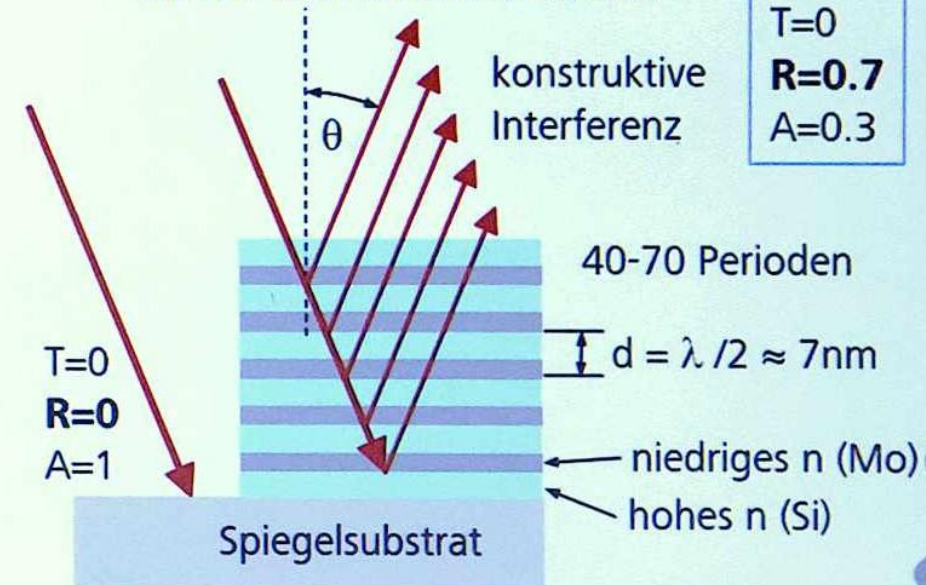
$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2$$

EUV, 13.5 nm

e.g. 6 mirror, no coating $A=1$ und $T=0$

→ system transmission = 0

Hochreflektierende Schicht



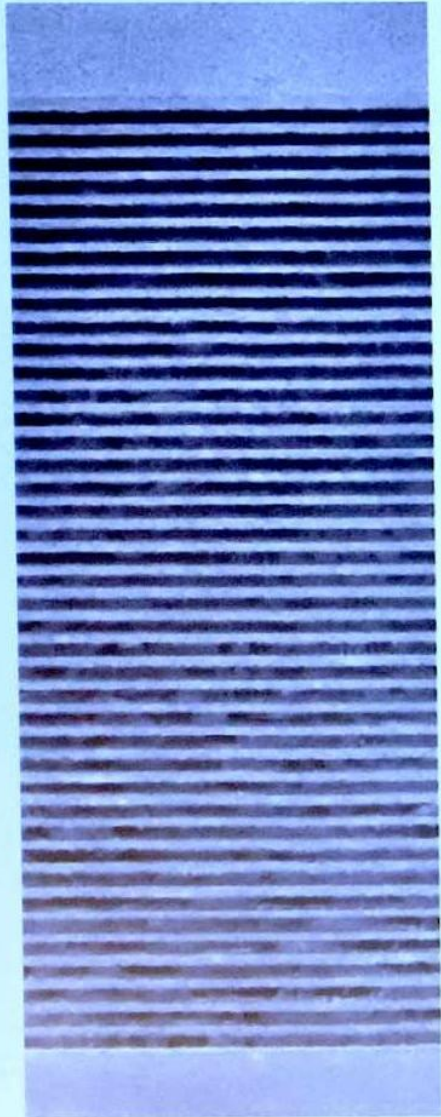
Bragg's law: $\lambda = 2 n d \cos(\theta)$

→ Systemtransmission $= 0.7^6 = 12\%$



EUV Reflektion ist auf 76% limitiert

Deshalb will man so wenige Spiegel wie möglich verwenden

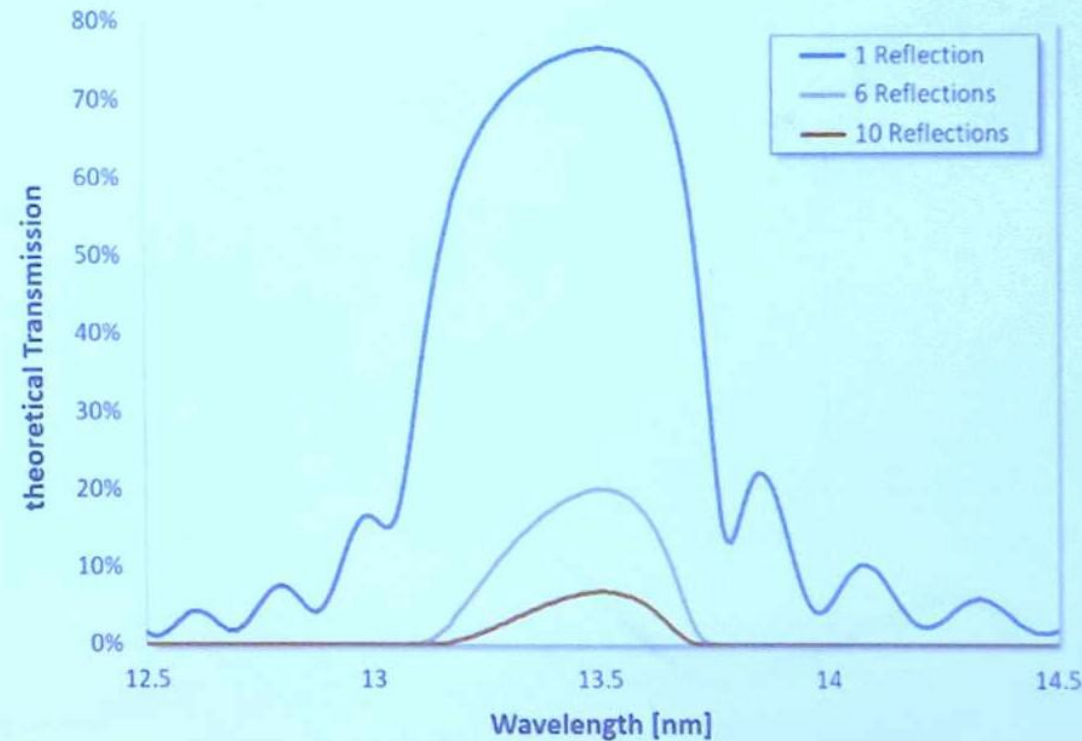


Dunkle Schichtlage: Molybdän

Helle Schichtlage: Silizium

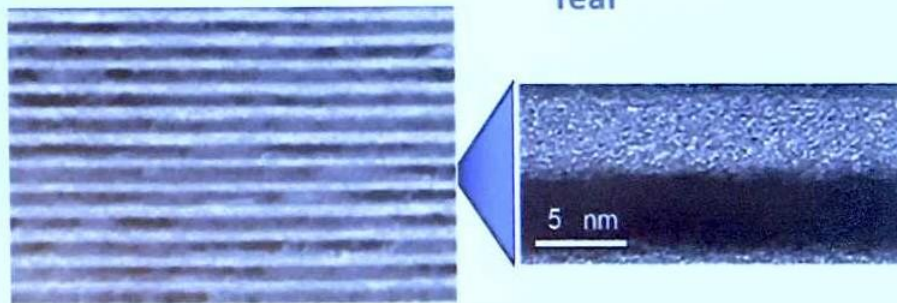
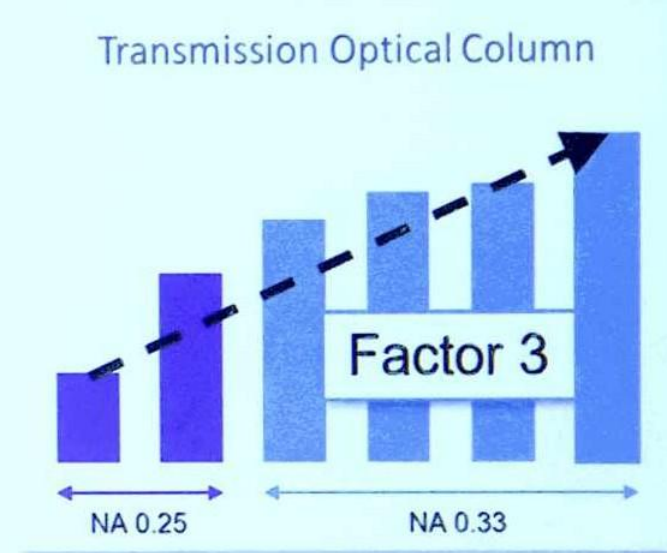
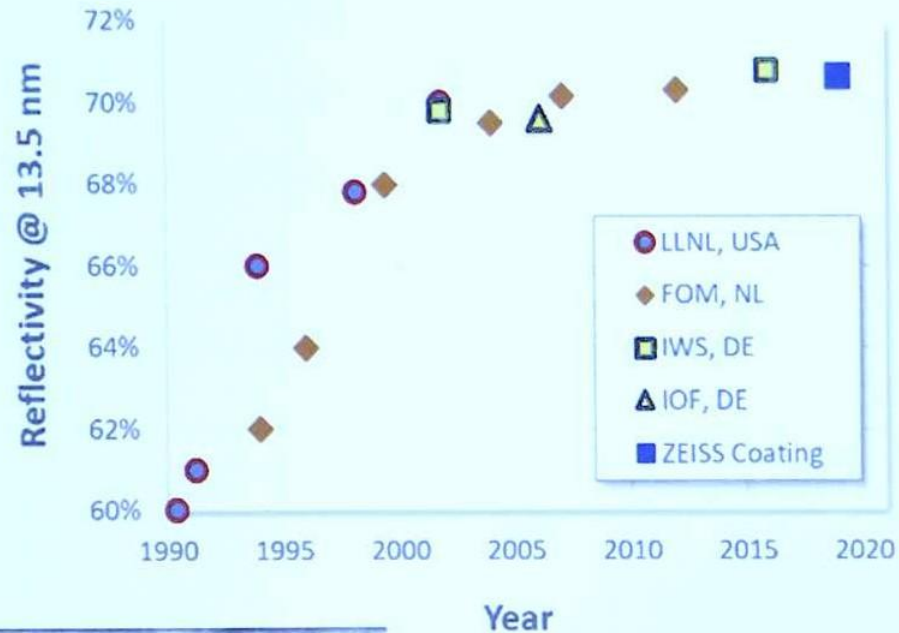
40 Perioden à ~7 nm

→ 280 nm total

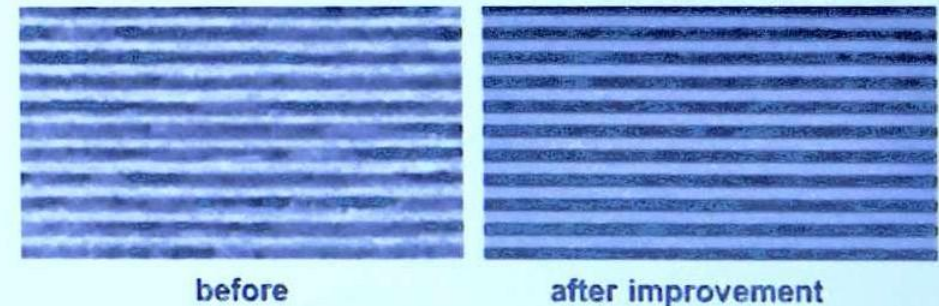


Weltweite Entwicklung von Schichten ermöglichte EUV-Erfolg

Transmission hat sich über die Produktgenerationen um Faktor 3 erhöht



→ Interdiffusion und Rauheit verringern den Brechungsindexkontrast und reduzieren dadurch die Reflexion



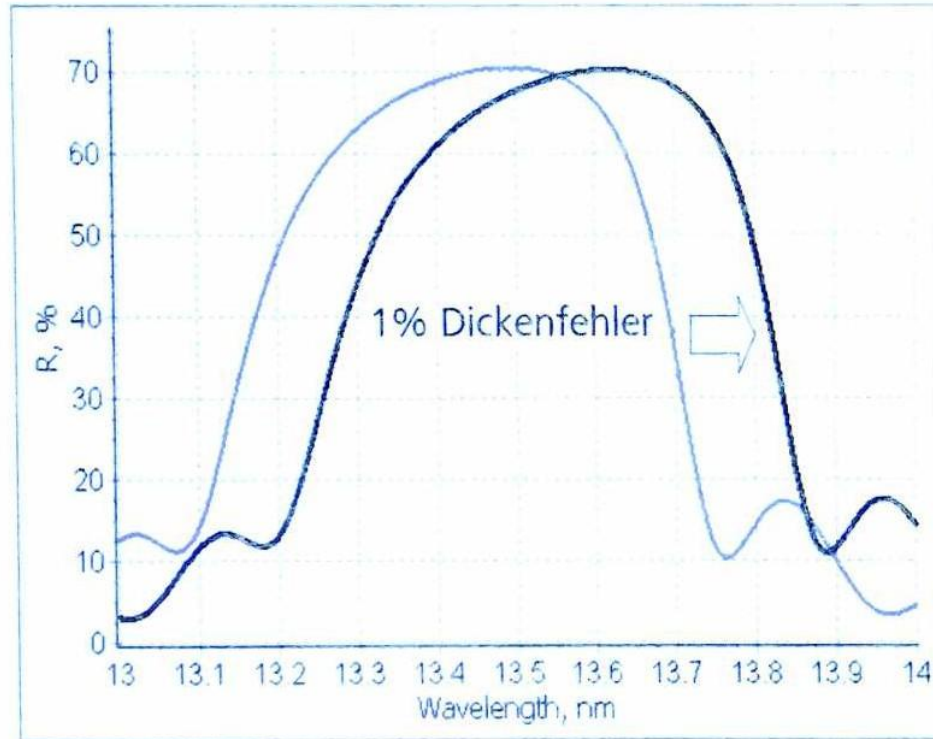
Optimierung der Beschichtungsgrenzflächen und Rauheit kann die Reflektivität auf > 70 % steigern

Der Produktionsprozess muss hochstabil sein

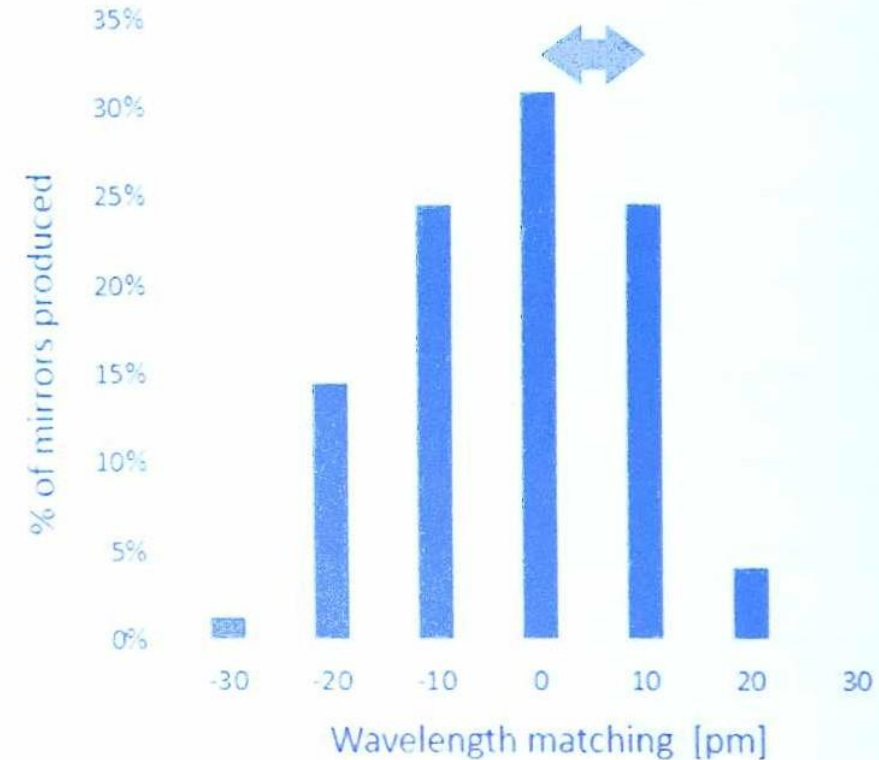
Produktionsdaten von mehreren hundert Beschichtungen zeigen hohe Genauigkeit



$$10 \text{ pm} / 13.5 \text{ nm} = 0.075 \% = 0.75 \text{ Promille}$$



Dickenfehler von wenigen Promille können zu Systemtransmissionsverlusten von mehreren Prozent führen.



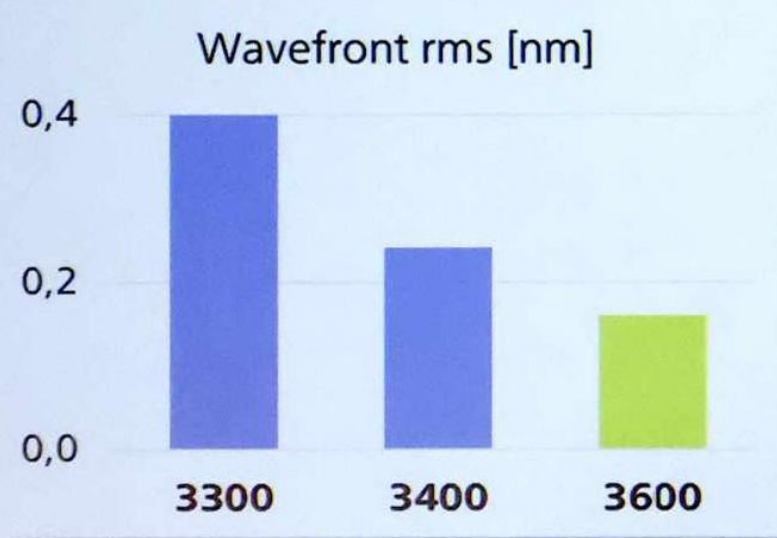
pm-Genauigkeit auf sehr unterschiedlich gekrümmten Substraten: >75 % aller gefertigten Spiegel innerhalb von ± 10 pm

Weitere Konsequenzen der EUV-Wellenlänge

Einige Faustregeln



Entwicklung der EUV-System-Wellenfront über die Jahre



- Wellenfrontfehler im System < 0.20 nm:

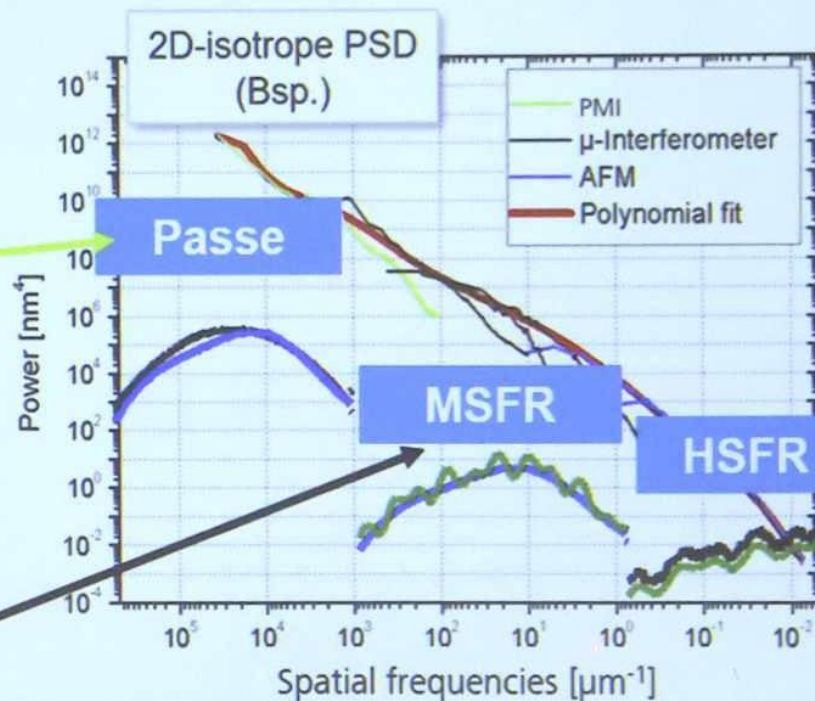
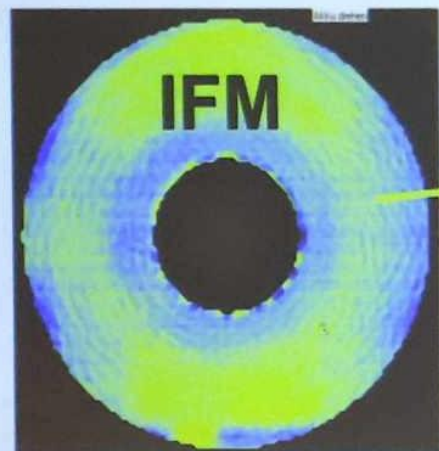
$$SurfaceError_{mirror} \approx \frac{WFE_{system}}{2 \cdot \sqrt{\sum(mirrors)}} \rightarrow < \text{Lambda} / 100$$

- Streulicht:

$$TIS \approx \left(\frac{2 \pi}{\text{Lambda}} 2 MSFR \right)^2 \rightarrow MSFR < \text{Lambda} / 100$$

EUV Projektionsoptik

Entscheidende Qualitätsparameter beim Polieren optischer Oberflächen



Erforderlich zur Erzielung ultrapräziser Oberflächenkontrolle über 7 Dekaden des PSD-Bereichs:

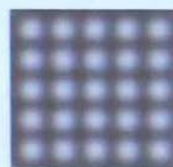
- Polierprozess
- Oberflächenmetrologie



Passe

Aberrationen

CD Uniformität, Overlay
(Überdeckung)



MSFR

Streulicht im Bildfeld

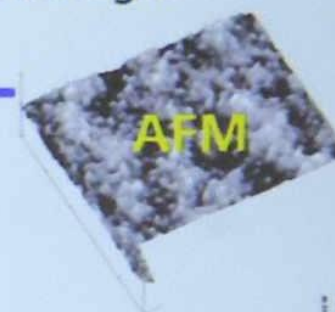
CD Uniformität, Kontrast



HSFR

Reduzierte Reflektivität

Transmission



Spiegelherstellung

Die Größen und Herausforderungen nehmen mit jeder Generation zu



MET

ADT

3100

3x00

Fotos zeigen
relative Spiegelgrößen



Passe

[pm rms]

350

250

140

<50

Aberrationen

MSFR

[pm rms]

250

200

130

<80

Streulicht

HSFR

[pm rms]

300

250

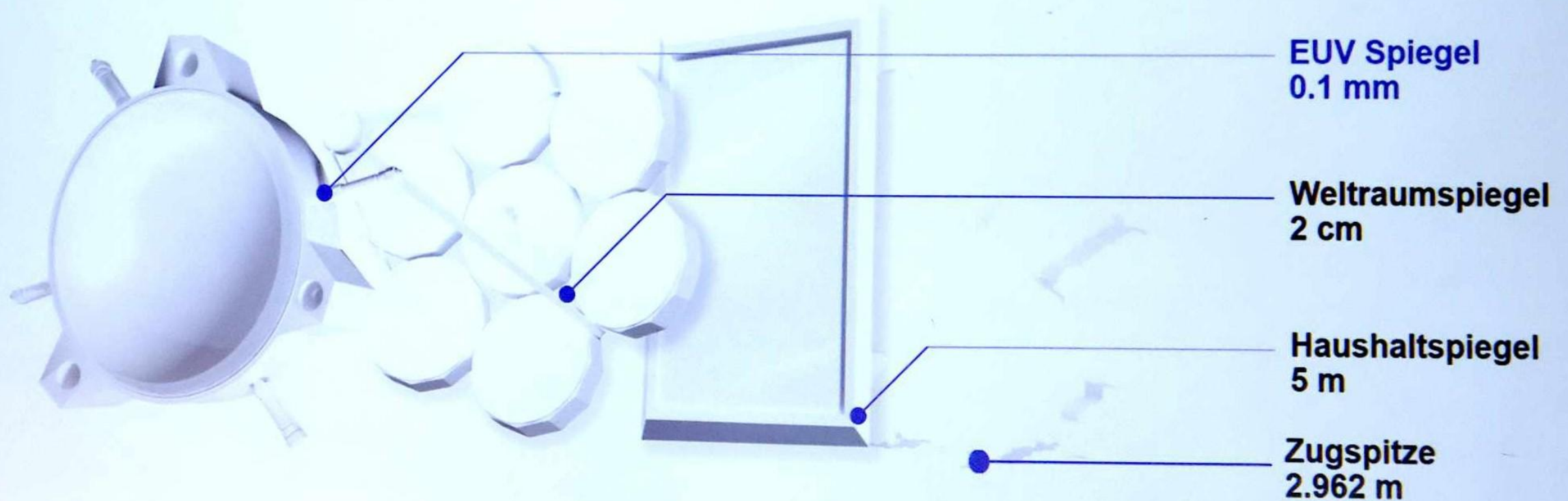
150

<100

Lichtverlust

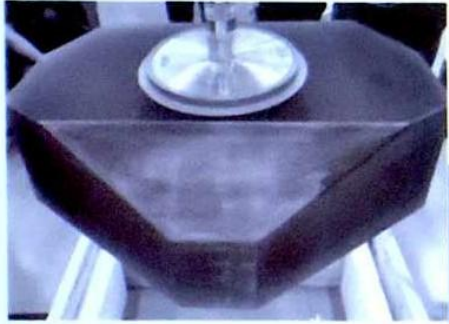
EUV - Fertigungspräzision im Sub-Nanometer-Bereich

Modernste Fertigungs- und Messverfahren erforderlich



Der präziseste Spiegel der Welt: Bei einer Vergrößerung eines EUV-Spiegels auf die Fläche Deutschlands würde **die größte Abweichung von der Sollform nur 0,1 Millimeter** betragen.

Die EUV-Optikfertigung folgt „fast“ Standardschritten ...



Abtrag

cm



μm

100 nm



Vorgeformtes
Substrat

Formgeb
ung

Polieren

Formkorr
ektur

Beschichtung

Montage

Genauigkeit

μm

100 nm

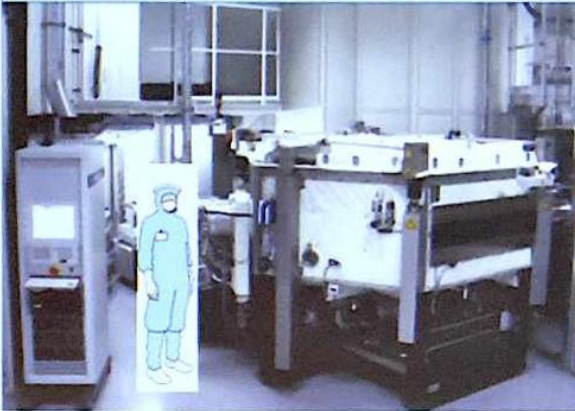
<30 pm

30 pm

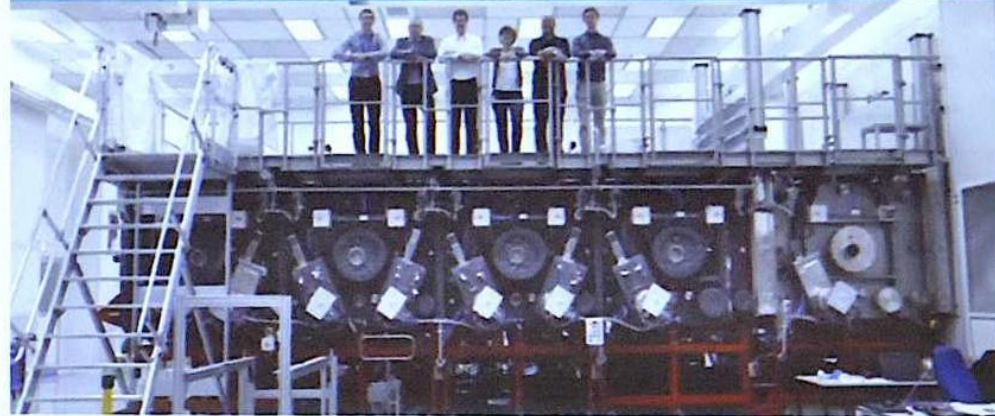


... EUV-Beschichtungen mittels Magnetronputtern abgeschieden werden

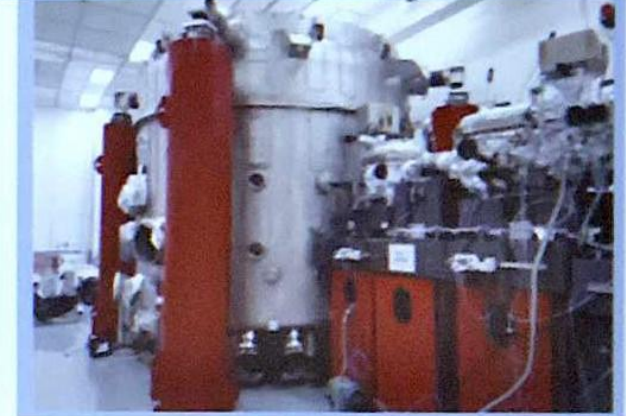
EUV: NA 0.33



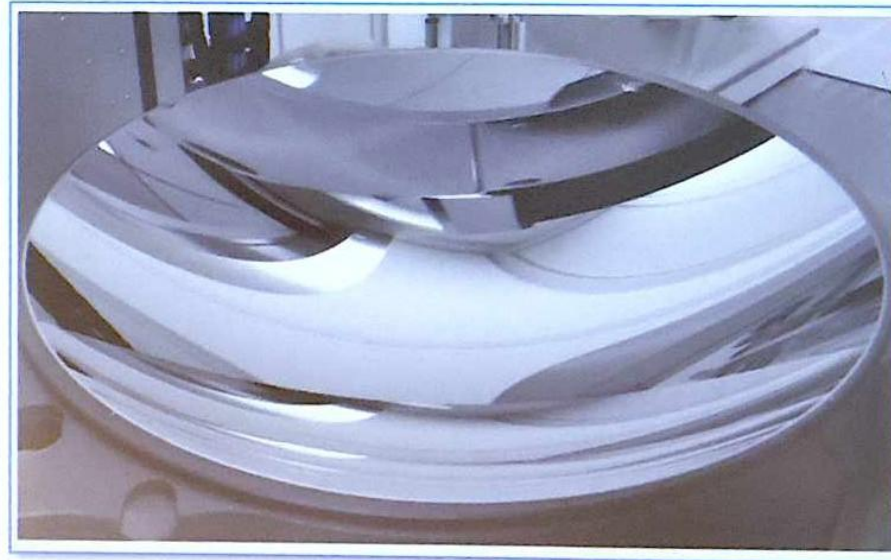
EUV: NA 0.55



Magnetronputtern



EUV Reflektometrie



Man kann nur herstellen, was man messen kann!



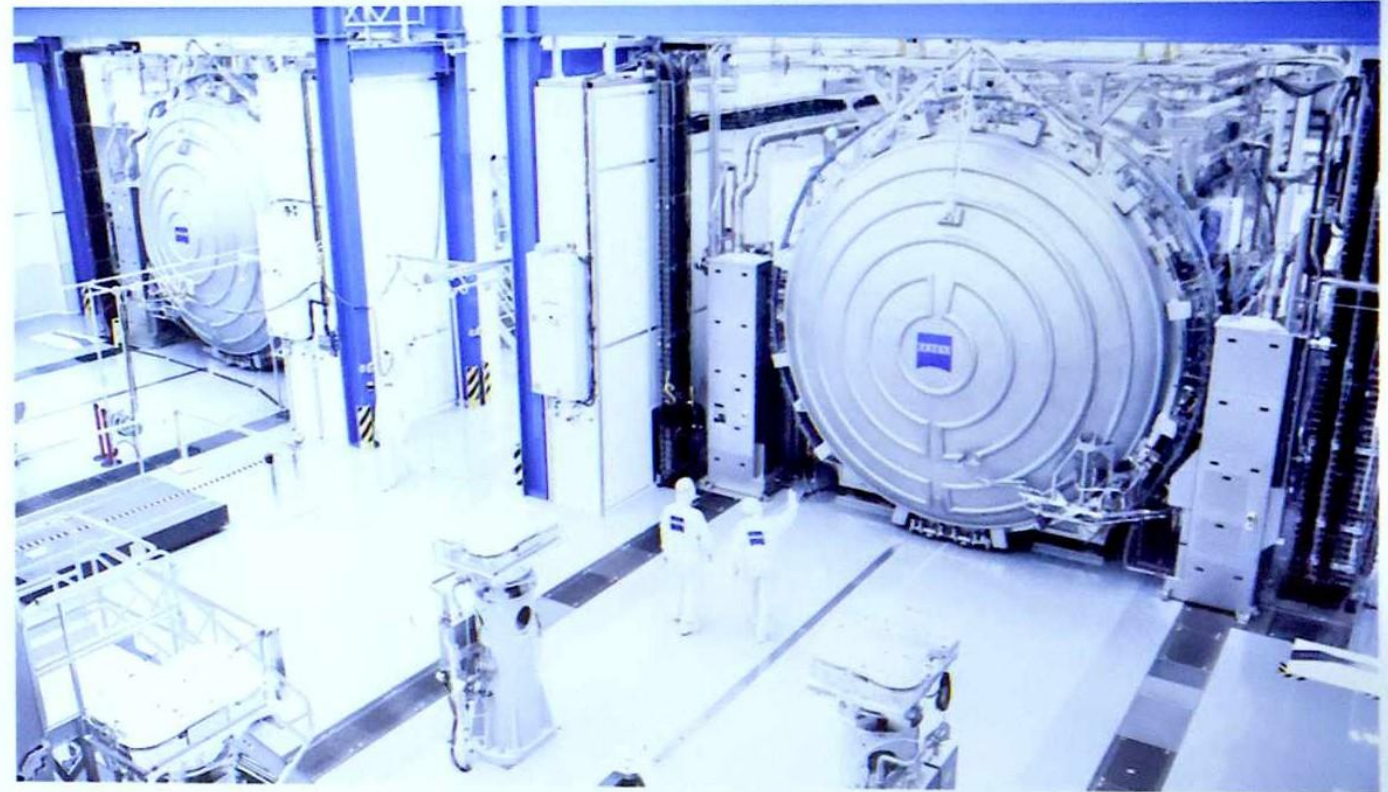
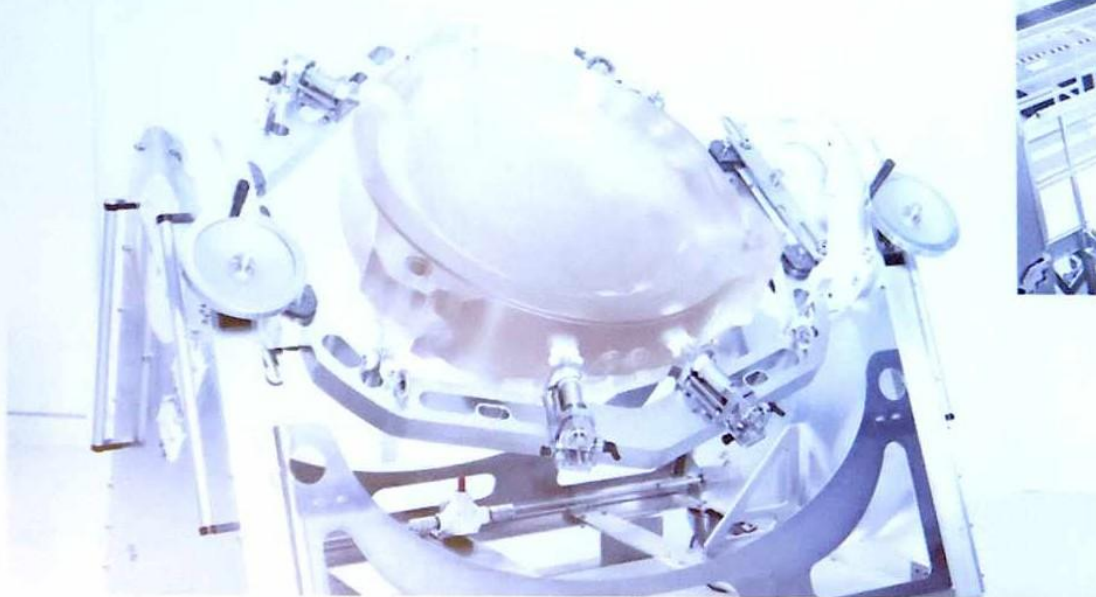
NA 0.55 erfordert vollständige Automatisierung, ultrapräzise Metrologie im Vakuum und Passekorrektur auf atomarer Ebene

Spiegeldimensionen signifikant erhöht

~ 1 m Durchmesser

> 100 kg Rohmasse

Keine manuelle Handhabung möglich, was **vollständige Automatisierung** erfordert



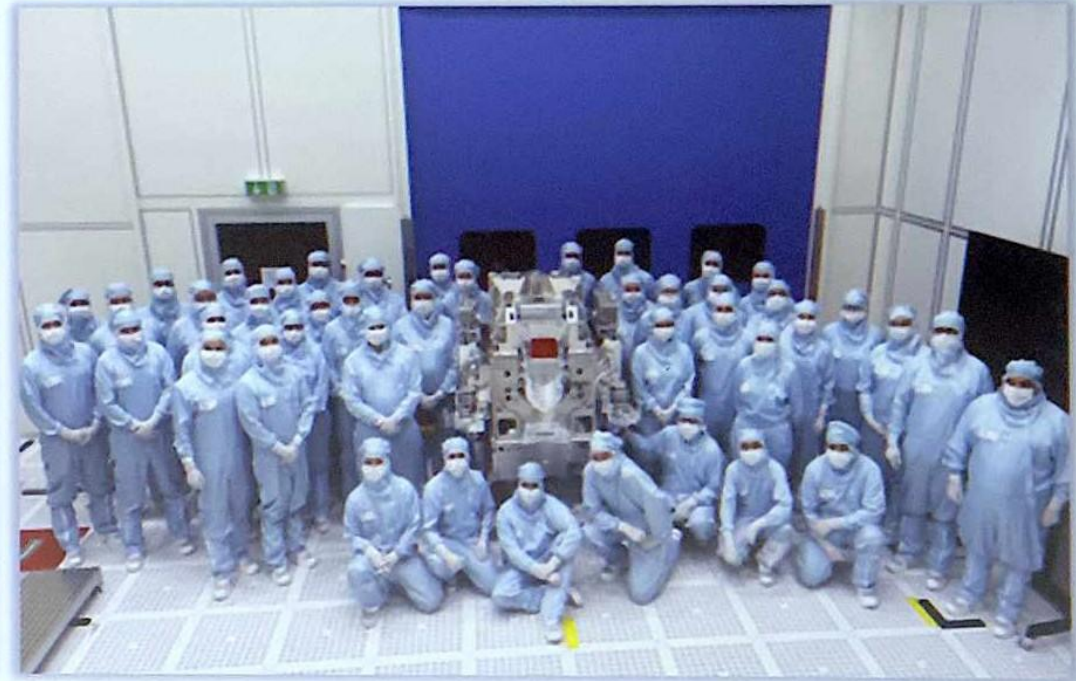
Gleichzeitig werden die Genauigkeitsanforderungen immer strenger und erfordern **Sub-Nanometer-Genauigkeit in jeder Dekade über 7 Größenordnungen** lateraler Abmessung!

Starlith® 3600: ~150 systems delivered
Starlith® 3800: ~100 systems delivered

First Starlith® 3600 delivery (fall 2020)



First Starlith® 3800 delivery (end 2022)



- In total **>300 EUV systems** with 0.33 NA delivered to ASML, at high and robust performance.
- More to come due to strong market pull.

Im Gegensatz zu transparenten Masken bei DUV, funktionieren EUV-Masken wie Spiegel, da EUV-Licht von fast allen Materialien absorbiert wird.

Basismaterial: *Low Thermal Expansion Material* (LTEM, wie z.B. Titandotiertes Quarzglas)

Multilayer-Beschichtung: 40 bis 50 dünne, alternierende Schichten aus Molybdän (Mo) und Silizium (Si)

Extreme Ebenheit und Defektfreiheit: Oberflächenrauheit rms < 0,1 bis 0,2 nm. Phasendefekte < 0,1/cm²

Absorberschicht: Strukturierte Absorberschicht „schluckt“ das Licht in den Bereichen, in denen keine Strukturen auf den Wafer projiziert werden sollen.

Was sind typische Absorbermaterialien?



Der aktuelle Industriestandard: Tantal-basierte Materialien

Tantalverbindungen als amorphe Legierungen für ultra-glatte Kanten beim Ätzen (reines Ta kristallisiert)

TaBN: Am häufigsten genutzt wegen Stabilität bei Reinigungsprozessen und präziser Trockenätzung

TaN / TaON: als Antireflexionsschicht (ARC) für tiefes Ultraviolettlicht (DUV) oben auf dem Absorber verwendet.

Der Nachteil: Tantal absorbiert EUV-Licht relativ schwach → Schicht muss recht dick sein (**ca. 60 bis 70 nm**)
→ bei schräg einfallendem EUV-Licht störender Schatten ("Mask 3D Effects").

Die nächste Generation: "Low-n"- und High-k-Absorber

Abschattungseffekt minimieren → stärker absorbieren (High-k) oder Phase des Lichts verschieben (Low-n) → Absorber **viel dünner (unter 30-40 nm)**

Ru-Legierungen (z. B. Ru-Ta, Ru-Cr): "Low-n"-Kandidat. Herausforderung: Schutzschicht besteht aus Ru → selektive Ätzen erschwert.

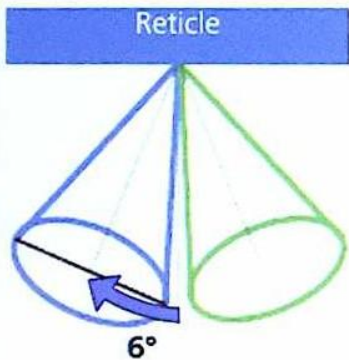
Ni oder Co: Nach Silber höchste EUV-Absorption. Herausforderung: Chemische Beständigkeit bei Maskenreinigung.

Cr-Sb-Verbindungen: Balance aus hohem Kontrast und guter Ätzbarkeit.

NA 0.55 EUV: Anamorphic design to limit angles at reticle and deliver high contrast

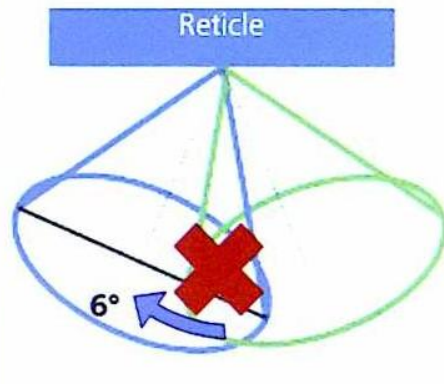
0.33 NA design

Current 0.33NA design
(4x/4x demagnification)



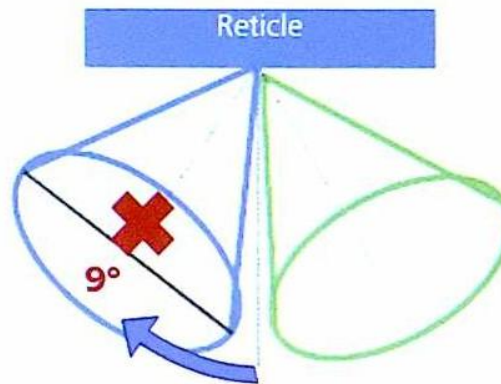
Potential NA 0.55 designs

NA 0.55 design: do as 0.33NA



NOK: overlap between incoming and outgoing light cones

NA 0.55 design: increase angle

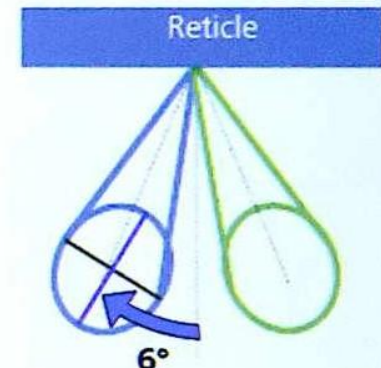


NOK: large shadowing at mask



NA 0.55 solution

NA 0.55 design
(4x/8x demagnification)



OK: good imaging as for 0.33 NA

- absorber shadowing at mask is angular dependent
- Inacceptable contrast loss for system with $\beta_{\text{scan}} = 1/4$

Solution: Anamorphic lens design
4x reduction in non-scan direction
8x reduction in scan direction

EUV NA 0.55 – first system shipped to end customer in 2023



ILLU #1: 31.03.2023



POB #1: 11.07.2023

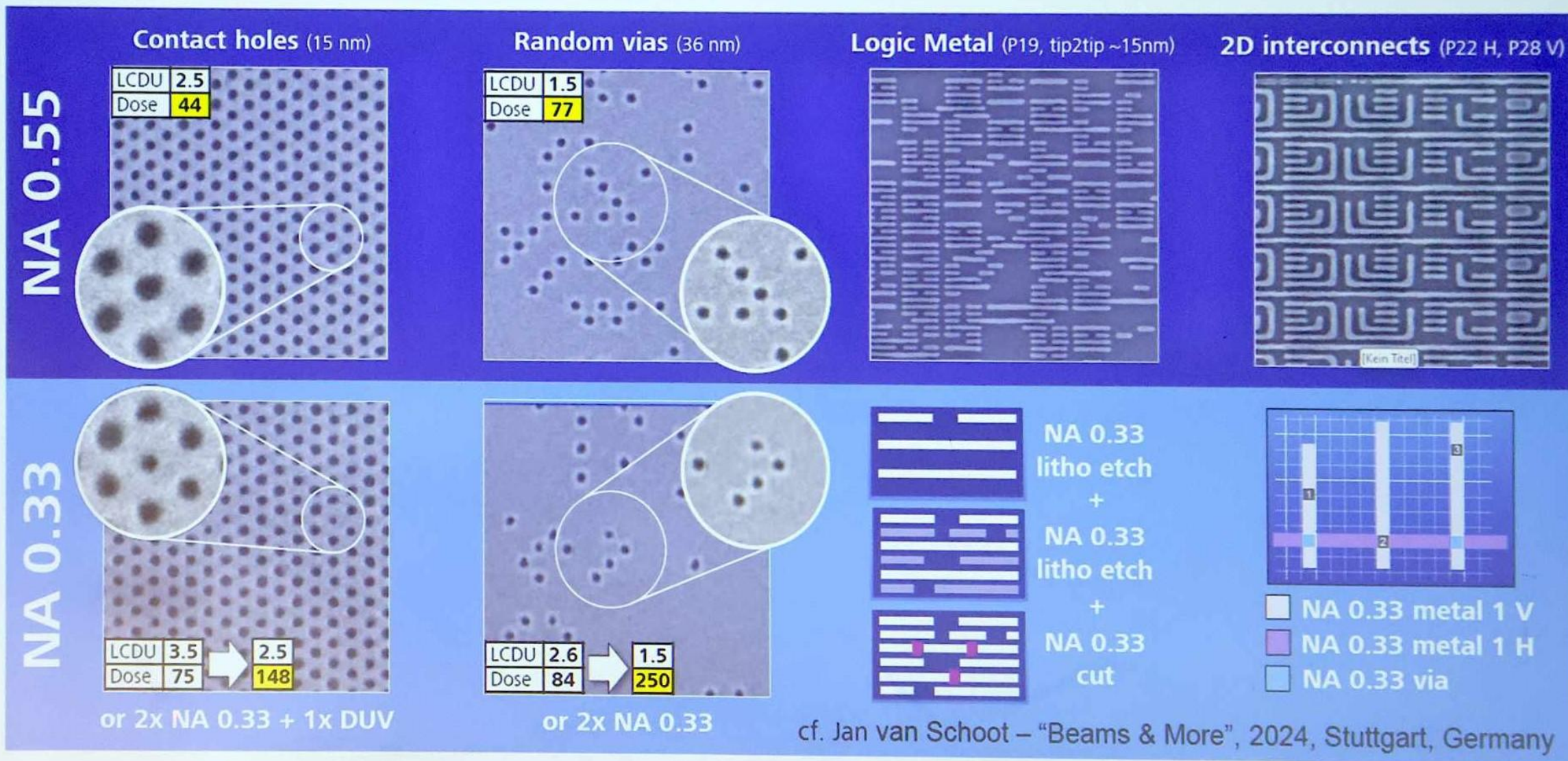


1st shipment ex ASML:
21.12.2023



Arrival at intel January 2024

First NA 0.55 systems show excellent imaging results at single exposure



NA 0.55 optics continuously improve performance

The next step for EUV technology



NA 0.55 Illuminators

- Allow a variety of illumination settings
- Will support even higher EUV source powers in the future
- Future extension with lower pupil fill ratio under investigation



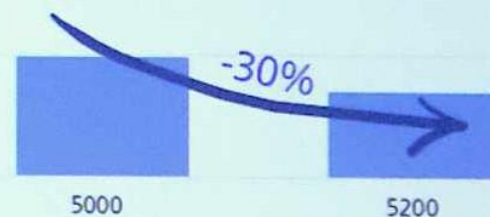
NA 0.55 Projection Optics

- Excellent optical performance
- Performance roadmap already started with good improvement
- Stable serial production population
- Transmission and straylight performance well within specifications

Improved Aberrations (NA0.55 Optics)



Improved Distortion (NA0.55 Optics)



ASML

2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 | 2029 | 2030 | 2031 | 2032 | 2033

0.55 NA
8 nm resolution

EXE:5000
MMO <1.1 nm
110 WpH (AA) | 75 WpH (AB)

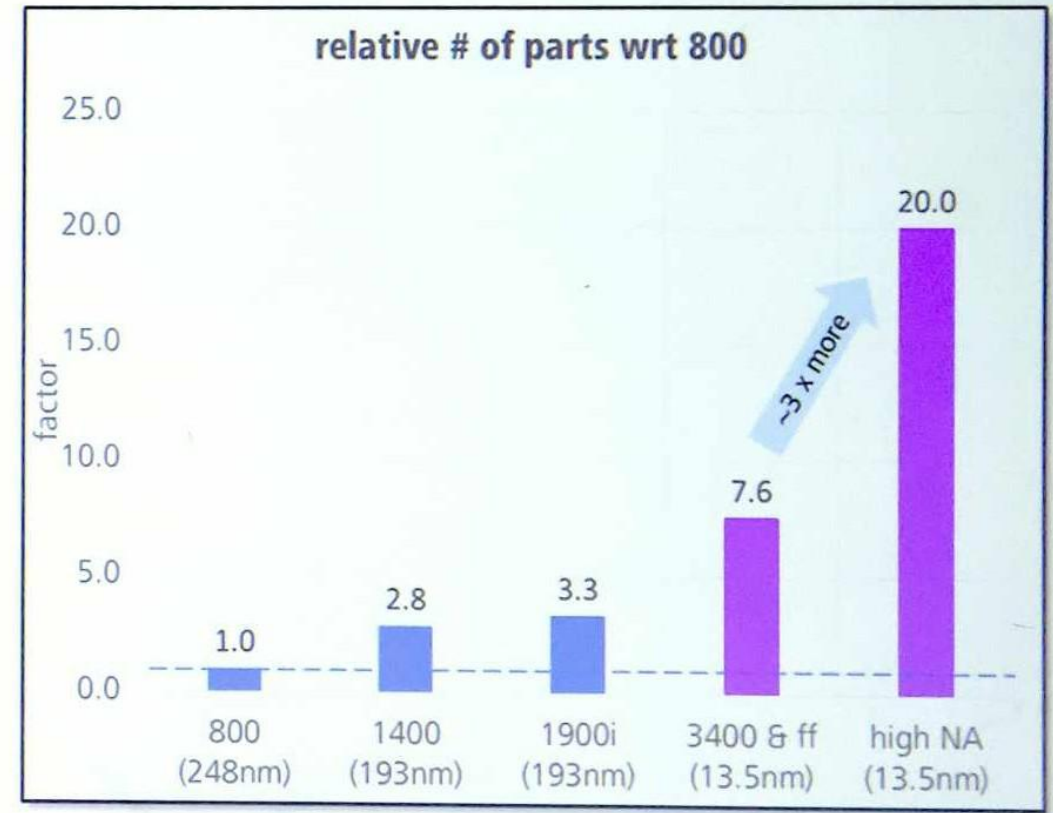
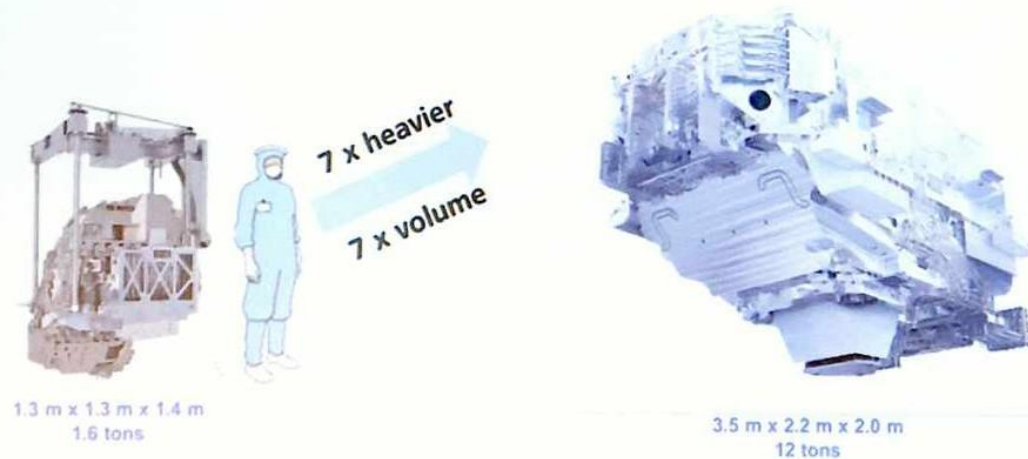
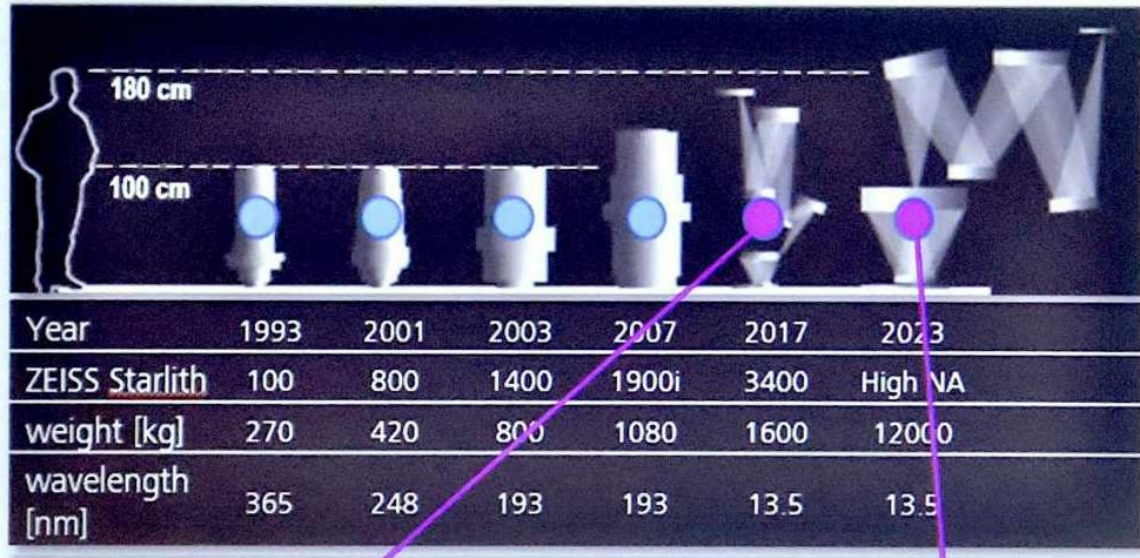
EXE:5200B
MMO <0.8 nm
175 WpH (AA) | 135 WpH (AB)

EXE 5200C
MMO <0.8 nm
190 WpH (AA) | 160 WpH (AB)

EXE:5200D
MMO <0.8 nm
≥ 195 WpH (AA) | ≥ 175 WpH (AB)

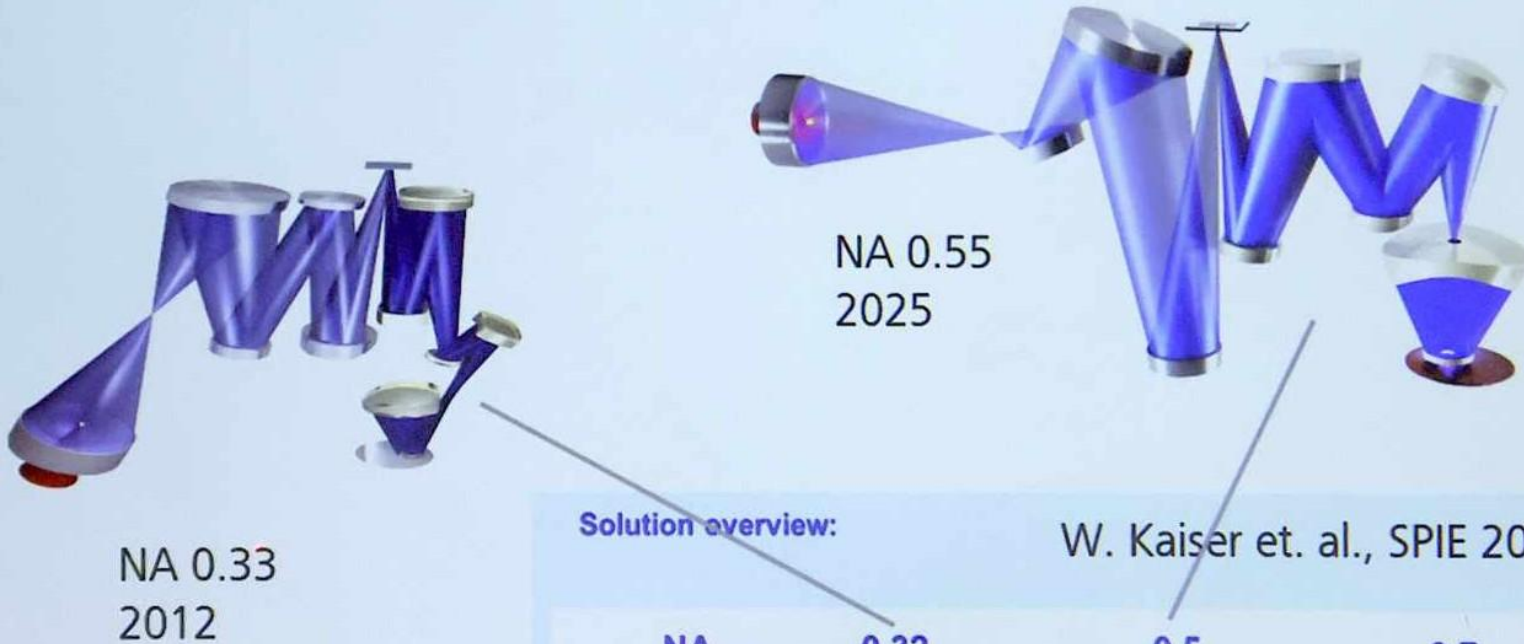
EXE:5400E
MMO <0.7 nm
≥ 210 WpH (AA) | ≥ 180 WpH (AB)

With smaller resolutions complexity & overall optic size increases



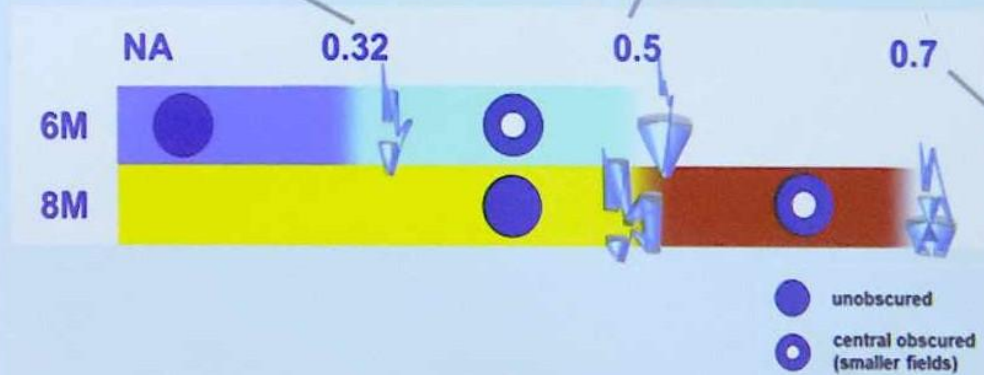
Projection Optics Roadmap towards 2030

Where is the limit of EUV?



Solution overview:

W. Kaiser et. al., SPIE 2008



There are design solutions for high NA systems enabling 11 nm and beyond

What about even higher NA?

- Basic ideas exist
- Many problems still to be solved
- In 2030 we will know...

Carl Zeiss SMT Campus Oberkochen

Continuously ramping up DUV & EUV (NA 0.33 & 0.55) optics production



Photo: Carl Zeiss AG

