(19) Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2018 133 187 A1** 2020.06.25

(12) # Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2018 133 187.8**
(22) Anmeldetag: **20.12.2018**
(43) Offenlegungstag: **25.06.2020**

(51) Int Cl.: ***C23C 14/54*** (2006.01)
C23C 16/52 (2006.01)
C03C 17/245 (2006.01)
G01J 3/00 (2006.01)
G16C 60/00 (2019.01)
G02B 1/10 (2015.01)

(71) Anmelder:
Rodenstock GmbH, 80687 München, DE

(74) Vertreter:
RPK Patentanwälte Reinhardt, Pohlmann und Kaufmann Partnerschaft mbB, 70182 Stuttgart, DE

(72) Erfinder:
Scherschlicht, Rüdiger, Dr., 82008 Unterhaching, DE; Radünz, Stefan, 82205 Gilching, DE

(56) Ermittelter Stand der Technik:

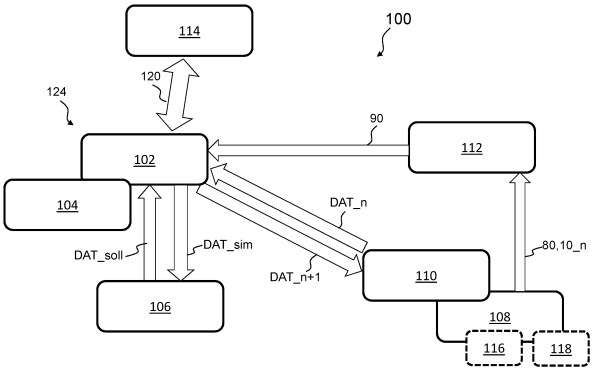
US	**2015 / 0 021 168**	**A1**

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Betreiben einer Beschichtungsanlage zur Herstellung von Schichtsystemen**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein selbststeuerndes, rückgekoppeltes Verfahren zum Betreiben wenigstens einer Beschichtungsanlage (108) zur Herstellung von Schichtsystemen (10), ein Verfahren zur Herstellung eines Schichtsystems (10) in wenigstens einer Beschichtungsanlage (108), ein Verfahren zum Einfahren eines Beschichtungsprozesses in wenigstens einer Beschichtungsanlage (108) zur Herstellung eines Schichtsystems (10), ein Beschichtungssystem (100) zur Herstellung eines Schichtsystems (10), eine Beschichtungsanlage (108) zur Herstellung eines Schichtsystems (10), ein System (200) von Beschichtungsanlagen (108) zur Herstellung von Schichtsystemen (10), ein Datenbank (106) zur Speicherung von Anlage-Datensätzen (DAT), ein Computer-Programm-Produkt für ein Verfahren zum Betreiben wenigstens einer Beschichtungsanlage (108), sowie ein Datenverarbeitungssystem (124) zur Ausführung eines Datenverarbeitungsprogramms.



Beschreibung

Stand der Technik

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Betreiben einer Beschichtungsanlage zur Herstellung von Schichtsystemen. Die Erfindung betrifft ferner ein Verfahren zur Herstellung eines Schichtsystemen, ein Verfahren zum Einfahren eines Beschichtungsprozesses in einer Beschichtungsanlage, ein Beschichtungssystem, eine Beschichtungsanlage, ein System von Beschichtungsanlagen sowie eine Datenbank zur Speicherung von Anlage-Datensätzen, ein Computer-Programm-Produkt für ein Verfahren zum Betreiben einer Beschichtungsanlage, und ein Datenverarbeitungssystem zur Ausführung eines Verfahrens zum Betreiben einer Beschichtungsanlage zur Herstellung von Schichtsystemen.

[0002] Ein in einem Fertigungsumfeld implementiertes Beschichtungsverfahren mit einem zugrundeliegenden Beschichtungsprozess weist üblicherweise Abweichungen von Beschichtungscharge zu Beschichtungscharge auf. Diese Abweichungen rühren daher, dass sich der Zustand der Beschichtungsanlage geringfügig verändert, beispielsweise durch Ablagerungen von Beschichtungsmaterial an den Wänden der Vakuumkammer, Bedienereinflüsse bei der Bestückung der Beschichtungsanlage mit Beschichtungsmaterial, Abnutzung diverser in der Beschichtungsanlage verbauten Komponenten und dergleichen.

[0003] Ein wirtschaftlich sinnvolles Verfahren, um die Abweichungen von Beschichtungscharge zu Beschichtungscharge möglichst gering zu halten, ist eine sehr genaue Prozesspflege, bei der der zugrundeliegende Beschichtungsprozess von Beschichtungscharge zu Beschichtungscharge gegebenenfalls geringfügig angepasst wird.

[0004] Eine solche Prozesspflege setzt ein tiefgreifendes Knowhow voraus und kann bisher nur von gut ausgebildeten Bedienern oder Fachkräften erfolgreich durchgeführt werden.

[0005] Im Falle der Beschichtung von Substraten mit einem Schichtsystem, wie es beispielsweise in der optischen Industrie typisch ist, sieht die Prozesspflege dabei wie folgt aus: Nach erfolgter Beschichtung eines optischen Substrats mit einem Schichtsystem wird an mindestens einem beschichteten Substrat eine optische Messung vorgenommen, bei der ein spektral aufgelöstes Messsignal aufgezeichnet wird, welches das optische System bestehend aus dem optischen Substrat und dem aufgebrachten Schichtsystem wiedergibt. Im Falle von Antireflexionsbeschichtungen oder Verspiegelungen wird die spektrale Reflexion oder Reflektivität des optischen Systems in einem handelsüblichen Spektrometer bestimmt. Das Ergebnis ist ein zweidimensionaler Datensatz, bestehend aus Datentupeln (zum Beispiel Wellenlänge in Nanometer, Reflexion in %). Dieser aufgenommene Datensatz („Anlagen-Ist-Datensatz“) wird vom Bediener mit einem gleichartig beschaffenen Soll-Datensatz, welcher im Falle von Antireflexionsbeschichtungen oder Verspiegelungen die spektrale Reflexion des Zielsystems beschreibt, verglichen.

[0006] Bei nicht zu tolerierenden Abweichungen im spektralen Verlauf oder den spektralen Parametern wie zum Beispiel den Farbwerten L*, C*, h* (im sogenannten CIELCh-Farbraum) muss der Bediener eine Korrektur an dem zugrundliegenden Beschichtungsprozess vornehmen. Im Regelfall wird der Bediener die im Beschichtungsprozess hinterlegte abzuscheidende physikalische Schichtdicke von mindestens einer Einzellage des Schichtsystems anpassen. Diese Schichtauswahl basiert zumeist auf Erfahrungen oder vorgegebenen Routinen.

[0007] Nachdem eine weitere Beschichtungscharge mit diesem Beschichtungsprozess gefertigt wurde, kann der Bediener die Wirksamkeit seiner Prozesspflege durch einen weiteren Vergleich zwischen Ist-Datensatz und Soll-Datensatz ermitteln und muss gegebenenfalls weitere phänomenologische Korrekturen (nicht numerisch generiert) am Beschichtungsprozess vornehmen.

[0008] Dieses Verfahren ist häufig ein zeit- und materialaufwändiger iterativer Versuch- und-Irrtum-Prozess, der nur von kundigen Bedienern durchgeführt werden kann. Dieses beschriebene erfahrungsbasierte Vorgehen wird nicht immer sicher zum gewünschten Ergebnis führen. Desweitern führt die erfahrungsgesteuerte Prozesspflege bei gleichen optischen Farbwerten nicht immer zu gleichen Schichtdickenrelationen. Dieses kann dazu führen, dass Schichteigenschaften und Schichtdickenrelationen sich unwissentlich ändern.

[0009] Bekannte optische Elemente mit interferometrischer Entspiegelung, wie sie etwa aus der WO 2016/110339 A1 bekannt sind, weisen üblicherweise einen Lichtreflexionsgrad von ungefähr 1% auf, berechnet nach der Norm DIN EN ISO 13666:2013-10. Die Farbe des verbleibenden Restreflexes kann eine starke Variation zeigen, wenn der Betrachtungswinkel geändert wird. Die Variation kann sich über die gesamte visuelle Farbskala erstrecken.

Offenbarung der Erfindung

[0010] Die Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren zum wirtschaftlich optimierten Betreiben einer Beschichtungsanlage zur Herstellung von Schichtsystemen anzugeben.

[0011] Weitere Aufgaben der Erfindung sind, eine Beschichtungsanlage, ein Beschichtungssystem, ein System von Beschichtungsanlagen sowie eine Datenbank, ein Computer-Programm-Produkt und ein Datenverarbeitungssystem zum Ausführen eines solchen Verfahrens anzugeben.

[0012] Die Aufgaben werden durch die Merkmale der unabhängigen Ansprüche gelöst. Günstige Ausgestaltungen und Vorteile der Erfindung ergeben sich aus den weiteren Ansprüchen, der Beschreibung und der Zeichnung.

[0013] Die Erfindung ist insbesondere für die Herstellung optischer Elemente geeignet. Es soll verstanden werden, dass das erfindungsgemäße Verfahren weder auf die Herstellung optischer Elemente und Beschichtungen beschränkt ist, noch auf die Abscheidung von Mehrschichtsystemen. Ebenso kann das Substrat, auf dem das Schichtsystem abgeschieden ist, bei Bedarf transparent sein oder nicht transparent.

[0014] Ferner kann die Erfindung für ein Schichtsystem eingesetzt werden, das aus einer Einzellage besteht die auf einem Substrat abgeschieden ist und die eine Schichtdicke aufweist. Dies schließt nicht aus, dass zwischen Einzellage und Substrat eine Haftvermittlerschicht angeordnet ist und/oder die Einzellage mit einer Schutzschicht bedeckt ist. Die etwaige Haftvermittlerschicht und/oder Schutzschicht haben keinen oder zumindest keinen nennenswerten Einfluss auf die untersuchten Eigenschaften des Schichtsystems mit der einen Einzellage.

[0015] Alternativ kann das Schichtsystem aus mehreren Einzellagen gebildet sein, die aufeinander auf einem Substrat abgeschieden sind und bei die Einzellagen jeweils Schichtdicken aufweisen, die gleich oder voneinander verschieden sein können. Auch hier kann zwischen der substratnächsten Einzellage und dem Substrat eine Haftvermittlerschicht angeordnet sein und/oder das Schichtsystem mit einer Schutzschicht bedeckt sein. Die etwaige Haftvermittlerschicht und/oder Schutzschicht haben keinen oder zumindest keinen nennenswerten Einfluss auf die untersuchten Eigenschaften des Schichtsystems mit den mehreren Einzellagen.

[0016] Falls nicht anderweitig angegeben, sollen die in dieser Offenbarung verwendeten Begriffe im Sinne der Norm DIN EN ISO 13666:2013-10 (EN ISO 13666:2012 (D/E)) und der DIN EN ISO 11664-4: 2012-06 (EN ISO 11664-4:2011) des Deutschen Instituts für Normung e.V. verstanden werden.

[0017] Der Begriff sichtbares Licht, sichtbare Strahlung bzw. ein sichtbarer Wellenlängenbereich betrifft gemäß Abschnitt **4.2** der Norm DIN EN ISO 13666:2013-10 optische Strahlung, die unmittelbar eine Lichtempfindung beim Menschen hervorzurufen vermag. Sichtbare Strahlung bezieht sich allgemein auf einen Wellenlängenbereich von 400 nm bis 780 nm.

[0018] Im Rahmen dieser Offenbarung kann sich sichtbare Strahlung bevorzugt auf einen Wellenlängenbereich von 400 nm bzw. 460 nm bis 700 nm beziehen, entsprechend des Sensitivitätsmaximums des menschlichen Auges. Damit kann gleichzeitig die Designflexibilität für die Auslegung der Filtereigenschaften und Flankensteilheit erhöht werden.

[0019] Der Begriff spektraler Reflexionsgrad, Reflexionsgrad oder Reflektivität bezeichnet entsprechend Abschnitt **15.1** der Norm DIN EN ISO 13666:2013-10 das Verhältnis der spektralen Strahlungsleistung, die von dem jeweiligen Material bzw. der Oberfläche oder Beschichtung reflektiert wird, zur auftreffenden Strahlungsleistung für eine bestimmte Wellenlänge (λ). Im vorliegenden Fall bezieht sich die Reflektivität auf die Reflektivität der gesamten Beschichtung mit ihren mehreren hoch- und niedrigbrechenden Teilschichten und nicht auf die Reflektivität einer einzelnen Teilschicht.

[0020] Nach einem ersten Aspekt der Erfindung wird ein Verfahren zum Betreiben wenigstens einer Beschichtungsanlage zur Herstellung von Schichtsystemen vorgeschlagen, umfassend

(i) Erfassen wenigstens einer spektralen Messkurve mit Ordinatenwerten und Abszissenwerten als Ist-Messkurve an einem Ist-Schichtsystem, welches aus einer Einzellage, falls das Schichtsystem aus einer Einzellage gebildet ist, oder einer Abfolge von mehreren Einzellagen, falls das Schichtsystem aus mehreren Einzellagen gebildet ist, mit jeweiligen einen, im Falle eines Schichtsystems mit einer Einzellage, oder mehreren Anlagen-Ist-Schichtdicken im Falle eines Schichtsystems mit mehreren Einzellagen, besteht, wobei die einen oder mehreren Einzellagen nach einem Anlagen-Datensatz der wenigstens einen Beschichtungsanlage hergestellt sind, wobei der Anlagen-Datensatz wenigstens die einen oder mehreren Anlagen-Ist-Schichtdicken der einen oder mehreren Einzellagen umfasst;

(ii) Zuordnen der Ist-Messkurve des Ist-Schichtsystems nach einem Zuordnungs-Kriterium, insbesondere für signifikante spektrale Punkte der Ist-Messkurve, zu einer Soll-Messkurve eines Soll-Datensatzes mit Ordinatenwerten und Abszissenwerten, dem ein Soll-Datensatz-Schichtsystem, gebildet aus einen oder mehreren Einzellagen zugrunde liegt, wobei der Soll-Datensatz wenigstens bekannte einen oder mehreren Soll-Schichtdicken der einen oder mehreren Einzellagen umfasst;

(iii) Generieren einer Simulations-Ist-Messkurve nach einem iterativen Verfahren durch Variieren wenigstens von einen oder mehreren Simulations-Ist-Schichtdicken der einen oder mehreren Einzellagen in zumindest einem spektralen Intervall der Ist-Messkurve und Erhalt eines finalen Simulations-Ist-Datensatzes mit wenigstens finalen einen oder mehreren Simulations-Ist-Schichtdicken, durch welche die Ist-Messkurve in der Simulations-Ist-Messkurve zumindest angenähert wird, bis für das Zuordnungskriterium ein nach einem statistischen Auswahlverfahren stabiles Ergebnis erreicht ist, wobei als Startwerte der einen oder mehreren Simulations-Ist-Schichtdicken die einen oder mehreren Soll-Schichtdicken verwendet werden;

(iv) Generieren einer Simulations-Soll-Messkurve nach einem iterativen Verfahren durch Variieren wenigstens der einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicken der einen oder mehreren Einzellagen in zumindest einem spektralen Intervall der Soll-Messkurve und Erhalt eines finalen Simulations-Soll-Datensatzes mit wenigstens finalen einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicken, durch welche die Soll-Messkurve in der Simulations-Soll-Messkurve zumindest angenähert wird, bis für das Zuordnungskriterium ein nach einem statistischen Auswahlverfahren stabiles Ergebnis erreicht ist; wobei als Startwerte der einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicken die einen oder mehreren Simulation-Ist-Schichtdicken verwendet werden; sowie

(v) Bereitstellen des finalen Simulations-Soll-Datensatzes für die wenigstens eine Beschichtungsanlage als neuer Anlagen-Datensatz zur Abscheidung eines weiteren Schichtsystems mit wenigstens einen oder mehreren Korrektur-Ist-Schichtdicken als neuen einen oder mehreren Anlagen-Ist-Schichtdicken, welche aus den finalen einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicken mit dem finalen Simulations-Soll-Datensatz bestimmt werden.

[0021] Vorteilhaft ermöglicht das erfindungsgemäße Verfahren eine selbststeuernde und rückgekoppelte Betriebsweise von Beschichtungsanlagen.

[0022] Günstigerweise kann die Beschichtungsanlage zur Herstellung von Schichtsystemen beispielsweise für optische Elemente eingesetzt werden.

[0023] Die signifikanten Punkte der Kurve können vorteilhaft genutzt werden, um zu einer Messkurve des untersuchten Schichtsystems das passende Soll-Design des Schichtsystems zu finden und dann für eine erste Annäherung in Form einer horizontalen und/oder lateralen Verschiebung der Messkurve zu nutzen.

[0024] Der Soll-Datensatz mit der Soll-Messkurve enthält die Zieldaten der optimalen Beschichtung. Diese Daten können neben einer spektral aufgelösten optischen Messung noch weitere Zielgrößen, wie beispielsweise im sichtbaren Spektralbereich die Farbwerte L*, C* und h* und/oder definierte berechenbare spektrale Größen wie gemittelte oder gewichtete Transmissions- und/oder Reflexionswerte in einem beliebig zu definierenden Intervall enthalten. Beispiele für spektral berechenbare Größen können der visuelle Bereich wie auch der IR-A/IR-B und/oder UV-A/UV-B-Bereich sein.

[0025] Des Weiteren enthält der Soll-Datensatz beschichtungsspezifische, von klein nach groß geschachtelte spektrale Intervalle. Das größtmögliche angegebene Intervall gibt den maximalen spektralen Betrachtungsbereich wieder. Die Anzahl der Intervalle ist frei wählbar. Der Soll-Datensatz enthält charakteristische spektrale Punkte, die das optische Layout der Beschichtung eindeutig fixieren.

[0026] Die Ist-Messkurve umfasst wenigstens die Daten der durchgeführten optischen Messung. Der Anlagen-Datensatz umfasst wenigstens die an der Beschichtungsanlage eingestellten Ist-Schichtdicken der mehreren Einzellagen, wenn das Schichtsystem aus mehreren Einzellagen gebildet ist, bzw. die an der Beschichtungsanlage eingestellte Ist-Schichtdicke der einen Einzellage, wenn das Schichtsystem aus nur einer Einzellage gebildet ist.

[0027] Die Simulations-Ist-Messkurve umfasst wenigstens eine simulierte spektrale Messkurve, die eine bestmögliche Übereinstimmung mit der durchgeführten optischen Messung als Ist-Messkurve darstellt.

[0028] Der Simulations-Ist-Datensatz umfasst wenigstens die bei dem iterativen Optimierungsverfahren bestimmten eine Simulations-Ist-Schichtdicke einen der Einzellage des Schichtsystems oder die Simulations-Ist-Schichtdicken der mehreren Einzellagen des Schichtsystems.

[0029] Die Simulations-Soll-Messkurve umfasst wenigstens eine simulierte spektrale Messkurve, die eine bestmögliche Übereinstimmung zwischen der Soll-Messkurve und der Simulations-Ist-Messkurve darstellt.

[0030] Der Simulations-Soll-Datensatz umfasst wenigstens die bei dem iterativen Optimierungsverfahren bestimmten Simulations-Soll-Schichtdicken der mehreren Einzellagen bzw. die Simulations-Soll-Schichtdicke der einen Einzellage mit der bestmöglichen Übereinstimmung mit der Soll-Messkurve mit Verrechnung über den Simulations-Soll-Datensatz. Die eingestellten einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicken dieses Datensatzes stellen die

Prozessparameter für die folgende Beschichtungscharge dar.

[0031] Dafür umfasst der Simulations-Soll-Datensatz die eingestellten Berechnungsparameter des simulierten Schichtsystems für ideale Schichten und/oder ideale Prozesse, Materialeigenschaften wie ideale Brechwerte und ideale Abscheidebedingungen, sowie Anlagenparameter wie Beschichtungsgeometrie, Schichtdickenkontrolle, etc..

[0032] Der Simulations-Soll-Datensatz korreliert zum einem die optischen Unterschiede zwischen der Ist-Messkurve und der Simulations-Ist-Messkurve sowie berücksichtigt dabei systembedingte Abweichungen, wie morphologische und technische Abweichungen von Beschichtungscharge zu Beschichtungscharge, sowie nicht-systembedingte Abweichungen, wie zum Beispiel Handhabungsunterschiede etc.. Zum anderen wird der Simulations-Ist-Datensatz für die Rückrechnung der Simulations-Soll-Messkurve zur Soll-Messkurve verwendet.

[0033] Unter Zuhilfenahme dieses Simulations-Soll-Datensatz ergibt sich die Möglichkeit einer weitergehenden Analyse der Zusammenhänge aus Anlagenparametern und Schichtparametern und/oder Schichteigenschaften. Hierzu kann es vorteilhaft sein, auf eine statische relevante Anzahl von Datensätzen zurückzugreifen.

[0034] Das erfindungsgemäße Verfahren sieht vor, dass eine Ist-Messkurve eines Schichtsystems, welches auf der Beschichtungsanlage abgeschieden wurde, in die Simulationssoftware eines Simulationsrechners, geladen wird.

[0035] Vorteilhaft kann der Beschichtungsprozess für ein Schichtsystem aus dem Aufbringen von einer Einzellage oder mehreren Einzellagen bestehen. Jede Einzellage wird dabei vorzugsweise durch einen Parametersatz beschrieben, der die physikalische oder optische Schichtdicke neben weiteren Parametern wie Abscheiderate, Prozessgasflüsse etc. beinhaltet. Die einen oder mehreren Einzellagen des Beschichtungsprozesses können dabei aus den Materialien ZrO_2, TiO_2, Al_2O_3, Ta_2O_5, Si_3N_4, Nd_2O_5, Pr_2O_3, $PrTiO_3$, La_2O_3, Nb_2O_5, Y_2O_3, Ce_2O_3, Dy_2O_5, HfO_2, SiO_2, MgF_2, ZrF_4, AlF_3, $Na_3Al_3F_{14}$, Na_3AlF_6, Silane und Siloxane sowie beliebigen Mischungen dieser Materialien bestehen. Als Beschichtungsverfahren können alle typischen Verfahren wie PVD, CVD, Sputtern und deren verwandte Prozesse herangezogen werden.

[0036] Mit Hilfe der Simulationssoftware werden aus den spektralen Daten der Ist-Messkurve nach einem Zuordnungskriterium beispielsweise signifikante spektrale Punkte, wie Extremwerte der spektralen Daten, ggf. ausgesuchte Punkte wie 1%-Durchgänge, bei denen die Reflexion 1% ist, eine volle Halbwertsbreite eines Peaks in der Messkurve oder dergleichen ermittelt. Es findet ein Vergleich mit den in einer Datenbank hinterlegten Soll-Messkurven anhand der ermittelten spektralen Punkte statt, um eine zur Ist-Messkurve passende Soll-Messkurve zu finden bzw. eine Soll-Messkurve auszuwählen, bei der die Abweichung zur Ist-Messkurve am geringsten ist. In die Simulationssoftware werden demzufolge alle Soll-Messkurven aus der Datenbank geladen und für jede Soll-Messkurve die Übereinstimmung berechnet zwischen den charakteristischen Punkten der Soll-Messkurve mit den jeweiligen Punkten der Ist-Messkurve.

[0037] Für alle spektralen Punkte mit den jeweiligen Koordinaten, nämlich Wellenlänge als Abszisse gegen Intensität als Ordinate, wird der Quotient aus der entsprechenden Abszisse der Ist-Messkurve zu der Abszisse der Soll-Messkurve sowie der gemittelte Quotient aus den bestimmten Quotienten gebildet. Diese gemittelten Quotienten werden im Folgenden Skalierungsfaktoren genannt und gelten einheitlich für das gesamte Schichtsystem. Für jede dieser Skalierungsfaktoren wird ein virtueller spektraler Datensatz erzeugt, der aus der Schichtdicke bei einer Einzellage bzw. den Schichtdicken bei mehreren Einzellagen der Soll-Messkurve multipliziert mit dem entsprechenden Skalierungsfaktor eine erste Annäherung ergibt.

[0038] Dadurch wird für das nachfolgende Optimierungsverfahren ein sehr günstiger Ausgangspunkt geschaffen. Dieser Skalierungsfaktor wird in der Datenbank für weitere mögliche Analysen abgelegt.

[0039] Ausgehend von den skalierten vorläufigen einen oder mehreren Schichtdicken des vorherigen Schritts startet ein Optimierungsverfahren in einem eingeschränkten spektralen Intervall. Dieses eingeschränkte spektrale Intervall ist beschichtungsindividuell und in dem zu der Soll-Messkurve zugeordneten Soll-Datensatz hinterlegt als erstes mögliches aus einer Intervall-Liste des Soll-Datensatzes. Im Rahmen dieses Optimierungsverfahrens wird die Schichtdicke der einen Einzellage, falls das Schichtsystem aus einer Einzellage gebildet ist, bzw. werden Schichtdicken der mehreren Einzellagen, falls das Schichtsystem aus mehreren Einzellagen gebildet ist, ermittelt, welche die Ist-Messkurve mit der zugrundenliegenden Simulations-Soll-Messkurve in einer ersten Annäherung beschreiben.

[0040] Aus den im vorherigen Schritt gewonnenen einen oder mehreren Schichtdicken als erste eine oder mehrere Simulations-Ist-Schichtdicken wird für die eine Einzellage oder jede der mehreren Einzellagen der Quotient mit den entsprechenden einen oder mehreren Ist-Schichtdicken, die an der Beschichtungsanlage eingestellt waren, gebildet. Aus dieser

Verrechnung ergibt sich der erste vorläufige Simulations-Datensatz. Dieser erste vorläufige Simulations-Datensatz wird mit den im Soll-Datensatz hinterlegten einen oder mehreren Soll-Schichtdicken auf Plausibilität auf Einzellagen-Niveau abgeglichen. Eine Abweichung von +/- 20% je Einzellagen-Schichtdicke kann akzeptabel sein, da es sich um eine erste grobe Annäherung handelt. Bei größerer Abweichung wird der Prozess ab dem vorherigen Schritt erneut gestartet, diesmal allerdings mit einer Nebenbedingung im Optimierungsverfahren, nämlich dass die Schichtdicke der Einzellage, für welche die Einzellagen-Schichtdicke außerhalb des vorgegebenen Bereiches war, auf diesen Bereich beschränkt wird. Im Idealfall ist diese Beschränkung nicht notwendig. Falls doch, können aber auch alle Einzellagen in ihrer Schichtdicke entsprechend beschränkt werden.

[0041] Nach diesem Schritt steht ein zweiter vorläufiger Satz an einer oder mehreren Schichtdicken bereit. Falls keine Beschränkung notwendig war, ist dieser zweite Simulations-Ist-Datensatz identisch zum ersten vorläufigen Simulations-Ist-Datensatz.

[0042] Für jedes weitere spektrale Intervall aus der Intervall-Liste des Soll-Datensatzes wird jetzt das Optimierungsverfahren angewandt. Das aktuell laufende Optimierungsverfahren verwendet immer den Satz des Simulations-Ist-Datensatzes des vorherigen Optimierungsverfahrens.

[0043] Typischerweise kann ein angepasster Simplex-Algorithmus als Optimierungsverfahren verwendet werden, jedoch können andere bekannte Simulationsverfahren ebenso geeignet sein. Simulationssoftware für derartige Optimierungsverfahren ist von verschiedenen Herstellern kommerziell erhältlich, beispielswiese die kommerzielle Simulationssoftware „Essential MacLeod“ oder andere bekannte Simulationssoftware beispielsweise für die Herstellung optischer Schichten.

[0044] Wenn alle Intervall-Iterationen durchgelaufen sind, sind die spektralen Daten der Ist-Messkurve in guter Übereinstimmung angenähert und es liegt eine erste finale Simulations-Ist-Messkurve sowie auch ein entsprechender Satz von Simulations-Ist-Schichtdicken vor. Diese beiden Parametersätze bilden den Simulations-Ist-Datensatz, der zwischengespeichert wird.

[0045] Diese Schritte werden so oft wiederholt, bis sich nach einem statistischen Auswahlverfahren ein stabiles Ergebnis ergibt. Vorzugsweise kann hierzu die gesamte Kurve betrachtet werden, insbesondere z.B. hinsichtlich Chi-Quadrat Abweichungen und dergleichen.

[0046] Wenn die spektralen Daten der Ist-Messkurve in bestmöglicher Übereinstimmung angenähert sind, kann mit den einen oder mehreren Simulations-Ist-Schichtdicken der finale Simulations-Ist-Datensatz generiert werden.

[0047] Jetzt wird der Optimierungsprozess erneut gestartet, mit dem Unterschied, dass jetzt die Optimierung zwischen der Simulations-Ist-Messkurve und der Soll-Messkurve stattfindet, um die spektralen Daten des Soll-Datensatzes nachzustellen. Außerdem ist der Simulations-Ist-Datensatz jetzt festgeschrieben und wird nicht mehr verändert.

[0048] Am Ende dieser Prozedur liegen eine, falls des Schichtsystem mit einer Einzellage gebildet ist, oder mehrere, falls das Schichtsystem mit mehreren Einzellagen gebildet ist, Simulations-Soll-Schichtdicken vor, welche den Simulations-Soll-Datensatz generieren. Aus diesen einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicken werden durch Verrechnung mit dem Simulations-Soll-Datensatz die eine oder mehrere Korrektur-Ist-Schichtdicken als die nächsten einen oder mehreren Anlagen-Ist-Schichtdicken berechnet, welche an der Beschichtungsanlage eingestellt bzw. übermittelt werden.

[0049] Vorteile der Erfindung liegen darin, dass im Gegensatz zum im Stand der Technik dargestellten Vorgehen mit dem erfindungsgemäßen Verfahren eine übergreifende analytische Steuerung des Beschichtungsprozesses stattfinden kann, welche vollkommen auf numerischen Berechnungen beruht.

[0050] Optional können mit dem erfindungsgemäßen Verfahren nicht nur Schichtdicken berücksichtigt und korrigiert werden, sondern durch Überwachung es können bei Bedarf auch weitere Prozessparameter überwacht werden, beispielsweise Zustand einer Anlage, Alter und/oder Zustand von Beschichtungsquellen, Alter und/oder Zustand von Messapparaturen in den Beschichtungsanlagen, Beladezustand mit Substraten bei der Beschichtung und dergleichen.

[0051] Das erfindungsgemäße Verfahren lässt sich für die automatische Selbstoptimierung eines bestehenden Beschichtungsprozesses anwenden sowie auch für die automatische Selbstkonfiguration von neuen Beschichtungsprozessen, wie auch beispielsweise dem Einfahren von Beschichtungsanlagen, anwenden. Unter Einfahren versteht der Fachmann die Neuinstallation bzw. erste Konfiguration eines neuen Beschichtungsprozesses und Beschichtungssystems auf einer Beschichtungsanlage.

[0052] Durch die kontinuierliche Optimierung/Überwachung ist sichergestellt, dass die so produzierten Schichtsysteme, beispielsweise optische Elemente, eine möglichst geringe Abweichung von Soll-Daten aufweisen.

[0053] Zusätzlich ergeben sich durch neu eingeführte Parametersätze wie Anlagen-Datensätze und Simulationsdatensätze und deren Überwachung neue Möglichkeiten für das Beschichtungs- und Anlagenmonitoring.

[0054] Vorteilhaft ergeben sich durch das erfindungsgemäße Verfahren Einsparmöglichkeiten in der Fertigung von Schichtsystemen, beispielsweise für optische Elemente. Es kann eine unmittelbare Reaktion / Meldung bei technisch bedingten Prozessdefiziten erfolgen. Beispielsweise kann bei Aggregatsdefekten in der Beschichtungsanlage sofort die darauffolgende Charge gestoppt werden und dadurch eine Fehlcharge verhindert werden. Bei schleichenden Anlagen- oder Prozessfehlern kann eine Dejustierung verhindert werden durch eine unmittelbare und fortlaufende Schichtkorrektur, wobei der anlagenspezifische Korrektur-Parametersatz dies anzeigt

[0055] Eine Pflege der Beschichtungsanlage kann vereinfacht werden. Individuelle Unterschiede der Prozessführung durch unterschiedliche Personen können vermieden werden. Die beschichtungsseitige Qualitätssicherung kann in diesem selbststeuernden System stattfinden und nicht nachgelagert wie bisher.

[0056] Weiter ergeben sich vorteilhaft Einsparmöglichkeiten beim Engineering. Das Einfahren von neuen Prozessen kann ferngesteuert von extern erfolgen. Durch einen neuen eingeführten Parametersatz ergeben sich neue Wege zum Verständnis der bisher ungeklärten Anlagen-, Prozess- und Schichtprobleme.

[0057] Gemäß einer vorteilhaften Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens kann das Generieren der Simulations-Ist-Messkurve, bzw. Simulations-Soll-Messkurve, weiterhin umfassen:

> Bestimmen eines Skalierungsfaktors als Mittelwert von Quotienten aus Abszissenwerten der Ist-Messkurve, bzw. Simulations-Ist-Messkurve und der Soll-Messkurve für nach dem Zuordnungskriterium bestimmte Abszissenwerte und
>
> Skalieren der einen Soll-Schichtdicke, falls das Schichtsystem aus einer Einzellage gebildet ist, oder mehreren Soll-Schichtdicken, falls das Schichtsystem aus mehreren Einzellagen gebildet ist; bzw. der einen oder mehreren Simulations-Ist-Schichtdicken der einen oder mehreren Einzellagen mit dem Skalierungsfaktor als Startwerte der einen oder mehreren Simulations-Ist-Schichtdicken, bzw. einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicken.

[0058] Demgemäß wird die Simulation-Ist-Messkurve nach dem erfindungsgemäßen Verfahren aus der Ist-Messkurve und den Soll-Schichtdicken generiert, um Startwerte für die Simulations-Ist-Schichtdicken zu bestimmen, während die Simulations-Soll-Messkurve aus der Simulations-Ist-Messkurve und den Simulations-Ist-Schichtdicken generiert wird, um Startwerte für die Simulations-Soll-Schichtdicken zu bestimmen.

[0059] Dadurch wird für das nachfolgende Optimierungsverfahren der bestmögliche Ausgangspunkt geschaffen.

[0060] Gemäß einer vorteilhaften Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens kann das Generieren der Simulations-Ist-Messkurve, bzw. Simulations-Soll-Messkurve, weiterhin umfassen:

> wenigstens für das erste Intervall für jede der mehreren Einzellagen, wenn das Schichtsystem mehrere Einzellagen aufweist bzw. für die eine Einzellage, wenn das Schichtsystem nur eine Einzellage aufweist: Bilden eines Quotienten aus der entsprechenden ersten finalen Simulations-Ist-Schichtdicke, bzw. der entsprechenden ersten finalen Simulations-Soll-Schichtdicke und der entsprechenden Anlagen-Ist-Schichtdicke, wobei erste Simulations-Ist-Schichtdicken, bzw. Simulations-Soll-Schichtdicken durch Skalieren der Simulations-Ist-Schichtdicken, bzw. Simulations-Soll-Schichtdicken mit dem Quotienten generiert werden.

[0061] Demgemäß werden für das Generieren der Simulations-Ist-Messkurve die Simulations-Ist-Schichtdicken herangezogen, während für das Generieren der Simulations-Soll-Messkurve die Simulations-Soll-Schichtdicken herangezogen werden.

[0062] Auf diese Weise können in geeigneter Weise günstige Startwerte für die weitere Optimierung bei der Anpassung von Simulations-Ist-Messkurven, bzw. Simulations-Soll-Messkurven generiert werden.

[0063] Gemäß einer vorteilhaften Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens kann das Generieren der Simulations-Ist-Messkurve, bzw. Simulations-Soll-Messkurve, weiterhin umfassen:

> Überprüfen der einzelnen ersten einen oder mehreren Simulations-Ist-Schichtdicken, bzw. einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicken auf zumindest ein Kriterium, insbesondere eine Plausibilität und/oder eine vorgegebene Abweichung von den jeweiligen einen oder mehreren Soll-Schichtdicken der Soll-Messkurve, und, sofern das wenigstens eine Kriterium verfehlt wird,
>
> Wiederholen des Variierens der einen oder mehreren Simulations-Ist-Schichtdicken, bzw. einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicken und des Bereitstellens von ersten finalen einen oder mehreren Simulations-Ist-Schichtdicken bzw. einen oder mehreren Simulations-

Soll-Schichtdicken sowie des Generierens der ersten einen oder mehreren Simulations-Ist-Schichtdicke, bzw. einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicke, wobei für solche eine oder mehrere Einzellagen, welche das Kriterium verfehlt haben, eine Beschränkung beim Variieren vorgegeben wird, und

Bereitstellen von zweiten einen oder mehreren Simulations-Ist-Schichtdicken, bzw. einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicken.

[0064] Demgemäß werden für das Generieren der Simulations-Ist-Messkurve die Simulations-Ist-Schichtdicken herangezogen, während für das Generieren der Simulations-Soll-Messkurve die Simulations-Soll-Schichtdicken herangezogen werden.

[0065] Diese Vorgehensweise erleichtert das Eingrenzen der Parameter bei dem Optimierungsverfahren und beschleunigt so das Bestimmen der optimierten Parametersätze.

[0066] Gemäß einer vorteilhaften Ausgestaltung kann das erfindungsgemäße Verfahren weiterhin umfassen:

Wiederholen der Schritte in einem oder mehreren weiteren spektralen Intervallen, wobei jedes folgende Intervall das vorausgegangene Intervall einschließt, wobei die zweiten einen oder mehreren Simulations-Ist-Schichtdicken, bzw. einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicken des vorausgegangenen Intervalls im folgenden Intervall als Startwerte eingesetzt werden und

Bereitstellen von finalen einen oder mehreren Simulations-Ist-Schichtdicken, bzw. einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicken.

[0067] Demgemäß werden iterative Intervallschachtelungen jeweils getrennt für Simulations-Ist-Schichtdicken und Simulations-Soll-Schichtdicken durchgeführt..

[0068] Auf diese Weise kann vorteilhaft eine effektive Annäherung der Simulations-Messkurven an die gemessenen Ist-Messkurven erfolgen, wobei die Anpassungsparameter so sukzessive verfeinert werden können. Das Risiko, dass ein ungünstiges Minimum im Optimierungsprozess bestimmt wird, lässt sich dadurch reduzieren.

[0069] Gemäß einer vorteilhaften Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens kann ein optisches Element hergestellt werden, wobei das optische Element ein Substrat und ein interferometrisch reflexminderndes Schichtsystem auf wenigstens einer Oberfläche des Substrats umfassen,
wobei das Schichtsystem einen Stapel von mindestens vier aufeinander folgenden Schichtpaketen umfasst, wobei jedes Schichtpaket ein Paar von ersten und zweiten Einzellagen umfasst, wobei die ersten Einzellagen eine erste optische Dicke und die zweiten Einzellagen eine zweite, von der ersten optischen Dicke verschiedene optische Dicke aufweisen,
wobei ein Brechungsindex der jeweils substratnäheren ersten Einzellagen größer ist als ein Brechungsindex der jeweils substratferneren zweiten Einzellagen des Stapels,
wobei das Schichtsystem eine Helligkeit, eine Buntheit und einen Bunttonwinkel einer Restreflexfarbe aufweist,
wobei der Betrag einer Änderung des Bunttonwinkels der Restreflexfarbe in einem Intervall eines Betrachtungswinkels mit den Grenzwerten 0° und 30° bezogen auf eine Oberflächennormale auf das Schichtsystem kleiner als der Betrag einer Änderung der Buntheit im Intervall des Betrachtungswinkels ist,
wobei folgende Schritte ausgeführt werden:

- Definieren eines Schichtdesigns, umfassend zumindest ein erstes Material für hochbrechende erste Einzellagen und ein zweites Material für niedrigbrechende zweite Einzellagen, Anzahl gewünschter Schichtpakete mit den Einzellagen, Startwerte der Dicke der Einzellagen;

- Definieren von Ziel-Farbwerten, umfassend Helligkeit, Buntheit und Bunttonwinkel zumindest an Grenzwerten für ein Intervall eines Betrachtungswinkels mit Grenzwerten von 0° und 30°;

- Durchführen eines Optimierungsverfahrens zur Variation der Einzelschichtdicken, bis ein Optimierungsziel erreicht ist.

[0070] Vorteilhaft können die Ziel-Farbwerte an den Grenzwerten des Intervalls gleich oder ähnlich gewählt werden.

[0071] Insbesondere können maximale Abweichungen für die Bunttonwinkel unterschiedlicher Restreflexfarben vorgegeben werden.

[0072] Vorteilhaft kann das Schichtsystem vier oder fünf Schichtpakete aufweisen, Es können auch mehr als fünf Schichtpakete vorgesehen sein.

[0073] Die Buntheit kann auch als Farbsättigung bezeichnet werden. Der Bunttonwinkel kann auch als Farbwinkel bezeichnet werden.

[0074] Vorteilhaft kann durch Variation der Schichtdicken der Teilschichten ein farbstabiles Schichtsystem bereitgestellt werden, dessen Restreflexfarbe sich auch bei größerer Änderung des Betrachtungswinkels nicht oder nur geringfügig ändert. Günstigerweise kann durch eine geeignete Kombination von Buntheit und Bunttonwinkel über einen großen Betrachtungswinkelbereich eine farbstabile Restreflexfarbe erreicht werden.

[0075] Die ersten, substratnäheren Teilschichten der Schichtpakete im Stapel können aus demselben ersten Material gebildet sein. Die zweiten, substratferneren Teilschichten können ebenso aus einem gleichen, vom ersten Material der ersten Teilschichten verschiedenen zweiten Material gebildet sind. Dabei kann vorgesehen sein, dass im substratfernsten Schichtpaket zwischen erster und zweiter Teilschicht eine Funktionsschicht aus einem dritten Material angeordnet ist, die vergleichbare Brechungseigenschaften wie die zweite Teilschicht aufweist. Für Berechnungszwecke kann die Funktionsschicht gegebenenfalls der zweiten Teilschicht zugeordnet werden. Alternativ können die Materialien der ersten Teilschichten im Stapel variieren. Ebenso kann alternativ vorgesehen sein, dass die Materialien, aus denen die zweiten Teilschichten gebildet sind, im Stapel variieren.

[0076] Gemäß einer vorteilhaften Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens kann der Bunttonwinkel im Intervall des Betrachtungswinkels mit den Grenzwerten 0° und 30° sich um höchstens 15° ändern, bevorzugt um höchstens 10° ändern; und/oder der Betrag der Änderung des Bunttonwinkels in einem zweiten Intervall eines Betrachtungswinkels von 0° bis zu einem Grenzbetrachtungswinkel mit oberen Grenzwerten 30° und 45° bezogen auf die Oberflächennormale auf das Schichtsystem kleiner als der Betrag einer Änderung der Buntheit im zweiten Intervall des Betrachtungswinkels sein und der Betrag der Buntheit beim Grenzbetrachtungswinkel mindestens 2 sein, insbesondere der Bunttonwinkel im zweiten Intervall sich höchstens um 20° ändern, bevorzugt höchstens um 15° ändern; und/oder der photopische Reflexionsgrad im Intervall des Betrachtungswinkels mit den Grenzwerten 0° und 30° höchstens 1,5%, bevorzugt höchstens 1,2% sein; und/oder der skotopische Reflexionsgrad im Intervall des Betrachtungswinkels mit den Grenzwerten 0° und 30° höchstens 1,5%, bevorzugt höchstens 1,2% sein.

[0077] Der Farbeindruck des Restreflexes des optischen Systems bleibt für einen Beobachter ganz oder nahezu unverändert.

[0078] Vorteilhaft ergibt sich eine farbstabile Restreflexfarbe auch bei größerer Variation des Betrachtungswinkels.

[0079] Vorteilhaft können die ersten Teilschichten aus einem hochbrechenden Material gebildet sein.

[0080] Günstigerweise können die ersten Teilschichten wenigstens aus einer oder mehreren der Verbindungen Ta_2O_5, TiO_2, ZrO_2, Al_2O_3, Nd_2O_5, Pr_2O_3, $PrTiO_3$, La_2O_3, Nb_2O_5, Y_2O_3, HfO_2, InSn-Oxid, Si_3N_4, MgO, CeO_2, ZnS und/oder deren Modifikationen, insbesondere deren andere Oxidationsstufen und/oder Mischungen derselben mit Silanen und/oder Siloxanen aufweisen.

[0081] Diese Materialien sind bekannt als Werkstoffe mit hohem klassischem Brechungsindex für den Einsatz bei optischen Elementen, wie beispielsweise zur Beschichtung von Brillengläsern. Die höherbrechenden Teilschichten können jedoch auch SiO_2 oder andere niedrigerbrechende Materialien enthalten, solange der Brechungsindex der gesamten Teilschicht größer als 1,6 ist, bevorzugt mindestens 1, 7, besonders bevorzugt mindestens 1,8, ganz besonders bevorzugt mindestens 1,9.

[0082] Vorteilhaft können die zweiten Teilschichten aus einem niedrigbrechenden Material gebildet sein.

[0083] Die niedrigerbrechenden Teilschichten können wenigstens eines der Materialien MgF_2, SiO, SiO_2, SiO_2 mit Zusätzen von Al, Silane, Siloxane in Reinform oder mit deren fluorierten Derivaten, aufweisen. Die niedrigerbrechenden Teilschichten können jedoch auch eine Mischung von SiO_2 und Al_2O_3 enthalten. Bevorzugt können die niedrigerbrechenden Teilschichten wenigstens 80 Gewichtsprozent SiO_2, besonders bevorzugt wenigstens 90 Gewichtsprozent SiO_2 enthalten.

[0084] Bevorzugt ist der Brechungsindex der niedrigbrechenden Teilschichten höchstens 1,55, bevorzugt höchstens 1,48, besonders bevorzugt höchstens 1,4. Diese Angaben von Brechungsindizes beziehen sich auf Normalbedingungen bei einer Temperatur von 25° C sowie eine Referenzwellenlänge der verwendeten Lichtintensität von 550 nm.

[0085] Typische Beispiele für Schichtmaterialien mit unterschiedlichen Brechungsindizes sind Siliziumdioxid (SiO_2) mit einem Brechungsindex von 1,46, Aluminiumoxid (Al_2O_3) mit einem Brechungsindex von 1, 7, Zirkondioxid (ZrO_2) mit einem Brechungsindex von 2,05, Praseodym-Titanoxid ($PrTiO_3$) mit einem Brechungsindex von 2,1, Titanoxid (TiO_2) und Zinksulfid (ZnS) mit jeweils einem Brechungsindex von 2,3. Diese Werte stellen mittlere Werte dar, die je nach Beschichtungsverfahren und Schichtdicke bis zu 10% variieren können.

[0086] Übliche optische Gläser weisen Brechungsindizes zwischen 1,5 und 2,0 auf. Schichtmaterialien mit Brechungsindizes kleiner als 1,5 wie MgF_2, SiO_2, werden deshalb in Kombination mit optischen Gläsern als niedrig brechende Materialien bezeichnet, Schichtmaterialien mit Brechungsindizes größer als 2,0 wie ZrO_2, $PrTiO_3$, TiO_2, ZnS werden in Kombination mit optischen Gläsern als hoch brechende Materialien bezeichnet.

[0087] Der Unterschied der Brechungsindizes zwischen den hochbrechenden und niedrigbrechenden

Materialien der ersten und zweiten Teilschichten beträgt vorzugsweise je nach Beschichtungsverfahren und Schichtdicke mindestens 0,2 bis mindestens 0,5.

[0088] Die verwendeten Materialien für diese Art von Beschichtungen sind die typischen Materialien, die in der Optik mittels beispielsweise PVD-Verfahren (PVD = Physical Vapour Deposition (physikalische Gasphasenabscheidung)) oder CVD-Verfahren (CVD = Chemical Vapour Deposition (chemische Gasphasenabscheidung)) auf ein Substrat aufgebracht werden.

[0089] Nach einer günstigen Ausgestaltung des optischen Elements können zumindest die ersten Teilschichten aus einem gleichen ersten Material gebildet sind und die zweiten Teilschichten zumindest überwiegend aus einem gleichen zweiten Material gebildet sind.

[0090] Optional können die zweiten Teilschichten aus dem gleichen zweiten Material gebildet sein und lediglich im substratfernsten Schichtpaket eine Funktionsschicht zwischen der ersten Teilschicht und der zweiten Teilschicht aufweisen. Die Funktionsschicht kann niedrigbrechend sein und bedarfsweise der zweiten Teilschicht für Berechnungszwecke zugeschlagen werden.

[0091] Nach einem weiteren, insbesondere eigenständigen, Aspekt der Erfindung wird ein Verfahren vorgeschlagen zur Herstellung eines Schichtsystems aus einer Einzellage oder mehreren Einzellagen in wenigstens einer Beschichtungsanlage, umfassend:

(i) Erfassen wenigstens einer spektralen Messkurve mit Ordinatenwerten und Abszissenwerten als Ist-Messkurve an einem Ist-Schichtsystem, welches aus einer oder mehreren Einzellagen mit jeweiligen Anlagen-Ist-Schichtdicken besteht, wobei die eine oder mehreren Einzellagen nach einem Anlagen-Datensatz der wenigstens einen Beschichtungsanlage hergestellt sind, wobei der Anlagen-Datensatz zumindest die einen oder mehreren Anlagen-Ist-Schichtdicken der einen oder mehreren Einzellagen umfasst;

(ii) Zuordnen der Ist-Messkurve des Ist-Schichtsystems nach einem Zuordnungs-Kriterium, insbesondere für signifikante spektrale Punkte der Ist-Messkurve, zu einer Soll-Messkurve eines Soll-Datensatzes mit Ordinatenwerten und Abszissenwerten, dem ein Soll-Datensatz-Schichtsystem, gebildet aus einer oder mehreren Einzellagen zugrunde liegt, wobei der Soll-Datensatz wenigstens bekannte Soll-Schichtdicken der einen oder mehreren Einzellagen umfasst;

(iii) Generieren einer Simulations-Ist-Messkurve nach einem iterativen Verfahren durch Variieren wenigstens von einer Simulations-Ist-Schichtdicke der einen Einzellage, falls das Schichtsystem aus einer Einzellage gebildet ist, oder mehreren Simulations-Ist-Schichtdicken der mehreren Einzellagen, falls das Schichtsystem aus mehreren Einzellagen gebildet ist, in zumindest einem spektralen Intervall der Ist-Messkurve und Erhalt eines finalen Simulations-Ist-Datensatzes mit wenigstens finalen einen oder mehreren Simulations-Ist-Schichtdicken, durch welche die Ist-Messkurve in der Simulations-Ist-Messkurve zumindest angenähert wird, bis für das Zuordnungskriterium ein nach einem statistischen Auswahlverfahren stabiles Ergebnis erreicht ist, wobei als Startwerte der einen oder mehreren Simulations-Ist-Schichtdicken die einen oder mehreren Soll-Schichtdicken verwendet werden;

(iv) Generieren einer Simulations-Soll-Messkurve nach einem iterativen Verfahren durch Variieren wenigstens der einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicken der einen oder mehreren Einzellagen in zumindest einem spektralen Intervall der Soll-Messkurve und Erhalt eines finalen Simulations-Soll-Datensatzes mit wenigstens finalen einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicken, durch welche die Soll-Messkurve in der Simulations-Soll-Messkurve zumindest angenähert wird, bis für das Zuordnungskriterium ein nach einem statistischen Auswahlverfahren stabiles Ergebnis erreicht ist; wobei als Startwerte der einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicken die einen oder mehreren Simulation-Ist-Schichtdicken verwendet werden; wobei das iterative Verfahren für ein oder mehrere spektrale Intervalle durchgeführt wird, wobei jedes folgende Intervall das vorausgegangene Intervall einschließt.

[0092] Einzelschritte des oben beschriebenen Verfahrens zum Betreiben einer Beschichtungsanlage zur Herstellung eines Schichtsystems, beispielsweise für ein optisches Element, können so vorteilhaft auf die Herstellung des Schichtsystems selbst angewandt werden.

[0093] Vorteilhaft ermöglicht das Verfahren unter Verwendung des Verfahrens nach dem ersten Aspekt der Erfindung eine selbststeuernde und rückgekoppelte Betriebsweise von Beschichtungsanlagen für Schichtsysteme, insbesondere für optische Schichtsysteme.

[0094] Nach einem weiteren, insbesondere eigenständigen, Aspekt der Erfindung wird ein Verfahren vorgeschlagen zum Einfahren eines Beschichtungsprozesses in wenigstens einer Beschichtungsanlage zur Herstellung eines Schichtsystems, umfassend:

(i) Erfassen wenigstens einer spektralen Messkurve mit Ordinatenwerten und Abszissenwerten als Ist-Messkurve an einem Ist-Schichtsystem, welches aus einer Einzellage oder einer Abfolge von mehreren Einzellagen mit jeweiligen Anlagen-Ist-Schichtdicken besteht, wobei die einen oder mehreren Einzellagen nach einem Anlagen-Datensatz der wenigstens einen Beschichtungsanlage hergestellt sind, wobei der Anlagen-Datensatz wenigstens die einen oder mehreren Anlagen-Ist-Schichtdicken der einen oder mehreren Einzellagen umfasst;

(ii) Zuordnen der Ist-Messkurve des Ist-Schichtsystems nach einem Zuordnungs-Kriterium, insbesondere für signifikante spektrale Punkte der Ist-Messkurve, zu einer Soll-Messkurve eines Soll-Datensatzes mit Ordinatenwerten und Abszissenwerten, dem ein Soll-Datensatz-Schichtsystem, gebildet aus einen oder mehreren Einzellagen zugrunde liegt, wobei der Soll-Datensatz wenigstens bekannte Soll-Schichtdicken der einen oder mehreren Einzellagen umfasst;

(iii) Generieren einer Simulations-Ist-Messkurve nach einem iterativen Verfahren durch Variieren wenigstens von einer Simulations-Ist-Schichtdicke der einen Einzellage, falls das Schichtsystem aus einer Einzellage gebildet ist, oder mehreren Simulations-Ist-Schichtdicken der mehreren Einzellagen, falls das Schichtsystem aus mehreren Einzellagen gebildet ist, in zumindest einem spektralen Intervall der Ist-Messkurve und Erhalt eines finalen Simulations-Ist-Datensatzes mit wenigstens finalen einen oder mehreren Simulations-Ist-Schichtdicken, durch welche die Ist-Messkurve in der Simulations-Ist-Messkurve zumindest angenähert wird, bis für das Zuordnungskriterium ein nach einem statistischen Auswahlverfahren stabiles Ergebnis erreicht ist, wobei als Startwerte der einen oder mehreren Simulations-Ist-Schichtdicken die einen oder mehreren Soll-Schichtdicken verwendet werden;

(iv) Generieren einer Simulations-Soll-Messkurve nach einem iterativen Verfahren durch Variieren wenigstens der einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicken der einen oder mehreren Einzellagen in zumindest einem spektralen Intervall der Soll-Messkurve und Erhalt eines finalen Simulations-Soll-Datensatzes mit wenigstens finalen einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicken, durch welche die Soll-Messkurve in der Simulations-Soll-Messkurve zumindest angenähert wird, bis für das Zuordnungskriterium ein nach einem statistischen Auswahlverfahren stabiles Ergebnis erreicht ist; wobei als Startwerte der einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicken die einen oder mehreren Simulation-Ist-Schichtdicken verwendet werden; sowie

(v) Bereitstellen des finalen Simulations-Soll-Datensatzes für die wenigstens eine Beschichtungsanlage als neuer Anlagen-Datensatz zur Abscheidung eines weiteren Schichtsystems mit wenigstens einen oder mehreren Korrektur-Ist-Schichtdicken als neuen einen oder mehreren Anlagen-Ist-Schichtdicken welche aus den finalen einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicken mit dem finalen Simulations-Soll-Datensatz bestimmt werden.

[0095] Vorteilhaft ermöglicht das Verfahren unter Verwendung des Verfahrens nach dem ersten Aspekt der Erfindung eine selbststeuernde und rückgekoppelte Betriebsweise beim Einfahren von Beschichtungsprozessen in Beschichtungsanlagen.

[0096] Üblicherweise erfordert das Einfahren von Beschichtungsanlagen einen erheblichen Zeitaufwand, der vorteilhaft verkürzt werden kann.

[0097] Das Einfahren einer neuen Beschichtungsanlage lässt sich mit dem erfindungsgemäßen selbststeuernden und rückgekoppelten Verfahren zum Betreiben einer Beschichtungsanlage zur Herstellung eines Schichtsystems, beispielsweise für ein optisches Element, effektiver und schneller durchführen. So ergibt sich erhebliches Einsparungspotential bei der Inbetriebnahme der Beschichtungsanlage. Auch kann das Einfahren der Beschichtungsanlage sogar ferngesteuert erfolgen, wodurch sich weiteres Einsparungspotential durch weniger vor Ort benötigtes Bedienungspersonal ergibt.

[0098] Nach einem weiteren, insbesondere eigenständigen, Aspekt der Erfindung wird ein Beschichtungssystem zur Herstellung eines Schichtsystems, beispielsweise für ein optisches Element, vorgeschlagen, umfassend wenigstens
eine Beschichtungsanlage zum Beschichten eines Substrats mit einem Schichtsystem,
einen Steuerrechner zum Steuern der Beschichtungsanlage und zur Kommunikation mit einem Simulationsrechner,
ein optisches Messgerät zum Bestimmen einer spektral aufgelösten Ist-Messkurve des Schichtsystems,
einen Simulationsrechner, auf dem eine Simulationssoftware zur optischen Berechnung und Optimierung des Schichtsystems installiert ist,
eine Datenbank zur Speicherung von Anlage-Datensätzen,
ein Eingabegerät zur Eingabe und Steuerung des Simulationsrechners und/oder der Beschichtungsanlage.

[0099] Das Beschichtungssystem umfasst auf diese Weise alle nötigen Komponenten, welche für ein effektives Einfahren und Betreiben der Beschichtungsanlage gemäß dem erfindungsgemäßen Verfahren wie oben beschrieben benötigt werden. Da-

durch lässt sich das Einfahren einer neuen Beschichtungsanlage mit dem erfindungsgemäßen Verfahren zum Betreiben einer Beschichtungsanlage zur Herstellung eines Schichtsystems effektiver und schneller durchführen. So ergibt sich erhebliches Einsparungspotential bei der Inbetriebnahme der Beschichtungsanlage. Auch kann das Einfahren der Beschichtungsanlage sogar ferngesteuert erfolgen, wodurch sich weiteres Einsparungspotential durch weniger vor Ort benötigtes Bedienungspersonal ergibt.

[0100] Die Beschichtungsanlage umfasst beispielsweise eine Vakuumkammer mit zugeordneten Aggregaten zur Beschichtung von Substraten wie verschiedene Beschichtungsquellen, Blenden, Glashalter, Pumpen, etc.

[0101] Vorteilhaft kann das Beschichtungssystem unter Verwendung des Verfahrens nach dem ersten Aspekt der Erfindung selbststeuernd und rückgekoppelt betreibbar sein.

[0102] Der Steuerrechner der Beschichtungsanlage steuert den Beschichtungsprozess auf der Beschichtungsanlage und übernimmt die Kommunikation mit der Beschichtungsanlage. Zum automatischen Datenaustausch kann dieser Rechner zumindest über eine Netzwerkverbindung verfügen.

[0103] In dem optischen Messgerät kann ein spektral aufgelöstes Messsignal aufgezeichnet werden, welches das optische Element bestehend aus dem optischen Substrat und dem aufgebrachten Schichtsystem wiedergibt. Diese sogenannte Ist-Messkurve kann als ein zweidimensionaler Datensatz, bestehend aus Datentupeln, zum Beispiel als Wellenlänge in Nanometer, Reflektivität in %, zur Verfügung gestellt werden. Diese Daten werden als „spektrale Daten“ bezeichnet.

[0104] Auf dem Simulationsrechner ist die Simulationssoftware installiert.

[0105] Die Simulationssoftware ist ein Computerprogramm, welches zumindest den von dem optischen Messgerät erzeugten Datensatz einlesen kann. Weiter kann die Simulationssoftware Datensätze der Beschichtungsanlage einlesen und ausgeben. Die Software implementiert das beschriebene erfindungsgemäße Verfahren als Steuerungsalgorithmus. Die Software arbeitet mit der Datenbank und liest beispielsweise Soll-Datensätze aus der Datenbank aus, speichert neu berechnete Simulations-Datensätze in der Datenbank ab. Weiter implementiert die Software mindestens einen beliebigen Optimierungs-/Fitalgorithmus, wie er in handelsüblichen Simulationsprogrammen zu finden ist, beispielsweise in „Essential MacLeod“.

[0106] In der Datenbank sind die gewonnenen Simulations-Soll-Datensätze für jede Beschichtungsanlage und für jeden Beschichtungsprozess abgespeichert und können zu einem späteren Zeitpunkt wiederausgelesen werden. Zusätzlich enthält die Datenbank für alle hinterlegten Beschichtungsprozesse die zugehörigen Soll-Datensätze.

[0107] Der bidirektionale Datenaustausch zwischen dem Steuerrechner der Beschichtungsanlage und der Simulationssoftware kann entweder direkt durch die Simulationssoftware und eine bestehende Netzwerkverbindung zum Steuerrechner der Beschichtungsanlage realisiert werden oder es kann eine weitere Software zum Einsatz kommen, welche den Datenaustausch übernimmt und der Simulationssoftware Daten der Beschichtungsanlage bereitstellt sowie in der Gegenrichtung Daten zurück zur Beschichtungsanlage transferiert. Im manuellen Fall findet dieser Datenaustausch durch die Interaktion mit einem Bediener über ein Eingabegerät statt.

[0108] Nach einem weiteren, insbesondere eigenständigen, Aspekt der Erfindung wird eine Beschichtungsanlage zur Herstellung eines Schichtsystems, beispielsweise für ein optisches Element, vorgeschlagen, insbesondere wie vorstehend beschrieben, umfassend eine Komponente zur Anwendung eines künstlichen Alterungsprozesses auf das Schichtsystem. Zweckmäßigerweise kann das in der Beschichtungsanlage hergestellte Schichtsystem in derselben Anlage auch gleich künstlich gealtert werden, um so eine stationäre Ist-Messkurve bei der Bestimmung der spektralen Eigenschaften des Schichtsystems zu erhalten. Dadurch ergibt sich eine hohe Sicherheit bei der Bestimmung der richtigen Korrektur-Schichtdicken für die neuen Schichtsysteme, da sich die Eigenschaften der Schichtsysteme im Lauf der Zeit auch nicht mehr stark ändern.

[0109] Vorteilhaft ermöglicht das Verfahren unter Verwendung des Verfahrens nach dem ersten Aspekt der Erfindung eine selbststeuernde und rückgekoppelte Betriebsweise von Beschichtungsanlagen.

[0110] Nach einem weiteren, insbesondere eigenständigen, Aspekt der Erfindung wird eine Beschichtungsanlage zur Herstellung eines Schichtsystems, beispielsweise für ein optisches Element, vorgeschlagen, insbesondere wie vorstehend beschrieben, umfassend

ein optisches Messgerät zum Bestimmen einer spektral aufgelösten Ist-Messkurve des Schichtsystems und/oder

eine Komponente zur Anwendung eines künstlichen Alterungsprozesses auf das Schichtsystem.

[0111] Günstigerweise kann ein optisches Messgerät zur in-situ-Bestimmung der spektralen Daten des hergestellten Schichtsystems auch gleich in der Be-

schichtungsanlage selbst angeordnet sein. So entfallen Unsicherheiten beim Transfer des Schichtsystems aus der Beschichtungsanlage und mögliche nachträgliche Veränderungen des Schichtsystems. So kann die Bestimmung von geeigneten einen (bei einem Schichtsystem mit einer Einzellage) oder mehreren (bei einem Schichtsystem mit mehreren Einzellagen) Korrektur-Schichtdicken unmittelbarer erfolgen. Eine Optimierung der Anlagen-Datensätze für das Beschichtungsverfahren kann so effektiver erfolgen. Vorteilhaft kann auch noch eine Komponente zur künstlichen Alterung des hergestellten Schichtsystems in die Beschichtungsanlage integriert sein. Zweckmäßigerweise kann das in der Beschichtungsanlage hergestellte Schichtsystem so in derselben Anlage auch gleich künstlich gealtert werden, um so eine stationäre Ist-Messkurve bei der Bestimmung der spektralen Eigenschaften des optischen Elements zu erhalten. Dadurch ergibt sich eine hohe Sicherheit bei der Bestimmung der richtigen einen oder mehreren Korrektur-Schichtdicken für die neuen Schichtsysteme, da sich die Eigenschaften der Schichtsysteme im Lauf der Zeit auch nicht mehr stark ändern.

[0112] Vorteilhaft kann die Beschichtungsanlage unter Verwendung des Verfahrens nach dem ersten Aspekt der Erfindung selbststeuernd und rückgekoppelt betreibbar sein.

[0113] Nach einem weiteren, insbesondere eigenständigen, Aspekt der Erfindung wird ein System von Beschichtungsanlagen zur Herstellung von Schichtsystemen, beispielsweise für optische Elemente, vorgeschlagen, insbesondere wie vorstehend beschrieben, umfassend wenigstens
eine oder mehrere Beschichtungsanlagen zum Beschichten mindestens eines Substrats mit einem Schichtsystem,
einen oder mehrere Steuerrechner zum Steuern wenigstens einer Beschichtungsanlage und zur Kommunikation mit einem Simulationsrechner,
ein optisches Messgerät zum Bestimmen einer spektral aufgelösten Ist-Messkurve des Schichtsystems,
einen Simulationsrechner, auf dem eine Simulationssoftware zur optischen Berechnung und Optimierung des Schichtsystems installiert ist, und welcher mit dem Steuerungsrechner der Beschichtungsanlage kommuniziert,
eine Datenbank zur Speicherung von Anlage-Datensätzen, sowie
ein Eingabegerät zur Eingabe und Steuerung des Simulationsrechners und/oder der einen oder mehreren Beschichtungsanlagen.

[0114] In einem solchen System von mehreren Beschichtungsanlagen können die verschiedenen Beschichtungsanlagen von einem Simulationsrechner gesteuert werden, wodurch sich erhebliches Einsparungspotential beim Betreiben der Beschichtungsanlagen ergibt. Auch lassen sich so Erkenntnisse und/oder Datensätze, welche an einer Beschichtungsanlage gewonnen werden, auf effektive Weise auf eine andere Beschichtungsanlage übertragen.

[0115] Nach einem weiteren, insbesondere eigenständigen, Aspekt der Erfindung wird eine Datenbank vorgeschlagen zur Speicherung von Anlage-Datensätzen, für ein Verfahren zum Betreiben wenigstens einer Beschichtungsanlage zur Herstellung von Schichtsystemen, beispielsweise für optische Elemente, insbesondere einem Verfahren nach dem ersten Aspekt der Erfindung, umfassend

(i) Erfassen wenigstens einer spektralen Messkurve mit Ordinatenwerten und Abszissenwerten als Ist-Messkurve an einem Ist-Schichtsystem, welches aus einer Abfolge von einer oder mehreren Einzellagen mit jeweiligen einen oder mehreren Anlagen-Ist-Schichtdicken besteht, wobei die einen oder mehreren Einzellagen nach einem Anlagen-Datensatz der wenigstens einen Beschichtungsanlage hergestellt sind, wobei der Anlagen-Datensatz wenigstens die einen oder mehreren Anlagen-Ist-Schichtdicken der einen oder mehreren Einzellagen umfasst;

(ii) Zuordnen der Ist-Messkurve des Ist-Schichtsystems nach einem Zuordnungs-Kriterium, insbesondere für signifikante spektrale Punkte der Ist-Messkurve, zu einer Soll-Messkurve eines Soll-Datensatzes mit Ordinatenwerten und Abszissenwerten, dem ein Soll-Datensatz-Schichtsystem, gebildet aus einen oder mehreren Einzellagen zugrunde liegt, wobei der Soll-Datensatz wenigstens bekannte einen oder mehreren Soll-Schichtdicken der einen oder mehreren Einzellagen umfasst;

(iii) Generieren einer Simulations-Ist-Messkurve nach einem iterativen Verfahren durch Variieren wenigstens von einer Simulations-Ist-Schichtdicke der einen Einzellage, falls das Schichtsystem aus einer Einzellage gebildet ist, oder mehreren Simulations-Ist-Schichtdicken der mehreren Einzellagen, falls das Schichtsystem aus mehreren Einzellagen gebildet ist, in zumindest einem spektralen Intervall der Ist-Messkurve und Erhalt eines finalen Simulations-Ist-Datensatzes mit wenigstens finalen Simulations-Ist-Schichtdicken, durch welche die Ist-Messkurve in der Simulations-Ist-Messkurve zumindest angenähert wird, bis für das Zuordnungskriterium ein nach einem statistischen Auswahlverfahren stabiles Ergebnis erreicht ist, wobei als Startwerte der einen oder mehreren Simulations-Ist-Schichtdicken die einen oder mehreren Soll-Schichtdicken verwendet werden;

(iv) Generieren einer Simulations-Soll-Messkurve nach einem iterativen Verfahren durch Variie-

ren wenigstens der einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicken der einen oder mehreren Einzellagen in zumindest einem spektralen Intervall der Soll-Messkurve und Erhalt eines finalen Simulations-Soll-Datensatzes mit wenigstens finalen einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicken, durch welche die Soll-Messkurve in der Simulations-Soll-Messkurve zumindest angenähert wird, bis für das Zuordnungskriterium ein nach einem statistischen Auswahlverfahren stabiles Ergebnis erreicht ist; wobei als Startwerte der einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicken die einen oder mehreren Simulation-Ist-Schichtdicken verwendet werden; sowie

(v) Bereitstellen des finalen Simulations-Soll-Datensatzes für die wenigstens eine Beschichtungsanlage als neuer Anlagen-Datensatz zur Abscheidung eines weiteren Schichtsystems mit wenigstens einen oder mehreren Korrektur-Ist-Schichtdicken als neuen einen oder mehreren Anlagen-Ist-Schichtdicken, welche aus den finalen einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicken mit dem finalen Simulations-Soll-Datensatz bestimmt werden;

wobei die Anlagen-Datensätze wenigstens Anlagen-Datensätze, Soll-Datensätze, Simulations-Ist-Datensätze, und/oder Simulations-Soll-Datensätze umfassen.

[0116] Mit Hilfe einer solchen Datenbank kann auf effektive Weise auf die unterschiedlichsten Anlagen-Datensätze, Soll-Datensätze, Simulations-Ist-Datensätze, und/oder Simulations-Soll-Datensätze zugegriffen werden. Damit lassen sich Erkenntnisse aus früheren und/oder anderen Beschichtungsprozessen auf günstige Weise weiterverwenden oder auf andere Beschichtungsanlagen und/oder Prozesse übertragen.

[0117] Vorteilhaft kann mittels der Datenbank unter Verwendung des Verfahrens nach dem ersten Aspekt der Erfindung eine Beschichtungsanlage oder ein System von Beschichtungsanlagen selbststeuernd und rückgekoppelt betreibbar sein.

[0118] Nach einem weiteren, insbesondere eigenständigen, Aspekt der Erfindung wird ein Computer-Programm-Produkt vorgeschlagen für ein Verfahren zum Betreiben wenigstens einer Beschichtungsanlage zur Herstellung von Schichtsystemen, beispielsweise für optische Elemente, wobei das Computer-Programm-Produkt wenigstens ein computerlesbares Speichermedium umfasst, welches Programmbefehle umfasst, die auf einem Computersystem ausführbar sind und das Computersystem dazu veranlassen, ein Verfahren auszuführen, umfassend

(i) Erfassen wenigstens einer spektralen Messkurve mit Ordinatenwerten und Abszissenwerten als Ist-Messkurve an einem Ist-Schichtsystem, welches aus einer oder mehreren Einzellagen mit jeweiligen Anlagen-Ist-Schichtdicken besteht, wobei die einen oder mehreren Einzellagen nach einem Anlagen-Datensatz der wenigstens einen Beschichtungsanlage hergestellt sind, wobei der Anlagen-Datensatz wenigstens die einen oder mehreren Anlagen-Ist-Schichtdicken der einen oder mehreren Einzellagen umfasst;

(ii) Zuordnen der Ist-Messkurve des Ist-Schichtsystems nach einem Zuordnungs-Kriterium, insbesondere für signifikante spektrale Punkte der Ist-Messkurve, zu einer Soll-Messkurve eines Soll-Datensatzes mit Ordinatenwerten und Abszissenwerten, dem ein Soll-Datensatz-Schichtsystem, gebildet aus einer oder mehreren Einzellagen zugrunde liegt, wobei der Soll-Datensatz wenigstens bekannte Soll-Schichtdicken der einen oder mehreren Einzellagen umfasst;

(iii) Generieren einer Simulations-Ist-Messkurve nach einem iterativen Verfahren durch Variieren wenigstens von einer Simulations-Ist-Schichtdicke der einen Einzellage, falls das Schichtsystem aus einer Einzellage gebildet ist, oder mehreren Simulations-Ist-Schichtdicken der mehreren Einzellagen, falls das Schichtsystem aus mehreren Einzellagen gebildet ist, in zumindest einem spektralen Intervall der Ist-Messkurve und Erhalt eines finalen Simulations-Ist-Datensatzes mit wenigstens finalen einen oder mehreren Simulations-Ist-Schichtdicken, durch welche die Ist-Messkurve in der Simulations-Ist-Messkurve zumindest angenähert wird, bis für das Zuordnungskriterium ein nach einem statistischen Auswahlverfahren stabiles Ergebnis erreicht ist, wobei als Startwerte der einen oder mehreren Simulations-Ist-Schichtdicken die einen oder mehreren Soll-Schichtdicken verwendet werden;

(iv) Generieren einer Simulations-Soll-Messkurve nach einem iterativen Verfahren durch Variieren wenigstens der einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicken der einen oder mehreren Einzellagen in zumindest einem spektralen Intervall der Soll-Messkurve und Erhalt eines finalen Simulations-Soll-Datensatzes mit wenigstens finalen einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicken, durch welche die Soll-Messkurve in der Simulations-Soll-Messkurve zumindest angenähert wird, bis für das Zuordnungskriterium ein nach einem statistischen Auswahlverfahren stabiles Ergebnis erreicht ist; wobei als Startwerte der einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicken die einen oder mehreren Simulation-Ist-Schichtdicken verwendet werden; sowie

(v) Bereitstellen des finalen Simulations-Soll-Datensatzes für die wenigstens eine Beschichtungsanlage als neuer Anlagen-Datensatz zur Abscheidung eines weiteren Schichtsystems mit wenigstens einen oder mehreren Korrektur-Ist-Schichtdicken als neuen einen oder mehreren Anlagen-Ist-Schichtdicken, welche aus den finalen einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicken mit dem finalen Simulations-Soll-Datensatz bestimmt werden.

[0119] Das Computer-Programm-Produkt kann die Software zum Steuern und Betreiben von Beschichtungsanlagen in modularer Weise zur Verfügung stellen und für unterschiedlichste Datenverarbeitungssysteme zugänglich machen.

[0120] Vorteilhaft kann mittels des Computer-Programm-Produkts unter Verwendung des Verfahrens nach dem ersten Aspekt der Erfindung eine Beschichtungsanlage oder ein System von Beschichtungsanlagen selbststeuernd und rückgekoppelt betreibbar sein.

[0121] Nach einem weiteren, insbesondere eigenständigen, Aspekt der Erfindung wird ein Datenverarbeitungssystem zur Ausführung eines Datenverarbeitungsprogramms vorgeschlagen, welches computerlesbare Programmbefehle umfasst, um ein Verfahren zum Betreiben wenigstens einer Beschichtungsanlage zur Herstellung von Schichtsystemen, beispielsweise für optische Elemente, insbesondere wie vorstehend beschrieben, auszuführen. Das Datenverarbeitungssystem kann in günstiger Weise den Simulationsrechner und die Datenbank, aber auch den Steuerrechner der Beschichtungsanlage umfassen.

[0122] Vorteilhaft kann mittels des Datenverarbeitungssystems unter Verwendung des Verfahrens nach dem ersten Aspekt der Erfindung eine Beschichtungsanlage oder ein System von Beschichtungsanlagen selbststeuernd und rückgekoppelt betreibbar sein.

Zeichnung

[0123] Weitere Vorteile ergeben sich aus der folgenden Zeichnungsbeschreibung. In den Figuren sind Ausführungsbeispiele der Erfindung dargestellt. Die Figuren, die Beschreibung und die Ansprüche enthalten zahlreiche Merkmale in Kombination. Der Fachmann wird die Merkmale zweckmäßigerweise auch einzeln betrachten und zu sinnvollen weiteren Kombinationen zusammenfassen.

Figurenliste

Fig. 1 ein Blockdiagramm eines Beschichtungssystems nach einem Ausführungsbeispiel der Erfindung;

Fig. 2 ein Ablauf des Verfahrens zum Betreiben wenigstens einer Beschichtungsanlage zur Herstellung von Schichtsystemen für optische Elemente nach einem Ausführungsbeispiel der Erfindung;

Fig. 3 ein Flussdiagramm des erfindungsgemäßen Verfahrens;

Fig. 4 ein detailliertes Flussdiagramm des erfindungsgemäßen Verfahrens;

Fig. 5 ein optisches Element mit einem Schichtsystem aus fünf Schichtpaketen auf einem Substrat nach einem Ausführungsbeispiel der Erfindung;

Fig. 6 Reflektivitätskurven eines erfindungsgemäßen Schichtsystems bei senkrechtem Lichteinfall mit einer Gegenüberstellung einer Ist-Messkurve und einer Soll-Messkurve im Wellenlängenbereich von 280 nm bis 800 nm;

Fig. 7 eine vergrößerte Darstellung der Reflektivitätskurven von **Fig. 6**;

Fig. 8 Reflektivitätskurven des Schichtsystems bei senkrechtem Lichteinfall mit einer Gegenüberstellung der Soll-Messkurve und einer skalierten Simulations-Soll-Messkurve;

Fig. 9 Reflektivitätskurven des Schichtsystems bei senkrechtem Lichteinfall mit einer Gegenüberstellung der Soll-Messkurve und einer in einem ersten spektralen Intervall von 380 nm bis 580 nm angefitteten Simulations-Soll-Messkurve;

Fig. 10 Reflektivitätskurven des Schichtsystems bei senkrechtem Lichteinfall mit einer Gegenüberstellung der Soll-Messkurve und einer in einem größeren spektralen Intervall von 380 nm bis 780 nm angefitteten Simulations-Soll-Messkurve;

Fig. 11 Reflektivitätskurven des Schichtsystems bei senkrechtem Lichteinfall mit einer Gegenüberstellung der Ist-Messkurve und einer über den gesamten Wellenlängenbereich von 280 nm bis 800 nm angefitteten Simulations-Soll-Messkurve;

Fig. 12 ein Blockdiagramm eines Systems von Beschichtungsanlagen nach einem weiteren Ausführungsbeispiel der Erfindung.

Ausführungsformen der Erfindung

[0124] In den Figuren sind gleichartige oder gleichwirkende Komponenten mit gleichen Bezugszeichen

beziffert. Die Figuren zeigen lediglich Beispiele und sind nicht beschränkend zu verstehen.

[0125] Im Folgenden verwendete Richtungsterminologie mit Begriffen wie „links“, „rechts“, „oben“, „unten“, „davor“ „dahinter“, „danach“ und dergleichen dient lediglich dem besseren Verständnis der Figuren und soll in keinem Fall eine Beschränkung der Allgemeinheit darstellen. Die dargestellten Komponenten und Elemente, deren Auslegung und Verwendung können im Sinne der Überlegungen eines Fachmanns variieren und an die jeweiligen Anwendungen angepasst werden.

[0126] **Fig. 1** zeigt ein Blockdiagramm eines Beschichtungssystems **100** nach einem Ausführungsbeispiel der Erfindung. Vorteilhaft kann das Beschichtungssystem **100** mit einem selbststeuernden und rückgekoppelten Steuerungsprozess betreibbar sein. Das Beschichtungssystem **100** zur Herstellung eines Schichtsystems **10** für ein optisches Element **80** umfasst wenigstens eine Beschichtungsanlage **108** zum Beschichten eines Substrats **22** mit einem Schichtsystem **10** für ein optisches Element **80**.

[0127] Der Aufbau eines optischen Elements **80** mit einem Schichtsystem **10** auf einem Substrat **22** ist in **Fig. 5** dargestellt.

[0128] Weiter umfasst das Beschichtungssystem **100** einen Steuerrechner **110** zum Steuern der Beschichtungsanlage **108** und zur Kommunikation mit einem Simulationsrechner **102**, ein optisches Messgerät zum Bestimmen einer spektral aufgelösten Ist-Messkurve **90** des Schichtsystems **10**, einen Simulationsrechner **102**, auf dem eine Simulationssoftware **104** zur optischen Berechnung und Optimierung des Schichtsystems **10** installiert ist, eine Datenbank **106** zur Speicherung von Anlage-Datensätzen DAT, sowie ein Eingabegerät **114** zur Eingabe und Steuerung des Simulationsrechners **102** und/oder der Beschichtungsanlage **108** über manuelle Eingaben **120**.

[0129] Die Datenbank **106** wird vorzugsweise nach einem, insbesondere eigenständigen, Aspekt zur Durchführung eines Verfahrens nach dem ersten Aspekt der Erfindung eingesetzt.

[0130] Die Datenbank **106** dient zur Speicherung von Anlage-Datensätzen DAT, für ein Verfahren zum Betreiben der Beschichtungsanlage **108** zur Herstellung von Schichtsystemen **10** für optische Elemente **80**, wobei die Anlagen-Datensätze DAT wenigstens Anlagen-Datensätze **DAT_n**, **DAT_n+1**, Soll-Datensätze **DAT_soll**, Simulations-Ist-Datensätze **DAT_ist_sim**, und/oder Simulations-Soll-Datensätze **DAT_soll_sim** umfassen.

[0131] Auf dem Simulationsrechner **102** ist ein Computer-Programm-Produkt für ein Verfahren nach dem ersten Aspekt der Erfindung zum Betreiben wenigstens einer Beschichtungsanlage **108** zur Herstellung von Schichtsystemen **10** für optische Elemente **80** implementiert, wobei das Computer-Programm-Produkt wenigstens ein computerlesbares Speichermedium umfasst, welches Programmbefehle umfasst, die auf dem Computersystem **102** ausführbar sind und das Computersystem **102** dazu veranlassen, das Verfahren auszuführen.

[0132] Das Computer-Programm-Produkt kann als eigenständiger Aspekt der Erfindung angesehen werden, insbesondere zum Ausführen eines Verfahrens nach dem ersten Aspekt der Erfindung auf einem Simulationsrechner **102** eines Datenverarbeitungssystems **124**.

[0133] Das Datenverarbeitungssystem **124**, welches wenigstens den Simulationsrechner **102** und die Simulationssoftware **104** umfasst, dient zur Ausführung eines Datenverarbeitungsprogramms, welches computerlesbare Programmbefehle umfasst, um das Verfahren zum Betreiben der Beschichtungsanlage **108** zur Herstellung von Schichtsystemen **10** für optische Elemente **80**, auszuführen.

[0134] Das Datenverarbeitungssystem **124** kann als eigenständiger Aspekt der Erfindung angesehen werden, insbesondere zum Ausführen eines Verfahrens nach dem ersten Aspekt der Erfindung mit einem Simulationsrechner **102**.

[0135] Die Beschichtungsanlage **108** kann optional eine Komponente **116** zur Anwendung eines künstlichen Alterungsprozesses auf das Schichtsystem **10** umfassen, um bei der spektralen Messung des Schichtsystems **10** in dem optischen Messgerät **112**, **118** stabile Verhältnisse des optischen Elements **80** sicherzustellen.

[0136] In einer weiteren Option kann die Beschichtungsanlage **108** auch ein optisches Messgerät **118** zum Bestimmen einer spektral aufgelösten Ist-Messkurve **90** des Schichtsystems **10** umfassen, sodass in-situ-Messungen der spektralen Eigenschaften des Schichtsystems **10** in der Beschichtungsanlage **108** selbst durchgeführt werden können und ein direktes Feedback an den Simulationsrechner **102** übertragen werden kann.

[0137] In **Fig. 2** ist ein Ablauf des Verfahrens nach einem ersten Aspekt der Erfindung zum Betreiben wenigstens einer Beschichtungsanlage **108** zur Herstellung von Schichtsystemen **10** für optische Elemente **80** nach einem Ausführungsbeispiel der Erfindung graphisch dargestellt und in den **Fig. 3** und **Fig. 4** als Flussdiagram, bzw. als detailliertes Flussdiagramm in einzelnen Schritten beschrieben.

[0138] Das Verfahren zum Betreiben der Beschichtungsanlage **108** nach dem ersten Aspekt der Erfindung umfasst im ersten Schritt **S100** (i) das Erfassen wenigstens einer spektralen Messkurve mit Ordinatenwerten und Abszissenwerten als Ist-Messkurve **90** an einem Ist-Schichtsystem **10_n**, welches aus einer Abfolge von Einzellagen **11**, **12**, **13**, **14**, **15**, **16**, **17**, **18**, **19**, **20** mit jeweiligen Anlagen-Ist-Schichtdicken **d_ist_11**, ..., **d_ist_20** besteht. Die Einzellagen **11**, **12**, **13**, **14**, **15**, **16**, **17**, **18**, **19**, **20** sind dabei nach einem Anlagen-Datensatz **DAT_n** der Beschichtungsanlage **108** hergestellt. Der Anlagen-Datensatz **DAT_n** umfasst wenigstens die Anlagen-Ist-Schichtdicken **d_ist_11**, ..., **d_ist_20** der Einzellagen **11**, **12**, **13**, **14**, **15**, **16**, **17**, **18**, **19**, **20**.

[0139] Im nächsten Schritt **S102** geschieht (ii) das Zuordnen der Ist-Messkurve **90** des Ist-Schichtsystems **10_n** nach einem Zuordnungs-Kriterium, welches insbesondere signifikante spektrale Punkte der Ist-Messkurve **90** umfassen kann, zu einer Soll-Messkurve **92** eines Soll-Datensatzes **DAT_soll** mit Ordinatenwerten und Abszissenwerten, dem ein Soll-Datensatz-Schichtsystem **10_soll**, gebildet aus Einzellagen **11**, **12**, **13**, **14**, **15**, **16**, **17**, **18**, **19**, **20** zugrunde liegt. Der Soll-Datensatz **DAT_soll** umfasst dabei wenigstens bekannte Soll-Schichtdicken **d_soll_11**, ..., **d_soll_20** der Einzellagen **11**, **12**, **13**, **14**, **15**, **16**, **17**, **18**, **19**, **20** und kann über den Simulationsrechner **102** aus der Datenbank **106** abgerufen werden.

[0140] In einem weiteren Schritt **S104** erfolgt (iii) das Generieren einer Simulations-Ist-Messkurve **94** nach einem iterativen Verfahren durch Variieren wenigstens von Simulations-Ist-Schichtdicken **g_ist_11**, ..., **g_ist_20** der Einzellagen **11**, **12**, **13**, **14**, **15**, **16**, **17**, **18**, **19**, **20** in zumindest einem spektralen Intervall **82** der Ist-Messkurve **90**. Dabei ergibt sich ein finaler Simulations-Ist-Datensatz **DAT_ist_sim** mit wenigstens finalen Simulations-Ist-Schichtdicken **g_ist_11**, ..., **g_ist_20**, durch welche die Ist-Messkurve **90** in der Simulations-Ist-Messkurve **94** zumindest angenähert wird. Dieses iterative Verfahren wird solange durchgeführt, bis für das Zuordnungskriterium ein nach einem statistischen Auswahlverfahren stabiles Ergebnis erreicht ist (Überprüfen **S114** und Abfrage **S116** in **Fig. 4**). Als Startwerte der Simulations-Ist-Schichtdicken **g_ist_11**, ..., **g_ist_20** werden bei dem iterativen Verfahren die Soll-Schichtdicken **d_soll_11**, ..., **d_soll_20** verwendet.

[0141] Im nächsten Schritt **S106** erfolgt (iv) das Generieren einer Simulations-Soll-Messkurve **98** nach einem iterativen Verfahren durch Variieren wenigstens der Simulations-Soll-Schichtdicken **g_soll_11**, ..., **g_soll_20** der Einzellagen **11**, **12**, **13**, **14**, **15**, **16**, **17**, **18**, **19**, **20** in zumindest einem spektralen Intervall **82** der Soll-Messkurve **92**. Dabei ergibt sich ein finaler Simulations-Soll-Datensatz **DAT_soll_sim** mit wenigstens finalen Simulations-Soll-Schichtdicken **g_soll_11**, ..., **g_soll_20**, durch welche die Soll-Messkurve **92** in der Simulations-Soll-Messkurve **98** zumindest angenähert wird. Dieses iterative Verfahren wird solange durchgeführt, bis für das Zuordnungskriterium ein nach einem statistischen Auswahlverfahren stabiles Ergebnis erreicht ist (Überprüfen **S115** und Abfrage **S117** in **Fig. 4**). Als Startwerte der Simulations-Soll-Schichtdicken **g_soll_11**, ..., **g_soll_20** werden bei dem iterativen Verfahren die Simulation-Ist-Schichtdicken **g_ist 11**, ..., **g_ist_20** verwendet.

[0142] In einem letzten Schritt **S108** erfolgt (v) das Bereitstellen des finalen Simulations-Soll-Datensatzes **DAT_soll_sim** für die Beschichtungsanlage **108** als neuer Anlagen-Datensatz **DAT_n+1** zur Abscheidung eines weiteren Schichtsystems 10_n+1 mit wenigstens Korrektur-Ist-Schichtdicken **d_korr_11**, ..., **d_korr_20** als neuen Anlagen-Ist-Schichtdicken **d_ist_11**, ..., **d_ist_20**. Diese werden aus den finalen Simulations-Soll-Schichtdicken **g_soll_11**, ..., **g_soll_20** mit dem finalen Simulations-Soll-Datensatz **DAT_soll_sim** bestimmt.

[0143] Zum Generieren der Simulations-Ist-Messkurve **94**, bzw. Simulations-Soll-Messkurve **98** in den Schritten **S104**, bzw. **S106**, kann jeweils in einem Schritt **S110**, bzw. **S111** ein Skalierungsfaktor **122** bestimmt werden als Mittelwert von Quotienten aus Abszissenwerten der Ist-Messkurve **90**, bzw. der Simulations-Ist-Messkurve **94** und der Soll-Messkurve **92** für nach dem Zuordnungskriterium bestimmte Abszissenwerte. Mit diesem Skalierungsfaktor **122** werden die Soll-Schichtdicken **d_soll_11**, ..., **d_soll_20**; bzw. die Simulations-Ist-Schichtdicken **g_ist_11**, ..., **g_ist_20** der Einzellagen **11**, **12**, **13**, **14**, **15**, **16**, **17**, **18**, **19**, **20** skaliert und als Startwerte der Simulations-Ist-Schichtdicken **g_ist_11**, ..., **g_ist_20**, bzw. Simulations-Soll-Schichtdicken **g_soll_11**, ..., **g_soll_20** bestimmt.

[0144] Zum Generieren der Simulations-Ist-Messkurve **94**, bzw. Simulations-Soll-Messkurve **98** in den Schritten **S104**, bzw. **S106**, kann jeweils in einem Schritt **S112**, bzw. **S113**, wenigstens für das erste Intervall **82** für jede der Einzellagen **11**, **12**, **13**, **14**, **15**, **16**, **17**, **18**, **19**, **20** ein Quotient **126** aus der entsprechenden ersten finalen Simulations-Ist-Schichtdicke **g_ist_11**, ..., **g_ist_20**, bzw. der entsprechenden ersten finalen Simulations-Soll-Schichtdicke **g_soll_11**, ..., **g_soll_20** und der entsprechenden Anlagen-Ist-Schichtdicke **d_ist_11**, ... , **d_ist_20**, gebildet werden. Mit dem Quotienten **126** werden erste Simulations-Ist-Schichtdicken **g_ist_11**, ..., **g_ist_20**, bzw. Simulations-Soll-Schichtdicken **g_soll_11**, ..., **g_soll_20** durch Skalieren der Simulations-Ist-Schichtdicken **g_ist_11**, ..., **g_ist_20**, bzw. Simulati-

ons-Soll-Schichtdicken **g_soll_11**, ..., **g_soll_20** mit dem Quotienten **126** generiert.

[0145] In einem Schritt **S114**, bzw. **S115** können die einzelnen ersten Simulations-Ist-Schichtdicken **g_ist_11**, ..., **g_ist_20**, bzw. Simulations-Soll-Schichtdicken **g_soll_11**, ..., **g_soll_20** auf zumindest ein Kriterium, insbesondere eine Plausibilität und/oder eine vorgegebene Abweichung von den jeweiligen Soll-Schichtdicken **g_soll_11**, ..., **g_soll_20** der Soll-Messkurve **94** überprüft werden. Sofern das wenigstens eine Kriterium verfehlt wird, wird das Variieren der Simulations-Ist-Schichtdicken **g_ist_11**, ..., **g_ist_20**, bzw. Simulations-Soll-Schichtdicken **g_soll_11**, ..., **g_soll_20** in den Schritten **S104**, **S106** und das Bereitstellen **S108** von ersten finalen Simulations-Ist-Schichtdicken **g_ist_11**, ..., **g_ist_20** bzw. Simulations-Soll-Schichtdicken **g_soll_11**, ..., **g_soll_20** sowie das Generieren der ersten Simulations-Ist-Schichtdicke **g_ist_11**, ..., **g_ist_20**, bzw. Simulations-Soll-Schichtdicke **g_soll_11**, ..., **g_soll_20** wiederholt, wobei für solche Einzellagen **11**, **12**, **13**, **14**, **15**, **16**, **17**, **18**, **19**, **20**, welche das Kriterium verfehlt haben, eine Beschränkung beim Variieren **S104**, **S106** vorgegeben wird. Anschließen werden die zweiten Simulations-Ist-Schichtdicken **g_ist_11**, ... , **g_ist_20**, bzw. Simulations-Soll-Schichtdicken **g_soll_11**, ..., **g_soll_20** bereitgestellt.

[0146] Die Schritte **S104**, **S106**, **S112**, **S113**, **S114**, **S115** können in einem oder mehreren weiteren spektralen Intervallen **84**, **86** wiederholt werden, wobei jedes folgende Intervall **84**, **86** das vorausgegangene Intervall **82**, **84** einschließt, und wobei die zweiten Simulations-Ist-Schichtdicken **g_ist_11**, ..., **g_ist_20**, bzw. Simulations-Soll-Schichtdicken **g_soll_11**, ..., **g_soll_20** des vorausgegangenen Intervalls **82**, **84** im folgenden Intervall **84**, **86** als Startwerte eingesetzt werden und finale Simulations-Ist-Schichtdicken **g_ist_11**, ..., **g_ist_20**, bzw. Simulations-Soll-Schichtdicken **g_soll_11**, ..., **g_soll_20** bereitgestellt werden.

[0147] Das beschriebene Verfahren zur Herstellung eines Schichtsystems **10** für ein optisches Element **80**, kann vorteilhaft so ausgeführt werden, dass das iterative Verfahren für ein oder mehrere spektrale Intervalle **82**, **84**, **86** durchgeführt wird, wobei jedes folgende Intervall **84**, **86** das vorausgegangene Intervall **82**, **84** einschließt. Weiter kann das beschriebene Verfahren auch zum Einfahren eines Beschichtungsprozesses in wenigstens einer Beschichtungsanlage **108** zur Herstellung eines Schichtsystems **10** für ein optisches Element **80**, benutzt werden.

[0148] Die **Fig. 5** zeigt exemplarisch ein optisches Element **80** mit einem Schichtsystem **10** auf einem Substrat **22**, beispielsweise ein Brillenglas, nach einem Ausführungsbeispiel der Erfindung. Das interferometrisch reflexmindernde Schichtsystem **10** ist auf wenigstens einer Oberfläche **24** des Substrats **22** angeordnet. Vorteilhaft ist das Schichtsystem **10** mit einem selbststeuernden und rückgekoppelten Verfahren nach dem ersten Aspekt der Erfindung herstellbar.

[0149] Als unterste Lage auf dem Substrat **22** kann das Schichtsystem **10** in üblicher Weise eine einlagige oder mehrlagige Zwischenschicht **30** aufweisen, beispielsweise zur Verbesserung der Haftung des Stapels **40** und/oder als Kratzschutz für das Substrat **22**. Diese Zwischenschicht **30** kann in üblicher Weise beispielsweise aus unterstöchiometrischen niederbrechenden Metalloxiden, Chrom, Silanen oder Siloxanen bestehen Die Zwischenschicht **30** ist für die weiteren Betrachtungen der optischen Eigenschaften nicht relevant.

[0150] Auf der Zwischenschicht **30** sind in **Fig. 5** beispielsweise fünf Schichtpakete **42**, **44**, **46**, **48**, **50** eines Stapels **40** aufeinanderfolgend angeordnet.

[0151] Auf der Zwischenschicht **30** ist ein Stapel **40** von mindestens vier, in diesem Beispiel fünf, aufeinander folgenden Schichtpaketen **42**, **44**, **46**, **48**, **50** angeordnet, wobei jedes Schichtpaket **42**, **44**, **46**, **48**, **50** ein Paar von ersten Einzellagen **11**, **13**, **15**, **17**, **19** und zweiten Einzellagen**12**, **14**, **16**, **18**, **20** umfasst.

[0152] Das substratnächste Schichtpaket **42** umfasst die substratnähere Einzellage **11** und die substratfernere Einzellage **12**, das nächste Schichtpaket **44** die substratnähere Einzellage **13** und die substratfernere Einzellage **14**, das darauffolgende Schichtpaket **46** die substratnähere Einzellage **15** und die substratfernere Einzellage **16**, das auf dieses folgende Schichtpaket **48** die substratnähere Einzellage **17** und die substratfernere Einzellage **18** und das substratfernste Schichtpaket **50** die substratnähere Einzellage **19** und die substratfernere Einzellage **20**.

[0153] Optional kann das substratfernste Schichtpaket **50** zwischen der substratnäheren Teilschicht **19** und der substratferneren Teilschicht **20** eine Funktionsschicht **34** aufweisen, welche beispielsweise zur Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit, zur mechanischen Spannungsegalisierung und/oder als Diffusionssperre wirken kann. Diese Funktionsschicht **34** kann aus einem niedrigbrechenden Material gebildet sein, sowie mit anderen Metalloxiden wie zum Beispiel Aluminium legiert sein. Für Berechnungszwecke und Simulationszwecke der optischen Eigenschaften kann die Funktionsschicht **34** der niedrigerbrechenden Teilschicht **20** des obersten, substratfernsten Schichtpakets **50** zugeschlagen werden oder gegebenenfalls, beispielsweise bei verhältnismäßig geringer Schichtdicke, unberücksichtigt bleiben.

[0154] In jedem Schichtpaket **42**, **44**, **46**, **48**, **50** weisen die entsprechenden ersten Einzellagen **11**, **13**, **15**, **17**, **19** jeweils eine erste optische Dicke **t1** und die entsprechenden zweiten Einzellagen **12**, **14**, **16**, **18**, **20** jeweils eine zweite, von der ersten optischen Dicke **t1** im jeweiligen Schichtpaket **42**, **44**, **46**, **48**, **50** verschiedene optische Dicke **t2** auf.

[0155] Ein Brechungsindex n1 der jeweils substratnäheren ersten Einzellagen **11**, **13**, **15**, **17**, **19** ist größer als ein Brechungsindex n2 der jeweils substratferneren zweiten Einzellagen **12**, **14**, **16**, **18**, **20** des Stapels **40**. Das Schichtsystem **10** weist eine Helligkeit L*, eine Buntheit C* und einen Bunttonwinkel h einer Restreflexfarbe auf, wobei bei der Betrag einer Änderung Δh des Bunttonwinkels h der Restreflexfarbe in einem Intervall eines Betrachtungswinkels AOI mit den Grenzwerten 0° und 30° bezogen auf eine Oberflächennormale **70** auf das Schichtsystem **10** kleiner als der Betrag einer Änderung ΔC* der Buntheit C* im Intervall des Betrachtungswinkels AOI ist.

[0156] Betrachtet wird das Schichtsystem von einem Betrachter in einem Betrachtungswinkel AOI von 0° bis zu einem Grenzwinkel, beispielsweise 30°, gemessen von der Oberflächennormalen **70** aus.

[0157] Um das Schichtsystem **10** zu entwerfen, werden günstigerweise folgende Schritte durchgeführt:

- Definieren eines Schichtdesigns, umfassend zumindest ein erstes Material für hochbrechende erste Einzellagen **11**, **13**, **15**, **17**, **19** und ein zweites Material für niedrigbrechende zweite Einzellagen **12**, **14**, **16**, **18**, **20**, Anzahl gewünschter Schichtpakete **42**, **44**, **46**, **48**, **50** mit den Einzellagen **11**, **12**, **13**, **14**, **15**, **16**, **17**, **18**, **19**, **20**, Startwerte der Dicke der Einzellagen **11**, **12**, **13**, **14**, **15**, **16**, **17**, **18**, **19**, **20**;

- Definieren von Ziel-Farbwerten, umfassend Helligkeit L*, Buntheit C* und Bunttonwinkel h zumindest an Grenzwerten für ein Intervall eines Betrachtungswinkels AOI mit Grenzwerten von 0° und 30°;

- Durchführen eines Optimierungsverfahrens zur Variation der Einzelschichtdicken **d_ist_11**, ..., **d_ist_20**, bis ein Optimierungsziel erreicht ist

[0158] Das Substrat **22** ist beispielsweise ein Kunststoff, insbesondere ein transparenter Kunststoff für ein Brillenglas.

[0159] Der Begriff Brillenglas bezeichnet im Rahmen der vorliegenden Offenbarung insbesondere ein beschichtetes Brillenglas gemäß Abschnitt 8.1.13 der Norm DIN EN ISO 13666:2013-10, also ein Brillenglas, auf das eine oder mehrere Oberflächenbeschichtungen aufgebracht wurden, insbesondere um eine oder mehrere seiner Eigenschaften zu ändern.

[0160] Bevorzugt können solche Brillengläser insbesondere vorteilhaft eingesetzt werden als Brillen (mit und ohne Korrektur), Sonnenbrillen, Skibrillen, Arbeitsplatzbrillen, sowie Brillen in Verbindung mit kopfgetragenen Anzeigeeinrichtungen (so genannte „head-mounted displays“).

[0161] Der Begriff Brillenglas kann im Rahmen der vorliegenden Offenbarung ferner Brillenglas-Halbfabrikate umfassen, insbesondere ein Brillenglasblank oder Brillenglas-Halbfertigprodukt gemäß Abschnitt **8.4.2** der Norm DIN EN ISO 13666:2013-10, also einen Linsenrohling oder Blank mit nur einer optischen fertig bearbeiteten Fläche.

[0162] Bezogen auf die Ausgestaltungen in **Fig. 5** kann die gegenüberliegende Oberfläche **26** des Substrats **22** optional ein weiteres, ähnliches oder identisches Schichtsystem **10**, keine Beschichtung oder lediglich schützende Beschichtung aufweisen (nicht dargestellt).

[0163] Vorzugsweise ist jede der substratnäheren Einzellagen **11**, **13**, **15**, **17**, **19** aus einem identischen ersten Material gebildet. Vorzugsweise ist das erste Material ein höherbrechendes Material mit einem ersten Brechungsindex n1.

[0164] Vorzugsweise ist jede der substratfernen Einzellagen **12**, **14**, **16**, **18**, **20** aus einem identischen zweiten Material gebildet. Vorzugsweise ist das zweite Material ein niedrigbrechendes Material mit einem zweiten Brechungsindex n2. Der Brechungsindex n1 ist größer als der Brechungsindex n2, vorzugsweise ist der Unterschied der Brechungsindizes n1, n2 mindestens 0,2, vorzugsweise bis mindestens 0,5.

[0165] Die Reihenfolge der ersten Einzellagen **11**, **13**, **15**, **17**, **19** und zweiten Einzellagen **12**, **14**, **16**, **187**, **20** bleibt im Stapel **40** gleich, so dass in jedem Schichtpaket **42**, **44**, **46**, **48**, **50** die jeweilige substratnähere erste Einzellage **11**, **13**, **15**, **17**, **19** immer die höherbrechende und die jeweilige substratfernere zweite Einzellage **12**, **14**, **16**, **18**, 20immer die niedrigbrechende der Einzellagen **11**, **12**, **13**, **14**, **15**, **16**, **17**, **18**, **19**, **20** ist.

[0166] Insbesondere kann es sich bei den höherbrechenden Einzellagen **11**, **13**, **15**, **17**, **19** um Schichten aus hochbrechenden Materialien handeln und bei den niedrigerbrechenden Einzellagen **12**, **14**, **16**, **18**, **20** um Schichten aus niedrigbrechenden Materialien.

[0167] Die Schichtpakete **42**, **44**, **46**, **48**, **50** im Stapel **40** unterscheiden sich nur in ihrer jeweiligen Dicke und/oder in den Dicken der einzelnen Einzellagen **11**, **12**, **13**, **14**, **15**, **16**, **17**, **18**, **19**, **20** im jeweiligen Schichtpaket **42**, **44**, **46**, **48**, **50**.

[0168] Der Stapel **40** ist in an sich bekannter Weise mit einer Deckschicht **32** abgeschlossen, die beispielsweise der Pflege des Schichtsystems **10** dient. Die Deckschicht **32** wird auf die letzte optisch relevante Einzellage **20** des obersten Schichtpakets **50** des Stapels **40** aufgebracht und kann beispielsweise fluorhaltige Moleküle enthalten. Die Deckschicht **32** verleiht dem Stapel **40** üblicherweise eine verbesserte Pflegeeigenschaft, mit Eigenschaften wie eine wasserabweisende und ölabweisende Funktion bei einer Oberflächenenergie von typischerweise kleiner 15 mN/m.

[0169] Die Deckschicht **32** ist für die weiteren Betrachtungen der optischen Eigenschaften des Schichtsystems **10** nicht weiter relevant.

[0170] Die optischen Eigenschaften des Stapels **40** des Schichtsystems **10** können rechnerisch mittels an sich bekannter Berechnungsverfahren und/oder Optimierungsverfahren simuliert werden. Die Herstellung des Schichtsystems **10** erfolgt sodann mit den bestimmten Schichtdicken der einzelnen Teilschichten **60**, **62** der Schichtpakete **42**, **44**, **46**, **48**, **50**.

[0171] Bei der Herstellung von optischen Schichtsystemen **10** werden dessen optische Eigenschaften des Schichtsystems **10** bei der Herstellung der Teilschichten **60**, **62** eingestellt. Beispielsweise kann das aus der WO 2016/110339 A1 bekannte Verfahren eingesetzt werden, das im Folgenden kurz umrissen ist. Mit dem bekannten Verfahren können verschiedene optische Effekte wie Verspiegelung oder Reflexminderung in einem Materialsystem erzielt werden, indem nur die Schichtdicken verändert werden, das verwendete Material jedoch gleich bleibt. Es sind jedoch auch andere Verfahren möglich.

[0172] Durch eine in der WO 2016/110339 A1 beschriebene Variation der Schichtpaketdicken bei gleichbleibenden Materialien lassen sich unterschiedliche Reflektivitäten, insbesondere für eine reflexmindernde Wirkung erzielen. Dies wird durch Minimierung bzw. Optimierung eines Parameters σ erreicht. Der Parameter σ ist wiederum eine Funktion der Schichtdicken der Einzellagen **11**, **12**, **13**, **14**, **15**, **16**, **17**, **18**, **19**, **20**, bzw. von Verhältnissen der optischen Dicken **t1**, **t2** der Einzellagen **11**, **12**, **13**, **14**, **15**, **16**, **17**, **18**, **19**, **20** eines jeden der vier Schichtpakete **42**, **44**, **46**, **48** (nicht dargestellt) bzw. fünf Schichtpakete **42**, **44**, **46**, **48**, **50** nach **Fig. 5** im Stapel **40**.

[0173] Bei einer bestimmten Wellenlänge λ bestimmt sich die optische Dicke t einer Schicht, auch FWOT (full wave optical thickness) genannt, zu

$$t = \frac{d}{\lambda} \cdot n$$

wobei d die Schichtdicke, λ die Auslegungswellenlänge und n den Brechungsindex der Einzellagen **11**, **12**, **13**, **14**, **15**, **16**, **17**, **18**, **19**, **20** darstellt.

[0174] Eine reflexmindernde Wirkung durch den Stapel **40** kann für eine vorgebbare Reflektivität $\mathbf{R_m}$ des Stapels **40** erreicht werden, wenn das Produkt aus Reflektivität $\mathbf{R_m}$ und dem Parameter σ kleiner als 1 eingestellt ist:

$$R_m \cdot \sigma < 1$$

[0175] Die Reflektivität $\mathbf{R_m}$, auch Reflexionsgrad genannt, beschreibt hierbei das Verhältnis von reflektierter zu einfallender Intensität eines Lichtstrahls als Energiegröße. Die Reflektivität $\mathbf{R_m}$ wird zweckmäßigerweise über den Bereich des Lichts von 380 nm bis 800 nm gemittelt und auf 100 % bezogen.

[0176] Eine solche Bedingung $R_m \cdot \sigma < 1$ kann für einen Optimierungsprozess des Verfahrens zur Herstellung des Schichtsystems **10** als Randbedingung angesetzt werden.

[0177] Die optischen Dicken **t1**, **t2** der ersten und zweiten Einzellagen **11**, **12**, **13**, **14**, **15**, **16**, **17**, **18**, **19**, **20** der Schichtpakete **42**, **44**, **46**, **48**, **50** werden dadurch bestimmt, dass der Parameter σ mittels eines Optimierungsverfahrens, bevorzugt mittels Variationsrechnung, bestimmt wird.

[0178] Bevorzugt werden dabei die Dicken der jeweiligen Einzellagen **11**, **12**, **13**, **14**, **15**, **16**, **17**, **18**, **19**, **20** bei fünf Schichtpaketen **42**, **44**, **46**, **48**, **50** im Stapel **40** abhängig von einem Quotienten v_i (mit i=1, 2, 3, 4, 5) der ersten optischen Dicke **t1** jeweils der höherbrechenden ersten Einzellagen **11**, **13**, **15**, **17**, **19** und der zweiten optischen Dicke **t2** der niedrigerbrechenden zweiten Einzellagen **12**, **14**, **16**, **18**, **20** des jeweiligen Schichtpakets **42**, **44**, **46**, **48**, **50** gebildet.

[0179] In einer vorteilhaften Ausgestaltung kann bei einem Schichtsystem **10** nach **Fig. 5** der Parameter σ für einen Stapel **40** mit fünf aufeinander folgenden Schichtpaketen **42**, **44**, **46**, **48**, **50** aus der Beziehung

$$\sigma = \frac{V_1}{\sum_{i=2}^{nmax} v_i}$$

bestimmt werden, wobei, i= von 2 bis nmax=5 läuft.

[0180] Die Indizes i=1, 2, 3, 4, 5 stehen für die Reihenfolge der Schichtpakete **42**, **44**, **46**, **48**, **50** auf dem Substrat **22**. Entsprechend stehen $\mathbf{v_1}$ für das substratnächste Schichtpaket **42** und $\mathbf{v_5}$ für das substratfernste Schichtpaket **50**.

[0181] Es ist bekannt, wahrnehmungsbezogene Farben im so genannten CIE-L*a*b* Farbraum (vereinfacht CIELab-Farbraum) in kartesischen Koordinaten anzugeben, wie in der DIN EN ISO 11664-4: 2012-06 (EN ISO 11664-4:2011) dargelegt ist.

[0182] L* ist die CIELab-Helligkeit, a*, b* sind die CIELab-Koordinaten, C* die CIELab-Buntheit und hab der CIELab-Bunttonwinkel.

[0183] Die L*-Achse beschreibt die Helligkeit (Luminanz) der Farbe mit Werten von 0 bis 100. Die L*-Achse steht im Nullpunkt senkrecht auf der a*b*-Ebene. Sie kann auch als Neutralgrauachse bezeichnet werden, da zwischen den Endpunkten Schwarz (L*= 0) und Weiß (L*=100) alle unbunten Farben (Grautöne) enthalten sind.

[0184] Auf der a*-Achse liegen sich Grün und Rot gegenüber, die b*-Achse verläuft zwischen Blau und Gelb. Komplementäre Farbtöne stehen sich jeweils um 180° gegenüber, in ihrer Mitte, d.h. dem Koordinatenursprung a*=0, b*=0, ist Grau.

[0185] Die a*-Achse beschreibt den Grünanteil oder Rotanteil einer Farbe, wobei negative Werte für Grün und positive Werte für Rot stehen. Die b*-Achse beschreibt den Blauanteil oder Gelbanteil einer Farbe, wobei negative Werte für Blau und positive Werte für Gelb stehen.

[0186] Die a*-Werte reichen von ca. -170 bis +100, die b*-Werte von -100 bis +150, wobei die Maximalwerte nur bei mittlerer Helligkeit bestimmter Farbtöne erreicht werden. Der CIELab-Farbkörper hat im mittleren Helligkeitsbereich seine größte Ausdehnung, diese ist aber je nach Farbbereich unterschiedlich in Höhe und Größe.

[0187] Der CIELab-Bunttonwinkel hab muss zwischen 0° und 90° liegen, wenn sowohl a* und b* positiv sind, zwischen 90° und 180°, wenn b* positiv ist und a* negativ, zwischen 180° und 270°, wenn sowohl a* und b* negativ sind und zwischen 270° und 360°, wenn b* negativ ist und a* positiv.

[0188] Beim CIE-L*C*h-Farbraum (vereinfacht CIELCh-Farbraum) sind die kartesischen Koordinaten des CIELab-Farbraums in Polarkoordinaten transformiert. Dabei werden die Zylinderkoordinaten C* (Buntheit, relative Farbsättigung, Entfernung von der L-Achse im Zentrum) und h (Bunttonwinkel, Winkel des Farbtons im CIELab-Farbkreis) angegeben. Die CIELab-Helligkeit L* bleibt dabei unverändert.

[0189] Der Bunttonwinkel h ergibt sich aus den a*- und b*-Achsen

$$h = \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right)$$

[0190] Der Bunttonwinkel h steht hierfür die Farbe des Restreflexes der reflexmindernden Schichtsystems **10**.

[0191] Die Buntheit C* ergibt sich zu

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2}$$

[0192] Die Buntheit C* wird auch als Farbtiefe bezeichnet.

[0193] Um die Schichtdicken **d_soll_11**, ..., **d_soll_20** der Einzellagen **11**, **12**, **13**, **14**, **15**, **16**, **17**, **18**, **19**, **20** festzulegen, wird ein Optimierungsverfahren zur Variation der Einzellagendicken **d_soll_11**, ..., **d_soll_20** durchgeführt, bis ein Optimierungsziel erreicht ist. Das Optimierungsverfahren variiert dann so lange die Einzellagendicken **d_soll_11**, ..., **d_soll_20**, bis das Optimierungsziel (Farbstabilität) erreicht ist.

[0194] Der Bunttonwinkel h kann sich dabei im Intervall des Betrachtungswinkels AOI mit den Grenzwerten 0° und 30° um höchstens 15° ändern, bevorzugt um höchstens 10° ändern. Der Betrag der Änderung Δh des Bunttonwinkels h kann in einem zweiten Intervall eines Betrachtungswinkels AOI von 0° bis zu einem Grenzbetrachtungswinkel ⊖ mit oberen Grenzwerten 30° und 45° bezogen auf die Oberflächennormale **70** auf das Schichtsystem **10** kleiner als der Betrag einer Änderung ΔC* der Buntheit C* im zweiten Intervall des Betrachtungswinkels AOI sein und der Betrag der Buntheit C* kann beim Grenzbetrachtungswinkel ⊖ mindestens ⊖ =2 sein, insbesondere kann der Bunttonwinkel h im zweiten Intervall sich höchstens um 20° ändern, bevorzugt höchstens um 15° ändern.

[0195] Der photopische Reflexionsgrad Rv im Intervall des Betrachtungswinkels AOI mit den Grenzwerten 0° und 30° kann vorteilhaft höchstens 1,5%, bevorzugt höchstens 1,2% sein.

[0196] Der skotopische Reflexionsgrad Rv` im Intervall des Betrachtungswinkels AOI mit den Grenzwerten 0° und 30° kann vorteilhaft höchstens als 1,5%, bevorzugt höchstens 1,2% sein.

[0197] In den **Fig. 6** bis **Fig. 11** sind jeweils Reflektivitätskurven bei senkrechtem Lichteinfall als Ist-Messkurven **90** zusammen mit Soll-Messkurven **92**, bzw. Simulations-Ist-Messkurven **94** dargestellt.

[0198] Fig. 6 zeigt Reflektivitätskurven eines erfindungsgemäßen Schichtsystems **10** mit einer Gegen-

überstellung einer Ist-Messkurve **90** (durchgezogene Linie) und einer Soll-Messkurve **92** (gepunktete Linie) im Wellenlängenbereich von 280 nm bis 800 nm; **Fig. 7** zeigt eine vergrößerte Darstellung der Reflektivitätskurven von **Fig. 6**. Die Soll-Messkurve **92** wurde dabei mittels Extremwert-Vergleich aus der Datenbank **106** als Soll-Messkurve **92** zur Ist-Messkurve **90** ermittelt. Man erkennt eine starke Peak-Verschiebung im niederen Wellenlängenbereich zwischen 280 nm und 380 nm und in der vergrößerten Darstellung in **Fig. 7** im Wellenlängenbereich von 380 nm und 680 nm.

[0199] In **Fig. 8** sind Reflektivitätskurven des Schichtsystems **10** mit einer Gegenüberstellung der Soll-Messkurve **92** (gepunktete Linie) und einer skalierten Simulations-Soll-Messkurve **98** (durchgezogene Linie) dargestellt. Es fand so eine horizontale Verschiebung der Simulations-Soll-Messkurve **98** statt. Das komplette Schichtsystem **10** wurde dabei skaliert, d.h. es wurde der Vektor, der alle physikalischen Schichtdicken **g_soll_11**, ..., **g_soll_20** der das Schichtsystem **10** repräsentierenden Einzelschichten **11**, **12**, **13**, **14**, **15**, **16**, **17**, **18**, **19**, **20** erhält, mit einem Skalierungsfaktor **122** multipliziert, d.h. jede Einzelschicht **11**, **12**, **13**, **14**, **15**, **16**, **17**, **18**, **19**, **20** wurde um den gleichen Skalierungsfaktor **122** dicker bzw. dünner gemacht.

[0200] **Fig. 9** zeigt Reflektivitätskurven des Schichtsystems **10** mit einer Gegenüberstellung der Soll-Messkurve **92** und einer in einem ersten spektralen Intervall **82** von 380 nm bis 580 nm angefitteten Simulations-Soll-Messkurve **98**. Dabei wurde für das iterative Optimierungsverfahren der Simplex-Algorithmus angewendet. Der Algorithmus wurde mit dem Optimierungsziel gestartet, die Simulations-Soll-Messkurve **98** aus dem vorherigen Schritt möglichst passgenau auf die Soll-Messkurve **92** im Intervall 380 nm bis 580 nm abzubilden durch Änderung der physikalischen Schichtdicken **g_soll_11**, ..., **g_soll_20**. Es ergibt sich eine sehr gute Annäherung der beiden Messkurven **92**, **98** in dem gewählten Intervall **82**.

[0201] In **Fig. 10** sind Reflektivitätskurven des Schichtsystems **10** mit einer Gegenüberstellung der Soll-Messkurve **92** und einer in einem größeren spektralen Intervall **84** von 380 nm bis 780 nm angefitteten Simulations-Soll-Messkurve **98** dargestellt. Dieses Mal wurde eine Simplex-Optimierung in dem größeren Intervall **84** von 380 nm bis 780 nm angewandt. Es wurden keine Schichtdickenrelationen berücksichtigt. Im unteren Wellenlängenbereich um 400 nm ist die Qualität der Übereinstimmung der beiden Messkurven **92**, **98** geringfügig schlechter, während sie im oberen Wellenlängenbereich von 580 nm bis 680 nm besser ist.

[0202] **Fig. 11** zeigt Reflektivitätskurven des Schichtsystems **10** mit einer Gegenüberstellung der Soll-Messkurve **92** und einer über den gesamten Wellenlängenbereich als Intervall **86** von 280 nm bis 800 nm angefitteten Simulations-Soll-Messkurve **98**. Dieses Mal wurde eine Simplex-Optimierung in dem größeren Intervall **86** von 280 nm bis 800 nm angewandt. Es wurden keine Schichtdickenrelationen berücksichtigt. Die Qualität der Übereinstimmung der beiden Messkurven **92**, **98** ist im mittleren Wellenlängenbereich von 480 nm bis 580 nm geringfügig schlechter geworden, jedoch im gesamten Wellenlängenbereich von 280 nm bis 800 nm im Mittel besser.

[0203] **Fig. 12** zeigt ein Blockdiagramm eines Systems **200** von Beschichtungsanlagen **108** nach einem weiteren Ausführungsbeispiel der Erfindung. Das System **200** kann auch als eigenständiges System betrachtet werden, das mit einem selbststeuernden und rückgekoppelten Steuerungsprozess nach dem ersten Aspekt der Erfindung betrieben werden kann. Das System **200** von Beschichtungsanlagen **108** zur Herstellung von Schichtsystemen **10** für optische Elemente **80** umfasst dabei zwei Beschichtungsanlagen **108** zum Beschichten eines Substrats **22** mit einem Schichtsystem **10** für ein optisches Element **80**, jeweils einen Steuerrechner **110** zum Steuern einer Beschichtungsanlage **108** und zur Kommunikation mit einem Simulationsrechner **102**, jeweils ein optisches Messgerät **112** pro Beschichtungsanlage **108** zum Bestimmen einer spektral aufgelösten Ist-Messkurve **90** des Schichtsystems **10**, sowie einen Simulationsrechner **102**, auf dem eine Simulationssoftware **104** zur optischen Berechnung und Optimierung des Schichtsystems **10** installiert ist, und welcher mit den Steuerungsrechnern **102** der Beschichtungsanlagen **108** kommuniziert. Weiter umfasst das System **200**
eine Datenbank **106** zur Speicherung von Anlage-Datensätzen DAT, ein Eingabegerät **114** zur Eingabe und Steuerung des Simulationsrechners **102** und/oder der Beschichtungsanlagen **108**. Mit einem solchen System **200** von Beschichtungsanlagen **108** ist es vorteilhaft möglich, mehrere Beschichtungsanlagen **108** über einen Simulationsrechner **102** zu steuern und die Beschichtungsprozesse für die Fertigung von optischen Elementen **80** mit Schichtsystemen **10** einzufahren und/oder zu optimieren.

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- WO 2016/110339 A1 [0009, 0171, 0172]

Zitierte Nicht-Patentliteratur

- Norm DIN EN ISO 13666:2013-10 [0009, 0016, 0017, 0019, 0159, 0161]
- EN ISO 13666:2012 [0016]
- DIN EN ISO 11664-4:2012-06 [0016, 0181]

Patentansprüche

1. Verfahren zum Betreiben wenigstens einer Beschichtungsanlage (108) zur Herstellung von Schichtsystemen (10), umfassend
(i) Erfassen (S100) wenigstens einer spektralen Messkurve mit Ordinatenwerten und Abszissenwerten als Ist-Messkurve (90) an einem Ist-Schichtensystem (10_n), welches aus einer oder mehreren Einzellagen (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) mit jeweiligen einen oder mehreren Anlagen-Ist-Schichtdicken (d_ist_11, ..., d_ist_20) besteht, wobei die eine oder mehreren Einzellagen (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) nach einem Anlagen-Datensatz (DAT_n) der wenigstens einen Beschichtungsanlage (108) hergestellt sind, wobei der Anlagen-Datensatz (DAT_n) wenigstens die einen oder mehreren Anlagen-Ist-Schichtdicken (d_ist_11, ..., d_ist_20) der einen oder mehreren Einzellagen (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) umfasst;
(ii) Zuordnen (S102) der Ist-Messkurve (90) des Ist-Schichtsystems (10_n) nach einem Zuordnungs-Kriterium, insbesondere für signifikante spektrale Punkte, der Ist-Messkurve (90), zu einer Soll-Messkurve (92) eines Soll-Datensatzes (DAT_soll) mit Ordinatenwerten und Abszissenwerten, dem ein Soll-Datensatz-Schichtsystem (10_soll), gebildet aus einer oder mehreren Einzellagen (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20), zugrunde liegt, wobei der Soll-Datensatz (DAT_soll) wenigstens bekannte eine oder mehrere Soll-Schichtdicken (d_soll_11, ..., d_soll_20) der einen oder mehreren Einzellagen (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) umfasst;
(iii) Generieren (S104) einer Simulations-Ist-Messkurve (94) nach einem iterativen Verfahren durch Variieren wenigstens von einer oder mehreren Simulations-Ist-Schichtdicken (g_ist_11, ..., g_ist_20) der einen oder mehreren Einzellagen (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) in zumindest einem spektralen Intervall (82) der Ist-Messkurve (90) und Erhalt eines finalen Simulations-Ist-Datensatzes (DAT_ist_sim) mit wenigstens finalen einen oder mehreren Simulations-Ist-Schichtdicken (g_ist_11, ..., g_ist_20), durch welche die Ist-Messkurve (90) in der Simulations-Ist-Messkurve (94) zumindest angenähert wird, bis für das Zuordnungskriterium ein nach einem statistischen Auswahlverfahren stabiles Ergebnis erreicht ist (S116), wobei als Startwerte der einen oder mehreren Simulations-Ist-Schichtdicken (g_ist_11, ..., g_ist_20) die eine oder mehrere Soll-Schichtdicken (d_soll_11, ..., d_soll_20) verwendet werden;
(iv) Generieren (S106) einer Simulations-Soll-Messkurve (98) nach einem iterativen Verfahren durch Variieren wenigstens der einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicken (g_soll_11, ..., g_soll_20) der einen oder mehreren Einzellagen (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) in zumindest einem spektralen Intervall (82) der Soll-Messkurve (92) und Erhalt eines finalen Simulations-Soll-Datensatzes (DAT_soll_sim) mit wenigstens finalen einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicken (g_soll_11, ..., g_soll_20, durch welche die Soll-Messkurve (92) in der Simulations-Soll-Messkurve (98) zumindest angenähert wird, bis für das Zuordnungskriterium ein nach einem statistischen Auswahlverfahren stabiles Ergebnis erreicht ist (S116); wobei als Startwerte der einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicken (g_soll_11, ..., g_soll_20) die einen oder mehreren Simulation-Ist-Schichtdicken (g_ist_11, ..., g_ist_20) verwendet werden;
(v) Bereitstellen (S108) des finalen Simulations-Soll-Datensatzes (DAT_soll_sim) für die wenigstens eine Beschichtungsanlage (108) als neuer Anlagen-Datensatz (DAT_n+1) zur Abscheidung eines weiteren Schichtsystems (10_n+1) mit wenigstens einen oder mehreren Korrektur-Ist-Schichtdicken (d_korr_11, ..., d_korr_20) als neuen einen oder mehreren Anlagen-Ist-Schichtdicken (d_ist_11, ..., d_ist_20) welche aus den finalen einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicken (g_soll_11, ..., g_soll_20) mit dem finalen Simulations-Soll-Datensatz (DAT_soll_sim) bestimmt werden.

2. Verfahren nach Anspruch 1, zum Generieren (S104, S106) der Simulations-Ist-Messkurve (94), bzw. Simulations-Soll-Messkurve (98), weiterhin umfassend
Bestimmen (S110) eines Skalierungsfaktors (122) als Mittelwert von Quotienten aus Abszissenwerten der Ist-Messkurve (90), bzw. Simulations-Ist-Messkurve (94) und der Soll-Messkurve (92) für nach dem Zuordnungskriterium bestimmte Abszissenwerte und Skalieren der einen oder mehreren Soll-Schichtdicken (d_soll_11, ..., d_soll_20); bzw. der einen oder mehreren Simulations-Ist-Schichtdicke (g_ist_11, ..., g_ist_20) der einen oder mehreren Einzellagen (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) mit dem Skalierungsfaktor (122) als Startwerte der einen oder mehreren Simulations-Ist-Schichtdicken (g_ist_11, ..., g_ist_20), bzw. der einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicke (g_soll_11, ..., g_soll_20).

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, zum Generieren (S104, S106) der Simulations-Ist-Messkurve (94), bzw. Simulations-Soll-Messkurve (98), weiterhin umfassend
wenigstens für das erste Intervall (82) für die eine oder jede der mehreren Einzellagen (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) Bilden (S112) eines Quotienten (126) aus der entsprechenden ersten finalen Simulations-Ist-Schichtdicke (g_ist_11, ..., g_ist_20), bzw. der entsprechenden ersten finalen Simulations-Soll-Schichtdicke (g_soll_11, ..., g_soll_20) und der entsprechenden Anlagen-Ist-Schichtdicke (d_ist_11, ..., d_ist_20), wobei eine oder mehrere erste Simulations-Ist-Schichtdicken (g_ist_11, ..., g_ist_20)), bzw. eine oder mehrere Simulations-Soll-Schichtdicken (g_soll_11, ... , g_soll_20) durch Skalieren der einen oder mehreren Simulations-Ist-Schichtdicken (g_ist_11, ..., g_ist_20), bzw. einen oder mehreren

Simulations-Soll-Schichtdicken (g_soll_11, ..., g_soll_20) mit dem Quotienten (126) generiert werden.

4. Verfahren nach Anspruch 3, zum Generieren (S104, S106) der Simulations-Ist-Messkurve (94), bzw. Simulations-Soll-Messkurve (98), weiterhin umfassend
Überprüfen (S114) der einen oder mehreren einzelnen ersten Simulations-Ist-Schichtdicken (g_ist_11, ..., g_ist_20), bzw. einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicken (g_soll_11, ..., g_soll_20) auf zumindest ein Kriterium, insbesondere eine Plausibilität und/oder eine vorgegebene Abweichung von den jeweiligen einen oder mehreren Soll-Schichtdicken (g_soll_11, ..., g_soll_20) der Soll-Messkurve (94), und, sofern das wenigstens eine Kriterium verfehlt wird,
Wiederholen des Variierens (S104, S106) der einen oder mehreren Simulations-Ist-Schichtdicken (g_ist_11, ..., g_ist_20), bzw. einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicken (g_soll_11, ..., g_soll_20) und des Bereitstellens (S108) von ersten finalen einen oder mehreren Simulations-Ist-Schichtdicken (g_ist 11, ..., g_ist_20) bzw. einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicken (g_soll_11, ..., g_soll_20) sowie des Generierens der ersten einen oder mehreren Simulations-Ist-Schichtdicke (g_ist_11, ..., g_ist_20), bzw. einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicke (g_soll_11, ..., g_soll_20), wobei für die oder solche der mehreren Einzellagen (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20), welche das Kriterium verfehlt haben, eine Beschränkung beim Variieren (S104, S106) vorgegeben wird, und
Bereitstellen von zweiten eine oder mehrere Simulations-Ist-Schichtdicken (g_ist_11, ..., g_ist_20), bzw. einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicken (g_soll_11, ..., g_soll_20).

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 3 bis 4, umfassend
Wiederholen der Schritte (S104, S106, S112, S113, S114, S115) in einem oder mehreren weiteren spektralen Intervallen (84, 86), wobei jedes folgende Intervall (84, 86) das vorausgegangene Intervall (82, 84) einschließt, wobei die zweiten einen oder mehreren Simulations-Ist-Schichtdicken (g_ist_11, ..., g_ist_20), bzw. einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicken (g_soll_11, ..., g_soll_20) des vorausgegangenen Intervalls (82, 84) im folgenden Intervall (84, 86) als Startwerte eingesetzt werden und
Bereitstellen von finalen einen oder mehreren Simulations-Ist-Schichtdicken (g_ist_11, ..., g_ist_20), bzw. einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicken (g_soll_11, ..., g_soll_20).

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei ein interferometrisch reflexminderndes Schichtsystem (10) auf wenigstens einer Oberfläche (24) eines Substrats (22) abgeschieden wird,
wobei das Schichtsystem (10) einen Stapel (40) von mindestens vier aufeinanderfolgenden Schichtpaketen (42, 44, 46, 48, 50) umfasst, wobei jedes Schichtpaket (42, 44, 46, 48, 50) ein Paar von ersten und zweiten Einzellagen (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) umfasst, wobei die ersten Einzellagen (11, 13, 15, 17, 19) eine erste optische Dicke (t1) und die zweiten Einzellagen (12, 14, 16, 18, 20) eine zweite, von der ersten optischen Dicke (t1) verschiedene optische Dicke (t2) aufweisen,
wobei ein Brechungsindex (n1) der jeweils substratnäheren ersten Einzellagen (11, 13, 15, 17, 19) größer ist als ein Brechungsindex (n2) der jeweils substratferneren zweiten Einzellagen (12, 14, 16, 18, 20) des Stapels (40),
wobei das Schichtsystem (10) eine Helligkeit (L*), eine Buntheit (C*) und einen Bunttonwinkel (h) einer Restreflexfarbe aufweist,
wobei der Betrag einer Änderung (Δh) des Bunttonwinkels (h) der Restreflexfarbe in einem Intervall eines Betrachtungswinkels (AOI) mit den Grenzwerten 0° und 30° bezogen auf eine Oberflächennormale (70) auf das Schichtsystem (10) kleiner als der Betrag einer Änderung (ΔC*) der Buntheit (C*) im Intervall des Betrachtungswinkels (AOI) ist, wobei folgende Schritte ausgeführt werden:
- Definieren eines Schichtdesigns, umfassend zumindest ein erstes Material für hochbrechende erste Einzellagen (11, 13, 15, 17, 19) und ein zweites Material für niedrigbrechende zweite Einzellagen (12, 14, 16, 18, 20), Anzahl gewünschter Schichtpakete (42, 44, 46, 48, 50) mit den Einzellagen (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20), Startwerte der Dicke der Einzellagen (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20);
- Definieren von Ziel-Farbwerten, umfassend Helligkeit (L*), Buntheit (C*) und Bunttonwinkel (h) zumindest an Grenzwerten für ein Intervall eines Betrachtungswinkels (AOI) mit Grenzwerten von 0° und 30°;
Durchführen eines Optimierungsverfahrens zur Variation der Einzelschichtdicken (d_ist_11, ..., d_ist_20), bis ein Optimierungsziel erreicht ist.

7. Verfahren nach Anspruch 6,
wobei der Bunttonwinkel (h) im Intervall des Betrachtungswinkels (AOI) mit den Grenzwerten 0° und 30° sich um höchstens 15° ändert, bevorzugt um höchstens 10° ändert; und/oder
wobei der Betrag der Änderung (Δh) des Bunttonwinkels (h) in einem zweiten Intervall eines Betrachtungswinkels (AOI) von 0° bis zu einem Grenzbetrachtungswinkel (θ) mit oberen Grenzwerten 30° und 45° bezogen auf die Oberflächennormale (70) auf das Schichtsystem (10) kleiner als der Betrag einer Änderung (ΔC*) der Buntheit (C*) im zweiten Intervall des Betrachtungswinkels (AOI) ist und der Betrag der Buntheit (C*) beim Grenzbetrachtungswinkel (θ) mindestens 2 ist, insbesondere wobei der Bunttonwinkel (h) im zweiten Intervall sich höchstens um 20° ändert, bevorzugt höchstens um 15° ändert; und/oder

wobei der photopische Reflexionsgrad (Rv) im Intervall des Betrachtungswinkels (AOI) mit den Grenzwerten 0° und 30° höchstens 1,5%, bevorzugt höchstens 1,2% ist; und/oder
wobei der skotopische Reflexionsgrad (Rv') im Intervall des Betrachtungswinkels (AOI) mit den Grenzwerten 0° und 30° höchstens 1,5%, bevorzugt höchstens 1,2% ist.

8. Verfahren zur Herstellung eines Schichtsystems (10) in wenigstens einer Beschichtungsanlage (108), insbesondere nach wenigstens Anspruch 1, umfassend
(i) Erfassen (S100) wenigstens einer spektralen Messkurve mit Ordinatenwerten und Abszissenwerten als Ist-Messkurve (90) an einem Ist-Schichtsystem (10_n), welches aus einer oder mehreren Einzellagen (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) mit jeweiligen Anlagen-Ist-Schichtdicken (d_ist_11, ..., d_ist_20) besteht, wobei die eine oder mehreren Einzellagen (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) nach einem Anlagen-Datensatz (DAT_n) der wenigstens einen Beschichtungsanlage (108) hergestellt sind, wobei der Anlagen-Datensatz (DAT_n) zumindest die einen oder mehreren Anlagen-Ist-Schichtdicken (d_ist_11, ..., d_ist_20) der einen oder mehreren Einzellagen (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) umfasst;
(ii) Zuordnen (S102) der Ist-Messkurve (90) des Ist-Schichtsystems (10_n) nach einem Zuordnungs-Kriterium, insbesondere für signifikante spektrale Punkte der Ist-Messkurve (90), zu einer Soll-Messkurve (92) eines Soll-Datensatzes (DAT_soll) mit Ordinatenwerten und Abszissenwerten, dem ein Soll-Datensatz-Schichtsystem (10_soll), gebildet aus einer oder mehreren Einzellagen (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) zugrunde liegt, wobei der Soll-Datensatz (DAT_soll) wenigstens eine oder mehrere bekannte Soll-Schichtdicke (d_soll_11, ..., d_soll_20) der einen oder mehreren Einzellagen (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) umfasst;
(iii) Generieren (S104) einer Simulations-Ist-Messkurve (94) nach einem iterativen Verfahren durch Variieren wenigstens von Simulations-Ist-Schichtdicken (g_ist_11, ..., g_ist_20) der einen oder mehreren Einzellagen (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) in zumindest einem spektralen Intervall (82) der Ist-Messkurve (90) und Erhalt eines finalen Simulations-Ist-Datensatzes (DAT_ist_sim) mit wenigstens finalen einen oder mehreren Simulations-Ist-Schichtdicken (g_ist_11, ..., g_ist_20), durch welche die Ist-Messkurve (90) in der Simulations-Ist-Messkurve (94) zumindest angenähert wird, bis für das Zuordnungskriterium ein nach einem statistischen Auswahlverfahren stabiles Ergebnis erreicht ist (S116), wobei als Startwerte der einen oder mehreren Simulations-Ist-Schichtdicken (g_ist_11, ..., g_ist_20) die einen oder mehreren Soll-Schichtdicken (d_soll_11, ..., d_soll_20) verwendet werden;
(iv) Generieren (S106) einer Simulations-Soll-Messkurve (98) nach einem iterativen Verfahren durch Variieren wenigstens der einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicke (g_soll_11, ..., g_soll_20) der einen oder mehreren Einzellagen (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) in zumindest einem spektralen Intervall (82) der Soll-Messkurve (92) und Erhalt eines finalen Simulations-Soll-Datensatzes (DAT_soll_sim) mit wenigstens finalen einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicken (g_soll_11, ..., g_soll_20, durch welche die Soll-Messkurve (92) in der Simulations-Soll-Messkurve (98) zumindest angenähert wird, bis für das Zuordnungskriterium ein nach einem statistischen Auswahlverfahren stabiles Ergebnis erreicht ist (S116); wobei als Startwerte der einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicken (g_soll_11, ..., g_soll_20) die einen oder mehreren Simulation-Ist-Schichtdicken (g_ist_11, ..., g_ist_20) verwendet werden; wobei das iterative Verfahren für ein oder mehrere spektrale Intervalle (82, 84, 86) durchgeführt wird, wobei jedes folgende Intervall (84, 86) das vorausgegangene Intervall (82, 84) einschließt.

9. Verfahren zum Einfahren eines Beschichtungsprozesses in wenigstens einer Beschichtungsanlage (108) zur Herstellung eines Schichtsystems (10), insbesondere nach wenigstens Anspruch 1, umfassend
(i) Erfassen (S100) wenigstens einer spektralen Messkurve mit Ordinatenwerten und Abszissenwerten als Ist-Messkurve (90) an einem Ist-Schichtsystem (10_n), welches aus einer oder mehreren Einzellagen (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) mit jeweiligen Anlagen-Ist-Schichtdicken (d_ist_11, ..., d_ist_20) besteht, wobei die eine oder mehreren Einzellagen (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) nach einem Anlagen-Datensatz (DAT_n) der wenigstens einen Beschichtungsanlage (108) hergestellt sind, wobei der Anlagen-Datensatz (DAT_n) zumindest die einen oder mehreren Anlagen-Ist-Schichtdicken (d_ist_11, ..., d_ist_20) der einen oder mehreren Einzellagen (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) umfasst;
(ii) Zuordnen (S102) der Ist-Messkurve (90) des Ist-Schichtsystems (10_n) nach einem Zuordnungs-Kriterium, insbesondere für signifikante spektrale Punkte der Ist-Messkurve (90), zu einer Soll-Messkurve (92) eines Soll-Datensatzes (DAT_soll) mit Ordinatenwerten und Abszissenwerten, dem ein Soll-Datensatz-Schichtsystem (10_soll), gebildet aus einer oder mehreren Einzellagen (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) zugrunde liegt, wobei der Soll-Datensatz (DAT_soll) zumindest bekannte eine oder mehrere Soll-Schichtdicken (d_soll_11, ..., d_soll_20) der einen oder mehreren Einzellagen (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) umfasst;
(iii) Generieren (S104) einer Simulations-Ist-Messkurve (94) nach einem iterativen Verfahren durch Variieren wenigstens von einen oder mehreren Simulations-Ist-Schichtdicken (g_ist_11, ..., g_ist_20) der einen oder mehreren Einzellagen (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) in zumindest einem spektralen Intervall (82) der Ist-Messkurve (90) und Erhalt eines fi-

nalen Simulations-Ist-Datensatzes (DAT_ist_sim) mit wenigstens finalen einen oder mehreren Simulations-Ist-Schichtdicken (g_ist_11, ..., g_ist_20), durch welche die Ist-Messkurve (90) in der Simulations-Ist-Messkurve (94) zumindest angenähert wird, bis für das Zuordnungskriterium ein nach einem statistischen Auswahlverfahren stabiles Ergebnis erreicht ist (S116), wobei als Startwerte der einen oder mehreren Simulations-Ist-Schichtdicken (g_ist_11, ..., g_ist_20) die einen oder mehreren Soll-Schichtdicken (d_soll_11, ..., d_soll_20) verwendet werden;
(iv) Generieren (S106) einer Simulations-Soll-Messkurve (98) nach einem iterativen Verfahren durch Variieren wenigstens der einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicken (g_soll_11, ..., g_soll_20) der einen oder mehreren Einzellagen (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) in zumindest einem spektralen Intervall (82) der Soll-Messkurve (92) und Erhalt eines finalen Simulations-Soll-Datensatzes (DAT_soll_sim) mit wenigstens finalen einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicken (g_soll_11, ..., g_soll_20, durch welche die Soll-Messkurve (92) in der Simulations-Soll-Messkurve (98) zumindest angenähert wird, bis für das Zuordnungskriterium ein nach einem statistischen Auswahlverfahren stabiles Ergebnis erreicht ist (S116); wobei als Startwerte der einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicken (g_soll_11, ..., g_soll_20) die einen oder mehreren Simulation-Ist-Schichtdicken (g_ist_11, ..., g_ist_20) verwendet werden;
(v) Bereitstellen (S108) des finalen Simulations-Soll-Datensatzes (DAT_soll_sim) für die wenigstens eine Beschichtungsanlage (108) als neuer Anlagen-Datensatz (DAT_n+1) zur Abscheidung eines weiteren Schichtsystems (10_n+1) mit wenigstens einen oder mehreren Korrektur-Ist-Schichtdicken (d_korr_11, ..., d_korr_20) als neuen einen oder mehreren Anlagen-Ist-Schichtdicken (d_ist_11, ..., d_ist_20) welche aus den finalen einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicken (g_soll_11, ..., g_soll_20) mit dem finalen einen oder mehreren Simulations-Soll-Datensatz (DAT_soll_sim) bestimmt werden.

10. Beschichtungssystem (100) zur Herstellung eines Schichtsystems (10), insbesondere nach wenigstens Anspruch 1, umfassend wenigstens
- eine Beschichtungsanlage (108) zum Beschichten eines Substrats (22) mit einem Schichtsystem (10) für ein optisches Element (80),
- einen Steuerrechner (110) zum Steuern der Beschichtungsanlage (108) und zur Kommunikation mit einem Simulationsrechner (102),
- ein optisches Messgerät zum Bestimmen einer spektral aufgelösten Ist-Messkurve (90) des Schichtsystems (10),
- einen Simulationsrechner (102), auf dem eine Simulationssoftware (104) zur optischen Berechnung und Optimierung des Schichtsystems (10) installiert ist,
- eine Datenbank (106) zur Speicherung von Anlage-Datensätzen (DAT),
- ein Eingabegerät (114) zur Eingabe und Steuerung des Simulationsrechners (102) und/oder der Beschichtungsanlage (108).

11. Beschichtungsanlage (108) zur Herstellung eines Schichtsystems (10), insbesondere nach wenigstens Anspruch 1, umfassend eine Komponente (116) zur Anwendung eines künstlichen Alterungsprozesses auf das Schichtsystem (10).

12. Beschichtungsanlage (108) zur Herstellung eines Schichtsystems (10), insbesondere nach wenigstens Anspruch 1,
umfassend
ein optisches Messgerät (118) zum Bestimmen einer spektral aufgelösten Ist-Messkurve (90) des Schichtsystems (10) und/oder
eine Komponente (116) zur Anwendung eines künstlichen Alterungsprozesses auf das Schichtsystem (10).

13. System (200) von Beschichtungsanlagen (108) zur Herstellung von Schichtsystemen (10), insbesondere nach wenigstens Anspruch 1, umfassend wenigstens
- eine oder mehrere Beschichtungsanlagen (108) zum Beschichten eines Substrats (22) mit einem Schichtsystem (10),
- einen oder mehrere Steuerrechner (110) zum Steuern wenigstens einer Beschichtungsanlage (108) und zur Kommunikation mit einem Simulationsrechner (102),
- ein optisches Messgerät (112) zum Bestimmen einer spektral aufgelösten Ist-Messkurve (90) des Schichtsystems (10),
- einen Simulationsrechner (102), auf dem eine Simulationssoftware (104) zur optischen Berechnung und Optimierung des Schichtsystems (10) installiert ist, und welcher mit dem Steuerungsrechner (102) der Beschichtungsanlage (108) kommuniziert,
- eine Datenbank (106) zur Speicherung von Anlage-Datensätzen (DAT),
- ein Eingabegerät (114) zur Eingabe und Steuerung des Simulationsrechners (102) und/oder der einen oder mehreren Beschichtungsanlagen (108).

14. Datenbank (106) zur Speicherung von Anlage-Datensätzen (DAT), für ein Verfahren zum Betreiben wenigstens einer Beschichtungsanlage (108) zur Herstellung von Schichtsystemen (10), insbesondere nach wenigstens Anspruch 1, umfassend
(i) Erfassen (S100) wenigstens einer spektralen Messkurve mit Ordinatenwerten und Abszissenwerten als Ist-Messkurve (90) an einem Ist-Schichtsystem (10_n), welches aus einer oder mehreren Einzellagen (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) mit jeweiligen einen oder mehreren Anlagen-Ist-Schichtdicken (d_ist_11, ..., d_ist_20) besteht, wobei die eine oder mehreren Einzellagen (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) nach einem Anlagen-Datensatz (DAT_

n) der wenigstens einen Beschichtungsanlage (108) hergestellt sind, wobei der Anlagen-Datensatz (DAT_n) wenigstens die einen oder mehreren Anlagen-Ist-Schichtdicken (d_ist_11, ..., d_ist_20) der einen oder mehreren Einzellagen (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) umfasst;
(ii) Zuordnen (S102) der Ist-Messkurve (90) des Ist-Schichtsystems (10_n) nach einem Zuordnungs-Kriterium, insbesondere für signifikante spektrale Punkte der Ist-Messkurve (90), zu einer Soll-Messkurve (92) eines Soll-Datensatzes (DAT_soll) mit Ordinatenwerten und Abszissenwerten, dem ein Soll-Datensatz-Schichtsystem (10_soll), gebildet aus einen oder mehreren Einzellagen (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) zugrunde liegt, wobei der Soll-Datensatz (DAT_soll) wenigstens bekannte eine oder mehrere Soll-Schichtdicken (d_soll_11, ..., d_soll_20) der einen oder mehreren Einzellagen (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) umfasst;
(iii) Generieren (S104) einer Simulations-Ist-Messkurve (94) nach einem iterativen Verfahren durch Variieren wenigstens von einen oder mehreren Simulations-Ist-Schichtdicken (g_ist_11, ..., g_ist_20) der einen oder mehreren Einzellagen (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) in zumindest einem spektralen Intervall (82) der Ist-Messkurve (90) und Erhalt eines finalen Simulations-Ist-Datensatzes (DAT_ist_sim) mit wenigstens finalen einen oder mehreren Simulations-Ist-Schichtdicken (g_ist_11, ..., g_ist_20), durch welche die Ist-Messkurve (90) in der Simulations-Ist-Messkurve (94) zumindest angenähert wird, bis für das Zuordnungskriterium ein nach einem statistischen Auswahlverfahren stabiles Ergebnis erreicht ist (S116), wobei als Startwerte der einen oder mehreren Simulations-Ist-Schichtdicken (g_ist_11, ..., g_ist_20) die einen oder mehreren Soll-Schichtdicken (d_soll_11, ..., d_soll_20) verwendet werden;
(iv) Generieren (S106) einer Simulations-Soll-Messkurve (98) nach einem iterativen Verfahren durch Variieren wenigstens der einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicken (g_soll_11, ..., g_soll_20) der einen oder mehreren Einzellagen (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) in zumindest einem spektralen Intervall (82) der Soll-Messkurve (92) und Erhalt eines finalen Simulations-Soll-Datensatzes (DAT_soll_sim) mit wenigstens finalen einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicken (g_soll_11, ..., g_soll_20, durch welche die Soll-Messkurve (92) in der Simulations-Soll-Messkurve (98) zumindest angenähert wird, bis für das Zuordnungskriterium ein nach einem statistischen Auswahlverfahren stabiles Ergebnis erreicht ist (S116); wobei als Startwerte der einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicken (g_soll_11, ..., g_soll_20) die einen oder mehreren Simulation-Ist-Schichtdicken (g_ist_11, ..., g_ist_20) verwendet werden;
(v) Bereitstellen (S108) des finalen Simulations-Soll-Datensatzes (DAT_soll_sim) für die wenigstens eine Beschichtungsanlage (108) als neuer Anlagen-Datensatz (DAT_n+1) zur Abscheidung eines weiteren Schichtsystems (10_n+1) mit wenigstens einen oder mehreren Korrektur-Ist-Schichtdicken (d_korr_11, ..., d_korr_20) als neuen einen oder mehreren Anlagen-Ist-Schichtdicken (d_ist_11, ..., d_ist_20) welche aus den finalen einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicken (g_soll_11, ..., g_soll_20) mit dem finalen Simulations-Soll-Datensatz (DAT_soll_sim) bestimmt werden, wobei die Anlagen-Datensätze (DAT) wenigstens Anlagen-Datensätze (DAT_n, DAT_n+1), Soll-Datensätze (DAT_soll), Simulations-Ist-Datensätze (DAT_ist_sim), und/oder Simulations-Soll-Datensätze (DAT_soll_sim) umfassen.

15. Computer-Programm-Produkt für ein Verfahren zum Betreiben wenigstens einer Beschichtungsanlage (108) zur Herstellung von Schichtsystemen (10), wobei das Computer-Programm-Produkt wenigstens ein computerlesbares Speichermedium umfasst, welches Programmbefehle umfasst, die auf einem Computersystem (102) ausführbar sind und das Computersystem (102) dazu veranlassen, ein Verfahren auszuführen, insbesondere nach wenigstens Anspruch 1, umfassend
(i) Erfassen (S100) wenigstens einer spektralen Messkurve mit Ordinatenwerten und Abszissenwerten als Ist-Messkurve (90) an einem Ist-Schichtsystem (10_n), welches aus einer Abfolge von einer oder mehreren Einzellagen (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) mit jeweiligen einen oder mehreren Anlagen-Ist-Schichtdicken (d_ist_11, ..., d_ist_20) besteht, wobei die einen oder mehreren Einzellagen (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) nach einem Anlagen-Datensatz (DAT_n) der wenigstens einen Beschichtungsanlage (108) hergestellt sind, wobei der Anlagen-Datensatz (DAT_n) wenigstens die einen oder mehreren Anlagen-Ist-Schichtdicken (d_ist_11, ..., d_ist_20) der einen oder mehreren Einzellagen (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) umfasst;
(ii) Zuordnen (S102) der Ist-Messkurve (90) des Ist-Schichtsystems (10_n) nach einem Zuordnungs-Kriterium, insbesondere für signifikante spektrale Punkte der Ist-Messkurve (90), zu einer Soll-Messkurve (92) eines Soll-Datensatzes (DAT_soll) mit Ordinatenwerten und Abszissenwerten, dem ein Soll-Datensatz-Schichtsystem (10_soll), gebildet aus einen oder mehreren Einzellagen (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) zugrunde liegt, wobei der Soll-Datensatz (DAT_soll) wenigstens bekannte eine oder mehrere Soll-Schichtdicken (d_soll_11, ..., d_soll_20) der einen oder mehreren Einzellagen (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) umfasst;
(iii) Generieren (S104) einer Simulations-Ist-Messkurve (94) nach einem iterativen Verfahren durch Variieren wenigstens von einen oder mehreren Simulations-Ist-Schichtdicken (g_ist_11, ..., g_ist_20) der einen oder mehreren Einzellagen (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) in zumindest einem spektralen Intervall (82) der Ist-Messkurve (90) und Erhalt eines finalen Simulations-Ist-Datensatzes (DAT_ist_sim) mit wenigstens finalen einen oder mehreren Simulati-

ons-Ist-Schichtdicken (g_ist_11, ..., g_ist_20), durch welche die Ist-Messkurve (90) in der Simulations-Ist-Messkurve (94) zumindest angenähert wird, bis für das Zuordnungskriterium ein nach einem statistischen Auswahlverfahren stabiles Ergebnis erreicht ist (S116), wobei als Startwerte der einen oder mehreren Simulations-Ist-Schichtdicken (g_ist_11, ..., g_ist_20) die einen oder mehreren Soll-Schichtdicken (d_soll_11, ..., d_soll_20) verwendet werden;
(iv) Generieren (S106) einer Simulations-Soll-Messkurve (98) nach einem iterativen Verfahren durch Variieren wenigstens der einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicken (g_soll_11, ..., g_soll_20) der einen oder mehreren Einzellagen (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) in zumindest einem spektralen Intervall (82) der Soll-Messkurve (92) und Erhalt eines finalen Simulations-Soll-Datensatzes (DAT_soll_sim) mit wenigstens finalen einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicken (g_soll_11, ..., g_soll_20, durch welche die Soll-Messkurve (92) in der Simulations-Soll-Messkurve (98) zumindest angenähert wird, bis für das Zuordnungskriterium ein nach einem statistischen Auswahlverfahren stabiles Ergebnis erreicht ist (S117); wobei als Startwerte der einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicken (g_soll_11, ..., g_soll_20) die einen oder mehreren Simulation-Ist-Schichtdicken (g_ist_11, ..., g_ist_20) verwendet werden;
(v) Bereitstellen (S108) des finalen Simulations-Soll-Datensatzes (DAT_soll_sim) für die wenigstens eine Beschichtungsanlage (108) als neuer Anlagen-Datensatz (DAT_n+1) zur Abscheidung eines weiteren Schichtsystems (10_n+1) mit wenigstens einen oder mehreren Korrektur-Ist-Schichtdicken (d_korr_11, ..., d_korr_20) als neuen einen oder mehreren Anlagen-Ist-Schichtdicken (d_ist_11, ..., d_ist_20) welche aus den finalen einen oder mehreren Simulations-Soll-Schichtdicken (g_soll_11, ..., g_soll_20) mit dem finalen Simulations-Soll-Datensatz (DAT_soll_sim) bestimmt werden.

16. Datenverarbeitungssystem (124) zur Ausführung eines Datenverarbeitungsprogramms, welches computerlesbare Programmbefehle umfasst, um ein Verfahren zum Betreiben wenigstens einer Beschichtungsanlage (108) zur Herstellung von Schichtsystemen (10), insbesondere nach wenigstens Anspruch 1, auszuführen.

Es folgen 12 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

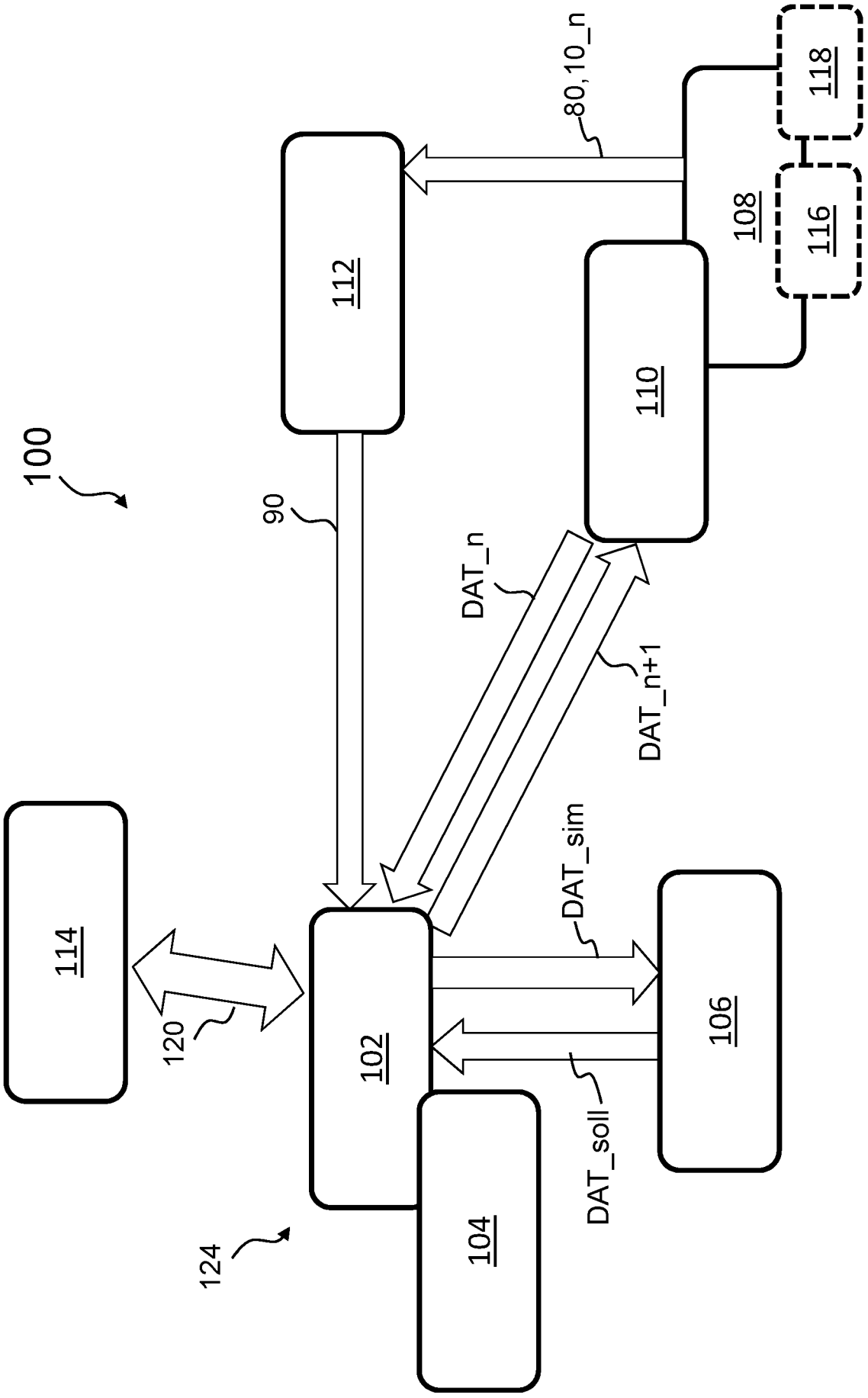


Fig. 1

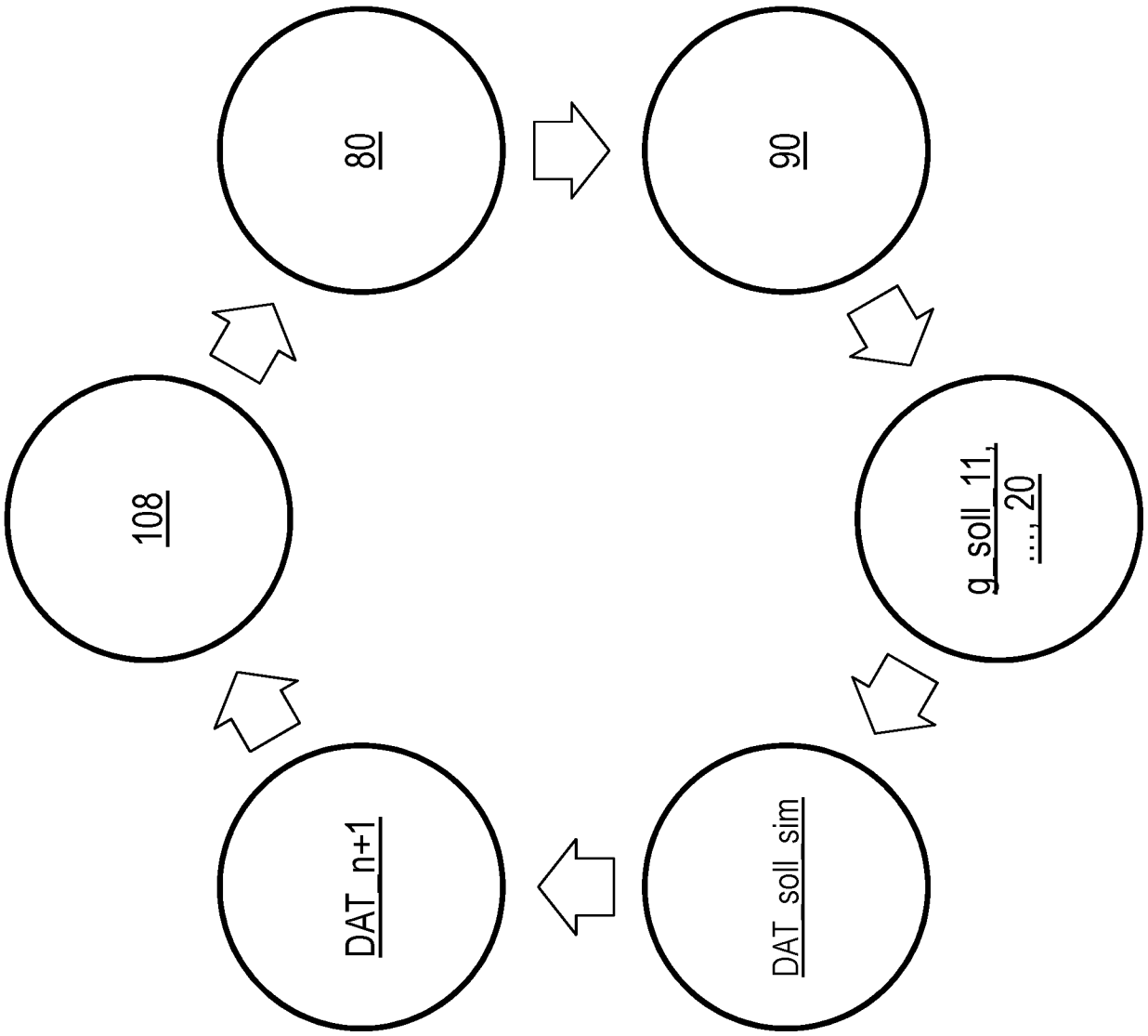


Fig. 2

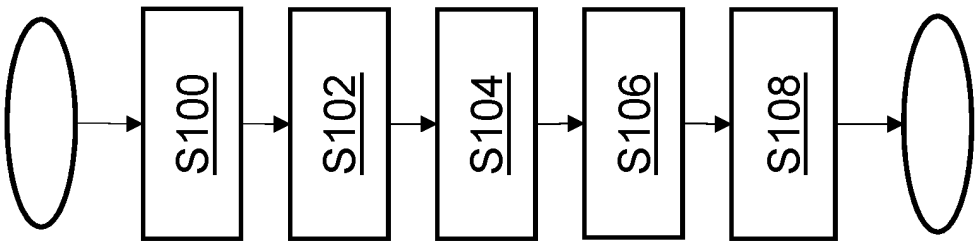


Fig. 3

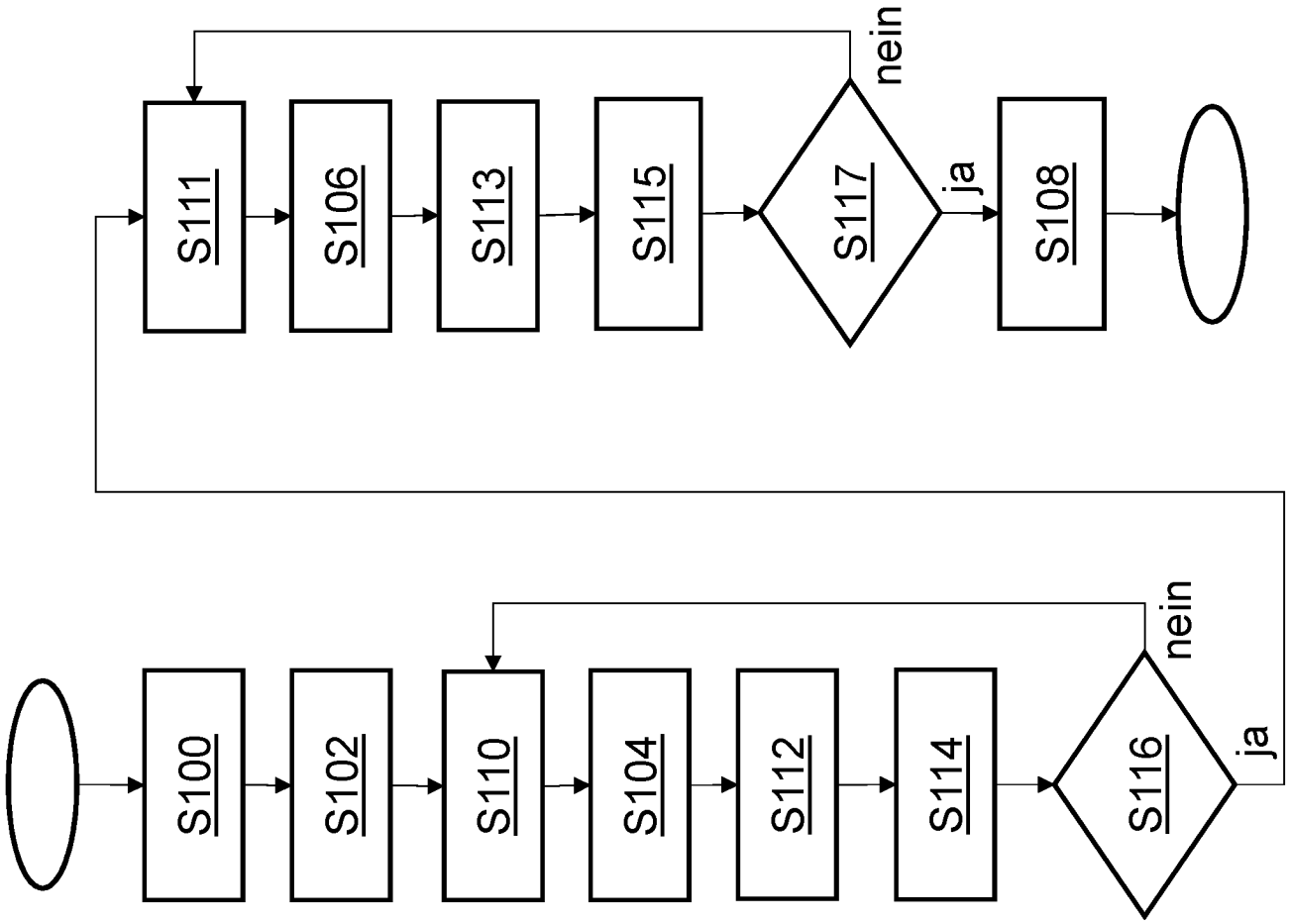

S100
S102
S110
S104
S112
S114
S116
nein
ja
S111
S106
S113
S115
S117
nein
ja
S108

Fig. 4

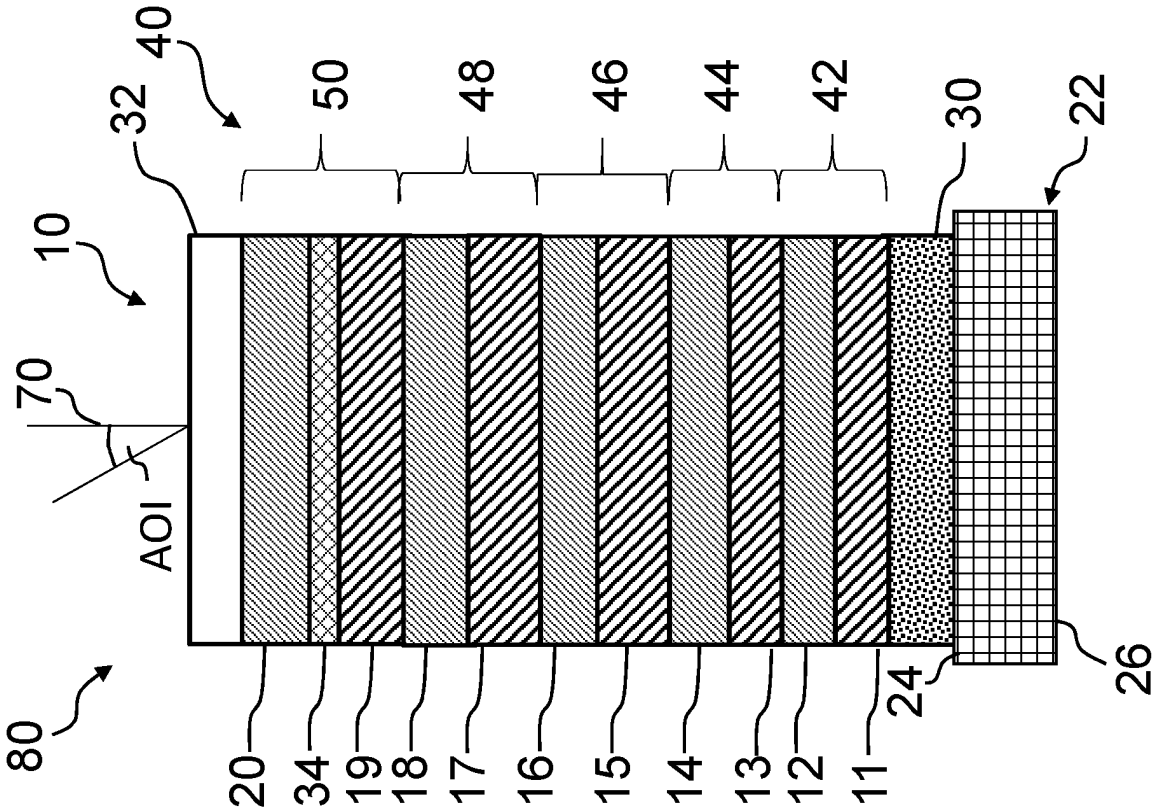

40
50
48
46
44
42
32
30
22
10
70
AOI
80
20
34
19
18
17
16
15
14
13
12
11
24
26

Fig. 5

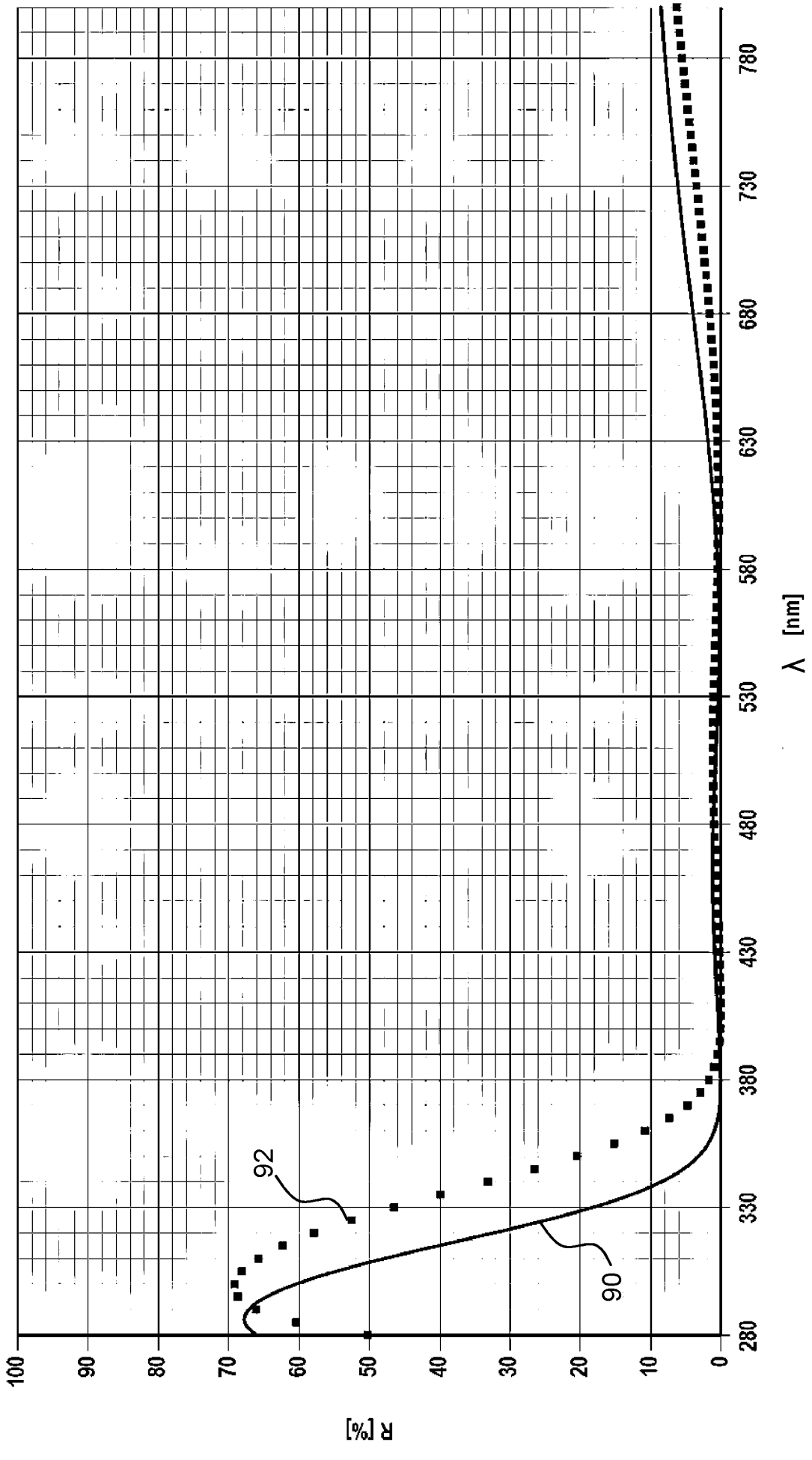

R [%]
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
λ [nm]
280
330
380
430
480
530
580
630
680
730
780
92
90

Fig. 6

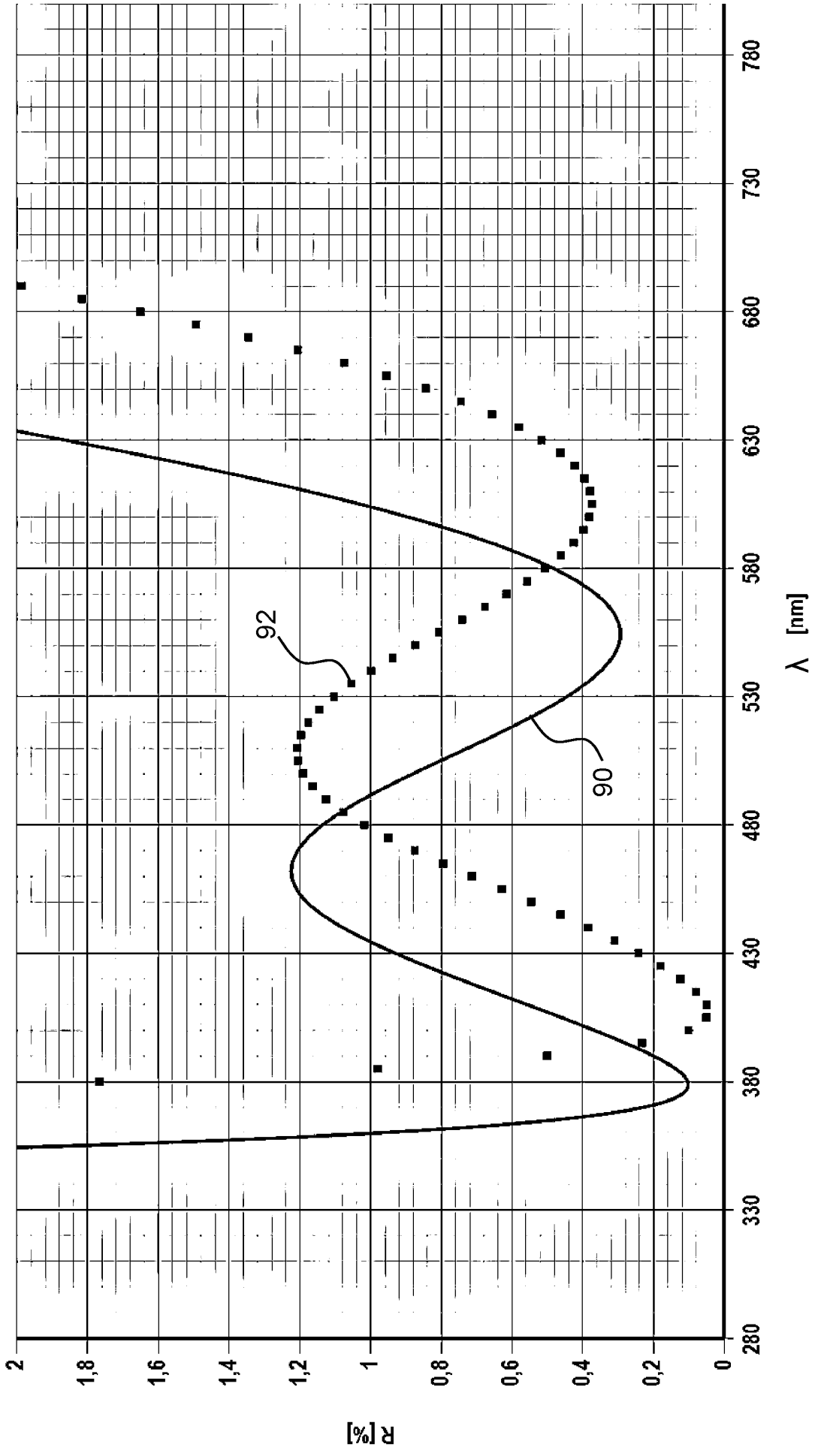

R [%]
2
1,8
1,6
1,4
1,2
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
280
330
380
430
480
530
580
630
680
730
780
λ [nm]
92
90

Fig. 7

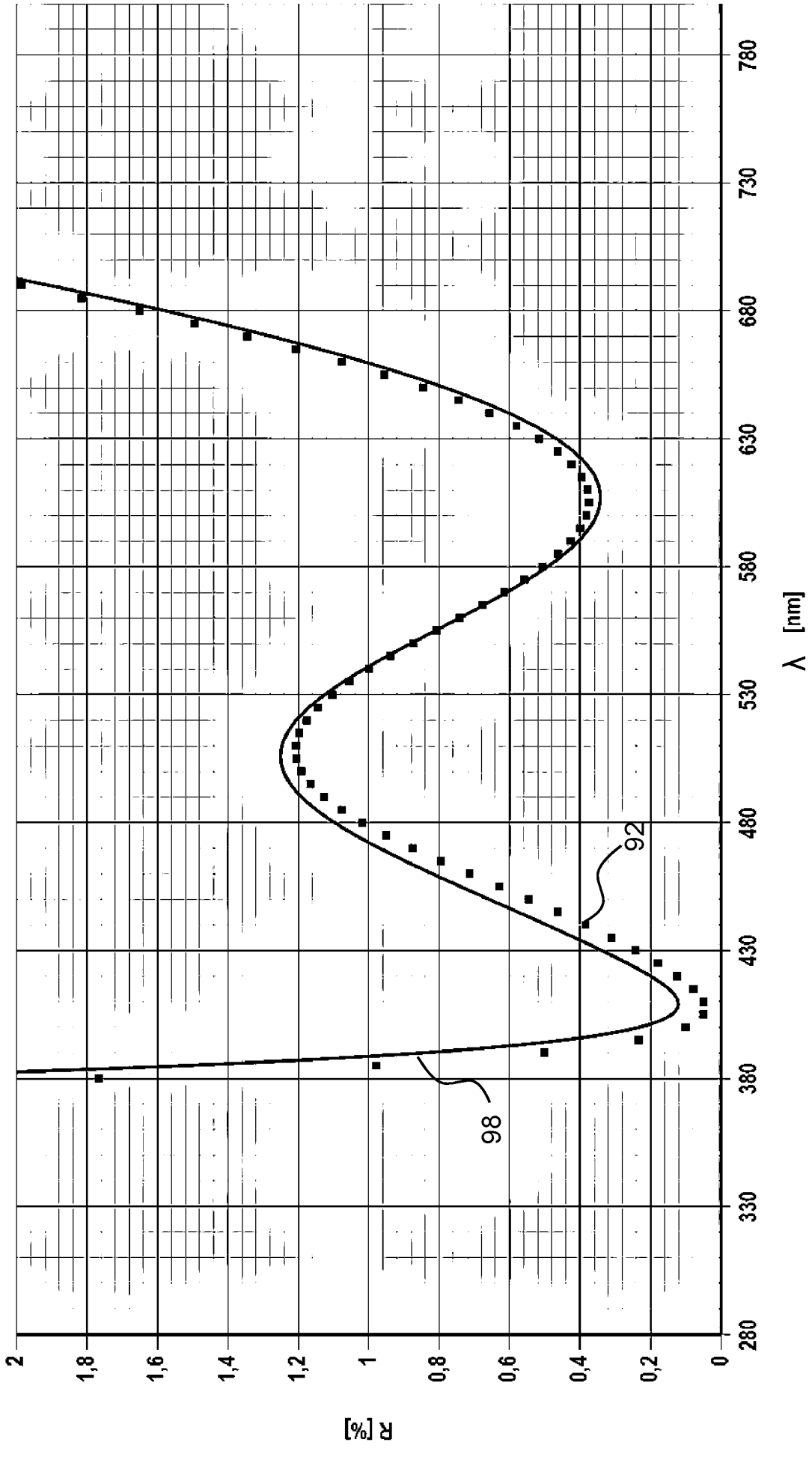

R [%]
2
1,8
1,6
1,4
1,2
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
280
330
380
430
480
530
580
630
680
730
780
λ [nm]
92
98

Fig. 8

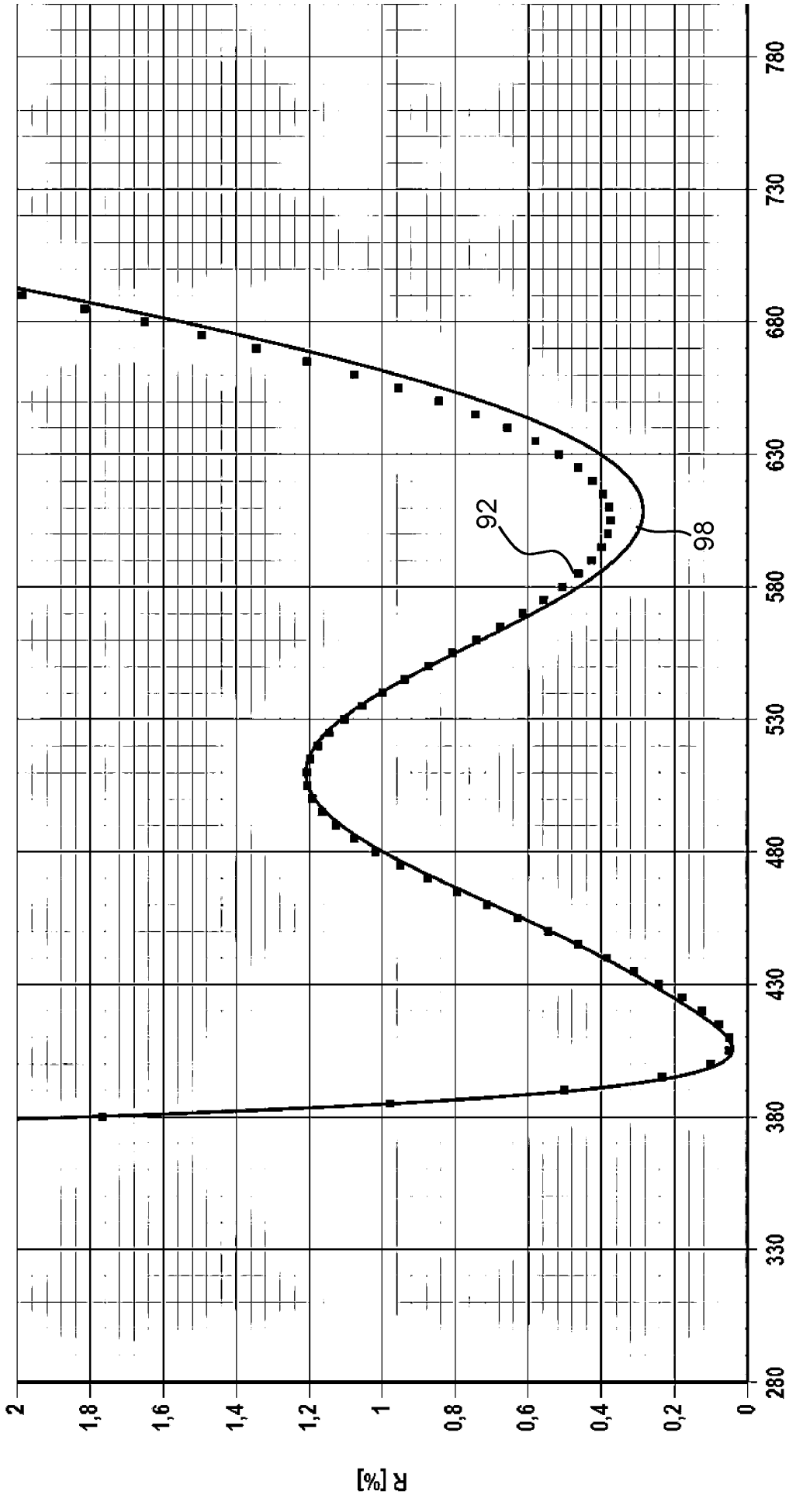

R [%]
2
1,8
1,6
1,4
1,2
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
280
330
380
430
480
530
580
630
680
730
780
λ [nm]
92
98
82

Fig. 9

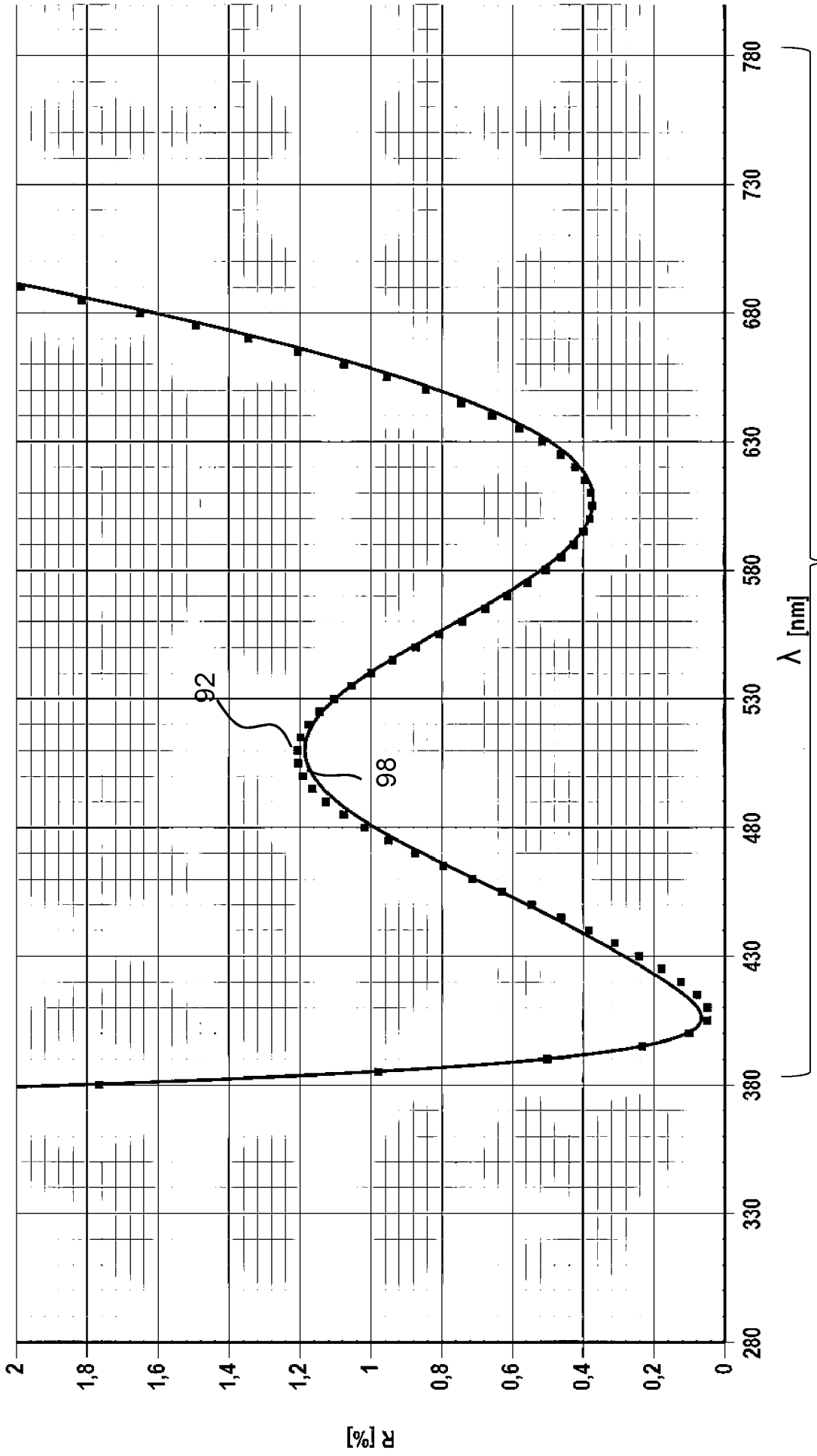

R [%]
2
1,8
1,6
1,4
1,2
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
280
330
380
430
480
530
580
630
680
730
780
λ [nm]
84
92
98

Fig. 10

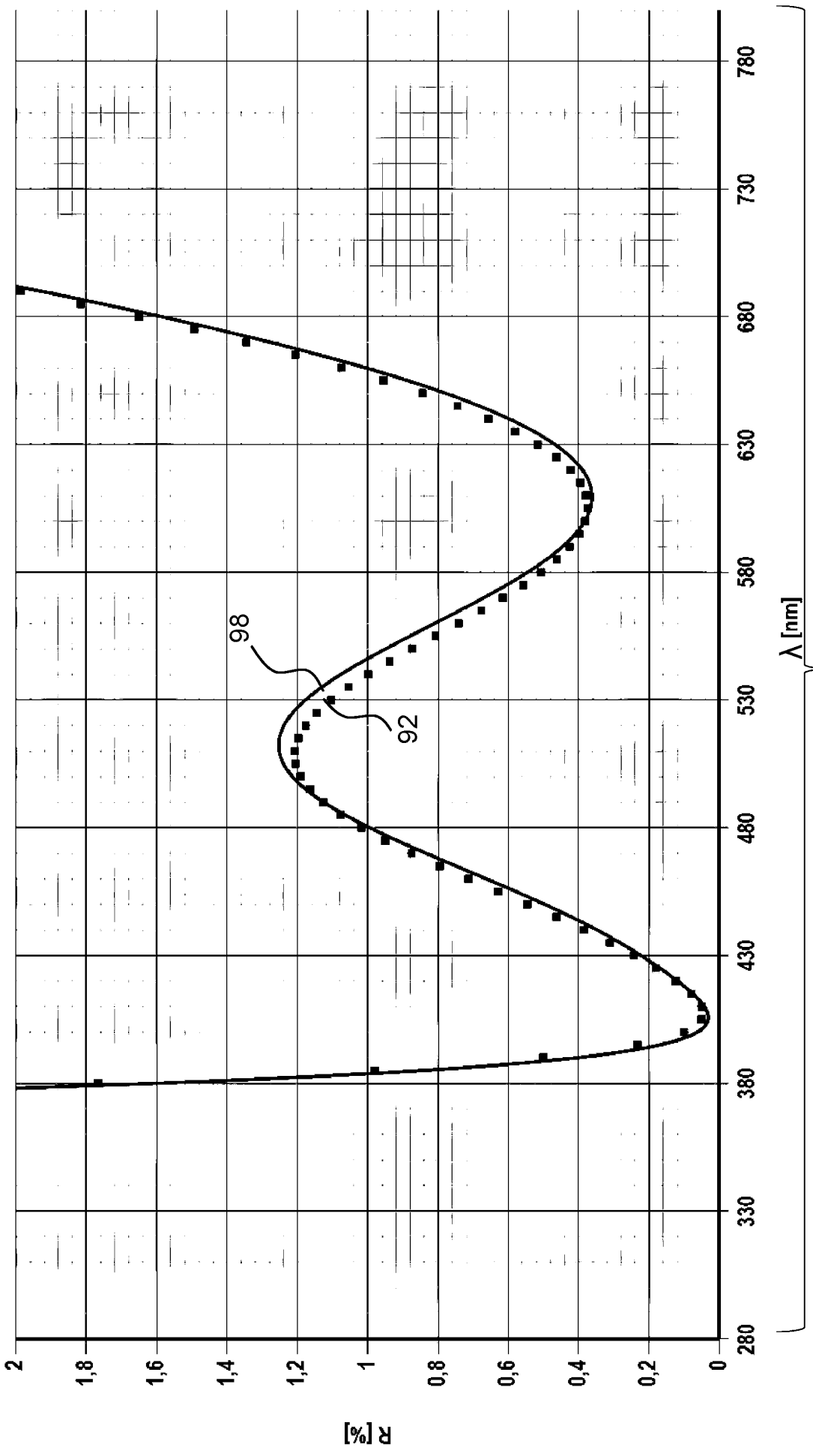

R [%]
2
1,8
1,6
1,4
1,2
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
280
330
380
430
480
530
580
630
680
730
780
λ [nm]
86
98
92

Fig. 11

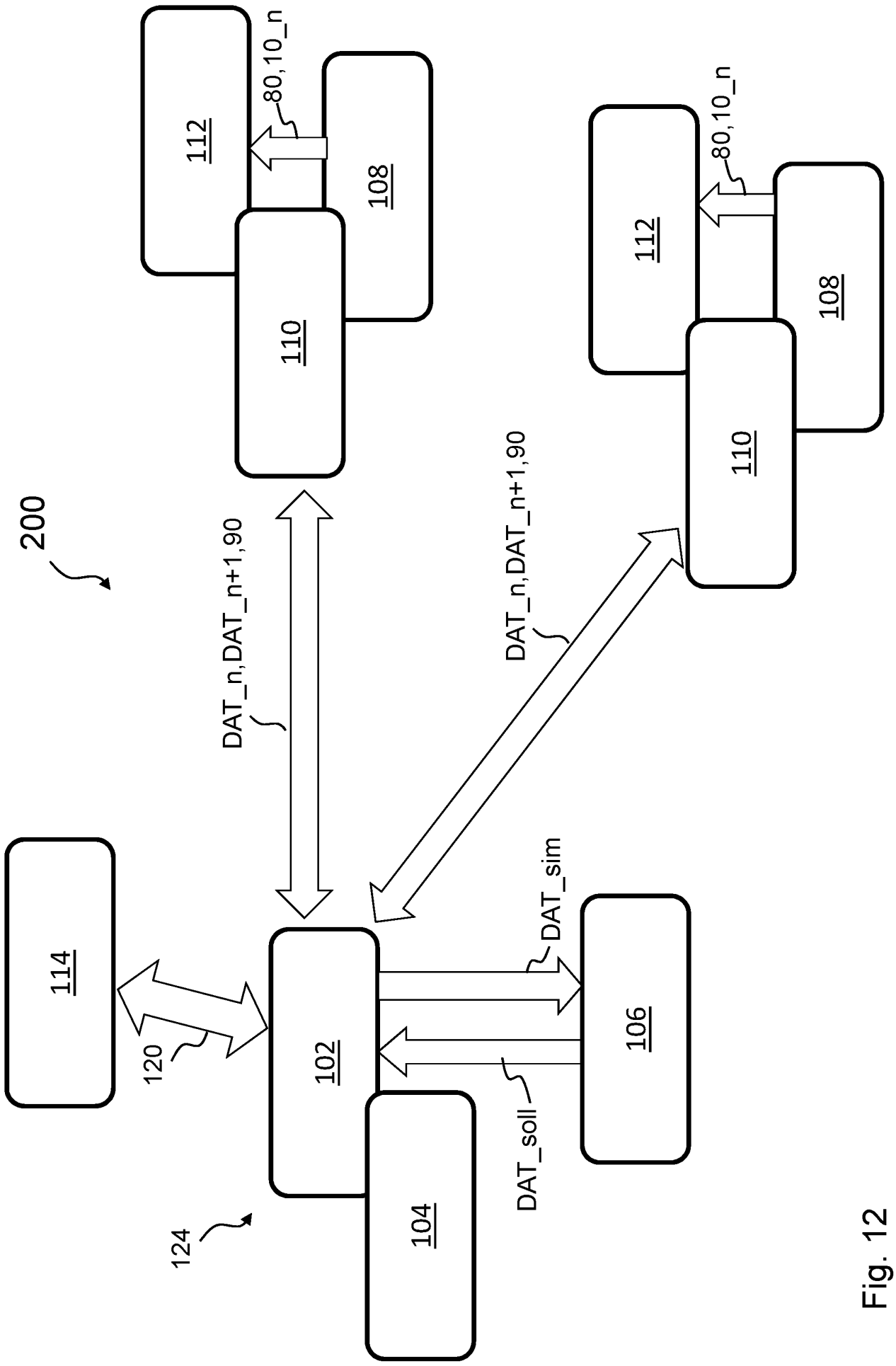


Fig. 12

Das Dokument wurde durch die Firma Jouve erstellt.