

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 56 (1965)
Heft: 14

Artikel: Leckprüfmethoden für Halbleiterschaltungsbauteile
Autor: Villalaz, C.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-916384>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 21.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV)
und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

Leckprüfmethode für Halbleiterschaltungsbauteile

Von C. Villalaz, Zürich

621.192.46

Nach einer kurzen Diskussion des allgemeinen Problemkreises, der bei Leckprüfuntersuchungen zu berücksichtigen ist, werden 10 verschiedene Leckprüfmethodengruppen bezüglich ihrer Eigenschaften vergleichend diskutiert. Diese Methodengruppen eignen sich speziell für Leckprüfuntersuchungen an Halbleiterschaltungsbauteilen, können jedoch auch zweckmässigerweise an geometrisch ähnlichen, andersgearteten Bauteilen zur Anwendung gelangen. Vor- und Nachteile der Methoden werden im einzelnen ausführlich behandelt. Es wurde der Versuch unternommen, die wesentlichsten Elemente eines morphologischen Schemas für Dichtheitsprüfungen zusammenzustellen. Schliesslich folgen noch einige Bemerkungen über die Bedeutung der Anwendung von Leckprüfmethoden.

Après une brève discussion générale des problèmes concernant la recherche des fuites, l'auteur traite de 10 groupes de méthodes d'essais, dont il compare les propriétés. Ces groupes de méthodes conviennent particulièrement à la recherche des fuites d'éléments de couplage à semi-conducteurs, mais ils sont également applicables avantageusement à d'autres éléments d'une configuration analogue. Les avantages et les inconvénients des méthodes sont examinés en détail. L'auteur a tenté de grouper les éléments essentiels d'un schéma morphologique pour les essais d'étanchéité. Il termine par quelques observations sur l'importance de l'emploi de méthodes de contrôle des fuites.

1. Einführung

Es ist eine Erfahrungstatsache, dass Wasser (H_2O), Sauerstoff (O_2), Stickstoff (N_2) und auch andere Stoffe die kritischen Oberflächenzustände von Halbleiterschaltungsbauteilen beeinflussen [1]...[13]¹⁾. Die ersten Stoffe gehören zu denjenigen, die hauptsächlich in der näheren Umgebung der Bauteile vor und während ihres Betriebes vorkommen. Wasser kann im erlaubten Temperaturbereich in drei Zuständen auftreten: Im gasförmigen, flüssigen und im festen Zustand. Alle Zustände weisen störende Eigenschaften auf, jedoch ist der Einfluss des gasförmigen Zustandes auf die Oberflächenzustände dominierend. Unter diesen Umständen muss man, wenn die Dichtheit von solchen Bauteilumhüllungen beurteilt werden soll, die betreffenden Messungen zum mindesten mittels flüssiger und gasförmiger Stoffe durchführen.

Der Ursprung der Beanspruchung, welche während der Betriebszeit von Halbleiterschaltungsbauteilen, bezüglich der Dichtheit ihrer Umhüllungen, auftritt, besteht in Druckunterschieden. Diese Druckunterschiede können von aussen nach innen oder von innen nach aussen gerichtet sein. Somit wird auch ein Materialtransport durch eine möglicherweise vorhandene Leckstelle in der Umhüllung in beiden Richtungen stattfinden. Eine ausführliche Vorausbestimmung der dabei auftretenden Vorgänge kann nicht gegeben werden. Nur für vorgegebene, als Mittelwerte spezifizierte Beanspruchungsniveaus, und/oder periodisch wechselnde Beanspruchungskomplexe, d. h. für sehr vereinfachte Bedingungen, kann man versuchen, die Quantitäten eines bestimmten Stoffes, welche durch eine eventuell vorhandene Leckstelle ausgetauscht werden, rechnerisch zu erfassen.

Wie eng der Zusammenhang zwischen der Dichtheit der Umhüllungen von Halbleiterschaltungsbauteilen und ihrem Verhalten im Betrieb, d. h. während ihrer Lebensdauer, ist, konnte bisher quantitativ noch nicht bestimmt werden. Es scheint, dass eine allgemein gültige, quantitative Formulierung

für die Beantwortung dieses Fragenkomplexes nicht gegeben werden kann. Nur in einigen sehr speziellen Fällen sind Beziehungen in Erscheinung getreten, die auf eine eventuelle direkte Verknüpfung der Dichtheitseigenschaften mit dem Lebensdauerverhalten hinweisen. Der ausserordentlich hohe Grad der Verschiedenheit des Aufbaues der hier diskutierten Bauteile, der Prüfmethoden, die für die Ermittlung der Dichtheitseigenschaften zur Verfügung stehen, und der Betriebszustände, die während der Lebensdauer der Bauteile auftreten, sind wohl die Hauptgründe für diese Situation. Man kann jedoch mit grosser Sicherheit annehmen, dass wegen der Korrosionserscheinungen im Inneren und auch wegen des bekannten Einflusses verschiedener Stoffe auf die Oberflächenzustände der im Innern der Umhüllungen befindlichen Bauteilelemente, wie anfangs erwähnt wurde, grosse Undichtheiten immer schädliche Auswirkungen aufweisen müssen und man deswegen bestrebt sein sollte, die Bauteilumhüllungen so dicht wie möglich auszuführen, wenn ein wirklich zuverlässiger Bauteil resultieren soll.

Im folgenden werden nach einer kurzen Einführung in die hauptsächlichsten Probleme, die bei der Untersuchung von Dichtheitseigenschaften auftreten, die wichtigsten Dichtheitsprüfmethoden besprochen, Methoden, welche sich vor allem für die Untersuchungen von kleinen Umhüllungen, wie sie bei Halbleiterschaltungsbauteilen auftreten, eignen. Eine sinn gemässe Anpassung der hier besprochenen Methoden an die Prüfung von dimensionsmässig ähnlichen Bauteilen, die hingegen auch anderen Verwendungszwecken dienen können, wie z. B. hermetisch abgeschlossene Relais, Schutzkontakte, Elektronenröhren, Kondensatoren, u. a. m., ist ohne grosse Schwierigkeiten möglich.

Als Zielsetzung wird versucht, die Vor- und Nachteile der besprochenen Prüfmethoden möglichst weitgehend und vollständig zusammenzufassen, so dass auf Grund dieser Erläuterungen ihre unzulässige und falsche Anwendung vermieden werden kann. Schliesslich wird eine detaillierte Zusammen-

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

fassung der modernen Erkenntnisse über die Ermittlungsmethoden von Dichteitseigenschaften angefügt. Dies geschieht auf morphologischer Basis. Das Resultat dieser Art Behandlung des Problemkreises kann als richtungsweisend für die Beurteilung von zukünftigen Entwicklungen auf diesem Gebiet der Analysetechnik angesehen werden.

2. Allgemeine Aspekte der Dichtheitsprüfmethode

2.1 Leckrate

Betrachtet man ein geschlossenes und geometrisch konstantes Volumen V mit einem kleinen Leck, nimmt man gleichzeitig an, dass bei konstanter Temperatur T eine Druckdifferenz $\Delta P = P_i - P_0$ zwischen Innenraum und der äusseren Umgebung des betreffenden Volumens vorhanden ist, und setzt man weiter noch voraus, dass der Innenraum des betreffenden Volumens mit einem Gas gefüllt ist, welches ursprünglich einen höheren Druck P_i aufweist als dasjenige des Aussenraumes P_0 , so wird man feststellen, dass im Laufe der Zeit Gas durch die Leckstelle austritt. Dieser Gasaustrittsprozess kann unter Berücksichtigung des progressiven Druckausgleiches zwischen Innen- und Aussenraum ($P_i \rightarrow P_0$) als Funktion der Zeit durch die Änderung des Produktes aus Druck und Volumen $PV = N$, welches sich beispielsweise als die Quantität des Gases im Innenraum interpretieren lässt, dargestellt werden. Diese Änderung weist eine grosse Ähnlichkeit mit der elektrischen Entladung eines Kondensators auf und kann durch die asymptotische Abnahme von $N = PV$ als Funktion der Zeit, $N = N(t)$, von $PV = P_i V$ nach $PV = P_0 V$ beschrieben werden (Fig. 1).

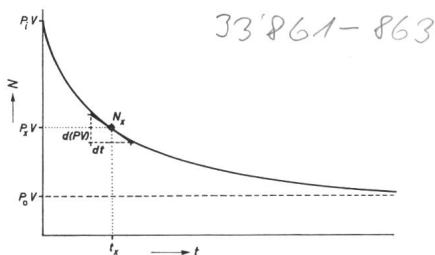


Fig. 1

Die Menge eines Materials im Innern eines abgeschlossenen Volumens als Funktion der Zeit skizziert

wenn bei aussen angelegtem Unterdruck ein Entweichen des Materials durch eine Leckstelle nach aussen stattfindet

$N = PV$ Gasmenge im Innern des Prüfvolumens; t Zeit

Betrachtet man den Punkt N_x der Kurve in Fig. 1 mit seinen Koordinaten P_x und t_x , so kann man die charakteristischen Eigenschaften der Kurve um diesen Punkt herum durch die erste Ableitung der betreffenden Funktion in diesem Punkt beschreiben. Die erste Ableitung $d(PV)/dt$ soll als die momentane differenzielle Leckrate Q_d bezeichnet werden. Die momentane differenzielle Leckrate kann in Wirklichkeit nicht gemessen werden, es sei denn, man könnte in einem unendlich

kleinen Zeitintervall messen. Nimmt man nun einen endlichen Zeitintervall für die Druckmessung in Anspruch, $\Delta t = t_2 - t_1$, und hat die Gasmenge sich in diesem Zeitintervall um $V \cdot \Delta P = V(P_2 - P_1)$ geändert, so kann man den Begriff der quasidifferenziellen Leckrate Q_{qd} einführen:

$$Q_{qd} = \frac{V(P_2 - P_1)}{t_2 - t_1} = \frac{V \cdot \Delta P}{\Delta t} \quad (1)$$

wenn der Betrag von Δt genügend klein gehalten wird.

Diese quasidifferenzielle Leckrate muss prinzipiell als Mittelwert aufgefasst werden. Da das Volumen V als konstant vorausgesetzt wurde und Q_d eine zeitabhängige Grösse darstellt, $Q_d = Q_d(t)$, ist der Mittelwert von $Q_d(t)$ über den Zeitabschnitt $\Delta t = t_2 - t_1$ gegeben durch:

$$Q = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} Q_d(t) dt = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{P_1}^{P_2} V dP = V \frac{P_2 - P_1}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

was mit Gl. (1) übereinstimmt.

Q_d wird durch die Strömungsbedingungen definiert. Wird die Strömung, und damit die momentane Leckrate, künstlich konstant gehalten, z. B. durch Anbringen einer konstanten Druckdifferenz zwischen Innen- und Aussenraum, kann man die differenzielle Leckrate dem Mittelwert Q und demzufolge auch der quasi-differenziellen Leckrate Q_{qd} gleichsetzen. Eine solche Sachlage entsteht z. B., wenn man Durchflussmengenbestimmungen bei konstant gehaltener Druckdifferenz vornimmt. In allen anderen Fällen muss man die numerischen Werte von t_1 , t_2 , P_1 , P_2 und V bei der Erwähnung der Leckrate beifügen, wenn man verschiedene Leckraten miteinander vergleichen möchte, denn nur ähnliche Werte dieser Grössen lassen einen Vergleich sinnvoll erscheinen (siehe dazu auch später Abschnitt 2.7).

Der wirklich stattfindende Materialtransportprozess, welcher während der Lebensdauer der hier vornehmlich diskutierten Bauteile stattfindet, ist sehr eng mit der momentanen differentiellen Leckrate Q_d verbunden, denn der Materialaustausch findet in kleinen Portionen statt, erzeugt durch momentan auftretende kleine Druckdifferenzen zwischen Innen- und Aussenraum der zu testenden Umhüllungen.

Die Leckrate Q wird normalerweise in Torr \times Liter pro Sekunde (Torr \cdot Lit./s) angegeben. 1 Torr ist der 1/760 Teil einer physikalischen Atmosphäre (at). In der Praxis der Leckprüfuntersuchungen an Halbleiterschaltungsbauteilen kann man 1 Torr ungefähr gleich mit 1 mmHg (Millimeter Quecksilbersäule) setzen, denn: 1 mmHg = 1,000 000 140 Torr. 1 Torr \times Liter/Sekunde = $3,27 \cdot 10^{-19}$ Gasmoleküle pro Sekunde bei einer Umgebungstemperatur von $T = 20^\circ \text{C}$.

Andere Einheiten für die Definition der Leckrate werden vor allem in England und den USA verwendet. In Tabelle I

Umrechnungstabellen für Leckraten

Tabelle I

Torr \cdot Lit. \cdot s $^{-1}$	$\mu\text{m} \cdot$ Lit. \cdot s $^{-1}$	$\mu\text{m} \cdot$ Lit. \cdot h $^{-1}$	at \cdot cc \cdot s $^{-1}$	at \cdot cc \cdot h $^{-1}$	$\mu\text{m} \cdot$ ft $^3 \cdot$ s $^{-1}$	$\mu\text{m} \cdot$ ft \cdot h $^{-1}$
$1,00 \cdot 10^0$	$1,00 \cdot 10^3$	$3,60 \cdot 10^6$	$1,32 \cdot 10^0$	$4,75 \cdot 10^3$	$3,53 \cdot 10^1$	$1,27 \cdot 10^5$
$1,00 \cdot 10^{-3}$	$1,00 \cdot 10^0$	$3,60 \cdot 10^3$	$1,32 \cdot 10^{-3}$	$4,75 \cdot 10^0$	$3,53 \cdot 10^{-2}$	$1,27 \cdot 10^2$
$2,78 \cdot 10^{-7}$	$2,78 \cdot 10^{-4}$	$1,00 \cdot 10^0$	$3,67 \cdot 10^{-7}$	$1,32 \cdot 10^{-3}$	$9,81 \cdot 10^{-6}$	$3,53 \cdot 10^{-2}$
$7,60 \cdot 10^{-1}$	$7,60 \cdot 10^2$	$2,73 \cdot 10^6$	$1,00 \cdot 10^0$	$3,60 \cdot 10^3$	$26,80 \cdot 10^0$	$9,65 \cdot 10^4$
$2,11 \cdot 10^{-4}$	$2,11 \cdot 10^{-1}$	$7,60 \cdot 10^2$	$2,78 \cdot 10^{-4}$	$1,00 \cdot 10^0$	$7,43 \cdot 10^{-3}$	$26,80 \cdot 10^0$
$2,83 \cdot 10^{-2}$	$28,30 \cdot 10^0$	$1,02 \cdot 10^5$	$3,74 \cdot 10^{-2}$	$1,35 \cdot 10^2$	$1,00 \cdot 10^0$	$3,60 \cdot 10^3$
$7,87 \cdot 10^{-6}$	$7,87 \cdot 10^{-3}$	$28,30 \cdot 10^0$	$1,04 \cdot 10^{-5}$	$3,74 \cdot 10^{-2}$	$2,78 \cdot 10^{-4}$	$1,00 \cdot 10^0$

sind solche weiteren üblicherweise verwendeten Einheiten zusammengestellt. Die Werte für die Tabelle I sind teilweise von [14] übernommen worden. Für weitere Umrechnungstabellen von Druckeinheiten sei auf [15] oder auch [16] hingewiesen.

2.2 Grössenordnungen von Leckraten in der Praxis

Wenn es sich um schlecht qualifizierte Umhüllungen handelt, liegen die Grössenordnungen von Leckraten für Halbleiterschaltungsbauteile etwa bei 10^{-6} Torr · Lit./s oder noch grösseren Werten. Wenn es sich jedoch um hochqualifizierte Umhüllungen handelt, so liegen deren Leckraten etwa bei 10^{-10} oder sogar noch kleineren Werten [17; 18; 19]. Dementsprechend kann man, wie auch in den zitierten Quellen angegeben, mit mittleren Leckraten von etwa 10^{-8} rechnen.

Die Streuung der Leckratenhäufigkeitsverteilung eines bestimmten Herstellungstyps von Halbleiterschaltungsbauteilen ist normalerweise grösser als eine Dekade, und die charakteristische Form solcher Verteilungen ist, in linearen Maßstäben betrachtet, unsymmetrisch. Die längere Randzone der Häufigkeitsverteilung liegt jeweils auf der Seite der grösseren Leckraten. Diese Tatsache deutet an, dass die heutigen Verschlussmethoden bezüglich Beherrschung wie auch bezüglich Ausführung noch verbessert werden können. Mehrere Häufungspunkte können in den Verteilungen auftreten (Ausreisser). Häufigkeitsverteilungen der Leckraten verschiedener Transistortypen sind in der Veröffentlichung von Bergqvist [18] aufgeführt. Ein weiterer Freiheitsgrad in der Häufigkeitsverteilung von Leckraten ist noch durch die Tatsache gegeben, dass Leckraten zeitabhängige Werte aufweisen [17], also nicht immer als konstante Grössen aufgefasst werden können.

Aus allen diesen Tatsachen geht hervor, dass für die Bestimmung der Undichtheiten, im speziellen von Halbleiterschaltungsbauteilumhüllungen, eine ziemlich grosse Empfindlichkeitsspanne des Detektionsmechanismus zur Verfügung stehen muss.

2.3 Erzeugung von Druckdifferenzen für die Bestimmung der Leckrate

Druckdifferenzen, die während des Betriebes von Halbleiterschaltungsbauteilen auftreten, werden durch Änderungen der klimatischen Bedingungen erzeugt. So etwa durch Temperaturänderungen, Umgebungsdruckänderungen wie auch Veränderungen des Feuchtigkeitsgehaltes der Umgebungsatmosphäre. Die Temperaturänderungen können sich direkt bemerkbar machen, und zwar nach der gut bekannten Beziehung für den Zustand von idealen Gasen:

$$P V = R T \quad (3)$$

wobei R die universelle Gaskonstante bedeutet.

Andererseits kann auch eine indirekte Einwirkung auftreten, wenn eine Zustandsänderung stattfindet, so z. B. von der flüssigen in die gasförmige Phase. Für viele Stoffe kann man den Dampfdruck als Funktion der Temperatur, $p(T)$, durch die folgende Gleichung beschreiben [20]:

$$\log p = -\frac{a}{T} - b \cdot \log T + c \quad (4)$$

wobei a , b und c drei Konstanten bezeichnen. Diese Konstanten sind für verschiedene Stoffe bestimmt worden [20].

Auch der Diffusionsdruck kann zu Druckunterschieden führen. Ist die Diffusionsdruckkomponente als hauptsächlicher

Einfluss zu bezeichnen, so kann das erste Gesetz von Fick [20] angewendet werden. Diesem Gesetz zufolge ist die Menge m eines Gases, welches infolge Diffusion durch einen Querschnitt q dringt, proportional zum Verhältnis der partiellen Dichte dq/dx und zur Zeit Δt :

$$m = -D q \frac{dq}{dx} \cdot \Delta t \quad (5)$$

In diesem Falle bezeichnet D die Diffusionskonstante.

Durch das zweite Ficksche Gesetz [20] kann man den Diffusionsprozess im nichtstationären Zustand beschreiben:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (6)$$

Mit c wird hier die Konzentration (Anzahl Mole pro Volumeneinheit) bezeichnet.

2.4 Strömungswiderstand

Für verschiedene und vereinfachte geometrische Leckkonfigurationen sind Formeln entwickelt worden, die erlauben, den Strömungswiderstand R der betreffenden Konfiguration direkt zu berechnen [15; 16; 21]. Die wichtigste dieser Beziehungen ist die Formel von Knudsen [21], erstmals im Jahre 1909 publiziert. Sie ist vielseitig anwendbar. Eine vereinfachte Darstellung der Formel von Knudsen ist in [16] gegeben:

$$\frac{l}{R} = \frac{d^3}{l} (180 d \bar{P} + 12,17) \left(\frac{l + 252 d \bar{P}}{l + 312 d \bar{P}} \right) \quad (7)$$

Hiebei bezeichnet d den Durchmesser eines runden Loches in cm und l die Länge des Leckpfades in cm. Setzt man \bar{P} , den mittleren Druck innerhalb des Leckpfades, in Torr ein, so erhält man l/R in Liter pro Sekunde. Der Ausdruck (7) gilt nur für Luft. Für andere Gase muss entweder auf Knudsens Originalformel [21] zurückgegriffen, oder die Gl. (7) entsprechend geändert werden. Die einfache Form von Knudsens Formel (7) lässt sich ohne viel Umstände berechnen. Sie ist gültig für runde Löcher und für alle drei möglichen Strömungszustände, den viskosen, den molekularen, wie auch für den Strömungszustand zwischen diesen beiden, den Übergangszustand. Dieser Übergangszustand ist nach [16] zwischen den folgenden beiden Grenzen gegeben:

$$0,02 < \bar{P} d < 0,55 \quad (8)$$

wenn der mittlere Druck \bar{P} in Torr und der Durchmesser d der Leckstelle in cm angegeben werden. Wegen der üblicherweise relativ kleinen Grösse der Leckstellen kann man das Auftreten von turbulenten Strömungsbedingungen ausschliessen [22; 23].

2.5 Materialtransport während der Leckprüfung

Sind die Vorrichtungen, die für die Ermittlung eines erzwungenen Materialaustausches dienen, in ihren äusseren Abmessungen gross im Verhältnis zu den Dimensionen der zu testenden Umhüllungen, wie es im vorliegenden Fall der Leckprüfungen an Halbleiterschaltungsbauteilen wohl angenommen werden kann, so sind die Möglichkeiten für die Bestimmung der Prüfmaterialtransportprozesscharakteristika beschränkt. Grundsätzlich kann die Bestimmung der Quantität des Prüfmaterials, welches in einer bestimmten Zeiteinheit ausgetauscht wird, auf verschiedene Arten geschehen. Durch die Erzeugung eines Überdruckes auf der Aussenseite der zu

testenden Volumina wird der Prüfstoff im Falle eines vorhandenen Leckes in das Innere des zu prüfenden Volumens dringen. Die Ermittlung der eingedrungenen Menge kann entweder aussen oder innen geschehen. Aussen durch Messung des Verlustes, innen durch Reaktionen, welche durch den Prüfstoff hervorgerufen werden, z. B. durch Oberflächenveränderungen. Auch ein Materialtransport in umgekehrter Richtung kann erzeugt werden, indem man an der Aussenseite einen Unterdruck erzeugt und dann nach einer bestimmten Zeit entweder Reaktionen der inneren Struktur misst oder die Materialzunahme ausserhalb. Beide Materialbewegungsrichtungen können einfach oder zusammengesetzt vorkommen und man kann dementsprechend von «monodirektionalen» und «bidirektionalen» Transporteigenschaften sprechen. Im bidirektionalen Fall wird beispielsweise durch Überdruck Material erst hineinbefördert und nachher durch Unterdruck wieder herausgeholt, oder umgekehrt. Man kann diese Art, Material hinein zu befördern und nachher wieder zu extrahieren, mit der Ladung und Entladung eines Kondensators vergleichen (siehe dazu auch Abschnitt 2.5 und [23]).

Das Unterdrucksetzen der Bauteile kostet jeweils einige Zeit (Stunden bis Tage, je nach gewünschter Empfindlichkeit). Mit zunehmender Dauer der Druckphase der Prüfung, in welcher die zu prüfenden Bauteile unter Über- oder Unterdruck sind, sowie auch mit zunehmendem Betrag der Druckdifferenz, nimmt die Empfindlichkeit der Anzeige zu. Auch die Genauigkeit der Anzeige kann gegebenenfalls entsprechend verbessert werden.

Nach der Druckphase müssen die zu prüfenden Exemplare an der Aussenseite von Rückständen des zu prüfenden Materials, z. B. Helium, befreit werden, weil durch Ansammlungen dieses Materials bei der Detektion eine Verfälschung der Resultate eintreten kann. Diese Verfälschung ist jedoch in der sicheren Richtung, denn die Resultate werden schlechter angezeigt als sie in Wirklichkeit sind. Anders verhält es sich mit einem anderen Störeffekt, welcher durch den Reinigungsprozess selber hervorgerufen werden kann. Sind unter den zu testenden Exemplaren solche, welche relativ grobe Leckstellen aufweisen (z. B. Leckraten grösser als 10^{-5} Torr · Lit./s), so besteht die Möglichkeit, dass während des Reinigungsprozesses das vorher in der Überdruckphase hineingeströmte Prüfgas (eben z. B. Helium) wieder herausströmt. In diesem Fall wird dann in der Detektionsphase der Leckprüfung auch eine verfälschte Anzeige in Erscheinung treten. Die Anzeige wird jedoch im Gegensatz zur vorher erwähnten Störeffektauswirkung besser sein als die in Wirklichkeit zu erwartende. Eine grobe Leckstelle wird dann wie eine relativ feine angezeigt, d. h. alle angezeigten Resultate können gegebenenfalls angezweifelt werden. Durch Vorselektion auf die kritische Leckratengrenze von etwa 10^{-6} Torr · Lit./s kann dieses Übel beseitigt werden.

Bei der Messung der Durchflussleckrate, wo auf der einen Seite des zu prüfenden Bauteils oder Unterteils das Prüfmaterial in hoher Konzentration und unter erhöhtem Druck vorhanden ist, während auf der anderen Seite im Falle einer Leckstelle eine Indikation des durchfliessenden Prüfmaterials stattfindet [23], können beide Störeffekte vermieden werden. Diese Tatsache erlaubt die grundsätzliche Schlussfolgerung, dass monodirektionalen Prüfungsvorgängen nach dem Durchflussverfahren grundsätzlich der Vorrang gegeben werden sollte [23].

Durch die seriegelassete Anwendung von monodirektionalen und bidirektionalen Prüfverfahren besteht die Möglichkeit einer Trennung der variablen Grössen, welche die Dichteitseigenschaften von Bauteilen kennzeichnen, so dass eine in die Tiefe gehende Lokalisierung, d. h. eine Lokalisierung in Richtung des Materialtransportes von aussen nach innen, in den Bereich der Realisierung gelangt.

2.6 Einfluss der Bauteilkonzeption

Halbleiterschaltungsbauteile sind, wie heute allgemein bekannt, normalerweise durch mehr als eine Schicht vor Einflüssen aus der Umgebung geschützt ([7]...[10], [24], u. a. m.). Diese Schutzschichten sind prinzipiell in Serie geschaltet, wenn man die Bewegungsrichtung des Materialtransportes als Referenz bezeichnet. Ausser den Schutzschichten (z. B. äusserer Gehäuseteil, Fett, Lack, Oxydschicht) gibt es noch Schutzvorrichtungen, welche als parallel geschaltet aufgefasst werden können (Getter-Stoffe). Soll eine Leckprüfung durchgeführt werden, so muss unbedingt angegeben werden, welcher oder welche dieser Schutzmechanismen davon betroffen werden sollen, d. h. welche dieser Schutzvorrichtungen als solche zu untersuchen sind.

Beispielsweise wird während des sog. «Bomb-Testes», welcher prinzipiell später noch eingehend behandelt wird, durch aussen angelegten Überdruck eine spezifizierte Flüssigkeit durch allfällig vorhandene Leckstellen in das Innere der zu prüfenden Bauteile gepresst. Als Indikation dient in diesem Fall die Veränderung von elektrischen Kenngrössen. Das Resultat einer solchen Leckprüfung darf nicht ohne weiteres direkt mit dem Resultat einer anderen Leckprüfung verglichen werden, welche prinzipiell nur den Schutz der äusseren Gehäuseumhüllung erfasst.

Im allgemeinen ist es nützlich, im Zusammenhang mit Dichtheitsprüfungen für die Beschreibung der zu prüfenden Bauteilkonzepte eine diesbezüglich, besonders geeignete Darstellung zu verwenden. Es ist noch gar nicht lange her, nämlich 1953 [25; 26], da wurden in zwei relativ kurzen Aufsätzen einer physikalischen Zeitschrift wahrscheinlich erstmals die Grundgedanken für die Realisierung einer solchen Darstellung veröffentlicht. Einfache Analogiebeziehungen zwischen bestimmten Prozessen einer Materienströmung und Prozessen, welche bei der Modellvorstellung des elektrischen Stromes als Partikelwanderung auftreten, wurden aufgestellt und diskutiert. Streng genommen ist eine solche analoge Transformation nur unter sehr einschränkenden Voraussetzungen gültig, aber für den hier verwendeten Zweck, nämlich eine anschauliche und übersichtliche Darstellung der Verhältnisse zu erhalten, darf die erwähnte Grundlage für die analoge Transformation verwendet werden. Die Anwendung des Grundgedankens besteht in der Aufstellung äquivalenter Flussdiagramme, welche, ähnlich den Ersatzschaltungen in der Elektrotechnik, eine einfache, schematische und nur prinzipiell gültige Darstellung erlauben, für viele Zwecke als Ausgangsbasis für vereinfachte, rechnerische Beziehungen gebraucht werden können, aber natürlich nur als Modellvorstellung unter sehr vereinfachten Bedingungen gültig sind. Mittels solcher äquivalenter Flussdiagramme kann jedem Bauteilkonzept eine Gruppe von Ersatzelementen in bestimmter Anordnung zugeordnet werden und Art und Grösse der Elemente, sowie ihre Zusammenschaltungsgesetzmässigkeiten bestimmen nachher die daraus resultierenden charakteristischen Eigenschaften des Konzeptes bezüglich Dichtheit.

Bezeichnet man den Flusswiderstand, welcher als Summe eines Leckpfadsystems in einem bestimmten Material, in Richtung des Materialtransportes (z. B. von aussen nach innen durch das Material der Metallkappe eines Transistors hindurch) auftritt, mit R , die Summe aller Möglichkeiten einer Materialspeicherung in demselben Material mit C (Flusskapazität) und die herrschende Druckdifferenz $P_i - P_o$ (Index i für Innenraum; Index o für Aussenraum) mit V (Flusspotentialdifferenz oder Flußspannung), kann man für die Konstruktionskonzepte von Halbleiterschaltungsbauteilen, unter Berücksichtigung der verschiedenen vorhandenen Materialien, äquivalente Flussdiagramme aufstellen, und dann analytische Betrachtungen über die Dichtheitseigenschaften der betreffenden Konfigurationen vornehmen. Diese äquivalenten Flussdiagramme können auch als Flussersatzschaltbilder bezeichnet werden, wenn man sich an die Terminologie der Elektrotechnik anlehnt.

In Fig. 2 ist beispielsweise ein Flussersatzschaltbild für eine bestimmte Transistorkonfiguration gezeigt. Das Bauteilkonzept besteht in diesem Fall aus einer mechanisch stabilen externen Umhüllung, dem Gehäuse, einem intern als Schutz gegen eindringende Stoffe zusätzlich angeordneten Füllstoff (z. B. Silikonfett mit eingebautem Getterstoff), sowie einer zuinnerst angeordneten Schutzschicht, welche in direktem Kontakt mit dem eingebauten Element steht (z. B. Oxydschicht auf dem Halbleiterkristall). Wie man aus Fig. 2 ersehen kann, wurde jede Schutzschicht durch eine Kombination von einem Flusswiderstand R und einer Flusskapazität C ersetzt, die je als konzentrierte Ersatzschaltelemente der Schaltung aufgefasst werden können.

Bei den heutigen Methoden für Dichtheitsuntersuchungen an fertiggestellten Halbleiterschaltungsbauteilen wird im allgemeinen nur die komplexe Schaltung des Flusswiderstandes zusammen mit der Flusskapazität ermittelt. Im Falle, wo man die Methode der Durchflussmessung anwendet, misst man grundsätzlich nur den Betrag des Flusswiderstandes allein. Man hat bisher nie im besonderen auf die störenden Einflüsse von Flusskapazitäten während der Dichtheitsprüfung geachtet. Im besonderen, wenn man Resultate von Durchflussmessungen mit solchen von fertigen Bauteilen erhaltenen vergleichen will, muss man die Speichereigenschaften des Bauteilkonzeptes, welche sich vor- oder nachteilhaft auswirken können, unbedingt in Betracht ziehen. Man sieht, dass es vorteilhaft ist, ähnlich, wie in der Elektrotechnik schon lange Zeit üblich, von Flussimpedanzen zu sprechen. In diesem Fall entspricht dann eine Dichtheitsuntersuchung der Bestimmung der Grössen der konzentrierten Ersatzschaltelemente, der Impedanzen oder Admittanzen.

Wahrscheinlich können viele Parameteränderungen, welche während der Betriebsdauer von Halbleiterschaltungsbauteilen

erfahrungsgemäss auftreten, und die eine sättigende Änderungscharakteristik aufweisen oder auch periodischen Änderungscharakter zeigen, wenigstens teilweise in Beziehung zu solchen Speichereffekten, hervorgerufen durch die vorhandenen Flusskapazitäten, gebracht werden. Indem man sie auf periodische oder auch einmalige Ladungs- und Entladungsvorgänge zurückführt, ist eine Erklärung plausibel und eventuell sogar im Bereich der Nachweismöglichkeit.

Unter Berücksichtigung der konzentrierten Ersatzschaltelemente R und C und der Verallgemeinerung der terminologischen Transformationen, d. h. Erweiterung der analogen Wechselbeziehungen, wie in Tabelle II gezeigt wird, kommt man zu der Feststellung, dass die Leckrate als Analogon zur elektrischen Leistung aufgefasst werden kann. Hierbei muss man selbstverständlich eine Verlustleistung verstehen. Analog zur Elektrotechnik kann man auch von Scheinleistung oder Scheinleckrate, Wirkleistung oder Wirkleckrate und auch Blindleistung oder Blindleckrate sprechen. Selbstverständlich kann man diese Eigenschaft der Leckrate, als Leistung darstellbar zu sein, auch auf Grund einer Dimensionsbetrachtung ableiten.

Analoge Transformationsbeziehungen zwischen elektrotechnischen und hydrodynamischen Ausdrücken

Tabelle II

Elektrotechnik	Hydrodynamik
q = Ladung	V = Volumen
$V = V_2 - V_1$ = Potentialdifferenz, Spannung	$P = P_2 - P_1$ = Druckdifferenz = Kraft pro Fläche
$I = \frac{dq}{dt}$ = Strom	$I = \frac{dV}{dt}$ = Materialfluss
$R = \frac{V}{I} = \frac{V dt}{dq}$ = Widerstand	$R = \frac{P dt}{dV}$ = Strömungswiderstand
$\frac{1}{R}$ = Leitwert	$\frac{1}{R}$ = Strömungsleitwert
$C = \frac{q}{V}$ = Kapazität	$C = \frac{V}{P}$ = Materialspeicher, Flusskapazität
$L = V \frac{dt}{dI} = V \left(\frac{d^2 q}{dt^2} \right)^{-1}$ = Induktivität	$L = P \left(\frac{d^2 V}{dt^2} \right)^{-1}$ = Flussinduktivität
$Z = a + jb$ = Impedanz	$Z = a + jb$ = Flussimpedanz
$\frac{1}{Z} = \frac{1}{a + jb}$ = Admittanz	$\frac{1}{Z} = \frac{1}{a + jb}$ = Flussadmittanz
$P = VI = V \frac{dq}{dt}$ = Leistung	$Q = P \frac{dV}{dt}$ = Leckrate
$dA = VI dt$ = Energie	$dA = P dV$ = Energie
$E = \frac{K}{q} = \frac{V}{I}$ = Feldstärke	$E = \frac{P}{I}$ = Feldstärke

Für den in dieser Veröffentlichung verfolgten Zweck der veranschaulichenden Darstellung von Bauteilkonzeptionen bezüglich Dichtheitseigenschaften ist eine noch fortgeschrittene Verallgemeinerung der analogen Beziehungen durchaus, und auf einfache Art und Weise, denkbar. So könnte man beispielsweise weitere konzentrierte passive Schaltelemente mit linearem oder nichtlinearem Übertragungscharakter, wie z. B. Induktivitäten, nicht lineare Widerstände, Dioden u. a. m., einführen, oder auch noch aktive Schaltelemente hinzuziehen, welche auch in linearen oder nichtlinearen Variationen auftreten würden.

Die Einführung weiterer konzentrierter Ersatzschaltelemente für die Beschreibung des Schutzaufbaues bezüglich Dichtheit kompliziert selbstverständlich das Vorstellungsvermögen über die stattfindenden Transportprozesse, führt jedoch auf alle Fälle zu einem besseren Verständnis der Mechanismen.

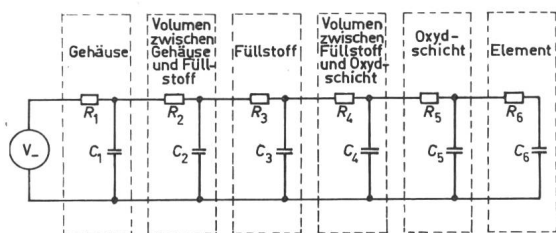


Fig. 2

Vereinfachtes, an das Problem der Leckprüfuntersuchungen angepasstes Materieflusserersatzschaltbild einer hypothetischen Transistorkonfiguration

2.7 Kritische Teile der Halbleiterschaltungsbauteilkonstruktionen

Die Kenntnisse über die kritischen Teile von Konstruktionen, welche den eigentlichen Halbleiterschaltungsbauelementen zum Schutz gegenüber einem Materialaustausch mit der Umgebung dienen sollen, ist von wesentlicher Bedeutung. Oft erlauben diese Kenntnisse ein wirkungsvolles Aussieben schlechter Exemplare aus einer gegebenen Gesamtheit. Die folgende Anordnung der kritischen Teile entspricht erfahrungsgemäss derjenigen Rangordnung, die sich ergibt, wenn man die Anzahl Ausfälle, die bei einer solchen Untersuchung festgestellt werden, nach der Häufigkeit ihres Auftretens innerhalb bestimmter Merkmalgruppen anordnet, und zwar so, dass das Ausfallmerkmal mit der grössten Ausfallhäufigkeit zuerst aufgezählt wird:

- a) Verschlussstelle;
- b) Glaseinschmelzung der Gehäuseteile;
- c) Glaseinschmelzung der Zuführungsdrähte;
- d) Glaseinschmelzung selber (Glasdefekte);
- e) Scharfe Ecken oder Krümmungen in gezogenen Unterteilen (z. B. Kappen).

Wie man sieht, ist die Verschlussstelle im Verhältnis zu allen anderen speziellen Partien der Konstruktion die kritischste. Hiefür gibt es eine einfache logische Erklärung: Die Verschlussstelle ist, jedenfalls bei den heute noch üblichen Konstruktionen, im Verhältnis zu allen anderen kritischen Stellen diejenige, wo das Produkt aus der Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines störenden Effektes und dem bezüglich Abdichtung kritischen Bereich am grössten ist. Allgemein charakterisiert dieses Produkt sehr gut die Eigenschaften einer bestimmten Stelle bezüglich kritischem Verhalten. Will man demzufolge eine bessere Abdichtung der Umhüllung erhalten, muss man entweder danach trachten, die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Störeffektes an den kritischen Stellen der Konstruktion durch Verbesserung der Prozesse, die zur Erzeugung dieser Stellen beitragen, zu verringern [27], oder man muss durch Änderung der Konstruktion versuchen, den für die Abdichtung verantwortlichen Bereich zu verkleinern. Nicht ganz unzweckmässig ist hier der Vergleich mit der relativ kleinen Verschlussstelle an einem Flaschenhals. Schliesslich kann man gut verschlossene Weinflaschen oder auch Weinfässer, für welche die Verhältnisse diesbezüglich noch günstiger liegen, jahrzehntelang und mehr aufbewahren, ohne störende Flüssigkeitsverluste zu erhalten. Es gibt noch einen anderen Grund für eine Verkleinerung des kritischen Bereiches der Verschlussstelle. Die durch äusseren Unterdruck im Inneren eines Gehäuses wirkenden Kräfte, welche eine Verschlechterung der Dichtheitseigenschaften hervorrufen können, reduzieren sich mit abnehmendem Wirkungsbereich, d. h. sie werden umso wirkungsloser, je kleiner die ihnen zur Verfügung stehende Angriffsfläche ist.

Aus diesen Überlegungen geht auch, wenigstens prinzipiell, eine analoge Reihenfolge der betreffenden kritischen Stellen hervor, wenn man die heute üblicherweise verwendeten Umhüllungskonstruktionen für Halbleiterschaltungsbauteile betrachtet.

Die Qualität der Glaseinschmelzungen, für den Fall der Schmelzstelle an Gehäuseteilen, wie auch für den Fall der Drahteinschmelzungen, hängt sehr weitgehend von den Kontakteigenschaften zwischen der Oxydschicht des Metalls und dem Metall selber ab. Der gute Kontakt zwischen Glas und

Oxydschicht ist meistens einfacher herzustellen als der Kontakt zwischen Oxyd und Metall [23; 24].

Das Problem der Vermeidung von Glasdefekten in den Glaseinschmelzungen oder Glasteilen einer Umhüllung kann vor allem durch eine günstige Anpassung der Temperaturausdehnungskoeffizienten der verschiedenen für die Umhüllung verwendeten Materialien gelöst werden. Schon während des Herstellungsprozesses können die Unterteile oder auch die fertiggestellten Schaltungsbauteile Temperaturbeeinflussungen ausgesetzt sein, die bei einer schlechten Anpassung der Ausdehnungskoeffizienten zu Glassprüngen usw. führen können [24]. Diese Temperaturbeanspruchungen können länger andauern oder aber auch schockartig wirken, so dass man nicht nur die Zustände bei statischen Beanspruchungsverhältnissen, sondern auch die durch dynamische Aktionen hervorgerufenen Spannungszustände, wie sie z. B. durch einen unsorgfältig durchgeführten Verschlussprozess erzeugt werden können, in die Beurteilung einbeziehen muss. Prinzipiell sollten nach Abschluss des Fertigungsprozesses keine inneren Spannungszustände in den Gehäuseteilen zurückbleiben.

Treten potentielle Leckstellen an Kanten oder Ecken gezogener Materialien auf, so lassen sie sich relativ einfach durch Sichtkontrolle, eventuell sogar unter Vergrösserung, eliminieren, bevor das Unterteil, z. B. eine Kappe, in den weiteren Produktionsprozess einbezogen wird.

Ein sehr wichtiges Thema im Zusammenhang mit der Undichtheit verschiedener Konstruktionsprinzipien von Halbleiterschaltungsbauteilen ist die Beziehung zwischen dem freien Speichervolumen V_S im Inneren der Umhüllung, dem kritischen Oberflächenbereich des Halbleiterelementes selber A_S und der Leckrate. Es ist verständlich, dass, je kleiner das Volumen V_S ist, umso mehr eine vorgegebene Quantität N eines bestimmten Stoffes den vorgegebenen kritischen Bereich der Oberfläche A_S beeinflussen wird, denn die Wahrscheinlichkeit, dass eine Reaktion von N auf dem Oberflächenbereich A_S stattfindet, steigt mit abnehmendem Volumen V_S . Andererseits verursacht eine Zunahme des Verhältnisses A_S/V_S auch eine Zunahme der Reaktionswahrscheinlichkeit und -intensität von N . Wenn also nur auf Grund der Werte von Leckraten ein Vergleich zwischen verschiedenen Halbleiterschaltungsbauteilen vorgenommen wird, so kann dieser Vergleich bezüglich Auswirkungen sehr unterschiedliche Ergebnisse liefern, wenn dabei nicht gleichzeitig Angaben über V_S und A_S beigelegt werden. Auch die Empfindlichkeiten bezüglich Oberflächenreaktionen der Halbleiterbauelemente mit dem betreffenden Prüfmaterial müssen nicht in jedem Fall gleich geartet sein und sollten jeweils dementsprechend zumindestens qualitativ in die Diskussion einbezogen werden.

Aus diesen Überlegungen lassen sich zwei weitere Regeln für die Konzipierung von Halbleiterschaltungsbauteilumhüllungen ableiten:

- a) Das für den Materialaustausch im Innern der Umhüllung zur Verfügung stehende Volumen V_S sollte so gross wie möglich sein (in der Ausdrucksweise des Flussersatzschaltbildes: ein grosser Flusswiderstand und eine grosse Flusskapazität).

Dieses freie Volumen im Innern der Umhüllung kann durch Getterstoffe, welche selektiv auf bestimmte für den Austausch in Frage kommende Materialien reagieren, künstlich vergrössert werden (Getterstoffe, welche z. B. eine Feuchtigkeitsspeicherung gestatten).

b) Der kritische Oberflächenbereich der in der Umhüllung eingebauten Halbleiterelemente A_S sollte so klein wie möglich gestaltet werden und demzufolge auch eine möglichst einfache Form erhalten.

Das Erhalten eines möglichst einfach geformten kritischen Oberflächenbereichs mit minimalen Ausdehnungen kann durch konstruktive Massnahmen und auch durch sorgfältige technologische Steuerung während der Fertigung garantiert werden.

2.8 Anwendung von Zusatzbeanspruchungen bei Dichtheitsprüfungen

Neben den erstrangigen Beanspruchungen, welche, wie in Abschnitt 2.3 beschrieben worden ist, einen Materialtransport durch eventuell vorhandene Leckstellen in der Umhüllung eines Bauteiles verursachen, treten auch andere Beanspruchungen in mehr oder weniger wirksamer Form auf, welche einen indirekten Einfluss auf die Dichtheit der Umhüllungen haben können [17]. Beispielsweise ergeben sich solche Beanspruchungen aus: Temperaturunterschieden, magnetischen Feldern, elektrischer Leistung, Strom oder Spannung, welche für den Zweckeinsatz der Bauteile notwendig sind, mechanischen Kräften, welche sich z. B. durch die Befestigungsart ergeben, chemischen Einflüssen, herrührend von der Umgebung der Bauteile, Strahlung (Einsatz in der Nähe von Reaktoren), biologischen Komplexen, wie z. B. der Wachstum von Mikroorganismen usw. Alle diese Zusatzbeanspruchungen können statisch oder dynamisch oder auch in kombinierter Wirkungsweise auftreten. Ihr Auftreten kann einmalig oder wiederholt sein, periodisch oder nicht periodisch, einzeln oder gemischt, im Innern der Umhüllungen, ausserhalb der Umhüllungen wie auch beidseitig. Der Einfluss der Zusatzbeanspruchungen kann mit vorteilhaften oder nachteiligen Folgen verbunden sein und nicht nur direkte, sondern auch indirekte Auswirkungen haben. Die umhüllenden Schutzschichten, die der Abschirmung gegen Materialaustausch dienen, können durch Zusatzbeanspruchungen kurzzeitige oder lang andauernde Veränderungen, reversibler und/oder nicht reversibler Art erleiden, die zum Teil recht beträchtliche Ausmasse annehmen können (z. B. Brüche oder Risse in Oxydschutzschichten, hervorgerufen durch thermische Ermüdungsbeanspruchung, oder auch Veränderung der Getterstoffeigenschaften durch Temperaturbeanspruchung usw.). Folglich muss während der Durchführung von Dichtheitsprüfungen unbedingt die Möglichkeit bestehen, zusätzliche Beanspruchungskomplexe wirken zu lassen, wenn man Wert darauf legt, dass die Resultate wirklichkeitsgetreu sind und somit eine sinnvolle Aussage ergeben sollen, die eventuell für eine mehr konkrete Vorhersage des Verhaltens in der Wirklichkeit dienen soll.

Zusätzlich zu diesen während des Prüfvorganges wünschgemäss zu applizierenden Beanspruchungen treten während der Prüfung jedoch auch unerwünschte zusätzliche Beanspruchungen auf, welche die erwarteten Resultate oft störend beeinflussen, ja, sogar manchmal total verfälschen. Demzufolge müssen die gesamten Einflusskomponenten während der Prüfung jeweils bis ins kleinste Detail analysiert und dementsprechend bei der Auswertung der Ergebnisse berücksichtigt werden. Eine Speicherung aller Messgrössen, die der Beschreibung des Testvorgangs dienen, ist unumgänglich und bei einer vergleichenden Beurteilung sollten diese Angaben unbedingt berücksichtigt werden.

Auch der Initialzustand der zu testenden Bauteile ist von wesentlicher Bedeutung. Einerseits können unerwünschte Beanspruchungen schon vor dem Testvorgang ihre schädlichen

Einflüsse ausgeübt haben (z. B. Korrosion durch Lagerung in der Nähe von schädlichen Stoffen), andererseits kann der Initialzustand auch direkten Einfluss auf die Prüfergebnisse haben, man denke hierbei vielleicht an eine Prüfung, welche an Glasdurchführungen vor und nach einem Tauchverzinnungsprozess durchgeführt wurde, ohne dass diese Tatsache bekannt ist. Durch den Temperaturschock während des Tauchverzinnungsvorganges könnte gegebenenfalls eine Undichtheit durch Glassprung erzeugt worden sein, die dann als Materialanlieferungsausfall gewertet würde.

3. Diskussion verschiedener heute üblicher Prüfmethoden

Wie später in Abschnitt 5 noch im einzelnen beschrieben werden wird, gibt es sehr viele Möglichkeiten, Leckteste durchzuführen, d. h. die Quantität eines Prüfmateri als zu ermitteln, die während eines bestimmten Zeitabschnittes durch eine Leckstelle in eine Umhüllung eindringt. Für die folgende Diskussion sind die wichtigsten heute in der Halbleiterschaltungsbauteiltechnik üblicherweise vom Hersteller wie auch vom Anwender solcher Bauteile angewendeten Prüfmethoden erläutert. Dabei sollen zuerst die relativ einfachen Methoden behandelt werden. Die Bezeichnungen der Prüfmethoden, welche international noch nicht genormt worden sind, sowie auch die Klassifikation der Methodengruppe sollen weitgehend dem jeweiligen Detektionsverfahren angepasst sein. Dieses Vorgehen ist einfacher und die resultierenden Begriffe sind auch verständlicher als wenn die Benennung von der Seite der Prüfbedingungen aus vorgenommen würde, wie es teilweise z. B. in [28] getan worden ist. Will man, was jedoch im folgenden Text nicht der Fall ist, eine weitere systematische und logische Unterteilung der Prüfmethodengruppen vornehmen, so wird man wahrscheinlich dann doch zur Beschreibung auf Grund des Prüfbeanspruchungskomplexes greifen müssen. Das Resultat wird dann aber auch entsprechend kompliziert ausfallen.

Die zur Diskussion stehenden zehn Gruppen von Prüfmethoden sollen in der folgenden Reihenfolge besprochen werden:

- a) Optische Detektionsmethoden;
- b) Detektion durch gefärbte Flüssigkeiten;
- c) Detektion durch Gasblasen;
- d) Detektion durch fluoreszierende Stoffe;
- e) Chemische Gasdetektion;
- f) Detektion durch Änderung von Oberflächenzuständen;
- g) Druckdifferenzdetektionsmethoden;
- h) Massenspektrometrische Flüssigkeitsdetektion;
- i) Detektion von radioaktiven Stoffen;
- j) Massenspektrometrische Gasdetektion.

3.1 Optische Detektionsmethoden

Die optische Kontrolle von Objekten ist wohl die einfachste Methode für die Ermittlung von Leckstellenvorkommen in einer Exemplargesamtheit [28]. Die optische Kontrolle kann mit oder ohne Vergrösserungsvorrichtungen, wie Lupen, Binokulare oder Mikroskope geschehen. Durch Bestrahlen oder Durchleuchten der zu prüfenden Gegenstände mit Licht verschiedenster Frequenzen, d. h. mit Licht verschiedener Färbung, stehen dem Beobachter eine Vielzahl von Detektionsmethoden zur Verfügung, die, je nach Fall, den Gegebenheiten angepasst, ihre Anwendung finden können. Der Prozess der optischen Kontrolle dient vor allem dem einfachen Auslesen und Lokalisieren von relativ groben Leckstellen. Die Anwendung von Licht ist im üblichen Bereich der Lichtintensität prinzipiell nichtzerstörend. Selbstverständlich würde die

Benützung eines Laserstrahles für die Detektion von Leckstellen eine spezielle Überprüfung der gegebenen Umstände bezüglich Destruktivität verlangen. Die höchste zu erwartende Detektionsempfindlichkeit kann unter sehr vorteilhaften und speziellen Bedingungen etwa mit 10^{-5} Torr · Lit./s angegeben werden. Obwohl diese Gruppe von Methoden an und für sich bezüglich Empfindlichkeit nicht gerade sehr hochwertig ist, kann sie doch bei der Auslese grosser Stückzahlen eine wesentliche Rolle spielen, nicht zuletzt auch wegen des geringen Aufwandes bezüglich Prüfzeit und -vorrichtungen. Optische Kontrollen können an halbfertigen, sowie auch an fertiggestellten Produkten durchgeführt werden. Da keine quantitativen Angaben bezüglich Leckrate erhalten werden, muss die optische Kontrolle in die Klasse der quantitativen Methoden eingereiht werden. Sie ist dazu noch durch subjektive Beeinflussung gekennzeichnet. Diese Beeinflussung kann jedoch durch geeignete Massnahmen, wie Fehlermerkmalklassifizierung, Festlegung der Beleuchtungs- und Betrachtungsverhältnisse usw. weitgehend reduziert werden. Zusätzliche Beanspruchungen können prinzipiell wohl gleichzeitig mit der Beobachtung appliziert werden, jedoch wird diese Möglichkeit heute noch wenig ausgenützt. Ein grosser Vorteil besteht darin, dass diese Prüfmethodegruppe prinzipiell gleich nach Beendigung einer bestimmten Prozessstufe zur Anwendung gelangen kann. Es sind grundsätzlich keine preparativen Vorkehrungen notwendig. Schliesslich darf man noch erwähnen, dass eine optische Kontrolle an allen möglichen Bauformen durchführbar ist.

3.2 Detektion durch gefärbte Flüssigkeiten

Sollen Leckstellen durch gefärbte Flüssigkeiten ermittelt werden, so werden während einer bestimmten Zeit die zu prüfenden fertiggestellten Exemplare unter erhöhtem Druck in einer gefärbten Flüssigkeit gelagert. Die Exemplare werden anschliessend herausgenommen, an der Aussenseite gereinigt und schliesslich mit oder ohne Vergrösserung betrachtet. Eine andere Variante besteht darin, dass durch ein allfällig vorhandenes Leck eine Mischung einer Flüssigkeit mit einem stark wirksamen Farbstoff (z. B. Alkohol und Fuchsin) zustande kommt. Dabei wird der Farbstoff in Puderform in das Gehäuse befördert und dort durch Bewegung zerstreut. Die durch das Leck eintretende Flüssigkeit wird, zuerst an der Stelle des Leckes selber und dann weiter um sich greifend, eine intensive Verfärbung verursachen. Die Verfärbung selber, oder der aus ihr resultierende Rückstand, sind als Indikation für das Vorhandensein einer Leckstelle aufzufassen. Im günstigsten Fall kann bei dieser Leckprüfmethodegruppe eine Detektionsempfindlichkeit von etwa 10^{-5} Torr · Lit./s erwartet werden.

Der beschriebene Detektionsprozess dient hauptsächlich der Lokalisierung von Leckstellen und auch ihrer formmässigen Beurteilung. Gerade in dieser Beziehung sind die Methoden der Detektion von gefärbten Flüssigkeiten besser geeignet als eine einfache optische Kontrolle ohne zusätzliche Verwendung eines Prüfmaterials bestimmter Zusammensetzung. Je nachdem, welche Flüssigkeit gewählt und welche Methode für das erzwungene Eindringen der Flüssigkeit angewendet wird, kann die besprochene Prüfmethodegruppe destruktiven oder nicht-destruktiven Charakter besitzen. Man erhält keine quantitativen Ergebnisse. Die Prüfmethoden können Ergebnisse für fertiggestellte, wie auch für halbfertiggestellte Teile liefern, und auch Untersuchungen nach dem Durchflussprinzip sind durchaus üblich. Wie bei der optischen Kontrolle sind in dieser

Prüfmethodegruppe die Resultate, wenn auch in geringerem Umfang, subjektiv durch den Betrachter beeinflusst. Zusätzliche Beanspruchungen können während beider Prüfphasen, der Druckphase für das erzwungene Eindringen der Prüf- flüssigkeit, sowie auch der Detektionsphase, aufgeprägt werden, normalerweise aber wird ein solches Verfahren nicht angewendet. Grosse Stückzahlen können im Gegensatz zur optischen Kontrolle nicht mehr so einfach verarbeitet werden. Grundsätzlich kann schliesslich die Detektion von gefärbten Flüssigkeiten für alle möglichen Gehäuseformen angewendet werden.

3.3 Detektion durch Gasblasen

Zwecks Detektion von Leckstellen durch Gasblasen werden die zu prüfenden Bauteile in eine Flüssigkeit getaucht. Ein Druckunterschied wird derart erzeugt, dass der Innendruck in den Bauteilgehäusen weit höher ist als der auf die Flüssigkeit wirkende Umgebungsdruck. In diesem Fall wird bei Vorhandensein einer Leckstelle genügender Grösse eine Gasblase nach der anderen austreten. Bei gegebener Distanz vom Flüssigkeitsspiegel und gegebener Flüssigkeitszusammensetzung kann von der zeitlichen Folge der Gasblasen, wie auch von ihrer Grösse auf die Lochart (Schlitzartig, rund, auf verschiedene Orte verteilt usw.) und Lochgrösse qualitativ geschlossen werden. Diese Schlussfolgerungen haben jedoch nur rein rangmässige Bedeutung. Durch Reduktion der Menge der Flüssigkeit, welche die zu prüfenden Exemplare umgibt, bis zum dünnen Flüssigkeitsfilm kann man die Empfindlichkeit der Methodik etwas steigern. Schliesslich ist die Empfindlichkeit nur noch von der Oberflächenspannung der Flüssigkeit und dem Radius der Leckstelle abhängig (siehe dazu auch [20], S. 66). Alle verschiedenen Versionen dieser Prüfmethodegruppe, wie Stearin- oder Glycerinprüfungen, bei welchen der Überdruck durch Tauchen der Exemplare in eine erhitzte Flüssigkeit geschieht, Vakuumblasenprüfung, bei welcher die Druckdifferenz durch ein aussen angelegtes Vakuum erzeugt wird, oder Seifenblasenprüfung, welche wohl zur empfindlichsten Sorte gehört, haben eines gemeinsam, sie lassen sich mit relativ geringem Aufwand sehr rasch durchführen und eignen sich demgemäss für die Auslese von grösseren Mengen, wenn auch nur für grobe Leckstellen. Dieses, weil die maximal zu erwartende Empfindlichkeit auf etwa 10^{-5} Torr · Lit./s beschränkt ist. Die Gasblasendetektion eignet sich für die Lokalisierung von Leckstellen, gibt jedoch direkt, ohne spezielle Vorkehrungen keine zahlenmässigen Ergebnisse. Nur durch Auffangen der Blasen in einem Messrezipienten kann auch mittels dieser Methodegruppe bei gegebenen Druck- und Zeitverhältnissen eine zahlenmässige Interpretation der Ergebnisse vorgenommen werden. Durch spezielle Vorbereitungen der zu prüfenden Bauteile, z. B. Füllen mit Alkohol vor der Prüfung, kann gegebenenfalls eine weitere Steigerung der Empfindlichkeit erhalten werden. Diese ist jedoch nur verhältnismässig wirksam, indem durch Erhöhung des Dampfdruckes dieser Flüssigkeit, beispielsweise durch Temperaturerhöhung hervorgerufen, im Verhältnis zum Vorgang ohne Alkohol eine grössere Druckdifferenz erzeugt wird. Unterteile, wie auch fertige Bauteile können durch diese Methodik geprüft werden. Auch die Anwendung des Durchflussprinzips ist realisierbar. Jenachdem, welcher Art die während der Prüfung auftretenden Zusatzbeanspruchungen (die unerwünschten) sind, muss die Methodik der Gasblasendetektion als destruktiv oder nicht-destruktiv bezeichnet werden. Ein grosser Vorteil ist auch hier

wieder, dass grundsätzlich die Anwendung der Prüfung ohne spezielle Vorkehrungen, direkt nach Beendigung eines Herstellungsprozessabschnittes geschehen kann. Eine kleine Einschränkung in der Anwendung ergibt sich durch die Tatsache, dass nur Bauteile mit gasgefüllten Umhüllungen auf diese Art untersucht werden können. Für weitere Einzelheiten über verschiedene Varianten dieser Methodengruppe siehe [8; 17; 22; 28].

3.4 Detektion durch fluoreszierende Stoffe

Um eine Detektion von Undichtheiten mittels fluoreszierender Stoffe durchzuführen, werden die zu prüfenden Exemplare unter Überdruck mit dem fluoreszierenden Puder bestäubt. Nach Herausnahme aus der Bestäubungskammer werden sie an der Aussenseite mit Luftstrom soweit vom Prüfmaterial befreit, dass nur noch örtliche, relativ scharf gemusterte Akkumulationen des Puders übrig bleiben. Dieser Prozess kann etwa mit den Untersuchungen von Oberflächenbeschaffenheiten durch graduelles Abätzen verglichen werden, wobei im vorliegenden Fall jedoch die sukzessive Entfernung von störendem Prüfmaterial nicht durch ein Ätzmittel, sondern durch den Luftstrom geschieht. Durch das Verfahren können sehr feine strukturelle Veränderungen, die auf eine Anomalität hinweisen, und potentielle Quellen für Undichtheiten darstellen, lokalisiert und analysiert werden.

Das Verfahren ist nicht für die Beurteilung von grossen Exemplarzahlen geeignet. Hauptsächlich dient es, wie schon erwähnt, der Ermittlung von potentiellen Ursachen für Leckstellen, und nimmt damit unter den anderen Gruppen von Leckprüfmethoden eine Sonderstellung ein. Vor allem sind auch Strukturänderungen der Oberfläche, welche z. B. durch Beanspruchungen während des Verschliessprozesses erzeugt werden können, feststellbar.

Da als Resultat des Verfahrens keine ziffernmässigen Resultate erscheinen, sondern nur klassifizierbare Merkmale, ist die Auswertung der Ergebnisse immer mit der Subjektivität des Beobachters behaftet. Eine direkte Angabe der maximal zu erwartenden Empfindlichkeit ist nicht möglich, denn inwiefern nun gegebenenfalls eine festgestellte Absonderlichkeit in der Oberflächenstruktur auch mit einer Undichtheit identifiziert werden kann, ist nur relativ schwer ermittelbar (durch sukzessives Abdecken mit einem Lack und gleichzeitiger Messung der Durchflussdichtheit). Somit besteht also nur ein korrelativer Zusammenhang, welcher jedoch nicht vorhergesagt werden kann, sondern jeweils als Ergebnis weiterer Untersuchungen resultiert. Für dichte Exemplare ist die Methode der Detektion durch fluoreszierende Stoffe grundsätzlich nicht destruktiv. Die zu prüfenden Bauteile oder Unterteile können bis auf sehr spezielle Einschränkungen nahezu beliebige Formen aufweisen, und auch jeweils sofort nach Beendigung eines bestimmten Fabrikationsabschnittes analysiert werden. Die gleichzeitige Applikation von zusätzlichen Beanspruchungen während der Prüfung ist prinzipiell möglich, aber bis jetzt noch nicht üblich. Weitere Einzelheiten sind in [8; 17; 22] zu finden.

3.5 Chemische Gasdetektion

Soll für die Ermittlung von Leckstellen die Detektion des Prüfmaterials, in diesem Fall ein bestimmtes Gas, durch chemischen Nachweis geschehen, so werden die zu prüfenden Teile für eine vorbestimmte Zeit unter Einwirkung von erhöhtem Druck in einer von diesem Prüfgas gesättigten Atmosphäre gelagert, so dass das Prüfgas gegebenenfalls durch vorhandene

Leckstellen in genügender Menge eindringen und gespeichert werden kann. Nach Entnahme aus der Druckkammer werden die Teile äusserlich sorgfältig gereinigt und dann wird die chemische Nachweismethode des Prüfgesetzes angewendet.

Als Prüfgas wird oft Ammoniak verwendet, als Nachweis dient in diesem Falle Ozalidpapier [15].

Bei Hochvakuumssystemen wird diese Methodik, auch im Durchflussverfahren, heute oft zwecks Lokalisierung von Leckstellen angewendet. Sie eignet sich jedoch auch für Untersuchungen an kleinen Bauteilen, wenn man dem beschriebenen Verfahren entsprechend vorgeht. Die Methode darf jedoch im Halbleiterschaltungsbauteilsektor heute noch als unkonventionell bezeichnet werden. Die Empfindlichkeit des Nachweises ist etwa bei 10^{-11} Torr · Lit./s begrenzt [15]. Die ausserordentlich hohe Empfindlichkeit macht diese Methode besonders geeignet. Selbstverständlich wird die hohe Empfindlichkeit nur durch eine relativ lange Prüfzeit erhalten. Auch Aussagen über die Form von Leckstellen sind durch dieses Verfahren möglich, jedoch empfiehlt sich in diesem Fall eine zeitlich gestaffelte Beobachtung der Reaktionen. Die Methodik ist prinzipiell destruktiv, denn Ammoniak beeinflusst nachgewiesenermassen die Oberflächen von Germanium und Silizium [10]. Dementsprechend ist eine Anwendung der beschriebenen Detektionsmethode für die Untersuchung von grossen Stückzahlen, wie auch für hundertprozentige Auslese, nicht statthaft. Zusätzliche Beanspruchungen können grundsätzlich während des eigentlichen Prüfprozesses beigelegt werden. Bei fertigen Bauteilen muss eine Druckphase vor der Detektionsphase vorgesehen werden, womit das Erhalten der Ergebnisse etwas verzögert wird. Diese Verzögerung ist umso grösser, je grösser die gewünschte Empfindlichkeit sein soll. Die chemische Gasdetektion darf, wie übrigens alle Gasdetektionsmethoden, nur dann angewendet werden, wenn die Bauteile im Inneren ein genügend grosses Speichervolumen für das Prüfgas enthalten.

3.6 Detektion durch Änderung von Oberflächenzuständen

Für die Detektion von Undichtheiten durch Veränderung von Oberflächenzuständen der im Inneren der Umhüllungen eingebauten Bauteilelemente werden die zu untersuchenden Bauteile eine bestimmte Zeit in eine Druckkammer eingeschlossen. Die Druckkammer enthält eine Prüfliquidität oder ein Prüfgas. Die Druckkammer ist verhältnismässig zum Innenraum der zu prüfenden Bauteile unter Überdruck. Die Prüfliquidität oder das Prüfgas (Prüfmaterial) muss unbedingt die Eigenschaft besitzen, zwangsläufig an der Oberfläche des zu prüfenden Bauteilelementes eine, durch äusserlich angewandte elektrische Messung erkennbare, Veränderung zu verursachen [29]. Eine solche elektrische Messung muss vor und nach der Drucklagerung stattfinden. Da gerade die auf Oberflächenveränderungen besonders empfindlichen Parameter wegen ihrer besonderen Empfindlichkeit nicht immer sehr stabil sind, ist es zweckmässig, parallel zum eigentlichen Prüfverfahren eine statistisch genügend grosse Anzahl Bauteile aus der gleichen Grundgesamtheit unter äquivalenten Beanspruchungsbedingungen und Zeitverhältnissen zu lagern. Hierbei soll nur der Einfluss des Prüfmaterials ausgeschlossen werden. Werden nun auch von dieser parallel gelagerten Bauteilgruppe die Veränderungen im Prüfablauf registriert, so ist eine klare Trennung der Änderungsursachen der einen Gruppe gegenüber der anderen statistisch mit beliebiger Genauigkeit

möglich [30], wenn man genügend grosse Stückzahlen zur Verfügung hat. Ist der eigentliche Beanspruchungszyklus, die Druckphase, abgeschlossen, so geschieht, wie schon angedeutet, eine erste Wiederholung der elektrischen Messung. Weitere Wiederholungen müssen entsprechend den Verhältnissen nach Tagen oder auch Wochen stattfinden, da gerade, wenn im Inneren der Bauteilmhüllungen zusätzliche Schutzmechanismen angeordnet sind, ein Eindringen von Fremdstoffen verzögert wird. Jedenfalls ist es unbedingt notwendig, sich wiederholt davon zu überzeugen, dass die Wartezeit genügend gross gewählt ist, so dass ein festzulegender Prozentsatz von Ausfällen (z. B. 99%) garantiert erfasst wird. Ohne wiederholte Abklärung gemäss den Regeln, welche beim Planen und Auswerten von Versuchen ganz allgemein zu befolgen sind [31], könnten schleichende Veränderungen der Produkteigenschaften eine Verfälschung der Dichtheitsprüfresultate hervorrufen. Die Begründung für die Wiederholungen der elektrischen Messungen nach der Druckphase liegt in der Gefahr verankert, dass bei sehr grossen Leckstellen ein rasches Entweichen des Prüfmaterials gleich nach Beenden der Druckphase auftreten kann, und im Fall, wo das Prüfmaterial irreversible Veränderungen nur in begrenztem Mass hervorgerufen hat, nur ungenügende Abweichungen der Messparameter vom ursprünglichen Wert für die Indikation zur Verfügung stehen.

Die Methodengruppe der Detektion durch Anzeige von Oberflächenzustandsänderungen gehört heute zu den realistischsten. Das Prüfkonzept ist besonders durch die Tatsache charakterisiert, dass das Prüfmaterial wirklich bis ins Innerste des Bauteiles, nämlich bis zur Oberfläche des Bauelementes selber, vordringt, grundsätzlich auch einer Diffusion weiter ins Innere nichts im Wege steht. Ganz gleich, wie komplex eine Bauteilkonfiguration auch aussehen mag, das Eindringen des Prüfmaterials wird dann angezeigt, wenn alle Schutzvorrichtungen überwunden worden sind, d. h. bis es zu der Stelle gelangt, wo es Schaden anrichten kann. Es findet eine über alles integrierende Anzeige statt.

Die bekannten Methoden, nach welchen mit Alkohol oder mit Wasser und einem Spülmittel gearbeitet wird, werden mit dem Begriff «Bombtest» umschrieben. Obwohl der ganze Prüfungsvorgang inklusive Detektionsphase in der Praxis Wochen in Anspruch nimmt, gehört er zu den universellsten. Die notwendige Ausrüstung für die Durchführung der Prüfung ist immer noch mit verhältnismässig geringem Aufwand verbunden, wenn man mit anderen Prüfmethoden vergleicht.

Eine Anwendung von verschiedenen zusätzlichen Beanspruchungen während des eigentlichen Prüfungsvorganges ist noch nicht beschrieben worden, aber durchaus realisierbar. Natürlich würde dies das einfache Vorgehen auch mit zusätzlichen Schwierigkeiten verbinden, die sich gerade bei der Untersuchung von grösseren Stückzahlen auswirken würden. Der Prozess des Einleitens eines Fremdstoffes in ein Gehäuse, mit dem Zweck, dadurch Veränderungen hervorzurufen, muss grundsätzlich als destruktiv angesehen werden, wenn nicht garantiert wird, dass bei den verhältnismässig dichten Exemplaren zwangsläufig keine Beschädigungen auftreten.

Die Ergebnisse von solchen Prüfungen können sowohl rangmässig für Vergleichszwecke, als auch bezüglich ihrer charakteristischen Merkmale, z. B. mittlere Veränderungen, häufigste Veränderungen, Streuung der Veränderungen usw. ausgewertet werden, aber eine eigentliche ziffernmässige Ermitt-

lung von Leckraten ist nicht direkt möglich, denn eine Beziehung zwischen solchen elektrisch gemessenen Veränderungen und der eigentlichen Leckrate konnte bisher noch nicht abgeklärt werden. Dies ist durchaus begreiflich, wenn man sich die in Abschnitt 2.6 erläuterten Tatsachen über die Materialflusserersatzschaltbilder vergegenwärtigt. Ein grosser Vorteil liegt darin, dass die besprochene Methodik für alle möglichen Bauteilformen und Umhüllungskonfigurationen in Frage kommt, und somit auch für Bauteile, welche nach der Planartechnik extrem oberflächenmässig passiviert und durch Plastikumhüllungen mechanisch geschützt sind. Man schätzt, dass die extremste Detektionsempfindlichkeit etwa in der Gegend von 10^{-6} Torr · Lit./s liegt. Dies geht unter anderem aus Kreuzversuchen hervor, welche mit verschiedenen anderen Prüfmethoden, deren Empfindlichkeit weit höher liegt, und die eine quantitative Ermittlung der Leckrate erlauben, vorgenommen wurden. Diese Kreuzversuche sind mit Flüssigkeiten als Prüfmaterial durchgeführt worden. Dementsprechend ist es jedoch möglich, dass bei Verwendung eines aggressiven Gases als Prüfmaterial eine weit grössere Sensitivität resultieren könnte. Prinzipiell können alle Gase, welche nur die Oberfläche und nicht auch gleichzeitig die Schutzvorrichtungen, vom aussen angeordneten Gehäuse bis zur innenpositionierten Oxydschicht, angreifen, als Prüfgas Verwendung finden.

Als weitere Version von Oberflächenindikationsprüfungen kann man die nach alter Tradition immer noch durchgeführten Kochprüfungen in Wasser [32] und auch die bekannten Temperatur-Feuchtigkeitszyklen, welche übrigens auch sehr wirklichkeitsnah und oft auch ausserordentlich empfindlich sind, wie auch einzig in ihrer Indikation, erwähnen. Durch die lange Zeitdauer (Wochen), während welcher die Beanspruchung bei den Temperatur-Feuchtigkeitszyklen wirken kann und auch nicht zuletzt wegen der Dynamik der Beanspruchung, die auch an die Wechselfestigkeit des Dichtheit erzeugenden Komplexes zusätzliche Anforderungen stellt, können sich durch solche Verfahren auch Hinweise auf Mängel und Schwächen ergeben, die sonst in keinem anderen Prüfverfahren zum Ausdruck kommen.

Alle Prüfungen, die auf der Indikation durch Oberflächenzustandsveränderungen basieren, haben eines gemeinsam: Sie eignen sich vor allem für die Anwendung am fertiggestellten Bauteil. Eine Anwendung mittels Durchflussverfahrenstechnik an halbfertigen Produkten ist noch nicht beschrieben worden. Eine Lokalisierung oder auch der Versuch der Formbestimmung von Leckstellen ist nur indirekt, durch sukzessives Abdecken möglich. Für weitere Einzelheiten siehe [8; 17; 29].

3.7 Druckdifferenzdetektionsmethoden

Soll die Ermittlung der Leckrate durch Zuhilfenahme der Detektion von durch Undichtheit verursachten Druckänderungen erfolgen, so werden die zu prüfenden fertigen Bauteile in eine geschlossene Prüfkammer gebracht. Der Druck in dieser Kammer wird je nach dem, welche Verhältnisse diesbezüglich im Inneren der zu prüfenden Bauteile vorherrschen, mittels einer Pumpe herab- oder heraufgesetzt, so dass eine Druckdifferenz entsteht. Dann wird die Prüfkammer durch Schliessen eines den Verhältnissen entsprechend guten Verschlussystems von der Pumpe getrennt. Durch Anpassung von Form und Volumen der Prüfkammer an das zu prüfende Volumen und die Form des zu prüfenden Bauteiles kann man erreichen, dass das Restvolumen in der Prüfkammer, was

nach Einführung des zu prüfenden Bauteiles noch in der Prüfkammer für einen allfälligen Materialaustausch zur Verfügung steht, mindestens die gleiche Grössenordnung erhält, wie das Volumen des zu untersuchenden Exemplares selber. Damit erhält man optimale Verhältnisse bezüglich Empfindlichkeit und Zeitaufwand, denn nach der Trennung der Prüfkammer vom übrigen System werden mittels einer geeigneten Druckänderungsmessvorrichtung, welche absolut dicht an das Prüfkammervolumen und möglichst ohne Einführung von zusätzlichem Volumen angeschlossen sein soll, die Änderungen des Druckes in der Prüfkammer als Funktion der Zeit gemessen. Je grösser nun das im Bauteil gegebenenfalls vorhandene Leck ist, umso mehr Gas wird pro Zeiteinheit aus der zu prüfenden Umhüllung austreten. Sinngemäss wird dementsprechend auch die Druckänderung in der Prüfkammer umso grösser sein [14; 15; 16; 22]. Einzelheiten über die Anwendung des Verfahrens für Halbleiterschaltungsbauteile und auch geometrisch ähnliche Umhüllungen, wie Uhrehgehäuse, sind in [17; 33; 34; 35] eingehend beschrieben.

Die Methodik der Druckdifferenzermittlung zwecks Leckratendetektion ist, wie aus [17] hervorgeht, noch sehr jung und in der Anwendung für Halbleiterschaltungsbauteile ungebräuchlich. Jedoch weisen ihre Eigenschaften eine besondere Eignung auf diesem Sektor auf, und es ist dementsprechend eine Verbreitung dieser Methodik zu erwarten, wenn auch vielleicht vorerst nur für die prüfmateriallose Vorauslese auf relativ grobe Leckstellen. Eine Begrenzung in der Anwendung der Druckdifferenzmessmethode ist durch die Tatsache gegeben, dass die zu prüfenden Volumina mit Gas gefüllt oder evakuiert sein müssen, und dass, je kleiner das für einen Gasaustausch im Innern der Umhüllungen zur Verfügung stehende Volumen ist, umso mehr die Empfindlichkeit des Meßsystems sinkt. Der ursprüngliche Druck im Inneren der zu prüfenden Gehäuse ist nur von sekundärer Bedeutung, denn prinzipiell ist eine gerätemässige Anpassung an die Verhältnisse in weitgehendem Masse mit einfachen Mitteln möglich.

Entsprechend den in Abschnitt 2.1 erläuterten Tatsachen entspricht der beschriebene Messvorgang, wenn die Art des während dieses Prozesses ausgetauschten Gases und auch der im Innern der zu untersuchenden Exemplare vorhandene Initialdruck bekannt sind, einer Ermittlung der Leckrate unter zeitlich variablen Druckverhältnissen (die zuerst grosse Druckdifferenz nimmt ja ab, da das System nach aussen hin abgeschlossen ist). Sollte die Vermutung vorliegen, dass die Leckraten der zu prüfenden Bauteile von der Grösse der bei der Messung möglicherweise vorhandenen Druckdifferenzänderungen abhängig sind, so muss dies jedenfalls berücksichtigt werden.

Die Druckdifferenzdetektionsmethoden sind die erste Gruppe von Methoden in der vorliegenden Beschreibung von verschiedenen Prüfmetho-
den-
gruppen, welche genaue quantitative Ergebnisse zu liefern in der Lage sind. Die maximal erreichbare Empfindlichkeit dürfte, wie in [15] angegeben, etwa bei 10^{-11} Torr · Lit./s liegen. Dies jedoch nur unter der Voraussetzung, dass alle störenden Nebeneffekte, wie Verdampfung, Entgasung [36] usw. auf ein absolutes Minimum reduziert worden sind. Die Prüfzeit ist innerhalb einer gegebenen Prüfanlage, unter äquivalenten Prüfbedingungen, für einen gegebenen Bauteiltyp direkt proportional zum gewünschten Empfindlichkeitsniveau. Die zu prüfenden Exemplare können einzeln oder in Gruppen gleichzeitig analysiert werden.

Die Ermittlung des Mittelwertes einer Gruppe von Exemplaren kann entsprechend genauer geschehen, und auch die Zeit, die bis zum Entscheid vergeht, ob ein Gruppenmittelwert grösser oder kleiner als ein vorgegebener Grenzwert ist, wird durch zunehmende Anzahl der gleichzeitig beobachteten Exemplare weitgehend verringert. Die Methodik ist grundsätzlich nicht destruktiv und zusätzliche Beanspruchungen können wahlweise beliebig aufgeprägt werden. Die Empfindlichkeit der Methodik ist prinzipiell auch bei Anwendung an fertiggestellten Bauteilen nur einseitig begrenzt. Dies steht im Gegensatz zu anderen, ebenso empfindlichen quantitativen Messmethoden für die Dichtheit. Eine Lokalisierung von Leckstellen ist direkt nicht möglich, nur durch sukzessives Bedecken mit einem Dichtungsmittel [37] kann eine indirekte Ortung von Leckstellen, wenn auch mit relativ hoch getriebenem Aufwand, stattfinden. Demzufolge ist eine Feststellung über die Form und Art der Leckstellen nicht möglich. Auch Unterteile können mittels Durchflussverfahren mengenmässig bezüglich Leckrate untersucht werden. Die Exemplare können ohne besondere Vorbereitungen der Prüfung unterworfen werden, und zwar sofort nach Beendigung einer Herstellungprozesse. Die Genauigkeit der Methodengruppe ist sehr gross und die Vorrichtungen einfach, zuverlässig und leicht kontrollierbar. Auch der Unterhalt solcher Vorrichtungen ist einfach.

3.8 Die massenspektrometrische Flüssigkeitsdetektion

Bei dem Verfahren der massenspektrometrischen Detektion von Flüssigkeiten werden die zu prüfenden Bauteile in einer besonders dafür geeigneten Flüssigkeit, z. B. schweres Wasser, welches bezüglich Leckprüfungen ähnliche Eigenschaften wie gewöhnliches Wasser aufweist, jedoch bezüglich Nachweisbarkeit unter normalen Verhältnissen eine ausgezeichnete Rolle spielt. Wie schon von anderen Prüfungen her bekannt ist, wird eine Druckphase zwecks Eindringens der Prüf-
flüssigkeit vorgesehen. Nach Entnahme der zu prüfenden Exemplare aus der Druckkammer werden sie äusserlich gereinigt, und zwecks Ermittlung der pro Zeiteinheit herausdringenden Materialmenge in das Meßsystem eines Flugzeitmassenspektrometers eingeführt. Wie schon in Abschnitt 2.5 erwähnt, erhält man grundsätzlich bei der Verwendung des Durchflussmessprinzips genauere und reproduzierbarere Ergebnisse. Dies gilt auch beim vorliegenden Detektionsprozess. Man spannt in diesem Fall das runde Bauteil, welches vorher an einem Ende mit einem kleinen Loch versehen worden ist, so in eine abdichtende Haltevorrichtung, dass beispielsweise das Loch auf die Seite eines Flüssigkeitsspeichers gerichtet ist. Gleichzeitig sorgt man dafür, dass das Flüssigkeitsreservoir unter Überdruck gegenüber dem auf der anderen Seite der Einspannvorrichtung angeschlossenen Meßsystem ist [23].

Es ist durchaus möglich, während des Prüfvorganges zusätzliche Beanspruchungen wirken zu lassen. Gemessene Werte zeigen [23], dass die maximale Detektionsempfindlichkeit dieser Messmethode bei kleineren Werten als 10^{-11} Torr · Lit./s liegen muss.

Eine ziemlich gute Korrelation der gemessenen Resultate mit solchen, welche durch die massenspektrometrische Helium Detektion erhalten wurden (siehe Abschnitt 3.10), ist festgestellt worden [23]. Die Methode ist, wenn eine Flüssigkeit verwendet wird, welche weder die Umhüllung noch andere zusätzliche Schutzmechanismen verändert, und auch die Oberfläche des eingebauten Bauteilelementes nicht angreift, nicht-

destruktiv. Als grosser Nachteil wirkt sich wieder die Tatsache aus, dass Leckstellen mit Leckraten grösser als 10^{-6} Torr · Lit./s an fertiggestellten Bauteilen verfälscht angezeigt werden, und zwar derart, dass ein scheinbar besserer Wert auf dem Instrument angegeben wird. Also muss eine Vorauslese auf diesen Grenzwert mittels eines anderen Prüfverfahrens stattfinden. Die Prüfzeit mittels Massenspektrometer ist ohne die Vorauslese und die Druckphase relativ kurz (Minuten). Einzelresultate, wie auch Gruppendurchschnittswerte können ermittelt werden. Durch Anwendung von besonderen Düsen für das örtlich begrenzte Besprühen oder auch Beschnüffeln ist eine, wenn auch relativ grobe, Bestimmung der örtlichen Lage von Leckstellen möglich. Da alle massenspektrometrischen Geräte mit den dazugehörenden Pump- und Anzeigemechanismen relativ aufwändig sind, lohnt sich der Einsatz solcher Geräte eigentlich nur bei der Untersuchung grosser Stückzahlen.

3.9 Detektion von radioaktiven Stoffen

Zwecks Durchführung einer Dichtheitsprüfung an Halbleiterschalt- oder ähnlichen Bauteilen kann man auch ein radioaktives Gas oder eine radioaktive Flüssigkeit verwenden [22]. In diesem Fall werden die zu untersuchenden Bauteile in der Druckphase der Prüfungen mit dem radioaktiven Stoff in Kontakt gebracht und gegebenenfalls verseucht. Als Gas wird hierbei oft Krypton verwendet. Nach der äusserlichen Reinigung, die zwecks Verhütung einer Fehlanzeige stattfindet, wird die übrigbleibende Radioaktivität der verseuchten Bauteile bestimmt. Aus ihr kann dann auf einfache Art die Leckrate bestimmt werden. Die Messung der Radioaktivität kann beispielsweise durch Entladung einer Ionisationskammer oder mittels Zählrohr oder auch Scintillationszähler [38] geschehen. Die äusserste Begrenzung der Empfindlichkeit liegt einerseits etwa bei 10^{-11} Torr · Lit./s, nämlich dort, wo sich die natürlicherweise vorhandene Reststrahlung anfängt bemerkbar zu machen. Dabei ist zu erwähnen, dass diesbezüglich das innere freie Volumen, wie auch der Druck und die Zeit, während welcher die Verseuchung stattfindet, von wesentlicher Bedeutung sind. Eine andere Begrenzung der Empfindlichkeit ergibt sich bei etwa 10^{-6} Torr · Lit./s aus den schon vorher in den Abschnitten 2.5 und 3.9 erwähnten Gründen. Also ist auch hier mittels einer anderen Prüfung eine Vorauslese auf diese Grenze durchzuführen. Selbstverständlich muss darauf geachtet werden, dass die Vorausleseprüfung nicht die Dichtheit der zu prüfenden Bauteile beeinflusst (z. B. durch Ölrückstände usw.). Die hier beschriebene Prüfmethodik ist prinzipiell nicht destruktiv. Eine wesentliche Tatsache kann als charakterisierende Ursache für die relativ begrenzte Verbreitung dieser Prüfart aufgeführt werden. Durch zu starke örtliche Akkumulation ist eine Konzentration von radioaktiven Quellen im Bereich der Möglichkeit, und kann gegebenenfalls Schäden beim Prüfpersonal hervorrufen [39]. Darum ist auch eine hundertprozentige Anwendung bei grösseren Stückzahlen nicht empfehlenswert. Auf alle Fälle jedoch ist eine Anwendung in Laboratorien zum Teil ausserordentlich zweckmässig, denn es können Resultate, welche mit anderen Prüfmethoden ermittelt worden sind, auf relativ einfache Weise kontrolliert werden. Die Detektionszeit ist sehr kurz, wenn man direkt anzeigende Zählrohrgeräte zur Verfügung hat; sie ist etwas länger, dafür aber auch exakter und reproduzierbarer, wenn für die Messung der radioaktiven Strahlen Ionisationskammern eingesetzt werden. Beides, einzelne Bauteile wie auch

Gruppen von Bauteilen, können wahlweise geprüft werden. Eine Lokalisierung der Leckstellen ist mittels dieser Methodik unmöglich. Eingehendere Information sind in [8; 17; 18; 22; 28; 38; 40] enthalten.

3.10 Massenspektrometrische Gasdetektion

Soll als Prüfmaterial ein Gas verwendet und dieses mit einem Massenspektrometer nachgewiesen werden, so wird, wie schon bekannt, für die Untersuchung von fertiggestellten Bauteilen zuerst eine Druckphase vorgesehen, in welcher die zu prüfenden Bauteile mit dem Prüfgas, wenn sie Leckstellen aufweisen, gefüllt werden. Nach der Druckphase werden die Exemplare, wie ebenfalls bekannt, äusserlich von Resten des Prüfgases befreit und schliesslich für die Bestimmung der pro Zeiteinheit entweichenden Gasmenge in eine Unterdruckkammer, welche mit einem Massenspektrometer verbunden ist, eingeschlossen. Wie bei allen massenspektrometrischen Ermittlungsverfahren können schon sehr geringe Anzahlen von Teilchen pro Zeiteinheit registriert werden. Moderne Geräte dieser Art sind derart automatisiert, dass man nach einer relativ kurzen Wartezeit (weniger als eine Minute nach dem Verschliessen in der Messkammer) schon die erste direkte Ablesung der Leckrate vornehmen kann. Mit Helium als Prüfgas zählen heute solche Geräte fast schon zur Standardausrüstung bei der Entwicklung, Herstellung und Qualitätskontrolle von Halbleiterschaltungsbauteilen. Helium, welches nur in äusserst geringer Konzentration in der Atmosphäre anzutreffen ist, besitzt bezüglich Leckprüfungen ausgezeichnete Eigenschaften.

Als Resultat des Prüfverfahrens erhält man Einzelwerte oder auch Gruppendurchschnitte, je nachdem, ob man einzelne Exemplare oder Gruppen von Exemplaren gleichzeitig zu prüfen wünscht. Auch die Anwendung des Durchflussverfahrens ist in diesem Fall möglich, und sie bringt ebenfalls die schon früher öfters erwähnten Vorteile (siehe Abschnitt 2.5; 3.8 und 3.9). Die obere Grenze des Empfindlichkeitsbereiches ist durch das Massenspektrometer gegeben, und liegt heute etwa bei 10^{-11} Torr · Lit./s oder auch noch geringeren Werten. Die untere Grenze des Bereiches kann für die Untersuchungen an fertiggestellten Bauteilen wieder etwa bei 10^{-6} Torr · Lit./s angesetzt werden, denn auch in diesem Fall entweicht während des notwendigen Reinigungsprozesses das Prüfgas durch grobe Leckstellen sehr rasch. Natürlich fällt diese untere Grenze der Empfindlichkeit weg, wenn die Durchflussmessmethode an halbfertigen Unterteilen praktiziert wird (siehe Abschnitt 2.5). Wieder muss also für das Prüfen von fertigen Bauteilen eine Vorselektion stattfinden. Beeinflusst das Prüfgas keine der für die Funktion des Bauteiles verantwortlichen charakteristischen Grössen, so kann die Prüfung als nichtzerstörend angesehen werden. Dies gilt im allgemeinen für das Prüfgas Helium, und seine Anwendung bei der Ermittlung von Leckraten in Halbleiterschaltungsbauteilen auf Germanium- und Siliziumbasis. Allgemein ist diese Methode eine der genauesten. Trotzdem muss man bei ihrer Anwendung immer daran denken, dass eventuell durch Speichereffekte im Inneren der Gehäuse (z. B. durch Si-Fett) die Resultate verfälscht werden können. Auch muss sehr darauf geachtet werden, dass alle die Druckphase charakterisierenden Grössen, wie Temperatur, Druckdifferenz, Druckniveau, Zeit, u. a. m. im richtigen und immer gleichen Verhältnis des zu prüfenden Innenvolumen stehen, damit ein sinnvoller Vergleich von Re-

sultaten möglich ist. Auch die Wartezeit nach Entnahmen aus der Druckkammer bis zum eigentlichen Detektionsvorgang, sowie auch der Detektionsvorgang selber, sollten immer unter gleichen Bedingungen durchgeführt werden.

Die Methode der massenspektrometrischen Gasdetektion, und vor allem die spezielle Variante mit Helium als Prüfgas, kann sowohl für Untersuchungen an sehr grossen Stückzahlen wie auch für Untersuchungen besonderer Art im Laboratorium eingesetzt werden. Mittels geeigneter Vorrichtungen ist auch eine Ortsbestimmung der Leckstellen möglich (analog, wie in Abschnitt 3.8 beschrieben), soweit die geometrischen Abmessungen der Bauteile ein bestimmtes, von den Vorrichtungen und ihrer Handhabung abhängiges Mindestmass nicht unterschreiten. Es liegt meistens in der Natur der Dinge, dass relativ hochwertige Vorrichtungen auch mit verhältnismässig hohem Kostenaufwand verbunden sind. Dies trifft auch für den gerätemässigen Aufwand eines automatisierten Massenspektrometers, verbunden mit dem dazugehörigen Pumpmechanismus, dem Anzeigeteil und den Hilfsvorrichtungen, zu. Grundsätzlich ist es auch in diesem Fall möglich, während der Detektions- oder auch schon während der Druckphase zusätzliche Beanspruchungen hinzuzufügen. Von dieser Möglichkeit wird jedoch heute nur zwecks besonderer Analyse im Laboratorium Gebrauch gemacht. Auch hier ist wieder der Hinweis angebracht, dass nur gasgefüllte oder evakuierte Umhüllungen untersucht werden können. Zusätzliche Angaben über diese Testmethodengruppe kann man in [8; 17; 28; 39] finden.

4. Vergleichende Betrachtungen über die verschiedenen Prüfmetho- den- gruppen

Jede der in den Abschnitten 3.1 bis und mit 3.10 eingehend behandelten Prüfmetho-
den-
gruppen hat, wie man auch den
sumarischen Grundlgebetrachtungen des Kapitels 2 entnehmen kann, verschiedene Vor- und Nachteile. Für jede der beschriebenen Methodengruppen kann man jedoch auch eine besonders gerichtete Eignung feststellen. Solche in ganz bestimmten Anwendungsbereichen besonders vorteilhafte charakteristische Merkmale, die nur gerade einer einzigen Prüfmetho-
den-
gruppe angehören und sie diesbezüglich von allen anderen wesentlich unterscheiden, sollen im Folgenden zusammengestellt werden. Wie schon in Kapitel 3 soll die Einteilung wieder der Klassifizierung nach der Detektionsart untergeordnet sein:

- Optische Detektion: Einfaches Prüfverfahren.
- Detektion von gefärbten Flüssigkeiten: Genaue Ermittlung der Form von Leckstellen.
- Gasblasendetektion: Schnelle Lokalisierung von groben Leckstellen.
- Detektion durch fluoreszierende Stoffe: Lokalisierung von Schwächen, welche potentielle Leckstellen darstellen.
- Chemische Gasdetektion: Sehr empfindliche Lokalisierung von Leckstellen.
- Oberflächenveränderung: Total integrierende, wirklichkeitsgetreue Methodik.
- Druckdifferenzdetektion: Allgemein grösster Empfindlichkeitsbereich, keine Fremdstoffe.
- Massenspektrometrische Flüssigkeitsdetektion: Grösste Empfindlichkeit in Verbindung mit flüssigen Prüfmedien.
- Detektion radioaktiver Stoffe: Gute Kontrollmethodik.
- Massenspektrometrische Gasdetektion: Bestens geeignet für die Analyse grosser Stückzahlen.

In Tabelle III sind alle wichtigen charakteristischen Merkmale der diskutierten Prüfmetho-
den-
gruppen zusammengestellt. Selbstverständlich ist diese Zusammenstellung nicht allesumfassend. Sie stellt nur das Ergebnis eines Versuches

dar, wenigstens die wesentlichsten Merkmale zu erfassen. Die Symbole ΔP , ΔT und ΔD in Tabelle III bezeichnen entsprechend die Druck-, Temperatur- und Diffusionsbeanspruchungen, welche zusätzlich während des Prüfvorganges auftreten. Symbole, welche in Klammern geschrieben sind, geben Beanspruchungen mit zweitrangigen Auswirkungen an. Eingeklammerte Worte umschreiben weniger betonte Eigenschaften. Die besonders vorteilhaften Eigenschaften sind in jeder Reihe der Tabelle III eingerahmt.

Man kann aus dieser Zusammenstellung leicht ersehen, dass jede der beschriebenen Prüfmetho-
den-
gruppen ihren eigenen Charakter hat. Die Gruppen ergänzen sich teilweise untereinander, und man kann daraus allgemein schliessen, dass eine kombinierte Anwendung von verschiedenen Prüfmetho-
den-
gruppen immer vorteilhaftere Ergebnisse liefern wird als die Anwendung einer einzigen Methode.

In Fig. 3 ist der prinzipielle charakteristische Verlauf der normiert dargestellten Detektionsempfindlichkeit S/S_{max} als Funktion des Betrages der Leckrate für die verschiedenen besprochenen Prüfmetho-
den-
gruppen angegeben. Die gezeigten Kurven beziehen sich auf die für fertiggestellte Bauteile anwendbaren Methodenvarianten. Für die in den Fig. 3h, 3i und 3j angegebenen Fälle tritt, wie man sieht, bei höheren Leckraten eine starke Reduktion der Empfindlichkeit auf.

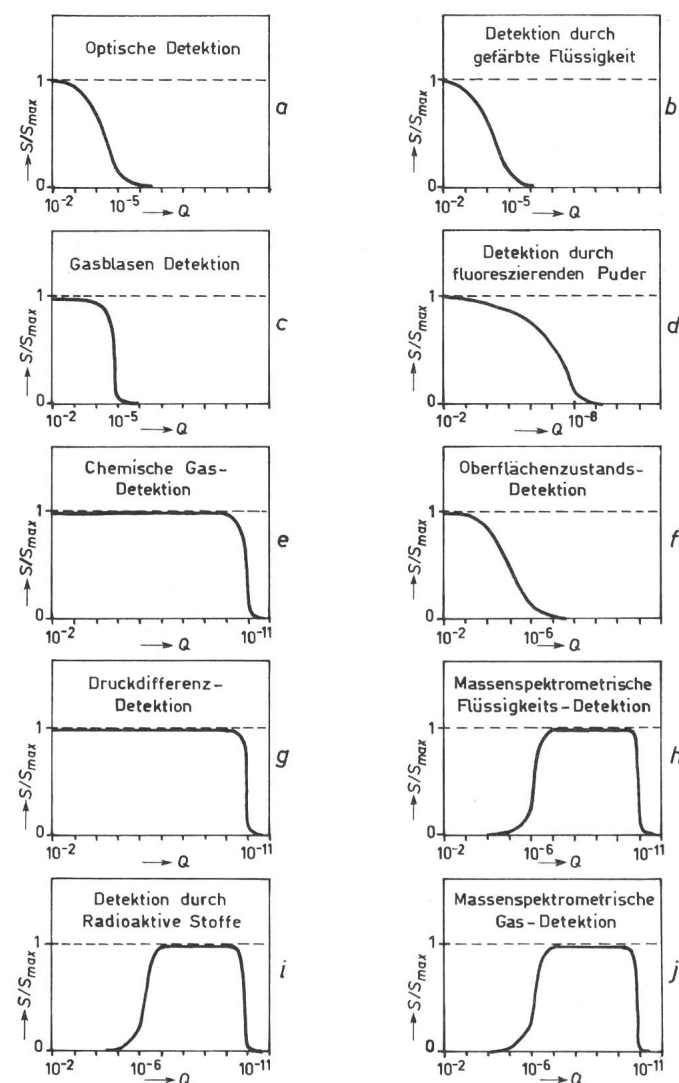


Fig. 3
Die verschiedenen normiert dargestellten Empfindlichkeitskennlinien
der Leckprüfmetho-
den-
gruppen
 S Empfindlichkeit; Q Leckrate

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Detektionsart	optisch	Gefärbte Flüssigkeit	Gas-Blasen	Fluoreszierende Stoffe	Gas chemisch	Oberflächenzustand	Druckdifferenz	Flüssigkeit massenspektrometrisch	Radioaktive Stoffe	Gas massenspektrometrisch
2	Maximale Empfindlichkeitsgrenze (Torr · Lit./s)	$\approx 10^{-5}$	$\approx 10^{-5}$	$\approx 10^{-5}$	keine	$\approx 10^{-11}$	$\approx 10^{-6}$	$\approx 10^{-11}$	$\approx 10^{-11}$	$\approx 10^{-11}$	$\approx 10^{-11}$
3	Minimale Empfindlichkeitsgrenze (Torr · Lit./s)	keine	keine	keine	keine	keine	keine	keine	$\approx 10^{-6}$	$\approx 10^{-6}$	$\approx 10^{-6}$
4	Totale Testzeit für Bauteile im Endzustand	Sekunden	Stunden bis Tage	Sekunden	Minuten	Stunden	Stunden bis Wochen	Sekunden bis Monate	Stunden	Stunden	Stunden
5	Totale Testzeit für Unterteile	Sekunden	Sekunden bis Minuten	Sekunden	Minuten	Stunden	Stunden bis Wochen	Sekunden bis Monate	Sekunden	Sekunden	Sekunden
6	Materialtransportrichtung für Bauteile im Endzustand	keine	beide	von innen nach aussen	von aussen nach innen	von aussen nach innen nach aussen	von aussen nach innen	beide einzeln	von aussen nach innen nach aussen	von aussen nach innen nach aussen	von aussen nach innen nach aussen
7	Materialtransportrichtung im Durchflussverfahren	keine	beide einzeln	beide einzeln	beide einzeln	beide einzeln	beide einzeln	beide einzeln	beide einzeln	beide einzeln	beide einzeln
8	Zusatzbeanspruchungen	keine	$\Delta P (\Delta D)$	$\Delta P (\Delta T)$	ΔP	$\Delta P (\Delta D)$	$\Delta P (\Delta T, \Delta D)$	ΔP	ΔP	$\Delta P (\Delta D)$	$\Delta P (\Delta D)$
9	Kritische Eigenschaften	Subjektivität	zerstörend	Entgasungseffekte	Keine quantitative Information	zerstörend	zerstörend	Entgasungseffekte	Vorselektion	Vorselektion	Vorselektion
10	Lokalisierung?	ja	ja	ja	(ja)	ja	nein	nein	ja	nein	ja
11	Für Bauteile	alle	alle	gasgefüllte	alle	alle	alle	vakuum- und gasgefüllte	vakuum- und gasgefüllte	vakuum- und gasgefüllte	vakuum- und gasgefüllte
12	Indikation	subjektiv qualitativ	qualitativ	qualitativ	qualitativ	quasi quantitativ	quantitativ	quantitativ	quantitativ	quantitativ	quantitativ

Diese Reduktion fällt weg, wenn man mittels Durchflussverfahren vorgeht. Die in Fig. 3 gezeigten Kurven sollen nur die charakteristischen Kennzeichen der verschiedenen Prüfmethodengruppen untereinander bezüglich Empfindlichkeitsverlauf illustrieren. Es handelt sich hierbei selbstverständlich nicht um gerechnete oder gemessene Kurven, sondern vielmehr um einen prinzipiell skizzierten Verlauf, der sich auf Grund der in den früheren Abschnitten zusammengestellten Angaben und Überlegungen ergibt.

5. Morphologische Aspekte von Leckprüfmethoden

Die grundlegenden Erläuterungen des Kapitels 2, die mehr beschreibenden Ausführungen des Kapitels 3 und auch die vergleichenden Aspekte des Kapitels 4 weisen direkt oder auch indirekt, mehr oder weniger, daraufhin, dass das Gebiet der Leckprüfmethoden noch lange nicht erschöpfend behandelt worden ist. Im Folgenden sollen deswegen die Ergebnisse

eines diesbezüglichen gedanklichen Experimentes aufgezeichnet werden.

Dieses Experiment umfasst als Zielsetzung die Aufstellung der wesentlichen Faktoren einer morphologischen Struktur. Durch die Zusammenstellung soll einerseits eine Positionierung der heute üblichen Methodik innerhalb des abzusehenden Bereiches der verschiedenen sonstigen Möglichkeiten herauskristallisiert und andererseits ein Ausblick auf die zukünftig zu erwartenden Bestrebungen bezüglich Weiterentwicklung der Methoden eröffnet werden. Eine genaue Darstellung des Wesens und der Vorteile eines solchen morphologischen Verfahrens ist in [41] angegeben.

Für die Aufstellung eines morphologischen Schemas werden alle mit dem Problem irgendwie zusammenhängenden Aspekte so vollständig wie nur möglich gesammelt. Die Analyse eines solchen Schemas stellt den ersten schöpferischen Schritt in der Lösung der Problemstellung dar. Dieser Schritt ermöglicht oft die Aufdeckung verschiedener verdeckter Schwächen, welche

schon zu Fehlern bei der Sammlung der Daten geführt haben können. Ein besseres Verständnis der Sachlage ergibt sich in jedem Fall aus der Analyse des morphologischen Schemas, und das führt meistens zu einer besseren Approximation des Lösungsweges. Nicht immer resultiert der kürzeste und einfachste Lösungsweg, aber systematische Ausarbeitung vereinfacht den Prozess der Optimierung und ermöglicht so auch bei relativ schwierigen Problemen die Wahrscheinlichkeit, den richtigen Lösungsprozess einzuleiten, zu vergrössern.

5.1 Materialien für den zwangsläufigen Materialaustausch

Die Messung der Leckrate erfordert während einer vorgeschriebenen Zeitdauer einen zwangsläufigen Materialaustausch zwischen dem Innen- und dem Aussenraum des zu prüfenden Volumens. Verschiedene Materialien, die entweder schon zum System selber gehören oder welche von aussen her zugeführt werden müssen, können für diesen Zweck verwendet werden. Die in Frage kommenden Materialkomplexe sollen im folgenden Text, nach ihrem physikalischen Zustand geordnet, besprochen werden. Nur allgemein gültige Feststellungen werden zusammengestellt.

5.1.1 Prüfmaterial im gasförmigen Zustand

Das gasförmige Prüfmaterial ist wohl das zweckmässigste, wenn es sich um die Ermittlung von sehr kleinen Leckraten handelt. In diesem physikalischen Zustand kann die kleinstmögliche Materialdichte, also die beste Eindringfähigkeit, erreicht werden. Auch die ausserordentlich selektiven Detektionsmethoden (siehe Abschnitte 3.9 und 3.10) lassen diese Art Prüfmaterial als vorteilhaft gegenüber allen anderen erscheinen. Grundsätzlich können für die Ermittlung eines Gasaustausches sämtliche Methoden verwendet werden, welche entweder Gasteilchen als Funktion der Zeit direkt zählen oder welche indirekte Auswirkungen von solchen Teilchen als Funktion der Zeit zu registrieren erlauben. Auch Konzentrationsänderungen können als solche für die Detektion verwendet werden. Es ist durchaus denkbar, dass auch verschiedene Gase gleichzeitig als Prüfmaterial Verwendung finden.

5.1.2 Mischung des gasförmigen und flüssigen Zustandes

Das Gemisch aus gasförmigem und flüssigem Prüfmaterial weist teilweise noch die Vorteile des gasförmigen Zustandes auf, aber auch schon den Nachteil der grösseren Dichte der Flüssigkeit. Grundsätzlich unterscheiden sich die Ermittlungsmethoden für den Fall des gemischten Prüfmaterials nicht wesentlich von denjenigen des gasförmigen Zustandes, nur kann in diesem Fall die Zweispurigkeit der beiden Zustände ausgenutzt werden.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten für die Mischung aus Gas und Flüssigkeit. Die Komponenten des Gemisches können gleichzeitig oder auch hintereinander innerhalb des gleichen Prüfvorganges zur Anwendung gelangen. Aus diesen zwei Unterscheidungen ergeben sich weitere Möglichkeiten für den Aufbau eines Prüfprozesses. Auch kann eine Mischung durch Umschalten von einem Zustand in den anderen zur Anwendung gelangen. Dies ist z. B. der Fall, wenn man ein gasförmiges Prüfmaterial innerhalb der Umhüllung kondensieren lässt.

5.1.3 Prüfmaterial im flüssigen Zustand

Der Nachteil des flüssigen Zustandes, nämlich seine relativ zum gasförmigen Medium höhere spezifische Dichte, kann auch

von Vorteil sein, und zwar dann, wenn auch im praktisch zu erwartenden Fall das flüssige Medium bezüglich Eindringens den Vorrang hat, z. B. gilt das, wenn ein Bauteil während seiner Betriebszeit in direktem Kontakt mit Öl steht. Ist ein solches Bauteil mit Gas gefüllt, so bedeutet jedes Eindringen von Flüssigkeit ein nahezu irreversibles Ereignis, und das bedeutet im Laufe der Zeit eine Akkumulation des Fremdstoffes im Inneren. Diese in der Praxis sich als schädlich auswirkende Sachlage kann umgekehrt für die Untersuchung der Dichteitseigenschaften auch nützliche Anwendung finden.

5.1.4 Mischung des gasförmigen, des flüssigen und des festen Zustandes

Die komplexe Mischung aus gasförmigem, flüssigem und festem Zustand stellt den universellsten Kompromiss dar, der für die Wahl des Prüfmaterials überhaupt in Frage kommt. Selbstverständlich weist auch dieser Kompromiss alle Vor- und Nachteile der einzelnen Komponenten auf. Als Feststoff soll ein in Puderform vorhandener Stoff aufgefasst werden. Ähnlich, wie unter Ziff. 5.1.2 für die Mischung aus zwei Zuständen erwähnt worden ist, kann man Parallel- und/oder Serieschaltungen sämtlicher möglicher Kompositionsformen vornehmen. Auch die unter Ziff. 5.1.2 zuletzt besprochene Möglichkeit der Hintereinanderschaltung für die drei Zustände ein und desselben Prüfmaterials innerhalb eines Prüfvorganges ist prinzipiell möglich (man denke sich das Prüfmaterial in gasförmigen Zustand hineingebracht, durch Kondensation auf den empfindlichen Bereich der Elementoberfläche gebracht und durch Ausfrieren die Indikation für die Gegenwart des Prüfmaterials im Inneren realisiert). So abwegig dieser Gedanke im ersten Augenblick erscheint, Tatsache ist, dass man heute zwecks Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes im Inneren von Halbleiterschaltungsbauteilen mittels der sog. Taupunktmethode [42] wenigstens zum Teil diese Prozedur schon realisiert.

5.1.5 Mischung des gasförmigen und des festen Zustandes

Die Mischung aus dem gasförmigen und dem festen Zustand kann als eine weitere Variante der Zusammensetzung von Prüfmaterialien genannt werden. Nebst der Verwendung von puderförmigen Feststoffen muss der Vollständigkeit halber auch die Möglichkeit des kompakten Feststoffes erwähnt werden. Wie bei bisher allen genannten Mischzuständen des Prüfmaterials kommt auch in diesem Falle eine Parallel- wie auch eine Serieschaltung der Zustände, innerhalb ein und desselben Prüfmaterials oder auch zwischen verschiedenen Prüfmaterialien, in Frage. Es ist vielleicht gerade hier, in diesem Zusammenhang, angebracht, wenn auch der Grenzfall der Festkörperdiffusionsabdichtung zur Sprache kommt. Diese spielt heute bei sehr modernen Halbleiterschaltungsbauteilkonfigurationen während des Betriebes eine nicht unwesentliche Rolle [13]. Hier lagern sich Stoffe an der Oberfläche von Oxydschichten an und diffundieren nachher langsam, vor allem bei erhöhter Temperatur, durch diese Schutzschicht ins Innere, wo sie Veränderungen in der Struktur verursachen, die dann teilweise bei Messungen charakteristischer Kenngrössen ihre Auswirkungen zeigen.

5.1.6 Mischung des flüssigen und des festen Zustandes

Obwohl sich die Mischung aus flüssigem und festem Zustand als solche bezüglich Ermittlung der Leckrate wohl am ungünstigsten verhält, erfüllt sie bei der Lokalisierung von Leckstellen doch eine, wenn auch beschränkte, Anwendungs-

möglichkeit. Wieder ist eine Parallel- oder Serieschaltung der Funktionsweise realisierbar und vor allem auch die Umwandlung vom flüssigen in den festen Zustand. Eine sich indirekt bei der Lecksuche auswirkende Methodik, bei welcher eine solche Zustandsänderung zur praktischen Anwendung gelangt, ist das sukzessive Bedecken mit einem Dichtungsmittel, welches später aushärtet. Bekannt ist noch, wie schon an anderer Stelle dieser Veröffentlichung erwähnt (Abschnitt 3.2), das Verfahren der Detektion durch gefärbte Flüssigkeiten, wobei der gefärbte Niederschlag aus der verdunsteten Flüssigkeit als Indikation der Leckstellen funktioniert.

5.1.7 Prüfmaterial im festen Zustand

Die Anwendung eines Prüfmaterials im festen Zustand ist a priori im Verhältnis zu allen anderen Einzelstoffprüfmaterialien die ungeeignetste. Dies kann ganz einfach auf die Tatsache zurückgeführt werden, dass der feste Stoff die grösste Dichte aufweist, und somit für die direkte Bestimmung von Leckraten ausserordentlich schlecht geeignet ist. Wie schon unter Ziff. 5.1.5 erwähnt, sind jedoch auch in diesem Fall einesteils der durch Festkörperdiffusion resultierende Schaden wie auch die für die Bekämpfung solcher Schäden zu entwickelnden Methoden von wachsender Bedeutung, so dass, wenigstens in der Halbleiterschaltungsbauteiltechnik, auch dieser Art von Prüfmedium wachsende Aufmerksamkeit gewidmet werden muss. Die Verwendung von puderförmigen Feststoffen für Untersuchungszwecke, welche mit der Dichtheit zusammenhängen, ist schon in Abschnitt 3.1.4 eingehend behandelt worden.

5.1.8 Strahlung als Prüfmaterial

Die Strahlung als Informationsträger für den Nachweis von Materialaustausch scheint zuerst etwas weit gesucht zu sein. Ist jedoch die zu untersuchende Schicht relativ dünn im Verhältnis zu ihrer Flächenausdehnung und beträgt die Dicke der Schicht nur noch die Grössenordnung von einigen μm , so besteht die Möglichkeit, mittels Durchleuchten oder auch mittels Reflektionsmessverfahren, wie sie für die Dickenbestimmung sehr dünner Schichten verwendet werden, eine Lokalisierung von Leckstellen vorzunehmen. Auch relativ durchsichtige Körper, wie z. B. Glasdurchführungen, kann man mit Strahlung, im besonderen Fall Lichtstrahlung, untersuchen.

5.2 Bewegung während des Materialaustausches

Wie schon in Abschnitt 2.4 erwähnt worden ist, kann der forcierte Materialtransport während der Prüfung mono- oder multidirektionalen Charakter besitzen (von aussen nach innen und umgekehrt, auch mit Wiederholungen zwecks Akkumulation). Der Materialfluss kann während des Transportvorganges konstant gehalten oder auch zeitlich variabel gesteuert werden (die Aufladung oder Entladung von Volumina). Obwohl der Gedanke einer periodisch wechselnden Druckquelle, wie sie analog bekanntlich in der Elektrotechnik bei Messungen von Impedanzen verwendet wird, zuerst bestechend wirkt, sind doch wegen der hohen Flusswiderstände relativ grosse Zeitkonstanten zu erwarten, so dass in Realität eine solche Konzeption mehr theoretischen Charakter besitzt, wenn es um die Detektion von kleinen Leckraten (kleiner 10^{-6} Torr · Lit./s) geht. Hingegen könnte für die rasche Ermittlung von groben Leckstellen eine Realisierung nach diesem Prinzip nicht ausgeschlossen sein. Hierbei werden selbstverständlich die geometrischen Abmessungen der zu prüfenden

Bauteile eine nicht zu vernachlässigende Rolle spielen, denn sie stehen, wie auch die zu erwartenden Leckraten, im direkten Zusammenhang mit der Frequenz der zu applizierenden Druckschwingung.

5.3 Quellen für den Materialaustausch

Im Abschnitt 2.3 ist die Erzeugung von Druckdifferenzen, welche für die Erzeugung des Materialaustausches verwendet werden können, eingehend besprochen worden. Neben diesen recht gut bekannten Methoden kann grundsätzlich jede Differenz von potentieller Energie, ganz gleich welcher Form, für die Erzeugung eines erzwungenen Materialtransportes ausgenützt werden. So ist die Ausnützung einer elektrischen Potentialdifferenz für die Erzeugung einer Ionenwanderung durch die zu prüfenden Schichten denkbar. Durch konstante Polarität kann man auf diese Art eine Akkumulation von Ionen an bestimmten Stellen erhalten. Diese Anhäufung kann dann für den Detektionsprozess verwendet werden.

5.4 Anzeige des erzwungenen Materialaustausches

Die Anzeige, ob und wieviel Material während des Prüfungsvorganges ausgetauscht wird, kann inner- oder ausserhalb der zu prüfenden Bauteilumhüllung geschehen (siehe auch Abschnitte 3.6 und 3.8). Natürlich hängt die optimale Position des Detektionsmechanismus immer in mehr oder weniger starker Form von der Materialflussrichtung ab, aber das bedeutet nicht, dass ein Material, dass von aussen nach innen dringt, nur innen angezeigt werden kann. In diesem konkreten Fall kann, wie schon früher beschrieben, eine Indikation entweder aussen durch Druckveränderung in einem abgeschlossenen Volumen, oder im Inneren, durch chemische Reaktionen, Ionenlagerung etc. vorkommen.

In Abschnitt 3 wurden einige der möglichen Detektionsmethoden genannt. Neben diesen Methoden können auch noch weitere für eine Leckratenermittlung in Frage kommen:

- a) Messung der durch Druckunterschiede hervorgerufenen Änderung der äusseren Abmessungen [34],
- b) Durch den erzwungenen Materialaustausch verursachte Gewichtsveränderungen,
- c) Änderung der Frequenz der Lichtemission bei Gasentladungen,
- d) Durch Druckänderungen hervorgerufene Änderungen des Wärmeübertragungsverhaltens,
- e) Änderungen der akustischen Übertragungseigenschaften, welche durch Änderung der Druckverhältnisse erzeugt werden,
- f) Akkumulation von elektrischen Ladungen, verursacht durch den erzwungenen Materialtransport.

Eine weitere Ausdehnung des möglichen Bereiches der Detektionsmethoden, welche der Ermittlung von Leckraten dienen können, besteht in den Variationsmöglichkeiten der Prozesse, welche in Kapitel 3 ausführlich beschrieben worden sind. Manche dieser Varianten werden heute schon bei der Lecksuche und Leckratenermittlung in Hochvakuumssystemen angewandt, und müssten gegebenenfalls nur an den besonderen Aufgabenkreis, der sich bei den Untersuchungen an Halbleiterschaltungsbauteilen ergibt, angepasst werden. Andere Detektionsvarianten sind indirekt in den morphologischen Aspekten enthalten, welche in den Abschnitten 5.1 bis 5.3 diskutiert worden sind.

6. Abschliessende Bemerkungen

Mittels Leckprüfmethoden lassen sich die Schutzeigenschaften von Bauteilumhüllungen bezüglich eines Materialaustausches mit ihrer Umgebung ermitteln. Der Kostenanteil der

Umhüllungen von modernen Halbleiterschaltungsbauteilen ist verhältnismässig hoch, wenn man ihn zum Gesamtkostenbetrag in Beziehung setzt [27]. Dieser hohe Kostenanteil ist gerechtfertigt, wenn die mittels dieses Aufwandes angestrebte Schutzvorrichtung auch in jeder Beziehung einwandfrei funktioniert. Er ist jedoch sinnlos aufgewendet worden, wenn dies nicht der Fall ist. Auf diese Art betrachtet, ergibt sich für den Hersteller solcher Bauteile die konkrete Notwendigkeit, auf den Gebieten der Lecksuche und Leckratenbestimmung neue und immer bessere Methoden zu entwickeln.

Einerseits besteht eine solche Weiterentwicklung in der Verbesserung und Vervollständigung der heute schon angewandten Methoden bezüglich Genauigkeit und Reproduzierbarkeit und auch in Richtung besserer Anpassung an die gegebene Problematik, wie z. B. Verkürzung der Prüfzeiten, Reduktion der Gerätekosten, Vereinfachung des Prüfvorganges, sowie des Geräteunterhaltes, Einrichtungen für Großserie-selektionen usw. Andererseits muss aber auch die Entwicklung neuartiger Methoden gefördert werden, eine Forderung, die sich aus der teilweisen Unzulänglichkeit und Beschränktheit der heutigen Verfahren einerseits, und aus den steigenden Anforderungen des Anwendungskreises bezüglich Zuverlässigkeit der Bauteile andererseits ergibt. Beispielsweise gibt es noch kein experimentell bestätigtes Verfahren für die quantitative Ermittlung der Undichtheit von Bauteilen, welche direkt in Plastikstoffen eingebettet sind und die kein für einen durch eine Leckstelle stattfindenden Materialtransport zur Verfügung stehendes Speichervolumen im Inneren aufweisen, weil der Plastikstoff einen direkten Kontakt mit dem eigentlichen Bauelement aufweist. Andererseits ist auch noch kein zweckmässiges Verfahren bekannt, welches in nützlicher Frist gestattet, quantitativ die Diffusionsdichtheit von dünnen Schichten zu erfassen, Schutzschichten, wie etwa die Oxydschichten bei Planarkonfigurationen.

Wie gezeigt wurde, gibt es eine grosse Menge potentieller Entwicklungsrichtungen für neuartige Prüfmethoden. Es ist heute noch nicht abzusehen, welche dieser Richtungen in naher oder ferner Zukunft wohl mit besonderem Erfolg zu Ergebnissen gelangen wird. Da aber das Wissensgebiet der Leckanalyse insbesondere im Falle der Anwendung auf Halbleiterschaltungsbauteile noch als recht unbearbeitet bezeichnet werden und dementsprechend auch noch recht ergiebig sein kann, darf wohl in nicht allzu ferner Zukunft mit Fortschritten auf diesem Gebiet gerechnet werden.

Schliesslich sei noch darauf hingewiesen, dass eine Verbesserung der Analysenmethodik meistens Hand in Hand mit einer raschen Verbesserung der der Prüfung regelmässig unterworfenen Bauteileigenschaft verbunden, ja oft sogar ausschlaggebend daran beteiligt ist, und so auch die Untersuchungen bezüglich Verbesserung der Analysenmethodik einen positiven und sehr direkten, wenn auch nicht einfach zu messenden Einfluss auf die Rentabilität des gesamten wirtschaftlichen Systems haben, welches um das betreffende Bauteil herum aufgebaut ist, was letzten Endes vor allem dem Anwender solcher Bauteile zu Gute kommt.

An dieser Stelle möchte der Autor H. B. van Wijlen (Philips, Nijmegen) für die Problemstellung, Förderung und Unterstützung bei der Durchführung der Arbeit, und der Direktion der Philips AG, Zürich, für die grosszügige Abgrenzung des Arbeitsgebietes danken.

Literatur

- [1] A. J. Wahl and J. J. Kleimack: Factors affecting Reliability of Alloy Junction Transistors. Proc. IRE 44(1956)4, S. 494...502.
- [2] R. H. Kingston: Semiconductor Surface Physics. University of Pennsylvania, Philadelphia 1957.
- [3] G. Wallis: Surface States on Germanium. Sylvania Technologist 11(1958)1, S. 6...13.
- [4] A. Many: Semiconductor Surface Phenomena. Sylvania Technologist 11(1958)4, S. 117...124.
- [5] G. Heiland: Herstellung und Eigenschaften reiner Halbleiteroberflächen. Fortschr. Physik 9(1961)8, S. 393...454.
- [6] C. H. Zierdt: On the Importance of Operating Life Tests as Compared to Storage Tests of Transistors. Solid-State J. 2(1961)9, S. 21...27.
- [7] J. J. A. Ploos van Amstel: Methods of Producing Stable Transistors. Philips Techn. Rev. 22(1961/62)6, S. 204...214.
- [8] R. I. B. Cooper: Moisture Exclusion from Encapsulation of Long-Life Transistors. Proc. IRE 50(1962)2, S. 141...147.
- [9] W. Guggenbühl, M. J. O. Strutt and W. Wunderlin: Halbleiterbauelemente. Bd. I: Halbleiter und Halbleiterdioden. Birkhäuser Basel 1962.
- [10] H. Salow, H. Beneking, H. Krömer and W. v. Münch: Der Transistor. Physikalische und technische Grundlagen. Serie: Technische Physik in Einzeldarstellungen Bd. 15, Springer Berlin 1963.
- [11] E. Bartels: Oberflächeneffekte an Halbleitern, eine kurze Beschreibung ihrer Ursachen und Wirkungen. Elektron. Rdsch. 17(1963)6, S. 281...286.
- [12] E. Bartels: Oberflächeneffekte an Halbleitern, eine kurze Beschreibung ihrer Ursachen und Wirkungen. Internat. Elektron. Rdsch. 17(1963)7, S. 345...348.
- [13] F. F. Roberts, R. Sanvoisin and M. P. Morgan: Some Reliability Studies on Silicon Planar Transistors. Post Office electr. Engr. J. 57(1964)7, S. 112...126.
- [14] S. Dushman and J. M. Lafferty: Scientific Foundations of Vacuum Technique. Second Edition, Wiley New York 1962.
- [15] K. Diels and R. Jäckel: Leybold Vakuum-Taschenbuch. 2. Auflage, Springer Berlin 1962.
- [16] G. Ch. Mönch: Neues und Bewährtes aus der Hochvakuumtechnik. 3. Auflage. VEB Verlag Technik Berlin 1961.
- [17] H. Piatti: Contrôle d'herméticité non destructeur des petites enveloppes scellées. Le Vide 17(1962)99, S. 250...255.
- [18] H. Bergqvist: Leak Detection on Transistors. Elteknik 4(1961)8, S. 141...144.
- [19] B. Baker: Problème du dégazage des défauts d'étanchéité des boîtiers de transistors. L'onde électrique 41(1961)409, S. 408...415.
- [20] Chr. Gerthsen: Physik. 6. Auflage, Springer Berlin 1960.
- [21] M. Knudsen: Die Gesetze der Molekularströmung und der inneren Reibungsströmung der Gase durch Röhren. Ann. Physik 28(1909)-, S. 75...130.
- [22] J. H. Makking: Lekken zoeken in vacuümsystemen. Ingenieur (s'Gravenhage) 74(1962)34, S. 065...078.
- [23] H. v. Alven: Semiconductor Reliability. Vol. 2, Chapman & Hall London 1962.
- [24] A. Lindell: Envelope Design for Semiconductor Devices. Proc. IEE Part B 106(1959)Suppl., S. 463...469.
- [25] M. J. Aitken: An Electrical Analogue to a High Vacuum System. Brit. J. Appl. Physics. 4(1953)6, S. 188.
- [26] D. W. Stops: Further Applications of the Electrical Analogue to Vacuum Systems. Brit. J. Appl. Physics 4(1953)11, S. 350.
- [27] H. S. Evander: Transistor's Leads are its Hermetic Seals. Electronics 34(1962)34, S. 56 + 58.
- [28] D. B. Pearson: Hermetic-Seal Leak Dedection in Semiconductor Devices. Semiconductor Prod. 6(1963)2, S. 19...22.
- [29] R. J. Gnaedinger, S. S. Flaschen, M. A. Hall and E. J. Richez: Selection of Germanium Transistor Parameters by Control of Moisture at Low Levels within the Device Encapsulation. J. Electrochem. Soc. 109(1962)7, S. 589...595.
- [30] A. Linder: Statistische Methoden für Naturwissenschaftler, Mediziner und Ingenieure. 2. Auflage Birkhäuser Basel 1957.
- [31] A. Linder: Planen und Auswerten von Versuchen. Eine Einführung für Naturwissenschaftler, Mediziner und Ingenieure. Birkhäuser Basel 1953.
- [32] H. Rothfuss: Transistor-Messpraxis. Eine Anleitung für Messungen an Transistoren und Halbleiterdioden. Franckh Stuttgart 1961.
- [33] T. Kraus: Die Prüfung der Dichtigkeit luftgefüllter kleiner Gehäuse im Vakuum. Z. Instrum.-Kde. 72(1964)1, S. 7...10.
- [34] S. German and E. Rieckmann: Zur Prüfung der Wasserdichtheit von Uhrengehäusen. Z. Instrum.-Kde. 72(1964)8, S. 221...224.
- [35] M. Gary: Ein Verfahren zur Messung der Luftdurchlässigkeit von Uhrengehäusen. Z. Instrum.-Kde. 72(1964)8, S. 233...236.
- [36] B. Baker: Problème du dégazage et des défauts d'étanchéité des boîtiers de transistors. L'onde électrique 41(1961)409, S. 408...415.
- [37] J. R. Young: Ultrahigh Vacuum Leak Sealing Material. Rev. Sci. Instrum. 35(1964)1, S. 116.
- [38] W. Weizel: Einführung in die Physik. Teil III: Optik und Atomphysik. Bibliographisches Institut Mannheim 1959.
- [39] R. M. McRobb: The Reliability Testing of Semiconductors. Brit. Commun. and Electronics. 9(1962)11, S. 842...846.
- [40] G. Courtois and M. Gasnier: Der Nachweis von Ausströmungen mittels Radioelementen Microtecnic 17(1963)3, S. 119...124, Nr. 4, S. 146...154 + Nr. 5, S. 176...189.
- [41] F. Zwicky: Morphologische Forschung. Wesen und Wandel materieller und geistiger struktureller Zusammenhänge. Kommissionsverlag Buchdruckerei Winterthur, Winterthur 1959.
- [42] J. E. Shwop und H. J. Sullivan: Semiconductor Reliability. Chapman & Hall London 1961.

Adresse des Autors:

C. Villalaz, dipl. Elektroingenieur, Drosselstrasse 15, 8038 Zürich.