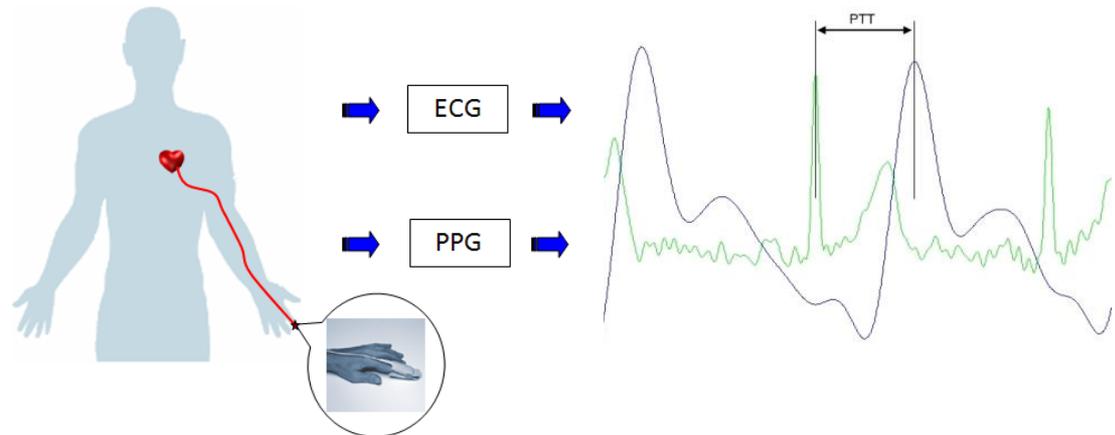


Vorlesung Mikrosystemtechnik Teil 4: Schichtstrukturierung

Stefan Hey

Institut für Technik der Informationsverarbeitung



Gliederung

- Reinraumtechnik
- Mikrostrukturtechnik
 - Vertikalstrukturierung
 - Schichtumwandlung
 - Schichtabscheideverfahren
 - PVD Verfahren
 - Aufdampf
 - Sputtern
 - Pulsed Laser Deposition
 - CVD Verfahren
 - Prinzip und Prozesse
 - Vor- und Nachteile
 - Epitaxie
 - Barrel Reaktoren
 - Gas Reaktoren

Gliederung

- Schichtstrukturierung (Ätzen)
 - Einführung, Begriffe und Anwendungsbeispiele
 - Nassätzen
 - Tauchätzen
 - Sprühätzen
 - Trockenätzen
 - **BE: Barrel Etching** = Barrel- Ätzen
 - **PE: Plasma Etching** = Plasmaätzen
 - **RIE: Reaktive Ion Etching** = Reaktives Ionenätzen
 - **RIBE: Reaktive Ion Beam Etching** = Reaktives Ionenstrahlätzen
 - **IE: Ion Etching** = Sputterätzen
 - **IBE: Ion Beam Etching** = Ionenstrahlätzen
- Ätzstoppverfahren

REINRAUMTECHNIK

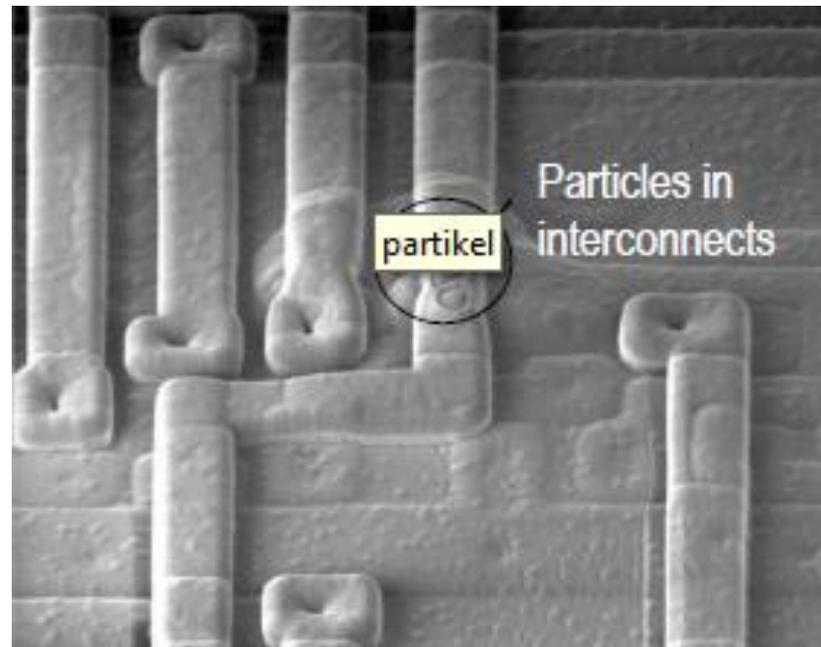
Reinräume



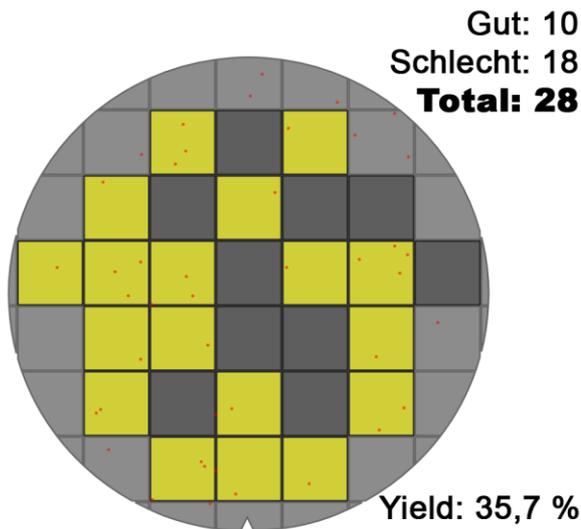
Quelle: www.gmp-monitoring.com

Reinräume, Notwendigkeit

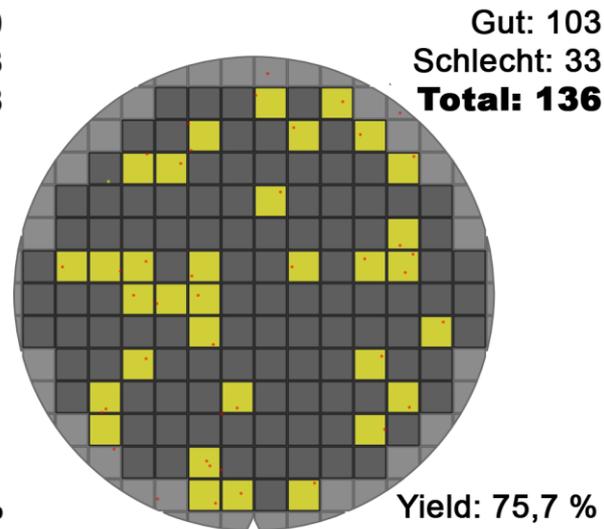
- Verunreinigungen im Wafer führen zu Schäden in den Bauelementen
- Tödliche Partikel ($> \frac{1}{2}$ Strukturgröße) \Rightarrow Sofortausfall
- Störende Partikel ($> \frac{1}{5}$ Strukturgröße) \Rightarrow Spätausfall
- Ein Bauelement (IC, Mikrosystem) kann durch ein Partikel unbrauchbar werden



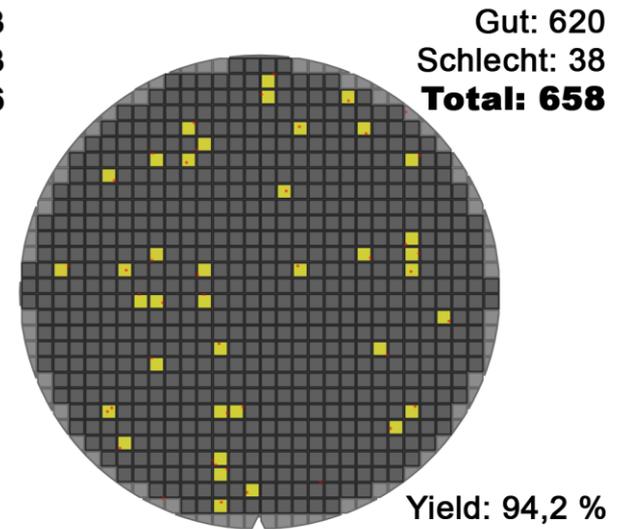
Wafer Ausbeute



Die-Größe: 40 mm x 40 mm



Die-Größe: 20 mm x 20 mm



Die-Größe: 10 mm x 10 mm

- Herstellkosten 200 mm Wafer ca. 850 € (2008)
- Für erforderliche Ausbeute können die Reinraumbedingungen berechnet werden

Quelle: Taiwan Semiconductor Manufacturing Company, Limited (TSMC)

Anforderungen an Reinraum

Year	1997	1999	2001	2003	2006	2009	2012
min. feature	250 nm	180 nm	150 nm	130 nm	100 nm	70 nm	50 nm
Memory							
Intro DRAM	256 Mb	1Gb	1Gb	4Gb	16 Gb	64 Gb	256 Gb
Production	64 Mb	256 Mb	1Gb	1Gb	4Gb	16 Gb	64 Gb
chip size (Intro-2.shrink)	280 - 100	400 - 140	445 - 160	560 - 200	790 - 280	1120- 390	1580-550
wafer size	200 mm	300 mm	300 mm	300 mm	300 mm	450 mm	450 mm
Requirements for surface preparation							
critical partical size	125 nm	90 nm	75 nm	65 nm	50 nm	35 nm	25 nm
critical area	0.16 cm ²	0.32 cm ²	0.50 cm ²	0.68 cm ²	1.60 cm ²	3.14 cm ²	6.40 cm ²
critical metals 1	5*10 ⁹ /cm ²	4*10 ⁹ /cm ²	3*10 ⁹ /cm ²	2*10 ⁹ /cm ²	1*10 ⁹	<10 ⁹ /cm ²	<10 ⁹ /cm ²
critical metals 2	5*10 ¹⁰	2.5*10 ¹⁰	2*10 ¹⁰	1.5*10 ¹⁰	1*10 ¹⁰	5*10 ⁹	2*10 ⁹
organics	1*10 ¹⁴	7*10 ¹³	6*10 ¹³	5*10 ¹³	3.5*10 ¹³	2.5*10 ¹³	1.8*10 ¹³
oxide residue	1*10 ¹⁴	7*10 ¹³	6*10 ¹³	5*10 ¹³	3.5*10 ¹³	2.5*10 ¹³	1.8*10 ¹³

Anforderungen für den wafer bei 99% Yield

Tödliche 1/2-Größe

kritische Fläche

Vergleiche Beispiel Schweißtropfen

Quelle: National Technology Roadmap, Semiconductor Industry Association (SIA) 1997

Year	1997	1999	2001	2003	2006	2009	2012
min. feature	250 nm	180 nm	150	130 nm	100 nm	70 nm	50 nm
Intro DRAM	256 Mb	1Gb	1Gb	4Gb	16 Gb	64 Gb	256 Gb
air							
max particles/m ³	27	12	8	5	2	1	1
litho: bases [ppb]	1	1	1	1	1	1	1
gate: metals [ppt]	0.7	0.3	0.3	0.2	0.1	0.07	0.05
gate: organics [ppt]	300	200	200	100	100	70	50
contact: acid/base	10/80	10/40	10/30	10/20	10/10	10/4	10/1
Ultra-pure water							
oxidizable C [ppb]	10	7	5	4	3	2	1
bacteria per liter	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
crit.particles/ ml	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2
anion, cation, metal	< 25 ppt	< 20	< 15	< 10	< 5	< 1	< 1
Liquid Chemicals							
crit.particles/ ml	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
HF, NH ₄ OH, Fe, Cu	< 500 ppt	< 250	< 200	< 150	< 100	< 50	< 50
Gases							
crit.particle per liter	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
other gases [ppt]	100	100	100	100	100	100	100

Anforderungen an die Umgebung für 99% yield auf dem wafer

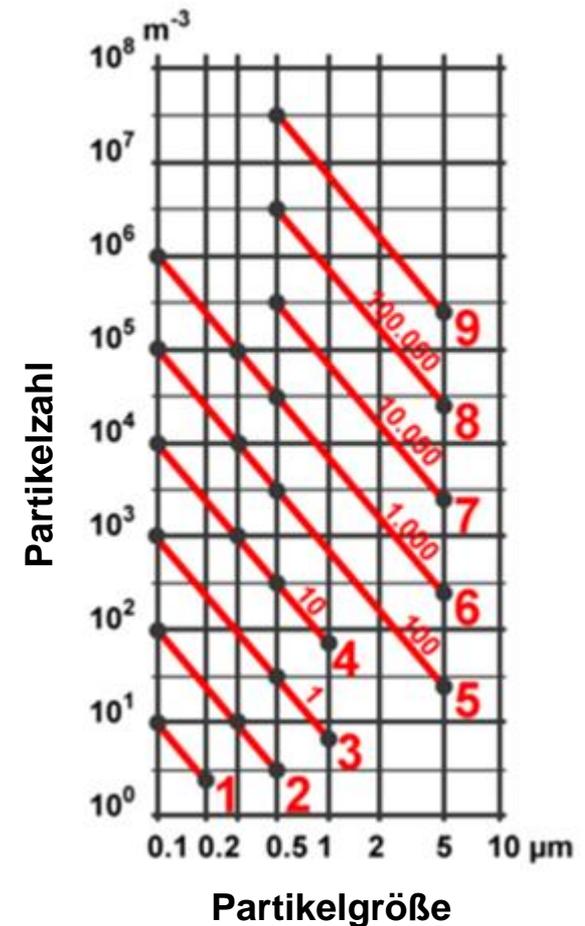
z.B. ein paar Virusteilchen/ m³ Luft !

Reinraumklassen

- Anforderungen an Reinräume werden in verschiedene Klassen unterteilt
- Anforderungen wachsen mit kleineren Strukturgrößen

ISO-Klassifizierungsanzahl	Höchstwert der Partikelkonzentration (je m ³) nach ISO 14644-1					
	0,1 µm	0,2 µm	0,3 µm	0,5 µm	1 µm	5 µm
ISO-Klasse 1	10	2	-	-	-	-
ISO-Klasse 2	100	24	10	4	-	-
ISO-Klasse 3	1.000	237	102	35	8	-
ISO-Klasse 4	10.000	2.370	1.020	352	83	-
ISO-Klasse 5	100.000	23.700	10.200	3.520	832	28
ISO-Klasse 6	1.000.000	237.000	102.000	35.200	8.320	293
ISO-Klasse 7	-	-	-	352.000	83.200	2.930
ISO-Klasse 8	-	-	-	3.520.000	832.000	29.300
ISO-Klasse 9	-	-	-	35.200.000	8.320.000	293.000

Quelle: www.schiller-gruppe.de



Schmutzquellen im Reinraum

- Im Reinraum selbst entstehen Schmutzpartikel
- Quellen für Verunreinigungen im Reinraum

Art der Verunreinigung	Quelle	verursachtes Problem
Staub	Menschen, Luft, Abrieb von Anlagen	Abschattung während der Lithographie
Molekular	Öl, alter Photolack	Haftung
Ionisch	Hautkontakt, Salz, Wasser	elektrisch wirksam
Atomar	Schwermetalle aus Abrieb und Ätzen	elektrisch wirksam

- Verunreinigungen müssen vermieden werden
- Unvermeidbare Verunreinigungen müssen entfernt werden

Reinraumkleidung

- Der Mensch ist der größte Schmutzquelle im Reinraum (1,8 qm Hautoberfläche, die sich in 5-7 Tagen vollständig erneuert)
- Partikelemission: ca. 1.000.000 / min im Sitzen
- Spezielle Bekleidung verringert Verschmutzung durch Menschen
- Bekleidung in Reinräumen:
 - Einteiliger Overall aus partikelundurchlässigem Gewebe (z.B. Polyester)
 - Spezielle Reinraumschuhe
 - Haube
- Möglichst langsame und möglichst wenige kontrollierte Bewegungen



Reinraum, Aufbau

Die theoretischen Anforderungen an die "idealen" Prozeßatmosphären werden durch **Reinräume** verwirklicht

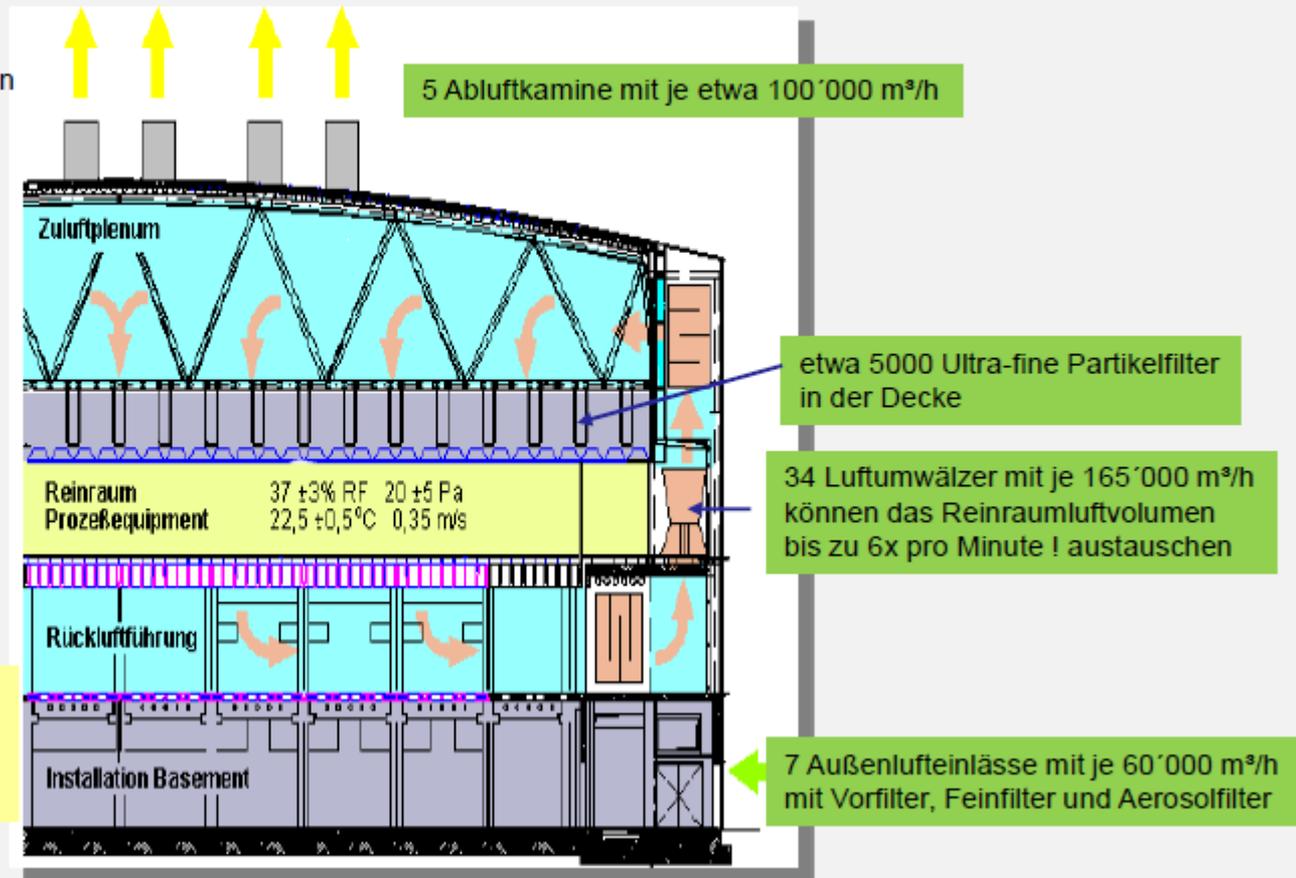
Beispiel:
Der Reinraum einer modernen Halbleiter-Fabrik hat eine Grundfläche von ~ 5000 m² und ist von 4 Stockwerken Luftaufbereitung umgeben.

Anforderung an die Konstanz der Umgebungsbedingungen:

Temperatur: 22,5 °C ± 0,5°C
Feuchte : 37 % ± 3%

Kosten der Reinraumtechnik:

Baukosten: ~ 50 Mill. €
Anlagenkosten: ~ 250 Mill. €
Betriebskosten: ~ 10 Mill. € / Jahr
(+ 1'500 Mill. € Prozeßgeräte)



Quelle: Universität der Bundeswehr, München

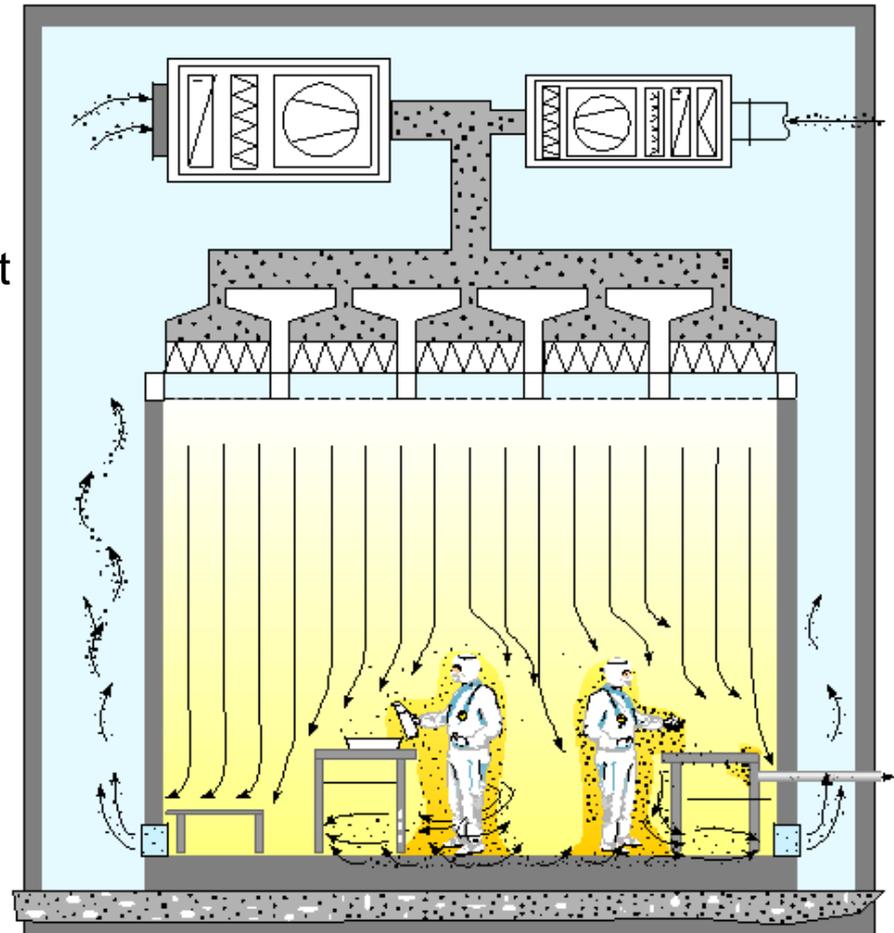
Laminar Flow

- Laminare Verdrängungsströmung:
 - Die partikelbelastete Luft wird von der partikelarmen Luft verdrängt abgeführt.
 - Strömungsgeschwindigkeit wird mit ca. 0.45 ± 0.05 m/s hoch gewählt

- ➔ Sehr guter Reinraum möglich

- ➔ Sehr kostenintensiv

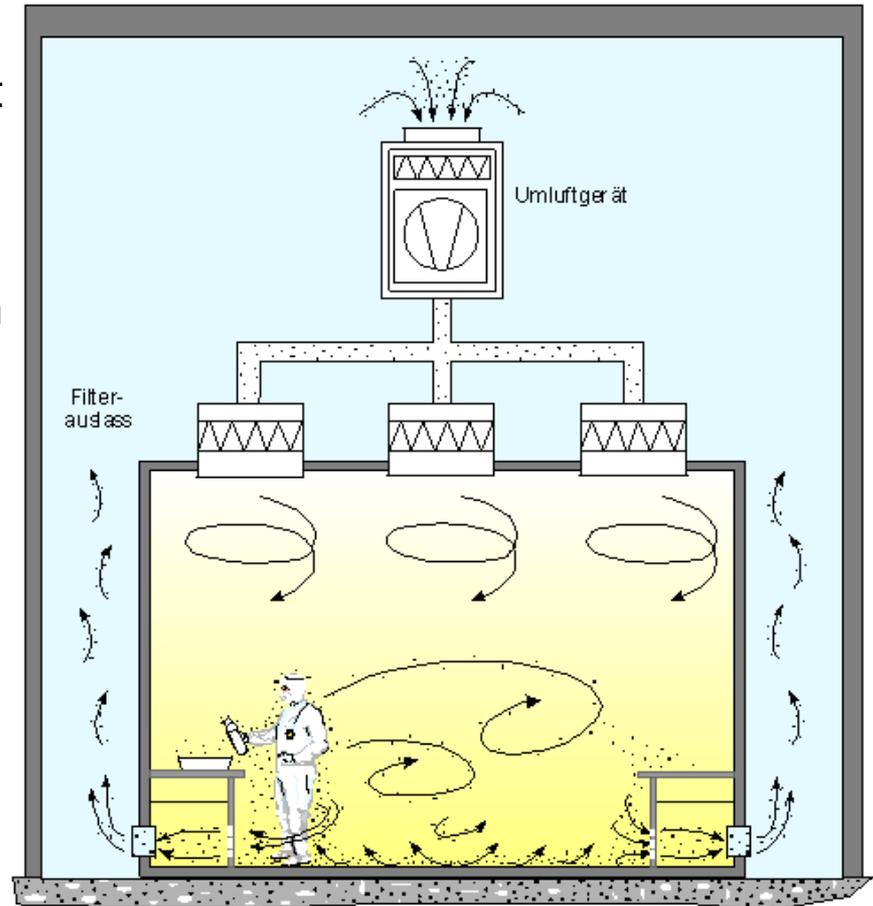
- Austausch der Luft alle 10 s



Quelle: Rudolf Simon, M+W Group GmbH

Turbulent Flow

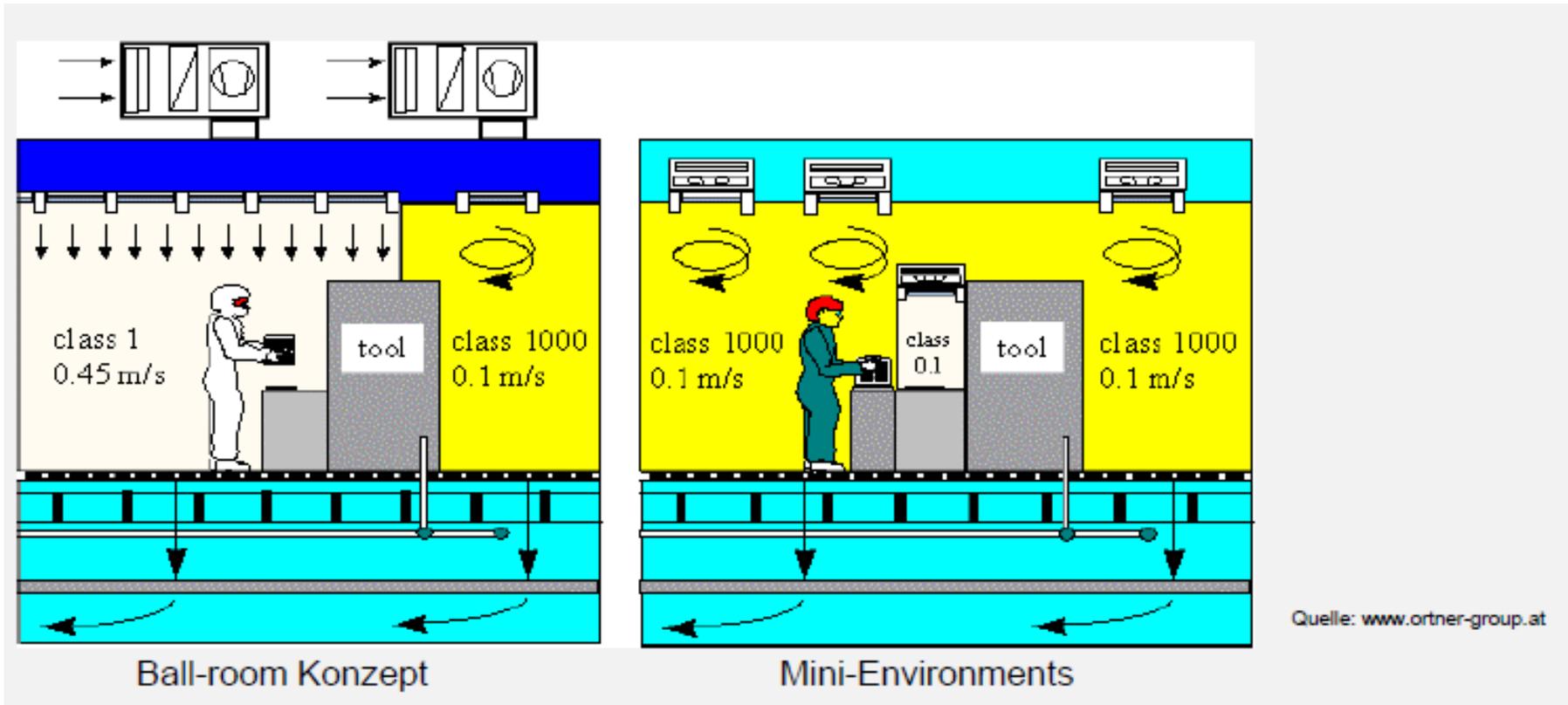
- Turbulente Mischströmung:
 - Partikelbelastete Luft wird mit partikelarmer Luft verdünnt
 - Die Luft wird reiner
 - Die verdünnte Luft wird durch einen gelochten Boden abgeführt
- ➔ Verweildauer der partikelbelasteten Luft ist größer → Reinraumklasse ist schlechter
- ➔ Preiswerter als Laminar Flow



Quelle: Rudolf Simon, M+W Group GmbH

Mini Environments

- Reinhaltung der Arbeitsbereiche der Wafer
- Mehr Automatisierung notwendig



Reinraum am KIT

- Gesamtfläche 500 m²
- Gelblichtreinraum am IMT (Campus Nord)
- Beschichtung von Substraten mit verschiedenen Resisten
- Strukturierung durch Lithographie
 - Optisch
 - Elektronenstrahl-Lithographie
 - Röntgentiefen-Lithographie (ANKA)

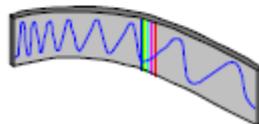


Anforderungen an Reinheit von Chemikalien

Fig. 2 *Development of Chemical Product Specifications*

High Purity Hydrofluoric acid

Year	Number of check parameters	Impurity level (metals)	Application history
1950	7	5 - 100 ppm	Laborator use
1968	9	5 - 10 ppm	Laboratory use
1970	30	1 - 10 ppm	Electronic Grade
1978	40	10 - 500 ppb	MOS Grade
1981	40-50	10 - 50 ppb	VLSI Grade
1990	50 +	10 ppb	ULSI Grade
1996	50 +	1 ppb	SLSI Grade
1998	50 +	100 ppt	XLSI Grade



Milestones in analytical instrumentation:
 Multi element AAS, ICP-OES, ICP-MS, HR-ICP-MS

From the First Transistor to the Global Information Society in 50 Years

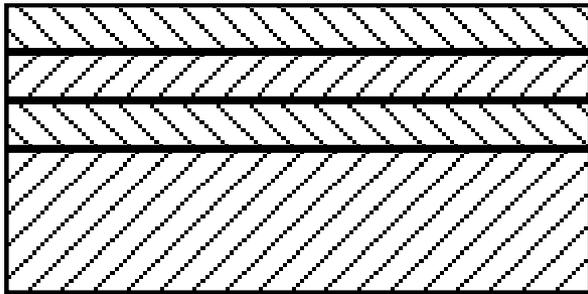
Quelle: Sievert Consulting

Reinstwasser

- Bedarf: 5.000 l / Wafer
- Fabrik mit 1000 Wafern => 5 Mio. l / Tag
- Entspricht dem Verbrauch einer Stadt mit 30.000 Einwohnern
- Reinigung durch
 - Grobfilter
 - Umkehrosmose (Membranfilter)
 - Ionentauscher (Austausch von H^+ und OH^- gegen gelöste Ionen)
 - UV-Bestrahlung (Abtöten von Mikroorganismen, damit diese sich nicht vermehren => neue Partikel)
 - Mikrofilter

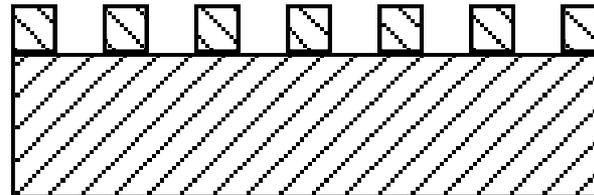
MIKROSTRUKTURTECHNIK

Vertikalstruktur



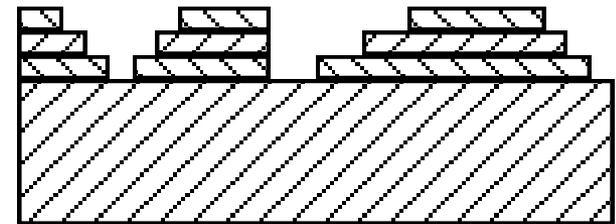
Schichtaufbau

Lateralstruktur

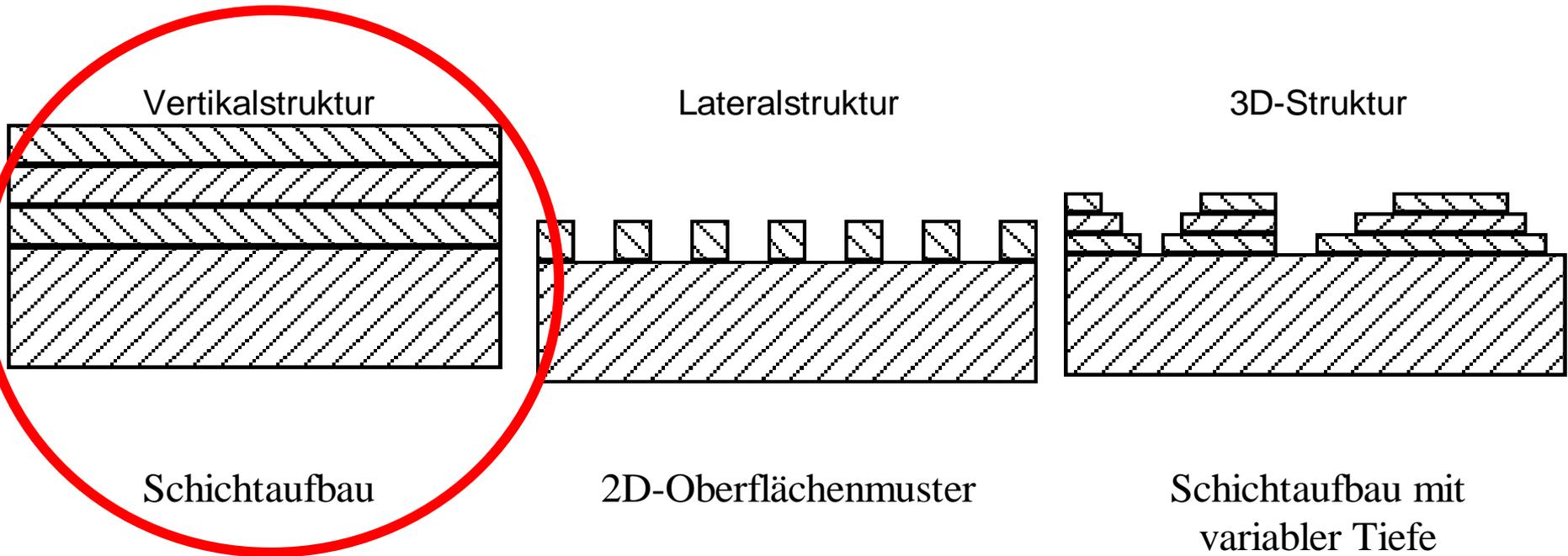


2D-Oberflächenmuster

3D-Struktur

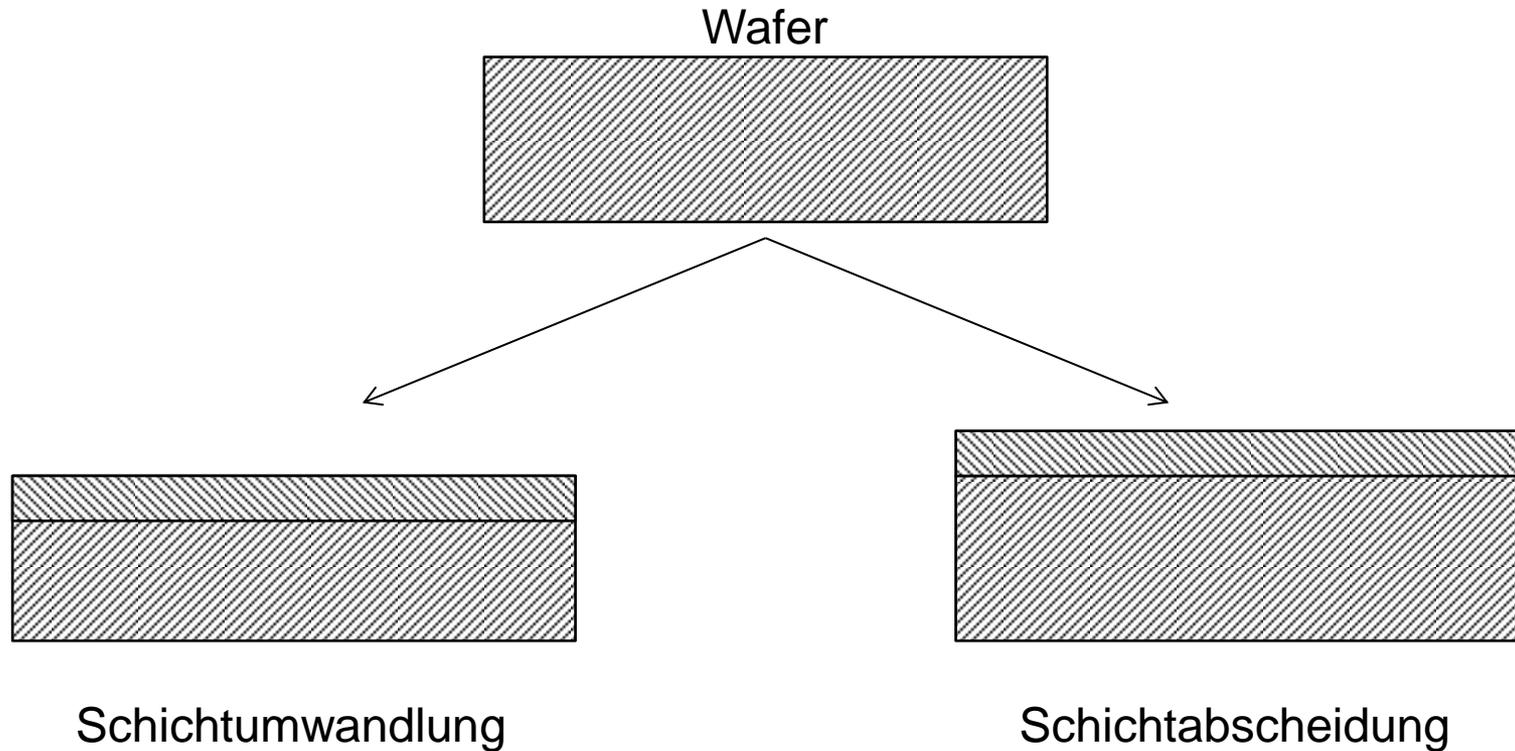


Schichtaufbau mit
variabler Tiefe



VERTIKALSTRUKTURIERUNG

Vertikalstrukturierung



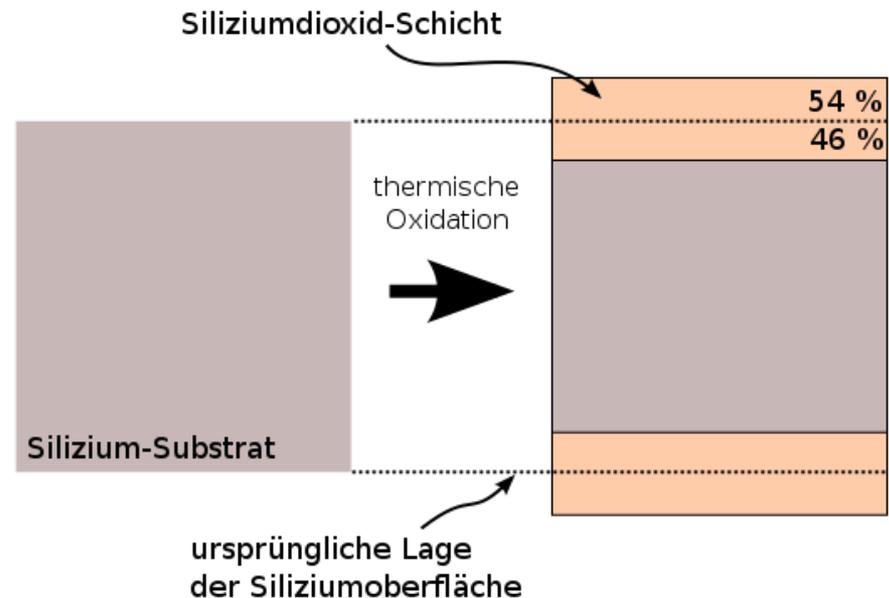
SCHICHTUMWANDLUNG

Schichtumwandlung

- Erzeugung der Schicht durch chemische Umwandlung der Oberfläche
- Thermische Oxidation von Si
 - Trockene Oxidation mit Sauerstoff
 - Nasse Oxidation mit Wasserdampf
- Diffusion
 - Diffusion mit erschöpflichen Quellen
 - Diffusion mit unerschöpflichen Quellen
- Ionenimplantation

Schichtumwandlung

- Thermische Oxidation von Si
 - **Trockene Oxidation mit Sauerstoff:**
 - Sehr dünne Oxidschichten
 - Hohe Qualität
 - Langsam
 - **Nasse Oxidation mit Wasserdampf:**
 - Dickere Schichten in gleicher Zeit
- Verwendung für
 - Passivierungsschichten
 - Maskierungsschichten
 - Isolierschichten
 - Haftvermittlungsschichten
 - Dielektrische Schichten



Schichtumwandlung

■ Diffusion

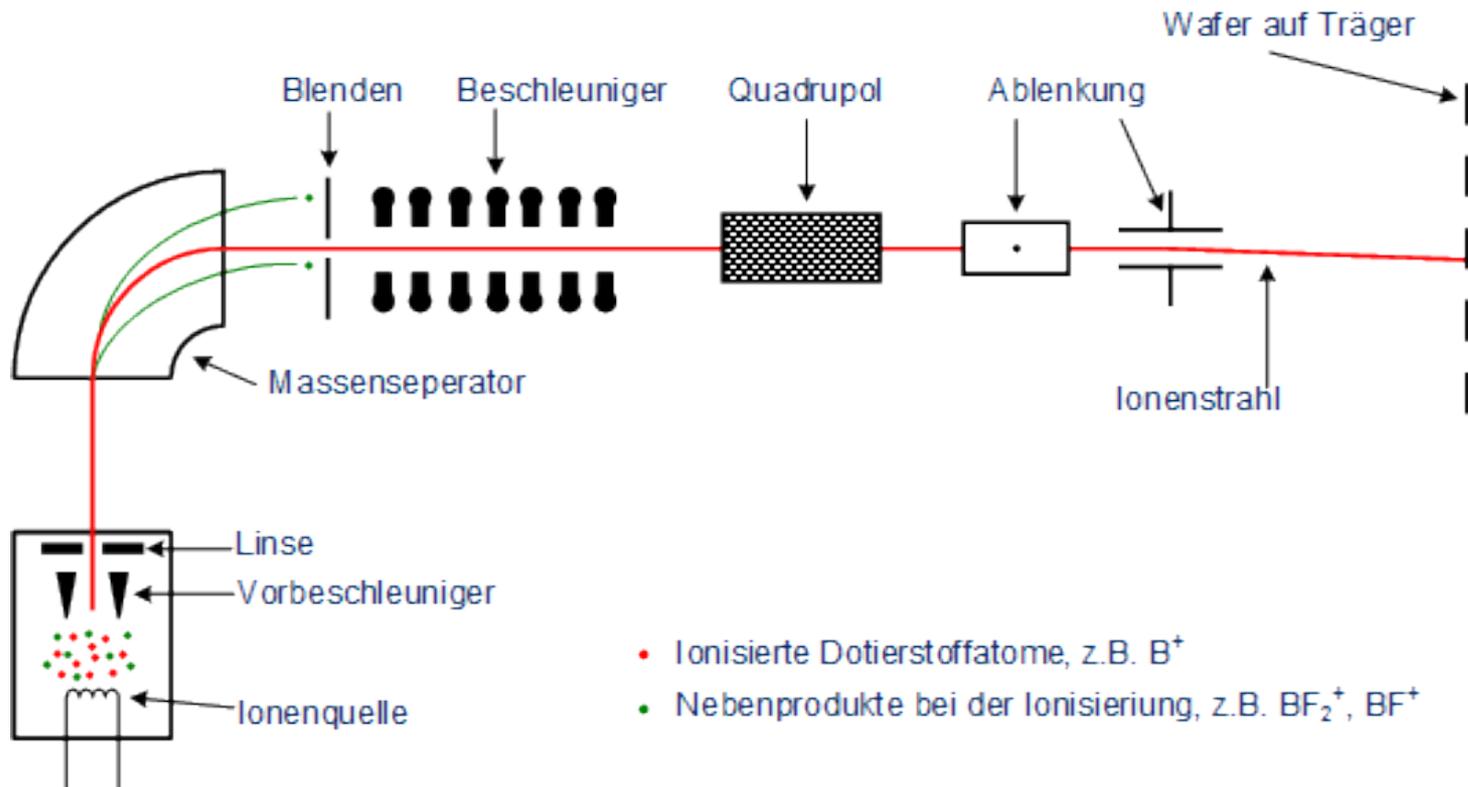
- Zur Herstellung von Dotierschichten mittels Fremdatomen (Bor, Phosphor)
- Anteil: 10^{-7} – 10^{-3} Fremdatome
- Diffusionsstoffe müssen durch die Schicht wandern
- **Diffusion mit erschöpflichen Quellen:**
 - Zuvor aufgebrauchte dotierte Schichten
- **Diffusion mit unerschöpflichen Quellen:**
 - Dotieratome kommen aus der umgebenden Atmosphäre

Schichtumwandlung

- Ionenimplantation
 - Dotieratome werden beschleunigt auf den Wafer geschossen
 - Für präzise und niedrige Dotierungen, spezielle Profile möglich
 - Anlagen sehr teuer
 - Tempern (erhitzen) notwendig, um Dotieratome von Zwischengitterplätzen in die Gitterstruktur einzubauen
 - Verschmutzung des Wafers durch Sputtereffekte aus der Anlage

Ionenimplantation für die lokale Schichtmodifikation

Prinzip einer Ionenimplantationsanlage



SCHICHTABSCHNEID- VERFAHREN

Vertikalstrukturierung (Schichtaufbau)

- Physikalische Beschichtung (Physical Vapor Deposition PVD)
- Chemische Beschichtung (Chemical Vapor Deposition CVD)

- Mit diesen Verfahren sind Schichtdicken im Bereich 0,1nm – 1000nm herstellbar

- Funktionen:

Leitfähigkeitsschichten (Metallschichten)	Isolationsschichten
Schutzschichten	Opferschichten
Haftschichten	Antihafschichten
Reflexionsschichten	Antireflexionsschichten

Schichtabscheideverfahren

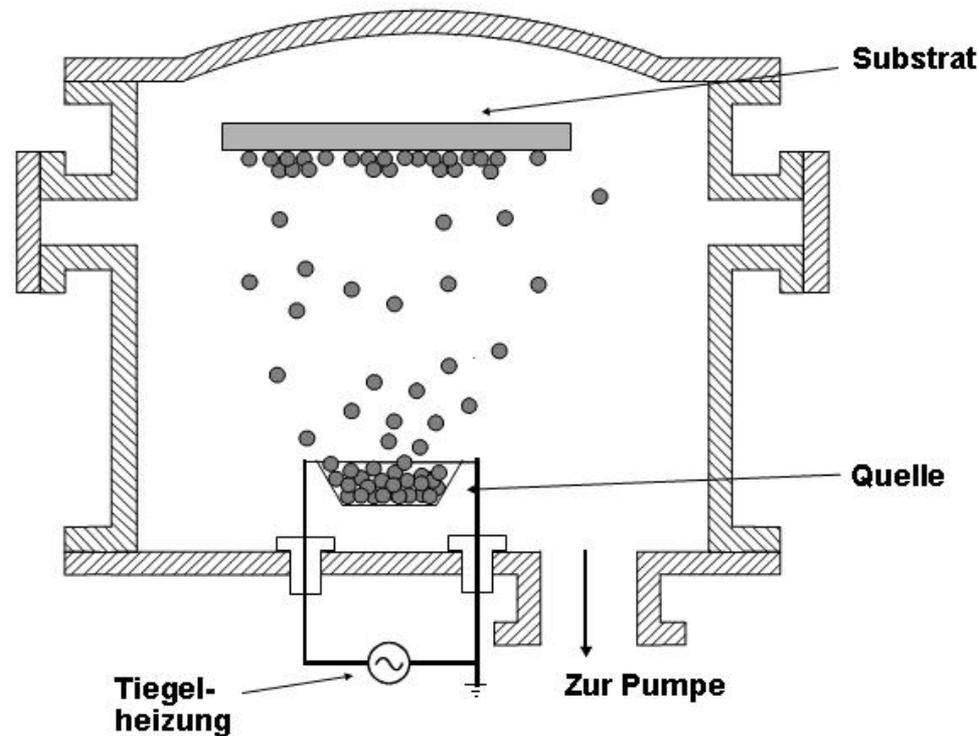
- Aus der Gasphase
 - Physical Vapor Deposition (PVD)
 - Aufdampfen
 - Sputtern
 - MBE Molekular-Strahlepitaxie
 - Laserablation Pulsed Laser Deposition (PLD)
 - ...
 - Chemical Vapor Deposition (CVD)
 - Normal Pressure CVD (NPCVD)
 - Atmospheric Pressure CVD (APCVD)
 - Low Pressure CVD (LPCVD)
 - Plasma Enhanced CVD (PECVD)
 - Metal-organic CVD (MOCVD)
 - ...

Schichtabscheidungsverfahren

- Aus der Flüssigphase
 - Liquid Phase Deposition (LPD)
 - Flüssigphasenepitaxie
 - Schmelzen
 - Spin-on-Methoden (SOG Spin-on-Glass, SOD Spin-on-Dielectric)
 - ...
 - Chemical Solution Deposition (CSD)
 - Sol-Gel-Verfahren
 - Metal-organic-Deposition (MOD)
 - Elektrochemische Deposition (Elektroplating)
 - Stromlose Abscheidung (Electroless Plating)

PVD-Verfahren (Aufdampfen)

- PVD ist das älteste Beschichtungsverfahren, das vielfach eingesetzt wird

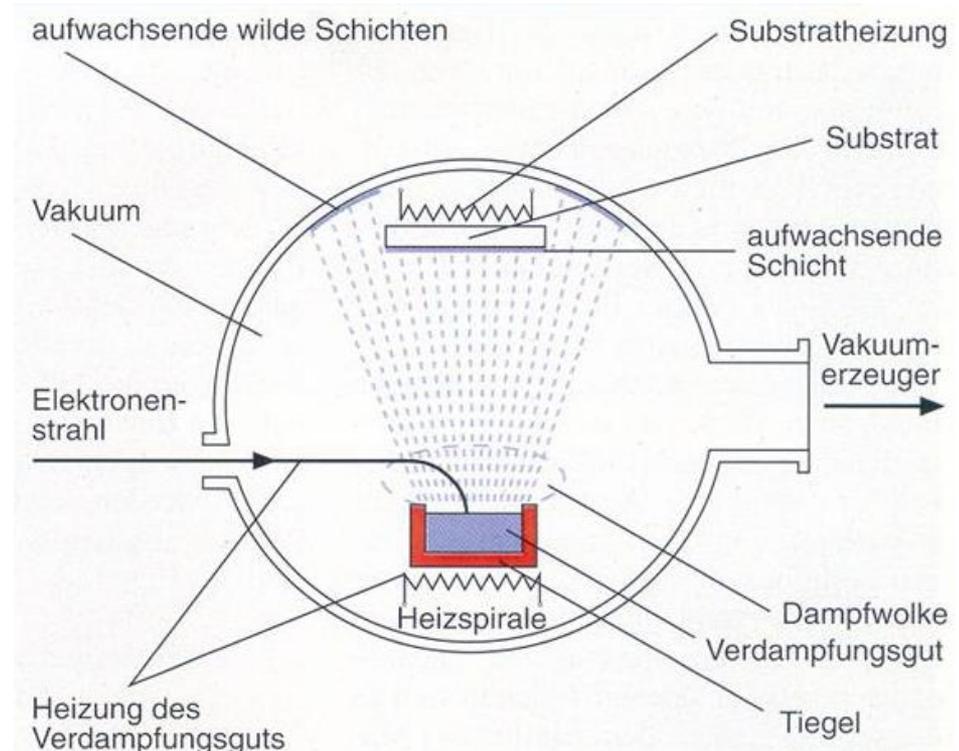


Schema des Aufdampfprozesses

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

Aufdampfanlage

- In einer Aufdampfanlage wird mit Wärme das Material in einem Hochvakuum ($< 10^{-5}$ mbar) verdampft
- Die Dampfwolke schlägt sich auf der kühleren Waferoberfläche nieder
- Der Druck in der Anlage muss so gewählt werden, dass die Atome ohne Zusammenstöße auf die Substrate gelangen
- Vorteil: Gut beherrschter Prozess
- Nachteil: geringe Schichthaftung

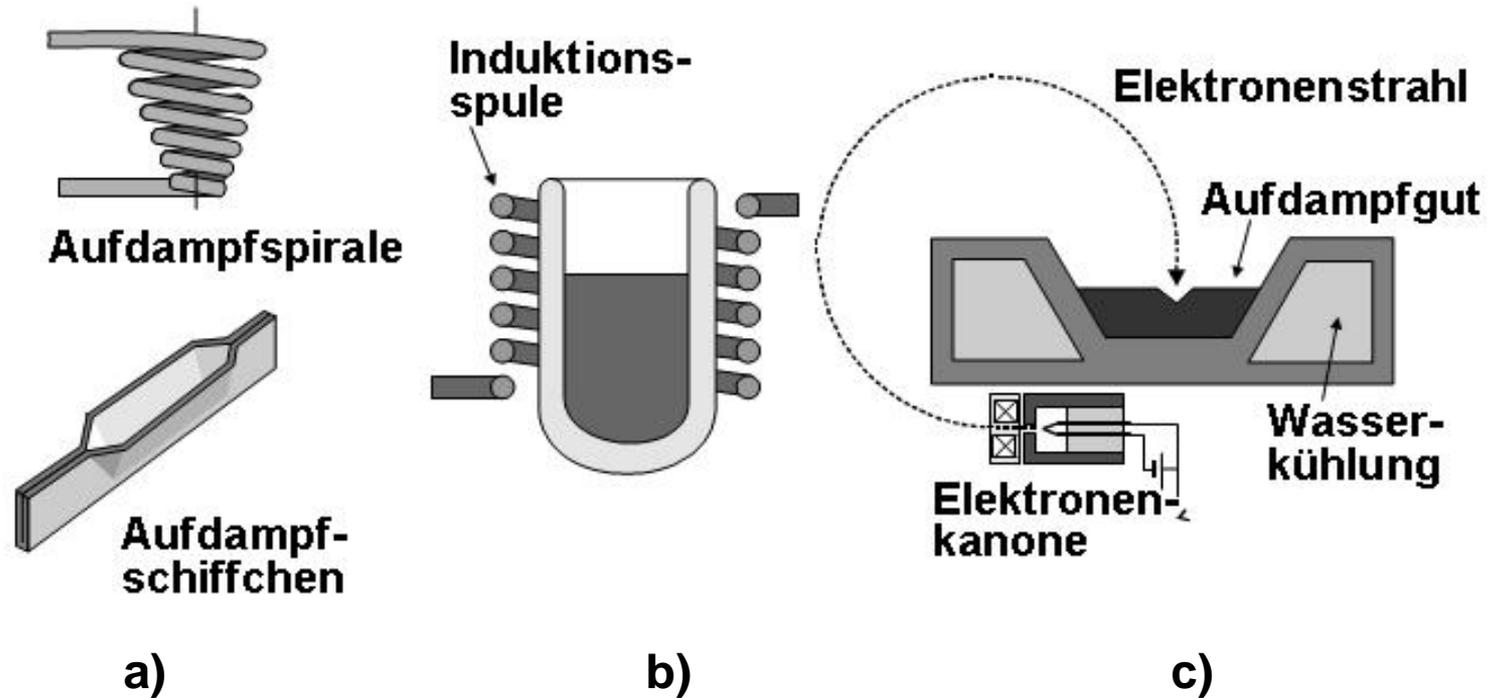


Aufdampfanlage

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

Aufdampfquelle

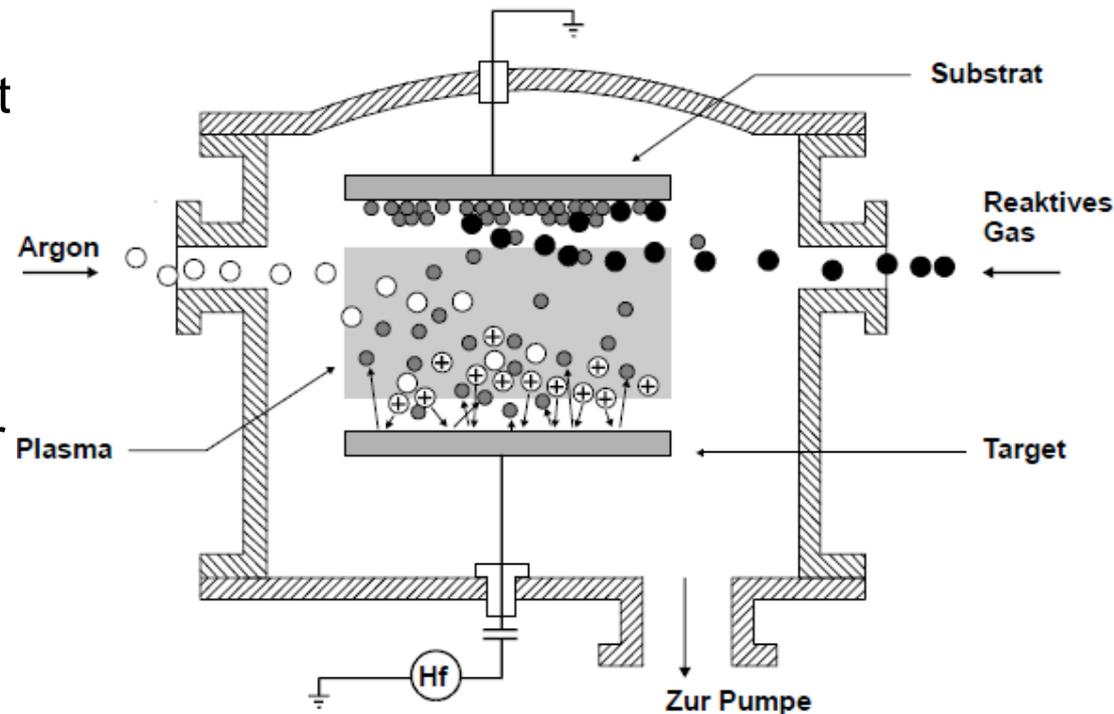
- Direkt beheizte Widerstandsquellen (a)
- Induktiv beheizte Quellen (b)
- Elektronenstrahlverdampfung (c)



Verschiedene Aufdampfquellen

Sputtern (Kathodenzerstäuben)

- Ionenerzeugung im Plasma
- Beschleunigte Ionen schlagen Atome aus Target (Kathode)
- Targetteilchen schlagen sich auf Substrat nieder
- Vorteile: Bessere Haftung wegen größerer kinetischer Energie
- Viele Materialien verwendbar (Metalle, Halbleiter, Keramiken, Gläser, ...)
- Nachteil: geringe Beschichtungsraten



Prinzip des Kathodenzerstäubens oder Sputterns

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

Sputtern gegenüber dem Aufdampfen

■ Vorteile

- Besser kontrollierbar
- Sputtern sehr vieler Materialien möglich
- Ermöglicht integrierte Reinigung des Substrats durch Sputterätzen
- Abgeschiedene Schichten haben immer dieselbe Zusammensetzung wie das Target
- Bessere Kantenabdeckung und höhere Dichte aufgrund höherer Energie einfallender Teilchen

■ Nachteile

- Aufwendigere Anlagentechnik
- Targets sehr teuer
- Mehr Verunreinigungen durch Gaseinschlüsse wegen höheren Prozess-Drücke

Prozessvarianten beim Sputtern

- DC-Sputtern
 - Zwischen Target und Anode liegt eine Gleichspannung
 - Aufladung ist erforderlich
 - Nur für leitfähige Targetmaterialien anwendbar
- AC-Sputtern
 - Es können auch nichtleitende Materialien zerstäubt werden
 - Für Entladung ist geringerer Druck ausreichen
- Reaktives Sputtern
 - Zuführung reaktiver Gase an die Oberfläche der Substrate
 - Abscheidung von chemischen Verbindungen möglich
 - Hauptsächliche Anwendungen sind Oxid(Al_2O_3), Nitride (TiN) und Oxinitride

Prozessvarianten beim Sputtern

■ Bias-Sputtern

- AC-Sputtern mit überlagerter, externer Gleichspannung
- Genaue Kontrolle des Sputterprozesses
- Substratträger wird auf niedrigeres Potenzial als Plasma gelegt

■ Sputterätzen

- Vor dem Start wird die Polarität der Spannung umgedreht und das Substrat abgesputtert
 - Entfernt mehrere Atomlagen der Oberfläche
 - Kontamination wird reduziert
 - Erzeugt zusätzliche Kondensationskeime

■ Magnetron

- Magnetisches Feld erhöht die Ionisierungsrate im Plasma
- Größere Anzahl der Stöße zwischen Elektronen und Prozessgas
- Höhere Abscheideraten bei kleineren Betriebsspannung und geringerem Leistungsumsatz

Aufdampf- und Sputteranlage



Aufdampfanlage



Sputter-Anlage

Bildquelle: <http://www.et.fh-jena.de>

Pulsed Laser Deposition, PLD

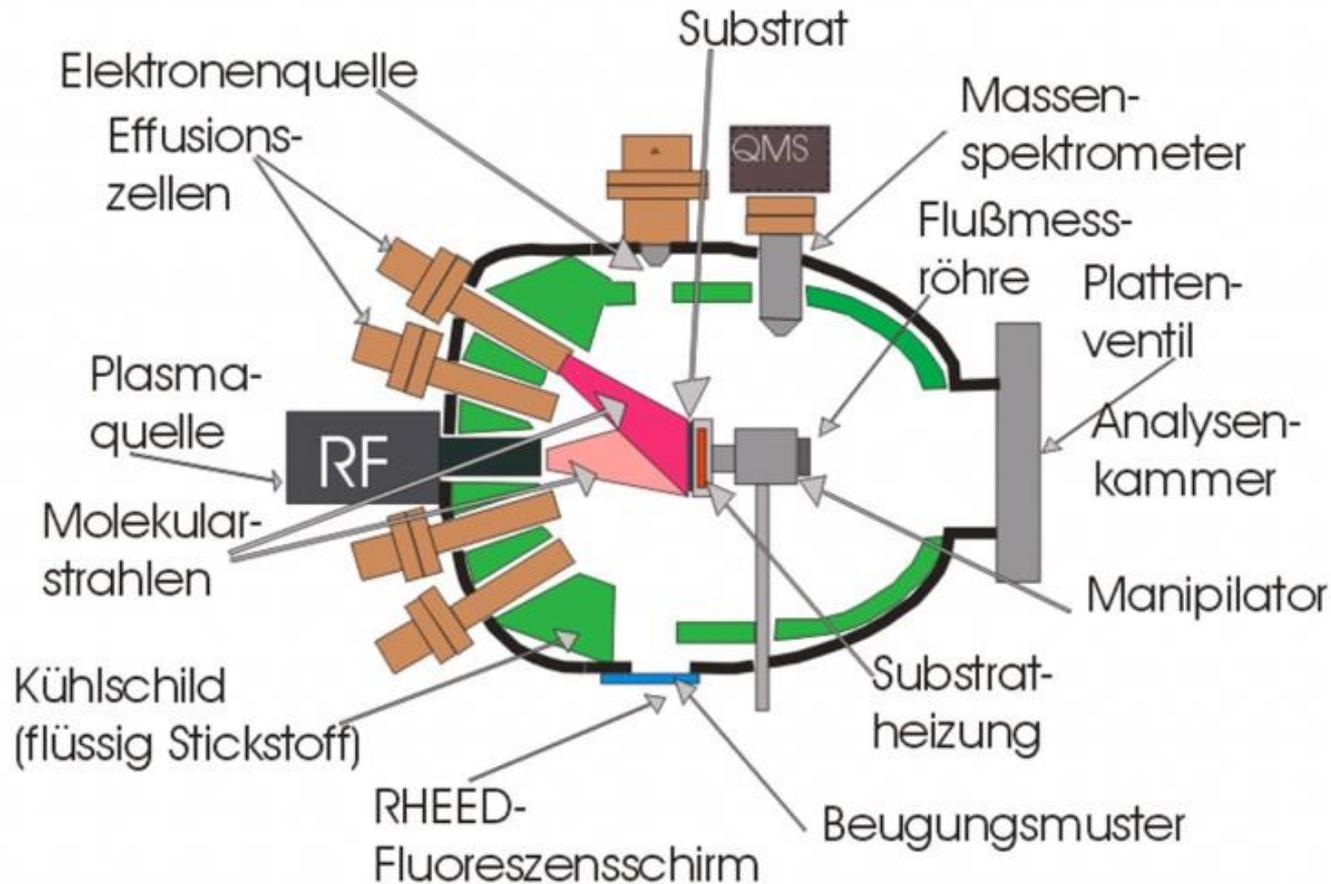
- Abscheidung von Schichten durch Laserablation
- Verdampfung des Materials durch Beleuchtung mit Laserstrahl hoher Intensität
- Vorteile:
 - die Menge die auf dem Substrat abgeschieden wird, kann über die Anzahl der Laserpulse genau festgelegt werden
 - auch komplizierte Zusammensetzungen von Materialien möglich
 - einfache Herstellung von vielschichtigen Lagen (multilayers)
 - verschiedene Materialklassen wie Keramiken, Metalle, Halbleiter und einige Polymere
- Nachteile:
 - langsamere Abscheidung als bei anderen PVD-Verfahren
 - Tröpfchenbildung auf Substrat möglich
 - keine großen Flächen möglich im Gegensatz zum Sputtern
 - vergleichsweise teuer

Molekular-Strahl-Epitaxie (MBE)

- Verfahren zur Herstellung von sehr dünnen Schichten
- Verschiedene Materialzusammensetzungen einstellbar

- Vorteil:
 - Sehr gute Kontrolle der Wachstumsprozesse
 - Geeignet für komplexe Strukturen

Molekularstrahlepitaxie

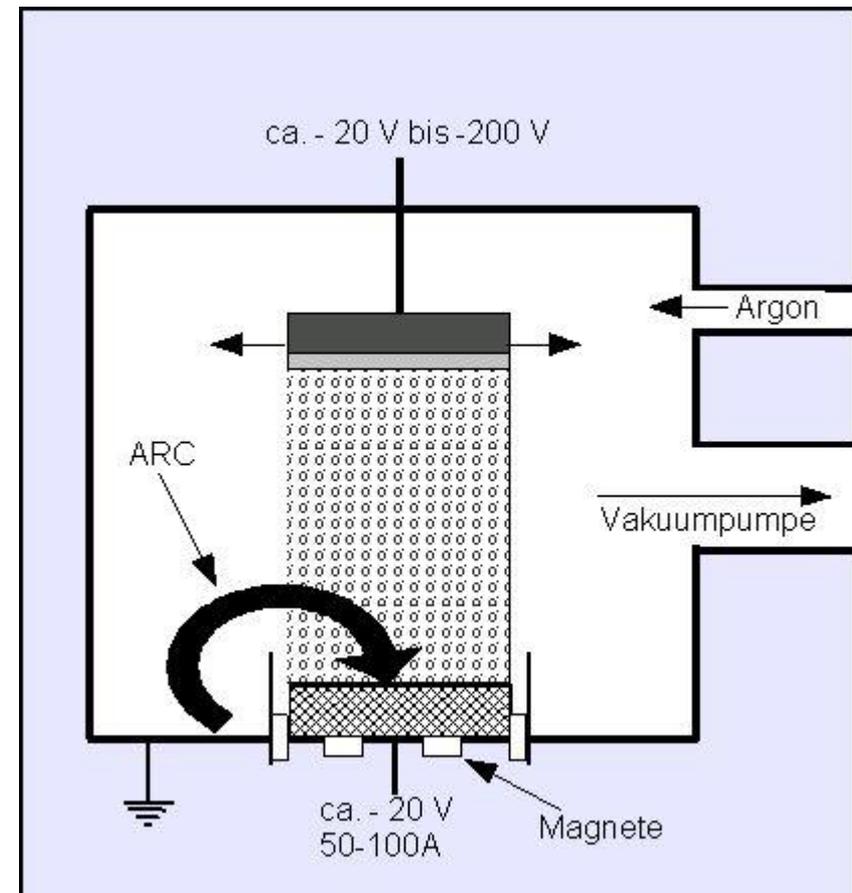


Ionenplattieren

- Das verdampfte Material wird ionisiert
- Negative Ladung am Substrat zieht die Ionen an

■ Ionenplattieren - ARC

- Schmelzen und Verdampfen des Targets durch Lichtbogen

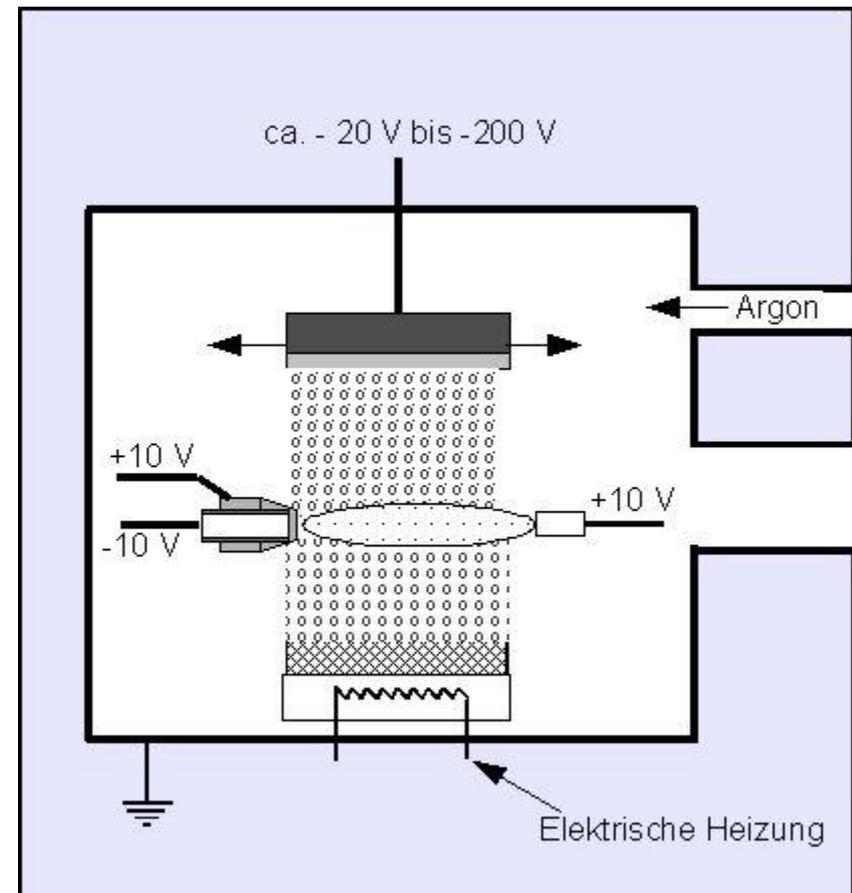


Ionenplattieren

- Das verdampfte Material wird ionisiert
- Negative Ladung am Substrat zieht die Ionen an

- **Ionenplattieren anodischer Lichtbogen**

- Schichtmaterial wird thermisch verdampft
- Bogenentladung im Metaldampf führt zur Ionisierung



Vor- und Nachteile des PVD-Verfahrens

■ Vorteile

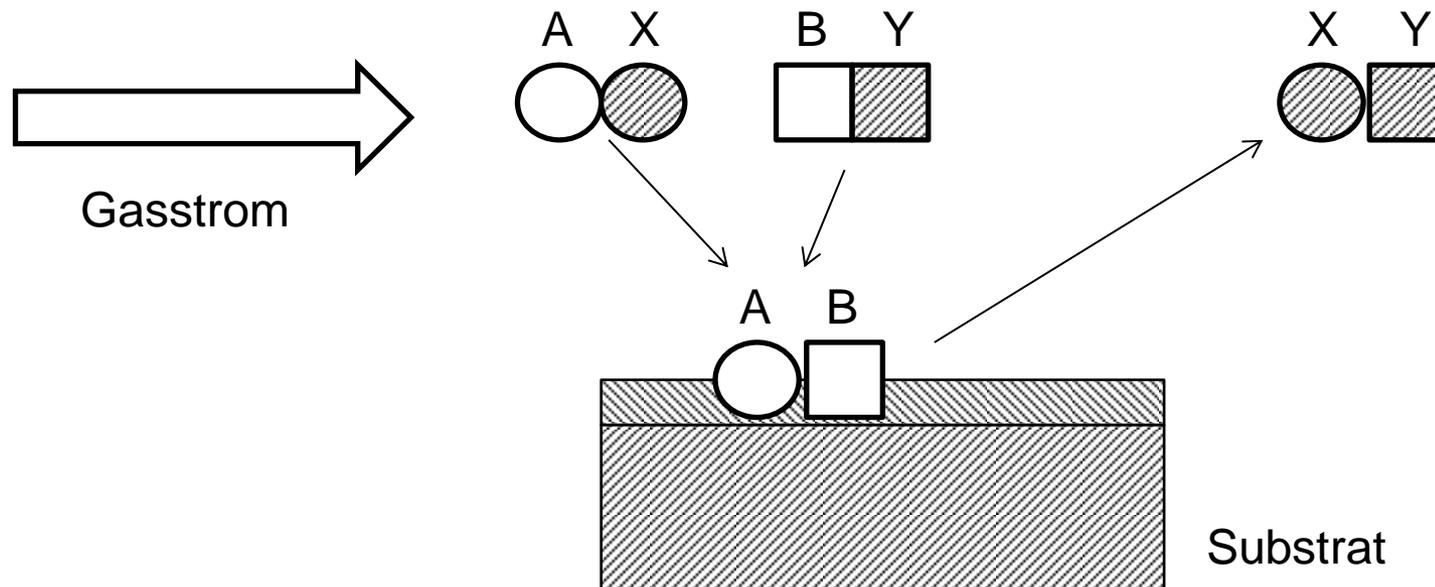
- Die Arbeitstemperaturen sind im Vergleich mit CVD niedrig
- Nahezu jede Substanz kann als Target verwendet werden

■ Nachteile

- Der Aufwand für das benötigte Vakuum ist groß
- Das Evakuieren von größeren Apparaturen dauert lange
- Ungleichmäßige Verteilung der aufzubringenden Substanz bei dreidimensionalen Objekten

Chemical Vapor Deposition CVD

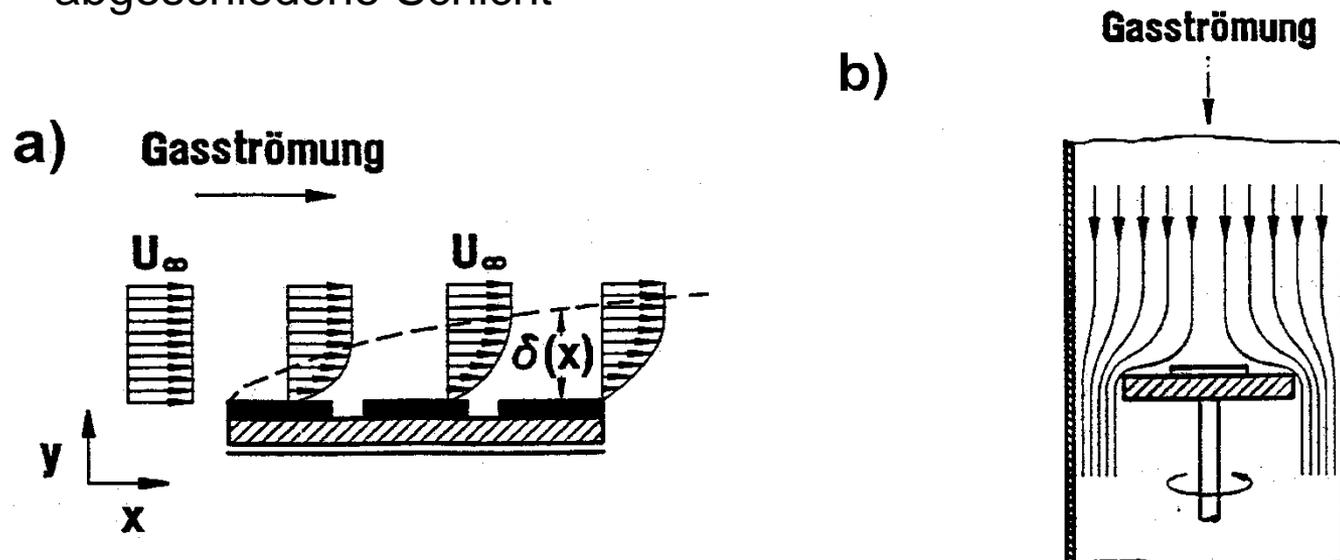
- Gasförmige Ausgangsmaterialien werden an Substratoberfläche chemisch zerlegt
- Das Ergebnis einer chemischen Reaktion dieser Gase ist eine abgeschiedene feste Schicht
- $AX(\text{Gas}) + BY(\text{Gas}) \rightarrow AB(\text{fest}) + XY(\text{Gas})$



Chemical Vapor Deposition CVD

- Gasförmige Ausgangsmaterialien werden an Substratoberfläche chemisch zerlegt

→ Das Ergebnis einer chemischen Reaktion dieser Gase ist die abgeschiedene Schicht

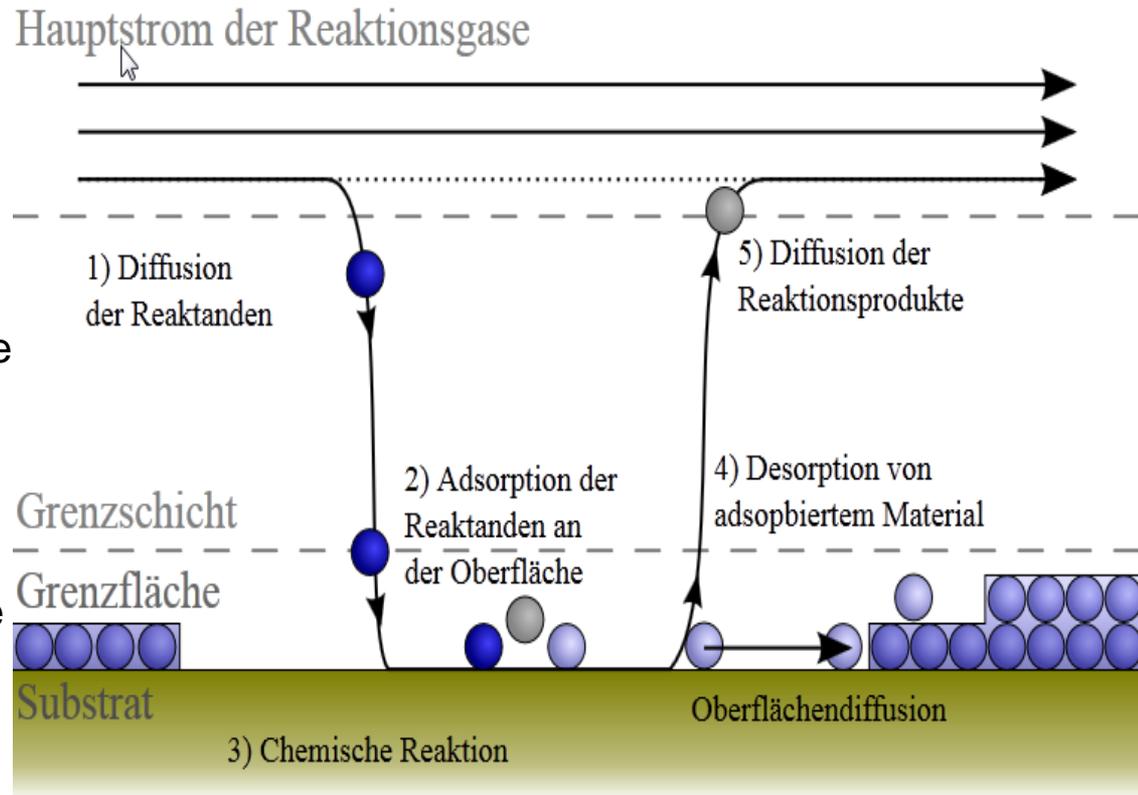


Einfluss der Anströmung des Reaktionsgases auf die Beschichtung mittels CVD

a) Parallele Anströmung, b) Senkrechte Anströmung

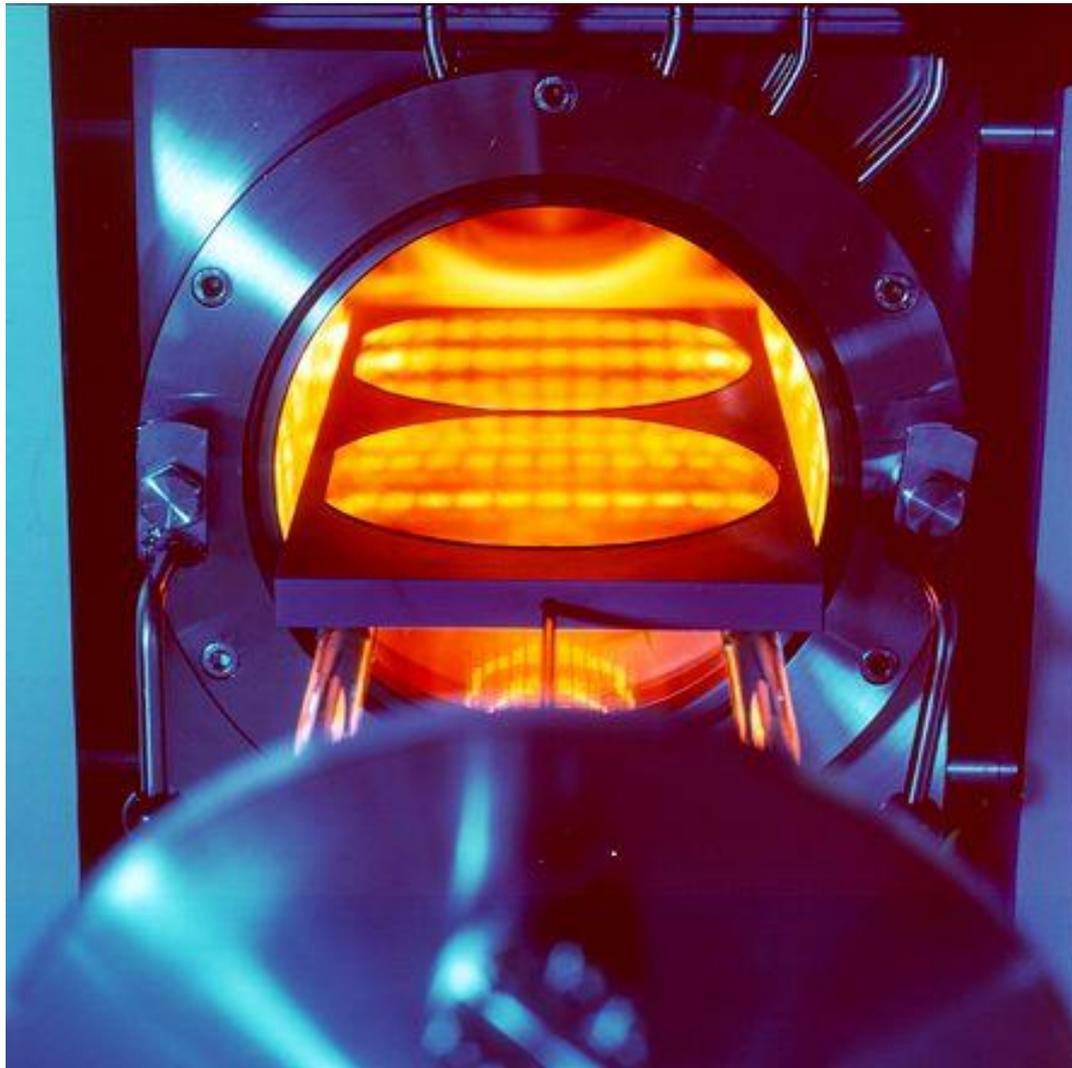
CVD- Teilprozesse

- Transport der Reaktanten in die Abscheide-Region
- Diffusion der Reaktanten durch die Grenzschicht hindurch zur Substratoberfläche
- Adsorption der Reaktanten an der Substratoberfläche
- Oberflächenreaktion (chemische Reaktion, Oberflächendiffusion des festen Reaktionsprodukts, Desorption der Reaktionsprodukte)
- Diffusion der Reaktionsprodukte durch Grenzschicht
- Abtransport der Reaktionsprodukte



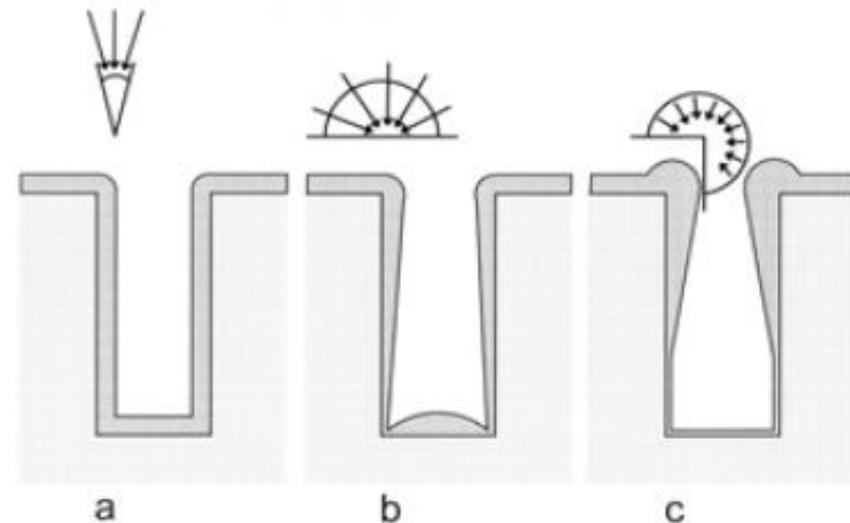
Grundprinzip von CVD-Prozessen

Anlage zur metallorganischen chemischen Gasphasenabscheidung (MOCVD)



Grabenüberdeckung beim CVD-Verfahren

- Idealfall, gleichmäßig bedeckte Kante durch hohe Oberflächenbeweglichkeit (a)
- Ungleichmäßig bedeckte Kante durch geringe Oberflächenbeweglichkeit bei hoher mittlerer freier Weglänge $\lambda \gg h$ (b)
- Ungleichmäßig bedeckte Kante durch geringe Oberflächenbeweglichkeit bei niedriger mittlerer freier Weglänge $\lambda \gg h$ (c)



Verschiedene Formen einer Grabenüberdeckung beim CVD-Verfahren

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