

DIN 50989-6



ICS 19.100

Einsprüche bis 2023-03-27

Entwurf**Ellipsometrie –
Teil 6: Modell Effektive Materialien;
Text Deutsch und Englisch**

Ellipsometry –
Part 6: Effective Materials model;
Text in German and English

Ellipsométrie –
Partie 6: Modèle de matériaux efficaces;
Texte en allemand et anglais

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2023-01-27 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an nmp@din.de möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an den DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP), 10772 Berlin oder Am DIN-Platz, Burggrafenstr. 6, 10787 Berlin.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 39 Seiten

DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP)

Inhalt

	Seite
Vorwort	4
Einleitung	5
1 Anwendungsbereich	6
2 Normative Verweisungen	6
3 Begriffe, Symbole und Abkürzungen	6
3.1 Begriffe	6
3.2 Symbole und Abkürzungen	6
4 Modell <i>Effektive Materialien</i>	7
4.1 Strahlengang und Effektiv-Medium-Theorie	7
4.1.1 Strahlengang	7
4.1.2 Effektiv-Medium-Theorie	8
4.2 Annahmen	11
4.3 Besonderheiten des Modells <i>Effektive Materialien</i>	12
4.4 Validierung	13
4.5 Messunsicherheit	14
4.5.1 Messunsicherheit der ellipsometrischen Transfergrößen Ψ und Δ	14
4.5.2 Messunsicherheit u_d der Schichtdicke d	14
5 Prüfbericht	14
Anhang A (informativ) Ergänzungen zum Modell <i>Effektive Materialien</i>	16
A.1 Effektiv-Medium-Näherung nach Maxwell-Garnett zur Berechnung der dielektrischen Funktion von porösem Gold	16
A.2 Effektiv-Medium-Näherung nach Bruggeman zur Simulation der ellipsometrischen Transfergrößen in Anwesenheit einer Grenzflächenrauheit SiO_2/Si	17
A.3 Effektiv-Medium-Näherung nach Bruggeman zur Auswertung der Messung einer porösen TiO_2 -Schicht auf Silizium	18
A.4 Hinweise für die Messpraxis	19
Literaturhinweise	20

Bilder

Bild 1 — Strahlengang beim Modell <i>Effektive Materialien</i>	8
Bild 2 — Schematische Darstellung der Grundgleichung beim Modell <i>Effektive Materialien</i>	9
Bild 3 — Schematische Darstellung der linearen Näherung beim Modell <i>Effektive Materialien</i>	9
Bild 4 — Schematische Darstellung der Maxwell-Garnett-Näherung	10
Bild 5 — Schematische Darstellung der Bruggeman-Näherung	11
Bild 6 — Validierung des Modells <i>Effektive Materialien</i>	13
Bild A.1 — Real- und Imaginärteile der komplexen dielektrischen Funktion von Gold sowie des effektiven Materials poröses Gold (90% Gold und 10 % Luft)	16
Bild A.2 — Real- und Imaginärteile der komplexen dielektrischen Funktion eines effektiven Materials (90% Gold und 10 % Luft) bei falscher Zuweisung der Materialien A und B	17
Bild A.3 — Simulierte ellipsometrische Transfergrößen Ψ und Δ von 10 nm SiO_2 auf Silizium-Substrat bei AOI 70° mit und ohne Rauheitsgrenzschicht	18
Bild A.4 — Messung porenfreier bzw. poröser TiO_2 -Schichten auf Si-Substrat: Real- und Imaginärteile der komplexen dielektrischen Funktion	19

Tabellen

Tabelle 1 — Symbole und Abkürzungen	7
Tabelle 2 — Annahmen beim Modell <i>Effektive Materialien</i>	12

Vorwort

Dieses Dokument wurde vom Arbeitsausschuss NA 062-01-61 AA „Mess- und Prüfverfahren für Schichten und Schichtsysteme“ des DIN-Normenausschusses Materialprüfung (NMP) erarbeitet.

DIN 50989, *Ellipsometrie*, besteht aus den folgenden Teilen:

- Teil 1: Grundlagen
- Teil 2: Modell Volumenmaterial
- Teil 3: Modell Transparente Einfachsicht
- Teil 4: Modell Semi-transparente Einfachsicht
- Teil 5: Modell Mehrfachsichten und periodische Schichten
- Teil 6: Modell Effektive Materialien¹

Aktuelle Informationen zu diesem Dokument können über die Internetseiten von DIN (www.din.de) durch eine Suche nach der Dokumentennummer aufgerufen werden.

¹ In Vorbereitung.

Einleitung

Bei der Messmethode Ellipsometrie handelt es sich um ein phasenempfindliches Reflexionsexperiment mit polarisiertem Licht im optischen Fernfeld. Die Ellipsometrie ist als nicht invasives Messverfahren seit langem in der Halbleitertechnik – speziell in der integrierten Fertigung – zunächst als Ein-Wellenlängen, dann als Mehrwellen-, später als spektroskopisches Messverfahren etabliert.

Mittels Ellipsometrie können optische bzw. dielektrische Konstanten beliebiger Materialien sowie Schichtdicken wenigstens semi-transparenter Schichten bzw. Schichtsysteme bestimmt werden. Die Ellipsometrie ist ein indirektes Messverfahren, dessen Auswertung auf einer Modelloptimierung basiert. Die je nach Verfahrensprinzip unterschiedlichen Messgrößen werden in die ellipsometrischen Transfergrößen Ψ (Psi, Amplitudeninformation) und Δ (Delta, Phaseninformation) umgewandelt, aus denen die interessierenden physikalischen Zielgrößen (optische bzw. dielektrische Konstanten, Schichtdicken) dann über einen parametrisierten Fit bestimmt werden.

Die Ellipsometrie weist eine hohe Präzision in den ellipsometrischen Transfergrößen Ψ und Δ auf, die für ideale Schicht-Substrat-Systeme einer Schichtdickenempfindlichkeit von 0,1 nm entsprechen kann. Das Messverfahren kann somit geringste Abweichungen in den Oberflächeneigenschaften nachweisen. Das steht im engen Zusammenhang mit der Homogenität und der Isotropie der Materialoberfläche. Für das Erreichen der hohen Präzision ist bei inhomogenen Materialien das Messen am identischen Messort Grundvoraussetzung. Gleiches gilt für die Orientierung der Einfallsebene relativ zur Materialoberfläche für anisotrope Materialien.

Beim Modell *Effektive Materialien* wird eine Fitprozedur zur Bestimmung der Schichtdicke d und der optischen/dielektrischen Konstanten N bzw. ε des Schichtmaterials, das als effektives Material beschrieben werden kann, angewandt. Die Volumenanteile der Schichtmaterialkomponenten können dabei in den Fit einbezogen werden, während deren optischen/dielektrischen Konstanten und die des Substrats bekannt sein müssen. Der Fit erstreckt sich deshalb auf die Größe Schichtdicke d , die *a priori* unabhängig von der Wellenlänge und dem Einfallswinkel ist, sowie den wellenlängenabhängigen Brechungsindex N /die dielektrische Funktion ε des effektiven Schichtmaterials, die vom Einfallswinkel unabhängig sind. Mit dem Modell *Effektive Materialien* wird die Bestimmung der Schichtdicke und des komplexen Brechungsindex/der komplexen dielektrischen Funktion des Schichtmaterials möglich.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument legt mittels ellipsometrischer Messungen und deren Auswertung das Verfahren zur Bestimmung der Schichtdicke d von Schichten effektiver Materialien sowie deren optischen (N) bzw. dielektrischen (ϵ) Konstanten/Funktionen auf Basis des Modells *Effektive Materialien* fest.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

DIN 50989-1:2018-03, *Ellipsometrie — Teil 1: Grundlagen*

DIN 50989-2:2021-04, *Ellipsometrie — Teil 2: Modell Volumenmaterial*

DIN 50989-3:2022-04, *Ellipsometrie — Teil 3: Modell transparente Einfeldschicht*

DIN 50989-4:2022-09, *Ellipsometrie — Teil 4: Modell Semi-transparente Einfeldschicht*

DIN 50989-5:2023-xx, *Ellipsometrie — Teil 5: Modell Mehrfeldschichten und periodische Schichten*

DIN EN ISO/IEC 17025, *Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien*

ISO/IEC Guide 98-3, *Uncertainty of measurement — Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM: 1995)*

3 Begriffe, Symbole und Abkürzungen

3.1 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gilt der folgende Begriff.

DIN und DKE stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

— DIN-TERMinologieportal: verfügbar unter <https://www.din.de/go/din-term>

— DKE-IEV: verfügbar unter <http://www.dke.de/DKE-IEV>

3.1.1

effektives Material

ein mindestens zweikomponentiges Material, dessen einzelne Komponenten noch ihre ursprünglichen optischen Eigenschaften besitzen

3.2 Symbole und Abkürzungen

In Tabelle 1 werden alle in diesem Dokument bzw. zusätzlich zu DIN 50989-1, DIN 50989-2, DIN 50989-3, DIN 50989-4 und DIN 50989-5 verwendeten Symbole und Abkürzungen dargestellt, wobei die Anforderungen von ISO/IEC Guide 98-3 und DIN EN ISO/IEC 17025 zu berücksichtigen sind.

Tabelle 1 — Symbole und Abkürzungen

Symbol und Abkürzung	Erläuterung
n	Brechungsindex (Realteil des komplexen Brechungsindex N)
k	Extinktionskoeffizient (Imaginärteil des komplexen Brechungsindex N)
N	komplexer Brechungsindex
ε_1	Realteil der komplexen dielektrischen Funktion
ε_A	Realteil der komplexen dielektrischen Funktion der Schichtmaterialkomponente A
ε_B	Realteil der komplexen dielektrischen Funktion der Schichtmaterialkomponente B
f_A	Volumenanteil der Schichtmaterialkomponente A
f_B	Volumenanteil der Schichtmaterialkomponente B
q	Depolarisationsfaktor
ε_2	Imaginärteil der komplexen dielektrischen Funktion
ε	komplexe dielektrische Funktion
φ	Einfallswinkel der einfallenden Lichtwelle zum Einfallslot
N_a	komplexer Brechungsindex des umgebenden Mediums (a, en: ambient)
N_{eff}	komplexer Brechungsindex des effektiven Schichtmaterials
ε_{eff}	komplexe dielektrische Funktion des effektiven Schichtmaterials
N_s	komplexer Brechungsindex des Substrats
d	Schichtdicke des effektiven Schichtmaterials
D_{RMS}	mittlere quadratische Abweichung (en: root-mean-square deviation, in DIN 50989-1 und einigen Auswerteprogrammen noch <i>RMSE</i> , root-mean-square error) genannt)
$D_{\text{RMS}, \text{min}}$	Minimum der mittleren quadratischen Abweichung
d_{fit}	Fitergebnis für die Schichtdicke
u_d	kombinierte Unsicherheit der Schichtdicke d unter Berücksichtigung aller Unsicherheitsanteile
c_{samp}	Erweiterungsfaktor (en: coverage factor) ^a der Probe (samp en: sample) zur Angabe der Messunsicherheit (erweiterten kombinierten Unsicherheit)
^a In ISO/IEC Guide 98-3 wird der Erweiterungsfaktor mit „ k “ bezeichnet.	

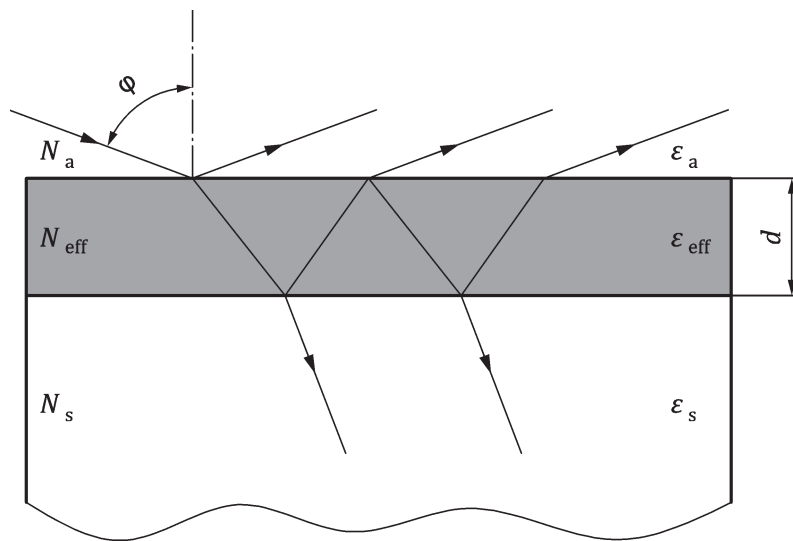
4 Modell Effektive Materialien

4.1 Strahlengang und Effektiv-Medium-Theorie

4.1.1 Strahlengang

Der Strahlengang unter dem Einfallswinkel φ im Modell *Effektive Materialien* ist in Bild 1 dargestellt.

Obwohl die Einzelschicht als effektives Material aus mindestens zwei Materialkomponenten besteht, die jede für sich ihre optische Wirkung entfalten, wird dem effektiven Schichtmaterial der Schichtdicke d unter Verwendung der Effektiv-Medium-Theorie (4.1.2) nur ein effektiver komplexer Brechungsindex N_{eff} bzw. eine effektive dielektrische Funktion ε_{eff} zugewiesen. Der Umgebung (Index a, en: ambient) wird der komplexe Brechungsindex N_a und die komplexe dielektrische Funktion ε_a zugeordnet. Üblicherweise wird Luft als Umgebung fungieren, der Brechungsindex und dielektrische Funktion sind dann reell mit $n_a = 1,000$, $k_a = 0,000$ und $\varepsilon_{a1} = 1$, $\varepsilon_{a2} = 0$ in sehr guter Näherung. Dem Substrat wird der komplexe Brechungsindex N_s zugeordnet.



Legende

- φ Einfallswinkel der einfallenden Lichtwelle zum Einfallslot
- N_a komplexer Brechungsindex des umgebenden Mediums (für Luft reell, $N_a = n_a = 1,000$)
- ε_a komplexe dielektrische Funktion des umgebenden Mediums (für Luft reell, $\varepsilon_a = \varepsilon_{1a} = 1$)
- d Schichtdicke des effektiven Schichtmaterials
- N_{eff} komplexer Brechungsindex des effektiven Schichtmaterials ($N_{\text{eff}} = n_{\text{eff}}(\lambda) + i \cdot k_{\text{eff}}(\lambda)$)
- ε_{eff} komplexe dielektrischen Funktion des effektiven Schichtmaterials ($\varepsilon_{\text{eff}} = \varepsilon_{1\text{eff}} + i \cdot \varepsilon_{2\text{eff}}$)
- N_s komplexer Brechungsindex des Substrats ($N_s = n_s(\lambda) + i \cdot k_s(\lambda)$)
- ε_s komplexe dielektrische Funktion des Substrats ($\varepsilon_s = \varepsilon_{1s} + i \cdot \varepsilon_{2s}$)

Bild 1 — Strahlengang beim Modell *Effektive Materialien*

Beim Modell *Effektive Materialien* wird davon ausgegangen, dass neben dem Einfallswinkel φ die Schichtdicke d des effektiven Schichtmaterials, die Brechungsindizes N bzw. die dielektrischen Funktionen ε der Schichtmaterialkomponenten mit deren Volumenanteilen sowie die optischen (n_s, k_s) bzw. dielektrischen ($\varepsilon_{1s}, \varepsilon_{2s}$) Konstanten des Substrats die gemessenen ellipsometrischen Transfergrößen Ψ und Δ bestimmen.

4.1.2 Effektiv-Medium-Theorie

4.1.2.1 Grundlagen

Die Effektiv-Medium-Theorie, oft auch als Effektiv-Medium Näherung bezeichnet (en: Effective Medium Approximation, EMA) erlaubt es, einen effektiven Brechungsindex bzw. eine effektive dielektrische Funktion des Schichtmaterials aus den jeweiligen Größen der zwei oder mehr Materialkomponenten zu berechnen.

Grundlage der Effektiv-Medium-Theorie ist die dielektrische Polarisierungstheorie, so dass streng genommen nur Dielektrika als Materialkomponenten des effektiven Materials in Frage kommen, was zu reellen effektiven optischen Konstanten ($k_{\text{eff}} = 0$) bzw. dielektrischen Funktionen ($\varepsilon_{2\text{eff}} = 0$) führt. Betrachtet man nun zwei Schichtkomponenten A und B mit ihren Volumenanteilen f_A und f_B , gilt Gleichung (1).

$$f_A + f_B = 1 \tag{1}$$

Für die Effektiv-Medium-Theorie sind drei grundlegende Näherungen bekannt, die lineare, rein mathematische Näherung, und die physikalischen Näherungen nach Maxwell-Garnett und Bruggeman. Da die dielektrische Polarisierungstheorie auf der dielektrischen Funktion basiert, werden alle Effektiv-Medium-Näherungen für den Realteil der effektiven dielektrischen Funktion ε_{eff} abgeleitet.

Die zwei grundlegenden Modelle der Effektiv-Medium-Theorie basieren auf der Clausius-Mossotti-Relation, die den Zusammenhang zwischen der Polarisierbarkeit der Moleküle und der dielektrische Konstante des Materials herstellt. Zur physikalischen Beschreibung von Zwei- oder Mehrkomponenten-Materialien, auch als effektives Material bezeichnet, sind dann die dielektrischen Konstanten aller Materialien zu berücksichtigen. Die resultierende dielektrische Konstante des effektiven Materials wird mit ε_{eff} bezeichnet.

Für sphärische Partikel eines Zwei-Komponentensystems des Materialien A und B in einem Umgebungsmedium der dielektrischen Konstante ε ergibt sich Gleichung (2), die in Bild 2 schematisch visualisiert ist.

$$\frac{\varepsilon_{\text{eff}} - \varepsilon}{\varepsilon_{\text{eff}} + 2\varepsilon} = f_A \frac{\varepsilon_A - \varepsilon}{\varepsilon_A + 2\varepsilon} + f_B \frac{\varepsilon_B - \varepsilon}{\varepsilon_B + 2\varepsilon} \quad (2)$$

Bei der Herleitung der Gleichung (2) wurde der Depolarisationsfaktor $q = 1/3$ für sphärische Körper berücksichtigt. Das resultiert im Koeffizienten 2 in den Nennern der drei Terme.

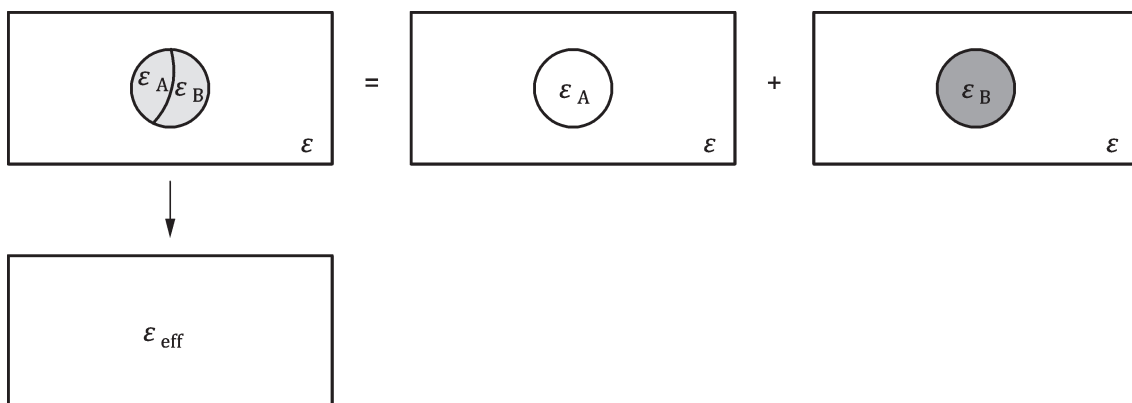


Bild 2 — Schematische Darstellung der Grundgleichung beim Modell *Effektive Materialien*

Aus Gleichung (2) können zwei grundlegende *physikalisch basierte* Näherungen abgeleitet werden, die als Maxwell-Garnett (MG-EMA), siehe 4.1.2.3, bzw. Bruggeman-Näherung (B-EMA), siehe 4.1.2.4, bezeichnet werden.

4.1.2.2 Lineare Näherung

Im Fall der *linearen rein mathematischen Näherung* ergibt sich nach Gleichung (3) für das effektive Schichtmaterial

$$\varepsilon_{\text{eff}} = f_A \varepsilon_A + f_B \varepsilon_B, \quad (3)$$

was in Bild 3 schematisch veranschaulicht ist.

A box containing the linear approximation equation: $\varepsilon_{\text{eff}} = f_A \varepsilon_A + f_B \varepsilon_B$.

Bild 3 — Schematische Darstellung der linearen Näherung beim Modell *Effektive Materialien*

4.1.2.3 Maxwell-Garnett-Näherung

Setzt man in Gleichung (2) $\varepsilon = \varepsilon_A$ ergibt sich die dielektrische Konstante effektiven Schichtmaterials nach Gleichung (4):

$$\frac{\varepsilon_{\text{eff}} - \varepsilon_A}{\varepsilon_{\text{eff}} + 2\varepsilon_A} = f_B \frac{\varepsilon_B - \varepsilon_A}{\varepsilon_B + 2\varepsilon_A} \quad (4)$$

Physikalisch bedeutet das, dass das Schichtmaterial A als Umgebung des Schichtmaterials B fungiert und üblicherweise dominant ist, oft wird deshalb auch die Bezeichnung Wirtsmedium (Material A, en: host) und Gastmedium (Material B, en: guest) verwendet, was in Bild 4 veranschaulicht ist. Für die Volumenanteile der Materialien A und B wird bei der Maxwell-Garnett Näherung $f_A > f_B$ vorausgesetzt.

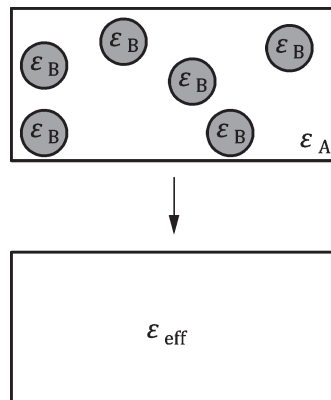


Bild 4 — Schematische Darstellung der Maxwell-Garnett-Näherung

Löst man die Gleichung (4) nach ε_{eff} auf, ergibt sich nach Gleichung (5) genau eine Lösung.

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \varepsilon_A \cdot \frac{\varepsilon_B (1 + 2f_B) + 2\varepsilon_A (1 - f_B)}{\varepsilon_B (1 - f_B) + \varepsilon_A (2 + f_B)} \quad (5)$$

Zur Berechnung der dielektrischen Funktion von porösem Gold wird in Abschnitt A.1 die Effektiv-Medium-Näherung nach Maxwell-Garnett verwendet.

4.1.2.4 Bruggeman-Näherung

Setzt man in Gleichung (2) $\varepsilon = \varepsilon_{\text{eff}}$ ergibt sich die dielektrische Konstante effektiven Schichtmaterials nach Gleichung (6):

$$0 = f_A \frac{\varepsilon_A - \varepsilon_{\text{eff}}}{\varepsilon_A + 2\varepsilon_{\text{eff}}} + f_B \frac{\varepsilon_B - \varepsilon_{\text{eff}}}{\varepsilon_B + 2\varepsilon_{\text{eff}}} \quad (6)$$

Physikalisch bedeutet das, dass die Schichtmaterialien A und B gemeinsam als effektives Medium wirken, was in Bild 5 veranschaulicht ist. Für die Zuweisung der Volumenanteile f_A und f_B der Materialien A und B wird bei der Bruggeman-Näherung keine Voraussetzung gemacht.

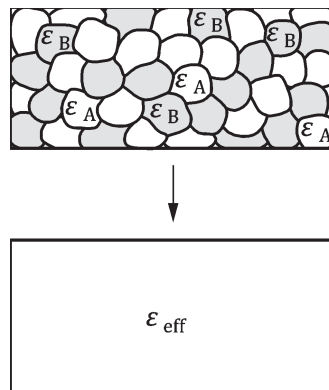


Bild 5 — Schematische Darstellung der Bruggeman-Näherung

Löst man die Gleichung (6) nach ε_{eff} auf, ergeben sich nach Gleichung (7) zunächst zwei Lösungen

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \frac{1}{4} \left(-b \pm \sqrt{b^2 + 8\varepsilon_A \varepsilon_B} \right) \quad (7)$$

mit

$$b = \varepsilon_A (1 - 3f_A) + \varepsilon_B (3f_A - 2), \quad (8)$$

wobei für Mischungen reiner Dielektrika ε_{eff} reell ist und sich mit der Bedingung $\varepsilon_{\text{eff}} > 0$ nach Gleichung (7) als einzige Lösung

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \frac{1}{4} \left(-b + \sqrt{b^2 + 8\varepsilon_A \varepsilon_B} \right) \quad (9)$$

ergibt. Zur Simulation der ellipsometrischen Transfergrößen wird in Abschnitt A.2 eine Grenzflächenrauheit SiO_2/Si als Effektiv-Medium-Näherung nach Bruggeman verwendet, während im Abschnitt A.3 die Effektiv-Medium-Näherung nach Bruggemann zur Auswertung von Messungen einer porösen TiO_2 -Schicht herangezogen wird.

4.2 Annahmen

Beim Modell *Effektive Materialien* werden die Modellannahmen nach Tabelle 2 gemacht.

Tabelle 2 — Annahmen beim Modell *Effektive Materialien*

Annahme	Erläuterung
M1	Es werden homogen verteilte sphärische dielektrische Partikel in der dielektrischen Umgebung (Maxwell Garnett) oder homogene Mischungen dielektrischer Partikel (Bruggeman) angenommen.
M2	Die minimale Partikelgröße jeder Materialkomponente des effektiven Materials muss mindestens eine Größenordnung über der Atom- bzw. Molekülgröße der betreffenden Komponente liegen, damit die Komponente optisch noch einzeln wirksam wird, d. h. Brechungsindex und Dielektrizitätskonstante überhaupt als Materialeigenschaft definiert sind. Gleichzeitig sollte die maximale Partikelgröße kleiner als $\lambda/10$ sein, damit keine zusätzlichen Effekte, wie Interferenzen, auftreten.
M3	Generell wird vorausgesetzt, dass die verwendeten dielektrischen Konstanten/Funktionen der Materialkomponenten unabhängig von den Partikelgröße und Partikelform sind.
S1	Planarität der Probenoberfläche bezüglich der Ausrichtung bei der Messung, d. h. Übereinstimmung der Oberfläche der Schicht mit der Ellipsometer-Referenzebene für symmetrischen Strahlengang
S2	Übereinstimmung zwischen bei der Messung auftretendem und im Modell verwendeten Einfallswinkel φ

Die Annahmen M1 bis M3 beschreiben auf das effektive Schichtmaterial bezogene und die Annahmen S1 und S2 messtechnische Einflussgrößen, die für die Gültigkeit bzw. Güte des Modells *Effektive Materialien* relevant sind.

Bei der Messung von effektiven Materialien werden möglicherweise mehrere der Annahmen des Modells *Effektive Materialien* nicht erfüllt. Auswirkungen, die sich aus Abweichungen in den Modellabweichungen M1 bis M3 ergeben, werden in Abschnitt A.3 als Hinweise für die Messpraxis aufgezeigt. Mögliche Abweichungen von den Annahmen S1 und S2 sind für die Modelle *Volumenmaterial*, *Transparente Einfachschicht* und *Semi-transparente Einfachschicht* in DIN 50989-2, DIN 50989-3 bzw. DIN 50989-4 beschrieben und hier sinngemäß auf das Modell *Effektive Materialien* anzuwenden.

In einigen Auswerteprogrammen kann zudem die Abhängigkeit der effektiven dielektrischen Konstante ϵ_{eff} von der Partikelform der Materialkomponenten durch Depolarisationsfaktor q berücksichtigt werden.

4.3 Besonderheiten des Modells *Effektive Materialien*

Das Modell *Effektive Materialien* enthält mit der Schichtdicke d eine Größe, die unabhängig von der Wellenlänge und vom Einfallswinkel ist. Damit ist ein Mehrwellenlängen- und Mehreinfallswinkel-Fit auf die Schichtdicke möglich, wobei die mittlere quadratische Abweichung D_{RMS} zwischen experimentell bestimmten und modellmäßig simulierten ellipsometrischen Transfergrößen nach Gleichung (10) minimiert wird.

$$D_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{2U - V + 1} \sum_{i=1}^U \left[\left(\frac{\psi_i^{\text{mod.}} - \psi_i^{\text{exp.}}}{u_{\text{sys}, \psi_i}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta_i^{\text{mod.}} - \Delta_i^{\text{exp.}}}{u_{\text{sys}, \Delta_i}} \right)^2 \right]} = \sqrt{\frac{1}{2U - V + 1} \chi^2} \quad (10)$$

Dabei ist

U die Anzahl der Messpunkte;

V die Anzahl der freien Parameter ($2U \geq V$).