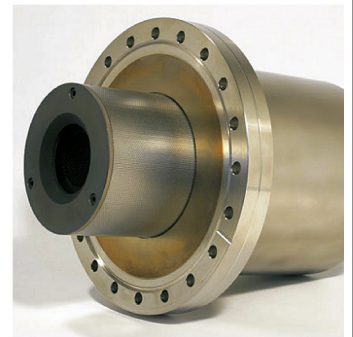
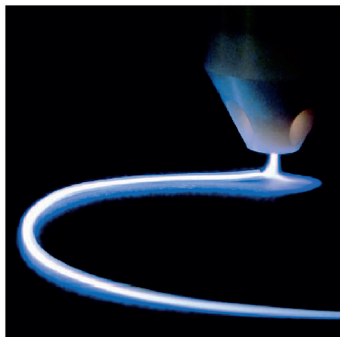
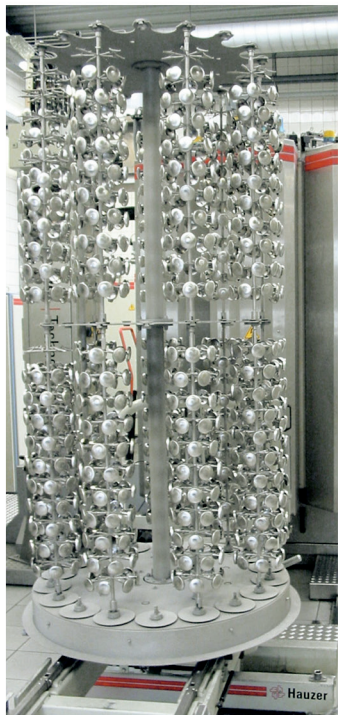
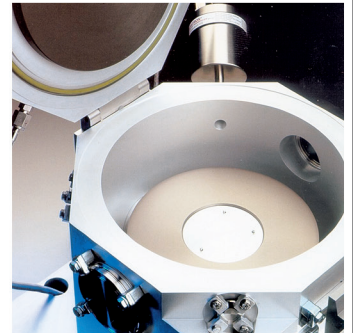
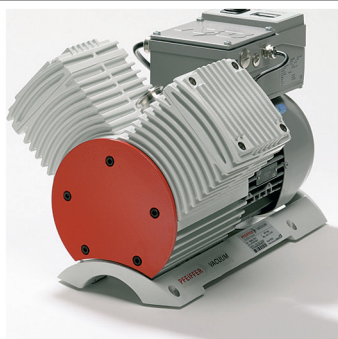


Gerhard Blasek, Günter Bräuer

Vakuum · Plasma · Technologien

Beschichtung und Modifizierung von Oberflächen

Teil I+II



Vakuum · Plasma · Technologien

Beschichtung und Modifizierung von Oberflächen

Teil I

Gerhard Blasek, Günter Bräuer et al.

Erste Auflage mit 505 Abbildungen
und 63 Tabellen

Fachverlag für
• Oberflächentechnik – Galvanotechnik
• Produktion von Leiterplatten
und Systemen
(Baugruppenteknik)

EUGEN G.
LEUZE
VERLAG

108 JAHRE 1902 – 2010

BAD SAULGAU
GERMANY

Alle Rechte, einschließlich das der Übersetzung und der Veranstaltung einer fremdsprachlichen Ausgabe, sind den Inhabern der Verlagsrechte vorbehalten.

Der Nachdruck, auch auszugsweise, ist verboten. Dieses Werk darf auch nicht in Teilen ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Printed in Germany • Imprimé en Allemagne

2010

ISBN 978-3-87480-257-4

EUGEN G. LEUZE VERLAG KG • D-88348 BAD SAULGAU

Inhaltliche redaktionelle Bearbeitung und Überarbeitung durch
Dr.-Ing. C. Benjamin Nakhosten
Technische Universität Dortmund, Fakultät Maschinenbau,
Lehrstuhl Technik und ihre Didaktik

Gesamtherstellung: Eugen G. Leuze Verlag KG, D-88348 Bad Saulgau

Vorwort

Vakuum und Plasma beherrschen nicht nur die Mikroelektronik- und Solartechnologie. Sie haben in nahezu allen technischen Disziplinen Einzug gehalten und sind maßgeblich an deren wissenschaftlich-technischem Fortschritt beteiligt. Die Beschichtung von Festkörpern im Vakuum und die Modifizierung oberflächennaher Bereiche durch Vakuum- und Plasmaprozesse schaffen Produkte mit neuen Gebrauchswerten und sind unverzichtbar für nachfolgende Fertigungsprozesse. Dies betrifft den Werkzeugbau und alle Bereiche des Maschinen- und Fahrzeugbaus, das Bauwesen, die Papier- und Textiltechnik, die Glas-, Keramik- sowie Kunststoffverarbeitung und -oberflächenveredelung, die Kommunikations- und Unterhaltungselektronik ebenso wie die Lebensmittel-, Umwelt- und Biotechnologien sowie die Medizintechnik. Vakuum- und Plasmaprozesse ermöglichen nicht nur eine kostengünstige, umwelt- und ressourcenschonende Fertigung, sondern verleihen Erzeugnissen völlig neue Eigenschaften wie extreme Härte, reduzierten mechanischen und chemischen Verschleiß, bessere Biokompatibilität, optimierte oder völlig neue optische, elektrische, magnetische sowie auch ästhetische Eigenschaften. Bedenkt man, dass das Potenzial der Vakuum- und Plasmatechnologie bei weitem noch nicht ausgeschöpft ist, offenbart sich darüber hinaus ihre enorme soziale Komponente bei der Sicherung und Schaffung von Arbeitsplätzen sowohl in Forschung und Entwicklung als auch im Geräte- und Anlagenbau für die Vakuum- und Plasmatechnik und schließlich in der Produktion neuer oder verbesserter und damit wettbewerbsfähigerer Produkte. In der Tat gibt es Regionen, in denen die vakuum- und plasmarelevante Oberflächentechnik neue Wirtschaftsstrukturen geschaffen hat oder schafft.

Plasmaprozesse, wie sie in diesem Buch behandelt werden, sind überwiegend Niederdruckprozesse. Nur gelegentlich wird auch Normaldruckplasma in die Betrachtungen einbezogen. Die technologischen Möglichkeiten werden an zahlreichen industrierelevanten Beispielen gezeigt. Dafür erforderliche physikalische, chemische und technologische Grundlagen werden bereitgestellt, und es werden Wege gezeigt, wie diese erschlossen werden können. Eine Vielzahl an Abbildungen, Tabellen und Literaturhinweisen soll das unterstützen. Das Buch ist also nicht als Lehrbuch im akademischen Sinn gedacht, sondern eher als inspirierender Wegweiser zur Nutzung von Vakuum und Niederdruckplasma bei der Lösung oberflächenspezifischer Probleme. So wird also hier die Mikroelektroniktechnologie nicht umfassend behandelt, wohl aber werden viele Prozesse dargestellt, die zur Fertigung mikroelektronischer Erzeugnisse eingesetzt werden. Das gilt auch für andere Anwendungsfelder von vakuumrelevanten Oberflächentechnologien. Um alles möglichst industriennah zu gestalten, wurden als Autoren zahlreiche Spezialisten aus industriellen

Bereichen oder mit starker Bindung zu diesen einbezogen. Der damit erreichte inhaltliche Gewinn war mit einem hohen Zeitaufwand bei der Erarbeitung der Manuskripte verbunden.

Die Autoren haben die von den Herausgebern vorgegebenen Themenkreise eigenverantwortlich und so aktuell wie möglich gestaltet. Inhaltliche Dopplungen konnten dennoch weitgehend vermieden werden.

Die Herausgeber danken allen beteiligten Autoren und dem Verlag für die konstruktive Zusammenarbeit, vor allem für ihre Geduld und den Glauben an die Realisierung des Vorhabens.

Gerhard Blasek und Günter Bräuer

Dresden im August 2010

1 Grundlagen

1.1 Vakuumtechnische Grundlagen

1.1.1 Anforderungen an Vakuumbedingungen

Von Vakuum wird gesprochen, wenn der Druck eines gasförmigen Stoffs unterhalb des kleinsten auf der Erde vorkommenden atmosphärischen Drucks liegt [1]. Vakuum ist erforderlich, wenn die Stöße von Gasteilchen untereinander oder mit Fremdgasteilchen und mit Wand- und Substratoberflächen vertretbar gering bleiben müssen. Im Folgenden wird die Bezeichnung *Gas* für permanentes Gas und Dampf und die Bezeichnung *Teilchen* für Atome oder Moleküle benutzt, sofern keine Unterscheidung erforderlich ist. Vakuum ermöglicht eine über größere Strecken stoßfreie, geradlinige Ausbreitung von Gasteilchen und kann Gasinkorporationen sowie ungewollte chemische Reaktionen stark vermindern. Vakuum ist somit zu einem unverzichtbaren Hilfsmittel in Forschung und Industrie geworden, so auch für die vakuum- und plasmatechnische Beschichtung und Modifizierung von Oberflächen [2–3].

Niederdruckplasmaprozesse laufen im Druckbereich von 10 bis 10^{-4} mbar ab. Nach der üblichen Einteilung der Druckbereiche überstreicht dies den Grob-, Fein- und Hochvakuumbereich (Tab. 1). Neben dem Gasdruck und den Anregungsparametern für das Plasma spielt in den meisten Fällen die Gaszusammensetzung eine entscheidende Rolle. So können reaktive Prozesse an der Oberfläche eines zu behandelnden Objekts entweder erwünscht sein oder sie sollen vermieden werden. Aus diesen Gründen werden definierte Gaszusammensetzungen gefordert, die sich auch im Lauf von Prozessen – beispielsweise durch das Desorbieren von Gasen wie Wasserdampf, Sauerstoff und Stickstoff, Reaktionsprodukte oder Leckagen sowie durch Verbrauch (etwa einer reaktiven) Gaskomponente – nicht störend ändern dürfen. Dies trifft gleichermaßen zu auf Aktivierungsverfahren sowie

Tab. 1: Vakuumbereiche

Formelzeichen	Einheit	Grobvakuum GV	Feinvakuum ¹⁾ FV	Hochvakuum HV	Ultrahochvakuum UHV
p	Pa	$3 \cdot 10^4 - 1 \cdot 10^2$	$1 \cdot 10^2 - 1 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-1} - 1 \cdot 10^{-5}$	unter 10^{-5}
	mbar	$3 \cdot 10^2 - 1$	$1 - 1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-7}$	unter 10^{-7}
n	m^{-3}	$8,3 \cdot 10^{24} - 2,5 \cdot 10^{22}$	$2,5 \cdot 10^{22} - 2,5 \cdot 10^{19}$	$2,5 \cdot 10^{19} - 2,5 \cdot 10^{15}$	unter $2,5 \cdot 10^{15}$

p = Druck, n = Teilchenanzahldichte bei 293 K, 1 mbar = 100 Pa.

¹⁾ Der Druckbereich von $1 \cdot 10^{-2}$ bis 100 Pa beziehungsweise 10^{-4} bis 10 mbar wird bisweilen als Niederdruck bezeichnet (Abschn. 1.2 und 2.4).

Beschichtungsverfahren mit Plasmabeteiligung. Zwei Strategien werden zur Gewährleistung definierter Gaszusammensetzungen verfolgt:

- Der Basisdruck vor Beginn eines Plasmaprozesses liegt im guten Hochvakuumbereich (10^{-5} mbar oder kleiner), was auch eine mögliche Gasabgabe (Desorption) unter Prozessbedingungen mindert.
- Es wird im Gasdurchflussregime gearbeitet, sodass sich die Gaszusammensetzung beim erforderlichen Arbeitsdruck während eines Prozesses nicht ändert.

Beide Strategien stellen spezifische Anforderung an die Vakuumerzeugung und -aufrechterhaltung sowie die Druckmessung und auch an die Gestaltung von Vakuumbauteilen (vakuumgerechte Konstruktion und Werkstoffauswahl). Grundkenntnisse der Thermodynamik verdünnter Gase und der Vakuumtechnik sind Voraussetzung für eine erfolgreiche Planung und Durchführungen von Vakuum- und Niederdruckplasmaprozessen. Die dafür wichtigen Grundlagen von Vakuumphysik und -technik werden im Folgenden dargestellt. Ergänzend sei auf die umfangreiche Fachliteratur zum Thema verwiesen [4–16].

1.1.2 Thermodynamische Grundlagen

Phänomenologische Betrachtung

Der thermodynamische Zustand eines verdünnten Gases (also hier des *Vakuums*) wird gut durch die Zustandsgleichung idealer Gase beschrieben:

$$pV = \nu RT = mR_i T \quad \langle 1 \rangle$$

mit

p = Druck (meist in Pa oder mbar), bei Gasgemischen: Summe der Partialdrücke,

V = Volumen (meist in m^3 oder ℓ),

T = absolute Temperatur (in K),

m = Masse (meist in kg oder g)

$\nu = m/M$ (Stoffmenge, in mol oder kmol) mit

M = molare Masse (meist in kg/kmol oder g/mol),

$R_i = R/M$ (individuelle, auch spezifische Gaskonstante) und

$R = 8,314 \text{ J}/(\text{mol K}) = 8,314 \text{ Pa m}^3/(\text{mol K})$ (universelle, auch molare Gaskonstante).

Tabelle 2 enthält die gesetzlich vorgeschriebenen und einige zwar veraltete, in der Literatur aber noch immer anzutreffende Einheiten für den Druck.

Bei konstanter Temperatur ist das Produkt pV , der so genannte pV -Wert, der Masse eines Gases proportional und beschreibt eine Gasmenge. Die pro Zeit (etwa durch eine Rohrleitung) bei konstanter Temperatur transportierte Gasmenge

$$q_{pV} = \left. \frac{d(pV)}{dt} \right|_T \quad \langle 2 \rangle$$

heißt pV -Stromstärke oder pV -Durchfluss mit der Maßeinheit mbar ℓ/s [1]. Ein definierter Gas(mengen)einlass pro Zeit in einen Vakuumraum wird in Standard- cm^3/min (abgek. sccm) oder Standard- ℓ/min (abgekürzt s ℓ m) angegeben, wobei gilt: $1 \text{ sccm} \hat{=} 1013 \text{ mbar cm}^3/\text{min}$,

Tab. 2: Druckeinheiten

	<i>Pa</i>	<i>bar</i>	<i>mbar</i>	<i>Torr</i> <i>mm Hg</i>	<i>atm</i>	<i>at</i>	<i>psi</i> <i>lbf/inch²</i>
<i>Pa</i>	1	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$9,87 \cdot 10^{-6}$	$1,02 \cdot 10^{-5}$	$1,45 \cdot 10^{-4}$
<i>bar</i>	$1 \cdot 10^5$	1	1000	750	0,987	1,02	14,5
<i>mbar</i>	100	$1 \cdot 10^{-3}$	1	0,75	$9,87 \cdot 10^{-3}$	$1,02 \cdot 10^{-3}$	$1,45 \cdot 10^{-2}$
<i>Torr</i>	$1,33 \cdot 10^2$	$1,33 \cdot 10^{-3}$	1,33	1	$1,32 \cdot 10^{-3}$	$1,36 \cdot 10^{-3}$	$1,93 \cdot 10^{-3}$
<i>atm</i>	$1,01 \cdot 10^{-4}$	1,013	$1,01 \cdot 10^6$	760	1	1,03	14,7
<i>at</i>	$9,81 \cdot 10^{-4}$	9,81	981	736	0,968	1	14,2
<i>psi</i>	$6,98 \cdot 10^3$	$6,98 \cdot 10^{-2}$	68,9	51,71	$6,8 \cdot 10^{-2}$	$7,02 \cdot 10^2$	1

1 sℓm ≅ 1013 mbar ℓ/min und zum Beispiel 100 sccm ≅ 1,69 mbar ℓ/s. Für einen definierten Gaseinlass stehen käufliche *Mass Flow Controller (MFC)* zur Verfügung, deren Herzstück ein thermischer Sensor ist.

Gaskinetische Betrachtung

Die kinetische Gastheorie geht von der modellhaften Betrachtung der Gasteilchen als harte, elastische und über ihren Radius hinaus wechselwirkungsfreie mikroskopisch kleine Kugeln aus (einatomiges ideales Gas). Ihre Masse und ihr Radius werden von der Gasart bestimmt. Sie führen eine ungeordnete Wimmelbewegung aus und stoßen dabei untereinander und mit der Gefäßwand zusammen. Dabei ändern sich Geschwindigkeit und Richtung der Teilchen. Die Wahrscheinlichkeit (relative Häufigkeit) dafür, dass im thermischen Gleichgewicht eine gewisse Anzahl Δ*N* von insgesamt *N* Gasteilchen in einem abgeschlossenen Volumen eine Geschwindigkeit mit dem Betrag *c* und in einem Bereich zwischen *c* und *c* + Δ*c* mit einem vorgegeben Δ*c* liegt, ist

$$\Delta N/N = w(c)\Delta c = 4\pi c^2(m_0/(2\pi kT))^{3/2} \exp(-m_0c^2/(2kT)) \Delta c \tag{<3>}$$

$$= 4\pi c^2 (M/(2\pi RT))^{3/2} \exp(-Mc^2/(2RT)) \Delta c, \tag{<4>}$$

mit

*m*₀ = Teilchenmasse und

k = 1,380 · 10⁻²³ J/K (*Boltzmannkonstante*).

Die Wahrscheinlichkeits- oder Häufigkeitsdichte *w(c)* ist die *Maxwellsche Geschwindigkeitsverteilung* für ein ideales Gas. Gleichung <4> enthält die molaren Größen *R* und *M* der phänomenologischen Betrachtung (Gl. <1>). Für den Übergang zum Teilchenmodell dienen die Zusammenhänge

$$k = R/N_A, \tag{<5>}$$

$$m_0 = M/N_A, \tag{<6>}$$

mit

*m*₀ = Teilchenmasse und

*N*_A = 6,022 · 10²³ mol⁻¹ (*Avogadrokonstante*).

Mithilfe statistischer Betrachtungen lassen sich für das Verständnis der Prozesse in verdünnten Gasen und im Niederdruckplasma wichtige Größen ableiten, die in *Tabelle 3* zusammen mit Zahlenwerten für Luft bei 293 K angegeben sind. Es ist erkennbar, dass die mittlere kinetische Energie der Teilchen mit der Temperatur verbunden ist.

Tab. 3: Wichtige Beziehungen der kinetischen Gastheorie [1]

Größen	Beziehungen	
wahrscheinlichste Teilchengeschwindigkeit für Luft ($M_r = 29, T = 293 \text{ K}$)	$c_w = \sqrt{2kT/m_0} = 129\sqrt{T/M_r} \text{ m/s}$ $c_w = 410 \text{ m/s}$	<7>
mittlere Teilchengeschwindigkeit für Luft ($M_r = 29, T = 293 \text{ K}$)	$\bar{c} = \sqrt{8kT/(\pi m_0)} = \sqrt{8RT/(\pi M)} = 146\sqrt{T/M_r} \text{ m/s}$ $\bar{c} = 464 \text{ m/s}$	<8>
mittleres Geschwindigkeitsquadrat	$\overline{c^2} = 3kT/m_0 = 3RT/M = 24,9 \cdot 10^3 T/M_r \text{ m}^2/\text{s}^2$	<9>
effektive Geschwindigkeit für Luft ($M_r = 29, T = 293 \text{ K}$)	$\sqrt{\overline{c^2}} = 158\sqrt{T/M_r} \text{ m/s}$ $\sqrt{\overline{c^2}} = 502 \text{ m/s}$	
mittlere kinetische Energie für $T = 293 \text{ K}$	$W_{\text{kin}} = m_0 \overline{c^2} / 2 = 3/2 kT$ $W_{\text{kin}} = 6,07 \cdot 10^{-21} \text{ J} = 0,038 \text{ eV}$	<10>
Gasdruck	$p = 1/3 \rho \overline{c^2}$ $p = nkT$	<11> <12>
Teilchenanzahldichte für Luft ($M_r = 29, T = 293 \text{ K}, p = 10^{-2} \text{ Pa}$)	$n = p/(kT) = 7,25 \cdot 10^{16} p/T \text{ cm}^{-3}$ $n = 2,5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$	<13>
mittlere flächenbezogene Auftreffrate (auch Wandstromdichte j_N) für Luft ($M_r = 29, T = 293 \text{ K}, p = 10^{-2} \text{ Pa}$)	$z'' = n\bar{c}/4 = p/\sqrt{2\pi m_0 kT} = pN_A/\sqrt{2\pi MRT}$ $= 2,64 \cdot 10^{20} p/\sqrt{M_r T} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ $z'' = 2,86 \cdot 10^{16} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$	<14> <15>
Wiederbedeckungszeit mit einer Monolage für Luft ($M_r = 29, T = 293 \text{ K}, p = 10^{-4} \text{ Pa}, z_1 = 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$)	$t_1 = z_1/z'' = 3,79 \cdot 10^{-17} \frac{z_1 \sqrt{M_r T}}{p} \text{ s cm}^2$ $t_1 = 1,7 \text{ s}$	<16>
Viskosität	$\eta = \rho \bar{c} \bar{l} / 3$ *)	<17>
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda = \eta c_v$	<18>

$n = N/V, \eta = m_0 n, M = M_r$ in kg/kmol, p in Pa, T in K, z_1 = Teilchenanzahl pro Fläche für eine Monolage in cm^{-2} , c_v = spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen, $1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

*) mittlere freie Weglänge groß gegen Gefäßabmessungen

2 Verfahren

2.1 Beschichten durch Verdampfen

2.1.1 Verdampfen im Hochvakuum

Beim Verdampfen im Hochvakuum wird das in der Dampfquelle (Verdampfer) befindliche Verdampfungsgut erhitzt, bis sich ein ausreichend hoher Dampfdruck gebildet hat und somit die gewünschten Verdampfungs- (in der Dampfquelle) und Beschichtungsraten (auf dem Substrat) erreicht werden (*Abschn. 1.1.4*). Zwischen der absoluten Temperatur T_v einer Schmelze oder eines Festkörpers (beim Sublimieren) stellt sich der Sättigungsdampfdruck p_D nach

$$p_D = A e^{-B/T_v} \quad <194>$$

mit

A, B = materialabhängige Konstanten

ein. Über die Dampfdrücke von Metallen in Abhängigkeit von der Temperatur steht umfangreiches Tabellenmaterial zur Verfügung [243] (*Abb. 3*). Für den praktischen Gebrauch ist es jedoch nützlicher, statt des Sättigungsdampfdrucks bei vorgegebener Verdampfungstemperatur die pro Zeit und Fläche abdampfende Materialmenge, die Masseverdampfungsrate (*Gl. <29>, Abb. 4*) zu kennen. Aus dieser lässt sich auf einfache Weise die für eine gewünschte Schichtdicke benötigte Menge Verdampfungsmaterial und die erforderliche Größe der Dampfquelle abschätzen.

Die beim Verdampfen emittierten Teilchen haben eine mittlere kinetische Energie E_D oder ein mittleres Geschwindigkeitsquadrat $\overline{c^2}$ nach

$$E_D = m \overline{c^2} / 2 = 3kT_v / 2 \quad <195>$$

mit

m_0 = Masse eines Dampfteilchens,

$k = 8,6 \cdot 10^{-5}$ eV/K (*Boltzmannkonstante*).

Bei üblichen Verdampfungstemperaturen liegt die Teilchenenergie zwischen etwa 0,2 und 0,3 eV [244]. Die Dampfquellen unterscheiden sich nach der Art der Wärmezufuhr. Ihr konstruktiver Aufbau muss dem Anwendungsfall angepasst werden (z. B. entsprechend Art

und Menge des zu verdampfenden Materials, Verdampfungsrate, Emissionscharakteristik, Standzeit, Anforderungen an die Schichtqualität). Die Wärmezufuhr kann direkt oder indirekt durch Stromdurchgang, induktive Heizung, Beschuss mit energiereichen Teilchen (meist Elektronen, *Abschn. 2.1.3*), mittels Vakuumlichtbögen (*Abschn. 2.1.5*) oder intensiver elektromagnetischer Strahlung (*Pulse Laser Deposition, PLD*) erfolgen [245–246].

Nur ein geringer Anteil der dem Verdampfer zugeführten Energie wird für den eigentlichen Verdampfungsprozess benutzt, das heißt für die Umwandlung eines Festkörpers in seinen Dampf. Der weitaus größte Anteil geht durch Wärmeleitung über die Zuleitungen und durch Wärmestrahlung oder (beispielsweise beim Elektronenstrahlbedampfen) über die Wand von mehr oder weniger gut gekühlten Tiegeln verloren. Wärmestrahlung erhöht die Temperatur der Substrate und muss gegebenenfalls durch ein optimiertes Heizregime und mit Strahlungsschutzblenden eingeschränkt werden. Die Verdampfung erfolgt dabei im Allgemeinen von unten nach oben. Bei geeigneter Ausbildung der Verdampfungsquellen ist auch ein Verdampfen in umgekehrter Richtung oder zur Seite möglich.

Die Wirtschaftlichkeit eines Bedampfungsverfahrens ergibt sich aus der Gesamtfläche (bei kleineren Teilen auch der Stückzahl), die in einer vorgegeben Zeit bedampft werden kann. Nur ein Teil der in den Verdampfer eingebrachten Energie wirkt als Nutzenergie. Dies ist die Summe der Energieanteile für Erwärmung, Schmelzwärme und Verdampfungswärme (oder Sublimationswärme) des zu verdampfenden Werkstoffs. Bestandteile der Verlustenergie E_v sind der Wärmeinhalt des nicht verdampften (aber erwärmten und eventuell geschmolzenen) Vorrats an Verdampfungsgut sowie Verluste durch Wärmeleitung und Wärmestrahlung aller erhitzten Teile des Verdampfers. Für die thermische Effektivität eines Verdampfers gilt:

$$\eta_{\text{th}} = \frac{E_n}{E} \quad <196>$$

mit

E_n = Nutzenergie,

E = Gesamtenergie, die in den Verdampfer eingebracht wird.

In der Praxis kann der spezifische Energieaufwand als Maß der thermischen Effektivität angesehen werden. Tatsächlich beträgt beim Verdampfen von Aluminium bei 1500 °C die spezifische Nutzenergie 2,4 kWh/kg. Es werden aber zum Beispiel beim Elektronenstrahlverdampfen aus heißen Tiegeln 7 bis 20 kWh/kg und bei blockförmigen Widerstandsverdampfern sogar 50 bis 100 kWh/kg benötigt [247]. Bei widerstandsbeheizten Verdampfern, die gegenüber Blockverdampfern eine geringere Eigenmasse besitzen, liegt der spezifische Energieaufwand unterhalb von 50 kWh/kg, erreicht aber nicht die bei Elektronenstrahlverdampfern erzielbaren Werte [248].

Bei Dünnschichtanwendungen, etwa in der Elektronik, spielen Energiekosten für das Verdampfen nur eine untergeordnete Rolle. Dennoch sollte eine hohe thermische Effektivität angestrebt werden. Neben geringeren Investitionskosten für den Verdampfer sind eine vereinfachte Kühlung des Verdampfers und der Substrate entscheidende Vorteile. Damit ergibt sich eine Verminderung der Gasabgabe derjenigen Verdampfer- und Anlagenteile, die thermischer Belastung ausgesetzt sind [249].

Für die Wirtschaftlichkeitsberechnung müssen neben den Investitions- auch die Betriebskosten bekannt sein. Materialverbrauch, Dauer der Evakuierung, des Aufdampfprozesses und des Chargierens, Abmessungen der Anlage und die Belegungsdichte sind einige weitere Größen, die der Berechnung zugrunde gelegt werden müssen.

2.1.2 Bedampfen mit widerstandsbeheizten Dampfquellen

2.1.2.1 Widerstandsbeheizte Dampfquellen

Wegen einfacher Handhabung und geringem Aufwand werden widerstandsbeheizte Dampfquellen auch heute noch häufig in industriellen Anlagen eingesetzt [250–252]. Eine Auswahl durch Stromdurchgang direkt beheizter Widerstandsverdampfer zeigt *Abbildung 119*. Das zu verdampfende Material ist hierbei im Kontakt mit dem Heizer.

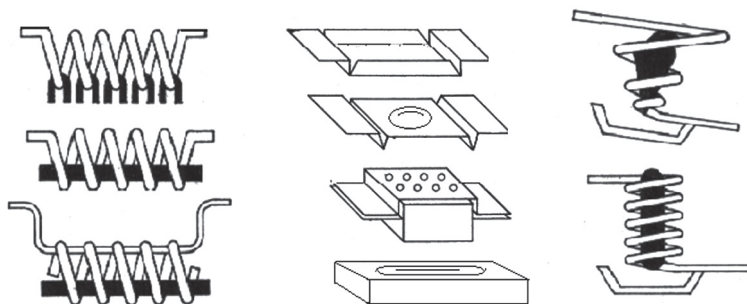


Abb. 119: Technische Ausführungsformen direkt beheizter Widerstandsverdampfer (Verdampfungsmaterial ist eingelegt)

Diese Verdampfer werden in unterschiedlichen Größen und Formen (Spiralen, Mulden, Kästen ohne Deckel oder mit perforiertem Deckel) und meist aus hoch schmelzenden Materialien wie Wolfram, Molybdän oder Tantal je nach Verdampfungsmaterial und Verdampfungsmenge eingesetzt. Die Massetragfähigkeit dieser Verdampfer beträgt einige Gramm. Für Schichtwerkstoffe mit niedrigen Verdampfungstemperaturen (z. B. Te, Se und Kunststoffe) kommen auch Verdampfer aus Edelstahl infrage.

Bei indirekten Widerstandsverdampfern wird ein Tiegel durch Wärmestrahlung oder Wärmeleitung erhitzt, vorzugsweise für Materialien mit hohem Dampfdruck bei vergleichsweise niedriger Temperatur (wie Zink, Selen oder Teflon [253]). Eine Sonderform ist die induktive Erhitzung durch mittelfrequente Wirbelströme [254] oder Elektronenstoß [255]. Ausführungsformen zu dieser Gruppe der Verdampfungsquellen zeigt *Abbildung 120*.

Die Standzeit von Widerstandsverdampfern wird vielfach durch Reaktions- und Legierungsneigung von Heizer- beziehungsweise Tiegelmateriale und Verdampfungsmaterial begrenzt. Reaktionen können auch zu Schichtverunreinigungen führen. Besonders schnell führen Schichtwerkstoffe wie Eisen, Kobalt, Nickel, Titan, Zirkonium und Silizium zur

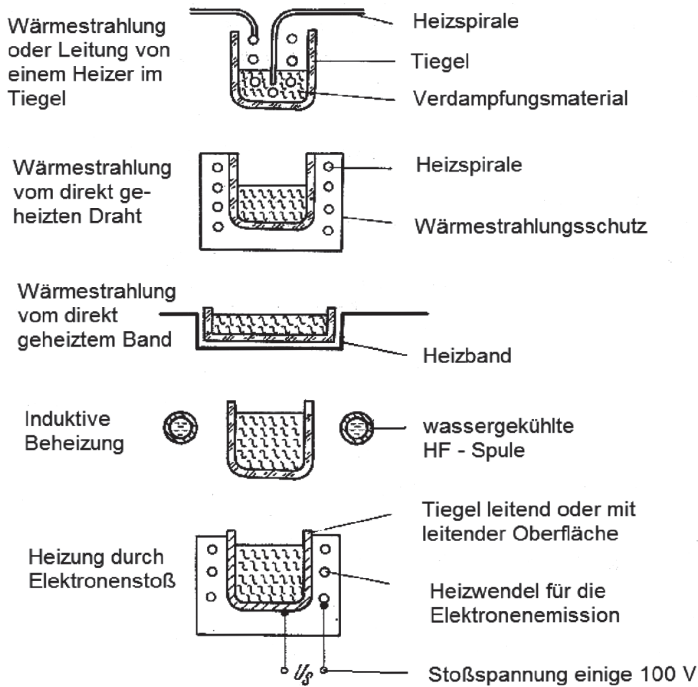


Abb. 120: Indirekt beheizte Verdampfungsquellen

Zerstörung von Verdampfern. Die Wiederverwendung benutzter Verdampfer ist wegen der eingetretenen Versprödung begrenzt oder unmöglich. Übersichten zu Schichtwerkstoffen und geeigneten Verdampferwerkstoffen sind in [250–251, 256–258] zu finden.

2.1.2.2 Vakuumbedingungen beim Bedampfen

Restgasdruck und Restgaszusammensetzung beeinflussen die Ausbreitung des Dampfs und die chemischen und morphologischen Eigenschaften der auf einem Substrat kondensierten Schicht erheblich (Abschn. 1.1.2 und 1.3.3). Bei einem Verhältnis $\bar{l}/r = 1$ von mittlerer freier Weglänge und Abstand zwischen Quelle und Substrat gelangen noch etwa 60 Prozent der Dampfteilchen ohne einen Zusammenstoß mit einem Restgasteilchen auf das Substrat (Abb. 121). Die anderen werden gestreut, gehen dem Beschichtungsprozess vielfach verloren und verunreinigen Vakuumkammer und Einbauten. Vor diesem Hintergrund und aus wirtschaftlicher Sicht gilt für viele industrielle Anwendungen die Faustregel, dass der Druck so niedrig sein muss, dass die mittlere freie Weglänge mindestens so groß, besser jedoch größer als der Abstand von Quelle und Substrat sein soll [259], der Druck also bei oder unter 10^{-4} mbar liegen soll. Unter diesen Bedingungen ist auch die Oxidationsgefahr für das Verdampfermaterial (*Durchbrennen*) ausreichend gering.

Der Druck in der Vakuumkammer und die Bedampfungsparameter müssen aufeinander abgestimmt sein und haben Einfluss auf die Schichtqualität. Je mehr abgedampfte Teilchen

3 Anwendungen

3.1 Optische Schichten

3.1.1 Bedeutung optischer Schichten

Optische Schichten spielen seit Jahren zunehmend eine entscheidende Rolle für die Realisierung wichtiger Funktionen von Bauteilen. Mit ihnen lassen sich nicht nur dekorative Effekte erzielen (*Abb. 506, Abschn. 3.12*). Glasoberflächen von Linsen, Computerdisplays und Schaufenster können entspiegelt und Kunststoffoberflächen mittels optischer Beschichtung gegen schädliche Ultraviolettstrahlung und Verkratzen geschützt werden. Im Architekturglasbereich kann eine zehn Nanometer dünne Silberschicht, eingebettet

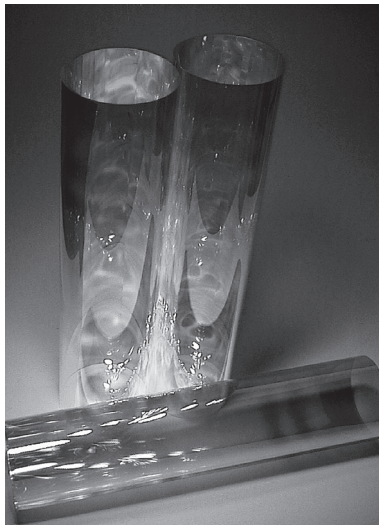


Abb. 506: Mit einer dichroitischen Schicht versehene PET-Folie für dekorative Anwendungen (*Fraunhofer-Institut für Schichttechnologie, Fraunhofer-Institut für Elektronenstrahl- und Plasmatechnik*)

in eine Gesamtschicht von 100 nm Dicke, den Energieverlust durch Wärmestrahlung praktisch vollständig vermeiden (*Abschn. 3.2*). Ohne den Einsatz optischer Schichten in Lasern, Mikroskopen oder in der Telekommunikation wäre die Funktion dieser Systeme nicht möglich. Die Anwendungen optischer Schichten beschränkt sich aber keineswegs auf den sichtbaren Bereich. Vielmehr benötigen zahlreiche Anwendungen optische Schichten vom fernen Infrarot- bis in den Röntgenbereich, sodass die charakteristischen Schichtdicken ($\lambda/4n$) im Mikrometerbereich bis hinunter zu wenig über einem Nanometer liegen. Einige Beispiele für Einsatzbereiche optischer Schichten sind in *Tabelle 64* zusammengestellt.

In Schichtsystemen sind Grenzflächeneigenschaften von enormer Bedeutung. Besonders wichtig ist, dass die Funktion – vor allem von transparenten Schichten – entscheidend von der Schichtdicke abhängt und zwar in vielen Fällen von extremer Genauigkeit bis in den Subnanometerbereich (z. B. bei Blockerschichten gegen Silberdiffusion bei Wärmeschutzschichten, *Abschn. 3.2* und *3.3*). Diese extreme Präzision ist nur mit einer atomlagenweisen Beschichtung unter extrem reinen Umgebungsbedingungen möglich.

Bei der Produktion optischer Schichten sind nicht nur die optischen und nicht optischen Eigenschaften von Interesse. Auch die Kosten müssen im Rahmen gehalten werden, insbesondere bei großvolumigen Anwendungen und hohen Stückzahlen. Dies erfordert Beschichtungsprozesse, die mit höchster Präzision auch bei hohen Raten und vor allem auf großen Flächen ausschussfrei arbeiten.

Tab. 64: Beispiele für optische Schichten mit den wichtigsten eingesetzten Beschichtungsverfahren

<i>Funktion</i>	<i>Schichtanzahl</i>	<i>Gesamtschichtdicke in μm</i>	<i>Technologie</i>	<i>Anwendung</i>
Antireflex, Antistatik	1 – 5	0,2	IAD, MS	Linse in optischen Geräten, Computermonitore, Displays, Fensterglas, Museumsglas
Wärmeschutz, Sonnenschutz	4 – 13	0,2	MS	Flachglas, Architektur
Kantenfilter	8 – 20	0,5 – 1	MS, IAD, EB, PCVD	Dekoration, Display, Projektoren, Wärmereflexionsfilter
Bandpassfilter	20 – 200		IAD, MS, IBS	Fluoreszenzmikroskopie, Raman-spektrometer, Telekommunikation
dielektrische Spiegel	30 – 80	3 – 6	IAD, IBS, MS	Lasieranwendungen
Breitbandpassfilter	80		IAD, MS	Consumeroptik (z. B. UV-IR-Cut)
Notchfilter, Kantenfilter, Bandpassfilter	> 100	10 – 20	(IAD), MS, IBS	Fluoreszenzmikroskopie, Raman-spektroskopie, Astronomie
Phasenkorrekturfilter	> 50	10	IBS, MS	Telekommunikationsfilter, fs-Laser

EB: electron beam deposition, IAD: ion assisted deposition, MS: Magnetronspütern, IBS: ion beam sputtering, PCVD: plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD, PICVD)