

# **Halbleitertechnologie von A bis Z**

Lithografie

|                                                      |   |
|------------------------------------------------------|---|
| <b>Belichten und Belacken</b> .....                  | 3 |
| <i><b>Übersicht</b></i> .....                        | 3 |
| <i><b>Aufbringen eines Haftvermittlers</b></i> ..... | 3 |
| <i><b>Belacken</b></i> .....                         | 4 |
| <i><b>Belichtung</b></i> .....                       | 5 |
| <i><b>Eingesetzte Belichtungsverfahren</b></i> ..... | 7 |
| <i><b>Multipatterning</b></i> .....                  | 9 |

# Belichten und Belacken

---

## Übersicht

In der Halbleiterfertigung werden Strukturen auf Siliciumscheiben mittels lithografischer Verfahren hergestellt. Dabei wird zuerst ein strahlungsempfindlicher Film, meist eine Fotolackschicht, auf dem Wafer aufgebracht, strukturiert und mit Ätzverfahren in die darunter liegende Schicht übertragen.

Die Fototechnik beinhaltet dabei folgende Prozessschritte:

- Aufbringen eines Haftvermittlers und Entfernen von Wasser auf dem Wafer
- Belacken der Wafer
- Stabilisieren der Lackschicht
- Belichten
- Entwickeln des Lackes
- Aushärten des Lackes
- Kontrolle

Bei einigen Prozessen wie der [Ionenimplantation](#), dient der Fotolack als Schutzschicht um bestimmte Bereiche auf dem Wafer von der Implantation auszuschließen. Eine Übertragung der Lackmaske durch einen Ätzprozess findet hier nicht statt.

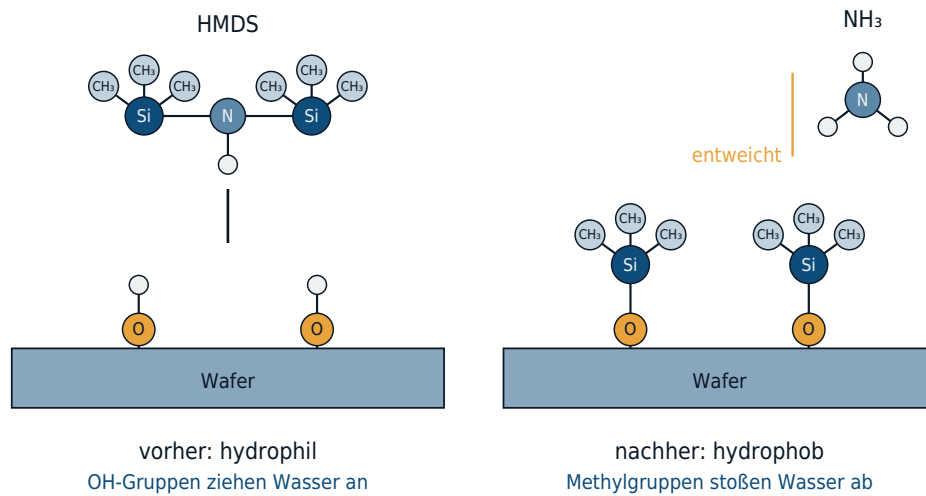
## Aufbringen eines Haftvermittlers

Zu Beginn werden die Wafer gereinigt und ausgeheizt (Pre-Bake) um anhaftende Partikel zu beseitigen und angelagertes Wasser zu entfernen. Die Oberfläche der Wafer ist Wasser anziehend (hydrophil) und muss vor dem Aufbringen der Lackschicht hydrophob, also Wasser abstoßend und somit Lack anziehend gemacht werden. Dazu wird auf den Wafern ein Haftvermittler, meist Hexamethyldisilazan (HMDS), aufgebracht. Die Wafer werden dabei dem Dampf dieser Flüssigkeit ausgesetzt, so dass sich die Scheibenoberflächen damit benetzen.

Durch die Feuchtigkeit in der Umgebungsluft befinden sich auch nach dem Ausheizen immer Wasserstoff H oder Hydroxidionen  $\text{OH}^-$  an der Waferoberfläche. Das HMDS spaltet sich in Trimethylsiliciumgruppen  $\text{Si}(\text{CH}_3)_3$  auf und entfernt den Wasserstoff unter Bildung von Ammoniak  $\text{NH}_3$ .

## Anlagerung von HMDS

Aus der wasseranziehenden Oberfläche wird eine wasserabweisende



● Sauerstoff    ● Silicium    ● Stickstoff    ● Methylgruppe    ○ Wasserstoff

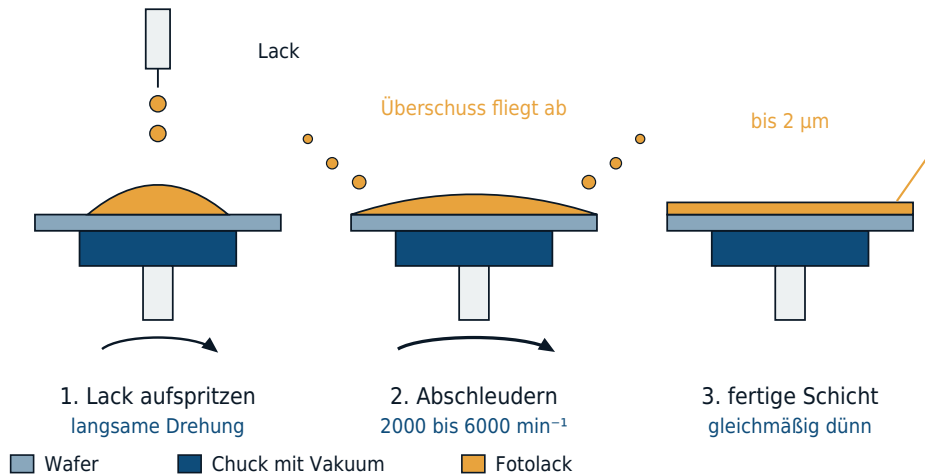
Das HMDS spaltet sich in zwei Trimethylsiliciumgruppen. Jede bindet an ein Sauerstoffatom der Oberfläche und nimmt dessen Wasserstoff mit; zusammen mit dem Stickstoff entsteht daraus Ammoniak.

## Belackten

Die Belackung der Wafer erfolgt durch eine Schleuderbeschichtung auf einem drehbaren Teller mit Vakuumanströmung (Chuck). Bei niedriger Drehzahl wird Lack in der Mitte der Scheibe aufgespritzt und dann bei 2000–6000 Umdrehungen pro Minute durch die Zentrifugalkraft zu einer homogenen Lackschicht auseinander gezogen. Deren Dicke beträgt je nach anschließendem Prozess bis zu 2 µm. Die Dicke hängt dabei von der Drehzahl und der Zähigkeit (Viskosität) des Lackes ab.

### Belacken durch Aufschleudern

Die Zentrifugalkraft zieht den Lacktropfen zu einer dünnen Schicht auseinander



Die Schichtdicke folgt aus Drehzahl und Zähigkeit des Lacks: Je schneller der Teller dreht und je dünnflüssiger der Lack, desto dünner die Schicht.  
Der weitaus größte Teil des aufgespritzten Lacks wird dabei abgeschleudert.

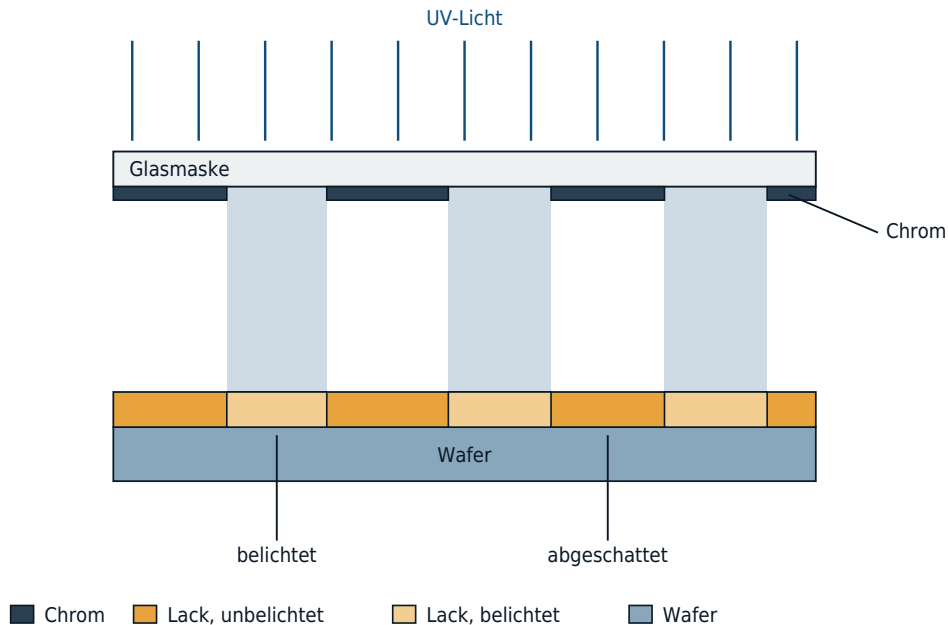
Damit der Lack auf der Scheibe gleichmäßig verfließen kann enthält er Wasser und Lösungsmittel, die ihn weich machen. Zur Stabilisierung der Lackschicht wird der Wafer danach bei ca. 100 °C ausgeheizt (Post-Bake bzw. Soft-Bake). Wasser und Lösungsmittel werden teilweise verdampft, eine Restfeuchtigkeit muss für die Belichtung erhalten bleiben.

Heutzutage kommen auf Grund der geringen Strukturgrößen oft noch weitere Hilfsschichten zum Einsatz, welche entweder vor oder nach dem Fotolack auf dem Wafer aufgebracht werden. Diese Schichten können u. a. als Antireflexschicht oder zur zusätzlichen Planarisierung dienen.

## Belichtung

In einer Belichtungsanlage befindet sich eine Glasmaske die teilweise mit Chrom beschichtet ist, dadurch werden partiell Bereiche des belackten Wafers belichtet und andere abgeschattet.

Belichtung durch eine Maske  
 Wo Chrom auf der Maske liegt, bleibt der Lack unbelichtet



Die Maske trägt das Muster als Chromschicht auf Glas. Beim Entwickeln wird je nach Lacktyp entweder der belichtete oder der unbelichtete Teil abgelöst – zurück bleibt die strukturierte Lackschicht.

Je nach Art des Lackes werden belichtete Teile löslich oder unlöslich. Mit Hilfe einer [Entwicklerlösung](#) werden die löslichen Bereiche entfernt, so dass eine strukturierte Lackschicht erhalten bleibt. Bei klassischem [Positivlack](#) der i-Linie spaltet sich ein Stickstoffmolekül  $N_2$  durch das energiereiche UV-Licht ab. Zurück bleibt ein Keto-Karben, das sich aus energetischen Gründen zu Keten ( $CH_2=C=O$ ) umwandelt. Unter Aufnahme von Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft bildet sich aus dem Keten eine Carbonsäure. Bei 248 nm und darunter wird dieser Mechanismus durch chemisch verstärkte Lacke ersetzt, die eine Photosäure freisetzen (siehe [Fotolack](#)).

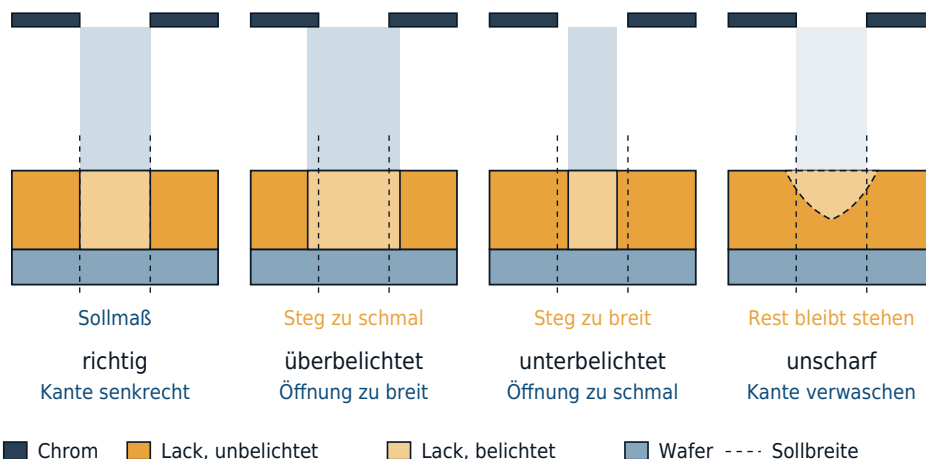
Die Belichtungszeit ist sehr wichtig damit die Strukturen die exakte Größe erhalten. Je länger die Scheibe den Strahlen der Belichtungsanlage ausgesetzt wird, desto größer werden dabei die belichteten Bereiche. Eine exakte Bestimmung der korrekten Belichtungsdauer zum Erreichen der vorgegebenen Strukturbreiten mit einem oder mehreren Testwafern (Vorläufern) ist notwendig, da sich der Lack je nach Umgebungstemperatur auch unterschiedlich verhalten kann.

Bei einer Überbelichtung werden Lackstege und damit die darunter liegenden Strukturen zu klein, Kontaktlöcher werden zu groß. Bei einer zu kurzen Belichtungszeit sind die Kontaktlöcher nicht geöffnet, Leiterbahnen sind zu breit und stehen unter Umständen miteinander in Kontakt. Zudem führt eine

schlechte Fokussierung zu unbelichteten Bereichen, so dass Kontaktlöcher bei der Entwicklung später nicht freigelegt werden und zwischen Leiterbahnen Verbindungen bestehen bleiben, die zu Kurzschlüssen führen.

#### Belichtungsprofile

Belichtungszeit und Fokus entscheiden über die Breite der Struktur



Je länger belichtet wird, desto breiter der belichtete Bereich: Lackstege werden schmaler, Kontaktlöcher größer. Bei zu kurzer Belichtung oder schlechtem Fokus bleibt am Boden Lack stehen und das Kontaktloch öffnet nicht.

Je nach nachfolgendem Prozess muss das Lackmaß, also die Breite der Lackstege oder die Größe der Kontaktlöcher angepasst werden. Bei isotropen Ätzungen (die Ätzung geschieht sowohl in vertikaler als auch horizontaler Richtung) wird die Maskierung nicht 1:1 in die zu strukturierende Schicht übertragen.

### Eingesetzte Belichtungsverfahren

Zur Belichtung werden je nach Anforderung energiereiche Strahlen wie UV-Licht, Röntgenstrahlung, Elektronenstrahlen und Ionenstrahlen eingesetzt. Dabei gilt: Je kürzer die Wellenlänge der Strahlung, desto kleiner sind auch die erreichbaren Strukturbreiten. Den Zusammenhang beschreibt das Rayleigh-Kriterium:

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

Dabei ist  $\lambda$  die Belichtungswellenlänge,  $NA$  die numerische Apertur des Objektivs und  $k_1$  ein Prozessfaktor, der die Beleuchtungsart, die Maskentechnik und den Fotolack zusammenfasst. Die Schärfentiefe nimmt dabei mit dem Quadrat der Apertur ab:

$$DOF = k_2 \cdot \frac{\lambda}{NA^2}$$

Jede Verbesserung der Auflösung wird also mit einem kleineren Fokusfenster bezahlt – deshalb sind planare Waferoberflächen (siehe [CMP](#)) eine Voraussetzung für feine Strukturen.

## Die Wellenlängen im Überblick

| Wellenlänge      | Quelle                          | Einsatz                                                                                             |
|------------------|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 436 nm (g-Linie) | Quecksilberdampfampe            | historisch; die i-Linie wird für unkritische Ebenen, Leistungshalbleiter und MEMS weiterhin genutzt |
| 365 nm (i-Linie) |                                 |                                                                                                     |
| 248 nm           | Kryptonfluorid-Excimerlaser     | größere Ebenen, Analog- und Leistungstechnik                                                        |
| 193 nm           | Argonfluorid-Excimerlaser       | Arbeitspferd der Fertigung, trocken und als Immersionsbelichtung                                    |
| 13,5 nm (EUV)    | Zinn-Plasma, mit Laser gezündet | kritische Ebenen aller führenden Logik- und Speicherprozesse                                        |

Ursprünglich war als Zwischenschritt auch der Fluorlaser mit 157 nm geplant. Er erwies sich als nicht praktikabel, da die dafür nötigen Calciumfluoridlinsen Feuchtigkeit aus der Luft aufnehmen; zudem wäre eine Immersionsbelichtung mit Wasser nicht möglich, weil Wasser Licht dieser Wellenlänge absorbiert.

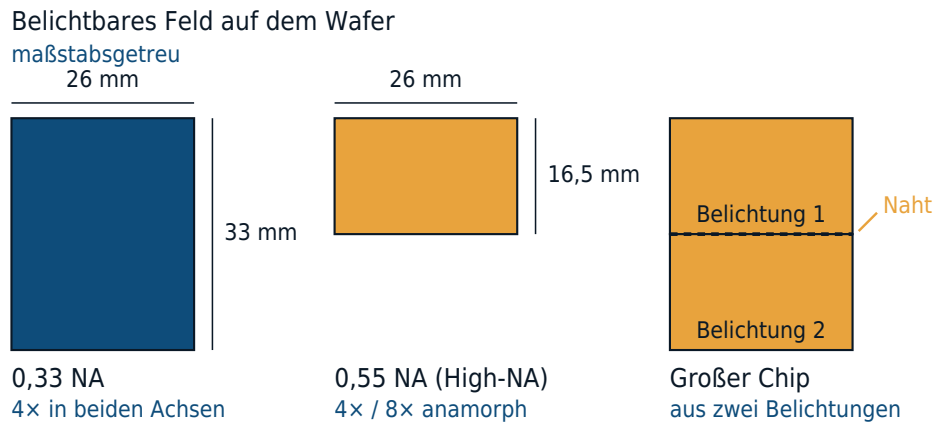
## Immersionsbelichtung

Statt die Wellenlänge weiter zu verkürzen, lässt sich die numerische Apertur erhöhen. Dazu wird der Spalt zwischen letzter Linse und Wafer mit hochreinem Wasser gefüllt, dessen Brechungsindex bei 193 nm etwa 1,44 beträgt. Damit sind Aperturen bis 1,35 möglich, gegenüber rund 0,93 in Luft. Eine einzelne Immersionsbelichtung löst dabei Strukturen bis etwa 38 nm Halbperiode auf – das ist die physikalische Grenze dieser Technik. Feinere Strukturen entstehen mit 193 nm nur noch, indem man ein Muster auf mehrere Belichtungen aufteilt (siehe [Multipatterning](#)).

## EUV-Lithografie

Der Sprung auf extremes Ultraviolett mit 13,5 nm ist seit 2019 in der Serienfertigung. Die Strahlung entsteht, indem Zinntröpfchen von einem Hochleistungslaser zu einem Plasma verdampft werden; da EUV von Luft und von jedem Glas absorbiert wird, arbeitet die gesamte Anlage im Vakuum und bildet ausschließlich über Spiegel ab. Die heutige Anlagengeneration mit einer Apertur von 0,33 erreicht in einer Belichtung etwa 13 nm Halbperiode und ersetzt damit an vielen Ebenen zwei oder mehr Immersionsschritte.

## Belichtbares Feld bei 0,33 NA und 0,55 NA



Seit 2024 kommt die High-NA-Generation mit einer Apertur von 0,55 hinzu, die etwa 8 nm Halbperiode auflöst. Der Preis dafür ist eine anamorphe Optik: Das Bild wird in einer Richtung um den Faktor 4, in der anderen um den Faktor 8 verkleinert, wodurch sich das belichtbare Feld auf  $26 \times 16,5$  mm halbiert. Große Chips müssen deshalb aus zwei aneinandergesetzten Belichtungen entstehen. Im Juli 2026 wurden erstmals High-NA-belichtete Ebenen in einem Serienprodukt qualifiziert; der breite Einsatz wird für 2027 und 2028 erwartet.

## Weitere Verfahren

Röntgen- und Ionenstrahlen haben die Fertigung nie erreicht und sind der Forschung vorbehalten. Elektronenstrahlschreiber sind dagegen unverzichtbar – nicht zur Belichtung der Wafer, sondern zur Herstellung der **Fotomasken**.

## Multipatterning

Eine einzelne Immersionsbelichtung mit 193 nm löst Strukturen bis etwa 38 nm Halbperiode auf. Als die Bauelemente diese Grenze unterschritten, bevor die **EUV-Lithografie** verfügbar war, blieb nur ein Weg: Das Muster wird auf mehrere Belichtungs- und Ätzschritte verteilt, die jeder einzeln innerhalb der Auflösungsgrenze liegen. Zusammen ergeben sie ein feineres Muster, als eine Belichtung erzeugen könnte.

## Mehrfachbelichtung mit zwei Masken (LELE)

Beim Litho-Etch-Litho-Etch-Verfahren wird das Zielmuster in zwei Teilmuster zerlegt, die jeweils den doppelten Strukturabstand haben. Das erste wird belichtet und geätzt, danach folgt ein zweiter kompletter Durchlauf, dessen Strukturen genau in die Lücken des ersten fallen.

Der Nachteil liegt in der Justierung: Die Lage der zweiten Ebene zur ersten geht

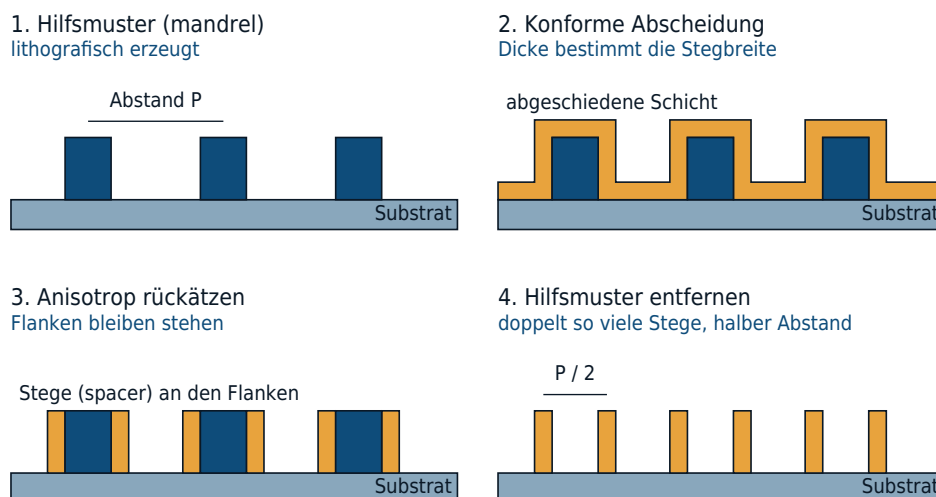
direkt in die Strukturbreite ein. Jeder Justierfehler erscheint als abwechselnd zu breiter und zu schmaler Abstand – ein systematischer Fehler, der die Bauelemente ungleichmäßig macht. Mit drei oder vier Durchläufen (LELELE und weiter) wächst dieses Problem, ebenso die Zahl der Prozessschritte und damit die Kosten.

## Selbstjustierende Verdopplung (SADP)

Das selbstjustierende Verfahren umgeht das Justierproblem, indem die feinen Strukturen nicht belichtet, sondern abgeschieden werden:

- Ein Hilfsmuster (mandrel) wird mit normaler Auflösung lithografisch erzeugt.
- Darüber wird konform eine dünne Schicht abgeschieden, üblicherweise per [Atomlagenabscheidung](#). Ihre Dicke bestimmt die späteren Strukturbreiten – und sie ist sehr viel genauer einstellbar als eine Belichtung.
- Ein anisotroper Ätzschritt entfernt die Schicht auf den waagerechten Flächen und lässt an den Flanken des Hilfsmusters Stege stehen (spacer).
- Das Hilfsmuster wird selektiv entfernt. Zurück bleiben doppelt so viele Stege, wie das Hilfsmuster Strukturen hatte.

### Ablauf der selbstjustierenden Verdopplung



Da die Stege durch das Hilfsmuster selbst positioniert werden, gibt es zwischen ihnen keinen Justierfehler. Wiederholt man das Verfahren, entstehen vier Strukturen pro ursprünglicher (SAQP). Der Preis: Es entstehen immer geschlossene Ringe um das Hilfsmuster, und die Struktur ist zwangsläufig regelmäßig. Beides muss mit zusätzlichen Masken korrigiert werden, die unerwünschte Abschnitte gezielt durchtrennen (cut mask) oder Enden definieren. Das Verfahren eignet sich deshalb für dichte, regelmäßige Muster –

Leitbahnen, Gate-Reihen, Speicherzellenfelder – und nicht für beliebige Layouts.

## Bedeutung heute

Multipatterning ist keine Übergangslösung geblieben. Auch mit EUV wird es weiter eingesetzt, nur an anderer Stelle: Wo EUV die kritischen Ebenen in einer Belichtung schafft, entfällt die Aufteilung; wo Strukturen unterhalb der EUV-Auflösung liegen, wird sie erneut nötig. Zugleich hat sich der Entwurf dauerhaft verändert. Layouts folgen heute strengen Regeln mit einheitlichen Rastern und einheitlichen Vorzugsrichtungen, weil nur solche Muster überhaupt zerlegbar sind – die Lithografie schreibt dem Schaltungsentwurf ihre Beschränkungen vor.