

# F O R S C H U N G S I N S T I T U T

der Forschungsgesellschaft für Feingeräte-, Mikro- und Uhrentechnik e.V.  
Stuttgart

## Reinräume in der Mikrotechnik

S.Büttgenbach und H.J.Wagner

### 1. Notwendigkeit der Reinraumtechnik bei der Fertigung mikrotechnischer Produkte

Die Miniaturisierung technischer Produkte stellt hohe Ansprüche an die Sauberkeit der Produktionslabors. So sind z.B. Entwicklung und Fertigung in der Mikroelektronik ohne Reinraumtechnik nicht mehr denkbar, da schon Partikel, die größer sind als  $1/3$  der minimalen Strukturabmessungen mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einem Ausfall von Schaltkreisen führen.

Die Ausbeute  $Y$ , und damit die Wirtschaftlichkeit einer Produktion, hängt ab von den Parametern

- Defektdichte  $D$ ,
- Chipfläche  $A$ ,
- Zahl der kritischen Maskenebenen  $n$ .

Bild 1 zeigt den Zusammenhang zwischen Ausbeute und Defektdichte für einige Chipgenerationen.

Die Anforderungen an die Reinräume steigen nicht nur in der Mikroelektronik infolge zunehmender Integrationsdichte, sondern auch auf anderen Gebieten wie Medizin, Pharmazie, Optik und Feinstmechanik gewinnt die Reinraumtechnik zunehmend an Bedeutung. So sind z.B. präzise Mikrokugellager, wie sie heute in Zahnarzt-Bohrgeräten üblich sind, ohne Reinraumtechnik nicht denkbar.

Reinraumtechnik beinhaltet zum einen die Vermeidung von Kontaminationen und zum anderen die Beseitigung von Kontaminationen. Wesentliche Kontaminationsquellen sind (mit zunehmender Gewichtung):

- Partikel in der Raumluft,
- Verunreinigungen in Prozeßmedien,
- Prozeß-Equipment (Abrieb) und Verfahren,
- Kontaktkontaminationen (Fingerabdrücke),
- Reinraumpersonal.

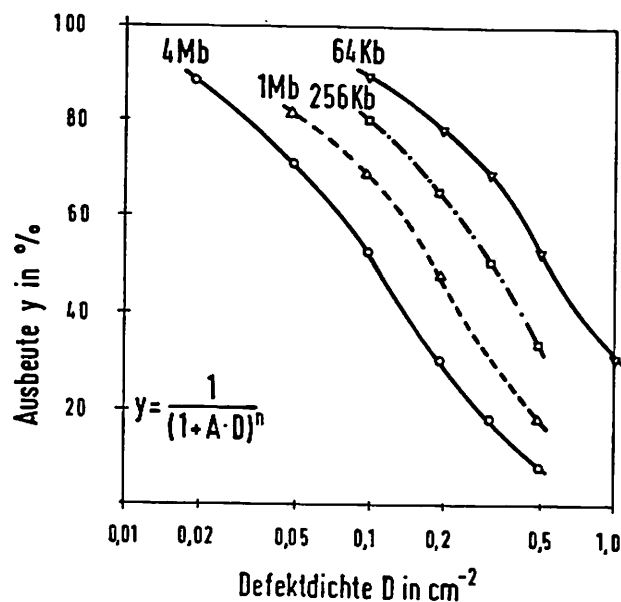


Bild 1. Abhängigkeit der Ausbeute von der Defektdichte

Die mit Abstand größte Kontamination (etwa 35%) wird durch das Reinraumpersonal verursacht. Jeder Mensch gibt zu jeder Zeit organische Produkte wie Schuppen, Schweiß, Fett, Haare oder Hautpartikel in irgendeiner Form an die Umgebung ab; z.B. wird das oberste Hautgewebe mit einer Oberfläche von über 1,5 m² alle 5 Tage vollständig in Form von Hautpartikeln emittiert. Daher sind besondere Schutzkleidung und reinraumgerechte Verhaltensweisen unerlässlich.

Die spezielle Reinraumbekleidung besteht je nach Reinheitsanforderungen aus Handschuhen, Mund- und eventuell Gesichtsschutz, Hauben (bis hin zur Vollschutzhaube), Kitteln (bis hin zum Overall für hohe Reinheitsklassen) und Überschuhen. Das Reinraumgewebe, meist Polyester, hat geringe Partikeldurchlässigkeit und Partikelgeneration, sollte aber trotzdem noch einen gewissen Tragekomfort (atmungsaktiv, wasserdampfdurchlässig, reinigungsverträglich) gewährleisten.

Das Personal kann durch reinraumgerechte Verhaltensweisen (s. Tabelle 1) wesentlich zu einer Verringerung der Kontamination beitragen. Rasche Bewegungen in Risikozonen, Husten, Niesen und Kosmetikartikel (Gesichtspuder, Wimperntusche, Lippenstifte, usw.) sollten vermieden werden.

Das 1984 von Hewlett-Packard-Mitarbeitern entwickelte SMIF-Konzept (Standard Mechanical Interface) will jeglichen direkten Kontakt Mensch - Produkt vermeiden: nicht mehr der Mensch, sondern nur noch das Produkt und die Maschine befinden sich unter Reinraumbedingungen. Dieses Konzept setzt vollautomatisches Roboter-Handling, standardisierte Miniaturreinraumboxen und entsprechende Produktaufnahme-Systeme voraus. Dabei bleiben die

Kassetten immer in einem geschlossenen System unter Reinraumbedingungen. Die immensen Kosten hierfür stehen in Relation zur Senkung der Betriebskosten für die Aufbereitung der Luftmengen (Filterung, Einhaltung von Temperatur und Feuchte) gegenüber herkömmlichen Reinraum-Konzeptionen. Mit dem SMIF-System wird eine Partikelreduktion auf 1/10 gegenüber einem konventionellen Reinraum erzielt (Bild 2).

| Partikelemission<br>in Millionen pro<br>Minute<br>( $d > 3 \mu\text{m}$ ) | Bewegungsart   |
|---|--|
| 0,1   | Stehen oder Sitzen ohne Bewegung                                   |
| 0,5   | Sitzen mit leichter Kopf-, Hand- oder Unterarmbewegung             |
| 1   | Sitzen mit mittlerer Körper- und Armbewegung und etwas Fußbewegung |
| 2   | Aufstehen mit voller Körperbewegung                                |
| 5   | Langsames Gehen (ca. 3,5 km/h)                                     |
| 7,5   | Gehen (ca. 6 km/h)   |
| 10  | Gehen (ca. 9 km/h)   |
| 15 bis 30   | Freiübungen und Spiele   |

Tabelle 1. Partikelemissionen durch Personen bei verschiedenen Bewegungen

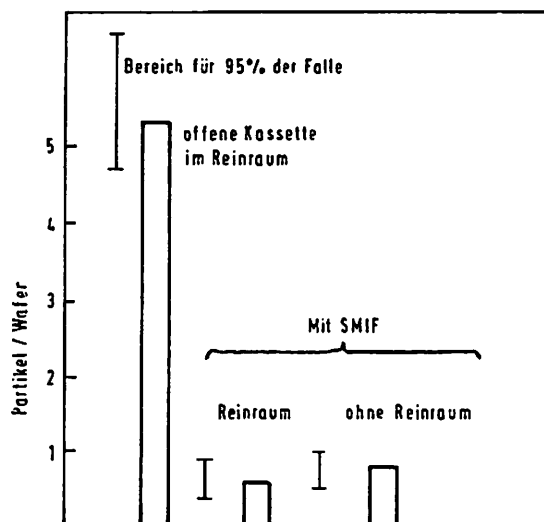


Bild 2. Vergleich der Kontamination von Wafern im herkömmlichen Reinraum und beim SMIF-System

In Tabelle 2 ist die Partikelemission durch Prozessmedien wiedergegeben, typische Partikelgrößen in Reinräumen sind in Tabelle 3 aufgelistet.

| Quelle      | Konzentration          | Partikelgröße |
|-------------|------------------------|---------------|
| Gase        | 1 cuft <sup>-1</sup>   | 0,5 µm        |
| Aqua dest.  | 500 l <sup>-1</sup>    | 0,5 µm        |
| Chemikalien | 10 000 l <sup>-1</sup> | 1,0 µm        |
| Kleidung    | 50 000 m <sup>-2</sup> | 5,0 µm        |

Tabelle 2. Partikelemission durch Prozeßmedien

| Partikel   | Partikelgröße (µm) |
|--|--------------------|
| Gleiten von Metalloberflächen (ungeschmiert; mit zunehmender Materialhärte nimmt die Partikelgröße ab) | 50 bis 500         |
| Falten oder Zerknüllen von Papier  | 65                 |
| Reiben auf einer epoxidbeschichteten Oberfläche  | 40                 |
| Schrauben anziehen   | 40                 |
| Keilriemenantrieb  | 40                 |
| Schreiben mit Filzstift auf normalem Papier  | 20                 |
| Reiben der Haut  | 4                  |
| Metalloxide und Glasbruchstücke  | 1                  |
| Ölpartikel   | 0,1                |

Tabelle 3. Partikelgrößen in Reinräumen

Ein im Bereich der Mikrotechnik unter Reinraumbedingungen zu bearbeitendes repräsentatives Produkt ist der Si-Wafer. Dessen Kontaminationsbelastung durch Raumluft ist mit ca. 1 Partikel größer als 0,1 µm pro Liter (das sind nur rund 7 % der Gesamtkontamination) gering im Vergleich zur Belastung durch Prozessflüssigkeiten (trotz Spurenverunreinigung im ppb-Bereich).

Obwohl alle Bemühungen darauf gerichtet sein sollten, Kontaminationen in Reinräumen bereits am Ort ihrer Entstehung zu beseitigen, ergibt sich die Notwendigkeit, bereits kontaminierte Oberflächen effektiv zu reinigen. Die Qualität der Reinigungsprozesse (Spülen, Schleudern, Abblasen, Trocknen) beeinflusst unmittelbar die Ausbeute. Reinstwasser ist dabei die Flüssigkeit, mit der ein Wafer am intensivsten in direkten Kontakt kommt. Tabelle 4 enthält die Spezifikationen für Reinstwasser für die Herstellung von 64 kB und 4 MB DRAMS.

Die Reinigung des Equipments bzw. des Reinraums sollte mit speziellen antistatischen, ionenfreien Flüssigkeiten und fuselfreien Tüchern erfolgen. Dieses Putzzubehör muß dabei aus-

schließlich dem Reinraum zugeordnet sein und darf nur dort eingesetzt werden.

| Dynamische RAM                    | 64 kB<br>(1980)           | 4 MB<br>(1989)          |
|-----------------------------------|---------------------------|-------------------------|
| Spezifischer Widerstand bei 25° C | 15 ... 18 MΩ<br>ASTM 1979 | 18 MΩ                   |
| Gesamtmetall-gehalt               | -                         | < 5 µg/l                |
| Partikel                          | < 2 000/l<br>gr. 1,0 µ    | < 50 000/l<br>gr. 0,1 µ |
| Keime (lebend)                    | <10 000/l                 | <10/l                   |
| SiO <sub>2</sub>                  | <50 µg/l                  | <1,0 µg/l               |

Tabelle 4. Reinstwasser-Spezifikationen

Prinzipiell ist eine strikte Trennung von sogenannten Weißzonen (kritische Reinraumbereiche der Fertigung) und Grauzonen (Ver- und Entsorgung, Wartung) einzuhalten (Bild 3).

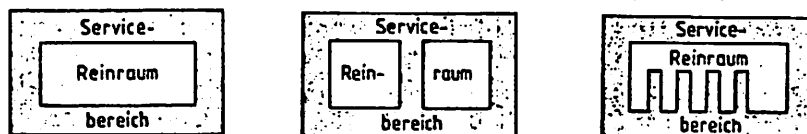


Bild 3 Grundrissvarianten eines Reinraums

## 2. Klassifizierung von Reinräumen

Unter dem Aspekt der Vermeidung von Partikeln, die im luftgetragenen Zustand auftreten (Aerosole) und auf diesem Weg dem Arbeitsbereich zugeführt werden, entstanden Anfang der 60er Jahre in den USA erste sogenannte Reine Werkbänke, da man erkannte, daß der herkömmliche Reinheitsgrad der Luft bei der Herstellung mikrotechnischer Produkte zu viel zu hohen Ausschußraten führte. Der Begriff des Reinraums wurde definiert und standardisiert (US-Federal-Standard 209 b; abgeleitet davon VDI-Richtlinie 2083).

### Definitionen:

Ein Reinraum ist ein abgegrenzter Bereich mit Einrichtungen zur Begrenzung der Teilchenzahl in der Luft und mit Temperatur-, Luftfeuchtigkeits- und Luftdruckregelung. Die Teilchenkonzentrationen müssen kleiner sein als die durch die entsprechenden Grenzkurven definierten jeweiligen Reinheitsklassen (Bild 4). Die Reinraumklasse muß erreicht werden, wenn Personen und Maschinen im Raum sind und arbeiten. Im statischen Betrieb ist die Teilchenkonzentration im Vergleich dazu sehr viel geringer.

Ein Reiner Arbeitsplatz ist eine Werkbank oder ein ähnlich abgegrenzter Arbeitsbereich, der durch eigene Zufuhr von gefilterter Luft charakterisiert ist.

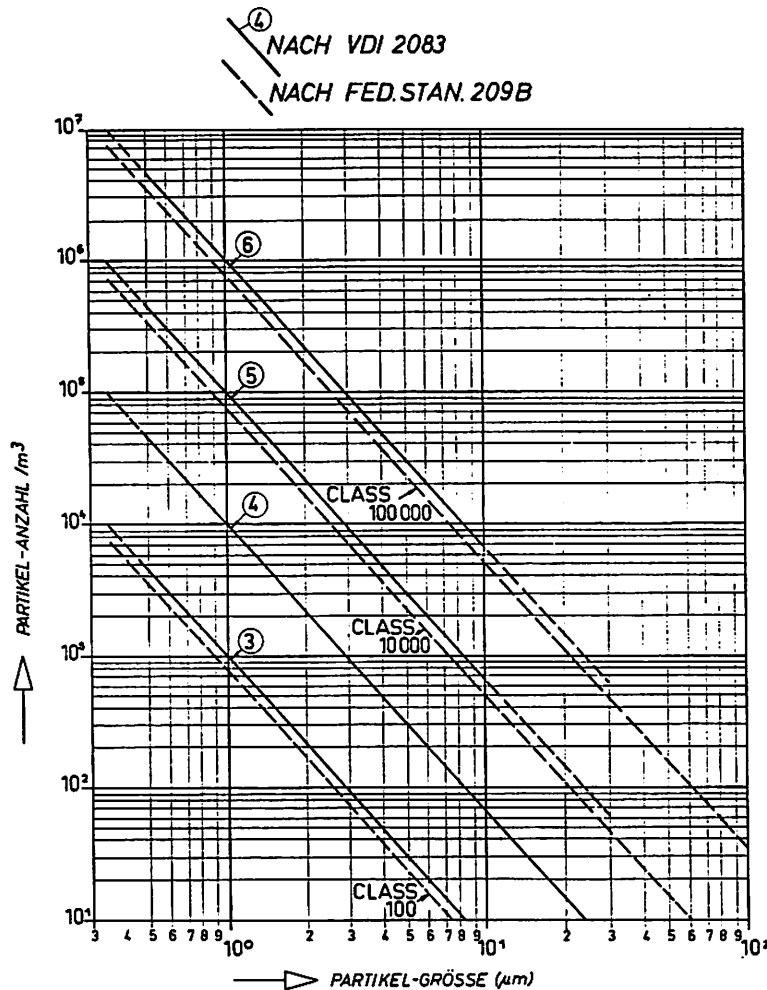


Bild 4. Grenzkurven der Reinheitsklassen für Reinnräume

Für die Konditionierung der Luft in Reinnräumen gelten folgende Richtwerte (für alle Reinnraumklassen):

- |                        |                               |
|------------------------|-------------------------------|
| -- Außenluftanteil:    | 50 m³/h/Person,               |
| -- Temperatur:         | 18 °C - 23 °C,                |
| -- Temperaturkonstanz: | ± 0,1 °C - ± 3 °C,            |
| -- rel. Feuchte:       | 35 % - 50 %,                  |
| -- Feuchtekonstanz:    | ± 1 % - ± 5 %,                |
| -- Geräusche:          | < 60 dB(A),                   |
| -- Beleuchtungsstärke: | 1000 lx entsprechend 40 W/m², |
| -- Überdruck:          | 5 Pa - 15 Pa,                 |
| -- Außenluftanteil:    | 5 % - 30 %.                   |

In der Halbleiterfertigung müssen diese Spezifikationen noch weiter eingegrenzt werden, z.B.:

- Temperatur: 21 °C ± 1°C,
- Relative Feuchte: 45 % ± 5%,
- Überdruck: > 12 Pa,
- Luft: weniger als 100 Partikel < 0,5 µm pro ft³.

Diese Spezifikation entspricht der Reinraumklasse 100.

Bild 5 zeigt die Partikelgrößen von Luftverunreinigungen, Bild 6 die zeitliche Entwicklung der kleinsten Strukturmaße bei integrierten Schaltkreisen. In Tabelle 5 sind die Absitzgeschwindigkeiten für Staubpartikel wiedergegeben.

Partikel in der Größenordnung 0,1 - 5 µm werden von der normalen Luftbewegung im Schwebezustand gehalten. Sogar Partikel >5µm können unter dem Einfluß von thermischen Effekten und Luftbewegungen in einen Schwebezustand kommen.

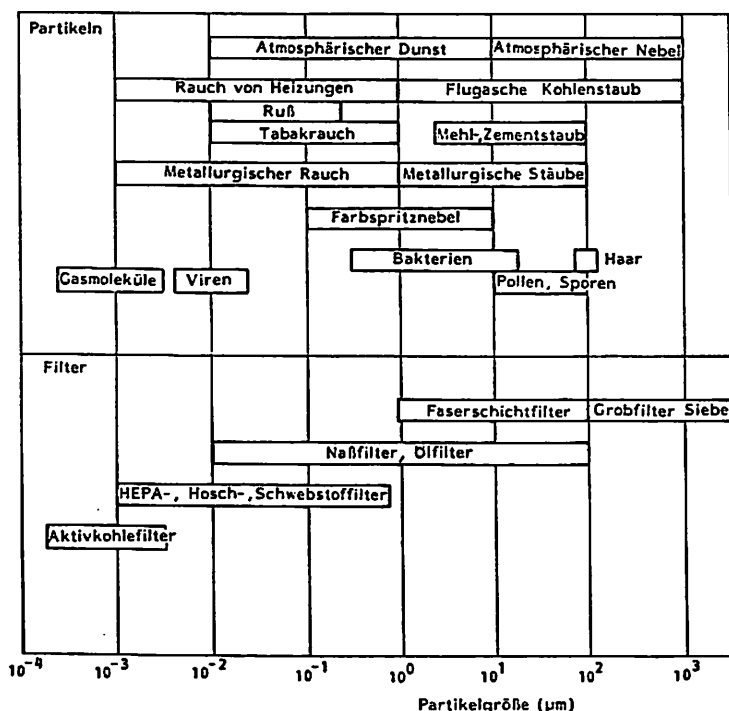


Bild 5. Partikelgrößen und Filterarten für Luftverunreinigungen

Einen Reinraum lufttechnisch aufzubereiten heißt, das vorhandene Luftvolumen durch ein gefiltertes Luftvolumen zu ersetzen, d.h. den Raum ständig mit Reinsluft zu durchspülen.

Damit keine Turbulenzströmungen auftreten, muß eine Luftgeschwindigkeit von  $0,45 \pm 0,1$  m/s eingehalten werden (US-Federal-Standard 209b). Durch diese Geschwindigkeit entsteht eine turbulenzarme Verdrängungsströmung (Kolbenströmung, Laminar

Flow), die wirkungsvoll die Schmutzpartikel entlang der Stromlinien abtransportiert (meist vertikal nach unten) und verhindert, daß sie wieder vom Boden, von Tischen oder Geräten aufgewirbelt werden. Aufgrund fehlender Temperatur- und Geschwindigkeitsgradienten werden diese Luftströmungen vom Reinraumpersonal noch als behaglich empfunden. Aus Gründen der Energieeinsparung können die Strömungsgeschwindigkeiten gegebenenfalls noch etwas erniedrigt werden.

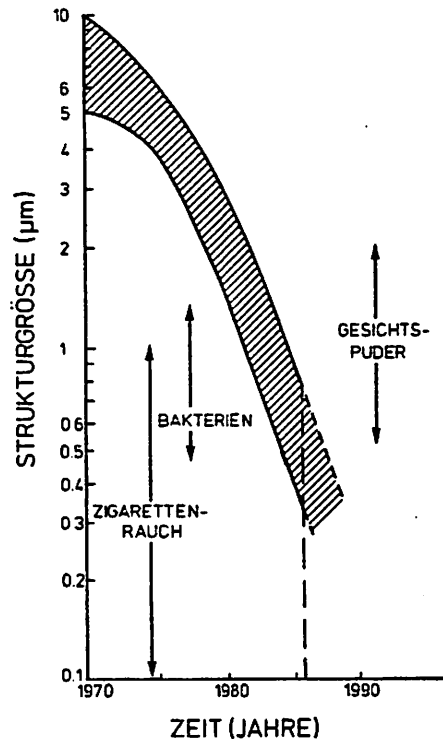


Bild 6. Zeitliche Entwicklung kleinster Strukturmaße bei integrierten Schaltkreisen

| Partikeldurchmesser<br>in Mikrometer | Absitzgeschwindigkeit<br>cm je sec |
|--------------------------------------|------------------------------------|
| 0,1                                  | 0,000081                           |
| 0,2                                  | 0,00018                            |
| 0,4                                  | 0,00066                            |
| 0,6                                  | 0,0010                             |
| 0,8                                  | 0,0025                             |
| 1,0                                  | 0,0036                             |
| 2,0                                  | 0,012                              |
| 4,0                                  | 0,48                               |
| 6,0                                  | 0,11                               |
| 8,0                                  | 0,19                               |
| 10                                   | 0,30                               |
| 20                                   | 1,2                                |
| 40                                   | 4,8                                |
| 60                                   | 10,8                               |
| 80                                   | 19,2                               |
| 100                                  | 30,0                               |

Tabelle 5. Absitzgeschwindigkeit von Staubpartikeln (spezifisches Gewicht=1, Lufttemperatur=20°C)



Eine mathematische Betrachtung zeigt, daß die Wahrscheinlichkeit für einen Defekt bei einer Verunreinigung durch ein größeres Teilchen wesentlich geringer ist als bei einer Verunreinigung durch eine größere Anzahl kleinerer Teilchen.

Ein Kubikmeter "normaler" Außenluft enthält ca. 30 - 60 Mio. Partikel. Eine Analyse ergibt folgende Zusammensetzung der "normalen" Luft:

|                       |         |          |       |
|-----------------------|---------|----------|-------|
| Größe der Teilchen:   | <0,5 µm | 0,5-1 µm | >1 µm |
| Anzahl der Teilchen:  | 91,7 %  | 6,8 %    | 1,5 % |
| Gewicht der Teilchen: | 1 %     | 2 %      | 97 %  |

Wichtigster Garant für die Einhaltung der geforderten Partikelzahl ist der passende Luftfilter. Man unterscheidet zwei Arten von Luftfiltern:

- Vorfilter (Grobfilter, Feinfilter),
- Hauptfilter (HOSCH- oder HEPA-Filter, d.h. Hochleistungs-Schwebstofffilter oder High Efficiency Particulate Air Filter).

Zur Abscheidung von Gasen (Abluft) durch Adsorption werden Aktivkohlefilter verwendet. Die Grobfilter werden hauptsächlich eingesetzt, um die größeren Teilchen ab 2 µm abzuscheiden. Der Wirkungsgrad der Filterung wird durch die letzte Filterstufe bestimmt. Würde man nur Schwebstofffilter installieren, wären sie innerhalb kürzester Zeit verstopft. Eine bis zu 9-fache Steigerung der Standzeit eines HOSCH-Filters ist durch die aufeinander abgestimmte Kombination von Schwebstofffilter, Feinfilter und Grobfilter zu erreichen.

Vorfilter haben einen Entstaubungsgrad von ca. 85 %, bestehen aus Wirrfaser-Vlies, und sind durch Ausklopfen, Absaugen oder Ausblasen zu regenerieren. Die im Vergleich zu den Vorfiltern teuren HOSCH-Filter haben einen Entstaubungsgrad von 99,997% und bestehen aus reinen Mikroglasfasern. Die Partikelabscheidung erfolgt im wesentlichen nach den vier Effekten Siebwirkung, Trägheitseffekt, Sperrereffekt und Diffusionseffekt, die geschwindigkeitsabhängig und teilweise gegenläufig zur Partikelgröße sind. Daraus resultiert, daß der HOSCH-Filter bei Teilchen von 0,3 µm die größte Durchlässigkeit hat. Der Abscheidegrad wird im sog. DOP-Test (Dioctylphthalat- Test; US-Mil-Std. 282) festgestellt.

Der Entstaubungsgrad des Schwebstofffilters ist eine relative Größe; ein Entstaubungsgrad von 99,997 % besagt z.B., daß nur 0,003 % der Partikel auf der Staublufseite, die kleiner sind als 0,3 µm, vom Schwebstofffilter durchgelassen werden. In Vorwegnahme der zukünftigen Filteranforderungen sind bereits sog. ULPA-Filter (Ultra Low Penetration Air Filter) mit einem Abscheidegrad von 99,9995 % auf dem Markt. Der Benutzer von Schwebstofffiltern sollte deshalb auf den Entstaubungsgrad und die Leckfreiheit der gekauften Filter achten.

### 3. Konzeption von Reinräumen

Infolge des Luftüberdrucks kann Reinluft aus dem Raum entweichen, aber staubbelastete Luft von außen nicht in den Reinraum eindringen. Die Partikelkonzentration  $n$  ergibt sich aus dem Verhältnis von Partikelquellstärke  $E$  und Zuluftvolumenstrom  $u$ , der als partikelfrei angenommen wird:  $n = E/u$ . Höhere Reinheitsanforderungen verlangen daher größere Reinluftmengen.

Für die Reinraumklasse 100 000 benötigt man einen ca. 20-fachen stündlichen Luftwechsel. Dies entspricht turbulenter Mischbelüftung. Man kann dies steigern und mit 40 - 60-fachem Luftwechsel Klasse 10 000 und mit ca. 200-fachem Luftwechsel Klasse 1000 erreichen. Dabei ist die Luftwechselzahl abhängig von der Anzahl der Personen im Reinraum. Für den zu transportierenden Luftvolumenstrom ergeben sich daraus die Richtwerte der Tabelle 6:

| Reinraumklasse nach<br>US-Fed.-Std. 209 b | Luftvolumenstrom<br>$\text{m}^3/(\text{h m}^2)$ |
|---|---|
| 100                                       | 1000 - 1600                                     |
| 1000                                      | 500 - 900                                       |
| 10000                                     | 120 - 150                                       |
| 100000                                    | ca. 60  |

Tabelle 6. Richtwerte für den Luftvolumenstrom

Legt man einen Reinraum mit einer Grundfläche von  $200 \text{ m}^2$  zugrunde, so ergibt sich für Klasse 10 000 ein Luftaustauschvolumen von  $24\,000 - 36\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ . Dies ist ein enormer Luftdurchsatz, dessen Sauerstoffgehalt vom Reinraumpersonal durch Atmung im allgemeinen nicht ausgeschöpft wird. Aus Wirtschaftlichkeitsgründen führt man deshalb diese Luft nach Staubfilterung und Zugabe von ca. 15 - 20 % Frischluft wieder zum Reinraum zurück (Umluftbetrieb). Der Frischluftanteil wird als Abluft dem gesamten Austauschvolumen wieder entzogen. Ein Teil dieser Abluft entweicht durch Personenschleusen und Abluftkanäle. Außerdem muß die bei bestimmten chemischen Prozessen entstehende toxische Abluft separat abgeführt und substituiert werden. Leckverluste der Gebäudehülle müssen ebenfalls kompensiert werden.

Entsprechend der geforderten Reinheit und dem damit verbundenen Luftvolumenstrom unterscheidet man zwischen

- Systemen mit turbulenter Mischlüftung (Klassen 100 000, 10 000),
- Systemen mit Verdrängungslüftung.

Bei turbulenten Mischlüftungssystemen wird die schwebstoffgefilterte Zuluft intensiv mit der Raumluft vermischt. Dabei resultiert infolge des Verdünnungseffektes eine Abnahme der Partikeldichte (Induktionswirkung des Zuluftstroms).

Werden höhere Anforderungen an die Luftreinheit gestellt (Reinraumklassen 1000, 100), so kann nur eine weitgehend gleichgerichtete Luftführung (Klasse 1000) oder eine reine Laminar Flow-Luftführung (Klasse 100) diese Anforderungen erfüllen (Bild 7).

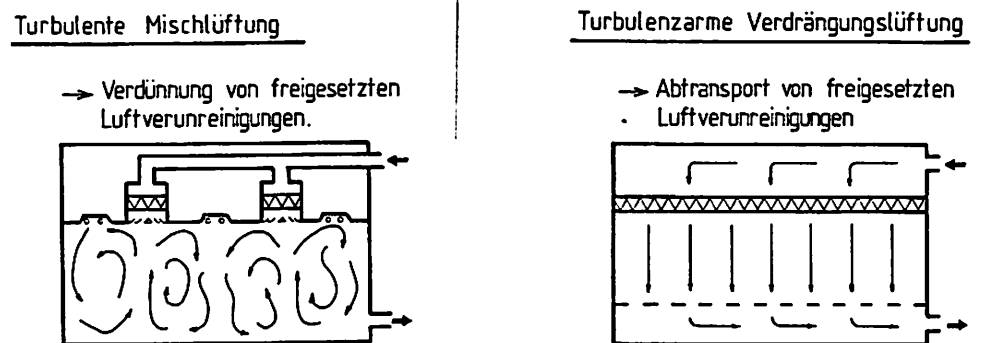


Bild 7. Luftführung in Reinräumen

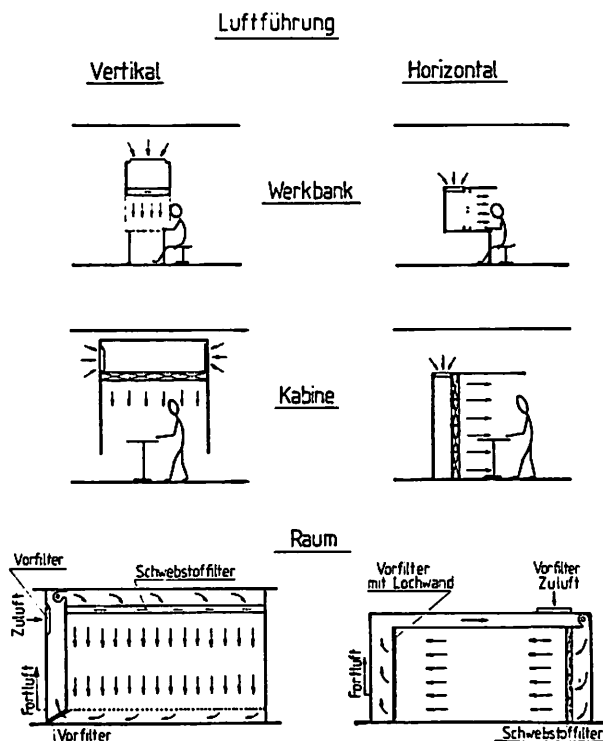


Bild 8. Ausführungsformen von Reinen Bereichen

Hinsichtlich der Größe unterscheidet man Reine Werkbänke, Reine Kabinen und Reinräume (Bild 8). Neuentwicklungen wie der schlüsselfertige modulare Reinraumcontainer haben sich noch nicht beim Anwender durchgesetzt und liegen z.Zt. noch ca. 20 % über dem konventionellen Kostenniveau. Je nach der Richtung, in der kein Transport von Verunreinigungen stattfinden darf, unterscheidet man Vertikalstrom- und Horizontalstromeinrichtungen. Hierbei wird die Zuluft großflächig über HOSCH-Filterdecken- bzw. -wandsysteme dem Raum zugeführt.

Die Strömungsformen der turbulenzarmen Verdrängungsströmung beinhalten auch Besonderheiten, die für den Anwender zu beachten sind:

- Aufgrund des hohen Geschwindigkeitsgradienten unterhalb des Filtermediums ist die Strömung direkt am Ausgang stark turbulent. Die Turbulenzzone beträgt das 3 - 8-fache der Breite der Totzone (Deckenleuchte, Filteraufhängung, usw.).
- Thermische Effekte können die Luftströmung wesentlich beeinflussen.
- Störstellen in der Strömung verursachen Rückströmungen.
- Bei großflächigen Räumen können Querströmungen erheblichen Umfangs entstehen. Dies läßt sich durch eine Raumaufteilung mit Stellwänden vermeiden.

Bild 9 zeigt ein Blockschaltbild einer Reinraumanlage mit ihren wesentlichen Komponenten. Wie im Bild deutlich zu erkennen ist, beansprucht die Grauzone einen verhältnismäßig großen Raumbedarf. Für einen Reinraum der Klasse 10 000 muß für die Reinraumanlage (Klimaanlage, Ver- und Entsorgungsbereich, Schleuse etc.) ein Raumbedarf von 50 - 100 % des eigentlichen Reinraums zusätzlich vorgesehen werden. Für einen Reinraum der Klasse 100 steigt dieser Bedarf auf ca. 200 % !

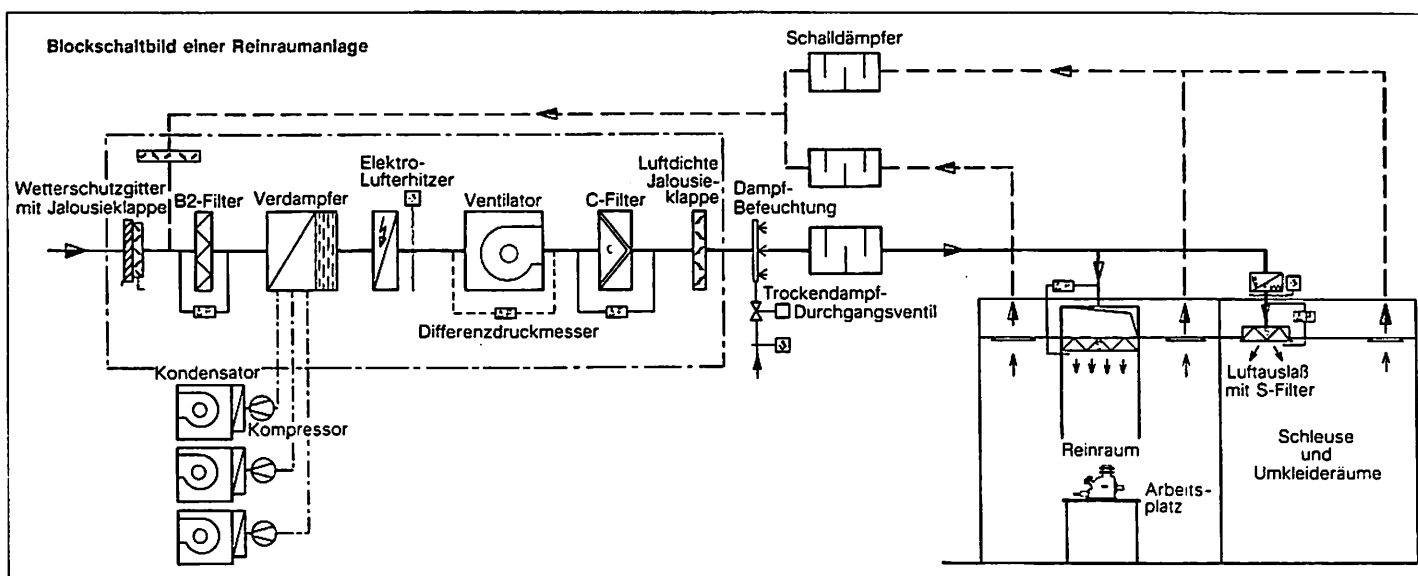


Bild 9. Blockschaltbild einer Reinraumanlage

Das Betreten der Reinnräume bzw. das Einbringen von Materialien erfolgt über Schleusenzonen, die die Aufgabe haben, die Kontamination aus angrenzenden Graubereichen weitgehend auszuschalten. An der Ein- und Austrittsseite sind Türen angeordnet, die gegeneinander verriegelt sind und sich nur wechselseitig öffnen lassen. Im Schleusenbereich erfolgt das Anlegen der Reinraumkleidung, die in speziellen Garderobeschränken untergebracht ist. Nach einer sog. Schmutzbarriere ist in der Schleuse ein hochadhäsiver Bodenbelag vorzusehen, der die noch anhaftenden Schmutz-

partikel binden soll. In vielen Fällen sind im Schleusenbereich zum Abblasen der Restpartikel noch Luftduschen installiert.

Eine effektive Anordnung der Laminarflow-Boxen nach dem Tunnelprinzip (Bild 10), gegebenenfalls mit Boden-Luftauslässen, gewährleistet eine ergonomische Raumausnutzung.

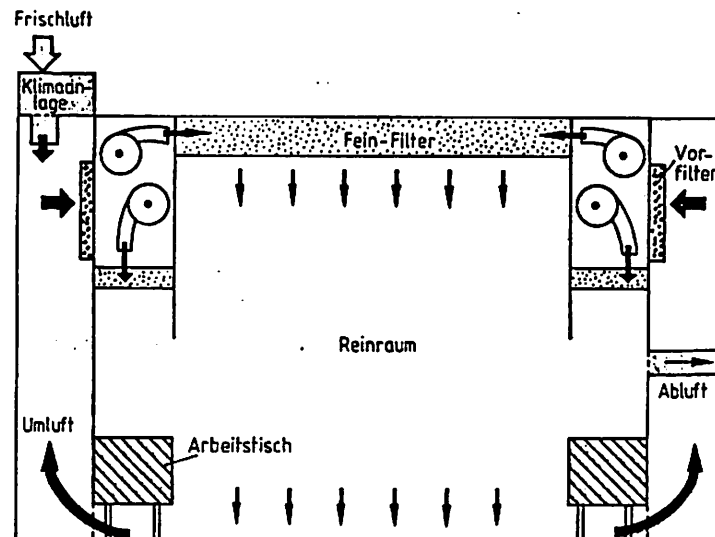


Bild 10. Anordnung der Arbeitsplätze nach dem Tunnelprinzip

Die Kosten eines Reinraums hängen direkt von seiner Leistungsfähigkeit ab. Ein Reinraum der Klasse 100 000 ist wesentlich kostengünstiger als ein Raum der Klasse 100, dessen Kosten im Vergleich dazu exponentiell ansteigen. Grundsätzlich ist zu unterscheiden zwischen Forschungsstätte und Produktionsstätte. Für ein Forschungslabor von 200 m<sup>2</sup> ist bei mittlerem Standard mit Kosten in der Größenordnung von ca. 10 000 DM/m<sup>2</sup> zu rechnen, einschließlich Planung und Projektierung.

Spezifische Reinraumlösungen werden meist erst nach ausführlichen technischen Gesprächen zwischen Hersteller und Anwender realisiert, was zwangsläufig bei den Kosten spürbar wird. Die Gesamtkosten verteilen sich grob auf die in Tabelle 7 aufgeführte Bereiche.

Für einen wirtschaftlichen Betrieb reinraumtechnischer Anlagen lassen sich mögliche Energieeinsparungen durch geeignete Kombination der folgenden Maßnahmen realisieren:

- Variation des Verhältnisses von Außen- zu Umluft, um den Bedarf an künstlicher Kühlung herabzusetzen. Folgende Abwärmeanteile fallen mit spezifischer Gewichtung an: Äquivalente Ventilatorleistung, Personenwärme, Beleuchtungswärme, Prozeßwärme, Maschinenwärme.
- Verwendung von Abwärme zu Heizzwecken.
- Wärmerückgewinnung aus der Abluft mit Hilfe von Rekuperatoren und Wärmepumpen.

- Minimale künstliche Befeuchtung.
- Anhebung des Temperaturniveaus.
- Minimierung des Außenluftanteils.
- Angemessene Systemunterteilung entsprechend der benötigten Raumluftzustände.
- Variabler Luftvolumenstrom.
- Drosselung des Luftstroms und des Außenluftanteils außerhalb der Produktionszeit.

Viele der möglichen Energiesparmaßnahmen erfordern zusätzliche Investitionen, die sich nach einer gewissen Zeit über die Betriebskostenreduktion amortisieren müssen.

| Kostenverteilung Reinraumtechnik  | Anteil Gesamtkosten |
|---|---------------------|
| Klimatechnik<br>(incl. Kühlwasser)  | ca. 30 %            |
| Elektroversorgung<br>Detektionssysteme<br>Kommunikationssysteme<br>Sicherheitssysteme | ca. 20 %            |
| Reinstwasser<br>Chemikalienver- und Entsorgung<br>Sanitär                             | 15 ... 20 %         |
| Reinraum<br>(Decken, Wände, Boden)<br>LF - Boxen                                      | ca. 15 %            |
| Vakuum<br>Reinstdruckluft<br>Prozeßgase-, luft  | 15 ... 20 %         |

Tabelle 7. Kostenverteilung bei Reinräumen

#### 4. Mikromechanik-Labor unter Low-Cost-Gesichtspunkten

Im Rahmen eines Forschungsprojektes mußte im Forschungsinstitut der Forschungsgesellschaft für Feingeräte-, Mikro- und Uhrentechnik ein Mikromechanik-Labor (ca. 70 m<sup>2</sup>) unter Low-Cost-Gesichtspunkten geplant und eingerichtet werden. Vergleicht man die Strukturmaße der Mikromechanik mit denen der Mikroelektronik (Bild 11), so sind die minimalen mikromechanischen Strukturen derzeit im LSI-Bereich anzusiedeln, d.h. Partikel >0,5 µm sind für das Produkt kritisch und können zum Ausfall des Bauelements führen.

Diese Anforderungen legten die Einrichtung eines Reinaums der Klasse 10 000 mit turbulenter Mischlüftung und Laminarflowboxen der Klasse 100 für die kritischen Bereiche nahe (Bild 12).

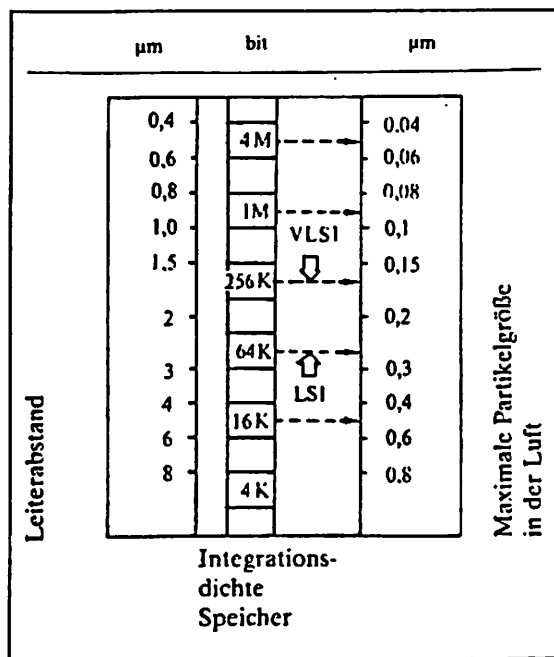


Bild 11. Zulässige Verunreinigungen in der Luft bei der Chip-Fertigung integrierter Schaltkreise

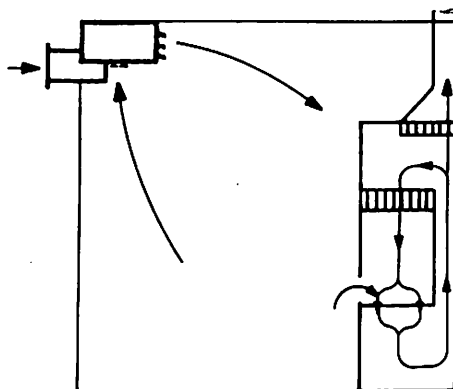


Bild 12. Turbulente Mischbelüftung mit abgegrenzten Klasse 100-Bereichen (schematisch).

Aus Kostengründen wird auf eine Boden-Luftabführung (Doppelboden) verzichtet. Die Abluftkanäle befinden sich ebenfalls an der Decke. Auch bei Reinraumklasse 10 000 ist eine Reinraumschleuse erforderlich. Es ist darauf zu achten, daß sich die eigentliche Wafer-Prozeßlinie ausschließlich unter Reinen Werkbänken befindet. Diese Laminarflow-Boxen beziehen ihre Zuluft aus dem Raum der Klasse 10 000 und geben ihre Abluft, sofern diese nicht separat abgeführt werden muß (wie z.B. in Chemie-Flowboxen), wieder in den Raum ab. Für die Reinraumklasse 10 000 genügen abriebfeste Wandfarbe und gewöhnliche PVC-Bodenbeläge den Anforderungen bezüglich Partikelemission. Für das Personal sind Reinraumkittel, Handschuhe, Überschuhe und eventuell Mundschutz und Kopfhaube obligatorisch.

Nachfolgend sind einige Konzeptionsdetails aufgeführt:

| Reinraumklasse                          | 10 000                     | 100   |
|---|----------------------------|---|
| Reinraum                                | X                          |   |
| Schleuse                                | X                          |   |
| Flowboxen                               |                            | X   |
| Lüftungsart                             | turbulente<br>Mischlüftung | turbulenzarme<br>Verdrängungslüftung                  |
| Luftwechsel [ $\text{h}^{-1}$ ]         | ca. 40                     | 360 - 500   |
| Luftmenge [ $\text{m}^3/\text{h m}^2$ ] | ca. 120                    | 1000 - 1600   |
| mittl. Luftgeschw. [ $\text{m/s}$ ]     | -                          | 0,3 - 0,45  |
| Einblasöffnungen                        | Deckenauslässe             | Filterdecke   |
| Abluftöffnungen                         | Decke                      | Tischfläche   |
| Vorfilter                               | EU 4                       | B 2 od. C   |
| Endfilter                               | HOSCH                      | HOSCH   |
| Überdruck [Pa]                          | 5 - 10                     | 12  |
| Wandbeschaffenheit                      | abriebfeste Farbe          | melaminharzbesch.<br>Platten/Acrylglas                |
| Bodenbeschaffenheit                     | PVC/Adhäsionsmatten        | melaminharzbesch.<br>Platten/Edelstahl-<br>lochbleche |

Bei der Abnahme von Reinräumen sind folgende Punkte zu messen bzw. zu beachten:

- Partikelkonzentration, Partikelgröße (z.B. mittels Streulicht-partikelzähler),
- Luftgeschwindigkeit (z.B. mittels Hitzdrahtanemometer),
- Schwingungsfreiheit (Partikelfreisetzung),
- Temperatur, rel. Feuchte und deren Konstanz,
- elektrostatische Aufladungen (da sie Staub anziehen).

Abschließend sei bemerkt, daß gegenwärtig der US-Fed.-Standard überarbeitet und auf die Reinraumklassen 10 und 1 erweitert wird. Diese werden dann im US-Fed-Standard 209 c festgelegt. Eine Neubearbeitung der VDI Richtlinie 2083, Blatt 1-7 soll im Jahr 1988 erscheinen.

#### Aktuelle Literatur zur Reinraumtechnik

- 1) US-Federal-Standard 209 b, Clean Room and Work Station Requirements (1976)
- 2) VDI 2083, Richtlinien Reinraumtechnik (1976)
- 3) U. Schmidt  
Industrial Application of Clean-Room Technology  
Humane Produktion - Humane Arbeitsplätze 5/1986
- 4) H.J. Göbel  
Cleanikum  
Capital 1/1986, S.174



- 5) SMIF reduziert Reinraum-Anforderungen drastisch  
productronic 5/1986, S.10
- 6) H. Harada, Y. Suzuki  
SMIF System Performance at 0.22  $\mu$ m Particle Size  
Solid State Technology, Dec. 1986, S.61
- 7) "Silizium-Schlacht" in Regensburg: Staubfreiheit ist oberstes  
Gebot  
Markt & Technik 46/1986, S.42
- 8) J.P. Walton  
Perspective on Cleanroom Design  
European Semiconductor Design & Production, March/April 1987,  
S.21
- 9) H. Bartz  
Reine Räume - Halbleiterfertigung als Trendsetter  
Hard And Soft 7/8 (1986)
- 10) G.Neuhaus  
Konzeption, Funktion und Betrieb von reinraumtechnischen  
Anlagen  
Pharma International 6/1985 und 1/1986
- 11) H. Bartz  
Miniatursierung in der Elektronikfertigung: Eine Herausfor-  
derung für die Reinraumtechnik  
Elektronik Produktion & Prüftechnik 7/8/1986
- 12) H. Bartz  
Abnahme und Kontrollmessungen an reinraumtechnischen Anlagen  
Pharma International 4/1986
- 13) W. Pinks  
Reinraumtechnik und ihre Bedeutung für die moderne Produk-  
tion und Forschung  
Umschau 9/1983, S.282
- 14) W. Pinks  
Reinraumtechnik in Halbleiter- und Elektronik-Fertigung  
iee productronic 1/1983, S.38
- 15) W. Pinks  
Reinraumtechnik - Eine Voraussetzung für die moderne Produk-  
tion  
CCI 2/1984, S.25
- 16) A. Bringmann  
Reinraumtechnik für Fertigungsbetriebe  
Umschau 11/1985, S.679
- 17) H. Schicht  
Filterdecken für die Großreinhäuser der Mikroelektronik  
Elektronik Produktion & Prüftechnik 11/1986, S.100

- 18) S.A. Hoenig  
The Clean Room as a System for Contamination Control  
Solid State Technology, Sept. 1985
- 19) T. G. O'Neill  
Clean Room Efficiency: A Combination of Design and Operation  
Semiconductor International, Dec. 1980
- 20) M.K. Kilpatrick  
Clean Rooms: The Common Sense Approach to Effectiveness  
Solid State Technology, March 1984
- 21) H. Steinberger  
Herausforderung Reinraum  
Elektronik 23/1986, S.187
- 22) R. Detzer  
Entwicklungsstand der Reinraumtechnik  
Chemie-Technik 4/1987, S.72
- 23) Reinraumtechnik - Lehrgangsunterlagen der Techn. Akademie  
Esslingen 11/1986
- 24) Unterlagen, Prospekte und Firmenschriften der Firmen:  
Babcock, Meissner & Wurst, Prettl, Weiss

S. Büttgenbach  
H.J. Wagner  
Forschungsinstitut der Forschungsgesellschaft  
für Feingeräte-, Mikro- und Uhrentechnik e.V.  
Breitscheidstr. 2b  
D-7000 Stuttgart 1  
8.87