

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 989 589**

51 Int. Cl.:

**G01B 11/06** (2006.01)  
**G02B 1/115** (2015.01)  
**C23C 16/52** (2006.01)  
**B29D 11/00** (2006.01)  
**C23C 14/54** (2006.01)  
**G02B 27/00** (2006.01)

12

## TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **17.12.2019** **PCT/EP2019/085810**  
87 Fecha y número de publicación internacional: **25.06.2020** **WO20127394**  
96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **17.12.2019** **E 19845695 (6)**  
97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **07.08.2024** **EP 3899422**

54 Título: **Procedimiento de funcionamiento de un sistema de revestimiento para la producción de sistemas de capas**

30 Prioridad:

**20.12.2018 DE 102018133187**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**27.11.2024**

73 Titular/es:

**RODENSTOCK GMBH (100.0%)**  
**Elsenheimerstrasse 33**  
**80687 München, DE**

72 Inventor/es:

**SCHERSCHLICHT, RÜDIGER y**  
**RADÜNZ, STEFAN**

74 Agente/Representante:

**GONZÁLEZ PECES, Gustavo Adolfo**

ES 2 989 589 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

## DESCRIPCIÓN

Procedimiento de funcionamiento de un sistema de revestimiento para la producción de sistemas de capas

**Estado de la técnica**

La invención se refiere a un procedimiento de funcionamiento de un sistema de revestimiento para la producción de sistemas de capas. La invención también se refiere a un procedimiento para producir un sistema de capas, un procedimiento para iniciar un proceso de revestimiento en un sistema de revestimiento, un sistema de revestimiento, un sistema de sistemas de revestimiento y una base de datos para almacenar registros de datos del sistema, un producto de programa de ordenador para un procedimiento para operar un sistema de revestimiento, y un sistema de procesamiento de datos para llevar a cabo un procedimiento para operar un sistema de revestimiento para producir sistemas de capas.

Un proceso de revestimiento implementado en un entorno de fabricación con un proceso de revestimiento subyacente suele presentar variaciones de un lote de revestimiento a otro. Estas desviaciones se deben al hecho de que el estado del sistema de revestimiento cambia ligeramente, por ejemplo debido a depósitos de material de revestimiento en las paredes de la cámara de vacío, influencias del operador al cargar el sistema de revestimiento con material de revestimiento, desgaste de diversos componentes instalados en el sistema de revestimiento y similares.

Un procedimiento económicamente razonable para minimizar las desviaciones de lote de revestimiento a lote de revestimiento es un mantenimiento muy preciso del proceso, en el que el proceso de revestimiento subyacente se ajusta ligeramente de lote de revestimiento a lote de revestimiento si es necesario.

Este tipo de mantenimiento de los procesos requiere una gran experiencia y, en la actualidad, sólo pueden llevarlo a cabo con éxito operadores o especialistas bien formados.

En el caso del revestimiento de sustratos con un sistema de capas, como es típico en la industria óptica, por ejemplo, el mantenimiento del proceso es el siguiente: Después de revestir un sustrato óptico con un sistema de revestimiento, se lleva a cabo una medición óptica en al menos un sustrato revestido, en la que se registra una señal de medición resuelta espectralmente, que representa el sistema óptico formado por el sustrato óptico y el sistema de revestimiento aplicado. En el caso de los revestimientos antirreflectantes o de espejo, la reflectancia espectral o reflectividad del sistema óptico se determina en un espectrómetro disponible en el mercado. El resultado es un conjunto de datos bidimensional formado por tuplas de datos (por ejemplo, longitud de onda en nanómetros, reflectancia en %). Este conjunto de datos registrados ("conjunto de datos del sistema real") es comparado por el operador con un conjunto de datos objetivo del mismo tipo, que describe la reflexión espectral del sistema objetivo en el caso de revestimientos antirreflectantes o revestimientos de espejo.

En caso de desviaciones intolerables en la progresión espectral o en los parámetros espectrales como los valores de color  $L^*$ ,  $C^*$ ,  $h^*$  (en el denominado espacio de color CIELCh), el operador debe realizar una corrección en el proceso de revestimiento subyacente. Por regla general, el operario ajustará el espesor físico de la capa de al menos una capa individual del sistema de revestimiento que se depositará en el proceso de revestimiento. Esta selección de turnos suele basarse en la experiencia o en rutinas predefinidas.

Después de que se haya producido otro lote de revestimiento con este proceso de revestimiento, el operador puede determinar la eficacia del mantenimiento de su proceso mediante una nueva comparación entre el conjunto de datos reales y el conjunto de datos objetivo, y puede tener que realizar nuevas correcciones fenomenológicas (no generadas numéricamente) en el proceso de revestimiento.

Este procedimiento es a menudo un proceso iterativo de ensayo y error que requiere mucho tiempo y material y que sólo puede ser llevado a cabo por operarios cualificados. Este enfoque basado en la experiencia descrito anteriormente no siempre conducirá al resultado deseado. Además, el mantenimiento del proceso basado en la experiencia no siempre conduce a las mismas proporciones de espesor de revestimiento con los mismos valores de color óptico. Esto puede hacer que las propiedades de las capas y las relaciones de espesor de las capas cambien sin saberlo.

Los elementos ópticos conocidos con revestimiento antirreflectante interferométrico, como los conocidos por el documento WO 2016/110339 A1, suelen tener una reflectancia luminosa de aproximadamente el 1 %, calculada según la norma DIN EN ISO 13666:2013-10. El color del reflejo residual restante puede mostrar una fuerte variación al cambiar el ángulo de visión. La variación puede abarcar toda la escala cromática visual.

El documento US 2015/021168 A1 divulga un dispositivo de control de deposición en línea y un proceso de revestimiento para un sistema de revestimiento multifuente para depositar capas sobre un sustrato. Las capas depositadas sobre el sustrato se iluminan, con lo que se registran señales ópticas de medición con resolución espectral. La señal de medición puede contener luz reflejada por la capa depositada y luz transmitida a través del sustrato con la capa depositada. Una unidad de evaluación determina el espesor de las capas a partir de la señal de medición. Un dispositivo de control se utiliza para el control de retroalimentación de la deposición de capas sobre la base de los espesores determinados.

El documento EP 3346023 A1 describe un proceso para revestir sustratos con varias capas. Se deposita una capa con un espesor físico programado sobre un sustrato de prueba. Un archivo de diseño contiene el espesor físico del objetivo y el resultado espectral del revestimiento. Se genera un conjunto de datos comparando el espesor físico programado con el espesor óptico de la capa aplicada.

- 5 V. A. Kheraj et al. proporcionan una base técnica general para la simulación de la reflectividad de sistemas ópticos multicapa: "Simulación del espectro de reflectividad para películas ópticas delgadas multicapa no absorbentes", PRAMANA. vol. 72, No. 6, 1 de junio de 2009 (2009-06-01), páginas 1011-1022, XP855689294, IN ISSN: 8304-4289, DOI:18.1807/s12843-089-0881-8.

#### Divulgación de la invención

- 10 El objeto de la invención es proporcionar un procedimiento para el funcionamiento económicamente optimizado de un sistema de revestimiento para la producción de sistemas de capas.

Otros objetos de la invención son proporcionar un sistema de revestimiento, un sistema de revestimiento, un sistema de sistemas de revestimiento, así como una base de datos, un producto de programa informático y un sistema de procesamiento de datos para llevar a cabo dicho procedimiento.

- 15 Los objetos se resuelven mediante las características de las reivindicaciones independientes. Las realizaciones favorables y las ventajas de la invención se muestran en las reivindicaciones adicionales, la descripción y el dibujo.

- La invención es particularmente adecuada para la fabricación de elementos ópticos. Debe entenderse que el procedimiento según la invención no se limita a la producción de elementos ópticos y revestimientos, ni a la deposición de sistemas multicapa. El sustrato sobre el que se deposita el sistema de capas también puede ser transparente o no transparente, según se desee.

- Además, la invención puede utilizarse para un sistema de capas que consiste en una única capa depositada sobre un sustrato y que tiene un espesor de capa. Esto no excluye la posibilidad de que se disponga una capa promotora de la adherencia entre la capa única y el sustrato y/o que la capa única esté cubierta por una capa protectora. Cualquier capa promotora de la adherencia y/o capa protectora no tienen ninguna o al menos ninguna influencia significativa en las propiedades analizadas del sistema de revestimiento con una sola capa.

- Alternativamente, el sistema de capas puede estar formado por varias capas individuales que se depositan unas sobre otras en un sustrato y en el que cada capa individual tiene un espesor de capa respectivo. Los espesores de las distintas capas pueden ser iguales o diferentes. También en este caso puede disponerse una capa promotora de la adherencia entre la capa individual más próxima al sustrato y el sustrato y/o el sistema de capas puede cubrirse con una capa protectora. La capa promotora de la adherencia y/o la capa protectora no tienen ninguna influencia, o al menos no tienen una influencia significativa, en las propiedades analizadas del sistema de revestimiento con las múltiples capas individuales.

- A menos que se indique lo contrario, los términos utilizados en esta divulgación deben entenderse en el sentido de la norma DIN EN ISO 13666:2013-10 (EN ISO 13666:2012 (D/E)) y DIN EN ISO 11664-4:2012-06 (EN ISO 11664-4:2011) del Instituto Alemán de Normalización e.V. de 2012 y 2011 respectivamente.

De acuerdo con la sección 4.2 de la norma DIN EN ISO 13666:2013-10, el término luz visible, radiación visible o un intervalo de longitud de onda visible se refiere a la radiación óptica que es capaz de causar directamente una sensación de luz en los seres humanos. La radiación visible se refiere generalmente a una gama de longitudes de onda de 400 nm a 780 nm.

- 40 En el contexto de la presente divulgación, la radiación visible puede referirse preferentemente a una gama de longitudes de onda de 400 nm o 460 nm a 700 nm, correspondiente a la sensibilidad máxima del ojo humano. Esto también aumenta la flexibilidad de diseño de las características y la pendiente del filtro.

- El término reflectancia espectral, reflectancia o reflectividad se refiere a la relación entre la potencia radiante espectral reflejada por el material, superficie o revestimiento respectivo y la potencia radiante incidente para una longitud de onda específica ( $\lambda$ ) de acuerdo con la sección 15.1 de la norma DIN EN ISO 13666:2013-10. En este caso, la reflectividad se refiere a la reflectividad de todo el revestimiento con sus varias subcapas de alto y bajo índice de refracción y no a la reflectividad de una sola subcapa.

Según un primer aspecto de la invención, se propone un procedimiento para operar al menos un sistema de revestimiento para producir sistemas de capas, que comprende

- 50 (i) adquirir al menos una curva de medición espectral con valores de ordenadas y valores de abscisas como curva de medición real en un sistema de revestimiento real, que consiste en una o más capas individuales, cada una de ellas con un espesor de revestimiento del sistema real de la respectiva capa individual, en el que la una o más capas individuales se producen de acuerdo con un conjunto de datos del sistema del al menos

un sistema de revestimiento, en el que el conjunto de datos del sistema comprende al menos el espesor de revestimiento del sistema real de la respectiva capa individual de la una o más capas individuales;

(ii) asignar la curva de medición real del sistema de capas real de acuerdo con al menos un criterio de asignación, en particular para puntos espectrales significativos de la curva de medición real, a una curva de medición objetivo de un conjunto de datos objetivo con valores de ordenadas y valores de abscisas, que se basa en un sistema de capas del conjunto de datos objetivo formado por una o más capas individuales, en el que el conjunto de datos objetivo comprende al menos un espesor de capa objetivo conocido de la capa individual respectiva de la una o más capas individuales;

(iii) generar una curva de medición real de simulación según un procedimiento iterativo variando al menos un espesor de capa simulación-real de las respectivas capas individuales en al menos un intervalo espectral de la curva de medición real y obteniendo un conjunto de datos simulación-real final con al menos un espesor de capa simulación-real final de la respectiva capa individual de la una o más capas individuales, mediante el cual la curva de medición real se aproxima al menos en la curva de medición real de simulación hasta que se alcanza un criterio de terminación;

(iv) generar una curva de medición objetivo de simulación según un procedimiento iterativo variando al menos el espesor de la capa del blanco de simulación de la capa individual respectiva en al menos un intervalo espectral de la curva de medición del blanco y obtener un conjunto de datos del blanco de simulación final con al menos un espesor de la capa del blanco de simulación final de la capa individual respectiva de la una o más capas individuales, mediante el cual la curva de medición objetivo se aproxima al menos en la curva de medición objetivo de simulación hasta que se alcanza un criterio de terminación, por el que se correlacionan las diferencias ópticas entre la curva de medición real y la curva de medición real de simulación, y el conjunto de datos reales de simulación se utiliza para un recálculo de la curva de medición objetivo de simulación a la curva de medición objetivo; y

(v) proporcionar el conjunto de datos objetivo de simulación final para el al menos un sistema de revestimiento como un nuevo conjunto de datos del sistema para depositar otro sistema de revestimiento con al menos un espesor de revestimiento real de corrección como el nuevo espesor de revestimiento real del sistema de la capa individual respectiva, que se determina a partir del espesor de revestimiento objetivo de simulación final de la capa individual respectiva de la una o más capas individuales con el conjunto de datos objetivo de simulación final.

Ventajosamente, el procedimiento según la invención permite un modo de funcionamiento autocontrolado y controlado por realimentación de los sistemas de revestimiento.

Favorablemente, el sistema de revestimiento puede utilizarse para producir sistemas de capas para elementos ópticos, por ejemplo.

Los puntos significativos de la curva pueden utilizarse ventajosamente para encontrar el diseño objetivo apropiado del sistema de revestimiento para una curva de medición del sistema de revestimiento investigado y utilizarse después para una aproximación inicial en forma de desplazamiento horizontal y/o lateral de la curva de medición.

El conjunto de datos objetivo con la curva de medición objetivo contiene los datos objetivo para el revestimiento óptimo. Además de una medición óptica resuelta espectralmente, estos datos también pueden contener otras variables objetivo, como los valores de color  $L^*$ ,  $C^*$  y  $h^*$  en el intervalo espectral visible y/o variables espectrales calculables definidas, como valores de transmisión y/o reflexión promediados o ponderados en un intervalo que se definirá según sea necesario. Ejemplos de variables calculables espectralmente pueden ser el intervalo visual así como el intervalo IR-A/IR-B y/o UV-A/UV-B.

Además, el conjunto de datos objetivo contiene intervalos espectrales específicos del revestimiento anidados de pequeño a grande. El mayor intervalo especificado posible refleja el intervalo de visión espectral máximo. El número de intervalos se puede elegir libremente. El conjunto de datos del objetivo contiene puntos espectrales característicos que definen claramente la disposición óptica del revestimiento.

La curva de medición real comprende al menos los datos de la medición óptica realizada. El registro de datos del sistema comprende al menos los espesores de capa reales de las múltiples capas individuales establecidas en el sistema de revestimiento si el sistema de revestimiento está formado por múltiples capas individuales, o el espesor de capa real de la capa individual establecida en el sistema de revestimiento si el sistema de revestimiento está formado por una sola capa individual.

La curva de medición simulada-real comprende al menos una curva de medición espectral simulada, que preferentemente representa la mejor concordancia posible con la medición óptica realizada como curva de medición real.

El conjunto de datos de simulación-real comprende al menos el espesor de capa de simulación-real de una de las capas individuales del sistema de capas o los espesores de capa de simulación-real de las múltiples capas individuales del sistema de capas determinados durante el proceso de optimización iterativo.

- 5 La curva de medición del objetivo de simulación comprende al menos una curva de medición espectral simulada, que preferentemente representa la mejor correspondencia posible entre la curva de medición del objetivo y la curva de medición real de simulación.

- 10 El conjunto de datos objetivo de simulación comprende al menos los espesores de capa objetivo de simulación de las múltiples capas individuales determinados en el proceso de optimización iterativo o el espesor de capa objetivo de simulación de la capa individual con la mejor coincidencia posible con la curva de medición objetivo con desplazamiento a través del conjunto de datos objetivo de simulación. El conjunto de uno o más espesores de capa objetivo de simulación de este conjunto de datos representa los parámetros del proceso para el siguiente lote de revestimiento.

- 15 A tal efecto, el conjunto de datos objetivo de simulación comprende el conjunto de parámetros de cálculo del sistema de revestimiento simulado para revestimientos ideales y/o procesos ideales, propiedades de los materiales tales como índices de refracción ideales y condiciones de deposición ideales, así como parámetros del sistema tales como geometría del revestimiento, control del espesor del revestimiento, etc.

- 20 El conjunto de datos objetivo de simulación correlaciona las diferencias ópticas entre la curva de medición real y la curva de medición real de simulación y tiene en cuenta las desviaciones relacionadas con el sistema, como las desviaciones morfológicas y técnicas de un lote de revestimiento a otro, así como las desviaciones no relacionadas con el sistema, como las diferencias de manipulación, etc. En segundo lugar, el conjunto de datos reales de simulación se utiliza para recalcular la curva de medición objetivo de simulación a la curva de medición objetivo.

Con la ayuda de este conjunto de datos objetivo de simulación, es posible seguir analizando las relaciones entre los parámetros del sistema y los parámetros de la capa y/o las propiedades de la capa. Para ello, puede ser ventajoso acceder a un número estáticamente relevante de registros de datos.

- 25 El procedimiento según la invención prevé que una curva de medición real de un sistema de revestimiento, que se depositó en el sistema de revestimiento, se cargue en el software de simulación de un ordenador de simulación.

- 30 Ventajosamente, el proceso de revestimiento de un sistema de capas puede consistir en la aplicación de una sola capa o de varias capas individuales. Cada capa individual se describe preferentemente mediante un conjunto de parámetros que contiene el espesor físico u óptico de la capa, además de otros parámetros como la velocidad de deposición, los flujos de gas de proceso, etc. La una o más capas individuales del proceso de revestimiento pueden consistir en los materiales  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{Nd}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Pr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{PrTiO}_3$ ,  $\text{La}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Ce}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Dy}_2\text{O}_5$ ,  $\text{HfO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgF}_2$ ,  $\text{ZrF}_4$ ,  $\text{AlF}_3$ ,  $\text{Na}_3\text{Al}_3\text{F}_{14}$ ,  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ , silanos y siloxanos, así como cualquier mezcla de estos materiales. Pueden utilizarse todos los procesos típicos de revestimiento, como PVD, CVD, sputtering y procesos afines.

- 35 Con ayuda del software de simulación, se determinan a partir de los datos espectrales de la curva de medición real, según un criterio de asignación, por ejemplo, puntos espectrales significativos, como valores extremos de los datos espectrales, puntos posiblemente seleccionados, como pasajes del 1% en los que la reflexión es del 1%, una semianchura completa de un pico en la curva de medición o similares. Se realiza una comparación con las curvas de medición objetivo almacenadas en una base de datos utilizando los puntos espectrales determinados para encontrar una curva de medición objetivo que coincida con la curva de medición real o para seleccionar una curva de medición objetivo con la menor desviación de la curva de medición real. Como resultado, todas las curvas de medición objetivo se cargan desde la base de datos en el software de simulación y se calcula la correspondencia entre los puntos característicos de la curva de medición objetivo y los respectivos puntos de la curva de medición real para cada curva de medición objetivo.

- 45 Para todos los puntos espectrales con las coordenadas respectivas, es decir, la longitud de onda como abscisa frente a la intensidad como ordenada, se forma el cociente desde la abscisa correspondiente de la curva de medición real hasta la abscisa de la curva de medición objetivo, así como el cociente promediado a partir de los cocientes determinados. Estos cocientes promediados se denominan a continuación factores de escala y se aplican uniformemente a todo el sistema de turnos.

- 50 Para cada uno de estos factores de escala se genera un conjunto de datos espectrales virtuales, que da como resultado una primera aproximación del espesor de capa para una sola capa o los espesores de capa para varias capas individuales de la curva de medición objetivo multiplicada por el factor de escala correspondiente.

Esto crea un punto de partida muy favorable para el posterior proceso de optimización. Este factor de escala se almacena en la base de datos para posibles análisis posteriores.

- 55 Partiendo del espesor de capa preliminar escalado de la capa individual única o de los espesores de capa preliminares escalados de las capas individuales múltiples de la etapa anterior, se inicia un proceso de optimización en un intervalo espectral restringido. Este intervalo espectral restringido es individual para el revestimiento y se almacena en el

conjunto de datos objetivo asignado a la curva de medición objetivo como el primer intervalo posible de una lista de intervalos en el conjunto de datos objetivo. Como parte de este proceso de optimización, se determina el espesor de capa de la capa individual si el sistema de capas está formado por una sola capa, o se determinan los espesores de capa de las múltiples capas individuales si el sistema de capas está formado por múltiples capas individuales, que describen la curva de medición real con la curva de medición objetivo de simulación subyacente en una primera aproximación.

Utilizando el espesor o espesores de revestimiento obtenidos en la etapa anterior como los primeros espesores de revestimiento reales de simulación, se forma el cociente con el espesor o espesores de revestimiento reales correspondientes que se establecieron en el sistema de revestimiento para la capa individual o cada una de las varias capas individuales. Este cálculo da como resultado el primer conjunto provisional de datos de simulación. Este primer conjunto de datos de simulación preliminar se compara con los espesores de capa objetivo almacenados en el conjunto de datos objetivo para comprobar la plausibilidad a nivel de capa individual. Puede aceptarse una desviación de +/- 20% por espesor de capa individual, ya que se trata de una aproximación inicial. Si la desviación es mayor, el proceso se reinicia desde la etapa anterior, pero esta vez con una condición secundaria en el proceso de optimización, a saber, que el espesor de capa de la capa individual para la que el espesor de capa individual estaba fuera del intervalo especificado se limite a este intervalo.

Idealmente, esta restricción no es necesaria. Sin embargo, si este es el caso, el espesor de todas las capas individuales puede limitarse en consecuencia.

Después de esta etapa, está listo un segundo conjunto preliminar de un espesor de capa para una sola capa o de varios espesores de capa para varias capas individuales. Si no fuera necesaria ninguna restricción, este segundo conjunto de datos simulación-real es idéntico al primer conjunto de datos simulación-real preliminar.

El procedimiento de optimización se aplica ahora para cada intervalo espectral adicional de la lista de intervalos del conjunto de datos objetivo. El procedimiento de optimización en curso utiliza siempre el conjunto de datos reales de simulación del procedimiento de optimización anterior.

Típicamente, se puede utilizar un algoritmo simplex adaptado como procedimiento de optimización, pero también pueden ser adecuados otros procedimientos de simulación conocidos. Los programas informáticos de simulación para este tipo de procesos de optimización están disponibles en el mercado a través de diversos fabricantes, por ejemplo, el programa informático de simulación comercial "Essential MacLeod" u otros programas informáticos de simulación conocidos, por ejemplo, para la producción de revestimientos ópticos.

Cuando se han ejecutado todas las iteraciones de intervalo, los datos espectrales de la curva de medición real se aproximan en buena concordancia y se dispone de una primera curva de medición real de simulación final, así como de un conjunto correspondiente de espesores de capa simulación-real. Estos dos conjuntos de parámetros forman el conjunto de datos reales de la simulación, que se almacena temporalmente.

Estas etapas se repiten hasta que se alcanza un criterio de terminación, por ejemplo hasta que se obtiene un resultado estable tras un procedimiento de selección estadística. Preferentemente, la curva completa puede analizarse con este fin, en particular, por ejemplo, con respecto a las desviaciones chi-cuadrado y similares.

Si los datos espectrales de la curva de medición real se aproximan en el mejor acuerdo posible, el conjunto de datos reales de simulación final puede generarse con el uno o más espesores de capa reales de simulación.

El proceso de optimización se inicia ahora de nuevo, con la diferencia de que la optimización tiene lugar ahora entre la curva de medición real de la simulación y la curva de medición objetivo para simular los datos espectrales del conjunto de datos objetivo. Además, el conjunto de datos reales de la simulación ha quedado fijado y ya no se modificará.

Al final de este procedimiento, se dispone de uno, si el sistema de capas está formado con una sola capa, o varios, si el sistema de capas está formado con varias capas únicas, espesores de capa objetivo de simulación, que generan el conjunto de datos objetivo de simulación. A partir de estos uno o más espesores de revestimiento objetivo de simulación, se calculan los uno o más espesores de revestimiento reales de corrección como los siguientes uno o más espesores de revestimiento reales del sistema mediante compensación con respecto al conjunto de datos objetivo de simulación, que se establecen o transmiten en el sistema de revestimiento.

Las ventajas de la invención residen en el hecho de que, a diferencia del procedimiento descrito en la técnica anterior, el procedimiento según la invención puede utilizarse para un control analítico exhaustivo del proceso de revestimiento, que se basa totalmente en cálculos numéricos.

Opcionalmente, no sólo los espesores de revestimiento pueden tenerse en cuenta y corregirse con el procedimiento según la invención, sino que también pueden controlarse otros parámetros del proceso si es necesario, por ejemplo el estado de un sistema, la edad y/o el estado de las fuentes de revestimiento, la edad y/o el estado de los equipos de medición en los sistemas de revestimiento, el estado de carga con sustratos durante el revestimiento y similares.

El procedimiento según la invención puede utilizarse para la autooptimización automática de un proceso de revestimiento existente, así como para la autoconfiguración automática de nuevos procesos de revestimiento, como el rodaje de sistemas de revestimiento. Por rodaje, el experto entiende la nueva instalación o configuración inicial de un nuevo proceso y sistema de revestimiento en un sistema de revestimiento.

- 5 La optimización/supervisión continua garantiza que los sistemas de revestimiento producidos de esta forma, por ejemplo elementos ópticos, se desvíen lo menos posible de los datos objetivo.

Además, los nuevos conjuntos de parámetros introducidos, como los conjuntos de datos del sistema y los conjuntos de datos de simulación y su supervisión, abren nuevas posibilidades para la supervisión del revestimiento y del sistema.

- 10 Ventajosamente, el procedimiento según la invención resulta en ahorros potenciales en la producción de sistemas de capas, por ejemplo para elementos ópticos. En caso de deficiencias técnicas del proceso, se puede reaccionar o informar inmediatamente. Por ejemplo, en caso de defectos unitarios en el sistema de revestimiento, el lote siguiente puede detenerse inmediatamente, evitando así un lote defectuoso. En caso de que se produzcan errores en el sistema o en el proceso, la desalineación puede evitarse mediante una corrección inmediata y continua del revestimiento, que se indica mediante el conjunto de parámetros de corrección específicos del sistema.
- 15 El mantenimiento del sistema de revestimiento puede simplificarse. Se pueden evitar las diferencias individuales en la gestión del proceso por parte de distintas personas. La garantía de calidad en el lado del revestimiento puede tener lugar en este sistema de autocontrol y no aguas abajo como antes.

- 20 También existen ventajosos potenciales de ahorro en ingeniería. Los nuevos procesos pueden ejecutarse a distancia desde el exterior. Se ha introducido un nuevo conjunto de parámetros que abre nuevas vías para comprender problemas de sistemas, procesos y turnos no resueltos hasta ahora.

Según una realización ventajosa del procedimiento según la invención, el criterio de terminación puede alcanzarse si se cumple al menos una de las siguientes condiciones:

- 25 (i) se consigue un resultado estable para el criterio de asignación según un procedimiento de selección estadística;
- (ii) la desviación entre la curva de medición real y la curva de medición real simulada se encuentra dentro de un margen de tolerancia;
- (iii) se ha realizado un número máximo de iteraciones.

- 30 Se puede alcanzar ventajosamente un resultado óptimo si se consigue un resultado estable para el criterio de asignación según un procedimiento de selección estadístico.

Si la desviación entre la curva de medición real y la curva de medición real simulada se encuentra dentro de un intervalo de tolerancia, se puede obtener al menos un resultado satisfactorio.

Si se ha realizado un número máximo de iteraciones, se puede limitar el esfuerzo computacional.

- 35 Según una realización ventajosa del procedimiento según la invención, el espesor de capa objetivo de la capa individual respectiva puede utilizarse como valor inicial del espesor de capa real de simulación de la capa individual respectiva. Así se obtienen buenos resultados del proceso. Alternativa o adicionalmente, el espesor de capa real de simulación de la capa individual respectiva puede utilizarse como valor inicial para el espesor de capa objetivo de simulación de la capa individual respectiva. Especialmente en combinación con el espesor de capa objetivo como valor de partida de la simulación del espesor de capa real de la capa individual respectiva, los resultados del proceso pueden mejorarse aún más.
- 40

Alternativa o adicionalmente, se puede utilizar un espesor de capa predeterminado de la capa individual respectiva como valor inicial del espesor de capa objetivo de simulación de la capa individual respectiva. Esto es favorable si, por ejemplo, ya se dispone de valores empíricos para un espesor de capa favorable o, si se van a depositar varias capas individuales, ya se dispone de valores empíricos para espesores de capa favorables de las capas individuales.

45 Además, se puede conseguir un resultado suficientemente bueno para un sistema de capas con un valor inicial casi arbitrario para los espesores de capa de las capas individuales mediante un número correspondientemente mayor de iteraciones.

- Según una realización ventajosa del procedimiento según la invención, la generación de la curva de medida real de simulación o de la curva de medida objetivo de simulación puede comprender además:
- 50 Determinar un factor de escala como el valor medio de los cocientes de los valores de las abscisas de la curva de medición real o de la curva de medición real de simulación y de la curva de medición objetivo para los valores de las abscisas determinados según el criterio de asignación y escalar el espesor de una capa objetivo, si el sistema de capas está formado por una sola capa, o los espesores de varias capas objetivo, si el sistema de capas está formado por varias capas individuales; o uno o varios espesores de capa reales de simulación de una o varias capas

individuales con el factor de escala como valores iniciales de uno o varios espesores de capa reales de simulación, o uno o varios espesores de capa objetivo de simulación.

En consecuencia, la curva de medición real de simulación según el procedimiento según la invención se genera a partir de la curva de medición real y los espesores de capa objetivo para determinar valores de partida para los espesores de capa simulación-real, mientras que la curva de medición simulación-objetivo se genera a partir de la curva de medición real de simulación y los espesores de capa simulación-real para determinar valores de partida para los espesores de capa simulación-objetivo.

Esto crea el mejor punto de partida posible para el proceso de optimización posterior.

Según una realización ventajosa del procedimiento según la invención, la generación de la curva de medición real de simulación o de la curva de medición objetivo de simulación puede comprender además al menos para el primer intervalo para cada una de la pluralidad de capas individuales, si el sistema de revestimiento comprende una pluralidad de capas individuales, o para la única capa individual, si el sistema de revestimiento comprende una única capa individual: Formar un cociente a partir del espesor de la capa real de la primera simulación final correspondiente o del espesor de la capa objetivo de la primera simulación final correspondiente y del espesor de la capa real del sistema correspondiente, en el que los espesores de la capa real de la primera simulación o los espesores de la capa objetivo de la simulación se generan escalando los espesores de la capa real de la simulación o los espesores de la capa objetivo de la simulación con el cociente.

En consecuencia, los espesores de capa reales de simulación se utilizan para generar la curva de medición real de simulación, mientras que los espesores de capa objetivo de simulación se utilizan para generar la curva de medición objetivo de simulación.

De este modo, se pueden generar valores de partida adecuados para una optimización posterior al adaptar las curvas de medición real de simulación o las curvas de medición objetivo de simulación.

Según una realización ventajosa del procedimiento según la invención, la generación de la curva de medida real de simulación o de la curva de medida objetivo de simulación puede comprender además:

comprobar el primer espesor de capa real simulado individual o de varios espesores de capa reales simulados o del único espesor de capa objetivo simulado de la capa individual respectiva para al menos un criterio, en particular la plausibilidad y/o una desviación predeterminada del espesor de capa objetivo respectivo de la curva de medición objetivo, y, si no se cumple el al menos un criterio,

repetir la variación del espesor de capa real de simulación de la capa individual respectiva o del espesor de capa objetivo de simulación de la capa individual respectiva y la provisión de un primer espesor de capa real de simulación final o del espesor de capa objetivo de simulación de la capa individual respectiva, así como la generación del primer espesor de capa real de simulación o del espesor de capa objetivo de simulación de la capa individual respectiva de la una o más capas individuales, en la que para la una capa individual o para aquellas de la pluralidad de capas individuales que hayan fallado el criterio, se impone una limitación al espesor de capa real de simulación o al espesor de capa objetivo de simulación de la capa individual respectiva de la una o más capas individuales. Espesor de capa objetivo de simulación de la capa individual respectiva de la una o más capas individuales, en la que se especifica una limitación de la variación para la una capa individual o para aquellas de la pluralidad de capas individuales que no hayan superado el criterio, y

suministrar un segundo espesor de capa real de simulación o espesor de capa objetivo de simulación de la capa individual respectiva de la una o más capas individuales.

En consecuencia, los espesores de capa reales de simulación se utilizan para generar la curva de medición real de simulación, mientras que los espesores de capa objetivo de simulación se utilizan para generar la curva de medición objetivo de simulación.

Este procedimiento facilita la reducción de los parámetros en el proceso de optimización y, por tanto, acelera la determinación de los conjuntos de parámetros optimizados.

Según una realización ventajosa, el procedimiento según la invención puede comprender además:

repetir las etapas en uno o más intervalos espectrales adicionales, incluyendo en cada intervalo posterior el intervalo anterior, utilizándose como valores de partida en el intervalo siguiente el segundo espesor de capa real de simulación o el espesor de capa objetivo de simulación de la capa individual respectiva del intervalo anterior, y

suministrar un espesor de capa real de simulación final o de un espesor de capa objetivo de simulación de la capa individual respectiva de una o más capas individuales.



En consecuencia, el anidamiento iterativo por intervalos se lleva a cabo por separado para los espesores de capa reales de simulación y los espesores de capa objetivo de simulación.

De este modo, puede lograrse una aproximación efectiva de las curvas de medición de la simulación a las curvas de medición reales medidas, con lo que los parámetros de ajuste pueden refinarse sucesivamente. Esto reduce el riesgo de que se determine un mínimo desfavorable en el proceso de optimización.

Según una realización ventajosa del procedimiento según la invención, se puede producir un elemento óptico, en el que el elemento óptico comprende un sustrato y un sistema de capa reductora de reflexión interferométrica en al menos una superficie del sustrato,

en el que el sistema de capas comprende una pila de al menos cuatro paquetes de capas sucesivos, cada paquete de capas comprende un par de capas individuales primera y segunda, teniendo las primeras capas individuales un primer espesor óptico y las segundas capas individuales un segundo espesor óptico diferente del primer espesor óptico,

en el que un índice de refracción de las primeras capas individuales más cercanas al sustrato es mayor que un índice de refracción de las segundas capas individuales de la pila más alejadas del sustrato,

en el que el sistema de capas tiene un brillo, una cromaticidad y un ángulo de matiz de un color reflectante residual,

en el que la cantidad de cambio en el ángulo de cromaticidad del color de reflexión residual en un intervalo de un ángulo de visión con los valores límite  $0^\circ$  y  $30^\circ$  en relación con una superficie normal al sistema de capas es menor que la cantidad de cambio en la cromaticidad en el intervalo del ángulo de visión,

mediante el cual se llevan a cabo las siguientes etapas:

- definir un diseño de capas que comprenda al menos un primer material para primeras capas simples de alto índice de refracción y un segundo material para segundas capas simples de bajo índice de refracción, número de paquetes de capas deseados con las capas simples, valores iniciales del espesor de las capas simples;
- definir los valores de color objetivo, que comprenden el brillo, la cromaticidad y el ángulo de matiz al menos en valores límite para un intervalo de un ángulo de visión con valores límite de  $0^\circ$  y  $30^\circ$ ;
- llevar a cabo un procedimiento de optimización para variar los espesores de capa individuales hasta alcanzar un objetivo de optimización.

Es ventajoso seleccionar valores de color objetivo iguales o similares en los límites del intervalo.

En particular, pueden especificarse las desviaciones máximas de los ángulos de tonalidad de los diferentes colores de reflexión residual.

Ventajosamente, el sistema de capas puede tener cuatro o cinco paquetes de capas; también se pueden proporcionar más de cinco paquetes de capas.

La cromaticidad también puede describirse como saturación del color. El ángulo tonal también puede denominarse ángulo cromático.

Ventajosamente, variando los espesores de capa de las capas parciales, se puede proporcionar un sistema de capas de color estable, cuyo color reflectante residual no cambia o cambia sólo ligeramente incluso si el ángulo de visión cambia significativamente. Idealmente, una combinación adecuada de cromaticidad y ángulo de matiz puede conseguir un color de reflexión residual estable en una amplia gama de ángulos de visión.

Las primeras subcapas de los paquetes de capas de la pila, que están más cerca del sustrato, pueden estar formadas del mismo primer material. Las segundas subcapas, que están más alejadas del sustrato, también pueden estar formadas por el mismo segundo material, que es diferente del primer material de las primeras subcapas. Se puede prever que una capa funcional hecha de un tercer material con propiedades refractivas comparables a las de la segunda subcapa esté dispuesta en la pila de capas más alejada del sustrato entre la primera y la segunda subcapas. A efectos de cálculo, la capa funcional puede asignarse a la segunda subcapa si es necesario. Alternativamente, los materiales de las primeras subcapas de la pila pueden variar. Alternativamente, los materiales de los que están formadas las segundas subcapas también pueden variar en la pila.

Según una realización ventajosa del procedimiento según la invención, el ángulo de cromaticidad en el intervalo del ángulo de visión con los valores límite  $0^\circ$  y  $30^\circ$  puede cambiar en un máximo de  $15^\circ$ , preferentemente en un máximo de  $10^\circ$ ; y/o

- la cantidad de cambio del ángulo de cromaticidad en un segundo intervalo de un ángulo de visión de 0° a un ángulo de visión límite con un valor límite superior entre 30° y 45° con respecto a la superficie normal al sistema de capas es menor que la cantidad de cambio de la cromaticidad en el segundo intervalo del ángulo de visión y la cantidad de cromaticidad en el ángulo de visión límite es al menos 2, en particular el ángulo de cromaticidad en el segundo intervalo cambia como máximo 20°, preferentemente como máximo 15°, y/o
- la reflectancia fotópica en el intervalo del ángulo de visión con los valores límite 0° y 30° es como máximo del 1,5%, preferentemente como máximo del 1,2%; y/o
- la reflectancia escotópica en el intervalo del ángulo de visión con los valores límite 0° y 30° es como máximo del 1,5%, preferentemente como máximo del 1,2%.
- La impresión cromática del reflejo residual del sistema óptico permanece completamente o casi inalterada para un observador.
- Un color reflectante residual estable es ventajoso incluso con una mayor variación del ángulo de visión.
- Ventajosamente, las primeras subcapas pueden estar formadas de un material altamente refractivo.
- Favorablemente, las primeras subcapas pueden comprender al menos uno o más de los compuestos Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, TiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Nd<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Pr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, PrTiO<sub>3</sub>, La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, HfO<sub>2</sub>, óxido de InSn, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, MgO, CeO<sub>2</sub>, ZnS y/o modificaciones de los mismos, en particular otros estados de oxidación de los mismos y/o mezclas de los mismos con silanos y/o siloxanos.
- Estos materiales son conocidos como materiales con un alto índice de refracción clásico para su uso en elementos ópticos, como para el revestimiento de lentes de gafas. Sin embargo, las subcapas de mayor refracción también pueden contener SiO<sub>2</sub> u otros materiales de menor refracción, siempre que el índice de refracción de toda la subcapa sea superior a 1,6, preferentemente al menos 1,7, particularmente preferentemente al menos 1,8, y lo más preferentemente al menos 1,9.
- Ventajosamente, las segundas subcapas pueden estar formadas por un material de baja refracción.
- Las subcapas de menor índice de refracción pueden comprender al menos uno de los materiales MgF<sub>2</sub>, SiO, SiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> con adiciones de Al, silanos, siloxanos en forma pura o con sus derivados fluorados. Sin embargo, las subcapas de menor refracción también pueden contener una mezcla de SiO<sub>2</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Preferentemente, las capas parciales de refracción inferior pueden contener al menos un 80% en peso de SiO<sub>2</sub>, particularmente preferentemente al menos un 90% en peso de SiO<sub>2</sub>.
- El índice de refracción de las capas parciales de baja refracción asciende preferentemente como máximo a 1,55, preferentemente como máximo a 1,48, de forma especialmente preferente a como máximo 1,4. Estos índices de refracción se refieren a condiciones normales a una temperatura de 25° C y una longitud de onda de referencia de la intensidad de la luz utilizada de 550 nm.
- Ejemplos típicos de materiales de revestimiento con diferentes índices de refracción son el dióxido de silicio (SiO<sub>2</sub>) con un índice de refracción de 1,46, el óxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) con un índice de refracción de 1,7, dióxido de circonio (ZrO<sub>2</sub>) con un índice de refracción de 2,05, óxido de titanio praseodimio (PrTiO<sub>3</sub>) con un índice de refracción de 2,1, óxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) y sulfuro de zinc (ZnS), cada uno con un índice de refracción de 2,3. Estos valores representan valores medios que pueden variar hasta un 10% en función del proceso de revestimiento y del espesor de la capa.
- Los vidrios ópticos comunes tienen índices de refracción entre 1,5 y 2,0. Los materiales de revestimiento con índices de refracción inferiores a 1,5, como MgF<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, se denominan materiales de baja refracción en combinación con vidrios ópticos, mientras que los materiales de revestimiento con índices de refracción superiores a 2,0, como ZrO<sub>2</sub>, PrTiO<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, ZnS, se denominan materiales de alta refracción en combinación con vidrios ópticos.
- La diferencia en los índices de refracción entre los materiales de alto índice de refracción y de bajo índice de refracción de la primera y segunda capas parciales es preferentemente de al menos 0,2 a al menos 0,5, dependiendo del proceso de revestimiento y del espesor de la capa.
- Los materiales utilizados para este tipo de revestimiento son los típicos materiales que se aplican a un sustrato en óptica utilizando, por ejemplo, procesos PVD (PVD = Physical Vapour Deposition) o procesos CVD (CVD = Chemical Vapour Deposition).
- Según una realización favorable del elemento óptico, al menos las primeras subcapas pueden estar formadas de un primer material idéntico y las segundas subcapas pueden estar formadas al menos predominantemente de un segundo material idéntico.
- Opcionalmente, las segundas subcapas pueden estar formadas del mismo segundo material y sólo tener una capa funcional entre la primera subcapa y la segunda subcapa en la pila de capas más alejada del sustrato. La capa

funcional puede tener un índice de refracción bajo y puede añadirse a la segunda subcapa a efectos de cálculo si es necesario.

5 Según otro aspecto de la invención, se propone un procedimiento para poner en marcha un proceso de revestimiento en al menos un sistema de revestimiento para producir un sistema de revestimiento, en el que una curva de medición real se aproxima al menos a una curva de medición espectral con valores de ordenadas y valores de abscisas en una curva de medición real de simulación hasta que se alcanza un criterio de terminación.

Ventajosamente, el procedimiento que utiliza el procedimiento según el primer aspecto de la invención permite un modo de funcionamiento autocontrolado y controlado por realimentación durante la puesta en marcha de procesos de revestimiento en sistemas de revestimiento.

10 El rodaje de los sistemas de revestimiento suele requerir un tiempo considerable, que puede acortarse ventajosamente.

15 El rodaje de un nuevo sistema de revestimiento puede llevarse a cabo de forma más eficaz y rápida con el procedimiento de autocontrol y retroalimentación según la invención para operar un sistema de revestimiento para producir un sistema de revestimiento, por ejemplo para un elemento óptico. Esto supone un considerable potencial de ahorro a la hora de poner en marcha el sistema de revestimiento. El sistema de revestimiento puede funcionar incluso a distancia, lo que supone un mayor potencial de ahorro gracias al menor número de operarios necesarios in situ.

Según otro aspecto, en particular independiente, de la invención, se propone un sistema de revestimiento para producir un sistema de revestimiento, por ejemplo para un elemento óptico, que comprende al menos

20 un sistema de revestimiento para revestir un sustrato con un sistema de revestimiento;  
un ordenador de control para controlar el sistema de revestimiento y comunicarse con un ordenador de simulación;

un dispositivo óptico de medición para determinar una curva de medición real espectralmente resuelta del sistema de revestimiento;

25 un ordenador de simulación en el que está instalado el software de simulación para el cálculo óptico y la optimización del sistema de revestimiento, en el que el ordenador de simulación está diseñado para correlacionar las diferencias ópticas entre una curva de medición real y una curva de medición real de simulación, de modo que se utilice un conjunto de datos simulación-real para recalcular una curva de medición simulación-objetivo con una curva de medición objetivo;

una base de datos para almacenar registros de datos de inversión;

30 un dispositivo de entrada para introducir y controlar el ordenador de simulación y/o el sistema de revestimiento.

De este modo, el sistema de revestimiento comprende todos los componentes necesarios que se requieren para un rodaje y un funcionamiento eficaces del sistema de revestimiento de acuerdo con el proceso según la invención descrito anteriormente.

35 Esto permite que un nuevo sistema de revestimiento se ejecute de manera más eficaz y rápida utilizando el procedimiento según la invención para operar un sistema de revestimiento para producir un sistema de revestimiento. Esto supone un considerable potencial de ahorro a la hora de poner en marcha el sistema de revestimiento. El sistema de revestimiento puede funcionar incluso a distancia, lo que supone un mayor potencial de ahorro gracias al menor número de operarios necesarios in situ.

40 El sistema de revestimiento incluye, por ejemplo, una cámara de vacío con unidades asociadas para el revestimiento de sustratos, como diversas fuentes de revestimiento, aberturas, soportes de vidrio, bombas, etc.

Ventajosamente, el sistema de revestimiento que utiliza el procedimiento según el primer aspecto de la invención puede funcionar de manera autocontrolada y realimentada.

45 El ordenador de control del sistema de revestimiento controla el proceso de revestimiento en el sistema de revestimiento y se encarga de la comunicación con el sistema de revestimiento. Este ordenador puede tener al menos una conexión de red para el intercambio automático de datos.

50 En el dispositivo de medición óptico se puede registrar una señal de medición resuelta espectralmente, que representa el elemento óptico compuesto por el sustrato óptico y el sistema de capas aplicado. Esta llamada curva de medición real puede estar disponible como un conjunto de datos bidimensional compuesto por tuplas de datos, por ejemplo como longitud de onda en nanómetros y reflectividad en %. Estos datos se denominan "datos espectrales".

El software de simulación se instala en el ordenador de simulación.

El software de simulación es un programa informático que puede al menos leer el conjunto de datos generados por el dispositivo óptico de medición. El software de simulación también puede leer y enviar registros de datos del sistema de revestimiento.

5 El software implementa el procedimiento descrito según la invención como un algoritmo de control. El software trabaja con la base de datos y, por ejemplo, lee registros de datos patrón de la base de datos y guarda registros de datos de simulación recién calculados en la base de datos. El software también implementa al menos un algoritmo de optimización/fitalización de su elección, como los que se pueden encontrar en programas de simulación disponibles en el mercado, como "Essential MacLeod".

10 Los registros de datos objetivo de simulación obtenidos para cada sistema de revestimiento y para cada proceso de revestimiento se almacenan en la base de datos y pueden volver a leerse posteriormente. La base de datos también contiene los registros de datos de destino asociados para todos los procesos de revestimiento almacenados.

15 El intercambio bidireccional de datos entre el ordenador de control del sistema de revestimiento y el software de simulación puede realizarse directamente mediante el software de simulación y una conexión de red existente con el ordenador de control del sistema de revestimiento, o bien puede utilizarse otro software que se encargue del intercambio de datos y proporcione al software de simulación datos procedentes del sistema de revestimiento y transfiera datos de vuelta al sistema de revestimiento en la dirección opuesta. En el caso manual, este intercambio de datos tiene lugar mediante la interacción con un operador a través de un dispositivo de entrada.

20 Es favorable un sistema de revestimiento para producir un sistema de revestimiento, por ejemplo para un elemento óptico, en particular como se ha descrito anteriormente, que comprenda un componente para aplicar un proceso de envejecimiento artificial al sistema de revestimiento.

25 También es útil envejecer artificialmente el sistema de revestimiento producido en el sistema de revestimiento en el mismo sistema para obtener una curva de medición real estacionaria al determinar las propiedades espectrales del sistema de revestimiento. El resultado es un alto grado de seguridad a la hora de determinar los espesores correctos de las capas de corrección para los nuevos sistemas de revestimiento, ya que las propiedades de los sistemas de revestimiento ya no cambian significativamente con el tiempo.

Ventajosamente, el procedimiento que utiliza el procedimiento según el primer aspecto de la invención permite un modo de funcionamiento autocontrolado y controlado por realimentación de los sistemas de revestimiento.

Un sistema de revestimiento para producir un sistema de revestimiento, por ejemplo para un elemento óptico, en particular como se ha descrito anteriormente, que comprende

30 un dispositivo óptico de medición para determinar una curva de medición real espectralmente resuelta del sistema de revestimiento y/o

un componente para aplicar un proceso de envejecimiento artificial al sistema de revestimiento.

35 Favorablemente, un dispositivo de medición óptica para la determinación in situ de los datos espectrales del sistema de revestimiento producido también puede disponerse directamente en el propio sistema de revestimiento. Esto elimina incertidumbres a la hora de transferir el sistema de revestimiento desde el sistema de revestimiento y posibles cambios posteriores en el sistema de revestimiento. De este modo, la determinación de un espesor de capa de corrección adecuado (para un sistema de revestimiento con una sola capa) o de varios (para un sistema de revestimiento con varias capas individuales) puede llevarse a cabo de forma más directa. Esto permite optimizar mejor los registros de datos del sistema para el proceso de revestimiento. Ventajosamente, también puede integrarse en el sistema de revestimiento un componente para el envejecimiento artificial del sistema de revestimiento producido. El sistema de revestimiento producido en el sistema de revestimiento también se puede envejecer artificialmente en el mismo sistema para obtener una curva de medición real estacionaria al determinar las propiedades espectrales del elemento óptico.

45 Esto da como resultado un alto grado de certeza al determinar el espesor correcto de una o más capas de corrección para los nuevos sistemas de capas, ya que las propiedades de los sistemas de capas ya no cambian significativamente con el tiempo.

Ventajosamente, el sistema de revestimiento que utiliza el procedimiento según el primer aspecto de la invención puede funcionar de manera autocontrolada y controlada por realimentación.

50 Sistema de instalaciones de revestimiento para la producción de sistemas de capas, por ejemplo para elementos ópticos, en particular como se ha descrito anteriormente, que comprende al menos

uno o más sistemas de revestimiento para revestir al menos un sustrato con un sistema de revestimiento;

uno o más ordenadores de control para controlar al menos un sistema de revestimiento y para comunicarse con un ordenador de simulación,

un dispositivo de medición óptico para determinar una curva de medición real resuelta espectralmente del sistema de capas;

un ordenador de simulación en el que está instalado un software de simulación para el cálculo óptico y la optimización del sistema de revestimiento y que se comunica con el ordenador de control del sistema de revestimiento;

una base de datos para almacenar registros de datos de inversión; y

un dispositivo de entrada para ingresar y controlar la computadora de simulación y/o uno o más sistemas de revestimiento.

En un sistema de este tipo con varios sistemas de revestimiento, los distintos sistemas de revestimiento pueden controlarse mediante un ordenador de simulación, lo que conduce a un potencial de ahorro significativo en el funcionamiento de los sistemas de revestimiento. Los conocimientos y/o conjuntos de datos obtenidos en un sistema de revestimiento también se pueden transferir eficazmente a otro sistema de revestimiento.

Según otro aspecto, en particular independiente, de la invención, se propone un producto de programa de ordenador para un procedimiento de funcionamiento de al menos un sistema de revestimiento para producir sistemas de capas, por ejemplo para elementos ópticos, en el que el producto de programa de ordenador comprende al menos un medio de almacenamiento legible por ordenador que comprende instrucciones de programa que pueden ejecutarse en un sistema informático y hacer que el sistema informático ejecute un procedimiento.

El producto de programa de ordenador puede proporcionar el software para controlar y operar sistemas de revestimiento de forma modular y hacerlo accesible para una amplia variedad de sistemas de procesamiento de datos.

Ventajosamente, mediante el producto de programa informático que utiliza el procedimiento según el primer aspecto de la invención se puede hacer funcionar un sistema de revestimiento o un sistema de sistemas de revestimiento de forma autocontrolada y retroalimentada.

Ventajosamente, se proporciona un sistema de procesamiento de datos para ejecutar un programa de procesamiento de datos que comprende instrucciones de programa legibles por ordenador para ejecutar un procedimiento para el funcionamiento de al menos un sistema de revestimiento para producir sistemas de capas, por ejemplo para elementos ópticos, en particular como se ha descrito anteriormente. El sistema de procesamiento de datos puede incluir el ordenador de simulación y la base de datos, pero también el ordenador de control del sistema de revestimiento.

Ventajosamente, usando el procedimiento según el primer aspecto de la invención, un sistema de revestimiento o un sistema de sistemas de revestimiento puede operarse de manera autocontrolada y acoplada por realimentación mediante el sistema de procesamiento de datos.

## Dibujo

En el siguiente dibujo se describen otras ventajas. Las figuras muestran realizaciones de la invención. Las figuras, la descripción y las reivindicaciones contienen numerosas características combinadas. El experto en la materia también podrá considerar las características individualmente y combinarlas en otras combinaciones útiles.

## Se muestra por ejemplo:

Fig. 1 un diagrama de bloques de un sistema de revestimiento según una realización de la invención;

Fig. 2 una secuencia del procedimiento para el funcionamiento de al menos un sistema de revestimiento para la producción de sistemas de capas para elementos ópticos según un ejemplo de realización de la invención;

Fig. 3 un diagrama de flujo del procedimiento según la invención;

Fig. 4 un diagrama de flujo detallado del procedimiento según la invención;

Fig. 5 un elemento óptico con un sistema de capas que comprende cinco paquetes de capas sobre un sustrato según un ejemplo de realización de la invención;

Fig. 6 Curvas de reflectividad de un sistema de revestimiento según la invención en incidencia perpendicular de la luz con una comparación de una curva de medición real y una curva de medición nominal en la gama de longitudes de onda de 280 nm a 800 nm;

Fig. 7 una vista ampliada de las curvas de reflectividad de la Fig. 6;

Fig. 8 Curvas de reflectividad del sistema de capas con incidencia vertical de la luz con comparación de la curva de medición objetivo y una curva de medición objetivo de simulación escalada

Fig. 9 Curvas de reflectividad del sistema de revestimiento con incidencia perpendicular de la luz con una comparación de la curva de medición nominal y una curva de medición nominal de simulación ajustada en un primer intervalo espectral de 380 nm a 580 nm;

5 Fig. 10 Curvas de reflectividad del sistema de revestimiento en incidencia perpendicular de la luz con una comparación de la curva de medición nominal y una curva de medición nominal de simulación ajustada en un intervalo espectral mayor de 380 nm a 780 nm;

Fig. 11 Curvas de reflectividad del sistema de revestimiento en incidencia perpendicular de la luz con una comparación de la curva de medición real y una curva de medición objetivo de simulación ajustada en toda la gama de longitudes de onda de 280 nm a 800 nm;

10 Fig. 12 un diagrama de bloques de un sistema de equipo de revestimiento según otra realización de la invención.

### Realizaciones de la invención

En las figuras, los componentes del mismo tipo o que tienen el mismo efecto están etiquetados con los mismos símbolos de referencia. Las figuras sólo muestran ejemplos y no deben entenderse como limitantes.

15 La terminología direccional utilizada a continuación con términos como "izquierda", "derecha", "arriba", "abajo", "antes", "detrás", "después" y similares sólo sirve para comprender mejor las figuras y de ninguna manera pretende limitar la generalidad representativa. Los componentes y elementos mostrados, su diseño y uso pueden variar según las consideraciones de un experto en la materia y pueden adaptarse a las respectivas aplicaciones.

20 La Figura 1 muestra un diagrama de bloques de un sistema de revestimiento 100 según una realización ejemplar de la invención. El sistema de revestimiento 100 puede funcionar ventajosamente con un proceso de control de retroalimentación y autocontrol. El sistema de revestimiento 100 para producir un sistema de capas 10 para un elemento óptico 80 comprende al menos un sistema de revestimiento 108 para revestir un sustrato 22 con un sistema de capas 10 para un elemento óptico 80.

La estructura de un elemento óptico 80 con un sistema de capas 10 sobre un sustrato 22 se muestra en la Figura 5.

25 Además, el sistema de revestimiento 100 comprende un ordenador de control 110 para controlar el sistema de revestimiento 108 y para comunicarse con un ordenador de simulación 102, un dispositivo de medición óptica para determinar una curva de medición real 90 resuelta espectralmente del sistema de revestimiento 10, un ordenador de simulación 102 en el que está instalado el software de simulación 104 para el cálculo óptico y la optimización del sistema de revestimiento 10, una base de datos 106 para almacenar registros de datos del sistema DAT, y un dispositivo de entrada 114 para introducir y controlar el ordenador de simulación 102 y/o el sistema de revestimiento 108 a través de entradas manuales 120.

La base de datos 106 se utiliza preferentemente según un aspecto, en particular independiente, para llevar a cabo un procedimiento según el primer aspecto de la invención.

35 La base de datos 106 se utiliza para almacenar registros de datos de sistema DAT, para un procedimiento de funcionamiento del sistema de revestimiento 108 para producir sistemas de capas 10 para elementos ópticos 80, en el que los registros de datos de sistema DAT comprenden al menos registros de datos de sistema DAT<sub>n</sub>, DAT<sub>n+1</sub>, registros de datos objetivo DAT<sub>soll</sub>, registros de datos reales de simulación DAT<sub>ist\_sim</sub>, y/o registros de datos objetivo de simulación DAT<sub>soll\_sim</sub>.

40 Un producto de programa de ordenador para un procedimiento según el primer aspecto de la invención para operar al menos un sistema de revestimiento 108 para producir sistemas de capas 10 para elementos ópticos 80 se implementa en el ordenador de simulación 102, en el que el producto de programa de ordenador comprende al menos un medio de almacenamiento legible por ordenador que comprende instrucciones de programa ejecutables en el sistema de ordenador 102 y que hacen que el sistema de ordenador 102 ejecute el procedimiento.

45 El producto de programa de ordenador puede considerarse un aspecto independiente de la invención, en particular para ejecutar un procedimiento según el primer aspecto de la invención en un ordenador de simulación 102 de un sistema de procesamiento de datos 124.

El sistema de procesamiento de datos 124, que comprende al menos el ordenador de simulación 102 y el software de simulación 104, es para ejecutar un programa de procesamiento de datos que comprende instrucciones de programa legibles por ordenador para realizar el procedimiento de funcionamiento del sistema de revestimiento 108 para producir sistemas de capas 10 para elementos ópticos 80.

50 El sistema de procesamiento de datos 124 puede considerarse un aspecto independiente de la invención, en particular para realizar un procedimiento según el primer aspecto de la invención utilizando un ordenador de simulación 102.

El sistema de revestimiento 108 puede incluir opcionalmente un componente 116 para aplicar un proceso de envejecimiento artificial al sistema de revestimiento 10 para asegurar condiciones estables del elemento óptico 80 durante la medición espectral del sistema de revestimiento 10 en el dispositivo de medición óptica 112, 118.

5 En otra opción, el sistema de revestimiento 108 puede comprender también un dispositivo de medición óptica 118 para determinar una curva de medición real 90 resuelta espectralmente del sistema de revestimiento 10, de modo que puedan realizarse mediciones in situ de las propiedades espectrales del sistema de revestimiento 10 en el propio sistema de revestimiento 108 y pueda transmitirse retroalimentación directa al ordenador de simulación 102.

10 En la Figura 2, se muestra gráficamente una secuencia del procedimiento según un primer aspecto de la invención para operar al menos un sistema de revestimiento 108 para producir sistemas de capas 10 para elementos ópticos 80 según un ejemplo de realización de la invención y se describe en las Figuras 3 y 4 como un diagrama de flujo, o como un diagrama de flujo detallado en etapas individuales.

15 El procedimiento para hacer funcionar el sistema de revestimiento 108 según el primer aspecto de la invención comprende en la primer etapa S100 (i) adquirir al menos una curva de medición espectral con valores de ordenada y valores de abscisa como curva de medición real 90 en un sistema de revestimiento real 10<sub>n</sub>, que comprende una secuencia de capas individuales 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 con espesores de capa del sistema real respectivos d<sub>ist</sub>\_11, ..., d<sub>ist</sub>\_20. Las capas individuales 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 se producen según un conjunto de datos de sistema DAT<sub>n</sub> del sistema de revestimiento 108. El conjunto de datos del sistema DAT<sub>n</sub> comprende al menos los espesores reales de capa del sistema d<sub>ist</sub>\_11, ..., d<sub>ist</sub>\_20 de las capas individuales 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20.

20 En la siguiente etapa S102, (ii) la curva de medición real 90 del sistema de capas real 10<sub>n</sub> se asigna a una curva de medición objetivo 92 de un conjunto de datos objetivo DAT<sub>soll</sub> con valores de ordenadas y valores de abscisas, que se basa en un sistema de capas de conjunto de datos objetivo 10<sub>soll</sub> formado a partir de capas individuales 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, de acuerdo con un criterio de asignación, que puede comprender en particular puntos espectrales significativos de la curva de medición real 90. La curva de medición real 90 se asigna a un conjunto de datos objetivo DAT<sub>soll</sub> con valores de ordenadas y valores de abscisas. El conjunto de datos objetivo DAT<sub>soll</sub> comprende al menos espesores objetivo de capa conocidos d<sub>soll</sub>\_11, ..., d<sub>soll</sub>\_20 de las capas individuales 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 y se puede recuperar de la base de datos 106 a través del ordenador de simulación 102.

25 En una etapa adicional S104, (iii) se genera una curva de medición real de simulación 94 según un procedimiento iterativo variando al menos los espesores de capa simulación-real g<sub>ist</sub>\_11, ..., g<sub>ist</sub>\_20 de las capas individuales 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 en al menos un intervalo espectral 82 de la curva de medición real 90. Esto da como resultado un conjunto de datos finales de simulación-real DAT<sub>ist\_sim</sub> con al menos espesores de capa real de simulación final g<sub>ist</sub>\_11, ..., g<sub>ist</sub>\_20, que al menos se aproximan a la curva de medición real 90 en la curva de medición real de simulación 94. Este procedimiento iterativo se lleva a cabo hasta que se alcanza un criterio de anulación, por ejemplo hasta que se alcanza un resultado estable para el criterio de asignación según un procedimiento de selección estadística (comprobación S114 y consulta S116 en la Figura 4). En el procedimiento iterativo, por ejemplo, los espesores de capa objetivo g<sub>soll</sub>\_11, ..., g<sub>soll</sub>\_20 se utilizan como valores de partida para los espesores de capa reales de simulación d<sub>ist</sub>\_11, ..., d<sub>ist</sub>\_20.

30 En la siguiente etapa S106, (iv) se genera una curva de medición objetivo de simulación 98 de acuerdo con un procedimiento iterativo variando al menos los espesores de capa de objetivo de simulación g<sub>soll</sub>\_11, ..., g<sub>soll</sub>\_20 de las capas individuales 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 en al menos un intervalo espectral 82 de la curva de medición objetivo 92. La curva de medición objetivo de simulación 98 se genera de acuerdo con un procedimiento iterativo. Esto da como resultado un conjunto de datos objetivo de simulación final DAT<sub>soll\_sim</sub> con al menos espesores de capa objetivo de simulación final g<sub>soll</sub>\_11, ..., g<sub>soll</sub>\_20, que al menos se aproximan a la curva de medición objetivo 92 en la curva de medición objetivo de simulación 98. Este procedimiento iterativo se lleva a cabo hasta que se alcanza un criterio de anulación, por ejemplo hasta que se alcanza un resultado estable para el criterio de asignación según un procedimiento de selección estadística (comprobación S115 y consulta S117 en la Figura 4). Por ejemplo, los espesores de capa reales de simulación g<sub>ist</sub>\_11, ..., g<sub>ist</sub>\_20 se utilizan como valores de partida para los espesores de capa objetivo de simulación g<sub>soll</sub>\_11, ..., g<sub>soll</sub>\_20 en el procedimiento iterativo.

35 En una etapa final S108, (v) el conjunto de datos objetivo de simulación final DAT<sub>soll\_sim</sub> para el sistema de revestimiento 108 se proporciona como un nuevo conjunto de datos de sistema DAT<sub>n+1</sub> para la deposición de un sistema de revestimiento adicional 10<sub>n+1</sub> con al menos espesores de revestimiento reales de corrección d<sub>korr</sub>\_11, ..., d<sub>korr</sub>\_20 como nuevos espesores de revestimiento reales de sistema d<sub>ist</sub>\_11, ..., d<sub>ist</sub>\_20. Estos se determinan a partir de los espesores de capa objetivo de simulación final g<sub>soll</sub>\_11, ..., g<sub>soll</sub>\_20 con el conjunto de datos objetivo de simulación final DAT<sub>soll\_sim</sub>.

55 Para generar la curva de medición real de simulación 94 o la curva de medición objetivo de simulación 98 en las etapas S104 o S106, se puede determinar un factor de escala 122 en una etapa respectiva S110 o S111 como el valor medio de los cocientes de los valores de abscisa de la curva de medición real 90 o la curva de medición real de simulación 94 y la curva de medición objetivo 92 para los valores de abscisa determinados según el criterio de asignación. Este factor de escala 122 se utiliza para escalar los espesores de capa objetivo d<sub>soll</sub>\_11, ..., d<sub>soll</sub>\_20; o los espesores

de capa reales de simulación  $g\_ist\_11, \dots, g\_ist\_20$  de las capas individuales 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 se escalan y determinan como valores iniciales de los espesores de capa reales de simulación  $g\_ist\_11, \dots, g\_ist\_20$ , o espesores de capa objetivo de simulación  $g\_soll\_11, \dots, g\_soll\_20$ .

Para generar la curva de medida real de simulación 94 o la curva de medida objetivo de simulación 98 en las etapas S104 o S106, un cociente 126 del correspondiente primer espesor de capa real de simulación final  $g\_ist\_11, \dots, g\_ist\_20$ , o el correspondiente primer espesor de capa objetivo de simulación final  $g\_soll\_11, \dots, g\_soll\_20$  y el correspondiente espesor de capa de sistema real  $d\_ist\_11, \dots, d\_ist\_20$ , puede formarse. El cociente 126 se utiliza para generar los primeros espesores de capa reales de simulación  $g\_ist\_11, \dots, g\_ist\_20$  o los espesores de capa objetivo de simulación  $g\_soll\_11, \dots, g\_soll\_20$  escalando los espesores de capa reales de simulación  $g\_ist\_11, \dots, g\_ist\_20$  o los espesores de capa objetivo de simulación  $g\_soll\_11, \dots, g\_soll\_20$  con el cociente 126.

En una etapa S114 o S115, los primeros espesores de capa reales de simulación individuales  $g\_ist\_11, \dots, g\_ist\_20$  o los espesores de capa objetivo de simulación  $g\_soll\_11, \dots, g\_soll\_20$  pueden comprobarse para al menos un criterio, en particular una plausibilidad y/o una desviación predeterminada de los respectivos espesores de capa objetivo  $g\_soll\_11, \dots, g\_soll\_20$  de la curva de medición objetivo 94. Si no se cumple el al menos un criterio, la variación de los espesores de capa real de simulación  $g\_ist\_11, \dots, g\_ist\_20$  o de los espesores de capa objetivo de simulación  $g\_soll\_11, \dots, g\_soll\_20$  en las etapas S104, S106 y la provisión S108 de los primeros espesores de capa real de simulación finales  $g\_ist\_11, \dots, g\_ist\_20$  o de los espesores de capa objetivo de simulación  $g\_soll\_11, \dots, g\_soll\_20$  y la generación del primer espesor de capa real de simulación  $g\_ist\_11, \dots, g\_ist\_20$ , o espesor de capa objetivo de simulación  $g\_soll\_11, \dots, g\_soll\_20$  se repite, por lo que se especifica una restricción en la variación de S104, S106 para aquellas capas individuales 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 que han fallado el criterio. A continuación, se proporcionan los segundos espesores de capa reales de simulación  $g\_ist\_11, \dots, g\_ist\_20$  o los espesores de capa objetivo de simulación  $g\_soll\_11, \dots, g\_soll\_20$ .

Las etapas S104, S106, S112, S113, S114, S115 pueden repetirse en uno o más intervalos espectrales 84, 86, en los que cada intervalo subsiguiente 84, 86 incluye el intervalo precedente 82, 84, y en los que los segundos espesores de capa reales de simulación  $g\_ist\_11, \dots, g\_ist\_20$ . Los espesores de capa objetivo de simulación  $g\_soll\_11, \dots, g\_soll\_20$  del intervalo precedente 82, 84 se utilizan como valores iniciales en el intervalo siguiente 84, 86 y se proporcionan los espesores de capa reales de simulación finales  $g\_ist\_11, \dots, g\_ist\_20$  o los espesores de capa objetivo de simulación  $g\_soll\_11, \dots, g\_soll\_20$ .

El procedimiento descrito para producir un sistema de capas 10 para un elemento óptico 80, puede ventajosamente realizarse de tal manera que el procedimiento iterativo se realice para uno o más intervalos espectrales 82, 84, 86, en el que cada intervalo subsiguiente 84, 86 incluye el intervalo precedente 82, 84. Además, el procedimiento descrito también puede utilizarse para iniciar un proceso de revestimiento en al menos un sistema de revestimiento 108 para producir un sistema de revestimiento 10 para un elemento óptico 80.

La figura 5 muestra un ejemplo de un elemento óptico 80 con un sistema de capas 10 sobre un sustrato 22, por ejemplo una lente de gafas, según una realización de la invención. El sistema de revestimiento interferométrico reductor de la reflexión 10 está dispuesto en al menos una superficie 24 del sustrato 22. Ventajosamente, el sistema de capas 10 puede fabricarse utilizando un procedimiento de autocontrol y retroalimentación según el primer aspecto de la invención.

Como capa más baja del sustrato 22, el sistema de capas 10 puede comprender una capa intermedia 30 de una o varias capas de manera convencional, por ejemplo para mejorar la adhesión de la pila 40 y/o como protección contra arañazos para el sustrato 22. Esta capa intermedia 30 puede consistir, por ejemplo, en óxidos metálicos subestequiométricos de baja refracción, cromo, silanos o siloxanos de la manera habitual. La capa intermedia 30 no es relevante para las consideraciones posteriores de las propiedades ópticas.

En la Figura 5, por ejemplo, cinco paquetes de capas 42, 44, 46, 48, 50 de una pila 40 están dispuestos consecutivamente sobre la capa intermedia 30.

Sobre la capa intermedia 30 se dispone una pila 40 de al menos cuatro, en este ejemplo cinco, paquetes de capas sucesivas 42, 44, 46, 48, 50, en la que cada paquete de capas 42, 44, 46, 48, 50 comprende un par de primeras capas individuales 11, 13, 15, 17, 19 y segundas capas individuales 12, 14, 16, 18, 20.

El paquete de capas 42 más cercano al sustrato comprende la capa individual 11 más cercana al sustrato y la capa individual 12 más alejada del sustrato, el siguiente paquete de capas 44 comprende la capa individual 13 más cercana al sustrato y la capa individual 14 más alejada del sustrato, el siguiente paquete de capas 46 comprende la capa individual 15 más próxima al sustrato y la capa individual 16 más alejada del sustrato, el siguiente paquete de capas 48 comprende la capa individual 17 más próxima al sustrato y la capa individual 18 más alejada del sustrato, y el paquete de capas 50 más alejado del sustrato comprende la capa individual 19 más próxima al sustrato y la capa individual 20 más alejada del sustrato.

Opcionalmente, la pila de capas 50 más alejada del sustrato puede tener una capa funcional 34 entre la capa parcial 19 más cercana al sustrato y la capa parcial 20 más alejada del sustrato, que puede actuar, por ejemplo, para aumentar



la conductividad eléctrica, para igualar la tensión mecánica y/o como barrera de difusión. Esta capa funcional 34 puede estar formada por un material de baja refracción y también puede alearse con otros óxidos metálicos como el aluminio. A efectos de cálculo y simulación de las propiedades ópticas, la capa funcional 34 puede añadirse a la subcapa refractiva inferior 20 del paquete de capas superior 50 más alejado del sustrato o, en caso necesario, no tenerse en cuenta, por ejemplo si el espesor de la capa es relativamente bajo.

En cada pila de capas 42, 44, 46, 48, 50, las correspondientes primeras capas individuales 11, 13, 15, 17, 19 tienen cada una un primer espesor óptico  $t_1$  y las correspondientes segundas capas individuales 12, 14, 16, 18, 20 tienen cada una un segundo espesor óptico  $t_2$  que es diferente del primer espesor óptico  $t_1$  en la respectiva pila de capas 42, 44, 46, 48, 50.

Un índice de refracción  $n_1$  de las respectivas primeras capas individuales 11, 13, 15, 17, 19 que están más cerca del sustrato es mayor que un índice de refracción  $n_2$  de las respectivas segundas capas individuales 12, 14, 16, 18, 20 de la pila 40 que están más alejadas del sustrato. El sistema de capas 10 tiene una luminosidad  $L^*$ , una cromaticidad  $C^*$  y un ángulo de cromaticidad  $h$  de un color de reflexión residual, en el que la cantidad de un cambio  $\Delta h$  del ángulo de cromaticidad  $h$  del color de reflexión residual en un intervalo de un ángulo de visión AOI con los valores límite  $0^\circ$  y  $30^\circ$  relativos a una normal de superficie 70 al sistema de capas 10 es menor que la cantidad de un cambio  $\Delta C^*$  de la cromaticidad  $C^*$  en el intervalo del ángulo de visión AOI.

El sistema de capas es visto por un observador en un ángulo de visión AOI de  $0^\circ$  hasta un ángulo crítico, por ejemplo  $30^\circ$ , medido desde la normal de superficie 70.

Para diseñar el sistema de capas 10, se llevan a cabo ventajosamente las siguientes etapas:

- Definir un diseño de capas que comprenda al menos un primer material para las primeras capas simples de alto índice de refracción 11, 13, 15, 17, 19 y un segundo material para las segundas capas simples de bajo índice de refracción 12, 14, 16, 18, 20, número de paquetes de capas deseados 42, 44, 46, 48, 50 con las capas simples 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, valores de partida del espesor de las capas simples 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20;
- Definir los valores de color objetivo, que comprenden la luminosidad  $L^*$ , la cromaticidad  $C^*$  y el ángulo de matiz  $h$  al menos en valores límite para un intervalo de un ángulo de visión AOI con valores límite de  $0^\circ$  y  $30^\circ$ ;
- Realizar un procedimiento de optimización para variar los espesores de capa individuales  $d_{ist\_11}$ , ...,  $d_{ist\_20}$  hasta que se alcance un objetivo de optimización.

El sustrato 22 es, por ejemplo, un plástico, en particular un plástico transparente para una lente de gafas.

En el contexto de la presente divulgación, el término lente oftálmica se refiere en particular a una lente oftálmica revestida de acuerdo con la sección 8.1.13 de la norma DIN EN ISO 13666:2013-10, es decir, una lente oftálmica a la que se han aplicado uno o más revestimientos superficiales, en particular para cambiar una o más de sus propiedades.

Preferentemente, tales lentes se pueden utilizar de forma especialmente ventajosa como gafas (con y sin corrección), gafas de sol, gafas de esquí, gafas de trabajo y gafas en combinación con dispositivos de visualización montados en la cabeza (los llamados "head-mounted displays").

En el marco de la presente divulgación, el término cristal para gafas también puede incluir productos semiacabados de cristal para gafas, en particular un cristal en bruto para gafas o un producto semiacabado de cristal para gafas según el punto 8.4.2 de la norma DIN EN ISO 13666: 2013-10, es decir, una lente en bruto o en bruto con una sola superficie con acabado óptico.

En base a las realizaciones de la Figura 5, la superficie opuesta 26 del sustrato 22 puede tener opcionalmente otro sistema de capas 10 similar o idéntico, sin revestimiento o sólo con un revestimiento protector (no mostrado).

Preferentemente, cada una de las capas individuales 11, 13, 15, 17, 19 más cercanas al sustrato está formada por un primer material idéntico. Preferentemente, el primer material es un material de mayor refracción con un primer índice de refracción  $n_1$ .

Preferentemente, cada una de las capas individuales 12, 14, 16, 18, 20 alejadas del sustrato está formada por un segundo material idéntico. Preferentemente, el segundo material es un material de baja refracción con un segundo índice de refracción  $n_2$ . El índice de refracción  $n_1$  es mayor que el índice de refracción  $n_2$ , preferentemente la diferencia entre los índices de refracción  $n_1$ ,  $n_2$  es al menos 0,2, preferentemente hasta al menos 0,5.

La secuencia de las primeras capas individuales 11, 13, 15, 17, 19 y de las segundas capas individuales 12, 14, 16, 18, 20 sigue siendo la misma en la pila 40, de modo que en cada pila de capas 42, 44, 46, 48, 50 la respectiva primera capa individual 11, 13, 15, 17, 19 es siempre la capa individual de mayor índice de refracción y la respectiva segunda capa individual 12, 14, 16, 18, 20, que está más alejada del sustrato, es siempre la capa individual de menor índice de refracción de las capas individuales 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20.

En particular, las capas individuales de alta refracción 11, 13, 15, 17, 19 pueden ser capas de materiales de alta refracción y las capas individuales de baja refracción 12, 14, 16, 18, 20 pueden ser capas de materiales de baja refracción.

5 Los paquetes de capas 42, 44, 46, 48, 50 de la pila 40 difieren únicamente en su espesor respectivo y/o en los espesores de las capas individuales 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 del paquete de capas 42, 44, 46, 48, 50 respectivo.

10 La pila 40 se sella de una manera conocida per se con una capa de cubierta 32, que sirve, por ejemplo, para mantener el sistema de capas 10. La capa de revestimiento 32 se aplica a la última capa individual ópticamente relevante 20 del paquete de capas superior 50 de la pila 40 y puede, por ejemplo, contener moléculas que contengan flúor. La capa superior 32 suele conferir a la pila 40 una propiedad de mantenimiento mejorada, con propiedades tales como una función hidrófuga y oleófuga a una energía superficial típicamente inferior a 15 mN/m.

La capa superior 32 no es relevante para las consideraciones posteriores de las propiedades ópticas del sistema de revestimiento 10.

15 Las propiedades ópticas de la pila 40 del sistema de capas 10 pueden simularse computacionalmente utilizando procedimientos de cálculo conocidos y/o procedimientos de optimización. A continuación, se fabrica el sistema de capas 10 con los espesores de capa determinados de las subcapas individuales 60, 62 de los paquetes de capas 42, 44, 46, 48, 50.

20 En la producción de sistemas de capas ópticas 10, las propiedades ópticas del sistema de capas 10 se ajustan durante la producción de las subcapas 60, 62. Por ejemplo, puede utilizarse el procedimiento conocido por el documento WO 2016/110339 A1, que se expone brevemente a continuación. Con el proceso conocido, se pueden conseguir diversos efectos ópticos, como el reflejo o la reducción de la reflexión, en un sistema de materiales cambiando únicamente el espesor de las capas, pero el material utilizado sigue siendo el mismo. Sin embargo, también son posibles otros procedimientos.

25 Variando los espesores de los paquetes de capas con los mismos materiales, como se describe en el documento WO 2016/110339 A1, se pueden conseguir diferentes reflectividades, en particular para un efecto de reducción de la reflexión. Esto se consigue minimizando u optimizando un parámetro  $\sigma$ . El parámetro  $\sigma$  es a su vez función de los espesores de capa de las capas individuales 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, o de relaciones de los espesores ópticos  $t_1$ ,  $t_2$  de las capas individuales 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 de cada uno de los paquetes de cuatro capas 42, 44, 46, 48 (no mostrados) o paquetes de cinco capas 42, 44, 46, 48, 50 según la figura 5 en la pila 40.

30 A una determinada longitud de onda  $\lambda$ , el espesor óptico  $t$  de un revestimiento, también denominado FWOT (Espesor óptico de onda completa), se determina de la siguiente manera

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

donde  $d$  es el espesor de la capa,  $\lambda$  es la longitud de onda de diseño y  $n$  es el índice de refracción de las capas individuales 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20.

35 Se puede conseguir un efecto de reducción de la reflexión por la pila 40 para una reflectividad predeterminable  $R_m$  de la pila 40 si el producto de la reflectividad  $R_m$  y el parámetro  $\sigma$  se establece en menos de 1:

$$R_m \cdot \sigma < 1$$

40 La reflectividad  $R_m$ , también llamada reflectancia, describe la relación entre la intensidad reflejada y la intensidad incidente de un haz de luz como una cantidad de energía. La reflectividad  $R_m$  se promedia convenientemente en el intervalo de luz de 380 nm a 800 nm y se relaciona con el 100 %.

Tal condición  $R_m \cdot \sigma < 1$  puede utilizarse como condición de contorno para un proceso de optimización del procedimiento de producción del sistema de capas 10.

45 Los espesores ópticos  $t_1$ ,  $t_2$  de la primera y segunda capas individuales 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 de los paquetes de capas 42, 44, 46, 48, 50 se determinan determinando el parámetro  $\sigma$  mediante un procedimiento de optimización, preferentemente mediante cálculo variacional.

50 Preferentemente, los espesores de las respectivas capas individuales 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 con paquetes de cinco capas 42, 44, 46, 48, 50 en la pila 40 se determinan como una función de un cociente  $v_i$  (donde  $i=1, 2, 3, 4, 5$ ) del primer espesor óptico  $t_1$  de las primeras capas individuales de mayor refracción 11, 13, 15, 17, 19 y el segundo espesor óptico  $t_2$  de las segundas capas individuales de menor refracción 12, 14, 16, 18, 20 de la respectiva pila de capas 42, 44, 46, 48, 50.

En una realización ventajosa, el parámetro  $\sigma$  para una pila 40 con cinco paquetes de capas consecutivos 42, 44, 46, 48, 50 en un sistema de capas 10 según la figura 5 puede calcularse a partir de la relación

$$\sigma = \frac{v_1}{\sum_{i=2}^{n_{\max}} v_i}$$

donde,  $i$  va de 2 a  $n_{\max}=5$ .

- 5 Los índices  $i=1, 2, 3, 4, 5$  representan la secuencia de los paquetes de capas 42, 44, 46, 48, 50 en el sustrato 22. Por consiguiente,  $v_1$  representa la pila de capas 42 más cercana al sustrato y  $v_5$  la pila de capas 50 más alejada del sustrato.

10 Se conoce la especificación de colores perceptuales en el denominado espacio de color CIE-L\*a\*b\* (espacio de color CIELab simplificado) en coordenadas cartesianas, tal como se establece en DIN EN ISO 11664-4:2012-06 (EN ISO 11664-4:2011).

L\* es la luminosidad CIELab, a\*, b\* son las coordenadas CIELab, C\* es la cromaticidad CIELab y  $h_{ab}$  es el ángulo de cromaticidad CIELab.

15 El eje L\* describe el brillo (luminancia) del color con valores de 0 a 100. El eje L\* es perpendicular al plano a\*b\* en el punto cero. También puede describirse como un eje gris neutro, ya que todos los colores acromáticos (tonos de gris) están contenidos entre los puntos extremos negro ( $L^*=0$ ) y blanco ( $L^*=100$ ).

En el eje a\*, el verde y el rojo están opuestos, el eje b\* discurre entre el azul y el amarillo. Los tonos de colores complementarios son cada uno 180° opuesto al otro, en su centro, es decir, el origen de coordenadas  $a^*=0$ ,  $b^*=0$ , es gris.

20 El eje a\* describe el componente verde o rojo de un color, donde los valores negativos representan el verde y los positivos el rojo. El eje b\* describe el componente azul o amarillo de un color, con valores negativos para el azul y positivos para el amarillo.

Los valores a\* van aproximadamente de -170 a +100, los valores b\* de -100 a +150, por lo que los valores máximos sólo se alcanzan con una luminosidad media de determinados tonos de color. El cuerpo de color CIELab tiene su mayor expansión en la gama de luminosidad media, pero ésta varía en altura y tamaño en función de la gama de color.

25 El ángulo cromático CIELab  $h_{ab}$  debe estar comprendido entre 0° y 90° si a\* y b\* son positivos, entre 90° y 180° si b\* es positivo y a\* es negativo, entre 180° y 270° si a\* y b\* son negativos y entre 270° y 360° si b\* es negativo y a\* es positivo.

30 En el espacio de color CIE-L\*C\*h (espacio de color CIELCh simplificado), las coordenadas cartesianas del espacio de color CIELab se transforman en coordenadas polares. Se especifican las coordenadas cilíndricas C\* (cromaticidad, saturación relativa del color, distancia del eje L en el centro) y h (ángulo del tono, ángulo del tono en el círculo cromático CIELab). La luminosidad L\* del CIELab no cambia.

El ángulo cromático h resulta de los ejes a\* y b\*

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

35 El ángulo de matiz h representa el color de la reflexión residual del sistema de revestimiento reductor de la reflexión 10.

La cromaticidad C\* da como resultado

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

La cromaticidad C\* también se denomina profundidad de color.

40 Para determinar los espesores de capa  $d_{\text{soll}_11}$ , ...,  $d_{\text{soll}_20}$  de las capas individuales 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, se lleva a cabo un procedimiento de optimización para variar los espesores de capa individuales  $d_{\text{soll}_11}$ , ...,  $d_{\text{soll}_20}$  hasta alcanzar un objetivo de optimización. A continuación, el proceso de optimización varía los espesores de capa individuales  $d_{\text{soll}_11}$ , ...,  $d_{\text{soll}_20}$  hasta que se alcanza el objetivo de optimización (estabilidad del color).

El ángulo de matiz  $h$  puede variar como máximo  $15^\circ$  en el intervalo del ángulo de visión AOI con los valores límite  $0^\circ$  y  $30^\circ$ , preferentemente como máximo  $10^\circ$ . La cantidad de cambio  $\Delta h$  del ángulo de matiz  $h$  puede ser menor que la cantidad de cambio  $\Delta C^*$  en un segundo intervalo de un ángulo de visión AOI desde  $0^\circ$  hasta un ángulo de visión límite  $\Theta$  con valores límite superiores de  $30^\circ$  y  $45^\circ$  basado en la superficie normal 70 en el sistema de capas 10 Cromaticidad  $C^*$  en el segundo intervalo del ángulo de visión AOI y la cantidad de cromaticidad  $C^*$  puede ser al menos  $\Theta = 2$  en el ángulo de visión límite  $\Theta$ , en particular el ángulo de tono  $h$  en el segundo intervalo puede variar como máximo  $20^\circ$ , preferentemente como máximo  $15^\circ$ .

La reflectancia fotópica  $R_v$  en el intervalo del ángulo de visión AOI con los valores límite  $0^\circ$  y  $30^\circ$  puede ser ventajosamente como máximo del 1,5%, preferentemente como máximo del 1,2%.

La reflectancia escotópica  $R_v'$  en el intervalo del ángulo de visión AOI con los valores límite  $0^\circ$  y  $30^\circ$  puede ser ventajosamente como máximo del 1,5%, preferentemente como máximo del 1,2%.

Las Figuras 6 a 11 muestran cada una curvas de reflectividad en incidencia vertical de la luz como curvas de medición real 90 junto con curvas de medición nominal 92 o curvas de medición real de simulación 94.

La figura 6 muestra curvas de reflectividad de un sistema de revestimiento 10 según la invención con una comparación de una curva de medición real 90 (línea continua) y una curva de medición nominal 92 (línea de puntos) en el intervalo de longitud de onda de 280 nm a 800 nm; la figura 7 muestra una representación ampliada de las curvas de reflectividad de la figura 6. La curva de medición objetivo 92 se determinó comparando los valores extremos de la base de datos 106 como curva de medición objetivo 92 con la curva de medición real 90. Puede reconocerse un fuerte desplazamiento del pico en la gama baja de longitudes de onda entre 280 nm y 380 nm y en la representación ampliada de la figura 7 en la gama de longitudes de onda de 380 nm y 680 nm.

La figura 8 muestra curvas de reflectividad del sistema de revestimiento 10 con una comparación de la curva de medición nominal 92 (línea de puntos) y una curva de medición nominal de simulación a escala 98 (línea continua). Esto dio lugar a un desplazamiento horizontal de la curva de medición del objetivo de simulación 98. El sistema de capas 10 completo se ha escalado, es decir, el vector que contiene todos los espesores de capa físicos  $g\_soll\_11, \dots, g\_soll\_20$  de las capas individuales 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 que representan el sistema de capas 10 se ha multiplicado por un factor de escala 122, es decir, cada capa individual 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 se ha hecho más gruesa o más fina por el mismo factor de escala 122. es decir, cada capa individual 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 se hizo más gruesa o más fina por el mismo factor de escala 122.

La figura 9 muestra curvas de reflectividad del sistema de revestimiento 10 con una comparación de la curva de medición nominal 92 y una curva de medición nominal de simulación 98 ajustada en un primer intervalo espectral 82 de 380 nm a 580 nm. Para el proceso de optimización iterativa se utilizó el algoritmo simplex. El algoritmo se inició con el objetivo de optimización de mapear la curva de medición objetivo 98 de simulación de la etapa anterior con la mayor precisión posible a la curva de medición objetivo 92 en el intervalo de 380 nm a 580 nm cambiando los espesores de capa física  $g\_soll\_11, \dots, g\_soll\_20$ . El resultado es una muy buena aproximación de las dos curvas de medición 92, 98 en el intervalo seleccionado 82.

La figura 10 muestra curvas de reflectividad del sistema de revestimiento 10 con una comparación de la curva de medición nominal 92 y una curva de medición nominal de simulación 98 ajustada en un intervalo espectral 84 más amplio de 380 nm a 780 nm. Esta vez, se utilizó la optimización simplex en el intervalo más amplio 84 de 380 nm a 780 nm. No se han tenido en cuenta las relaciones de espesor de capa. En la gama inferior de longitudes de onda en torno a 400 nm, la calidad de la concordancia entre las dos curvas de medición 92, 98 es ligeramente inferior, mientras que es mejor en la gama superior de longitudes de onda de 580 nm a 680 nm.

La figura 11 muestra las curvas de reflectividad del sistema de revestimiento 10 con una comparación de la curva de medición nominal 92 y una curva de medición nominal de simulación 98 ajustada sobre toda la gama de longitudes de onda como un intervalo 86 de 280 nm a 800 nm. Esta vez, se utilizó la optimización simplex en el intervalo mayor 86 de 280 nm a 800 nm. No se han tenido en cuenta las relaciones de espesor de capa. La calidad de la concordancia entre las dos curvas de medición 92, 98 se ha deteriorado ligeramente en la gama de longitudes de onda medias de 480 nm a 580 nm, pero ha mejorado por término medio en toda la gama de longitudes de onda de 280 nm a 800 nm.

La figura 12 muestra un diagrama de bloques de un sistema 200 de equipo de revestimiento 108 según otra realización de la invención. El sistema 200 también puede considerarse como un sistema autónomo operable con un proceso de autocontrol y control por realimentación según el primer aspecto de la invención. El sistema 200 de máquinas de revestimiento 108 para producir sistemas de capas 10 para elementos ópticos 80 comprende dos máquinas de revestimiento 108 para revestir un sustrato 22 con un sistema de revestimiento 10 para un elemento óptico 80, un ordenador de control 110 para controlar una máquina de revestimiento 108 y para comunicarse con un ordenador de simulación 102 un dispositivo de medición óptica 112 por cada sistema de revestimiento 108 para determinar una curva de medición real 90 resuelta espectralmente del sistema de revestimiento 10, y un ordenador de simulación 102, en el que está instalado el software de simulación 104 para el cálculo óptico y la optimización del sistema de revestimiento 10, y que se comunica con los ordenadores de control 102 de los sistemas de revestimiento 108. El sistema 200 comprende además una base de datos 106 para almacenar registros de datos del sistema DAT, un

dispositivo de entrada 114 para introducir y controlar el ordenador de simulación 102 y/o los sistemas de revestimiento 108. Con un sistema 200 de sistemas de revestimiento 108 de este tipo, es ventajosamente posible controlar varios sistemas de revestimiento 108 a través de un ordenador de simulación 102 y ejecutar y/o optimizar los procesos de revestimiento para la producción de elementos ópticos 80 con sistemas de capas 10.

## REIVINDICACIONES

1. Procedimiento implementado en ordenador para el funcionamiento de al menos un sistema de revestimiento (108) para producir sistemas de capas (10), que comprende

(i) adquirir (S100) al menos una curva de medición espectral con valores de ordenadas y abscisas como curva de medición real (90) en un sistema de capas real (10<sub>n</sub>), que consta de una o más capas individuales (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) cada una con un espesor real de capa del sistema (d<sub>ist\_11</sub>, ..., d<sub>ist\_20</sub>) de la respectiva capa individual (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20), en el que la una o más capas individuales (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) se producen de acuerdo con un conjunto de datos del sistema (DAT<sub>n</sub>) del al menos un sistema de revestimiento (108), en el que el conjunto de datos del sistema (DAT<sub>n</sub>) contiene al menos el espesor real de capa del sistema (d<sub>ist\_11</sub>, ..., d<sub>ist\_20</sub>) de la respectiva capa individual (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) de la una o más capas individuales (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20);

(ii) asignar (S102) la curva de medición real (90) del sistema de capas real (10<sub>n</sub>) según al menos un criterio de asignación, en particular para puntos espectrales significativos de la curva de medición real (90), a una curva de medición nominal (92) de un conjunto de datos nominal (DAT<sub>soll</sub>) con valores de ordenadas y valores de abscisas, que se basa en un sistema de capas del conjunto de datos nominal (10<sub>soll</sub>) formado por una o más capas individuales (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20), en el que el conjunto de datos nominal (DAT<sub>soll</sub>) tiene al menos un espesor de capa nominal conocido (d<sub>soll\_11</sub>, ..., d<sub>soll\_20</sub>) de la respectiva capa individual (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) de la una o más capas individuales (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20);

(iii) generar (S104) una curva de medición simulación real (94) según un procedimiento iterativo variando al menos un espesor de capa simulación real (g<sub>ist\_11</sub>, ..., g<sub>ist\_20</sub>) de la capa individual respectiva (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) en al menos un intervalo espectral (82) de la curva de medición real (90) y obteniendo un conjunto de datos de simulación real final (DAT<sub>ist\_sim</sub>) con al menos un espesor de capa de simulación real final (g<sub>ist\_11</sub>, ..., g<sub>ist\_20</sub>) de la respectiva capa individual (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) de la una o más capas individuales (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20), mediante la cual la curva de medición real (90) en la curva de medición real de simulación (94) es al menos aproximada hasta que se alcanza un criterio de terminación (S116); **caracterizado por**

(iv) generar (S106) una curva de medición objetivo de simulación (98) según un procedimiento iterativo variando al menos el espesor de la capa del blanco de simulación (g<sub>soll\_11</sub>, ..., g<sub>soll\_20</sub>) de la capa individual respectiva (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) en al menos un intervalo espectral (82) de la curva de medición objetivo (92) y obteniendo un conjunto de datos objetivo de simulación final (DAT<sub>soll\_sim</sub>) con al menos un espesor de capa objetivo de simulación final (g<sub>soll\_11</sub>, ..., g<sub>soll\_20</sub>) de la respectiva capa individual (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) de la una o más capas individuales (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20), mediante la cual la curva de medición objetivo (92) se aproxima al menos en la curva de medición objetivo de simulación (98) hasta que se alcanza un criterio de terminación (S116), en el que las diferencias ópticas entre la curva de medición real (90) y la curva de medición real de simulación (94) se correlacionan, y el conjunto de datos reales de simulación (DAT<sub>ist\_sim</sub>) se utiliza para un recálculo de la curva de medición objetivo de simulación (98) con respecto a la curva de medición objetivo (92);

(v) suministrar (S108) el conjunto de datos objetivo de simulación final (DAT<sub>soll\_sim</sub>) para el al menos un sistema de revestimiento (108) como un nuevo conjunto de datos del sistema (DAT<sub>n+1</sub>) para la deposición de otro sistema de capas (10<sub>n+1</sub>) con al menos un espesor de capa real de corrección (d<sub>korr\_11</sub>, ..., d<sub>korr\_20</sub>) como un nuevo espesor de capa real del sistema (d<sub>ist\_11</sub>, ..., d<sub>ist\_20</sub>) de la capa individual respectiva (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20), que se calcula a partir del espesor de capa objetivo de simulación final (g<sub>soll\_11</sub>, ..., g<sub>soll\_20</sub>) de la capa individual respectiva (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) de la una o más capas individuales (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) con el conjunto de datos objetivo de simulación final (DAT<sub>soll\_sim</sub>).

2. El procedimiento según la reivindicación 1, en el que el criterio de terminación se alcanza cuando se cumple al menos una de las siguientes condiciones:

(i) se consigue un resultado estable para el criterio de asignación según un procedimiento de selección estadística;

(ii) una desviación entre la curva de medición real (90) y la curva de medición real de simulación (94) se encuentra dentro de un margen de tolerancia;

(iii) se ha realizado un número máximo de iteraciones.

3. Procedimiento según la reivindicación 1 o 2,

en el que el espesor de capa objetivo ( $d_{soll\_11}, \dots, d_{soll\_20}$ ) de la capa individual respectiva (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) se utiliza como valor inicial del espesor de capa real de simulación ( $g_{ist\_11}, \dots, g_{ist\_20}$ ) de la capa individual respectiva (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20);

y/o

- 5 en el que el espesor de capa real de simulación ( $g_{ist\_11}, \dots, g_{ist\_20}$ ) de la capa individual respectiva (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) se utiliza como valor inicial del espesor de capa objetivo de simulación ( $g_{soll\_11}, \dots, g_{soll\_20}$ ) de la capa individual respectiva (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20);

y/o

- 10 en el que un espesor de capa predeterminado de la capa individual respectiva (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) se utiliza como valor inicial del espesor de capa objetivo de simulación ( $g_{soll\_11}, \dots, g_{soll\_20}$ ) de la capa individual respectiva (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20).

4. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, para generar (S104, S106) la curva de medición real de simulación (94) o la curva de medición objetivo de simulación (98), respectivamente que comprende además

- 15 determinar (S110) un factor de escala (122) como el valor medio de los cocientes de los valores de abscisa de la curva de medición real (90) o curva de medición real de simulación (94) respectivamente, y la curva de medición objetivo (92), para los valores de abscisa determinados según el criterio de asignación y escalar el espesor de capa objetivo ( $d_{soll\_11}, \dots, d_{soll\_20}$ ); o el espesor de capa real de simulación ( $g_{ist\_11}, \dots, g_{ist\_20}$ ), respectivamente, de la capa individual respectiva (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) con el factor de escala (122) como valores iniciales del espesor de capa real de simulación ( $g_{ist\_11}, \dots, g_{ist\_20}$ ), o el espesor de capa objetivo de simulación ( $g_{soll\_11}, \dots, g_{soll\_20}$ ), respectivamente, de la respectiva capa individual (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) de la una o más capas individuales (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20).

5. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes, para generar (S104, S106) la curva de medición real de simulación (94) o la curva de medición objetivo de simulación (98), respectivamente, que comprende además

- 25 formar (S112), al menos para el primer intervalo (82) para una o cada una de la pluralidad de capas individuales (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20), un cociente (126) del correspondiente primer espesor de capa real final de simulación ( $g_{ist\_11}, \dots, g_{ist\_20}$ ), o el correspondiente espesor de capa objetivo de la primera simulación final ( $g_{soll\_11}, \dots, g_{soll\_20}$ ), respectivamente, y el correspondiente espesor de capa real del sistema ( $d_{ist\_11}, \dots, d_{ist\_20}$ ), donde un primer espesor de capa real de simulación ( $g_{ist\_11}, \dots, g_{ist\_20}$ ) o un espesor de capa objetivo de simulación ( $g_{soll\_11}, \dots, g_{soll\_20}$ ), respectivamente, de la capa individual respectiva (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) escalando el espesor de capa real de simulación ( $g_{ist\_11}, \dots, g_{ist\_20}$ ) o el espesor de capa objetivo de simulación ( $g_{soll\_11}, \dots, g_{soll\_20}$ ), respectivamente de la capa individual respectiva (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) de la una o más capas individuales (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) con el cociente (126).

6. Procedimiento según la reivindicación 5, para generar (S104, S106) la curva de medición simulación real (94), o la curva de medición simulación deseada (98), comprende además

- 40 comprobar (S114) el espesor de la primera capa real de simulación individual ( $g_{ist\_11}, \dots, g_{ist\_20}$ ), o del espesor de la capa objetivo de simulación ( $g_{soll\_11}, \dots, g_{soll\_20}$ ), respectivamente, de la capa individual respectiva (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) para al menos un criterio, en particular una verosimilitud y/o una desviación predeterminada del espesor de capa objetivo respectivo ( $g_{soll\_11}, \dots, g_{soll\_20}$ ) de la curva de medición objetivo (92), y, si se incumple el al menos un criterio,

- 45 repetir la variación (S104, S106) del espesor de capa real de simulación ( $g_{ist\_11}, \dots, g_{ist\_20}$ ) o del espesor de capa objetivo de simulación ( $g_{soll\_11}, \dots, g_{soll\_20}$ ) de la capa individual respectiva (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) y la provisión (S108) de un primer espesor de capa real de simulación final ( $g_{ist\_11}, \dots, g_{ist\_20}$ ) o espesor de capa objetivo de simulación ( $g_{soll\_11}, \dots, g_{soll\_20}$ ) de la capa individual respectiva (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) y la generación del primer espesor de capa real de simulación ( $g_{ist\_11}, \dots, g_{ist\_20}$ ) o del espesor de capa objetivo de simulación ( $g_{soll\_11}, \dots, g_{soll\_20}$ ), donde para la respectiva capa individual (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) de la una o más capas individuales (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) que ha fallado el criterio, se especifica una restricción al variar (S104, S106), y

suministrar un segundo espesor de capa real de simulación ( $g_{ist\_11}, \dots, g_{ist\_20}$ ), o espesor de capa objetivo de simulación ( $g_{soll\_11}, \dots, g_{soll\_20}$ ) de la capa individual respectiva (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) de la una o más capas individuales (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20).

7. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 5 a 6, que comprende

- repetir las etapas (S104, S106, S112, S113, S114, S115) en uno o más intervalos espectrales adicionales (84, 86), incluyendo cada intervalo subsiguiente (84, 86) el intervalo precedente (82, 84), en el que el segundo espesor de capa real de simulación ( $g_{ist\_11}$ , ...,  $g_{ist\_20}$ ) o el espesor de capa objetivo de simulación ( $g_{soll\_11}$ , ...,  $g_{soll\_20}$ ) de la capa individual respectiva (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) del intervalo precedente (82, 84) se utilizan como valores iniciales en el intervalo siguiente (84, 86), y
- suministrar un espesor de capa real de simulación final ( $g_{ist\_11}$ , ...,  $g_{ist\_20}$ ) o espesor de capa objetivo de simulación ( $g_{soll\_11}$ , ...,  $g_{soll\_20}$ ) de la capa individual respectiva (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) de la una o más capas individuales (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20).
8. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, en el que un sistema de capas reductoras de la reflexión interferométrica (10) se deposita sobre al menos una superficie (24) de un sustrato (22),
- en el que el sistema de capas (10) comprende una pila (40) de al menos cuatro paquetes de capas (42, 44, 46, 48, 50) sucesivos, comprendiendo cada paquete de capas (42, 44, 46, 48, 50) un par de primera y segunda capas individuales (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20), teniendo las primeras capas individuales (11, 13, 15, 17, 19) un primer espesor óptico ( $t_1$ ) y las segundas capas individuales (12, 14, 16, 18, 20) un segundo espesor óptico ( $t_2$ ), diferente del primer espesor óptico ( $t_1$ ),
- en el que un índice de refracción ( $n_1$ ) de las respectivas primeras capas individuales (11, 13, 15, 17, 19) que están más próximas al sustrato es mayor que un índice de refracción ( $n_2$ ) de las respectivas segundas capas individuales (12, 14, 16, 18, 20) que están más alejadas del sustrato de la pila (40),
- en el que el sistema de capas (10) tiene una luminosidad ( $L^*$ ), una cromaticidad ( $C^*$ ) y un ángulo de matiz ( $h$ ) de un color de reflexión residual,
- en el que la cantidad de un cambio ( $\Delta h$ ) del ángulo de matiz ( $h$ ) del color de reflexión residual en un intervalo de un ángulo de visión (AOI) con los valores límite  $0^\circ$  y  $30^\circ$  relativos a una normal de superficie (70) al sistema de capas (10) es menor que la cantidad de un cambio ( $\Delta C^*$ ) de la cromaticidad ( $C^*$ ) en el intervalo del ángulo de visión (AOI), donde se llevan a cabo las siguientes etapas:
- definir un diseño de capas que comprende al menos un primer material para las primeras capas simples de alto índice de refracción (11, 13, 15, 17, 19) y un segundo material para las segundas capas simples de bajo índice de refracción (12, 14, 16, 18, 20), número de paquetes de capas deseados (42, 44, 46, 48, 50) con las capas simples (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20), valores iniciales del espesor de las capas simples (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20);
  - definir los valores de color objetivo, que comprenden la luminosidad ( $L^*$ ), la cromaticidad ( $C^*$ ) y el ángulo de matiz ( $h$ ) al menos en valores límite para un intervalo de un ángulo de visión (AOI) con valores límite de  $0^\circ$  y  $30^\circ$ ;
  - realizar un procedimiento de optimización para variar los espesores de capa individuales ( $d_{ist\_11}$ , ...,  $d_{ist\_20}$ ) hasta que se alcance un objetivo de optimización.
9. Procedimiento según la reivindicación 8,
- en el que el ángulo de cromaticidad ( $h$ ) en el intervalo del ángulo de visión (AOI) con los valores límite  $0^\circ$  y  $30^\circ$  cambia un máximo de  $15^\circ$ , preferentemente un máximo de  $10^\circ$ ; y/o
- en el que la cantidad de cambio ( $\Delta h$ ) del ángulo de cromaticidad ( $h$ ) en un segundo intervalo de un ángulo de visión (AOI) de  $0^\circ$  a un ángulo de visión límite ( $\Theta$ ) con un valor límite superior entre  $30^\circ$  y  $45^\circ$  con respecto a la normal de superficie (70) al sistema de capas (10) es menor que la cantidad de un cambio ( $\Delta C^*$ ) de la cromaticidad ( $C^*$ ) en el segundo intervalo del ángulo de visión (AOI) Superficie normal (70) al sistema de capas (10) es menor que la cantidad de un cambio ( $\Delta C^*$ ) de la cromaticidad ( $C^*$ ) en el segundo intervalo del ángulo de visión (AOI) y la cantidad de la cromaticidad ( $C^*$ ) en el ángulo de visión límite ( $\Theta$ ) es al menos 2, en particular, en el que el ángulo de cromaticidad ( $h$ ) en el segundo intervalo cambia como máximo  $20^\circ$ , preferentemente como máximo  $15^\circ$ ;
- y/o
- en la que la reflectancia fotópica ( $R_v$ ) en el intervalo del ángulo de visión (AOI) con los valores límite  $0^\circ$  y  $30^\circ$  es como máximo del 1,5%, preferentemente como máximo del 1,2%;
- y/o
- en la que la reflectancia escotópica ( $R_v'$ ) en el intervalo del ángulo de visión (AOI) con los valores límite  $0^\circ$  y  $30^\circ$  es como máximo del 1,5%, preferentemente como máximo del 1,2%.



10. Procedimiento para producir un sistema de capas (10) en al menos un sistema de revestimiento (108), que comprende un procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que el sistema de capas (10) se produce en base a un conjunto de datos objetivo de simulación final (DAT soll\_sim) para el sistema de revestimiento (108).
- 5 11. Procedimiento para poner en marcha un proceso de revestimiento en al menos un sistema de revestimiento (108) para producir un sistema de capas (10) con un procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 9, en el que una curva de medición real (90) se aproxima al menos a una curva de medición espectral con valores de ordenada y valores de abscisa en una curva de medición real de simulación (94) hasta que se alcanza un criterio de terminación.
- 10 12. Sistema de revestimiento (100, 200) para producir un sistema de capas (10), que comprende un procedimiento según al menos la reivindicación 1, que comprende al menos
  - un sistema de revestimiento (108) para revestir un sustrato (22) con un sistema de capas (10) para un elemento óptico (80),
  - 15 - un ordenador de control (110) para controlar el sistema de revestimiento (108) y para comunicarse con un ordenador de simulación (102),
  - un dispositivo óptico de medición (112) para determinar una curva de medición real espectralmente resuelta (90) del sistema de capas (10),
  - 20 - un ordenador de simulación (102) en el que está instalado el software de simulación (104) para el cálculo óptico y la optimización del sistema de capas (10), en el que el ordenador de simulación (102) está diseñado para correlacionar las diferencias ópticas entre una curva de medición real (90) y una curva de medición real de simulación (94), de modo que se utilice un conjunto de datos reales de simulación (DAT\_ist\_sim) para un cálculo inverso de una curva de medición objetivo de simulación (98) con respecto a una curva de medición objetivo (92);
  - una base de datos (106) para almacenar los conjuntos de datos del sistema (DAT),
  - 25 - un dispositivo de entrada (114) para introducir y controlar el ordenador de simulación (102) y/o el sistema de revestimiento (108).
13. Sistema de revestimiento según la reivindicación 12, en el que una pluralidad de sistemas de revestimiento (108) están provistos cada uno de un dispositivo de medición óptica (112) y un ordenador de control (110) para controlar el respectivo sistema de revestimiento (108) y para comunicarse con el ordenador de simulación (102).
- 30 14. Medio de almacenamiento legible por ordenador que comprende al menos un producto de programa de ordenador que tiene instrucciones de programa ejecutables en un sistema informático (102) de un sistema de revestimiento (100, 200) de la reivindicación 12 y que hace que el sistema informático (102) haga que el sistema de revestimiento (100, 200) realice un procedimiento de funcionamiento de al menos un sistema de revestimiento (108) para producir sistemas de revestimiento (10) según al menos la reivindicación 1.
- 35

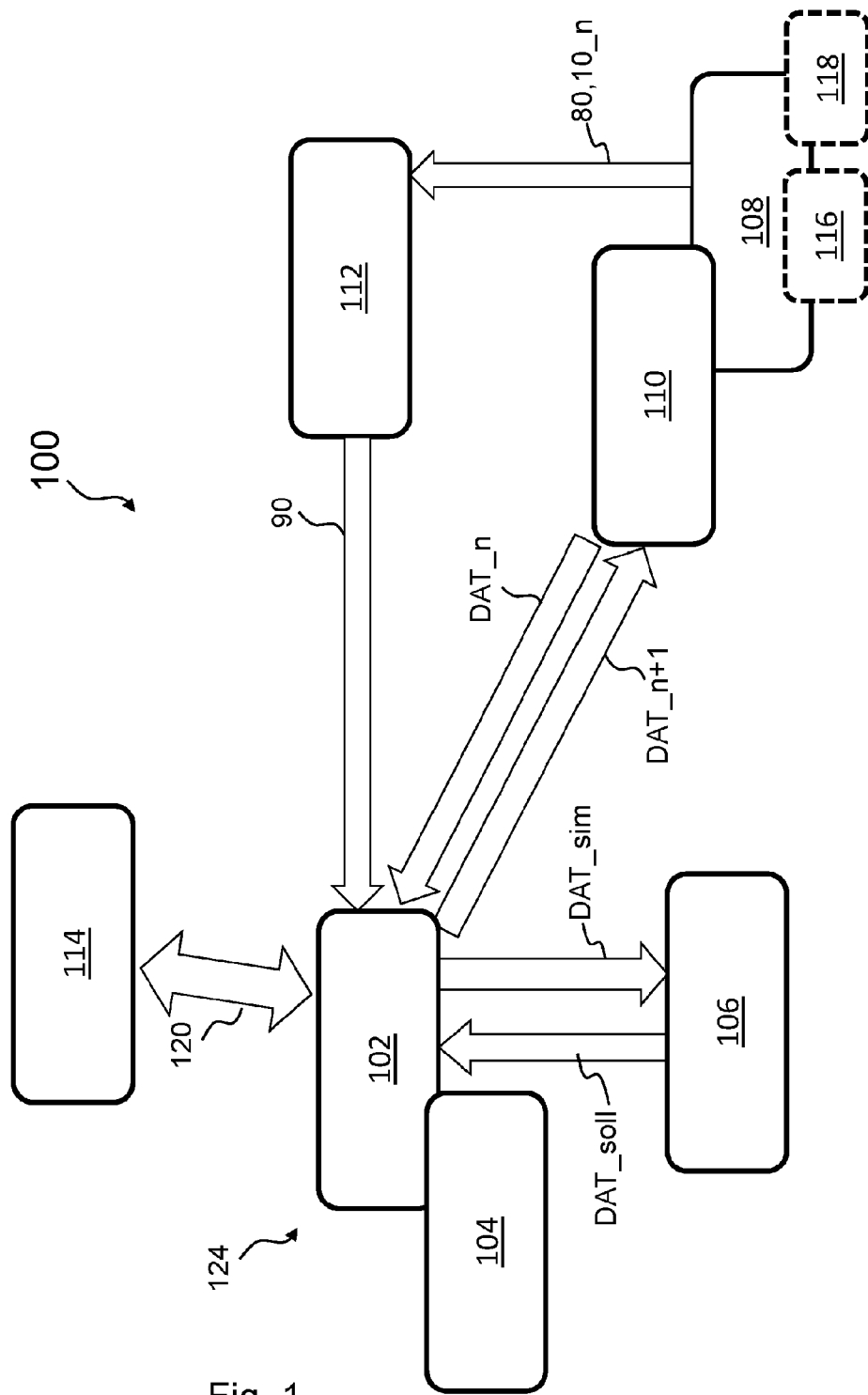


Fig. 1

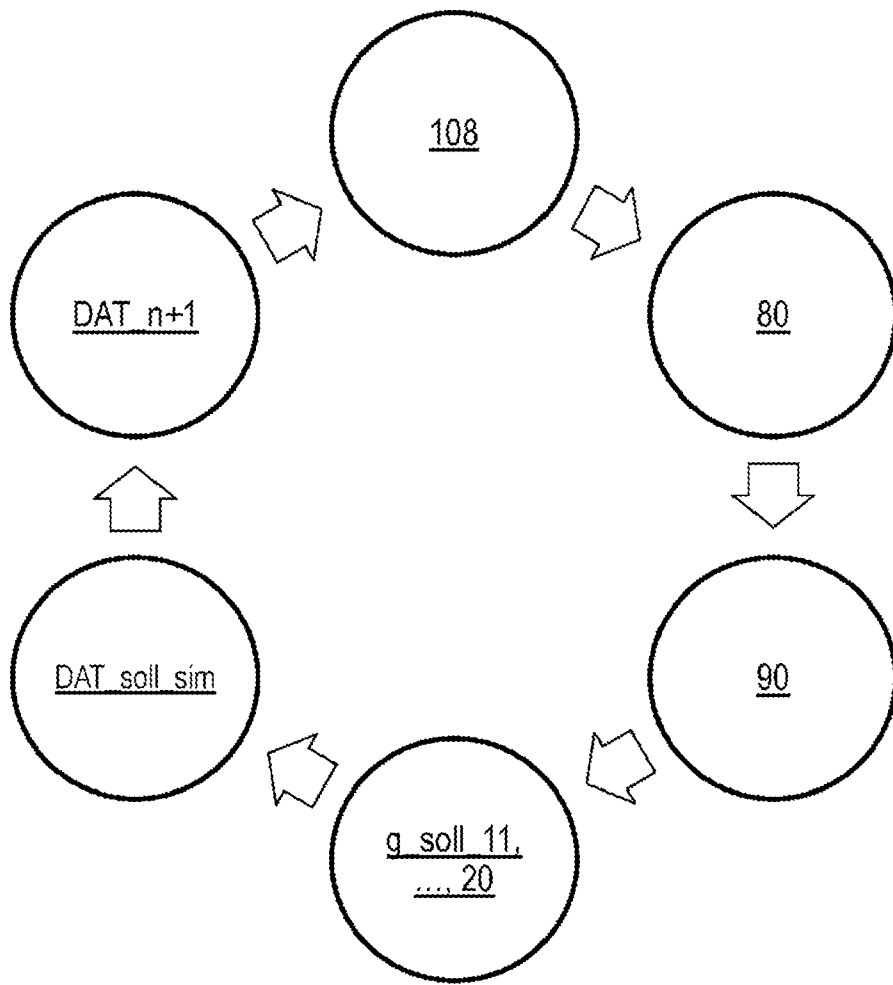


Fig. 2

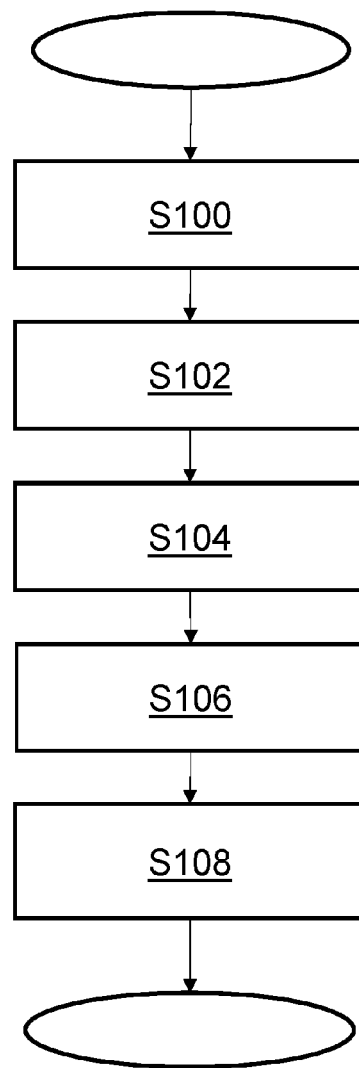


Fig. 3

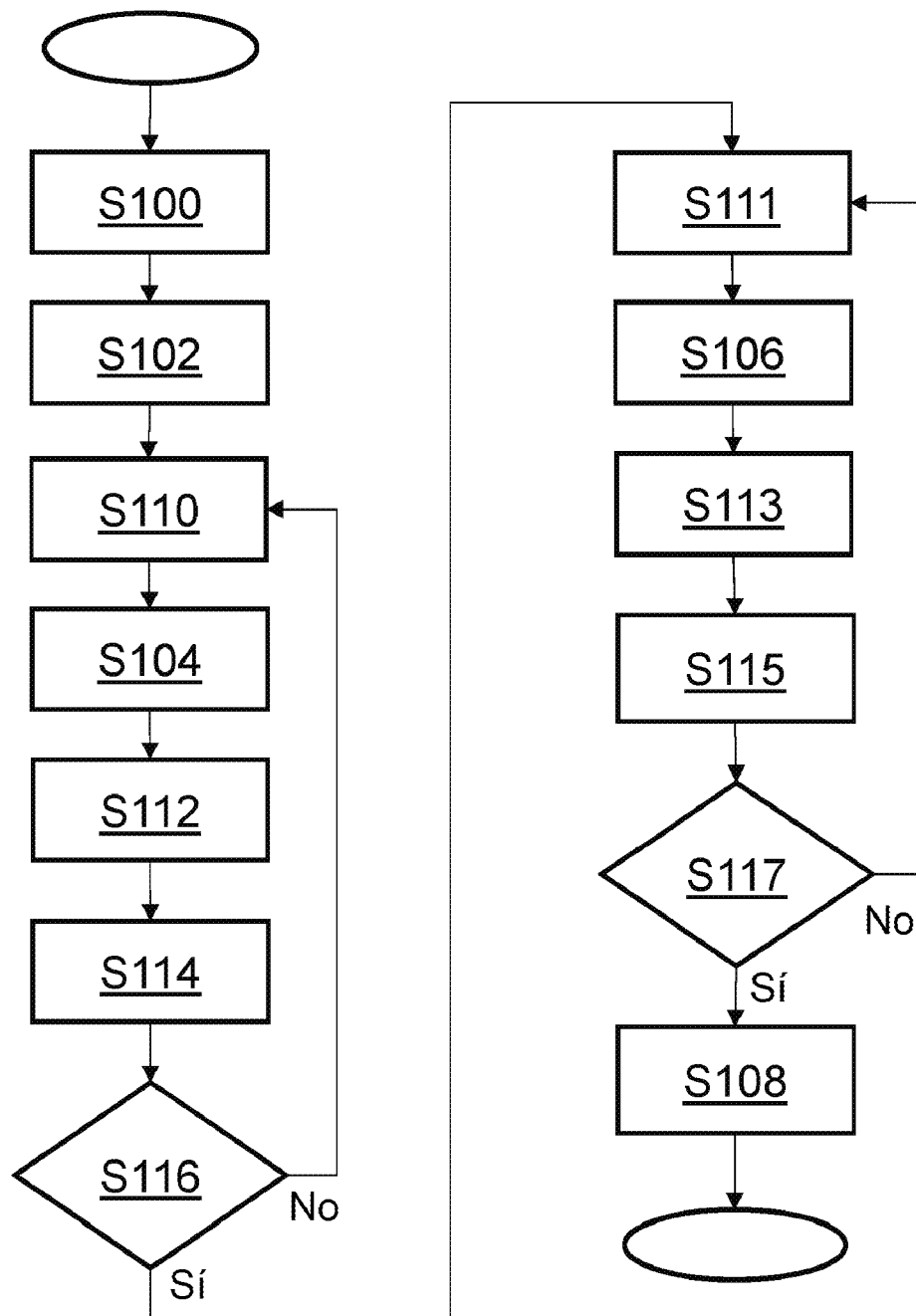


Fig. 4

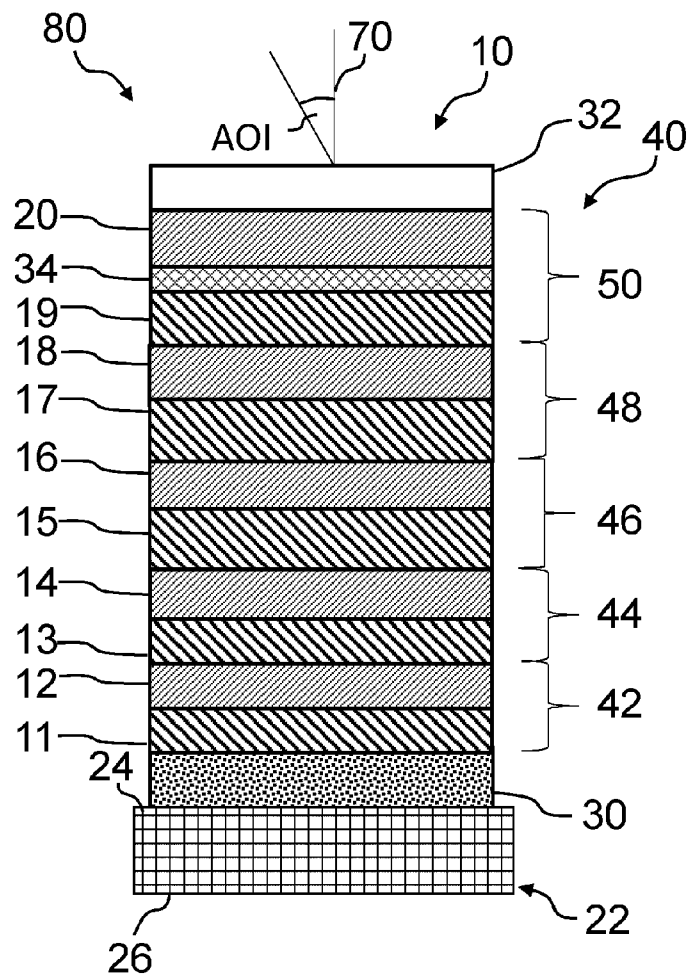


Fig. 5

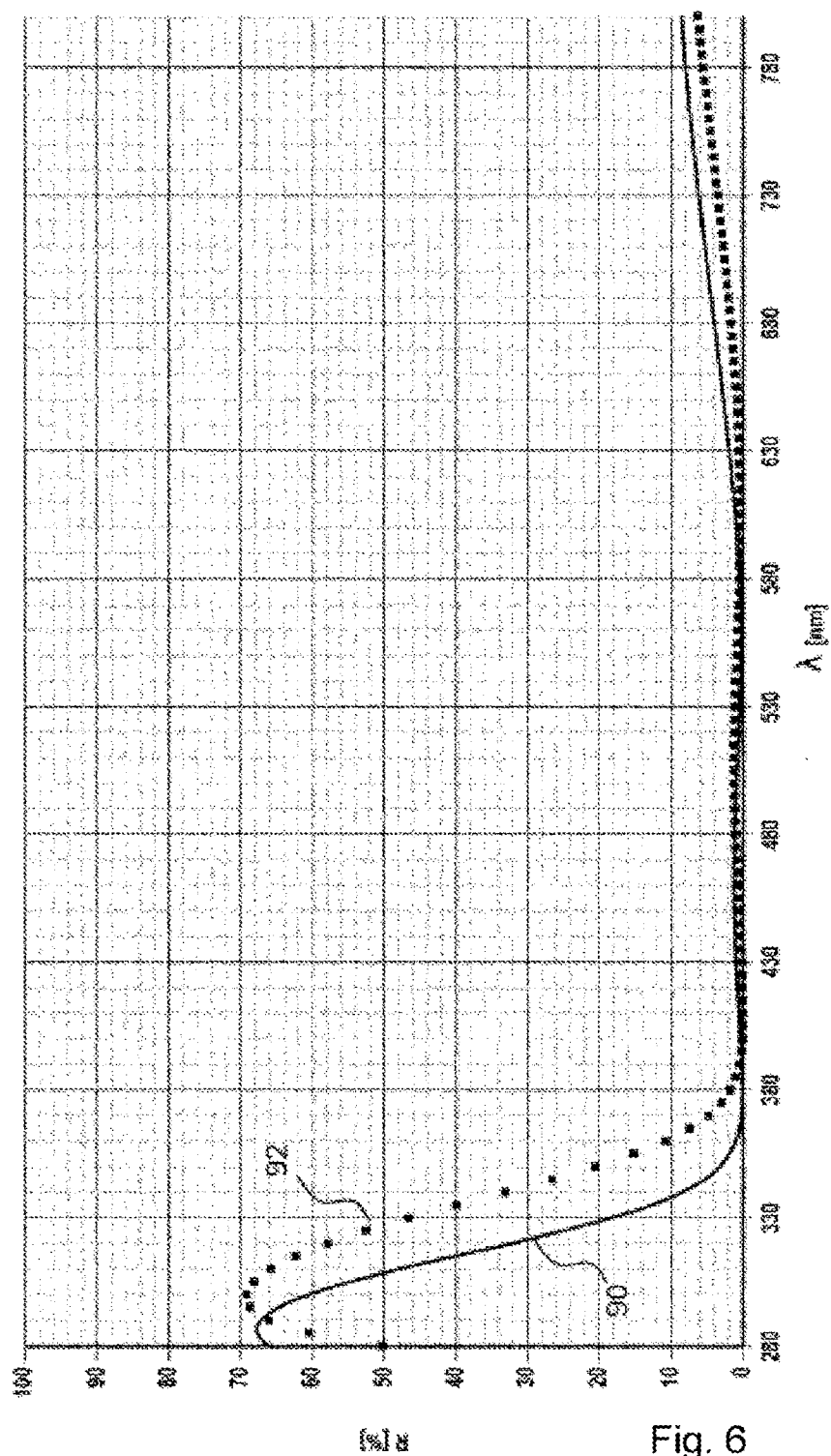


Fig. 6

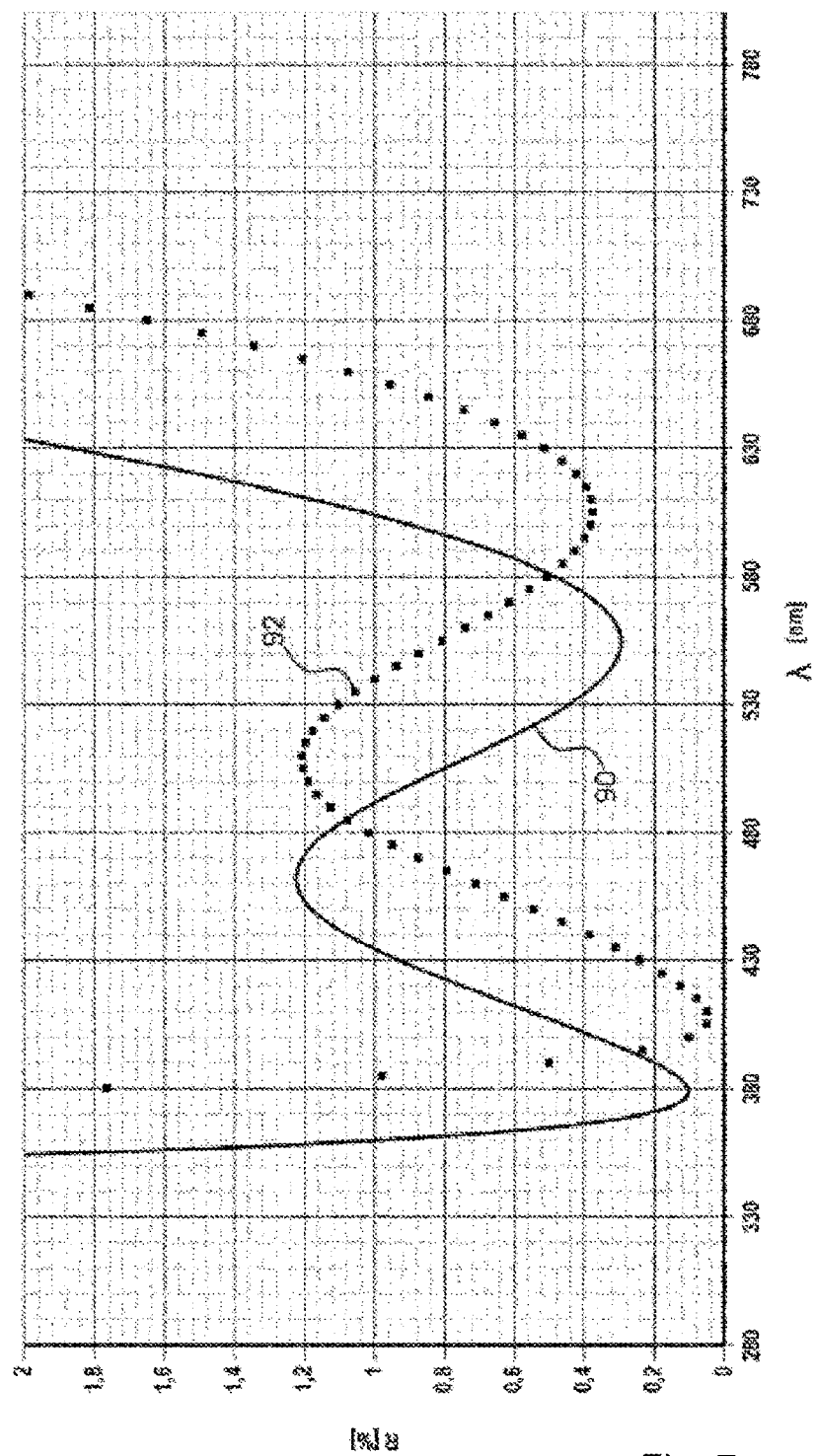


Fig. 7



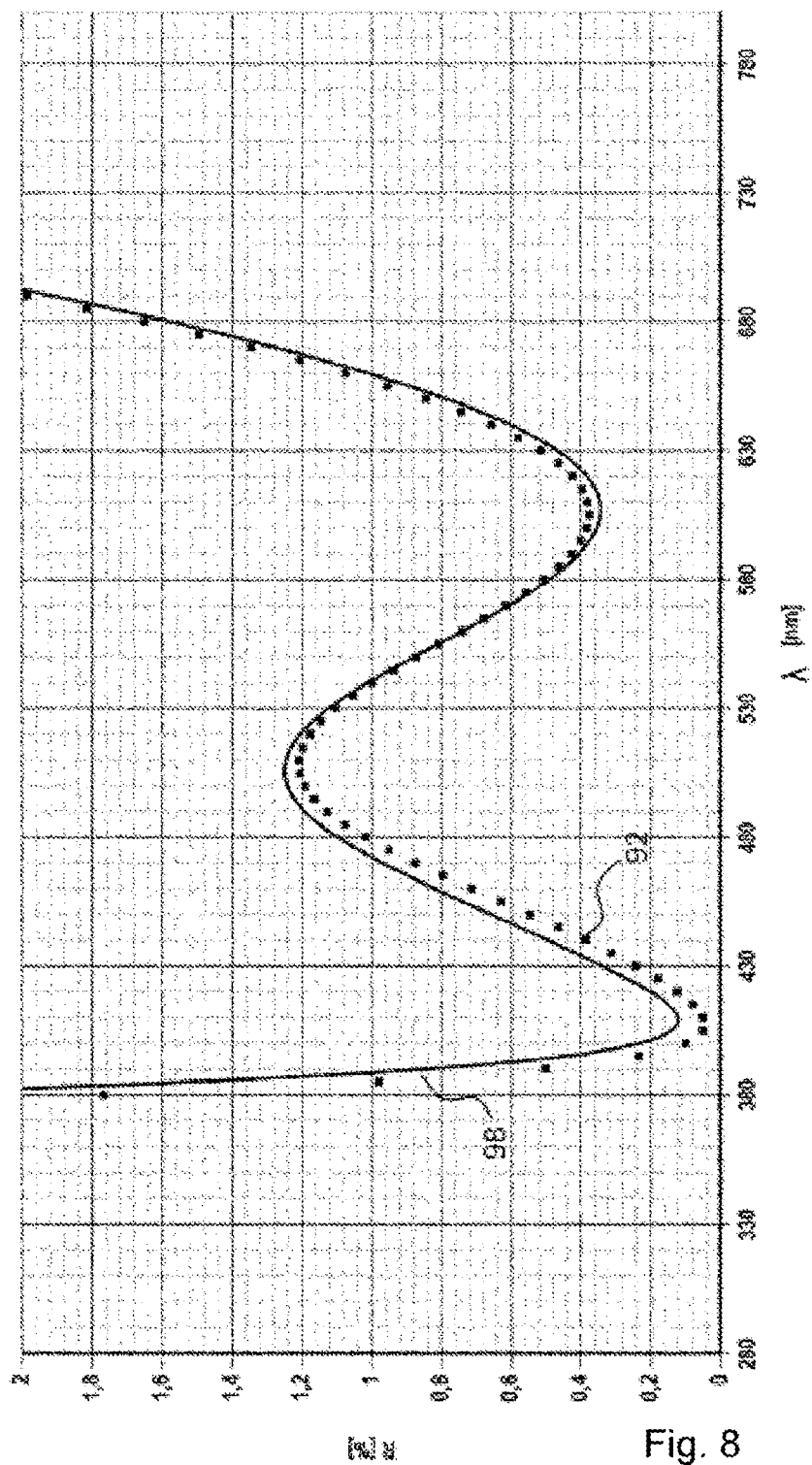


Fig. 8

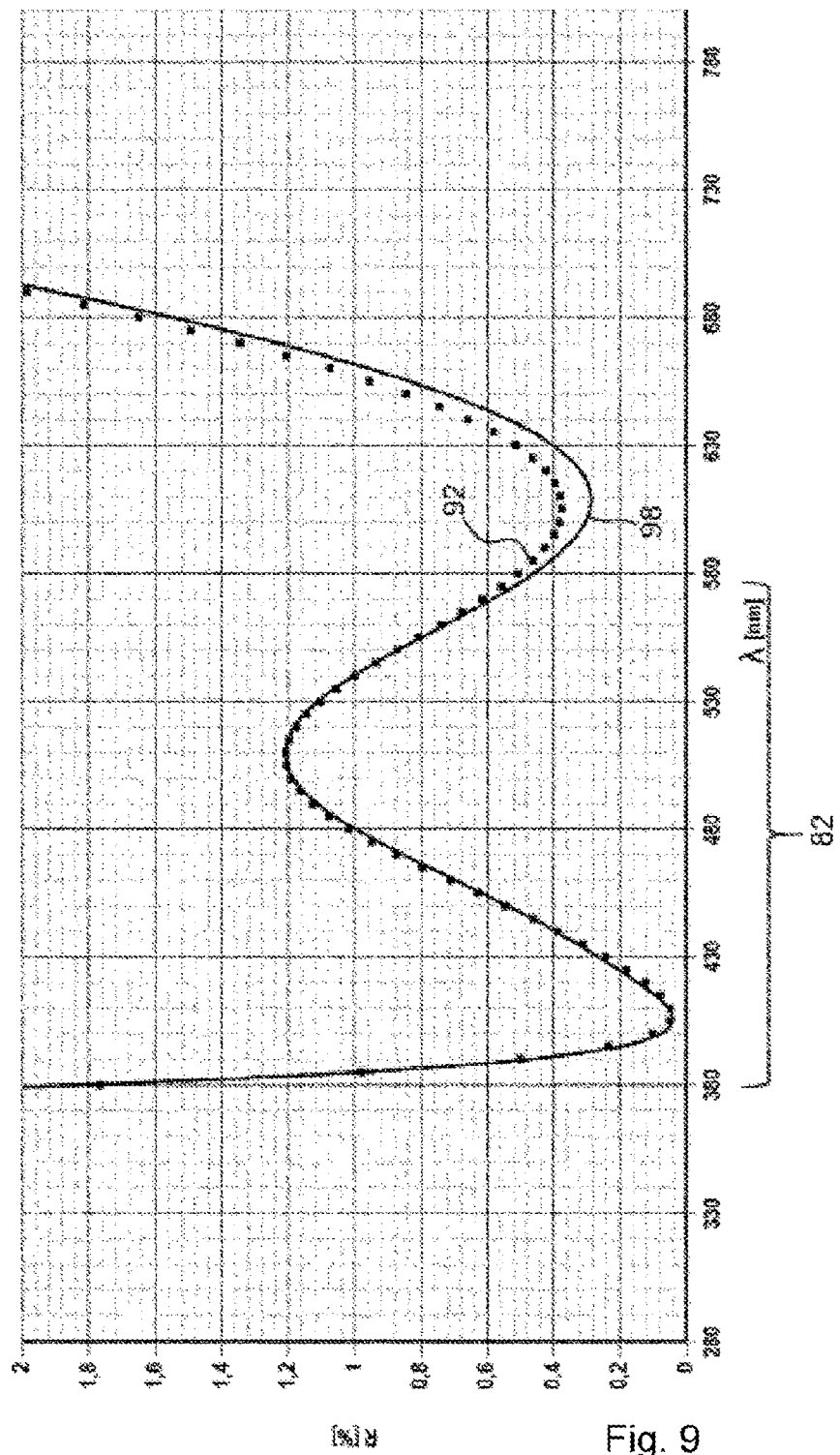


Fig. 9

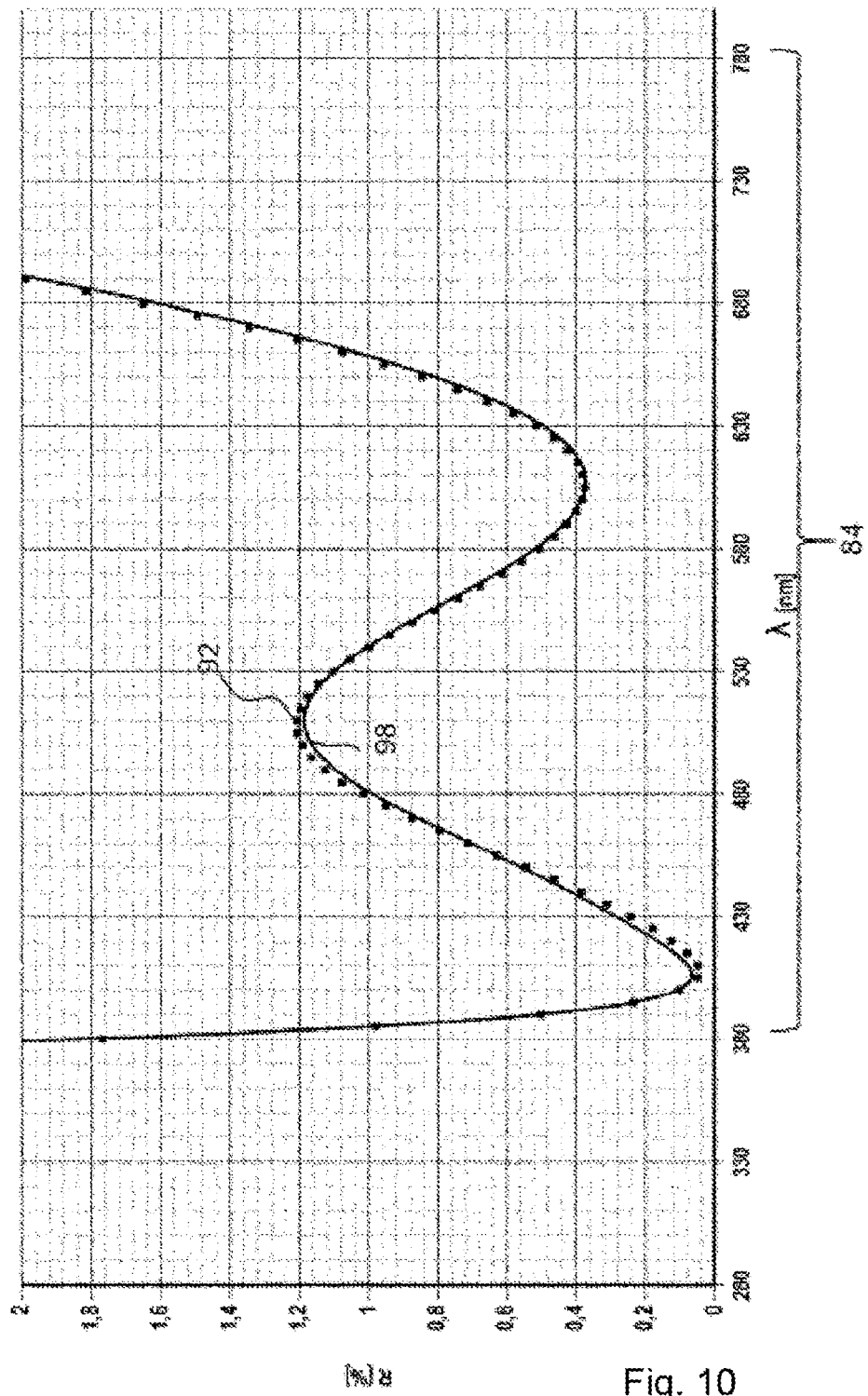


Fig. 10

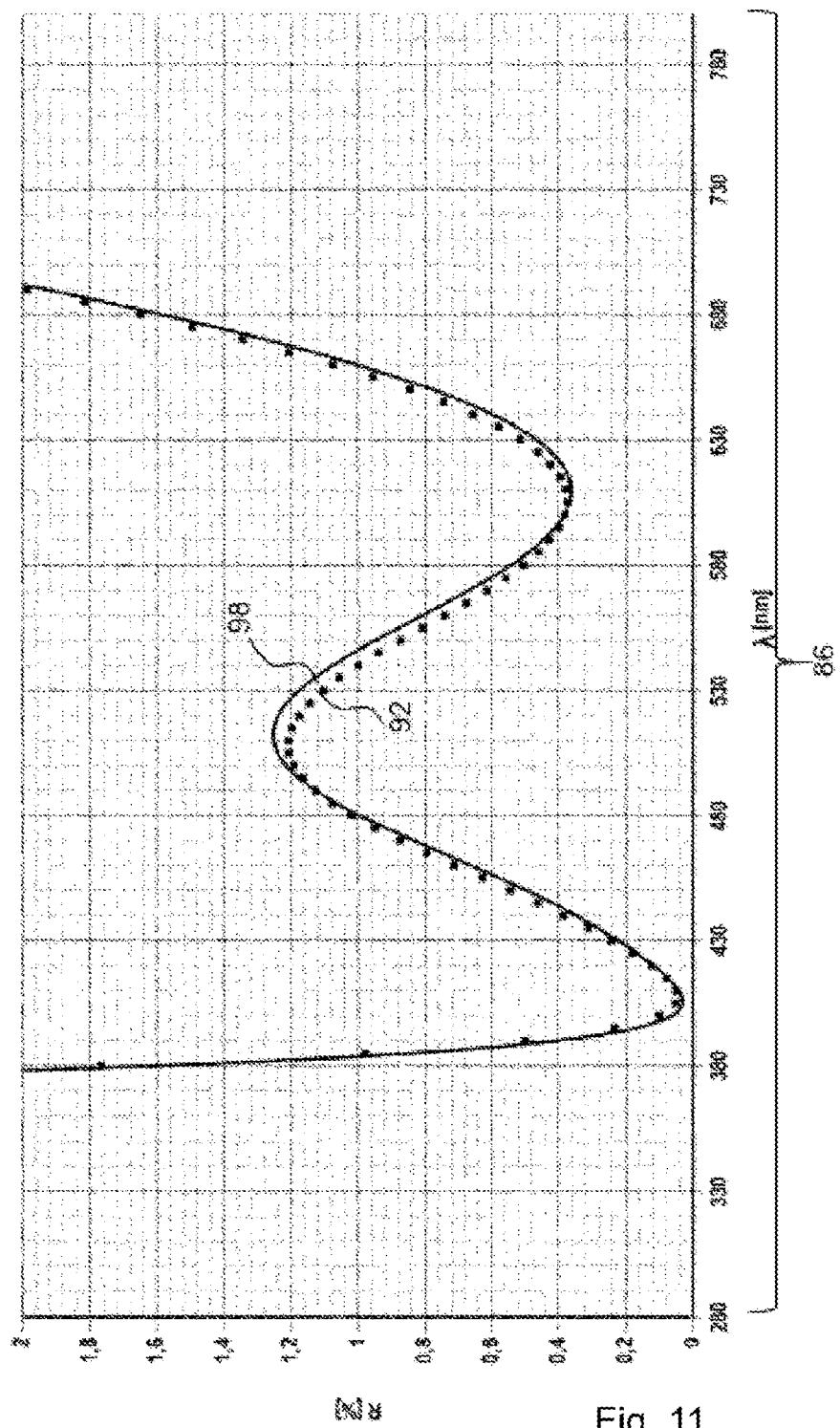


Fig. 11

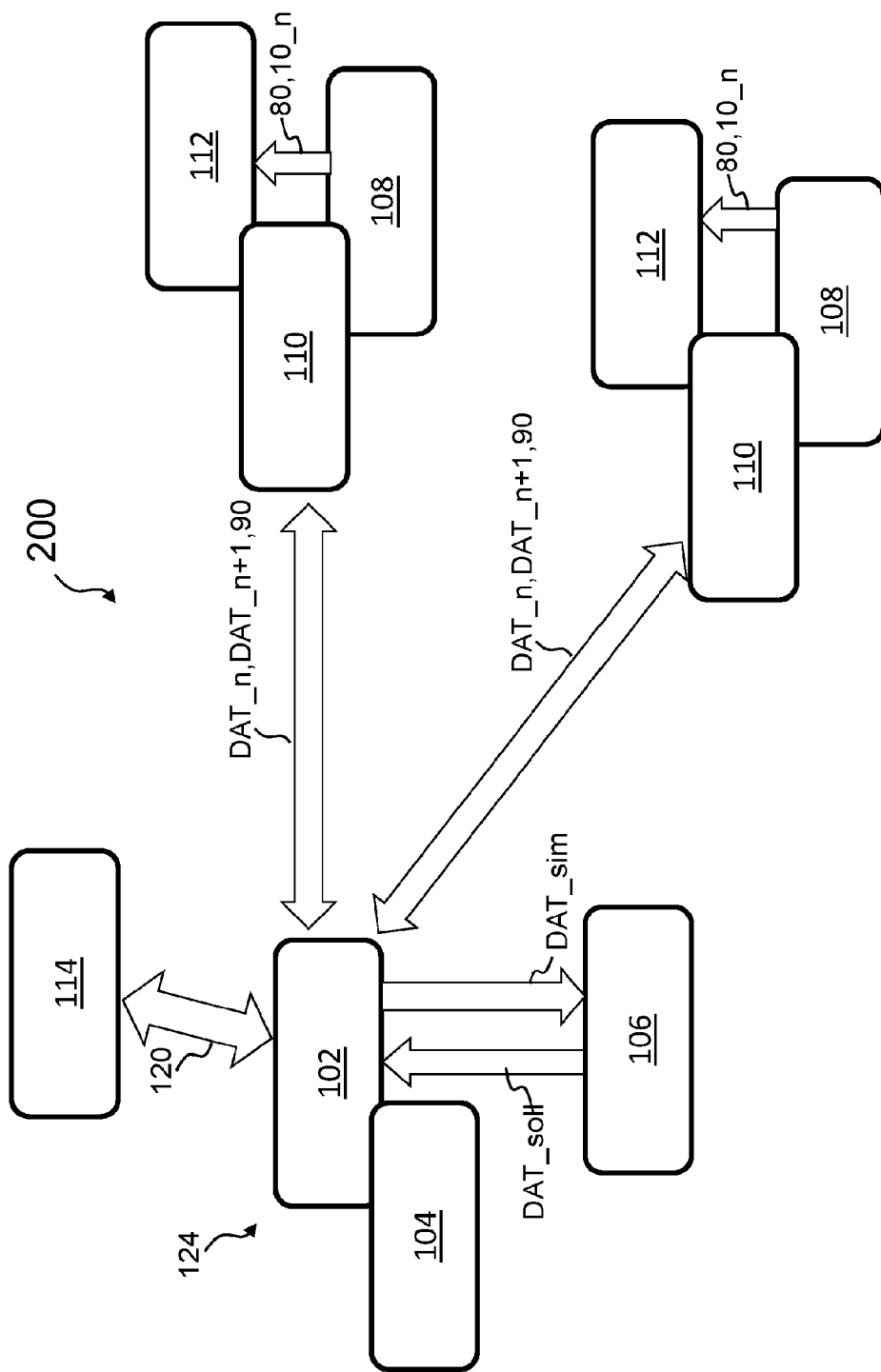


Fig. 12