



INHALT

- 01 - Einführung
- 02 - Das Verbrauchsmaterial
- 03 - Gefährdung der Prozess-Ausbeute
- 04 - Glaubensrichtungen der Anwender
- 05 - Wege der Kostensenkung
- 06 - Möglichkeiten der Materialauswahl
- 07 - Herabsetzung der Verbrauchs-
material-Qualität
- 08 - Auswirkungen
- 09 - Drei Thesen des Autors
- 10 - Die Qualitätsprüfung beim
Anwender
- 11 - Fehlerhafte Prüfmethoden
- 12 - Unterschwellige Einflüsse auf ein
Prüfergebnis
- 13 - Zusammenfassungen

Qualitäts-Optimierung des Reinraum-Verbrauchsmaterials

Win Labuda
Clear & Clean - Forschungslabor

Einführung

Die Gruppe *Reinraum-Verbrauchsmaterial* umfaßt Reinigungstücher, Papier, Handschuhe und Reinraum-Bekleidung. In diesem ersten Teil des Aufsatz sollen jedoch ausschließlich die *Reinraum-tücher* und das *Reinraum-Papier* behandelt werden.

Das wischende Reinigen gehört seit Jahrtausenden zu den Grundlagen der menschlichen Zivilisation. Ein beachtlicher Teil der Arbeitszeit des Menschen betrifft das wischende Reinigen. Weltweit werden jährlich etwa 4 Milliarden Quadratmeter Vliesstoffe zu Reinigungstüchern verarbeitet, welche einen Marktwert von über 5,4 Milliarden DM haben. Da verwundert es ein wenig, dass sich weder die physikalischen, die chemischen noch die Arbeitswissenschaften mit dem Vorgang des wischenden Reinigens jemals ausreichend intensiv beschäftigt haben. Auch in unserem HiTech-Zeitalter haben sich in einigen Spezialgebieten wischende Reinigungsverfahren auf höchstem technischen Niveau etabliert. Dazu gehört insbesondere die Sparte *Reinraumtücher*.

Das Aufzeichnen von Informationen, welche einen physikalischen oder technischen Prozess begleiten, ist so alt wie das Papier selbst. Denken Sie an Gallileis Aufzeichnungen über die Prozesse der Planeten-Mechanik. Es wird seit Jahren davon gesprochen, dass der Computer das Papier ersetzen wird. Bis heute jedoch ist der Bedarf an Reinraum-Papier jedes Jahr gestiegen und so bedarf auch dieses Material einer physikalischen und chemischen Einsicht, wenn man Fehler bei dessen Einsatz und Bewertung vermeiden will. Reinraum-Betreiber finden sich zum größten Teil in der Halbleiter-, Computer-, Pharma- oder optischen Industrie. Die dort eingesetzten Materialien, sowie deren Fertigungs- und Prüfverfahren unterscheiden sich erheblich von denen in den Faserstoff-Industrien Textil und Papier. So kommt es oftmals zu Mißverständnissen hinsichtlich produktgemäßer Anwendung und im physikalischen Sinne sinnvoller Anwender-Prüfungen für das *Reinraumentuch* aber auch für das *Reinraum-Papier*. In diesem Aufsatz werden technische Zusammenhänge aufgezeigt und es werden dem Anwender des Verbrauchsmaterials praktikable Lösungen für die Auswahl desselben angeboten. Gleichzeitig werden auch unbedenkliche Methoden praxisnah simulierter Eignungsprüfungen aufgezeigt.

Das Verbrauchsmaterial,

auf welches sich dieser Aufsatz bezieht, wird nachstehend genauer aufgelistet:

Präzisions-Reinigungstücher

- *Standard-Reinigungstücher*
Aufnahme von Flüssigkeiten, Entfernen von Partikeln, Schmierstoffen, Pasten und Lack, Reinigung von Arbeitsflächen, Glasflächen und Werkzeugen
- *Equipment-Reinigungstücher*
Reinigung der Geräte, Apparate und des Maschineninnern (Equipment)
- *Optik-Reinigungstücher*
Reinigung von optischen Glasoberflächen und Spiegeln
- *Boden-Reinigungs-Tücher*
Lösen und Aufnehmen der Verunreinigung von den Reinraum-Böden, welche oftmals eine scharfkantige Lochstruktur aufweisen

Partikelquellen im Reinraum

- *eingebraachte Partikel*

Umgebungsluft des externen Raums
Umgebungsluft der internen Räume
Ablagerungen auf der Bekleidung
Inertgas und Ätzgas-Partikel
Partikel in den Prozess-Medien
- *erzeugte Partikel*

Atmung des Menschen
Verbrauchsmaterial-Abrieb
Migration durch die Bekleidung
Reaktionsprodukte vom Prozess
prozessbedingter Abrieb
prozessbedingtes Wachstum
feinstofflicher Substanz

Tafel 1 Partikelherkunft im Reinraum

Reinraum-Papiere

- *als produktbegleitende Laufprotokolle*
in Formularform, welche zumeist aus mehreren DIN-A5 Blättern zu Heften zusammengebunden sind. Dort werden die technischen Daten der verschiedenen Fertigungschargen (lots) eingetragen.
- *als Informationsträger*
innerhalb des Reinraums, wie z.B. Betriebsanleitungen von Maschinen und Anlagen
- *als Zwischenleger*
zur oberflächenschonenden Trennung stapelbarer, flacher Produkte
- *als Notizbücher*
mit Rückenbindung zum Festhalten und Nachschlagen von Aufzeichnungen und Notizen

Die Funktion des Reinraums

Der Reinraum erfüllt die Aufgabe, die Stäube der Umgebungsluft während des Fertigungs-Prozesses vom gefertigten Produkt fernzuhalten. Die meisten industriellen Fertigungsprozesse finden deshalb in Reinräumen statt, weil bei normaler Fertigungsumgebung die prozentuale Fertigungsausbeute (Yield) dieser Prozesse erheblich geringer ausfallen würde. Solche Prozesse sind z. B. die Fertigung von

optischen Komponenten, integrierten Halbleitern, Plattenspeichern, Hybrid-Schaltungen, Komponenten der Mikromechanik, Liquid Crystal Displays und Datenträgern.

Partikel in der Umgebungsluft sind nicht die einzigen Verunreiniger, welche die Fertigungsausbeute mindern können. Bei der Halbleiterfertigung z. B. sind es auch Partikel aus Inertgasen, Ätzzgasen, den Prozessmedien wie DI-Wasser, Säuren und Laugen sowie Reaktionsprodukte, welche durch den Fertigungsprozess selbst entstehen, z. B. Ätzzrückstände und Polymere aus der Lack-Entfernung und nicht zuletzt auch das Reinraum-Verbrauchsmaterial und der Mensch als atmendes Wesen mit seiner Bekleidung. „Reinraum“ sind in Wirklichkeit zwei oder mehr ineinander verschachtelte, reine Systeme (Tafel 2).

Im „externen“ Reinraum, in dem sich der Mensch bewegt, befinden sich Maschinen, Apparate und Geräte, die in ihrem Innern wiederum ein hohes Maß an Reinheit aufweisen. Sie bilden eine Vielzahl an internen Reinräumen. Auch Reinräume sind nur relativ rein. Ein gewisses Maß an Rest-Verunreinigung ist auch dort unvermeidbar. Die Verunreinigung des externen Reinraums dringt zu einem gewissen Teil in das freie Volumen der internen Reinräume (Equipment) ein. Wie viel eindringt, ist abhängig davon, wie sehr die internen Räume vom externen Reinraum gegen das Eindringen von solchen Verunreinigern geschützt ist. Dieser Schleusenfaktor ist von den Geräteherstellern in den vergangenen Jahren deutlich erhöht worden.

Die Verunreinigungen eines Reinraums teilen sich in zwei Gruppen:

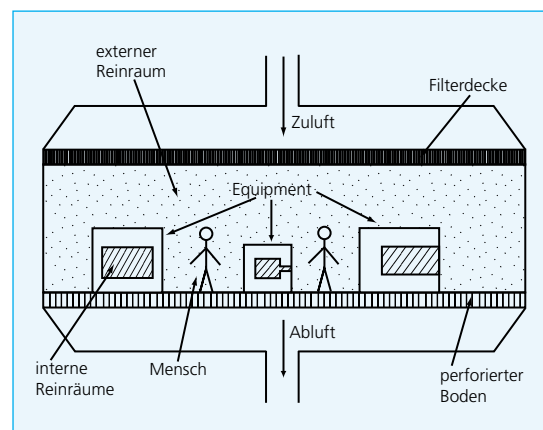
- *Schwebstoffe* in der Reinraumluft
- *Partikel-Ablagerungen* auf den Oberflächen des Reinraums

Die *Schwebstoffe* werden maschinell (gefilterte Zuluft > verunreinigte Abluft) stets auf einem gleichen Niveau gehalten, welches permanent überwacht wird. Die *Ablagerungen* lassen sich in ihrer Menge nicht messen. Deren Menge ist jedoch ungleich größer als die der Schwebstoff-Partikel. Beide *Verunreiniger* - Schwebstoffe und Ablagerungen - verteilen

sich nicht im Rahmen einer mathematisch nachvollziehbaren Funktion. Durch wechselnde Haftungs- oder Verankerungsbedingungen werden ständig Partikel von ihrem Ruheort an einer Oberfläche freigesetzt und werden dann luftgetragen. Gleichzeitig sedimentieren luftgetragene Partikel, um wieder auf einer Oberfläche einen Ruheort zu finden. Es werden auch Partikel und andere Verunreiniger durch Kontaktübertragung vom Menschen und seiner Kleidung auf die Reinraum-Oberflächen übertragen. Ein Teil der Verunreinigung im Reinraum wird im Reinraum selbst erzeugt. Daran ist auch und insbesondere das *Verbrauchsmaterial* beteiligt.

Die Gefährdung der Prozess-Ausbeute

Wegen der erhöhten Reinheitsanforderungen im Reinraum unterscheidet sich das dort eingesetzte Verbrauchsmaterial deutlich von ähnlichen Materialien, die bei *nicht reinen* Arbeitsprozessen Einsatz finden. Die Verunreinigung, welche beim Einsatz des Reinraum-Verbrauchsmaterials entsteht, ist im Wesentlichen *Partikel- und Faserabrieb*, welcher - als ein Teil reinraum-immanenter Partikelströme - im ungünstigen Falle auf die Produktoberfläche gelangt und das Produkt unbrauchbar macht. In anderen Fällen können sich z. B. insbesondere durch den Einsatz nicht optimal ausgewählter Reinigungstücher die Wartungs-Zeiten bis zur Wiederinbetriebnahme sehr teurer Anlagen erheblich verlängern und auf diese Weise die Prozesskosten erhöhen. Deshalb sollen die Oberflächen des Verbrauchsmaterials so beschaffen sein, dass die Freisetzung von Par-



Tafel 2 Verunreinigungen im Reinraum (schematische Darstellung)

tikeln, Fasern, Faserfragmenten, chemischen Inhaltsstoffen und Oberflächen-Ablagerungen verhindert wird. Auch wenn dies nicht vollends erreichbar ist, so ist es doch wichtiger Teil einer vielfältig angelegten *Vermeidensstrategie* mit dem Ziel, die Fertigungs-Ausbeute möglichst hoch zu halten. Ob und bis zu welchem Qualitätsniveau des Verbrauchsmaterials diese *Vermeidensstrategie* ihre Berechtigung hat, ist nach Wissen des Autors bisher nicht systematisch untersucht worden. In der Literatur wurden keine Informationen gefunden, welche für bestimmte reinraumgebundene Fertigungsprozesse eine gesicherte Beziehung zwischen z. B. Reinigungstuch-Beschaffenheit und Prozess-Ergebnis nachweisen konnten (Tafel 3). Es besteht unter Reinraum-Ingenieuren und Beauftragten jedoch erfahrungsgestützte Einigkeit darüber, dass dekontaminierte Gestricke aus Polyestergeräten (Equipment-Tücher) bei ihrem Einsatz weniger Partikel und Fasern freisetzen als z. B. Polyester-Zellstoff-Vliese (Standard-Tücher) und aus diesem Grunde für kritische Reinigungsvorgänge zu bevorzugen sind.

Die konstruktive und qualitative Beschaffenheit der Reinraumtücher lässt sich im Hinblick auf nachteilige Auswirkungen auf die Prozesskosten in zwei verschiedene Prozessgruppen unterscheiden. Das sind:

- *Prozessgruppe I* - Prozesse mit gesicherter Abhängigkeit zwischen Verbrauchsmaterial-Qualität und Prozesskosten
- *Prozessgruppe II* - Prozesse mit hypothetischer Abhängigkeit zwischen Verbrauchsmaterial-Qualität und Prozess-Kosten.

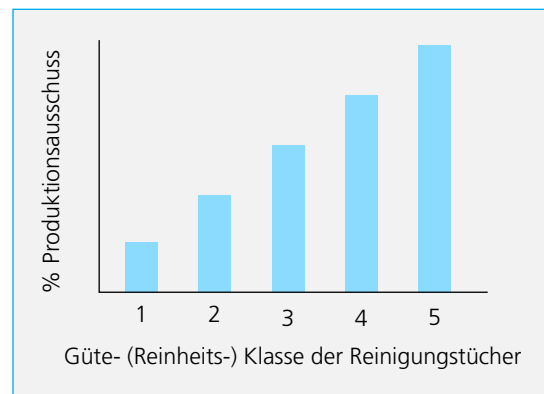
Auf beide Prozessgruppen soll nachstehend näher eingegangen werden.

Prozessgruppe I - Prozesse mit *gesicherter* Abhängigkeit zwischen Verbrauchsmaterial-Qualität und Prozesskosten:

Ein Beispiel für die *gesicherte* Abhängigkeit der Prozesskosten von der Verbrauchsmaterial-Qualität ist die vorbeugende Wartung von Plasma-Ätzmaschinen. Diese unterliegen während ihres Betriebs einer starken Verschmutzung. Sie werden deshalb turnusmäßig einer vorbeugenden Wartung unterzogen.

Dazu werden sie demontiert und dann durch Abätzverfahren gereinigt und gespült. Die nicht demontierbaren Teile werden mit Hilfe von Equipment-Reinigungstüchern gereinigt. Nach der Montage werden diese Geräte nochmals durch Reinigungstücher gereinigt. Anschließend erfolgt eine Konditionierung durch abwechselndes Vakuumpumpen und Belüften (pump down and vent). Danach werden Test-Wafer in das Gerät eingegeben und die Verunreinigung derselben wird gemessen. Beim Einsatz unzureichender Reinraumtücher kann man Faserfragmente derselben zum Beispiel auf der Oberfläche der Testwafer beobachten. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis die Partikel- und Fasermengenge so gering ist, dass die Anlage wieder zum Einsatz freigegeben werden kann. Werden bei diesem Prozess Reinigungstücher eingesetzt, welche selbst keinen hohen Reinheitsgrad haben oder nicht abriebfest sind, so erhöht sich die Anzahl der pump-and-vent-Zyklen erheblich und die Ausfallzeit (down-time) der Plasma-Ätzmaschine verlängert sich. Solche Maschinen kosten etwa 2 Mio. DM und die Ausfallkosten pro Stunde sind entsprechend hoch.

Die *Reinigungstuch-Kosten* spielen bei diesem Prozess kaum eine Rolle, wenn nur die Wiederinbetriebnahme der Anlage durch ein *besseres Tuch* ein wenig früher erfolgen kann. Ein weiteres Beispiel für die Prozessgruppe I ist die Reinigung von Druck-Sieben bei der Herstellung von Hybridschaltungen der Elek-



Tafel 3 Beispiel hypothetischer Zuordnung von Verbrauchsmaterial-Qualität zu Veränderung der Fertigungsausbeute (1 ultrafeines Gestricke, gewaschen, versiegelt; 2 Gestricke, gewaschen, versiegelt; 3 Gestricke, gewaschen, unversiegelt; 4 Vliesstoff, versiegelt; 5 Vliesstoff, unversiegelt)

tronik. Bei diesem Prozess werden elektrisch leitfähige Pasten im Siebdruck-Verfahren auf ein Keramik-Substrat aufgebracht und anschließend thermisch auf dem Substrat verfestigt. Beim Siebdruck-Verfahren kommt es immer wieder vor, dass die Pasten im Sieb trocken werden oder dass Partikel, welche auf das Sieb gelangt sind, die Präzision des Druckbildes beeinträchtigen. In diesen Fällen muß die Paste aus dem Sieb entfernt und das Sieb gereinigt werden. Beides geschieht oftmals mit Hilfe von Tüchern. Wenn diese Reinigungstücher nun beim Wischvorgang zum Abrieb von Faserfragmenten oder Meso-Partikeln neigen, dann macht sich dies sofort durch eine reduzierte Prozessausbeute bemerkbar. Auf diese Weise konnte ein großer deutscher Hersteller von Hybridschaltungen seine Prozessausbeute allein durch den Einsatz von besser geeigneten Reinigungstüchern um 35% erhöhen. Auch hier spielt der Preis eines Tuchs keine Rolle, wenn die Einsparungen ein Vielfaches der erhöhten Reiniungstuch-Kosten betragen.

Weitere Beispiele ließen sich für die Reinigung von Laser-Spiegeln, von optischen Gläsern bei den Prozessen der Flachbildschirmfertigung nennen. Das gleiche gilt auch für die Fertigungsprozesse der Speicherplatten-Montage. In diesem Bereich werden zusätzlich oftmals *Reinigungsstäbchen* eingesetzt, wofür im wesentlichen das gleiche gilt. Es gibt viele Prozesse, bei denen durch den Einsatz verbesserter (und somit zumeist teurerer) Reinigungstücher erhebliche Einsparungen möglich sind.

Prozessgruppe II - Prozesse mit *hypothetischer* Abhängigkeit zwischen Verbrauchsmaterial-Qualität und Prozesskosten:

Zu dieser Prozessgruppe gehören generell alle Prozesse, welche durch luftgetragene Partikel oder Partikelwanderung auf Oberflächen beeinträchtigt werden, bei denen eine gesicherte Zuordnung der *Prozesskosten* : *Verbrauchsmaterial-Qualität* jedoch nicht möglich ist. Das in diesem Aufsatz beschriebene Reinraum-Verbrauchsmaterial besteht wesentlich aus Faserstoffen (Textil, Papier). Diese sind ihrer Natur nach von weicher, poröser Beschaffenheit und neigen beim Gebrauch oder beim Kontakt mit anderen Oberflächen zu Faser- und Partikelabrieb. Sie gehören also zu den *Verunreinigern* des Reinraums. Wieviele

Partikel und chemische Inhaltsstoffe des Verbrauchsmaterials freigesetzt werden dürfen, so dass eine Beeinträchtigung der Fertigungsausbeute auch tatsächlich eintritt, ist die *Kernfrage der Material- und Kostenoptimierung* für diese Produktgruppe. Erwünscht wäre die Möglichkeit einer direkten Zuordnung von Verbrauchsmaterial-Qualität zur Veränderung der Fertigungsausbeute (Yield) (Tafel 3).

Das Reinraum-Verbrauchsmaterial ist jedoch nur *eine von mehreren* Verunreinigungsquellen bei den Prozessen des reinen Arbeitens. Eine Zuordnung von Defekten des gefertigten Produkts zu verschiedenen Gruppen der Defektpartikel-Herkunft ist daher nur schwer möglich. Der Defektdichte-Ingenieur kann selten und nur bei sehr großen Partikeln sicher sein, ob ein Defekt-Partikel, welches den Formfaktor eines Faserfragments hat, z. B. von einem Reinraum-Reinigungstuch, von der Reinraum-Unterbekleidung, von der Reinraum-Oberbekleidung oder von reinraumfremden Produkten stammt.

Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik besagt, dass die *Entropie* (Unordnung) eines isolierten Systems ohne die Einbringung von ordnungserhaltender Arbeit stets zunimmt. Betrachtet man den Reinraum als isoliertes System, so folgt daraus, dass zur Erhaltung von Reinheit (Ordnung) Arbeit aufzubringen ist.

In diesem Sinne bestehen im wesentlichen zwei Systeme, welche partikuläre aber auch flüssige und pastöse Verunreinigungen im Reinraum auf dem Weg vom Ort der Entstehung bis zum Ort der Gefährdung erheblich reduzieren:

- Der laminare Luftstrom

Der Transfer unerwünschter Materie vom Reinraum-Verbrauchsmaterial in den Reinraum hinein erfolgt annähernd kontinuierlich, aber der Reinraum selbst muß als ein Querstrom-Filter mit großer Abscheidekapazität betrachtet werden (siehe Tafel 2). Dies ist so, weil ein erheblicher Teil der luftgetragenen, partikulären Verunreinigung des Reinraums durch den dort vorhandenen laminaren Luftstrom in den Bodenbereich hinein abgeführt und vom Abluftstrom unterhalb des Bodens aufgenommen wird. Der Reinigungsfaktor dadurch beträgt etwa einen Klassensprung d. h. bei 10 Parti-

keln $>0,5 \mu\text{m}$ pro Kubikfuß nahe der Filterdecke werden im Bodenbereich bereits etwa 100 Partikel gemessen. Die Reinigungseffizienz der Laminarströmung beträgt also etwa 90%.

- Die turnusmäßige Reinigung

Für die Oberflächen im Reinraum ist zumeist eine turnusmäßige, wischende Oberflächen-Reinigung vorgesehen, wodurch die bislang angewachsene Verunreinigung immer wieder reduziert wird. Durch dieses Verfahren wird einem unendlichen Zuwachs der Oberflächen-Verunreinigung vorgebeugt. Ein Teil der eingesetzten Reinraumtücher z. B. wird für diesen Zweck eingesetzt.

Zu unklar sind Entstehung, Herkunft, Wege, Verbleib und Beseitigung der partikulären Verunreinigung im Reinraum, um für jede einzelne Verunreiniger-Gruppe nachvollziehbar zu sein. So sind viele Annahmen zum Thema partikelgebundener Defektursachen des gefertigten Produktes *hypothetisch* und müssen im Rahmen der Organisation einer sinnvollen Produktauswahl des Verbrauchsmaterials auch so betrachtet werden.

Der Zwang zu einer Hypothese über ein physikalisches Geschehen zeigt stets ein vorhandenes Wissensdefizit, aber die Tatsache des physikalischen Geschehens und seiner Auswirkungen auf den Prozess bleibt dennoch bestehen.

Das Gefährdungspotential für die reinen Produktions-Prozesse durch partikuläre Verunreinigungen der Oberflächen und der Luft ist in der Literatur vielfach erwähnt worden. In den vergangenen Jahren wurde dieses Potential durch konstruktive Veränderungen im Bereich des Equipment erheblich reduziert. Das Produkt ist zumindest in der Halbleiterfertigung

während der einzelnen Prozess-Schritte immer weiter von einer natürlichen Fertigungs-Umgebung abgeschirmt worden. Bei der SMIF-Technologie zum Beispiel kommt das Produkt während der Prozess-Schritte der Halbleiter-Fertigung mit der Normalatmosphäre kaum noch in Berührung.

Glaubensrichtungen der Anwender

Die Reduzierung des Gefährdungspotentials durch apparativen Aufwand und der Kostendruck in der Halbleiterindustrie haben eine Diskussion über den Einsatz von Reinraum-Verbrauchsmaterial von *reduzierter Qualität bei reduziertem Preis* zur Folge gehabt. Dabei haben sich zu diesem Thema bei den Reinraum-Betreibern vier Meinungsgruppen gebildet, welche im Wesentlichen unterschiedliche Minimalgrenzen für die Qualität des Reinraum-Verbrauchsmaterials als akzeptabel betrachten.

Meinungsgruppe 1 -

Die *absolute Vermeidensstrategie*: Bei dem verschwindend geringen Anteil der Kosten des Reinraum Verbrauchsmaterials von < 1 Promille relativ zu den Fertigungs-Gesamtkosten und bei der hohen Expositionszeit dieses Materials beim Mitarbeiter ist es sinnvoll, das beste und reinste Material einzusetzen, welches verfügbar ist (bei Reinigungstüchern z. B. der ausschließliche Einsatz hochwertiger, gewaschener Gestricken in der gesamten Fertigung). Die ständige intensive Auseinandersetzung mit dem Einsatz von Reinraum-Verbrauchsmaterial geringerer Qualität ist teurer als der dadurch entstehende mögliche Nutzen.

Meinungsgruppe 2 -

Der *statistisch orientierte Mittelweg*: Solange eine direkte Zuordnung zwischen *dynamischem Reinheitsgrad* des Verbrauchsmaterials

Möglichkeiten	positiv	negativ
die technischen Angaben der Produkthersteller zu akzeptieren	wenig Arbeit	Unsicherheit betreffend den Wahrheitsgehalt der Angaben
vergleichende Prüfungen bei einem wiss. Institut durchführen zu lassen	neutrale vergleichende Ergebnisse	teuer und nicht wenig Vorarbeit, um die Aufgabe für das Institut zu definieren
Prüfungen im Labor eines Herstellers selbst durchzuführen - an mitgebrachten und vorher codierten Mustern	preiswert, geschultes Personal, Routineprüfmethode	wenn die Prüflinge vorher nicht gut codiert sind, erfährt der Hersteller (Laboreigner) die Prüfergebnisse der Mitbewerber-Produkte

Tafel 4

und Fertigungsausbeute mit vertretbarem Aufwand nicht möglich ist, wird Reinraum-Verbrauchsmaterial mittlerer Qualität eingesetzt, welches sich möglichst schon über lange Zeiträume bewährt hat. Der Einsatz von Verbrauchsmaterial der unteren Kategorie wird aufgrund des möglicherweise erhöhten Gefährdungspotentials für die Prozessausbeute abgelehnt. Dabei ist der Grundgedanke nicht der tatsächlich eintretende Gefährdungsfall sondern die Erhöhung des statistisch basierten Gefährdungs-Risikos. Hier wird die Erfahrung zum Ausdruck gebracht, dass auch kleinere Verbrauchsmaterial-Probleme Kosten nach sich ziehen, welche die Ersparnisse im Vergleich zum Material der geringsten Qualität schnell übersteigen.

Meinungsgruppe 3 -

Der Weg der *abgestimmten Verhältnisse*: Diese Gruppe meint: Es ist sinnlos, Verbrauchsmaterial von hohem dynamischen Reinheitsgrad einzusetzen, wenn z.B. der Mitarbeiter im Bereich seiner Kleidung selbst nicht den gleichen dynamischen Reinheitsgrad aufweist. Oder beispielsweise ist es nicht sinnvoll, in einer Fertigung, in der keine Handschuhe getragen werden, ionenarme Papiere einzusetzen. Die Abstimmung der Qualität des Reinraum-Verbrauchsmaterials soll sich am bestehenden Oberflächen-Reinheitsgrad der Fertigungs-Umgebung orientieren, wobei der Maßstab die Prozesskomponente mit der *geringsten* Oberflächenreinheit ist.

Meinungsgruppe 4 -

SMIF - Die getrennte Einheit von Produkt und Umgebung: Wo das Produkt nicht mehr mit der natürlichen Umgebung in Berührung kommt, sondern in abgeschlossenen Minienvironments gefertigt wird, besteht eigentlich kaum noch ein Gefährdungs-Potential. Preisgünstiges Verbrauchsmaterial soll ein Teil der Mehrkosten für diese kostenintensive Fertigungsumgebung aufwiegen. Es besteht weltweit keine Einigkeit unter den Anwendern, welcher der vier oben aufgeführten Wege der richtige sei. Weil niemand einen Gegenbeweis zu einer der o. a. kontroversen Meinungen antreten kann, ist es letztlich eine Glaubenssache geworden, welches Verbrauchsmaterial eingesetzt wird. Diese allgemeine Orientierungslosigkeit hat sicher Nachteile: Einer derselben besteht z. B. darin,



Tafel 5 Eine mobile Spenderbox mit Reinraum-Reinigungstüchern kann leicht zu jedem Ort notwendiger Reinigungs-Arbeiten transportiert werden.

dass die Impulse vom Anwender in Richtung Hersteller ausbleiben, welche normalerweise einem Innovationsgeschehen für verbesserte Produkte vorausgehen.

Gemeinsamkeiten

Man kann als Basis sicher einige Grundsätze aufstellen, welche von allen der vorstehend genannten vier Glaubensrichtungen akzeptiert werden:

- ein gewisses Maß an ausbeuterelevanter Verunreinigung durch das Verbrauchsmaterial besteht. Es ist jedoch zur Zeit nicht bekannt, in welcher Größenordnung
- so gut wie nötig - so preiswert wie möglich soll das Material sein
- bei gleichem Preis soll das bessere Material eingesetzt werden
- bei gleichem Preis soll die höhere Behaglichkeits-Stufe eingesetzt werden
- bei Gefährdung der Gesundheit soll das bessere Material auch zum höheren Preis eingesetzt werden

Der Autor möchte aus seiner Erfahrung mit der Entwicklung und Anwendung von Reinraum-Verbrauchsmaterial zunächst die Möglichkeiten aufzeigen (siehe Tafel 4) und dann im Rahmen von vier Thesen sinnvolle Grenzen aufzeigen.

Wege der Kostensenkung

Eine Studie zum Thema Reinigungstücher aus der jüngeren Vergangenheit hat alternative Möglichkeiten der Kostensenkung für den Materialbereich *Reinraum-Reinigungstücher* aufgezeigt, die von der ausschließlichen Fokussierung auf den Materialpreis zu einer eher übergeordneten Betrachtung des gesamten Kostenblocks *wischendes Reinigen* hinweisen. Dort hat der Verfasser ausgeführt, dass im Rahmen der *Reinraumversorgung*, der *arbeitsplatznahen Bereitstellung*, der *Optimierung der Reinigungszeit*, der *gesicherten Einzel-tuch-Entnahme*, der *Optimierung des Feuchte-grades* und der *Entsorgung* von Reinigungstüchern weit größere Kostensenkungspotentiale bestehen, als durch Materialpreissenkungen jemals möglich wären. Hier bestehen in den Betrieben oft kontroverse Interessenlagen zwischen Fertigungs- und Einkaufsabteilung. Eine akute Einsparung auf der Einkaufsebene - *so gering sie auch sei* -, ist stets transparenter und präsenter als eine Einsparung auf der Fertigungsebene - *so groß sie auch sei*. Das ist so, weil Letztere normalerweise in den Unternehmen - abgesehen von gelegentlichen Verbesserungsvorschlägen der Belegschaft - keine Organisationsform hat und im Rahmen komplizierter technischer Sachverhalte viel schwerer darstellbar ist. Auf diesem Gebiet werden in der europäischen Industrie große Fehler begangen. In der erwähnten Studie weist der Verfasser nach, dass bei Arbeitsplatzkosten von DM 2,32 pro Minute in der deutschen Halbleiterindustrie ein Reinigungsvorgang mit einem Reinraumtuch einschl. Materialkosten durchschnittlich etwa 1,85 DM kostet, wobei die durchschnittlichen Materialkosten für ein Reinraum-Reinigungstuch nur mit DM 0,16 eingesetzt sind. Bevor man den materialgebundenen Kostenblock mit einer evtl. Erhöhung des Gefährdungsrisikos von DM 0,16 auf z.B. DM 0,10 senkt, wäre es sicher viel sinnvoller den fertigungsgebundenen Kostenblock von:

- Kosten für einen Wischvorgang	DM 1,85
- Materialkosten des Reinigungstuchs	DM 0,16
- Arbeitsplatzkosten	DM 1,69

z. B. auf DM 1,30 zu senken, denn dieser Bereich verfügt dazu über ein erheblich größeres Potential.

Das wären:

- Reduzierung von Reinigungstuch-Doppelentnahmen durch geeignete Spender
- Reduzierung der Material-Holzeit durch arbeitsplatznahe Anordnung und Erhöhung der Spenderzahl
- Reduzierung der Material-Suchzeit durch arbeitsplatznahe Anordnung und Erhöhung der Anzahl von Spendern
- Reduzierung der Befeuchtungszeit durch Einsatz bereits vorgefeuchteter Tücher
- Verbesserung der Befeuchtungs-Homogenität durch Einsatz feuchter Reinraum-Tücher oder durch Sprühflaschen mit einem Tröpfchendurchmesser oberhalb der Aerosolgrenze
- Erhöhung der Reinigungseffizienz durch Einsatz von Tüchern mit hoher Trockenwisch-Fähigkeit
- Erhöhung der Reinigungseffizienz durch geeignetes Operator-Training
- Reduzierung der Entsorgungszeit durch Erhöhung der Anzahl von Entsorgungsstellen

Manuelles Reinigen gehört in allen Bereichen der Industrie zu den zeitkosten-intensivsten Arbeiten. Das muß mehr beachtet werden. Ersparnismöglichkeiten auf der Fertigungsebene werden zu wenig genutzt, weil damit zunächst vielleicht sogar eine Materialkostenerhöhung verbunden ist. Reinraum-Techniker haben aus Unsicherheit oft nicht den Mut oder der Erfahrung und auch nicht die Zeit, solch eine Maßnahme gegenüber den Einkaufsabteilungen zu vertreten.

Möglichkeiten der Material-Auswahl

Es soll festgestellt werden, welche marktgängigen Alternativen denn überhaupt vorhanden sind, woraus der Anwender seine Auswahl treffen könnte.

Standard-Reinigungstücher: Es kann heute als gesichert gelten, dass sich für die Standard-Aufgaben der Flächenreinigung und spill-control im HL-Reinraum fast überall

hydro-verfestigte Spunlace-Vliesstoffe aus Zellstoff-Polyester-Gemisch durchgesetzt haben. Dies geschieht möglicherweise ohne Beeinträchtigung der Fertigungsausbeute auch in Reinräumen der Klasse 10. Zehn Jahre Erfahrung mit diesem Material bei vielen großen Halbleiter-Herstellern unterstützen diese Feststellung.

Ein Versuch mit Tüchern aus 100 % Cellulose, der in einem großen deutschen Halbleiter-Werk über ein Jahr lief, war deswegen nicht erfolgreich, weil es bei den Reinigungsvorgängen wegen zu geringer Festigkeit des Materials *Zellstoff* zur mechanischen Zerstörung des Tuches kam, bevor der Reinigungsvorgang beendet war. Ein preislich motiviertes downgrading dieses Materials findet seine Grenze also möglicherweise nicht im Bereich der Reinheitsanforderungen, sondern im Bereich der Handhabung.

Einige Reinraum-Betreiber setzen als Standard-Tücher aus ökologischen Gründen Viskose ein, oder in Japan Cupramonium-Vliesstoffe; andere bevorzugen Spinnvliese aus Polypropylen. Bei etwa 4 Millionen an ein deutsches Halbleiterwerk gelieferter Reinigungstücher aus hydroverfestigter Cellulose wurden keine ausbeuterelevanten Probleme bekannt. Unterschiede bei den Standard-Reinraum-Tüchern werden sich in Zukunft nicht so sehr auf die Tücherkonstruktion selbst sondern eher auf die *Bereitstellungs- und Entsorgungsform* derselben beziehen. Vorreiter dieser Entwicklung war die Firma Bosch in Reutlingen, welche bereits vor vielen Jahren in den dort vorhandenen Reinräumen als erste Einzelblatt-Spender für Reinraum-Reinigungstücher eingesetzt hat.

Die untere Qualitätsgrenze der Konstruktion liegt z. Zt. bei einem Vliesstoff-Tuch mit ca. 50% Zellstoffanteil, Rest Polymerfaser. Auswahl-Kriterien sind:
Standard-Tücher

- Anlieferungszustand
 - trocken
 - feucht
- Bereitstellungsform
 - Flachgelege
 - Interfalz im Mobil-Spender
 - Interfalz als Nachfüll-Pac
 - Viertelfalz

Equipment-Reinigungstücher: Auf dem Weltmarkt befinden sich etwa 20 verschiedene Reinraum-Gestricke. Diese finden auch bei den Herstellern von Speicherplatten vorzugsweise Einsatz. Sie unterscheiden sich nach den folgenden grundsätzlichen Auswahl-Kriterien:

- Waschzustand
 - gewaschen
 - ungewaschen
- Kantenschnitt:
 - thermisch
 - mechanisch
- Anlieferungsform
 - gelegt
 - geschüttet
- Anlieferungszustand
 - trocken
 - feucht

Ganz wesentliche Unterschiede zwischen den einzelnen Produkten bestehen jedoch bei den Kennwerten Partikelfreisetzung, Reinigungseffizienz, Wasseraufnahme pro Zeiteinheit, Flüssigkeitsrückstand auf der gereinigten Oberfläche und Triboelektrizität (Tafel 6). Auch gibt es heute noch einige Anbieter von ungewaschenen Gestricken und solchen ohne thermofixierte Ränder.

Mehrweg-Tücher

Im Rahmen notwendiger Kosten-Einsparungen hat sich zeitweise seit vielen Jahren immer wieder das Thema *Mehrweg-Tücher* etabliert. Während das Thema für den Bereich der Halbleiter-FABs wegen der Verschiedenartigkeit der Verschmutzungsreste (Kationen, Lackreste etc.), welche sich als Restbestände auch noch in den gewaschenen Tüchern befinden, uninteressant ist, besteht doch bei den Herstellern von Speicherplatten eine gewisse Neigung zum Mehrfach-Produkt. *Dafür* spricht die Hoffnung auf eine Ersparnis. *Dagegen* sprechen die folgenden kostenträchtigen Handhabungen, welche bei dem Kosten-Niveau eines europäischen Reinraum-Betriebs in die Kalkulation einbezogen werden müssen und das Mehrwegtuch teurer werden lassen als das Einwegtuch.

- Einsammeln der Tücher
- Trennen von stark verschmutzten Tüchern

- Verpacken in transportfähige Gebinde
- Transportieren zum Ort der Wäscherei und Waschen
- Trocknen unter Reinraum-Bedingungen
- Verpacken in entnahmefähige Gebinde
- Rücktransport derselben zum Ort des Einsatzes
- Prüfen des Reinheitszustands
- Prüfen der Reinigungs-Effizienz

Hinzukommt, dass endlich der Einsammler in der Lage sein müßte, festzustellen, ob es sich um ein mehrfach gewaschenes Tuch handelt, welches bereits entsorgt werden muß oder um ein neues oder wenig genutztes.

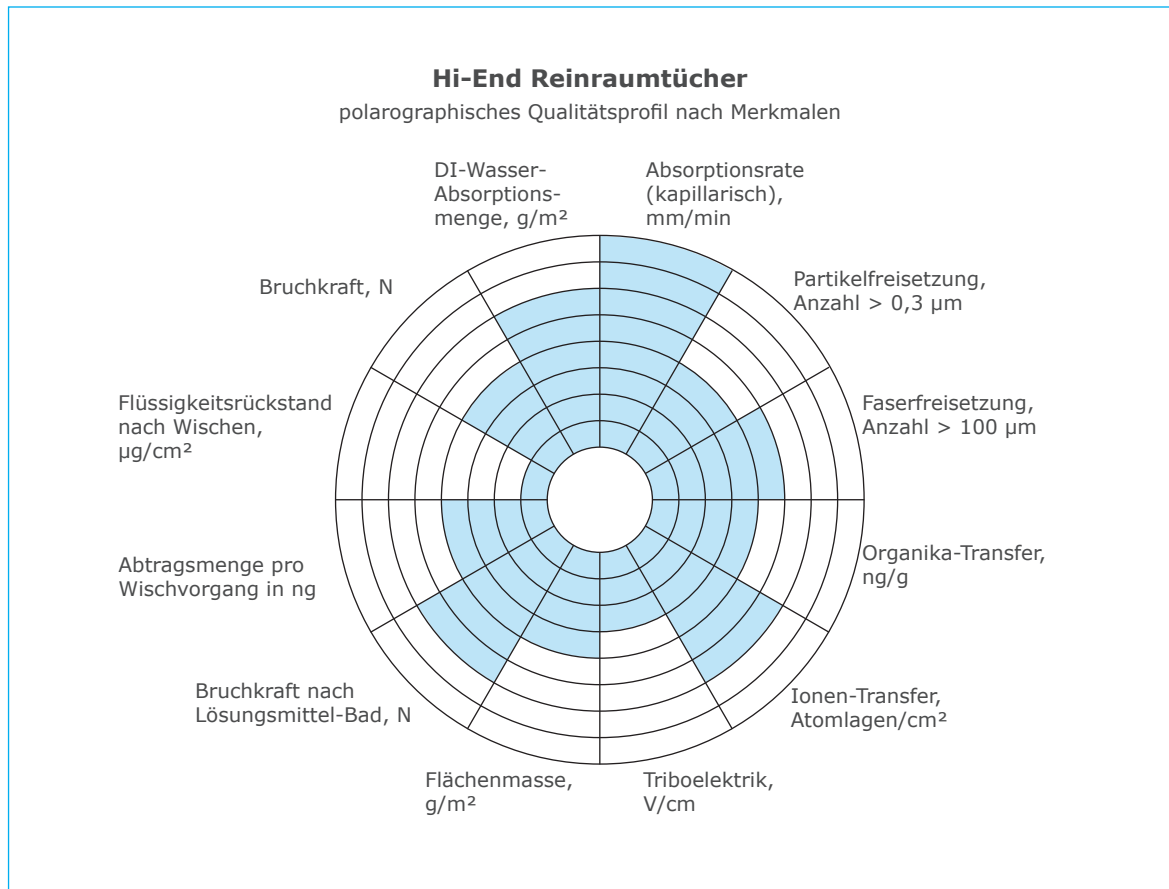
Reinraum-Papier

Reinraum-Papier (lose gestapelte Blätter): Reinraum-Papiere werden zumeist als Aufzeichnungsmedium für Fertigungsdaten gebraucht. Sie befinden sich bei der Halbleiterfertigung oft als Prozess-Aufzeichnungsdaten in Scheibennähe. Reinraum-Papiere müssen in Druckern und Kopiergeräten bedruckbar sein. Es gibt weltweit fünf bekannte Anbieter von Papieren auf Zellstoff-Basis und von sehr unterschiedlicher Qualität.

Auswahlkriterien sind:

- generelle Kriterien

- Tonerhaftung
- Weiterreißfestigkeit
- Beschreibbarkeit
- Maschinenfähigkeit



Tafel 6 Das Kreisprofil erlaubt eine schnelle, vergleichende Übersicht über die Qualitätsmerkmale verschiedener HiTech-Reinigungstücher

- reintechnische Kriterien

- Partikelfreisetzung Kante
- Partikelfreisetzung Fläche
- Ionenfreisetzung
- Triboelektrik

Es ist nicht ratsam, Reinraum-Papier ohne vorherige Qualitätsprüfung der reintechnischen Kriterien einzusetzen. Die Qualitätsunterschiede der Produkte der einzelnen Hersteller sind bei diesem Produkt ganz erheblich.

Reinraum-Notizbücher: Generelle Auswahlkriterien sind bei diesen Produkten:

- Kunststoff-Deckel
- Spiralbindung aus Kunststoff
- innen Reinraum-Papier
- Anlieferung in Kunststoff-Folie

Überall dort, wo technische Entscheidungen auf ein Gemisch von Erfahrungen und Vermutungen gestützt werden müssen und nicht auf beweisbaren Fakten beruhen, erblüht naturgemäß eine ausgedehnte Meinungsvielfalt (siehe Tafel 7). Solche Bereiche werden auch am ehesten Teil der Sparprogramme der Materialwirtschaftler. Diese konzentrieren sich jedoch zumeist auf den Materialpreis. Mit diesem Preisdruck ist kurz- oder langfristig aber oft auch ein *downgrading* der Materialqualität verbunden, welches sich wiederum nachteilig auf die Prozesskosten auswirken kann. Dabei sollte beachtet werden, dass sich die Kosten des Reinraum-Verbrauchsmaterials in drei Gruppen gliedern lassen. Diese müssen stets im

Zusammenhang gesehen werden. Reinraum-Verbrauchsmaterial kostet nicht nur Geld als Material, sondern beeinflusst auch mehr oder weniger die Kosten des Fertigungsprozess und so entstehen drei Kostengruppen:

- Kosten der Prozessgefährdung (Ausbeuteminderung)
- Kosten der Handhabung (Zeitkosten) und
- Kosten des Materials

Downgrading der Verbrauchsmaterial-Qualität

Immer wenn in einer der betroffenen Industrien der Reintechnik einmal die Gewinne rückläufig sind, wird die durchaus berechtigte Frage nach Kostensenkungen auch beim Reinraum-Verbrauchsmaterial gestellt. Dabei müssen auch die Möglichkeiten eines downgrading erwogen werden. Downgrading bedeutet den Ersatz des zur Zeit im Einsatz befindlichen Verbrauchsmaterials gegen ein anderes von geringerer aber möglicherweise noch ausreichender Qualität im Sinne einer Senkung der Materialkosten. Wegen der extrem langen Zeiträume zwischen Ursache und Wirkung in den Fertigungsprozessen der Reintechnik müssen hier zumeist Entscheidungen getroffen werden, ohne dass technisch fundierte Fakten vorliegen, an denen sich der Reinraum-Ingenieur orientieren könnte. So ist es z. B.

Meinungsgruppen der Anwender	Zusammenfassung von Anwendermeinungen dazu, wie das Reinraum-Verbrauchsmaterial beschaffen sein sollte
Meinungsgruppe 1	<i>Die absolute Vermeidensstrategie:</i> Bei dem geringen Anteil der Kosten des Reinraum Verbrauchsmaterials relativ zu den Fertigungs-Gesamtkosten und bei der hohen Expositionszeit dieses Materials beim Mitarbeiter ist es sinnvoll, das beste und reinste Material einzusetzen, welches verfügbar ist.
Meinungsgruppe 2	<i>Der statistisch orientierte Mittelweg:</i> Solange eine direkte Zuordnung zwischen dynamischem Reinheitsgrad des Verbrauchsmaterials und Fertigungsausbeute mit vertretbarem Aufwand nicht möglich ist, wird Reinraum-Verbrauchsmaterial mittlerer Qualität eingesetzt, welches sich möglichst schon über lange Zeiträume bewährt hat.
Meinungsgruppe 3	<i>Der Weg der abgestimmten Verhältnisse:</i> Diese Gruppe meint: Es ist sinnlos, Verbrauchsmaterial von hohem dynamischen Reinheitsgrad einzusetzen, wenn z.B. der Mitarbeiter im Bereich seiner Kleidung selbst nicht den gleichen dynamischen Reinheitsgrad aufweist.
Meinungsgruppe 4	<i>SMIF - Die getrennte Einheit von Produkt und Umgebung:</i> Wo das Produkt nicht mehr mit der Fertigungsumgebung in Berührung kommt, sondern in abgeschlossenen Minienvironments gefertigt wird, besteht ein verringertes Gefährdungspotential. Preisgünstigeres Verbrauchsmaterial soll einen Teil der Mehrkosten für die komplizierte Reinigung z.B. der Minienvironments aufwiegen.

Tafel 7

nicht möglich, mit Sicherheit vorauszusagen, ob ein Reinraum-Reinigungstuch einer geringeren Güteklasse z. B. zu einer verminderten Prozess-Ausbeute führen wird oder nicht. Wenn sich jedoch in Randbereichen technischer Prozesse Fakten nicht unmittelbar erschließen lassen, so bildet eben die *fachmännisch gestützte Vermutung* (expert based assumption) den höchsten z. Zt. erzielbaren Wahrheitswert. Die Ergebnisse der fachmännisch gestützten Vermutung sind deshalb zur Vermeidung von Nachteilen für das Prozessgeschehen so lange als verbindliche Wahrheit zu betrachten, bis ein höherer Erkenntnisstand vorliegt. Diese mittelbare Erkenntnismethode hat sich weltweit auch bei der Auswahl des Reinraum-Verbrauchsmaterials durchgesetzt. Eine solche Methode ist jedoch stets nur so gut wie die Fachkompetenz der Personen, von denen sie genutzt wird. Man kann daher davon ausgehen, dass das zur Zeit eingesetzte Reinraum-Verbrauchsmaterial die fachmännisch gestützte Vermutung in ihrer Bandbreite am besten reflektiert.

Denjenigen Technikern, welche der Meinungsgruppe 3 (der Weg der reduzierten Verhältnisse) nahestehen, sollen nachstehend jedoch die folgenden Argumente entgegengehalten werden: Unterschiede bei der dynamischen Oberflächen-Reinheit einzelner Prozess-Schritte oder Hilfsstoffen (wie z. B. Verbrauchsmaterial) berechtigen deswegen nicht zu der Annahme, der gesamte Prozess könne auf den Reinheitsgrad der Komponente mit der geringsten dynamischen Oberflächenreinheit reduziert werden, weil sich im Prozess das Maß aller Unreinheiten addiert und unter der Annahme einer insgesamt reduzierten Reinheit der Prozessumgebung eine Beeinträchtigung des Prozess-Ziels *nicht ausgeschlossen* werden kann. Das heißt in der Praxis: Auch wenn der Overall des Operators nicht der geforderten dynamischen Oberflächenreinheit entspricht, so dürfen dennoch nicht auch das Reinraum-Papier, die Reinraumbücher und alles sonstige Material auf eine geringere dynamische Oberflächen-Reinheit reduziert werden.

Der Begriff *dynamische Oberflächenreinheit* bezieht sich auf die Reinheit einer Oberfläche im einsatz-aktiven Zustand. Als Beispiel lässt sich hier das Reinigungstuch anführen, welches bei der Betrachtung seiner *stati-*

schen Oberflächenreinheit lediglich die in ihm vorhandenen Partikel, Faserfragmente und schichtförmigen Ablagerungen auf den Faseroberflächen aufweist. Im Zustand seines Gebrauchs kommt jedoch eine bestimmte Menge von Partikeln hinzu, welche durch den Abrieb des Fasermaterials durch die Reibung auf einer Oberfläche generiert werden. Mit dieser vermehrten Partikelanzahl steigt gegebenenfalls auch die Menge der während der Handhabung in die Umgebung hinein freigesetzten Partikel.

Bei kritischer Annäherung an das downgrading erlaubt die Vorstellung einer drastischen Reduzierung der Qualität des Verbrauchsmaterials bis hin zur denkbaren Minimalgrenze ein aufschlussreiches gedankliches Experiment. Reduzierung bis zur *Minimalgrenze* würde bedeuten:

- Servietten-Papier anstelle von Reinigungstüchern aus Polyester-Zellstoff-Gemischen
- Recycling-Papier anstelle von Reinraum-Papier
- Das Weglassen jeglicher Handschuhe in der Fertigung
- Das Weglassen jeglicher Reinraum-Bekleidung
- Das Tragen von Straßenschuhen

Geht man noch einen Schritt weiter, so könnte man sich auch vorstellen:

- Das Arbeiten bei ungefilterter Luft

Selbst unter der Annahme dass alle diese Schritte zunächst rückwirkungsfrei durchführbar wären, bleibt dennoch die Tatsache: Das *konkrete* Wissen über das Maß der Beeinträchtigung der Fertigungsausbeute durch die o. a. Maßnahmen wäre erst dann vorhanden, wenn das Experiment über einen relativ langen Zeitraum stattgefunden hätte. Zu diesem Zeitpunkt sind jedoch die dann möglicherweise eingetretenen Umstände nicht mehr kurzfristig umkehrbar.

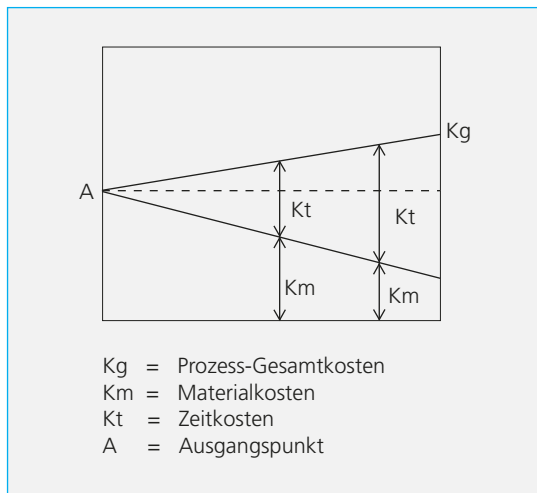
Es ist also kaum vorstellbar, dass sich ein Reinraum-Betreiber findet, der bereit ist, eine Wafer-FAB mit Erstellungskosten von über 500

Millionen Euro über einen längeren Zeitraum unter den oben genannten Minimalbedingungen zu betreiben – mit dem Risiko, am Ende festzustellen, dass er im Jahr € 50.000,- an Verbrauchsmaterial eingespart hat, aber die Wafer-FAB für ein *general cleaning* eine Zeitlang geschlossen werden muss. Als Alternative zu der o. a. angedachten Mög-

lichkeit der spontanen Umstellung des Betriebs einer FAB auf minimale Verbrauchsmaterial-Qualität bietet sich gedanklich auch die Möglichkeit der schrittweisen Qualitätsreduzierung des Verbrauchsmaterials über längere Zeiträume bis zum Auftreten erster akuter Ausfälle mit nachfolgender geringfügiger Wiederanhebung des Qualitätsniveaus.

Produktgruppe	A - hochwertigstes bekanntes Material	B - nächst niedere Qualitätsstufe	Kommentar zum downgrading
Standard-Tücher	Zellstoff-PES-Vlies im Einzelblatt-Spender als Standard-Tuch	Zellstoff-PES-Vlies als Flachgelege, verpackt in PE-Beutel	Mehrfach-Entnahmen erhöhen die Tücher kosten erheblich oder lange Fummelzeiten erhöhen die Zeitkosten; aber gewisse Ersparnis bei den Materialkosten
		100% Zellstoff-Vlies	Festigkeitsprobleme beim Trockeneinsatz; Feuchteinsatz wegen Zersetzung bei Kanten- und Eckenreibung nicht möglich
			hoher Ionenbestand
Equipment-Tücher	Gestricke, DIW-gewaschen, weich randversiegelt, gelegt, hohe Garndichte	Gestricke, DIW-gewaschen, nicht randversiegelt, gelegt	abgetrennte Maschenköpfe erhöhen die Maschinen-Ausfallzeiten
		Gestricke, DIW-gewaschen, weich randversiegelt, geschüttet	wenn in der Fertigung ausreichende Anzahl von Gestricke-Containern bereitgestellt werden, sind Ersparnisse möglich
		Gestricke, DIW-gewaschen, hart randversiegelt, geschüttet	evtl. Zerstörung empfindlicher Oberflächen durch harte Schmelzkante; Einsparungen möglich durch geschüttete anstelle von gelegter Ware
		Gestricke, DIW-gewaschen, randversiegelt, geringere Garndichte	höherer Feuchtigkeitsrückstand nach feuchtem Wischen ergibt mehr Verschmutzungsrückstand und erheblich längere Wischzeiten. Fettschichten werden nicht voll abgetragen.
		thermofixierter Vliesstoff, gewaschen, weich randversiegelt, gelegt	geringe Einsparungen im Vergleich zu Gestricken möglich, aber geringere Festigkeit des Vliesstoffs beschränkt die Anwendungsmöglichkeiten
Boden-Tücher	Tücher aus thermofixiertem Vliesstoff angepaßt an Bodenwischgerät	Bodenreinigungstücher aus Zellstoff- PES-Vlies	starke Abnutzung bereits nach kurzem Gebrauch; für Lochböden vollkommen ungeeignet
		wiederverwendbare gewebte Bodentücher	evtl. nach kurzem Gebrauch viel Faserabrieb und daher hohe zurückbleibende Partikelmenge
Reinraum-Papier	dekontaminiertes ionen- und partikelarmes Papier hoher Durchreißfestigkeit und leichter Markierfarbe	nicht dekontamin. ionen- und partikelarmes Papier hoher Durchreißfestigkeit und leichter Markierfarbe	preiswerter als A, aber Kante enthält mehr Partikel und Faserfragmente; für Laufprotokolle fraglich; in SMIF-Umgebungen möglich
		nicht dekontaminiertes Papier hoher Durchreißfestigkeit mit höherem Ionen- und Partikelbestand	kaum preiswerter als A; keine wesentlichen Einsparungen; vom Kosten-Nutzen Verhältnis her betrachtet nicht lohnend

Tafel 8 Auswirkungen des downgrading der Qualität von Reinraum-Verbrauchsmaterial



Tafel 9 These zur Entwicklung der Prozess-Gesamtkosten durch ein downgrading mit reduzierten Materialkosten

Die Durchführung auch dieses Vorhabens scheitert jedoch an den bereits oben angeführten grundsätzlichen, physikalischen Gegebenheiten: Die Verunreinigung eines Reinraums und seiner Hardware ist prinzipiell ein fortschreitender, additiver Prozess. Ein Ausgleich erfolgt durch kontinuierlichen Abtrag dieser Verunreinigungsmenge, also im Rahmen der durchgeführten Reinigungsarbeiten. Ist der Zustand einer akuten Prozessgefährdung durch eine allgemein angewachsene Verunreinigung erst einmal eingetreten, so wäre die Beseitigung dieses Zustands nur in längeren Zeiträumen möglich und das Ergebnis wäre katastrophal. In diesem Zusammenhang erinnern wir uns an eine alte Grundregel der Reintechnik: *Die eingesetzte Arbeit zur Erzeugung partikulärer Verunreinigung von Oberflächen ist um ein Vielfaches geringer als die notwendige Arbeit für deren Beseitigung.*

Das o. a. gedankliche Experiment hat uns gezeigt, dass ein absolutes downgrading nicht realisierbar ist und in Abwesenheit prozesstechnischer Fakten die Bestimmung der Verbrauchsmaterial-Qualität in einem Reinraumbetrieb stets nur im Rahmen einer erfahrungsbasierten subjektiven Risikoabschätzung erfolgen kann.

In diesem Zusammenhang stellt der Autor zusammenfassend drei Thesen zur Diskussion:

- These 1: *Wenn Einsicht in Ursache und Wirkung in Teile eines Prozess-Geschehens nicht besteht, so ist das Verhalten der Prozessbetreiber nach dem geringsten erfahrungsbasierten Gefährdungs-Risiko für das Prozess-Ergebnis einzurichten. Das heißt: Solange der Beweis des Gegenteils nicht erbracht werden kann, ist die Vermutung einer Prozessgefährdung durch das Reinraum-Verbrauchsmaterial aufrecht zu erhalten und danach zu handeln.*
- These 2: *Wegen der möglichen Kumulierung negativer Einflüsse auf das Prozessgeschehen darf die Qualität der Gesamtheit der Prozessglieder nicht an der Komponente mit der geringsten Prozesswirksamkeit orientiert werden.*
- These 3: *Die Reduzierung von Materialkosten für Hilfsstoffe im Sinne eines downgrading birgt die Gefahr einer überproportionalen Erhöhung der Zeitkosten, so dass die Prozess-Gesamtkosten mit jeder Materialkostenreduzierung mehr steigen als an Materialkostenersparnis erzielt wurde (Tafel 9).*

Materialprüfungen beim Anwender

Mit ständig verringerten Struktur-Abmessungen oder höherer Präzision der Produkte in vielen Industrien beeinflusst die Reinheit der unmittelbaren Fertigungsumgebung in steigendem Maße das Prozessziel (Beispiel Halbleiterfertigung in Mini-Environments). Auch für das Produktspektrum der Verbrauchsmaterialien besteht daher der Anspruch nach Anpassung an diese kritischen Prozesse. Trotz dieser Situation treffen neue oder verbesserte Reinraum-Verbrauchsmaterialien bei den Reinraum-Ingenieuren und -Betreibern auf unterschiedliche Akzeptanz. Der Zeitraum zwischen vorgestellter Innovation und Einführung in die Praxis wird dadurch oft unnötig lang. Dies wird vom Anwender stets damit begründet, dass das neue oder verbesserte Produkt zunächst einer technischen Anwenderprüfung unterzogen werden muss, bevor es dann eventuell zum Einsatz kommen kann. Aber auch andere Hürden wie geringes Interesse an einem Produktwechsel aufgrund persönlicher Motivation, die angebliche Höhe des Prüfaufwands oder Entscheidungsmüdigkeit der verantwortlichen Reinraum-Beauftragten,

Durchsetzungsprobleme derselben bei den Einkaufsabteilungen oder bei der Belegschaft sind Gründe dafür, dass die technische Innovation auf dem Gebiet der Reinraum-Verbrauchsmaterialien nur langsam in die Betriebe Einzug hält. Nicht wahrgenommene Verantwortlichkeit führt dann oftmals zum Ausweichen in die betrieblich-demokratischen Strukturen. Dieses zögerliche Taktieren ist Ursache dafür, dass die Investitionen der Verbrauchsmaterial-Hersteller nur sehr langsam zu neuer Kapitalbildung führen und dadurch die Innovation zu wenig Schubkraft erhält – zum eigenen Nachteil der Anwender. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage: Was kann denn ein Anwender mit seinen im allgemeinen vorhandenen apparativen Möglichkeiten überhaupt prüfen? Nachstehend werden einige Sachverhalte im

Bereich der Anwenderprüfungen am Beispiel von Reinraumbüchern beschrieben. Die Inhalte betreffen jedoch generell auch die anderen Reinraum-Verbrauchsmaterialien. Die technischen Merkmale von Reinraum-Reinigungstüchern lassen sich im Hinblick auf ihre Prüfbarkeit beim Anwender in drei Gruppen gliedern (Tafel 10). Das sind:

- beim Anwender leicht prüfbare technische Merkmale
- beim Anwender schwer prüfbare technische Merkmale
- beim Anwender nicht prüfbare technische Merkmale

technische Merkmale		Anwenderprüfung im eigenen Haus		
		möglich	schwer möglich	nicht möglich
physikalisch-chemische Prüfungen im Speziallabor				
1	Flächenmasse	Δ		
2	Dicke			Δ
3	Bruchlast längs und quer			Δ
4	Bruchdehnung längs und quer			Δ
5	Wasseraufnahme gesamt	Δ		
6	Wasseraufnahme kapillarisch			Δ
7	Halbwertszeit d. Wasseraufnahme			Δ
8	Flüssigkeitsrückstand nach Wischen			Δ
9	Partikelrückstand nach Wischen		Δ	
10	Triboelektrik, Aufladungshöhe			Δ
11	Triboelektrik, Entladungszeit			Δ
12	kationische Bestandteile		Δ	
13	anionische Bestandteile		Δ	
14	Reinigungseffizienz für Partikel			Δ
15	Reinigungseffizienz für pastöse Schichten			Δ
mögliche visuelle Funktionsprüfungen im Fertigungsumfeld				
18	Lösungsmittel-Verteilung im 2fach gefalteten Tuch bei Spritztränkung	Δ		
19	Flüssigkeitsrückstand auf der Oberfläche nach Wischen	Δ		
20	Aufnehmen definierter Flüssigkeitsmenge im 2-fach gefalteten Zustand (Anzahl der Wischvorgänge)	Δ		
21	Entfernung einer Fettschicht von einem Spiegelglas	Δ		

Tafel 10

Ein Halbleiter-Produzent z.B. hat normalerweise für die Prüfung der grundsätzlichen technischen Merkmale eines Reinigungstuchs (Bruchkraft, Bruchdehnung, Flüssigkeitsabsorption gesamt, Absorptionsrate, Flüssigkeitsrückstand nach Wischvorgang und Reinigungseffizienz) weder das Instrumentarium noch ausgebildete Prüfer. Für die Merkmale der Partikel- und Faserfreisetzung hat er zwar das Instrumentarium der Partikelzählung, aber nicht das der praxisnahen Partikelsammlung. Für den Bereich der Meso-Partikel und Fasern oberhalb 100 µm steht ihm normalerweise überhaupt kein Equipment zur Verfügung, welches irgendwelche reproduzierbaren Ergebnisse liefert. Für die seltenen Prüfungen, welche beim Anwender auf dem Gebiet der Verbrauchsmaterialien anstehen, ist eine Anschaffung von Equipment oder Fachpersonal von den Kosten her auch nicht vertretbar.

Er kann also die meisten physikalischen oder chemischen Produkt-Prüfungen im eigenen Hause nicht zuverlässig durchführen und ist somit vor die Wahl gestellt, welche sich aus dem Inhalt der Tafel 10 ergibt. Diese Tabelle zeigt, welche Prüfungen normalerweise beim Anwender ohne weiteres durchführbar sind und welche nicht. Damit der Anwender ein bestimmtes Maß an Eigenständigkeit der Produktbewertung behält, versucht er gelegentlich, physikalische oder chemisch-technische Prüfungen des Verbrauchsmaterials durch praxisorientierte Prüfungen der Gebrauchstüchtigkeit des Verbrauchsmaterials zu ersetzen.

Praxisorientierte Prüfungen - Erfahrungen und Gefühle

Selbst bei den einfachen Funktionsprüfungen im Fertigungsumfeld ergeben sich erfahrungsgemäß große Probleme bei einer brauchbaren Produkt-Bewertung. Einige Gründe dafür werden nachstehend genannt:

Prüfungen der Gebrauchstüchtigkeit erfolgen nicht aufgrund von Messungen sondern aufgrund von menschlichen Beobachtungen, Erfahrungen und Gefühlen. Will man auf dieser Basis zu einem einigermaßen sinnvollen Prüfergebnis gelangen, so wären nach Meinung des Anthropologischen Instituts der Universität Kiel, Dr. Helbing, für jedes einzelne Produkt etwa 160 Prüfungen durch verschiedene Personen nötig, um innerhalb normaler Toleranz-

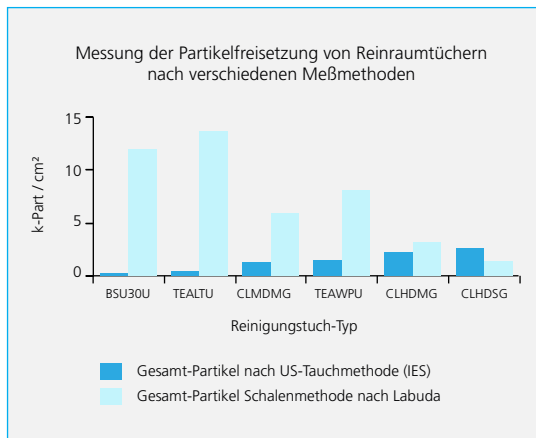
grenzen zu reproduzierbaren Ergebnissen zu gelangen. Tatsächlich geprüft werden jedoch zumeist nur wenige Exemplare.

Textile Gebilde wie Reinigungstücher sind ihrer Natur nach stofflich nicht sehr homogen. So werden bei vielen textilen Prüfungen Variationskoeffizienten bis zu 30 % als normal angesehen. Das bedeutet, man müsste für jedes Merkmal mindestens 5 Einzelprüfungen durchführen, um beim Prüfergebnis innerhalb einer Toleranz von etwa 20 % zu liegen. Die statistisch erforderliche Anzahl von Einzelprüfungen weicht also deutlich ab von der Anzahl der in der Praxis üblicherweise durchgeführten Anzahl. Die Betriebspraktiker argumentieren stets mit Zeitmangel - und so bleibt jede „Praxisprüfung“, welche nicht die erforderliche Anzahl von Prüfungen beinhaltet, in ihrem Resultat unbefriedigend und im Endeffekt fehlerhaft. Hinzu kommt Folgendes:

Messen heißt vergleichen mit einer Bezugsgröße. Bei praktischen Anwenderprüfungen ist die Bezugsgröße eine Kombination aus Erfahrung und Wunsch. Das Produkt ist „gut“, wenn es den bisherigen guten Erfahrungen des Prüfenden mit solchen oder ähnlichen Produkten entspricht. Hat der Prüfende keine oder wenig Erfahrung mit den zu prüfenden Produkten, so ersetzen Wunsch und Vorstellung die Erfahrung.

„Messgerät“ sind bei solchen Prüfungen die menschlichen Sinne. Die meisten vorrangigen technischen Kennwerte eines Reinraumtuchs sind mit Hilfe der menschlichen Sinne jedoch nicht wahrnehmbar. Dies gilt insbesondere für die partikuläre Oberflächenreinheit.

Die Ergebnisse von Prüfungen im Fertigungsumfeld lassen einen numerischen Ergebnisausdruck nicht ohne weiteres zu. Es werden daher in der Praxis oftmals Punkteskalen dazu benutzt, um eine Bewertung nach Beobachtung, Erfahrung und Gefühl in eine zumeist linear gegliederte Skala zu übertragen. Diese Darstellungsform soll den Aussagewert von messtechnisch nicht erfassten oder erfassbaren Größen auf die Ebene einer digitalen und also eine mit vermeintlich höherem Wahrheitsgehalt versehenen Information heben. Aber bereits die Zuordnung der erfassten Phänomene zu den verschiedenen Skalengruppen erfolgt auf subjektiver Basis.



Tafel 11 Ergebnisse der Messungen des Parameters Partikelfreisetzung von einigen bekannten Reinraumtüchern nach zwei verschiedenen Meßmethoden

Reinigungstücher werden allgemein, solange beim Arbeiten nicht irgendwelche Inhaltsstoffe sichtbar freigesetzt werden, als "gut" empfunden, je weicher, je "natürlicher" sie sich anfühlen. Diese Komponente geht erfahrungsgemäß in die Beurteilung eines Reinigungstuchs stärker ein als alle anderen Erwägungen. Es ist jedoch eine Tatsache, dass insbesondere die weichen Materialien den größten nicht sichtbaren Partikel- und Faserabrieb aufweisen.

Ist der Hersteller eines Produktes dem/den Prüfern bekannt, so entscheidet auch ein positives Herstellerimage unschwellig über die dem Produkt vom Prüfer zugedachte Qualität. Das Herstellerimage ist jedoch abhängig von vielen Unwägbarkeiten. Diese beziehen sich nicht immer ausschließlich auf die Produktqualität und deren Wirksamkeit im praktischen Einsatz.

Der Autor hat es erlebt, dass die Anwender-Prüfungen eines bestimmten Reinraum-Verbrauchsmaterials in dem einen Halbleiterwerk der gleichen Muttergesellschaft ergab, dass es sich dabei um ein vorbildliches Produkt mit Referenzcharakter handelt; in dem anderen Werk wurde das gleiche Produkt als das schlechteste des Marktes bewertet und sechs Jahre lang mit einer Einkaufssperre belegt. Dieses Beispiel zeigt wie kein anderes die immer noch vorhandene Bewertungsunsicherheit im Bereich Reinraum-Verbrauchsmaterial. Bei der Produktauswahl ist der Reinraum-Ingenieur gut beraten, sich nicht hauptsächlich

am Ergebnis der Praxisprüfung zu orientieren, sondern die Ergebnisse der physikalischen Messungen als vorrangiges Bewertungskriterium zu betrachten.

Das Prüfmethode-Dilemma

Insbesondere im Bereich der Prüfvorschriften für Partikel- und Faserfreisetzung von Reinraum-Reinigungstüchern besteht weltweit eine große Unsicherheit dadurch, dass die einzige von halboffizieller Seite vorgestellte Prüfmethode für Partikelfreisetzung aus Reinraum-Reinigungstüchern in ihrem gedanklich-physikalischen Ansatz prinzipiell fehlerhaft ist. Der Fehler hat seine Ursache in der abwegigen Simulation des wischenden Reinigungs-Vorgangs. Der Gedanke, welcher der dort veröffentlichten Prüfmethode (IES-RP-CC-004-87T und RP-CC-004.2) zugrunde liegt, ist:

Wenn man ein Reinraumtuch in destilliertem Wasser badet und danach die Anzahl der im Wasser befindlichen Partikel zählt, so erhält man ein Maß für die „reintechnische Gebrauchsgüte“ dieses Reinigungstuchs.

Dieser Gedanke ist physikalisch betrachtet vollkommen abwegig, weil sich bei einem Wischvorgang vor allem zwei Oberflächen reibend berühren: die Oberfläche des Reinigungstuchs und die zu reinigende Oberfläche. Dabei kommt es sowohl zu einem Materialabrieb, aber auch zu einer sofortigen Wiederaufnahme eines Teils der Menge abgeriebener Partikel durch das Reinigungstuch. Beim Tauchen eines Reinigungstuchs hingegen kommt es zu keinem Materialabrieb, sondern zu einer Ausschwemmung von Partikeln in die umgebende Flüssigkeit hinein. Das ist ein vollkommen anderes physikalisches Geschehen. Die Ergebnisse sind denn auch sehr unterschiedlich, ja konträr zueinander (Tafel 11). Hier zeigen sich die Unterschiede zwischen statischer und dynamischer Oberflächenreinheit.

Laban, Arrelano et al. hatten 1990 festgestellt, dass nach einem trockenen Wischvorgang auf Oberflächen geringster Rauigkeit (Wafer-Oberfläche) alle Reinigungstücher, unabhängig von ihrer Konstruktion und ihrem Wasch-Zustand nach einem Wischvorgang die gleiche Partikelmenge auf der Oberfläche zurücklassen (Lit).

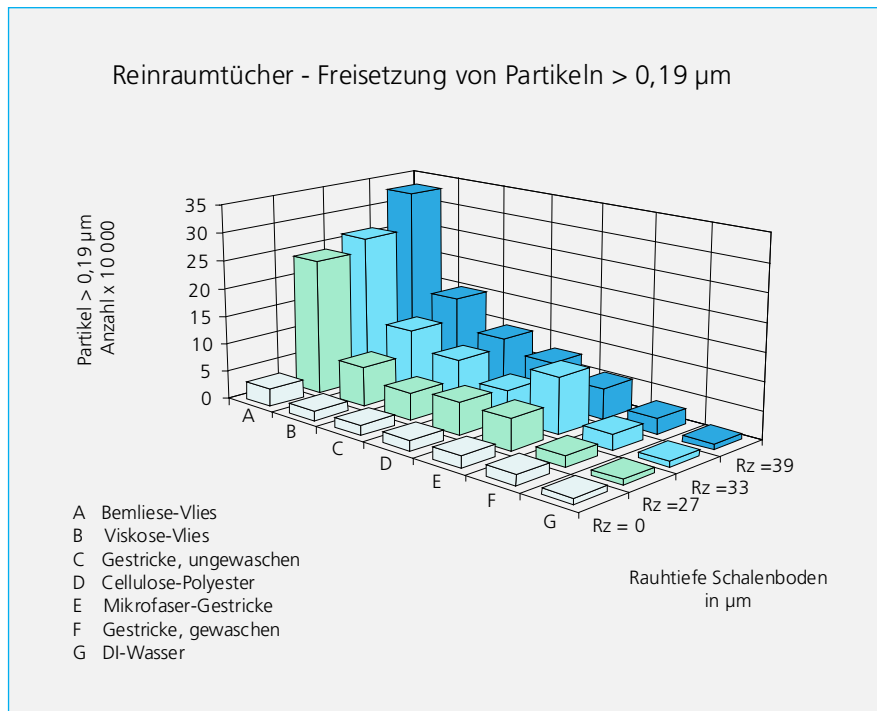
Der Autor hatte 1993 den Laban-Versuch dahingehend erweitert, dass er den Wischvorgang auf verschiedenen rauen Oberflächen durchführte und die dabei freigesetzten Partikel in Relation zur Art des textilen Materials setzte, welches zur Herstellung des Reinigungstuchs gebraucht wurde. Aufgrund dieser Versuche wurde erstmals die Abhängigkeit der Partikelfreisetzung sowohl vom Reinigungstuch-Material als auch von der Oberflächen-Rauhigkeit beschrieben (Tafel 12).

Obwohl Labans und Labudas Arbeiten den Amerikanern seit langem bekannt sind, mochten diese nicht von ihrer obskuren IES-Prüfmethode lassen. Das IES (Institute for Environmental Science) hat jedenfalls bis zum Jahre 2002 nicht reagiert. Letzten Endes ist es auch nicht die Partikel- oder Faserfreisetzung eines bestimmten Reinigungstuchs, welche den Anwender interessiert, sondern, wie viel % der vorhandenen Verunreinigungsmasse pro Zeiteinheit von der Oberfläche entfernt werden können. Für diesen Parameter Reinigungs-Effizienz hat der Autor eine Prüfmethode entwickelt und in der Literatur beschrieben.

Man kann von einem Anwender nicht erwarten, dass er ständig mit Prüfungen neuer Verbrauchsmaterialien beschäftigt ist, denn Prüfen kostet Zeit und bindet Personal an diese Aufgabe, welches woanders vielleicht produktiver eingesetzt ist.

Andererseits wäre es töricht, sich aus dem Innovationsgeschehen des Marktes auszuklinken - nur damit man nichts mehr prüfen muss. In Deutschland gibt es eine gute Lösung für dieses Problem: Ein spezialisiertes Forschungslabor in Lübeck stellt einen Laborservice für reintechnische Prüfungen zur Verfügung, wo jeder Anwender seine Prüfungen an seinen mitgebrachten Prüflingen selbst durchführen kann. Einige Anwender machen davon ständigen Gebrauch. Leider hat die Branche der Reinraum-Verbrauchsmaterial-Hersteller ihre Chancen im Bereich Forschung und Entwicklung nur zögerlich wahrgenommen. Auf dem Gebiet des Reinraum-Verbrauchsmaterials gibt es weltweit nur zwei Hersteller, welche eine intensive Materialforschung betreiben. Drei weitere Hersteller betreiben keine systematische Forschung, sind jedoch in der Lage, die wesentlichen techni-

schischen Merkmale ihrer Produkte messtechnisch zu erfassen. Von den angeführten fünf Herstellern befindet sich einer in Europa und der Rest in den USA. Außerdem gibt es weltweit eine Vielzahl von Unternehmen, welche ihre Produkte als Reinraum-Verbrauchsmaterial deklarieren, aber sie haben weder eine reintechnische Qualitätskontrolle noch ein faserstofftechnisches Prüflabor.



Tafel 12 Freisetzung von Partikeln >0,19 µm in Abhängigkeit von dem verwendeten textilen Material und der Rauigkeit der gewischten Oberfläche

Zusammenfassung betreffend die Materialauswahl

- Das heute eingesetzte Reinraum-Verbrauchsmaterial hat sich reintechnisch und preislich über den langen Zeitraum von etwa 20 Jahren etabliert. Eine deutliche Reduzierung der Materialpreise ist von den etablierten Herstellern zumeist nur bei entsprechendem downgrading der technischen Ansprüche an das Material zu erwarten.
- Von solchen Herstellern, welche keinen F&E-Aufwand betreiben und ihren Firmensitz weit außerhalb Europas haben, wären gelegentlich Preisvorteile zu erwarten, wobei solchen Unternehmen naturgemäß die Inventionskapazität, das Know-how und oft auch das Kapital fehlt, um in die für die Anwender wesentlich interessantere Kostenreduzierung auf dem Handhabungs- und Prozess-Gefährdungssektor zu investieren.

Im Innovationsbereich sind jetzt gefordert:

- bei HiTech-Reinigungstüchern: Verbesserung der Trockenwischfähigkeit, homogen gefeuchtete Tücher in schneller zugänglichen Behältern, höhere dynamische Reinheit bei Equipment-Tüchern, Siebreinigungstücher mit erheblich verringerten Siebreinigungszeiten im Bereich Schaltdruck und Hybridtechnik
- bei Handschuhen: Kurztragehandschuhe mit stark verbesserter Oberflächenreinheit, Handschuhe mit Verdampfungsfunktion, Handschuhe mit hoher dynamischer Oberflächenreinheit und solche mit reduziertem Oberflächenwiderstand
- bei Papier: Papiere mit besseren Laufeigenschaften in Kopier- und Druckgeräten, sterile Papiere, Papier mit garantierter Archivfestigkeit von mehr als 20 Jahren

Es besteht eine Vielzahl von Möglichkeiten der Kostenreduzierung beim Verbrauchsmaterial, welche sich auf Veränderungen von Konstruktion, Anlieferungszustand und Bereitstellung im Fertigungsumfeld beziehen. In diesem Bereich liegen knapp 90% der Möglichkeiten für eine Reduzierung der Kosten.

Zusammenfassung betreffend die Anwenderprüfung

- Anwenderprüfungen von Reinraum-Verbrauchsmaterialien ohne die Basis einer messtechnisch orientierten Spezifikation und ohne statistisch ausreichende Anzahl von Prüflingen sind wertlos, ja sogar gefährlich aufgrund der falschen Schlüsse, die daraus gezogen werden können.
- Die Prüfperson beim Anwender sollte nicht darüber informiert werden, wer der Hersteller des geprüften Produktes ist (codierte Prüflinge).
- Ein fachlich renommierter Hersteller weiß über die einzelnen Aspekte der Qualität seiner Produkte normalerweise mehr als ein Prüfer beim Anwender. Es ist daher sinnvoll und zeitsparend, den Hersteller des Produktes vor Prüfbeginn in eine Produkt-Prüfung einzubinden.
- Wird die Bedingung der codierten Prüflinge strikt eingehalten, so ist gegen eine Laborprüfung durch einen Prüfer des Anwenders bei einem der Verbrauchsmaterial-Hersteller nichts einzuwenden. Sie ist wegen des dort vorhandenen Prüf-Instrumentariums sinnvoller als die Durchführung eigener Anwenderprüfungen ohne geeignetes Instrumentarium und ohne geschultes Personal.
- Die Anmerkungen der Fertigungs-Mitarbeiter des Anwenders, welche die zu prüfenden Produkte täglich einsetzen, enthalten oft wertvolle Hinweise auf praxisorientierte Merkmale derselben. Mitarbeiter des Anwenders sollen jedoch nicht als Prüfer eingesetzt werden, weil sie auf diesem Gebiet normalerweise keine Fachleute sind.
- Die Entscheidung darüber, welches Verbrauchsmaterial in einer Reinraum-Fertigung eingesetzt wird, sollte allein der fachlich gebildete Reinraum-Ingenieur treffen. Bei solchen Produkten, bei denen Behaglichkeitskriterien die Auswahl mitbestimmen, soll auch der Reinraum-Beauftragte mitentscheiden. Eine Einbindung von allen möglichen anderen Meinungsträgern innerhalb des Unternehmens zur „demokratischen“ Absicherung der Entscheidung sollte vermieden werden.

- Die Prüfergebnisse sollen unbedingt mit den Herstellerfirmen diskutiert werden. Geheimhaltung von Prüfergebnissen gegenüber dem Hersteller ist ein Relikt aus der vergangener Zeit. Es ist im Interesse des prüfenden Anwenders, eine kritische Betrachtung seiner Prüfmodalitäten und Ergebnisse zu erhalten. Prüfer sollen daher zum kooperativen Handeln verpflichtet werden.

Literatur

1. Evaluating Wiping Materials Used in Cleanrooms and Other Controlled Environments, IES-RP-CC004.2, Institute of Environmental Sciences, 1992
2. Laban, Frédéric et al. (Motorola) - Clean room wiper efficiency comparison tests, Swiss Contamination Control 3(1990) No. 4a, ICCCS 90, Zürich, 1990