



(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2020 128 958.8**
(22) Anmeldetag: **03.11.2020**
(43) Offenlegungstag: **05.05.2022**
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **28.07.2022**

(51) Int Cl.: **G02C 7/02 (2006.01)**
A61B 5/107 (2006.01)
G06N 3/02 (2006.01)
G16H 50/20 (2018.01)

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber: Rodenstock GmbH, 80687 München, DE	Neuried, DE; Seidemann, Anne, 81375 München, DE; Kerner, Patrick, 82041 Oberhaching, DE; Zimmermann, Martin, 85253 Erdweg, DE; Gromann, Lukas, 85354 Freising, DE; Schmid, Leonhard, 86911 Dießen, DE; Uttenweiler, Dietmar, 82057 Icking, DE; Trumm, Stephan, 80999 München, DE
(74) Vertreter: Müller-Boré & Partner Patentanwälte PartG mbB, 80639 München, DE	
(72) Erfinder: Esser, Gregor, 80686 München, DE; Muschielok, Adam, 81476 München, DE; Altheimer, Helmut, 87650 Baisweil, DE; Becken, Wolfgang, 82061	(56) Ermittelter Stand der Technik: US 2010 / 0 195 053 A1

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Bestimmen eines Brillenglases, Vorrichtung zum Bestimmen von individuellen biometrischen Daten sowie Vorrichtung zum Herstellen eines Brillenglases**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zum Herstellen eines Brillenglases, umfassend:

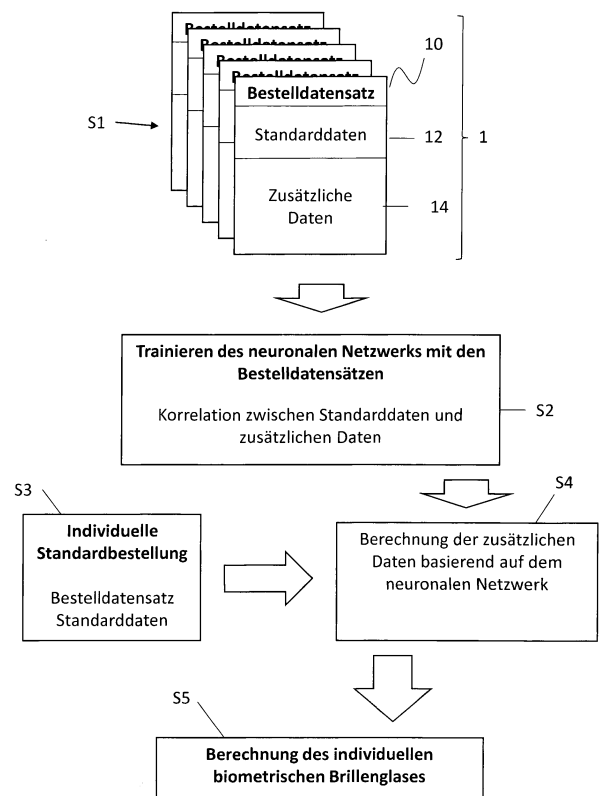
Bestimmen von individuellen Zusatzdaten (14), welche zumindest einen individuellen biometrischen Parameter zumindest eines Auges eines Benutzers umfassen; Berechnen des Brillenglases anhand der bestimmten individuellen Zusatzdaten,

wobei das Bestimmen von individuellen Zusatzdaten (14) mittels eines computerimplementierten Verfahrens umfassend die folgenden Schritte erfolgt:

Bereitstellen von individuellen Standarddaten (12) des Benutzers, wobei die Standarddaten (12) Verordnungsdaten umfassend eine Verordnung Ferne und/oder eine Verordnung Nähe zumindest eines der Augen des Benutzers umfassen; und

Berechnen der individuellen Zusatzdaten (14) basierend auf den individuellen Standarddaten (12) und unter Verwendung eines statistischen Modells (2), welches einen Zusammenhang zwischen den Standarddaten und den Zusatzdaten beschreibt,

wobei das statistische Modell (2) mittels statistischer Analyse eines Trainingsdatensatzes (1) mit einer Vielzahl von Referenzdatensätzen (10) hergeleitet worden ist, wobei jeder der Referenzdatensätze (10) Standarddaten und den Standarddaten zugeordnete Zusatzdaten umfasst.



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zum Herstellen eines Brillenglases, eine Vorrichtung zum Bestimmen von individuellen biometrischen Daten sowie eine Vorrichtung zum Herstellen eines Brillenglases.

[0002] Bei der Berechnung von Brillengläsern, insbesondere progressiven Brillengläsern, kann die Biometrie des Auges des Brillenträgers berücksichtigt werden, wie zum Beispiel in der Druckschrift US 9,910,294 B2 beschrieben. Diese biometrischen Brillengläser bieten große Vorteile, da die Qualität der Abbildung nicht mehr an der Scheitelpunktkugel, einem virtuellen Punkt eines einfachen Modells, bewertet wird, sondern dort, wo die Abbildung tatsächlich auch stattfindet: an der Netzhaut des Auges. Somit werden auch Interaktionen zwischen den einzelnen Abbildungsfehlern, welche bei der Brechung und Propagation durch die Medien des Auges entstehen, berücksichtigt.

[0003] Der Nachteil dieses Verfahrens ist allerdings, dass umfangreiche Messungen mit aufwendigen Apparaturen und Vorrichtungen notwendig sind. Dies führt zu einem hohen Aufwand und hohen Kosten. Dadurch kommen die Vorteile hochwertiger biometrischer Brillengläser nur einem relativ kleinen Teil der Fehlsichtigen zuteil.

[0004] Die Druckschrift US 2010/0195053 A1 beschreibt ein Verfahren zum Bestimmen von Verordnungsdaten eines Brillenträgers anhand von objektiven Refraktionsdaten des Brillenträgers. Die Bestimmung der Verordnungsdaten erfolgt mit Hilfe eines statistischen Modells (wie z.B. eines neuronalen Netzwerks), welches auf Basis einer Vielzahl von objektiven Refraktionsdaten und Sehschärfedaten trainiert worden ist.

[0005] Eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, die Vorteile biometrischer Brillengläser weitgehend zu nutzen, ohne die Nachteile der komplexen Messung aufzuweisen.

[0006] Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren und eine entsprechende Vorrichtung zum Herstellen eines Brillenglases und eine Vorrichtung zum Bestimmen von individuellen biometrischen Daten mit den in den jeweiligen unabhängigen Ansprüchen angegebenen Merkmalen gelöst.

[0007] Der vorliegenden Erfindung liegt die überraschende Erkenntnis zugrunde, dass es möglich ist, individuelle biometrische Parameter zumindest eines der Augen eines Benutzers anhand von im Rahmen einer routinemäßigen Refraktionsbestimmung ermittelten Standardwerten des Auges des Benutzers mit hinreichender Genauigkeit und Präzision zu bestimmen bzw. vorherzusagen. Es ist daher möglich, individuelle biometrische Brillengläser mit hoher Abbildungsqualität und Tragekomfort zu berechnen und herzustellen, ohne dass hierzu eine aufwendige und kostenintensive Messung der zusätzlichen biometrischen Daten erforderlich wäre.

[0008] Ein erster Aspekt der Erfindung betrifft ein Verfahren zum Herstellen eines Brillenglases. Das Verfahren umfasst ein computerimplementiertes Verfahren zum Bestimmen von individuellen biometrischen Parametern zumindest eines der Augen eines Benutzers umfassend:

Bereitstellen von individuellen Standarddaten des Benutzers, wobei die Standarddaten Verordnungsdaten zumindest eines der Augen des Benutzers umfassen;

Berechnen von individuellen Zusatzdaten umfassend zumindest einen individuellen biometrischen Parameter des zumindest einen Auges des Benutzers anhand der individuellen Standarddaten und unter Verwendung eines statistischen Modells, welches einen Zusammenhang zwischen Standarddaten und Zusatzdaten beschreibt,

wobei das statistische Modell mittels statistischer Analyse eines Trainingsdatensatzes mit einer Vielzahl von Referenzdatensätzen hergeleitet worden ist, wobei jeder der Referenzdatensätze Standarddaten und den Standarddaten zugeordnete Zusatzdaten umfasst.

[0009] Das Verfahren kann ferner Bereitstellen des statistischen Modells, welcher den Zusammenhang zwischen Standarddaten und Zusatzdaten beschreibt, umfassen.

[0010] Ferner kann das Verfahren Bereitstellen des Trainingsdatensatzes und Herleiten des statistischen Modells mittels statistischer Analyse des Trainingsdatensatzes umfassen. Das Herleiten des statistischen Modells kann zum Beispiel Trainieren eines ursprünglichen (nicht trainierten) Modells mit Hilfe des Trainings-

datensatzes umfassen. Das Modell kann zum Beispiel mehrere Modellparameter umfassen, welche während des Trainierens mit dem Trainingsdatensatz verändert bzw. angepasst werden.

[0011] Der Begriff „Bereitstellen“ im Sinne der vorliegenden Anmeldung beinhaltet „Festlegen“, „Übermitteln“, „Erhalten“, „Auslesen“, „Entnehmen aus einem Speicher, einer Datenbank und/oder einer Tabelle“, „Empfangen“, usw.

[0012] Der Begriff „Bestimmen“ im Sinne der vorliegenden Anmeldung beinhalten auch „Festlegen“, „Berechnen“, „Ermitteln“, „Vorhersagen“, usw.

Standarddaten

[0013] Standarddaten (Basisdaten) sind Daten zumindest eines der Augen des Benutzers und gegebenenfalls weitere Daten, welche in Zusammenhang mit einer Brillenbestellung erfasst werden (zum Beispiel von einem Augenoptiker oder einem Augenarzt). Beispielsweise können die Standarddaten Daten umfassen, welche normalerweise in Zusammenhang mit einer Brillenbestellung immer erfasst werden, wie Verordnungsdaten. Die Standarddaten können auch Daten umfassen, welche in der Regel optional in Zusammenhang mit einer Brillenbestellung erfasst bzw. gemessen werden, wie zum Beispiel die Aberrationen höherer Ordnung zumindest eines der Augen des Benutzers, etc.. Diese Daten können dann verwendet werden, um weitere zusätzliche Daten (Zusatzdaten) zu bestimmen.

[0014] Beispielsweise können die Standarddaten Daten umfassen, welche mit einem ersten Messgerät bzw. einem ersten Messverfahren erfasst worden sind. Auf Basis dieser Daten können Zusatzdaten berechnet werden, welche mit dem ersten Messgerät bzw. mit dem ersten Messverfahren nicht bestimmt oder gemessen werden können. Alternativ oder zusätzlich können die Zusatzdaten Daten umfassen, welche zwar mit dem ersten Messgerät bzw. dem ersten Messverfahren bestimmbar oder messbar sind, allerdings nicht mit einer ausreichenden Qualität (zum Beispiel nicht mit ausreichender Genauigkeit, Präzision und/oder Wiederholbarkeit).

[0015] So kann zum Beispiel bei der Bestimmung zumindest eines Teils der Standarddaten ein Messgerät zur Verfügung stehen, welches es erlaubt, einen Teil der bei der Berechnung eines individuellen biometrischen Brillenglases zu berücksichtigenden biometrischen Parameter des zumindest eines der Augen des Benutzers zu bestimmen. Die mit diesem Messgerät erfassten Daten können dann verwendet werden, um zusätzliche, mit diesem Messgerät nicht bestimmbare individuelle biometrische Parameter zu bestimmen. Das erste Messgerät kann zum Beispiel ein Aberrometer sein, welches es erlaubt, die Aberrationen des Auges zu bestimmen, jedoch nicht die Aberrationen der Cornea (die zum Beispiel mit einem Topographen gemessen werden) und/oder die Vorderkammertiefe (die zum Beispiel mit einer Scheimpflugkamera gemessen wird). Das Verfahren kann benutzt werden, um anhand der mit dem Aberrometer erfassten Aberrationsdaten des Auges, weitere biometrische Daten, wie zum Beispiel Aberration der Cornea und/oder die Vorderkammertiefe, zu bestimmen. Wenn ein Topograph und/oder eine Scheimpflugkamera vorhanden ist, können die entsprechenden Messdaten verwendet werden, um die Aberrationen des Auges zu bestimmen.

[0016] Wie oben beschrieben kann das Verfahren auch benutzt werden, wenn man Daten nicht nur nicht bestimmen oder messen kann (weil zum Beispiel die entsprechenden Messgeräte nicht zur Verfügung stehen), sondern auch wenn die entsprechenden Daten nur in einer schlechten oder nicht ausreichenden Qualität bestimmt bzw. gemessen werden können. Beispielsweise können die Standarddaten Daten umfassen, welche mit einem ersten (zum Beispiel einfachen) Messgerät bzw. Messverfahren gemessen worden sind, welches Daten mit einer geringen oder nicht ausreichenden Qualität liefert. Die mit dem ersten Messgerät bzw. mit dem ersten Messverfahren erfassten Daten können dazu verwendet werden, um zusätzliche Daten zu bestimmen, welche eine höhere Qualität aufweisen. Beispielsweise können die zusätzlichen Daten Daten entsprechen, welche mit einem zweiten präziseren Messgerät/Messgerätyps bzw. mit einem zweiten Messverfahren erfasst worden sind bzw. messbar sind.

[0017] Die Standarddaten umfassen zumindest die Verordnungsdaten. Die Verordnungsdaten umfassen eine Verordnung Ferne (d.h. die Refraktionsdaten beim Blicken in einer Entfernung in die Ferne, zum Beispiel in Unendlichkeit) und/oder eine Verordnung Nähe (d.h. die Refraktionsdaten beim Blicken in einer Entfernung in der Nähe, zum Beispiel in einer Leseentfernung). Die Verordnung Ferne zumindest eines der Augen des Benutzers setzt sich jeweils zusammen aus den Parametern Sphäre (Sph), dem Zylinder (Zyl) und Achse oder aus daraus abgeleiteten Größen, wie zum Beispiel den Komponenten M (sphärisches Äquivalent), J0 (Ortho-Astigmatismus) und J45 (Astigmatismus obliquus) des Powervektors der Verordnung Ferne. Die Ver-

ordnung Nähe setzt sich ebenfalls zusammen aus den Größen Sphäre (Sph), Zylinder (Zyl) und Achse zumindest eines der Augen des Benutzers oder aus daraus abgeleiteten Größen, wie zum Beispiel den Komponenten M, J0 und J45 des Powervektors der Verordnung Nähe. Die Verordnungsdaten können ferner die Addition umfassen, zum Beispiel bei Gleitsichtgläsern und Mehrstärkengläsern.

[0018] Die Verordnung Ferne, die Addition und/oder die Verordnung Nähe können zum Beispiel mittels subjektiver Refraktion ermittelt werden. Es ist auch möglich, die Verordnung Ferne, die Addition und/oder die Verordnung Nähe mittels objektiver Refraktion oder mittels einer Kombination von objektiver und subjektiver Refraktion zu ermitteln.

[0019] Die subjektive Refraktionsbestimmung ist eine Methode der Refraktionsbestimmung, bei der Seheindruck, der subjektiv vom Benutzer empfunden wird, berücksichtigt wird. Üblicherweise werden dem Benutzer unterschiedliche Refraktionsgläser vorgesetzt, wobei der Benutzer des Brillenglases dem Refraktionisten eine Verbesserung bzw. eine Verschlechterung des Seheindrucks bei Änderung der optischen Eigenschaften des vorgesetzten Refraktionsglases mitteilt.

[0020] Bei einer objektiven Refraktion hingegen wird keine Rückmeldung des Benutzers berücksichtigt. Die objektive Refraktion erfolgt allein mittels einer apparativen Anordnung und kann auch die Brechungseigenschaften sowie die Geometrie des Augapfels erfassen. Die objektive Refraktion kann mittels verschiedener Geräte durchgeführt werden, wie zum Beispiel Refraktometer, Aberrometer, Wellenfrontscanner, etc.

[0021] Optional können die Standarddaten zumindest einen der folgenden Parameter umfassen:

Pupillendistanz PD; und
Pupillendurchmesser.

[0022] Pupillendistanz und Pupillendurchmesser können mittels herkömmlicher Messverfahren ermittelt werden.

[0023] Weiter können die Standarddaten optional zumindest einen Teil der folgenden Daten umfassen, wobei die Daten mittels eines ersten Messverfahrens bzw. Messgeräts erfasst worden sind:

- Aberrationen niederer und/oder höherer Ordnung des Auges, wie zum Beispiel Sphäre (Sph), Zylinder (Zyl), Achse (bzw. M, J0, J45), Koma, Trefoil, sekundärer Astigmatismus, sphärische Aberration, und/oder andere Aberrationen; und/oder
- Aberrationen niederer und höherer Ordnung der Hornhaut (Cornea), wie zum Beispiel Sphäre (Sph), Zylinder (Zyl), Achse (bzw. M, J0, J45), Koma, Trefoil, sekundärer Astigmatismus, sphärische Aberration und/oder andere Aberrationen, und/oder
- physische Abmessungen des Auges, wie zum Beispiel Vorderkammertiefe, Augenlänge, etc.; und/oder
- Daten der Augenlinse, umfassend zum Beispiel Aberrationen niederer und höherer Ordnung der Augenlinse (wie zum Beispiel Sphäre (Sph), Zylinder (Zyl), Achse (bzw. M, J0, J45), Koma, Trefoil, sekundärer Astigmatismus, sphärische Aberration und/oder andere Aberrationen); und/oder Aufbau und/oder physische Abmessungen der Augenlinse, wie zum Beispiel Krümmungen und/oder Dicke; und/oder
- Pupillengrößen beim Sehen in der Ferne und Nähe und/oder Pupillengrößen unter mesopischen und photopischen Bedingungen.

[0024] Des Weiteren können die Standarddaten auch optional folgende weitere Parameter enthalten: Alter, Geschlecht, Ethnie, Ort der Bestellung, Körpergröße, Augeninnendruck, Blutwerte, Anamnesedaten oder Krankenakte (zum Beispiel Vorliegen von Diabetes), Aufnahmen der Netzhaut, Werte des Augendrucks, Daten des vorderen Augenabschnitts (Kammerwinkel) und/oder Daten der alten Brille.

Zusatzdaten

[0025] Zusatzdaten sind biometrische Daten zumindest eines der Augen des Benutzers, welche (zum Beispiel von einem Augenoptiker) in Zusammenhang mit einer Brillenbestellung bestimmt werden. Die Zusatzdaten können zum Beispiel Daten sein, welche in der Regel optional (zum Beispiel vom Augenoptiker) in Zusammenhang mit einer Brillenbestellung bestimmt werden. Wie oben beschrieben können die Zusatzdaten und die Standarddaten zumindest teilweise die gleichen Parameter (wie zum Beispiel Aberrationen zumin-

dest eines der Augen des Benutzers, etc.) enthalten, wobei die in den Zusatzdaten enthaltenen Parameter und die in den Standarddaten enthaltenen Parameter mit unterschiedlichen Messverfahren bzw. Messgeräten erfassbar sind.

[0026] Beispielsweise können die Zusatzdaten Daten umfassen, welche mit einem Aberrometer, einem Topographen, einer Scheimpflugkamera, einem OCT (d.h. einem optischen Kohärenztomographen bzw. einem Verfahren der optischen Kohärenztomographie, Englisch: Optical Coherence Tomography), einem Biometer, und/oder einer anderen Messvorrichtung oder einem anderen Verfahren der objektiven Refraktion erfasst worden sind bzw. erfasst werden können.

[0027] Die Zusatzdaten können zum Beispiel die folgenden biometrischen Daten bzw. Parameter zumindest eines der Augen des Benutzers umfassen:

- Aberrationen niederer und/oder höherer Ordnung des Auges, wie zum Beispiel Sphäre (Sph), Zylinder (Zyl), Achse (bzw. M, J0, J45), Koma, Trefoil, sekundärer Astigmatismus, sphärische Aberration, und/oder andere Aberrationen; und/oder
- Aberrationen niederer und höherer Ordnung der Hornhaut (Cornea), wie zum Beispiel Sphäre (Sph), Zylinder (Zyl), Achse (bzw. M, J0, J45), Koma, Trefoil, sekundärer Astigmatismus, sphärische Aberration und/oder andere Aberrationen, und/oder
- physische Abmessungen des Auges, wie zum Beispiel Vorderkammertiefe, Augenlänge, etc.; und/oder
- Daten der Augenlinse, umfassend zum Beispiel Aberrationen niederer und höherer Ordnung der Augenlinse (wie zum Beispiel Sphäre (Sph), Zylinder (Zyl), Achse (bzw. M, J0, J45), Koma, Trefoil, sekundärer Astigmatismus, sphärische Aberration und/oder andere Aberrationen); und/oder Aufbau und/oder physische Abmessungen der Augenlinse, wie zum Beispiel Krümmungen und/oder Dicke; und/oder
- Pupillengrößen beim Sehen in der Ferne und Nähe und/oder Pupillengrößen unter mesopischen und photopischen Bedingungen.

[0028] Bevorzugt umfassen die Zusatzdaten zumindest einige der folgenden Daten bzw. Parameter: die Aberrationen höherer Ordnung des Auges (wie zum Beispiel Koma, Trefoil, sekundärer Astigmatismus, sphärische Aberration, etc.), die Aberrationen niederer und höherer Ordnung der Hornhaut (Sphäre (Sph), Zylinder (Zyl), Achse (bzw. M, J0, J45), Koma, Trefoil, sekundärer Astigmatismus, sphärische Aberration, etc.), die Vorderkammertiefe, die Pupillengrößen in der Ferne und Nähe und/oder unter mesopischen und photopischen Bedingungen.

[0029] Die Zusatzdaten in den Referenzdatensätzen können zum Beispiel Daten sein, die bei früheren Bestellungen von biometrischen Brillengläsern zusätzlich zu den Standarddaten erfasst bzw. gemessen worden sind, zum Beispiel mit einem Aberrometer, einem Topographen, einer Scheimpflugkamera, einem OCT, einem Biometer und/oder einer anderen Messvorrichtung.

[0030] Die anhand von den individuellen Standarddaten eines Benutzers und des mit Hilfe des statistischen Modells ermittelten individuellen Zusatzdaten können, müssen jedoch nicht, den gleichen Typ Zusatzdaten sein, welche in den Referenzdatensätzen enthalten sind und zum Herleiten des statistischen Modells verwendet werden.

Statistisches Modell

[0031] Das statistische Modell kann ein beliebiges statistischer Modell sein, welches mit Hilfe von statistischen Methoden aus einem bereits vorhandenen Datensatz (Trainingsdatensatz) hergeleitet wird. Beispielhafte statistische Methoden sind Regression (wie zum Beispiel lineare Regression, nichtlineare Regression, nichtlineare Regression mit einem Attention-Mechanismus, nichtlineare multi-Task Regression, nicht-parametrische oder semiparametrische Regression, etc.), Klassifikationsmethoden, sowie andere Methoden des maschinellen Lernens. Algorithmen des maschinellen Lernens sind zum Beispiel in Jeremy Watt, Reza Borhani, Aggelos Katsaggelos: Machine Learning Refined: Foundations, Algorithms, and Applications, Cambridge University Press, 2020 beschrieben.

[0032] Das statistische Modell erhält als Eingangsgrößen wenigstens einen Teil der individuellen Standarddaten und/oder davon abgeleitete Größen und berechnet daraus zumindest einen Teil der zusätzlichen individuellen biometrischen Parameter bzw. Zusatzdaten. Der durch das statistische Modell vorgegebene Zusam-

menhang zwischen Standarddaten und Zusatzdaten kann ein linearer oder nichtlinearer Zusammenhang sein. Ferner kann der Zusammenhang multiparametrisch sein.

[0033] Beispielhafte statistische Modelle sind lineare oder nichtlineare Regressionsmodelle. Als nichtlineare Regressionsmodelle können zum Beispiel neuronale Netzwerke, zu denen auch tiefe neuronale Netzwerke gehören, verwendet werden. Es ist ebenfalls möglich, auch andere aus dem Gebiet des maschinellen Lernens bekannte nichtlineare Regressionsmodelle verwendet werden. Die Regressionsmodelle, wie zum Beispiel das neuronale Netzwerk, können anhand der bereitgestellten Trainingsdatensatz trainiert werden.

[0034] Das statistische Modell kann auch eine Kombination von mehreren statistischen Modellen unterschiedlicher Typen sein, zum Beispiel eine Kombination eines linearen Regressionsmodells, eines nichtlinearen Regressionsmodells (wie zum Beispiel eines neuronalen Netzwerks), eines Klassifizierungsmodells und/oder eines anderen statistischen Modells.

[0035] Das anhand des Trainingsdatensatzes hergeleitete statistische Modell kann in einer geeigneten Speichervorrichtung gespeichert werden, wie zum Beispiel einer Datenbank, einem Rechner, einer Rechen- oder Datenwolke. Zusammen mit dem statistischen Modell kann zumindest ein Teil des zum Herleiten verwendeten Trainingsdatensatzes gespeichert werden.

[0036] Das anhand eines Trainingsdatensatzes hergeleitete statistische Modell kann ferner laufend oder in regelmäßigen Abständen überprüft und/oder modifiziert werden, zum Beispiel auf Basis von neuen Referenzdatensätzen. Das Verfahren kann demzufolge ein Modifizieren des statistischen Modells umfassen.

Neuronale Netzwerke als statistische Modelle

[0037] Beinhaltet das statistische Modell ein neuronales Netzwerk oder besteht es aus einem solchen, so wird die Eingabeschicht des neuronalen Netzwerks mit zumindest einen Teil der Standarddaten und/oder daraus berechneten Hilfsgrößen belegt. Die Ausgabeschicht gibt Werte für zumindest einen Zusatzparameter bzw. zumindest einen Teil der Zusatzdaten aus. Das neuronale Netzwerk kann vorzugsweise zusätzlich zu einer Eingabe- und einer Ausgabeschicht auch eine oder mehrere versteckte Schichten enthalten.

[0038] Während des Trainings eines ursprünglichen, untrainierten neuronalen Netzwerks werden die Gewichte unter Anwendung geeigneter Lernalgorithmen geändert. Das trainierte neuronale Netzwerk gibt den Zusammenhang zwischen Standarddaten und Zusatzdaten vor.

[0039] Der Aufbau des neuronalen Netzwerks (wie zum Beispiel Anzahl und Arten der Schichten, Anzahl und Arten der Neuronen in den unterschiedlichen Schichten, die Art der Verknüpfung der Schichten und der Neuronen untereinander, etc.) sowie die Lernalgorithmen können unterschiedlich sein.

Trainingsdatensatz

[0040] Das statistische Modell, welches den Zusammenhang zwischen Standarddaten und Zusatzdaten beschreibt, wird mit Hilfe statistischer Methoden auf Basis eines Trainingsdatensatzes mit einer Vielzahl von einzelnen Datensätzen (Referenzdatensätzen) hergeleitet. Jeder der Referenzdatensätze kann zum Beispiel Standarddaten und die mittels geeigneter Messverfahren ermittelten Zusatzdaten eines bestimmten Benutzers umfassen. Die unterschiedlichen Referenzdatensätze im Trainingsdatensatz können vorzugsweise die Daten (Standarddaten und Zusatzdaten) von einer Vielzahl unterschiedlicher Benutzer (Referenzbenutzer) umfassen.

[0041] Die in den Referenzdatensätzen enthaltenen Zusatzdaten können zum Beispiel biometrische Parameter umfassen, welche nicht in den Zusatzdaten zugeordneten Standarddaten enthalten sind. Es ist auch möglich, dass die in den Referenzdatensätzen enthaltenen Zusatzdaten biometrische Parameter umfassen, welche zwar in den Zusatzdaten zugeordneten Standarddaten enthalten sind, jedoch eine niedrigere Qualität aufweisen. Beispielsweise können die Werte der Standarddaten und der diesen Standarddaten zugeordneten Zusatzdaten mit unterschiedlichen Messverfahren und/oder Messgeräten erfasst worden sein.

[0042] Hierzu können vorhandenen Bestellungen biometrischer Brillengläser verwendet werden, um mit den Datensätzen ein neuronales Netzwerk oder ein anderes statistisches Modell zu trainieren. Bei einer neuen Standardbestellung kann mit dem trainierten statistischen Modell und basierend auf den in den neuen Bestel-

lung enthaltenen individuellen Standardparametern die zusätzlichen Messdaten (Zusatzdaten) berechnet bzw. prognostiziert werden können. Damit können biometrische Brillengläser basierend auf individuellen Standardparametern und daraus berechneten Zusatzdaten mit Hilfe des neuronalen Netzwerks oder anderer statistischer Modelle berechnet werden.

[0043] Die Anzahl der Referenzdatensätze kann unterschiedlich sein. Beispielsweise können mehr als 10, 100, 1.000, 10.000, 100.000 oder 1.000.000 Referenzdatensätze verwendet werden. Vorzugsweise decken die Referenzdatensätze einen großen, vorzugsweise den gesamten Bereich ab, in dem später Brillengläser bestellt werden können. Beispielsweise können die Referenzdatensätze den Bereich von Refraktionswerten zum Beispiel -20 dpt bis +20 dpt für Sphäre und -8 dpt bis +8 dpt für Zylinder abdecken.

[0044] Ferner kann das Verfahren zum Bestimmen von individuellen biometrischen Parametern zumindest eines der Augen eines Benutzers ein Übermitteln der individuellen Standarddaten und die berechneten individuellen Zusatzdaten an eine externe Entität umfassen, wie zum Beispiel an einen Hersteller von ophthalmischen Brillengläsern, eine Fertigungseinheit, eine Fertigungsvorrichtung, etc.

[0045] Das Verfahren zum Herstellen eines Brillenglases umfasst ferner:

Bereitstellen von individuellen Standarddaten des Benutzers, wobei die Standarddaten eine Verordnung Ferne zumindest eines der Augen des Benutzers umfassen;

Bestimmen von individuellen biometrischen Parametern zumindest eines der Augen eines Benutzers anhand der bereitgestellten individuellen Standarddaten des Benutzers nach dem Verfahren gemäß einem der obigen Aspekte;

Berechnen des Brillenglases anhand der bereitgestellten individuellen Standarddaten und der bestimmten individuellen biometrischen Parameter.

[0046] Das Brillenglas kann zum Beispiel nach dem in der Druckschrift US 9,910,294 B2 beschriebenen Verfahren oder nach einem anderen bekannten Verfahren, bei dem individuelle biometrische Parameter bei der Berechnung des Brillenglases berücksichtigt werden, berechnet werden.

[0047] Das Verfahren kann ferner Fertigen des berechneten Brillenglases umfassen. Das Brillenglas kann zum Beispiel ein Einstärkenbrillenglas, ein multifokales Brillenglas oder ein progressives Brillenglas sein.

[0048] Ein beispielhaftes computerimplementiertes Verfahren zum Bestimmen eines statistischen Modells kann die folgenden Schritte umfassen:

- Bereitstellen eines Trainingsdatensatzes mit einer Vielzahl von Referenzdatensätzen, wobei jeder der Referenzdatensätze Standarddaten und den Standarddaten zugeordnete Zusatzdaten umfasst;
- Herleiten, mittels statistischer Analyse des Trainingsdatensatzes, eines statistischen Modells, welches einen Zusammenhang zwischen den Standarddaten und den Zusatzdaten beschreibt,
- Speichern des statistischen Modells in einer Speichervorrichtung.

[0049] Ein zweiter Aspekt der Erfindung betrifft ein Computerprogrammprodukt, welches, wenn es in den Speicher eines Computers geladen und auf diesem ausgeführt wird, bewirkt, dass der Computer ein Verfahren gemäß einem der obigen Aspekte durchführt.

[0050] Hinsichtlich der oben beschriebenen Verfahren und Computerprogrammprodukte gelten die vorgeannten bevorzugten Ausführungsvarianten und die vorgenannten Vorteile in sinngemäßer Weise.

[0051] Das Verfahren gemäß einem der obigen Aspekte kann mittels einer entsprechend ausgebildeten Vorrichtung durchgeführt werden.

[0052] Ein dritter Aspekt der Erfindung betrifft eine Vorrichtung zum Bestimmen von individuellen biometrischen Parametern zumindest eines der Augen eines Benutzers, wobei die Vorrichtung eine Rechenvorrichtung umfasst, welche ausgebildet ist, das oben beschriebene Verfahren zum Bestimmen von individuellen biometrischen Parametern durchzuführen.

[0053] Die Rechenvorrichtung kann vorzugsweise umfassen:

eine Standarddateneingabeschnittstelle zum Bereitstellen von individuellen Standarddaten des Benutzers, wobei die Standarddaten Verordnungsdaten (wie eine Verordnung Ferne und/oder Verordnung Nähe und gegebenenfalls Addition) zumindest eines der Augen des Benutzers umfassen;

eine Zusatzdatenberechnungsvorrichtung zum Berechnen von individuellen Zusatzdaten, umfassend zumindest einen individuellen biometrischen Parameter des zumindest einen Auges des Benutzers, wobei die Berechnung anhand der individuellen Standarddaten und unter Verwendung eines statistischen Modells erfolgt, wobei das statistische Modell mittels statistischer Analyse eines Trainingsdatensatzes mit einer Vielzahl von Referenzdatensätzen hergeleitet worden ist, wobei jeder der Referenzdatensätze Standarddaten und den Standarddaten zugeordnete Zusatzdaten umfasst.

[0054] Ferner kann die Vorrichtung eine Modelleingabeschnittstelle zum Bereitstellen des statistischen Modells umfassen. Das statistische Modell kann zum Beispiel in einer Speichervorrichtung gespeichert sein, wie zum Beispiel in einer Datenbank, einem Rechner und/oder einer Daten- oder Rechnerwolke. Des Weiteren kann die Vorrichtung eine Trainingsdatensatzeingabeschnittstelle zum Bereitstellen des Trainingsdatensatzes; und eine Modellberechnungsvorrichtung zum Herleiten bzw. Berechnen des statistischen Modells mittels statistischer Analyse des Trainingsdatensatzes umfassen. Das statistische Modell kann zum Beispiel mittels Trainierens eines ursprünglichen (untrainierten) Modells mit Hilfe des Trainingsdatensatzes hergeleitet bzw. berechnet werden.

[0055] Ein vierter Aspekt der Erfindung betrifft eine Vorrichtung zum Herstellen eines Brillenglases, umfassend:

Eine Vorrichtung zum Bestimmen von individuellen biometrischen Parametern zumindest eines der Augen eines Benutzers gemäß dem dritten Aspekt;

eine Glasberechnungsvorrichtung, welche ausgebildet ist, das Brillenglas anhand der bereitgestellten individuellen Standarddaten und der berechneten individuellen biometrischen Parameter zu berechnen.

[0056] Die Herstellungsvorrichtung kann ferner eine Fertigungsvorrichtung zum Fertigen des berechneten Brillenglases umfassen.

[0057] Die oben genannten Vorrichtungen zum Bereitstellen, Bestimmen, Festlegen oder Berechnen von Daten (wie zum von (individuellen) Standarddaten, (individuellen) Zusatzdaten, statistischen Modellen, Modellparameter, Gewichtungen, etc.) können durch geeignet konfigurierte bzw. programmierte Datenverarbeitungsvorrichtungen (insbesondere spezialisierte Hardwaremodule, Computer oder Computersysteme, wie zum Beispiel Rechner- oder Datenwolken) mit entsprechenden Recheneinheiten, elektronische Schnittstellen, Speicher und Datenübermittlungseinheiten realisiert werden. Die Vorrichtungen können ferner zumindest eine vorzugsweise interaktive grafische Benutzerschnittstelle (GUI) umfassen, welche es einem Benutzer ermöglicht, Daten zu betrachten und/oder einzugeben und/oder zu modifizieren.

[0058] Die oben genannten Vorrichtungen können ferner geeignete Schnittstellen aufweisen, die eine Übermittlung, Eingabe und/oder Auslesen von Daten (wie zum Beispiel Trainingsdatensatz, Referenzdatensätzen, (individuellen) Standarddaten, (individuellen) Zusatzdaten, etc.) ermöglichen. Ebenfalls können die Vorrichtungen zumindest eine Speichereinheit umfassen, zum Beispiel in Form einer Datenbank, welche die verwendeten Daten speichert.

[0059] Die Fertigungsvorrichtung kann zum Beispiel zumindest eine CNC gesteuerte Maschine zur Direktbearbeitung eines Blanks nach den ermittelten Optimierungsvorgaben umfassen. Alternativ kann das Brillenglas mittels eines Gießverfahrens gefertigt werden. Das fertig bearbeitete Brillenglas kann eine erste einfache sphärische oder rotationssymmetrisch asphärische Fläche und eine zweite, in Abhängigkeit von den individuellen Standarddaten und berechneten individuellen Zusatzdaten berechnete individuelle Fläche auf. Die einfache sphärische oder rotationssymmetrisch asphärische Fläche kann die Vorderfläche (d.h. die objektseitige Fläche) des Brillenglases sein. Selbstverständlich ist es jedoch möglich, die individuelle Fläche als Vorderfläche des Brillenglases anzuordnen. Auch können beide Flächen des Brillenglases individuell berechnet werden.

[0060] Ein weiterer Aspekt der Erfindung betrifft ein Brillenglas, das nach dem oben beschriebenen Herstellungsverfahren hergestellt ist. Des Weiteren bietet die Erfindung eine Verwendung eines nach dem oben beschriebenen Herstellungsverfahren hergestellten Brillenglases in einer vorgegebenen durchschnittlichen oder idealen bzw. individuellen Gebrauchsstellung des Brillenglases vor den Augen eines bestimmten Benutzers zur Korrektur einer Fehlsichtigkeit des Benutzers.

[0061] Nachfolgend werden bevorzugte Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung anhand begleitender Figuren beispielhaft beschrieben. Einzelelemente der beschriebenen Ausführungsformen sind nicht auf die jeweilige Ausführungsform beschränkt. Vielmehr können Elemente der Ausführungsformen beliebig miteinander kombiniert werden und neue Ausführungsformen dadurch erstellt werden. Es zeigen:

Fig. 1 ein beispielhaftes Verfahren zum Bestimmen von individuellen biometrischen Daten zumindest eines der Augen eines Benutzers und Berechnen eines Brillenglases;

Fig. 2 einen beispielhaften Referenzdatensatz;

Fig. 3 ein beispielhaftes lineares Regressionsmodell;

Fig. 4 ein beispielhaftes nichtlineares Regressionsmodell;

Fig. 5 ein beispielhaftes nichtlineares Regressionsmodell mit einem Attention-Mechanismus;

Fig. 6 ein beispielhaftes Multi-Task nichtlineares Regressionsmodell;

Fig. 7A das sphärische Äquivalent M [in Dpt] der Hornhaut als Funktion des Pupillendurchmessers [in mm];

Fig. 7B die Komponente J_0 [in Dpt] des Powervektors der Hornhaut als Funktion des in den Standarddaten enthaltenen subjektiven Ortho-Astigmatismus [in Dpt];

Fig. 7C die Komponente J_{45} [in Dpt] des Powervektors der Hornhaut als Funktion des in den Standarddaten enthaltenen subjektiven Astigmatismus obliquus J_{45} [in Dpt];

Fig. 8A die Augenlänge als Funktion des in den Standarddaten enthaltenen subjektiven sphärischen Äquivalents M [in Dpt];

Fig. 8B die Vorderkammertiefe als Funktion des in den Standarddaten enthaltenen subjektiven sphärischen Äquivalents M [in Dpt];

Fig. 9 unterschiedliche biometrische Zusatzparameter des rechten Auges eines Benutzers in tabellarischer Form;

Fig. 10 unterschiedliche biometrische Zusatzparameter des linken Auges eines Benutzers in tabellarischer Form;

Fig. 11 die Differenz des maximalen peripheren Astigmatismus im Auge bei einem Brillenglas, welches nach einem Verfahren gemäß einem Beispiel der Erfindung berechnet wurde, und bei einem herkömmlichen Brillenglas ohne Verwendung von biometrischen Daten oder bei Verwendung von biometrischen Standardparametern, wie sie das Gullstrandauge darstellt;

Fig. 12 die prozentuale Differenz der Brechwertänderung bei einem Brillenglas, welches nach einem Verfahren gemäß einem Beispiel der Erfindung berechnet wurde, und bei einem herkömmlichen Brillenglas ohne Verwendung von biometrischen Daten oder bei Verwendung von biometrischen Standardparametern, wie sie das Gullstrandauge darstellt;

Fig. 13 den Astigmatismus in der Bildebene des Systems Brillenglas-Auge, wobei das Brillenglas nach einem Verfahren gemäß einem Beispiel der Erfindung berechnet wurde,

Fig. 14 eine graphische Darstellung eines beispielhaften statistischen Modells;

Fig. 15A bis Fig. 15D beispielhafte Vorhersagen für die Cornea-Topographie für unterschiedliche Standardparameter;

Fig. 16A bis Fig. 16C die Abweichungen von vorhergesagten Zusatzdaten (in dem Fall die Augenlänge) von tatsächlich gemessenen Daten.

[0062] **Fig. 1** zeigt ein beispielhaftes Verfahren zum Bestimmen von individuellen biometrischen Parametern zumindest eines der Augen eines Benutzers und zum Berechnen eines Brillenglases anhand der bestimmten individuellen biometrischen Parameter. Das Verfahren umfasst die folgenden Schritte:

Schritt S1: Erstellung eines Trainingsdatensatzes aus einer Vielzahl von Datensätzen (Referenzdatensätzen) 10, wobei jeder Referenzdatensatz Standarddaten 12 und diesen Standarddaten zugeordnete Zusatzdaten 14 enthält.

[0063] Ein beispielhafter Referenzdatensatz 10 ist in **Fig. 2** gezeigt. Die Standarddaten 12 umfassen die Verordnung Ferne (Sph, Zyl, Achse bzw. M , J_0 , J_{45}) und bei bifokalen, Mehrstärken- und Gleitsichtgläsern

die Addition (Add). Optional umfassen die Standarddaten ferner die Pupillendistanz (PD), den Pupillendurchmesser und die Verordnungs-Nähe (Sph, Zyl, Achse bzw. M, J0, J45). Die Zusatzdaten 14 können zum Beispiel zumindest einen der folgenden Datensätze umfassen:

- Aberrationen niederer und höherer Ordnung des Auges;
- Aberrationen niederer und höherer Ordnung der Cornea;
- Parameter des Auges, wie zum Beispiel Vorderkammertiefe, Augenlänge;
- Pupillengrößen (Ferne, Nähe, mesopisch, photopisch);
- Daten der Augenlinse.

[0064] Um den Trainingsdatensatz zu bilden, können vorhandene Bestellungen biometrischer Brillengläser verwendet werden, bei denen die Zusatzdaten mittels eines Messverfahrens erfasst worden sind. Beispielhafte Messverfahren sind Messungen mit einem Aberrometer, einem Topographen, einer Scheimpflugkamera, einem OCT und/oder einem Biometer.

[0065] Schritt S2: Mit Hilfe von statistischen Methoden wird aus der Vielzahl von Referenzdatensätzen ein Zusammenhang zwischen den Standarddaten und den zusätzlichen Daten hergeleitet. Anders ausgedrückt wird anhand des Trainingsdatensatzes ein statistisches Modell ermittelt, welches den Zusammenhang, wie beispielsweise die Korrelation(en), zwischen Standarddaten und Zusatzdaten beschreibt.

[0066] Das Ermitteln des statistischen Modells kann zum Beispiel ein Trainieren eines ursprünglich untrainierten neuronalen Netzwerks mit dem Trainingsdatensatz, der die Vielzahl von Referenzdatensätzen umfasst, umfassen. Das trainierte neuronale Netzwerk kann anhand eines Testdatensatzes getestet werden und/oder kann anhand eines Validierungsdatensatzes validiert werden. Der Testdatensatz und der Validierungsdatensatz können jeweils eine Vielzahl von Datensätzen (Referenzdatensätzen) aus früheren Bestellungen umfassen, zum Beispiel eine Vielzahl von den in **Fig. 2** gezeigten Referenzdatensätzen. Vorzugsweise ist ein Referenzdatensatz, der in dem Testdatensatz enthalten ist, weder im Validierungsdatensatz noch im Trainingsdatensatz enthalten. Ähnlich ist ein Referenzdatensatz, der in dem Validierungsdatensatz enthalten ist, vorzugsweise weder im Testdatensatz noch im Trainingsdatensatz enthalten.

[0067] Schritt S3: Bereitstellen eines individuellen Datensatzes, welcher nur individuelle Standarddaten enthält. Die individuellen Standarddaten können im Rahmen einer individuellen Brillenbestellung für einen Benutzer von einem Augenoptiker erfasst werden.

[0068] Schritt S4: Berechnen von individuellen zusätzlichen Daten (Zusatzdaten) basierend auf den individuellen Standarddaten, die in dem individuellen Datensatz enthalten sind, der in Schritt S3 bereitgestellt wurde, und weiter basierend auf dem in Schritt S2 ermittelten Zusammenhang zwischen Standarddaten und Zusatzdaten. Die individuellen Standarddaten können zum Beispiel dem trainierten neuronalen Netzwerk aus Schritt S2 eingegeben werden. Die entsprechenden Ausgangsdaten des neuronalen Netzwerks können direkt als die individuellen Zusatzdaten verwendet werden. Es ist möglich, die Ausgangsdaten des neuronalen Netzwerks nicht direkt zu verwenden, sondern diese Ausgangsdaten zunächst einer weiteren Verarbeitung (wie zum Beispiel Überprüfung auf Plausibilität, Glätten, Filtern, Einordnen in Klassen, Umrechnen, etc.) zu unterziehen.

[0069] Schritt S5: Berechnen eines individuellen Brillenglases, basierend auf den individuellen Standarddaten, die in dem individuellen Datensatz enthalten sind, der in Schritt S3 bereitgestellt wurde, und weiter basierend auf den berechneten individuellen Zusatzdaten aus dem Schritt S4.

[0070] Das Berechnen eines individuellen Brillenglases umfasst das Berechnen zumindest einer Fläche des Brillenglases basierend auf den individuellen Standarddaten und den berechneten individuellen Zusatzdaten. Die so berechnete Fläche kann die Rückfläche oder die Vorderfläche des Brillenglases sein. Das „Berechnen zumindest einer Fläche eines Brillenglases“ schließt das Berechnen zumindest eines Teils einer Fläche bzw. eines Flächenstücks ein. Anders ausgedrückt wird unter einem „Berechnen zumindest einer Fläche eines Brillenglases“ ein Berechnen zumindest eines Teils der Fläche oder ein Berechnen der gesamten Fläche verstanden.

[0071] Die der berechneten Fläche gegenüberliegende Fläche kann eine einfache Fläche sein, wie zum Beispiel eine sphärische, eine rotationssymmetrisch eine asphärische, eine torische oder eine atorische Fläche. Es ist auch möglich, beide Flächen individuell zu berechnen.

[0072] Das Berechnen des individuellen Brillenglases kann mit einem bekannten Verfahren erfolgen, wie zum Beispiel mit dem aus der Druckschrift US 9,910,294 B2 bekannten Verfahren.

[0073] Fig. 3 bis Fig. 6 zeigen beispielhafte statistische Modelle 2, welche jeweils auf Basis eines Datensatzes 1 (Trainingsdatensatz) trainiert werden.

[0074] Fig. 3 zeigt ein beispielhaftes lineares Regressionsmodell mit einer Eingabeschicht und einer Ausgabeschicht. Dabei wird aus einer multidimensionalen Eingangsgröße x mit einer Dimension D (zum Beispiel $D = 26$) eine Ausgangsgröße $f(x)$ mit K Variablen berechnet:

$$f(x) = Wx, \quad (1)$$

wobei $W \in \mathbb{R}^{K \times D}$ die Gewichtungsmatrix bezeichnet.

[0075] Fig. 4 zeigt ein beispielhaftes nichtlineares Regressionsmodell mit einer Eingabeschicht, einer Ausgabeschicht und mehreren verborgenen Schichten. Dabei wird aus einer multidimensionalen Eingangsgröße x mit einer Dimension D (zum Beispiel $D = 26$) eine Ausgangsgröße $f(x)$ mit k Variablen berechnet:

$$f(x) = \sigma \left(W^3 \sigma \left(W^2 \sigma \left(W^1 x \right) \right) \right), \quad (2)$$

wobei:

$\sigma(a)$: eine Aktivierungsfunktion bezeichnet,

zum Beispiel $\sigma(a) = \max(a, 0)$ (Rectified Linear Unit (ReLU)); und

$W^1 \in \mathbb{R}^{L \times D}$, $W^2 \in \mathbb{R}^{M \times L}$ und $W^3 \in \mathbb{R}^{K \times M}$ Gewichtungsmatrizen bezeichnen.

[0076] Fig. 5 zeigt ein beispielhaftes nichtlineares Regressionsmodell mit einem Attention-Mechanismus. Das Modell weist eine Eingabeschicht, eine Ausgabeschicht, mehrere verborgene Schichten und eine Attention-Schicht mit „H“ Attentionsköpfen (English: „attention head“) auf. Bei jedem der Attentionsköpfe werden die folgenden Operationen durchgeführt:

$$x \odot \text{softmax} \left(W_{att}^h x \right)$$

$$\text{softmax}(a_i) = \frac{\exp(a_i)}{\sum_j \exp(a_j)} \quad (3)$$

wobei: $W_{att}^h \in \mathbb{R}^{D \times D}$, ($h = 1, \dots, H$) Gewichtungsmatrizen bezeichnet; und h ($h = 1, \dots, H$) den h -ten Attentionskopf bezeichnet.

[0077] Der Ausgang $f(x)$ wird berechnet durch:

$$f(x) = \sigma \left(W^3 \sigma \left(W^2 \sigma \left(W^1 \text{Attention}(x) \right) \right) \right), \quad (4)$$

wobei:

$\sigma(a)$ eine Aktivierungsfunktion (zum Beispiel Rectified Linear Unit (ReLU)) bezeichnet;

$$\text{Att}^h = x \odot \text{softmax} \left(W_{att}^h x \right);$$

$$\text{Attention}(x) = \frac{1}{H} \oplus_h \text{Att}^h \left(x; W_{att}^h \right), \quad h = 1, \dots, H;$$

$\odot$ das elementweise Produkt bezeichnet;

$\oplus_h$ das Aneinanderfügen aller Ausgabvektoren der einzelnen Attentionsköpfe $h = 1, \dots, H$ bezeichnet; und

$W^1 \in \mathbb{R}^{L \times H \cdot D}$, $W^2 \in \mathbb{R}^{M \times L}$ und $W^3 \in \mathbb{R}^{K \times M}$ Gewichtungsmatrizen bezeichnen.

[0078] **Fig. 6** zeigt ein beispielhaftes nichtlineares Multi-Task Regressionsmodell für die Verarbeitung von mehreren Aufgaben (Aufgaben (Tasks) 1 bis T). Das in **Fig. 6** gezeigte Modell basiert auf das in **Fig. 5** gezeigte Modell, welches für mehrere Aufgaben (Task 1 bis Task T) modifiziert wurde. Dabei wird eine gemeinsame Darstellung in der Attentionsschicht verwendet. Anstelle der Gewichtungsmatrix $W^3 \in \mathbb{R}^{K \times M}$ wird für jede einzelne Aufgabe eine gesonderte Gewichtungsmatrix $W_{task\ h}^2$, $h = 1 \dots, T$ verwendet. Mit Hilfe des Modells werden aus einer multidimensionalen Eingangsgröße x mit einer Dimension D (zum Beispiel $D = 26$) mehrere Ausgangsgrößen $f_t(x)$, $t = 1, \dots, T$ berechnet. Die Dimensionen der Ausgangsgrößen sind durch die Aufgaben gegeben, wobei die verschiedenen Aufgaben unterschiedliche Dimensionen besitzen können. Die Ausgangsgröße f^1 kann zum Beispiel die Dimension K_1 haben, die Ausgangsgröße f^2 kann die Dimension K_2 u.s.w. Insgesamt ist die Dimensional aller Ausgangsgrößen die Summe der Dimensionen der einzelnen Ausgangsgrößen $\sum_1^T K_i$.

[0079] **Fig. 7** und **Fig. 8** zeigen die Ergebnisse für unterschiedlichen individuellen biometrischen Zusatzparameter (d.h. Parameter, die in den Zusatzdaten enthalten sind), die nach dem oben beschriebenen Verfahren unter Verwendung des in **Fig. 3** gezeigten Modells (d.h. mittels linearer Regression) berechnet wurden, im Vergleich zu tatsächlich gemessenen individuellen Zusatzparametern und Zusatzparametern nach dem Gullstrand-Augenmodell. In **Fig. 7** und **Fig. 8** sind die gemessenen Werte mit kleinen Kreisen dargestellt. Die durchgezogene Linie zeigt den nach dem oben genannten Verfahren statistisch ermittelten linearen Zusammenhang zwischen dem jeweiligen Zusatzparameter und dem entsprechenden Standardparameter (d.h. einem Parameter, der in den Standarddaten enthalten ist). Die gestrichelte Linie zeigt die Parameterwerte nach dem Gullstrand-Augenmodell.

[0080] **Fig. 7** zeigt die Ergebnisse für die Komponenten des Power-Vektors der Hornhaut „M“ (sphärisches Äquivalent) „J0“ (Ortho-Astigmatismus) und „J45“ (Astigmatismus obliquus) der Hornhaut (Cornea), wobei:

Fig. 7A das sphärische Äquivalent M [in Dpt] der Hornhaut als Funktion des in den Standarddaten enthaltenen Pupillendurchmessers [in mm] zeigt;

Fig. 7B den Ortho-Astigmatismus J0 [in Dpt] der Hornhaut als Funktion des in den Standarddaten enthaltenen subjektiven (Rx) Ortho-Astigmatismus J0 [in Dpt] zeigt; und

Fig. 7C den Astigmatismus obliquus J45 [in Dpt] der Hornhaut als Funktion des in den Standarddaten enthaltenen subjektiven (Rx) Astigmatismus obliquus J45 [in Dpt] zeigt.

[0081] **Fig. 8** zeigt die Augenlänge (**Fig. 8A**) und die Vorderkammertiefe (**Fig. 8B**) jeweils als Funktion des in den Standarddaten enthaltenen subjektiven (Rx) sphärischen Äquivalent M [in Dpt].

[0082] Das subjektive (Rx) sphärische Äquivalent M, der subjektive (Rx) Ortho-Astigmatismus J0 und der subjektive Astigmatismus obliquus J45 sind die Komponenten des Powervektors der Verordnung Ferne, welche mittels subjektiver Refraktion ermittelt worden ist. Die Verordnung Ferne ist Bestandteil der Standarddaten.

[0083] Wie aus den **Fig. 7** und **Fig. 8** ersichtlich, sind die nach dem oben beschriebenen Verfahren ermittelten Werte für die zusätzlichen biometrischen Parameter sphärisches Äquivalent M der Hornhaut, Ortho-Astigmatismus J0 der Hornhaut, Astigmatismus obliquus J45 der Hornhaut, Augenlänge und Vorderkammertiefe sehr nah an den durch aufwendige Messverfahren ermittelten Werten.

[0084] **Fig. 9** und **Fig. 10** zeigen jeweils in tabellarischer Form unterschiedliche biometrische Zusatzparameter des rechten Auges (**Fig. 9**) und des linken Auges (**Fig. 10**) eines Benutzers mit den folgenden Standarddaten:

Rechtes Auge:

Verordnung Ferne:

Sph = -3,00 dpt;

Zyl = -1,75 dpt; Achse = 173°;

Addition = 0,00 dpt;

Pupillendistanz PD = 61,7 mm

Linkes Auge:

Verordnung Ferne:

Sph = -4,50 dpt;

Zyl = -1,00 dpt; Achse = 179°

Addition = 0,00 dpt;

Pupillendistanz PD = 61,7 mm

[0085] In Spalte 1 der in den **Fig. 9** und **Fig. 10** gezeigten Tabellen sind die Werte für die biometrischen Zusatzparameter nach dem Gullstrand-Augenmodell angegeben. In Spalte 2 sind die nach dem oben beschriebenen Verfahren auf Basis eines statistischen Modells ermittelten Werte für die biometrischen Zusatzparameter angegeben. Das statistische Modell ist ein lineares Regressionsmodell, wie zum Beispiel in **Fig. 3** gezeigt, welches für mehrere Aufgaben (Tasks) modifiziert wurde. In Spalte 3 sind tatsächlich gemessene Werte gezeigt. Die gemessenen Werte wurden mit dem zur Vermessung der Abstände der brechenden Flächen des Auges geeigneten Niederkohärenz-Reflektometer „LenStar 900“ (Haag-Streit) erfasst.

[0086] Wie aus den **Fig. 9** bis **Fig. 10** ersichtlich, stimmen die berechneten Zusatzparameter weitgehend mit den tatsächlich gemessenen Parametern überein.

[0087] **Fig. 11** und **Fig. 12** zeigen jeweils die Unterschiede in den Eigenschaften von Brillengläsern (insgesamt 813 Brillengläsern), welche nach einem Verfahren gemäß einem Beispiel der Erfindung berechnet worden sind, und herkömmlichen Brillengläsern ohne Verwendung eines biometrischen Modells, welche auf biometrischen Standardparametern, wie sie das Gullstrandauge darstellt, beruhen..

[0088] Auf der Abszisse der **Fig. 11** und der **Fig. 12** ist die mittlere Wirkung der Verordnung ($\text{sph} + \text{zyl}/2$) in Dpt (auch sphärisches Äquivalent genannt) aufgetragen.

[0089] Auf der Ordinate der **Fig. 11** ist die Differenz [in Dpt] des maximalen Astigmatismus im Auge bei einem Brillenglas, welches nach einem Verfahren gemäß einem Beispiel der Erfindung berechnet worden ist, und des maximalen Astigmatismus im Auge bei einem herkömmlichen Brillenglas aufgetragen, wobei beide Brillengläser die gleichen Standardparameter aufweisen.

[0090] Auf der Ordinate der **Fig. 12** ist die prozentuale Differenz der Brechkraftänderung bei einem Brillenglas, welches nach einem Verfahren gemäß einem Beispiel der Erfindung berechnet worden ist, und der Brechkraftänderung bei einem herkömmlichen Brillenglas aufgetragen, wobei beide Brillengläser die gleichen Standardparameter aufweisen.

[0091] **Fig. 13** zeigt den Astigmatismus in der Bildebene eines Systems Auge-Brillenglas, wobei der Abstand zwischen zwei Isoastigmatismuslinien 0,25 Dpt beträgt. Das Brillenglas wurde nach einem beispielhaften erfindungsgemäßen Verfahren für eine Verordnung Ferne (Sph = 0,0 Dpt, Ast = 0,0 Dpt) und einer Addition Add = 2,0 Dpt berechnet. Das Brillenglas weist eine Reduktion des maximalen peripheren Astigmatismus (Zyl) von ungefähr 15%.

[0092] Wie aus den **Fig. 11** bis **Fig. 13** ersichtlich, weisen die Brillengläser, welche auf Basis von individuellen zusätzlichen biometrischen Parametern (Zusatzdaten) optimiert worden sind, wobei die Zusatzdaten auf Basis von Standarddaten unter Verwendung eines statistischen Modells berechnet bzw. vorhergesagt werden, sehr gute optische Eigenschaften auf. Eine aufwendige und kostenintensive Messung von individuellen Zusatzdaten ist somit nicht notwendig.

[0093] Nachfolgend wird das beispielhafte Verfahren, welches bei der Berechnung der Brillengläser mit den in den **Fig. 11** bis **Fig. 13** gezeigten Werten verwendet wurde, beschrieben.

[0094] Der Trainingsdatensatz umfasst ca. 20000 Referenzdatensätze, Jeder Referenzdatensatz umfasst Standarddaten und die den Standarddaten zugeordneten Zusatzdaten. Die Standarddaten umfassen die mittels subjektiver Refraktion erfassten Verordnungsdaten (die Verordnung Ferne, umgerechnet in M, J0, J45) des rechten Auges eines Benutzers. Die Zusatzdaten umfassen die Cornea-Topografie in Zernike-Darstellung sowie die Vorderkammertiefe des rechten Auges des Benutzers. Der Trainingsdatensatz wird verwendet, um ein lineares Regressionsmodell, wie zum Beispiel das in **Fig. 3** gezeigte Modell, zu trainieren.

[0095] Das trainierte Modell ermöglicht eine Vorhersage jedes der Zernike-Koeffizienten $c_{n,m}(x)$ der Cornea-Topografie und der Vorderkammertiefe $d_{CL}(x)$ als lineare Regression folgender Merkmale (features):

$$x = (1, M, J_0, J_{45}, \text{Add}, M \cdot J_0, M \cdot J_{45}, M \cdot \text{Add}, J_0 \cdot J_{45}, J_0 \cdot \text{Add}, J_{45} \cdot \text{Add})^T \quad (5)$$

[0096] Im linearen Regressionsmodell gilt für die vorhergesagten Zernike-Koeffizienten $c_{n,m}(x)$ der Cornea-Topografie:

$$c_{n,m}(x) = \sum_i a_{n,m}^i x_i \quad (6)$$

[0097] Für die vorhergesagte Vorderkammertiefe $d_{CL}(x)$ gilt:

$$d_{CL}(x) = \sum_i a_{CL}^i x_i, \quad (7)$$

[0098] In den Gleichungen (6) and (7) bezeichnet:

$a_{n,m}^i$ die Parameter der linearen Regression des i-ten Merkmals zur Vorhersage des Zernike-Koeffizienten $c_{n,m}$; und

a_{CL}^i die Parameter der linearen Regression des i-ten Merkmals zur Vorhersage der Vorderkammertiefe.

[0099] Für die Cornea-Pfeilhöhe z als Funktion des Merkmal-Vektors x und der Position der Pupillenkoordinaten X_{pup}, Y_{pup} gilt:

$$z(x, X_{pup}, Y_{pup}) = \sum_{n,m} c_{n,m}(x) Z_{n,m}(X_{pup}, Y_{pup}) = \sum_i x_i z_i(X_{pup}, Y_{pup}), \quad (8)$$

wobei:

$$z_i(X_{pup}, Y_{pup}) = \sum_{n,m} a_{n,m}^i(x) Z_{n,m}(X_{pup}, Y_{pup}) \quad (9)$$

$Z_{n,m}$: das (m,n) -te Zernike-Polynom bezeichnet; und

X_{pup}, Y_{pup} die Pupillenkoordinaten bezeichnen.

[0100] Die Terme der Summe gemäß Gleichung (8) werden durch das Trainieren des Modells bestimmt.

[0101] **Fig. 14** zeigt eine graphische Darstellung des trainierten Modells für die Cornea-Topographie. Wie oben ausgeführt gilt für die Pfeilhöhe z der Cornea-Topographie:

$$z(x, X_{pup}, Y_{pup}) = \sum_i x_i z_i(X_{pup}, Y_{pup}) \quad (10)$$

[0102] In **Fig. 14** sind die durch Trainieren des Modells bestimmten Terme der Summe aus Gleichung (10) als Pfeilhöhen-Plots gezeigt, wobei die Pfeilhöhen-Isolinien in μm pro Einheit des jeweiligen Merkmals (konstanter Term, M , J_0 , J_{45} , Add , $M \cdot J_0$, $M \cdot J_{45}$, $M \cdot \text{Add}$, $J_0 \cdot J_{45}$, $J_0 \cdot \text{Add}$, $J_{45} \cdot \text{Add}$) und die Pupillenkoordinaten X_{pup}, Y_{pup} in mm angegeben sind.

[0103] **Fig. 15A** bis **Fig. 15D** zeigen beispielhafte Vorhersagen für die Cornea-Topographie auf Basis des trainierten Modells bei unterschiedlichen Standardparametern M (Sphärisches Äquivalent), J_0 , J_{45} und Add . **Fig. 15A** zeigt die Ergebnisse (als Iso-Linienplots) für $M = 0 \text{ Dpt}$, $J_0 = 0 \text{ Dpt}$, $J_{45} = 0 \text{ Dpt}$ und $\text{Add} = 0 \text{ Dpt}$. **Fig. 15B** zeigt die Ergebnisse (als Iso-Linienplots) für $M = 0 \text{ Dpt}$, $J_0 = 2 \text{ Dpt}$, $J_{45} = 0 \text{ Dpt}$ und $\text{Add} = 0 \text{ Dpt}$. **Fig. 15C** zeigt die Ergebnisse (als Iso-Linienplots) für $M = 0 \text{ Dpt}$, $J_0 = 0 \text{ Dpt}$, $J_{45} = 2 \text{ Dpt}$ und $\text{Add} = 0 \text{ Dpt}$. **Fig. 15D** zeigt die Ergebnisse (als Iso-Linienplots) für $M = 0 \text{ Dpt}$, $J_0 = 0 \text{ Dpt}$, $J_{45} = 0 \text{ Dpt}$ und $\text{Add} = 2 \text{ Dpt}$. Auf der Abszisse und der Ordinate in **Fig. 15A** bis **Fig. 15D** sind jeweils die Pupillenkoordinaten x_{pup}, y_{pup} angegeben. Insbesondere zeigen **Fig. 15A** bis **Fig. 15D** jeweils von links nach rechts die mittlere Wirkung der Cornea in Dpt , die Pfeilhöhe der Cornea (Cornea-Topographie) in μm und die Abweichung der Pfeilhöhe der Cornea vom konstanten Term in der Cornea-Topographie Darstellung gemäß Gleichung (10) (Topographie Abweichung).

[0104] Fig. 16A bis Fig. 16C zeigen die Abweichungen von vorhergesagten Zusatzdaten (in dem Fall die Augenlänge) von tatsächlich gemessenen Daten. Auf der Abszisse ist die gemessene Augenlänge in mm aufgetragen. Auf der Ordinate ist die vorhergesagte Augenlänge in mm aufgetragen.

[0105] Die in Fig. 16A gezeigte vorhergesagte Augenlänge ist die Augenlänge gemäß dem Gullstrand-Augenmodell. Dieses Modell weist 0 Eingangsparameter auf. Die Genauigkeit der Vorhersage (95% Konfidenzintervall) ist ± 2.4 mm.

[0106] Die in Fig. 16B gezeigte vorhergesagte Augenlänge ist mittels eines trainierten statistischen Modells mit dem sphärischen Äquivalent als Eingangsparameter ermittelt worden. Die Genauigkeit der Vorhersage (95% Konfidenzintervall) ist ± 1.5 mm.

[0107] Die in Fig. 16C gezeigte vorhergesagte Augenlänge ist mittels eines trainierten statistischen Modells mit dem sphärischen Äquivalent und der Pupillendistanz als Eingangsparameter ermittelt worden. Die Genauigkeit der Vorhersage (95% Konfidenzintervall) ist ± 1.4 mm.

[0108] Wie aus den Fig. 16A bis Fig. 16C ersichtlich, kann die Berücksichtigung mehrerer Eingangsparameter die Genauigkeit der Vorhersagen verbessern.

Bezugszeichenliste

1	Trainingsdatensatz
2	statistisches Modell
10	Referenzdatensatz
12	Standarddaten
14	Zusatzdaten
S1 bis S5	Verfahrensschritte

Patentansprüche

1. Verfahren zum Herstellen eines Brillenglases, umfassend:

Bestimmen von individuellen Zusatzdaten (14), welche zumindest einen individuellen biometrischen Parameter zumindest eines Auges eines Benutzers umfassen;

Berechnen des Brillenglases anhand der bestimmten individuellen Zusatzdaten, wobei das Bestimmen von individuellen Zusatzdaten (14) mittels eines computerimplementierten Verfahrens umfassend die folgenden Schritte erfolgt:

Bereitstellen von individuellen Standarddaten (12) des Benutzers, wobei die Standarddaten (12) Verordnungsdaten umfassend eine Verordnung Ferne und/oder eine Verordnung Nähe zumindest eines der Augen des Benutzers umfassen; und

Berechnen der individuellen Zusatzdaten (14) basierend auf den individuellen Standarddaten (12) und unter Verwendung eines statistischen Modells (2), welches einen Zusammenhang zwischen den Standarddaten und den Zusatzdaten beschreibt,

wobei das statistische Modell (2) mittels statistischer Analyse eines Trainingsdatensatzes (1) mit einer Vielzahl von Referenzdatensätzen (10) hergeleitet worden ist, wobei jeder der Referenzdatensätze (10) Standarddaten und den Standarddaten zugeordnete Zusatzdaten umfasst.

2. Verfahren gemäß Anspruch 1, wobei das Berechnen von individuellen Zusatzdaten ferner umfasst:

Bereitstellen des Trainingsdatensatzes (1); und

Herleiten des statistischen Modells (2) mittels statistischer Analyse des Trainingsdatensatzes (1), wobei das Herleiten des statistischen Modells (2) ein Trainieren eines ursprünglichen Modells mit Hilfe des Trainingsdatensatzes (1) umfasst.

3. Verfahren gemäß Anspruch 1 oder 2, wobei das statistische Modell (2) ein lineares Regressionsmodell, ein nichtlineares Regressionsmodell, ein nichtparametrisches oder ein semi-parametrisches Regressionsmodell ist.

4. Verfahren gemäß einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei das statistische Modell (2) ein neuronales Netzwerk ist, welches mit Hilfe des Trainingsdatensatzes trainiert worden ist.

5. Verfahren gemäß einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei die Standarddaten (12) ferner die Addition und/oder die Pupillendistanz und/oder den Pupillendurchmesser umfassen.

6. Verfahren gemäß einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei die in den Referenzdatensätzen (10) enthaltenen Zusatzdaten (14) biometrische Parameter umfassen, welche nicht in den den Zusatzdaten (14) zugeordneten Standarddaten (12) enthalten sind; und/oder wobei die in den Referenzdatensätzen (10) enthaltenen Zusatzdaten (14) biometrische Parameter umfassen, welche in den den Zusatzdaten (14) zugeordneten Standarddaten (12) enthalten sind, wobei die Werte der Standarddaten (12) und der diesen Standarddaten zugeordneten Zusatzdaten (14) mit unterschiedlichen Messverfahren und/oder Messgeräten erfasst worden sind.

7. Verfahren gemäß einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei die Verordnungen mittels subjektiver Refraktion ermittelt worden sind.

8. Verfahren gemäß einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei die in den Referenzdatensätzen (10) enthaltenen Zusatzdaten (14) Daten umfassen, welche mit einem Aberrometer, einem Topographen, einer Scheimpflugkamera, einem OCT und/oder einem Biometer erfasst worden sind.

9. Verfahren gemäß einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei die Zusatzdaten (14) umfassen:

- Aberrationen niederer und/oder höherer Ordnung des Auges; und/oder
- Vorderkammertiefe und/oder Länge des Auges; und/oder
- Aberrationen niederer und höherer Ordnung der Cornea; und/oder
- Aberrationen niederer und/oder höherer Ordnung der Augenlinse; und/oder
- Aufbau der Augenlinse und/oder Krümmungen der Augenlinse und/oder Dicke der Augenlinse; und/oder
- Pupillengrößen des Benutzers beim Sehen in der Ferne und Nähe und/oder unter mesopischen und photopischen Bedingungen.

10. Vorrichtung zum Bestimmen von individuellen biometrischen Parametern zumindest eines der Augen eines Benutzers, wobei die Vorrichtung eine Rechenvorrichtung umfasst, welche ausgebildet ist, das Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9 durchzuführen.

11. Vorrichtung zum Herstellen eines Brillenglases:
 eine Vorrichtung zum Bestimmen von individuellen biometrischen Parametern zumindest eines der Augen eines Benutzers gemäß Anspruch 10;
 eine Glasberechnungsvorrichtung, welche ausgebildet ist, das Brillenglas anhand der berechneten individuellen biometrischen Parameter zu berechnen.

Es folgen 18 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

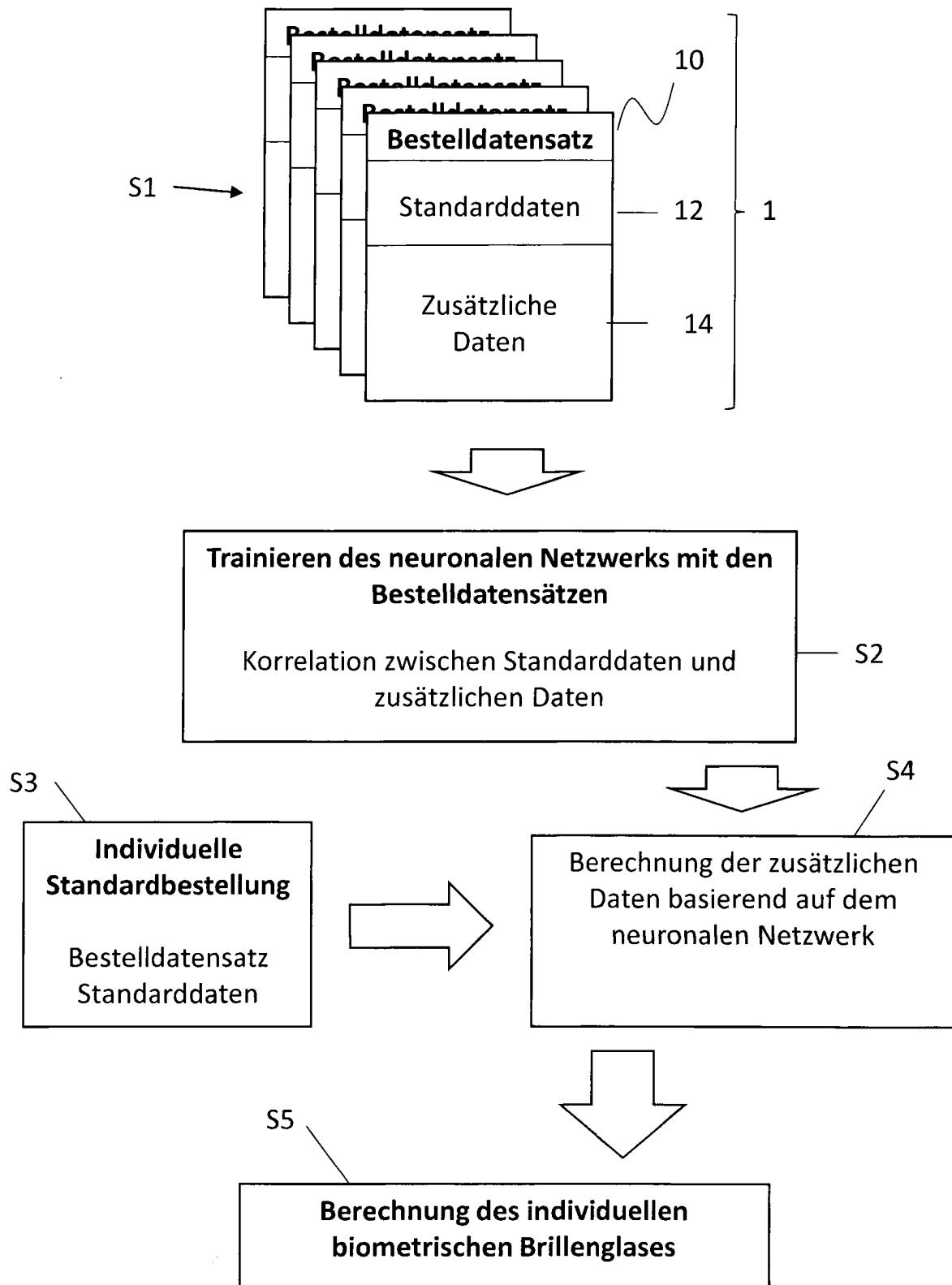


FIG. 1

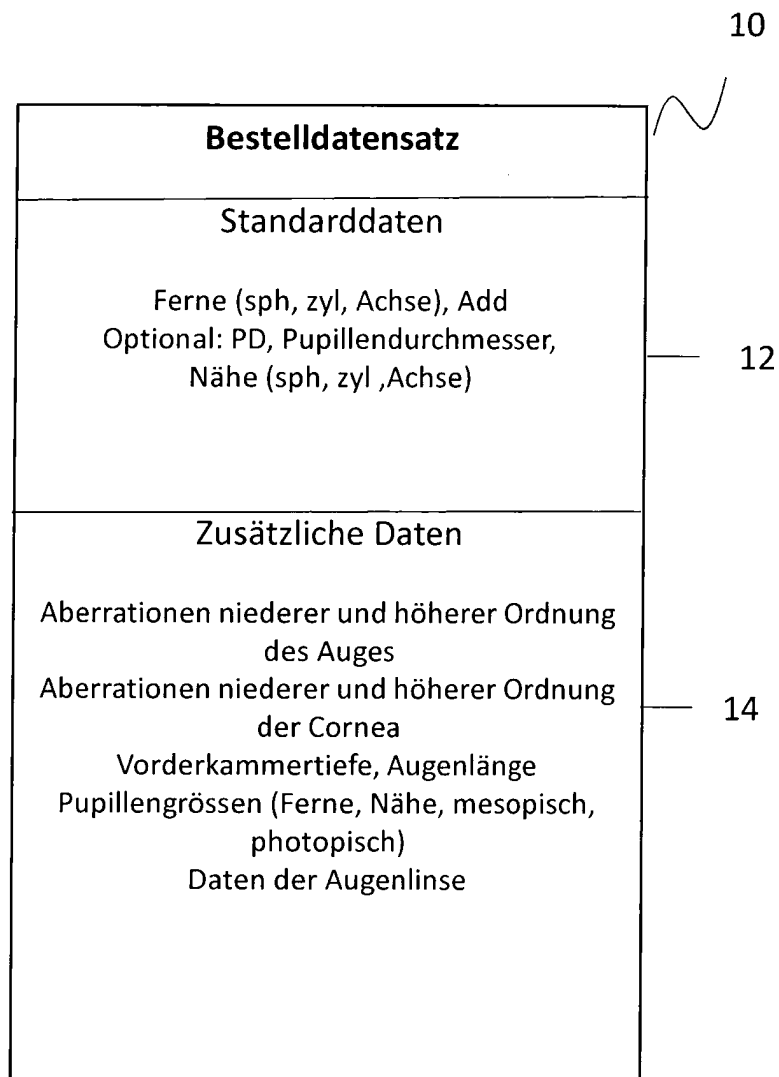


FIG. 2

Lineare Regression

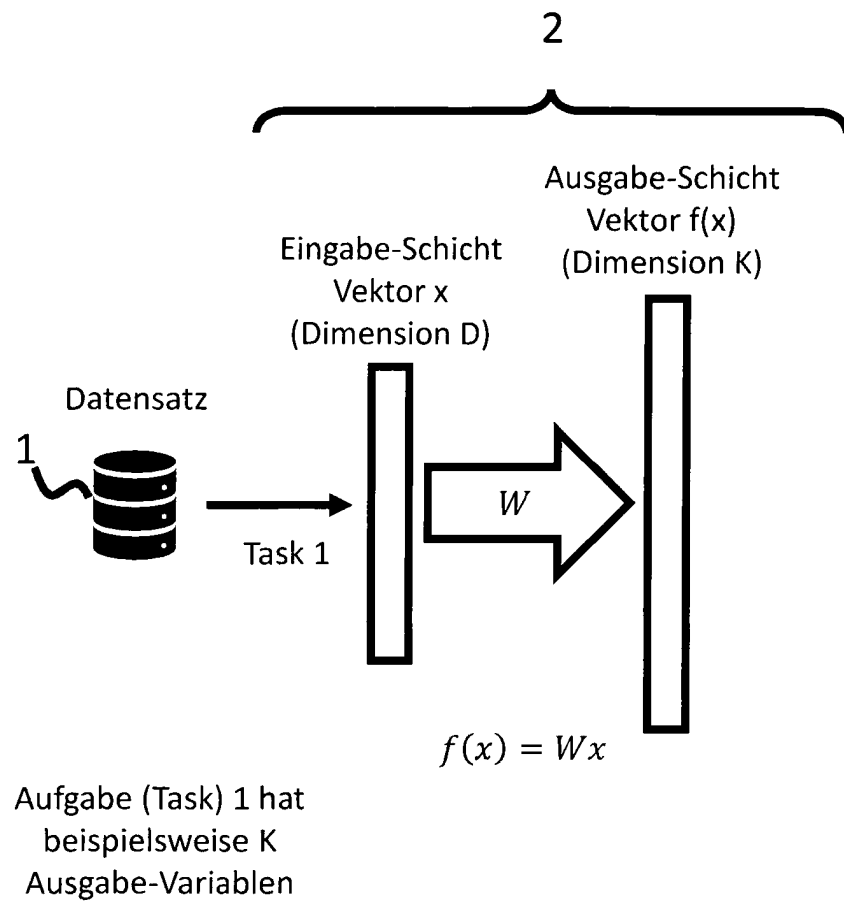
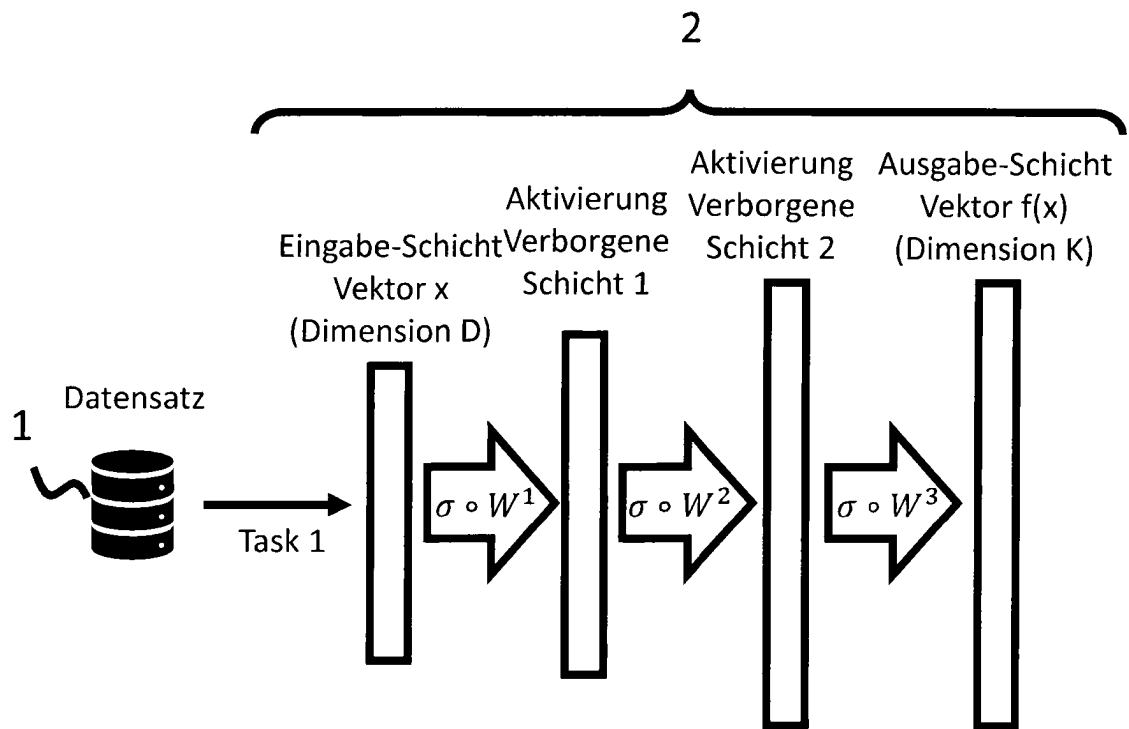


FIG. 3

Nichtlineare Regression



Aufgabe (Task) 1 hat
beispielsweise K
Ausgabe-variablen

$$f(x) = \sigma \left(W^3 \sigma \left(W^2 \sigma \left(W^1 x \right) \right) \right)$$

$\sigma(a)$: Aktivierungsfunktion,
z.B. Rectified Linear Unit (ReLU)

FIG. 4

Nichtlineare Regression mit Attention-Mechanismus

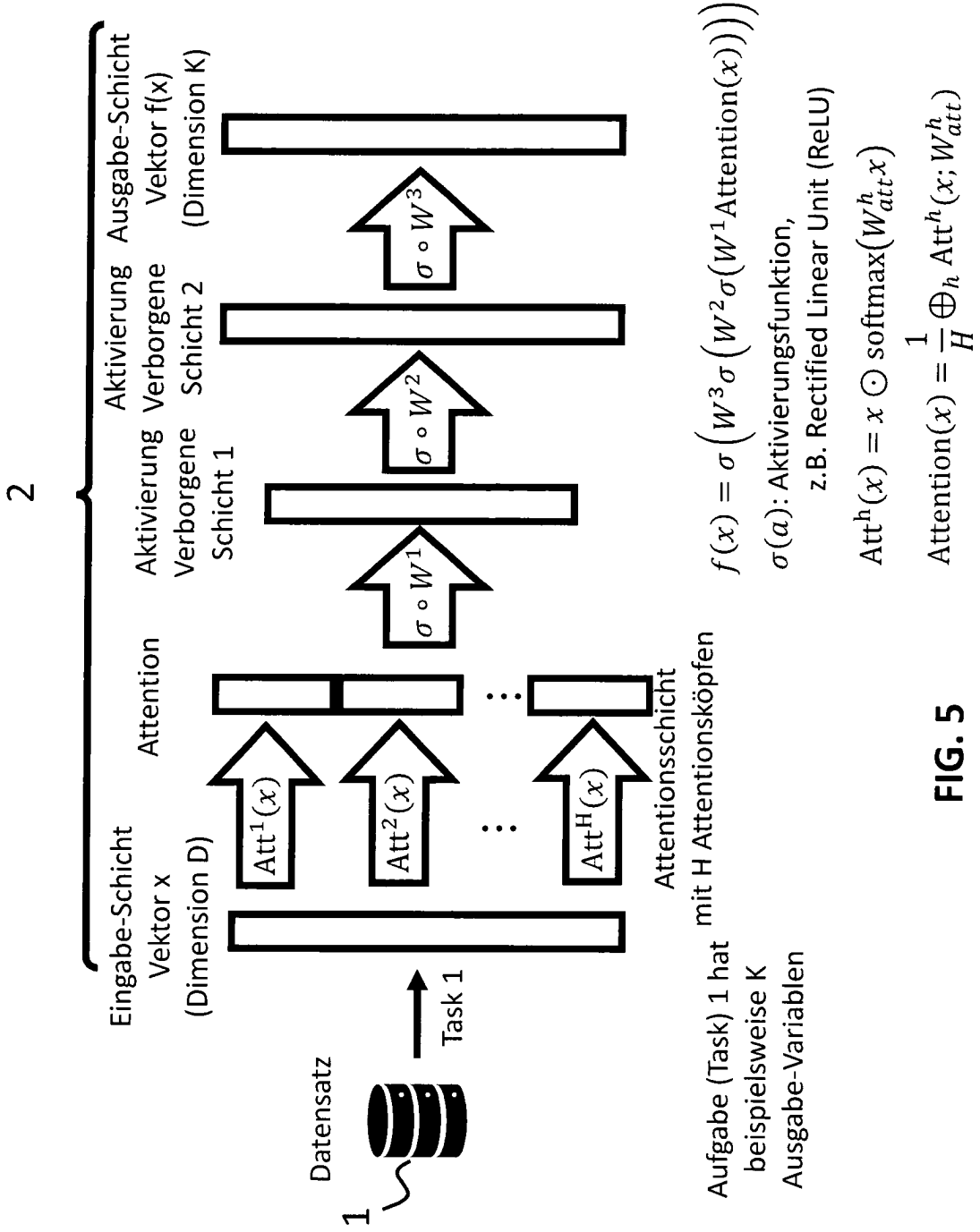


FIG. 5

Nichtlineare multi-Task Regression mit Attention-Mechanismus

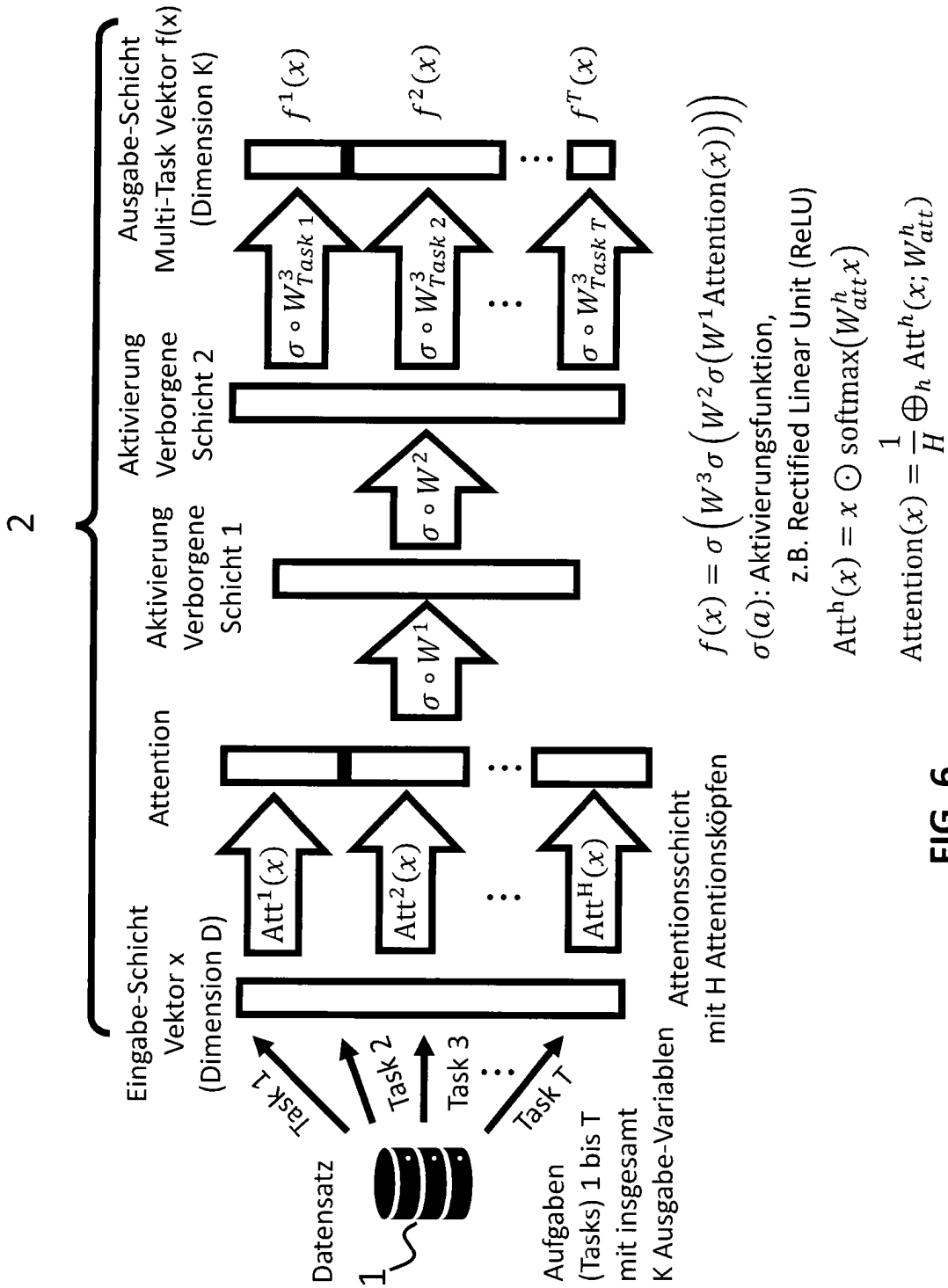


FIG. 6

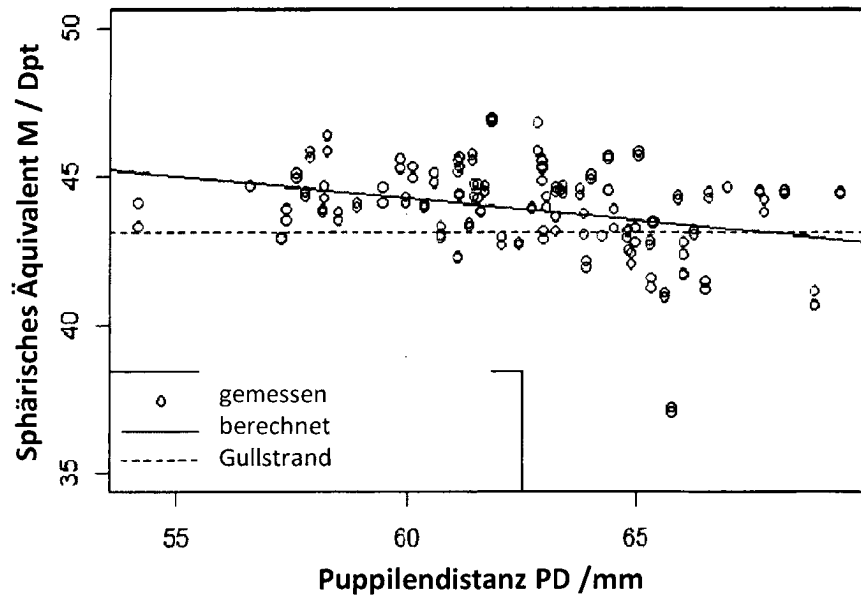


FIG. 7A

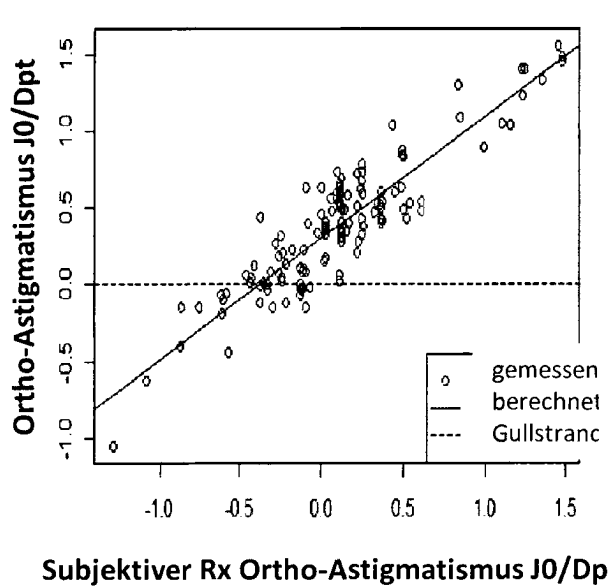


FIG. 7B

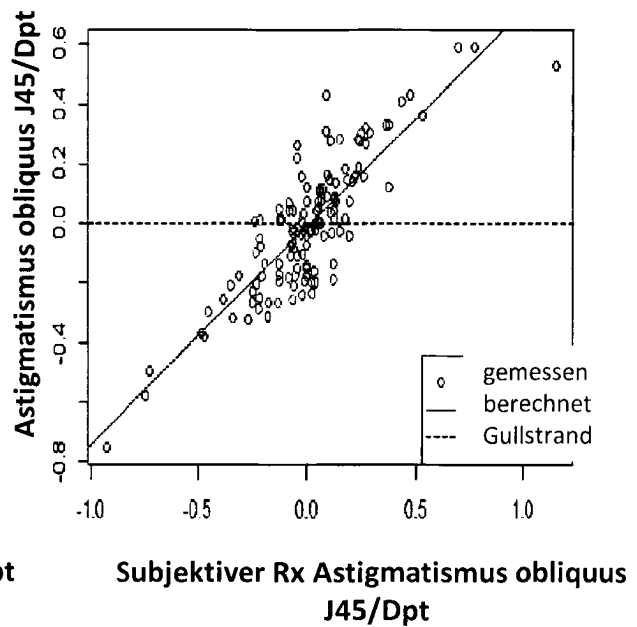


FIG. 7C

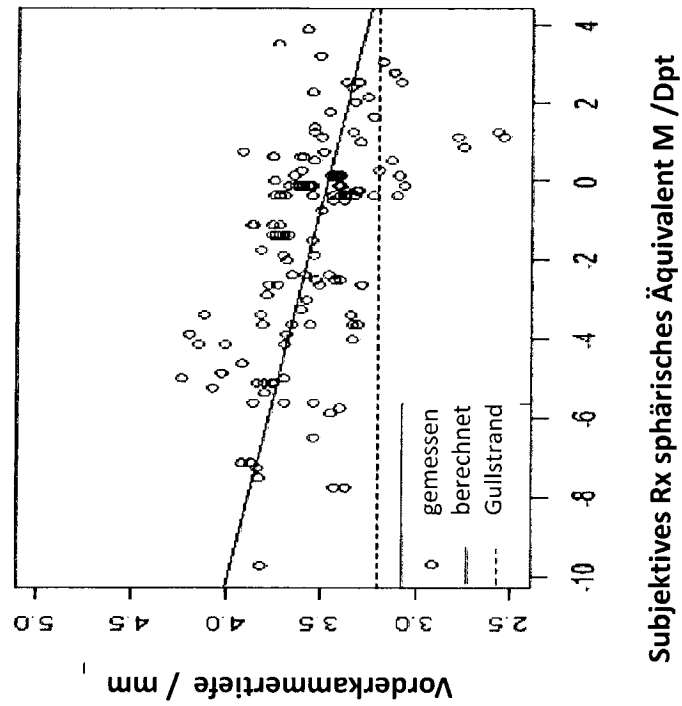


FIG. 8B

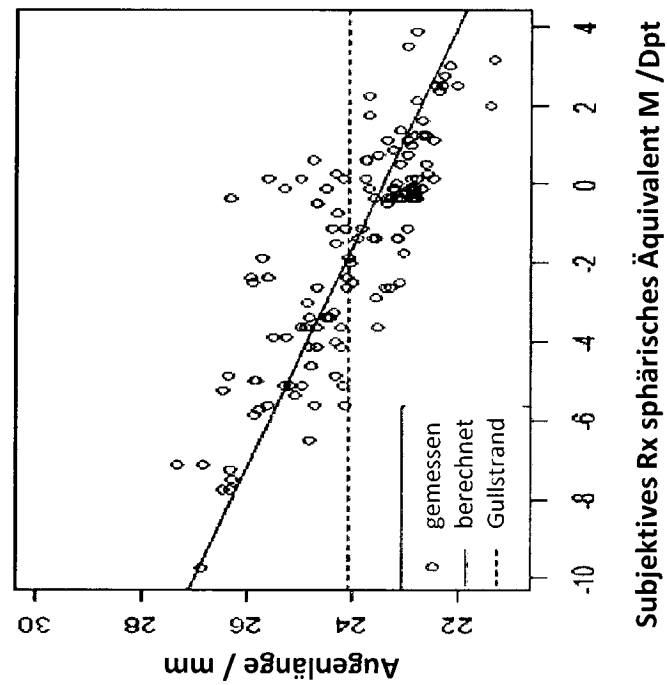


FIG. 8A

Parameter	Gullstrand-Augenmodell	Vorher-gesagte Werte	Tatsächliche Werte
		Beispiel	Gemessen
Augenlänge/ mm	24,09	24,8	25, 3
Vorderkamertiefe / mm	3,2	3,7	4,2
Sphärisches Äquivalent der Hornhaut / Dpt	43,08	44,0	44,7
Astigmatismus (ortho) der Hornhaut / Dpt	0	1,0	1,1
Astigmatismus (obliquus) der Hornhaut / Dpt	0	-0,17	-0,08
Pupillendurchmesser / mm	Nicht bekannt, daher auf „0“ gesetzt	5,4	6,1
Sphärische Aberration des Auges / μm (bei einem Pupillendurchmesser von 3 mm)	Nicht bekannt, daher auf „0“ gesetzt	-0,0025	-0,0056

FIG. 9

Parameter	Gullstrand-Augenmodell	Vorher-gesagte Werte	Tatsächliche Werte
		Beispiel	Gemessen
Augenlänge / mm	24,09	26,0	27,3
Vorderkammertiefe / mm	3,2	3,8	3,9
Sphärisches Äquivalent der Hornhaut / Dpt	43,08	43,5	42,7
Astigmatismus (ortho) der Hornhaut / Dpt	0	0,10	0,08
Astigmatismus (obliquus) der Hornhaut / Dpt	0	0,19	0,27
Pupillendurchmesser / mm	Nicht bekannt, daher auf „0“ gesetzt	3,7	2,5
Sphärische Aberration des Auges / μm (bei einem Pupillendurchmesser von 3 mm)	Nicht bekannt, daher auf „0“ gesetzt	0,0074	0,0136

FIG. 10

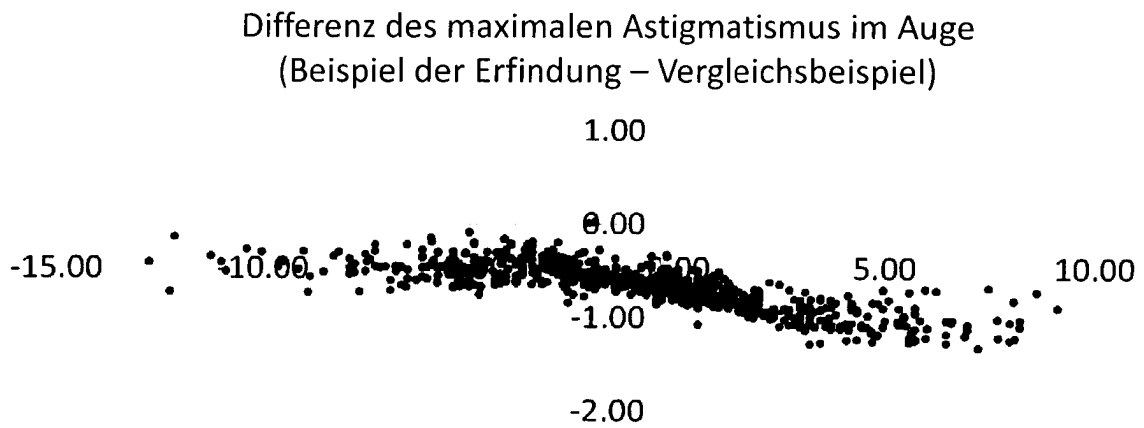


FIG. 11

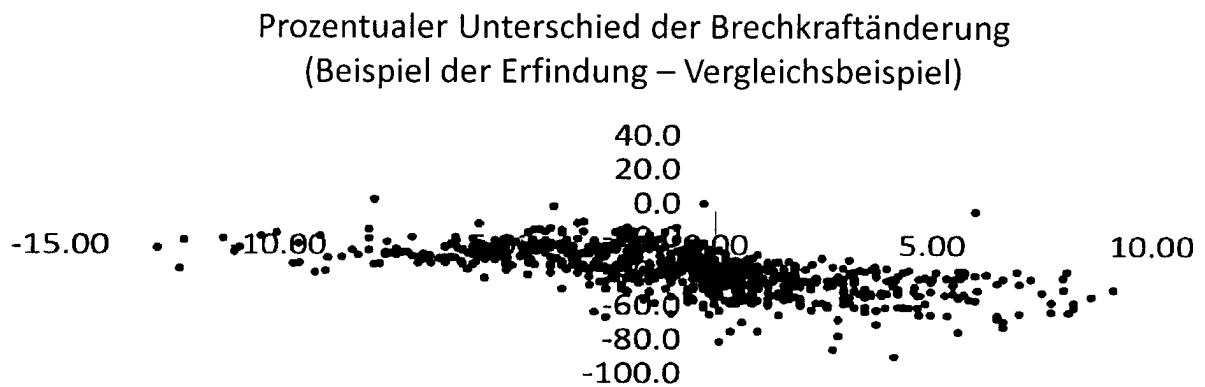


FIG. 12

Sph 0,0 D, Add 2,0 D

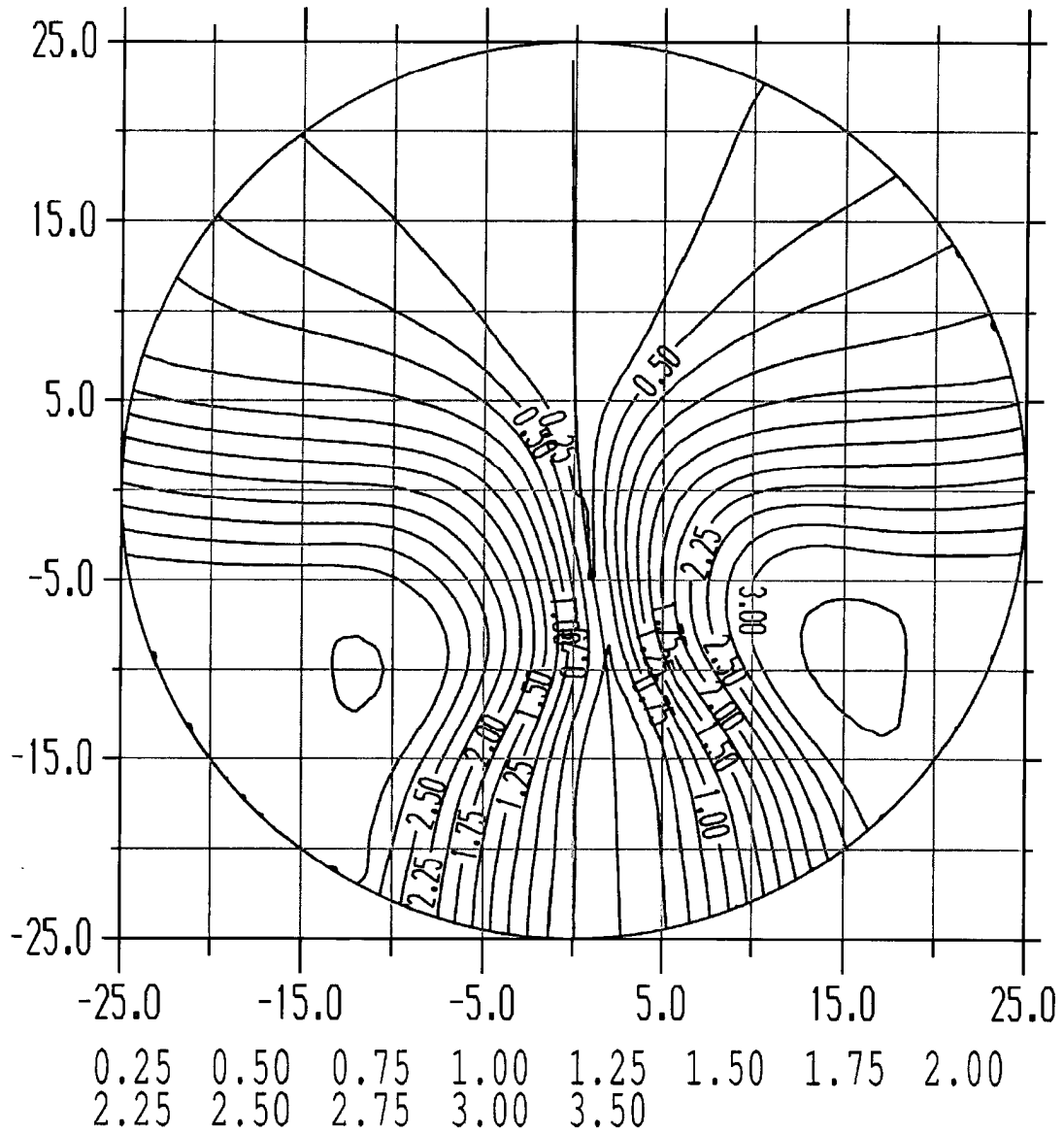


FIG. 13

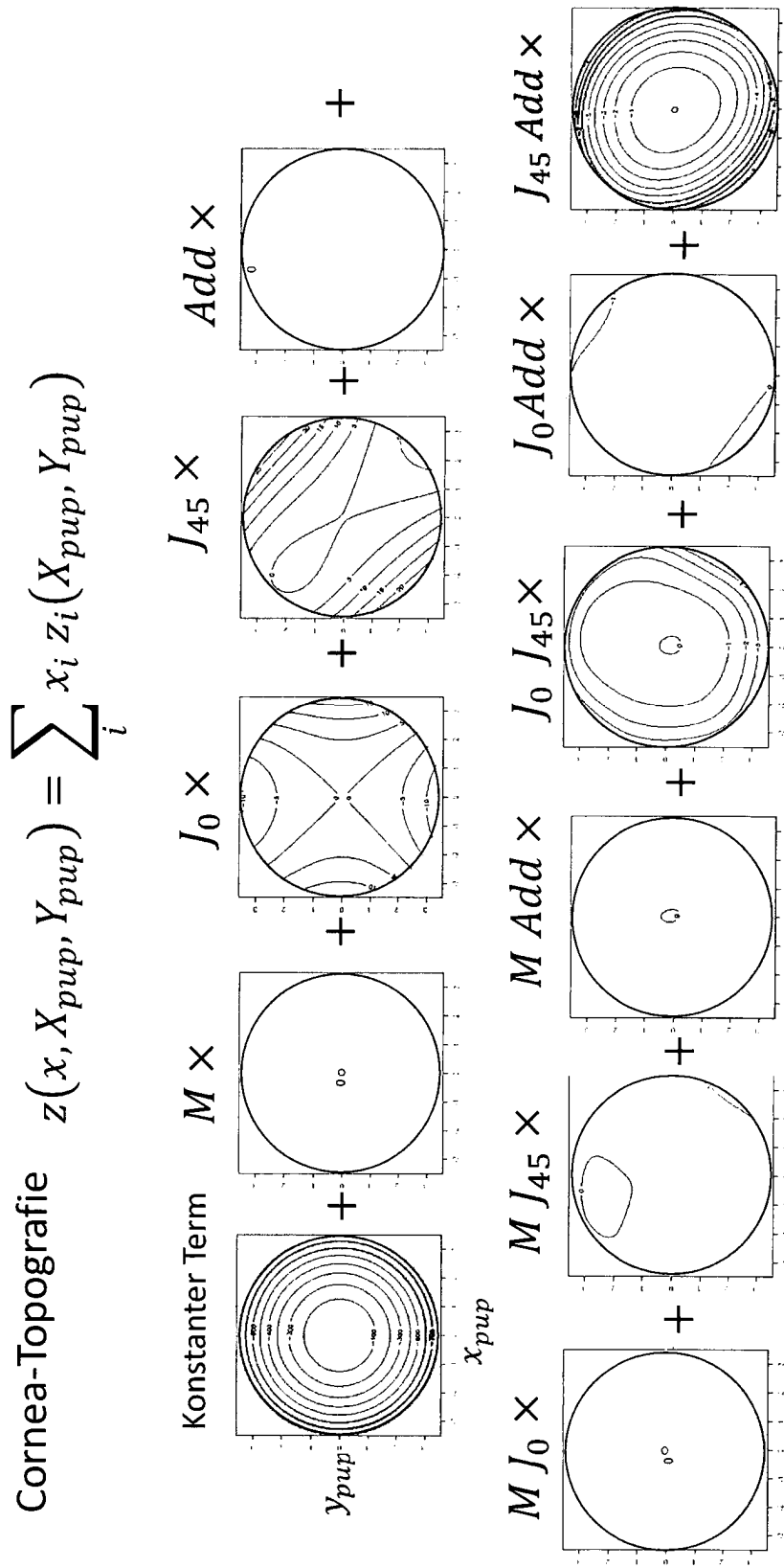


FIG. 14

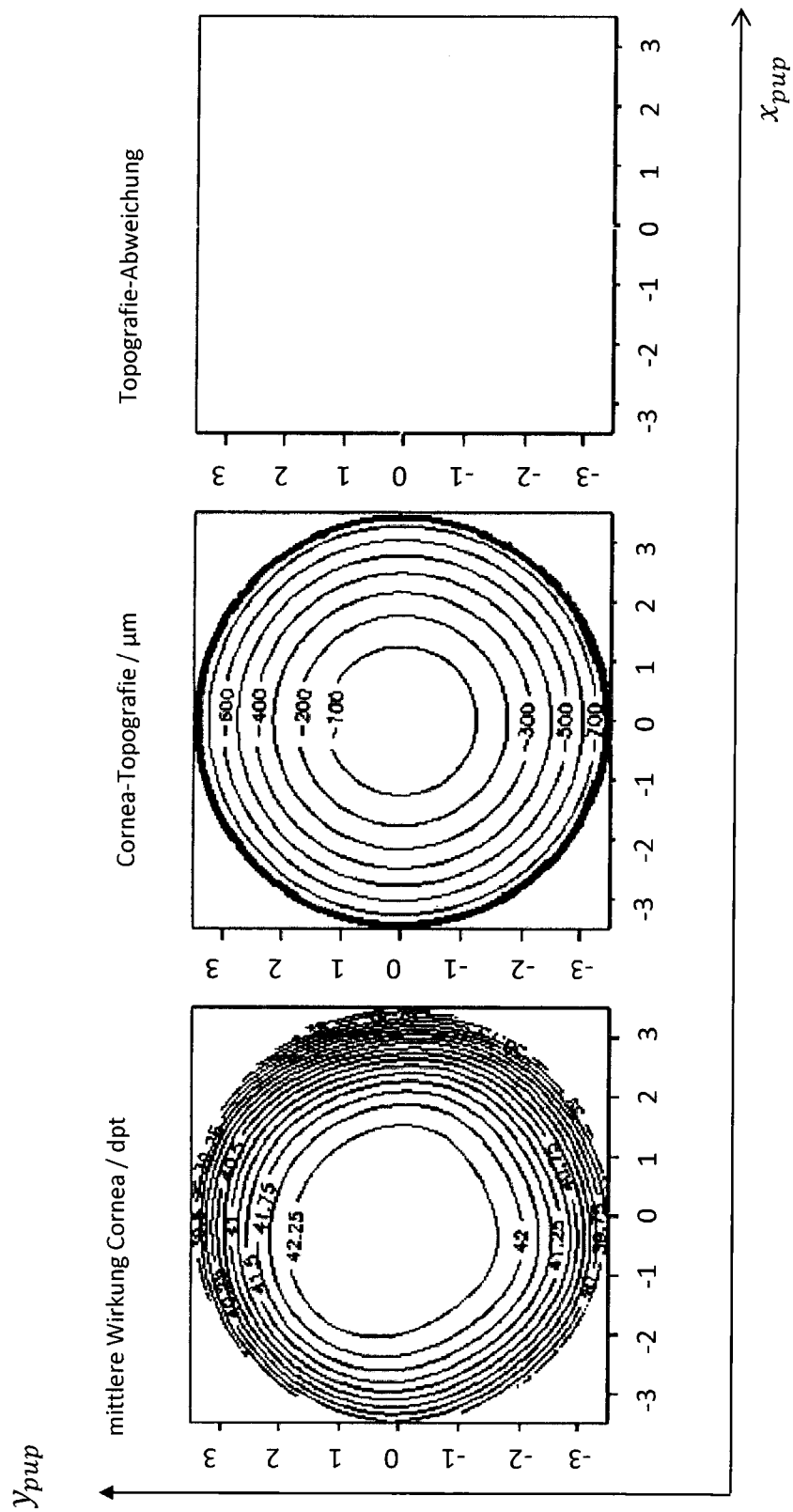


FIG. 15A

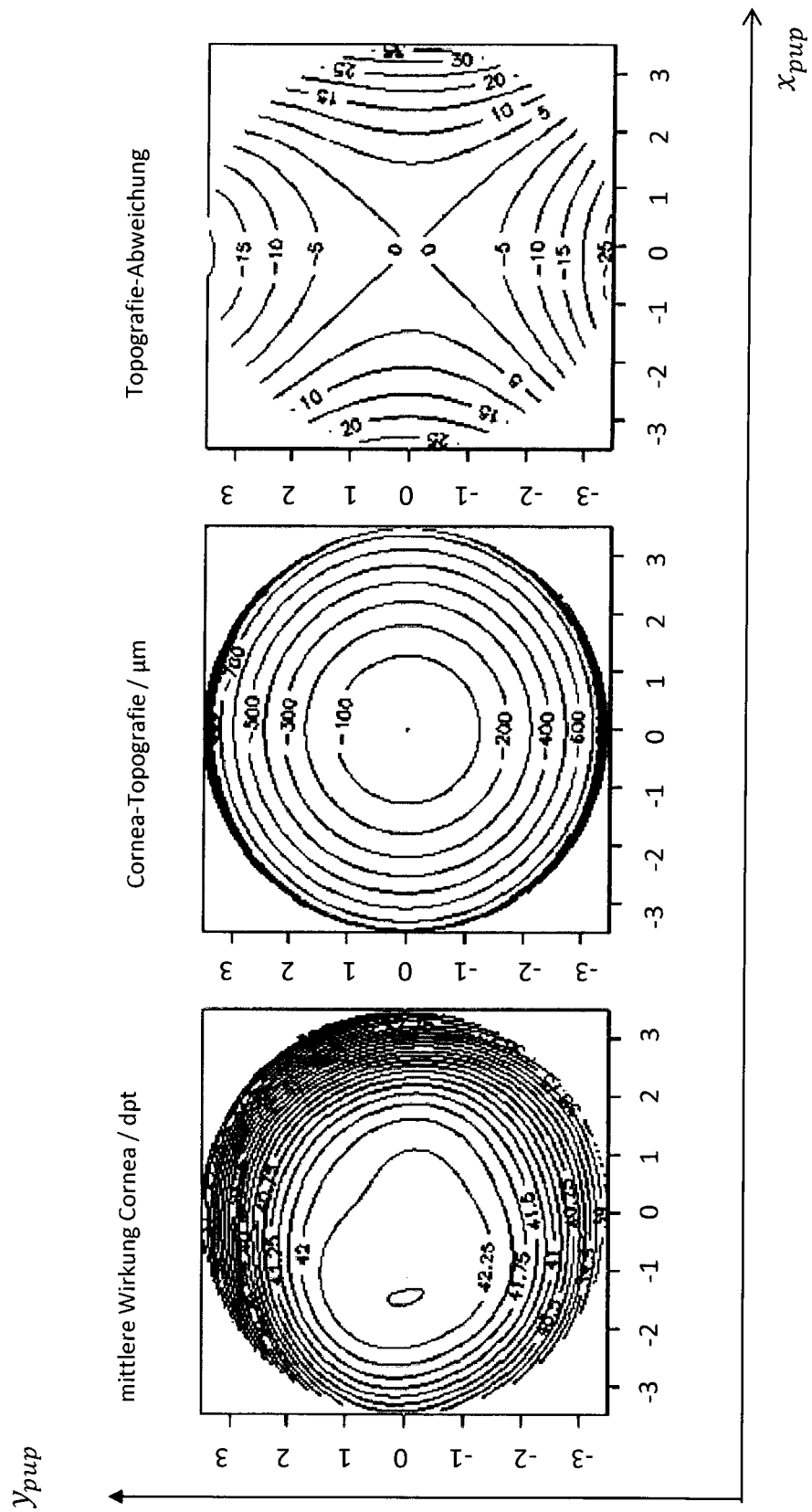


FIG. 15B

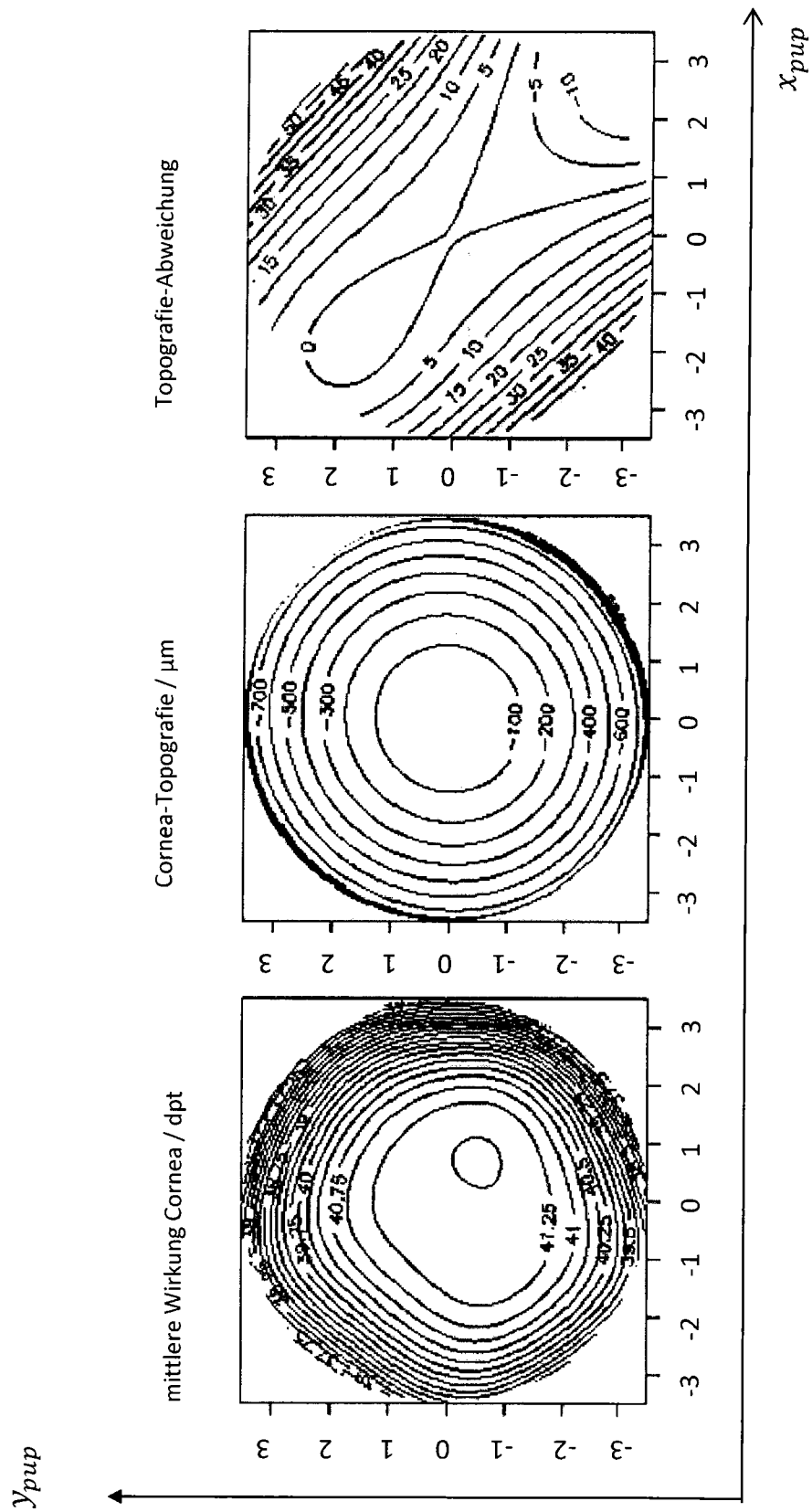
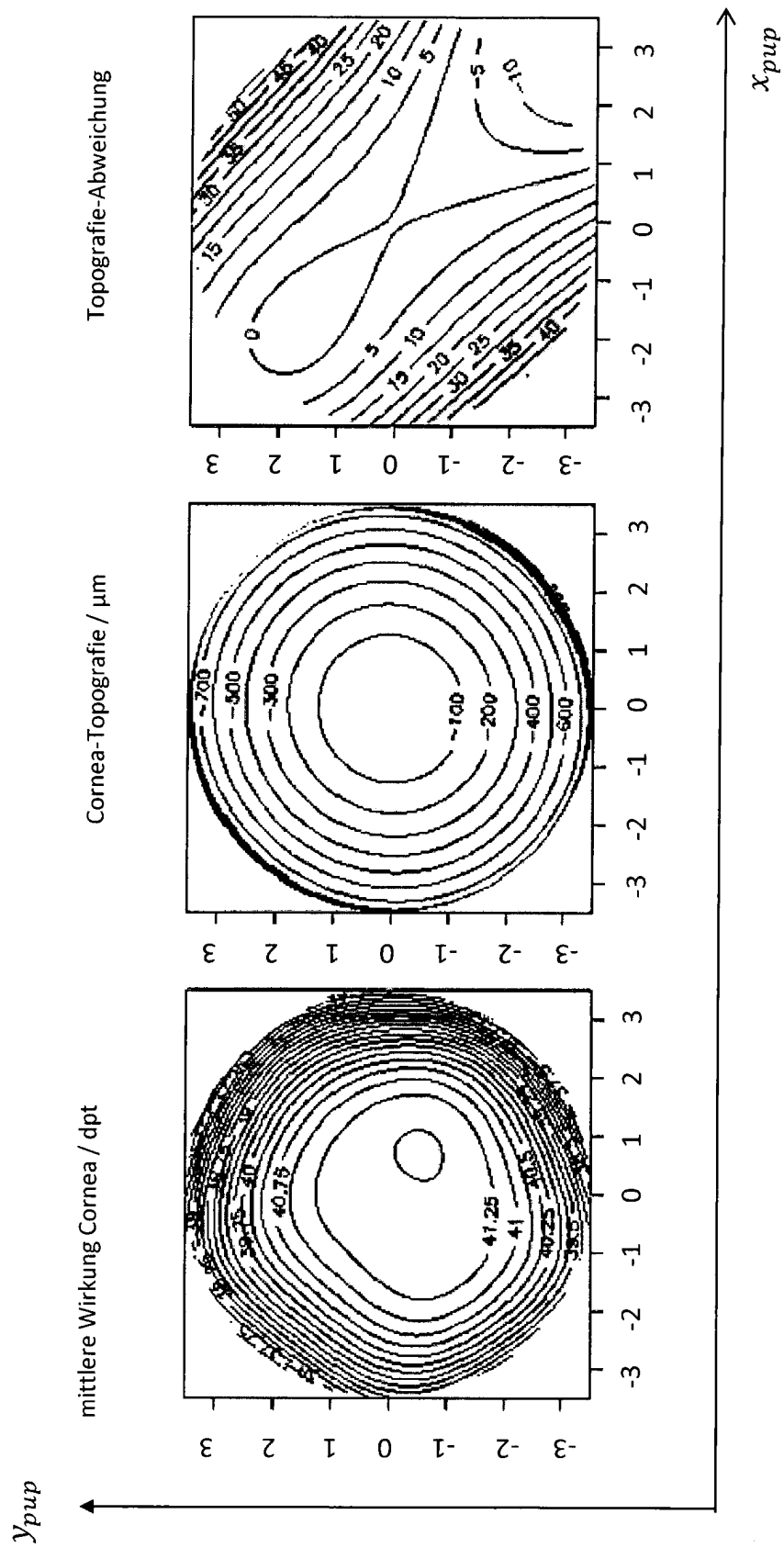


FIG. 15C



Vorhersage auf Basis des
sphärischen Äquivalents M und
der Pupillendistanz
2 Eingangsparameter

Vorhersage auf Basis des
sphärischen Äquivalents M
1 Eingangsparameter

Gullstrand model
0 Eingangsparameter

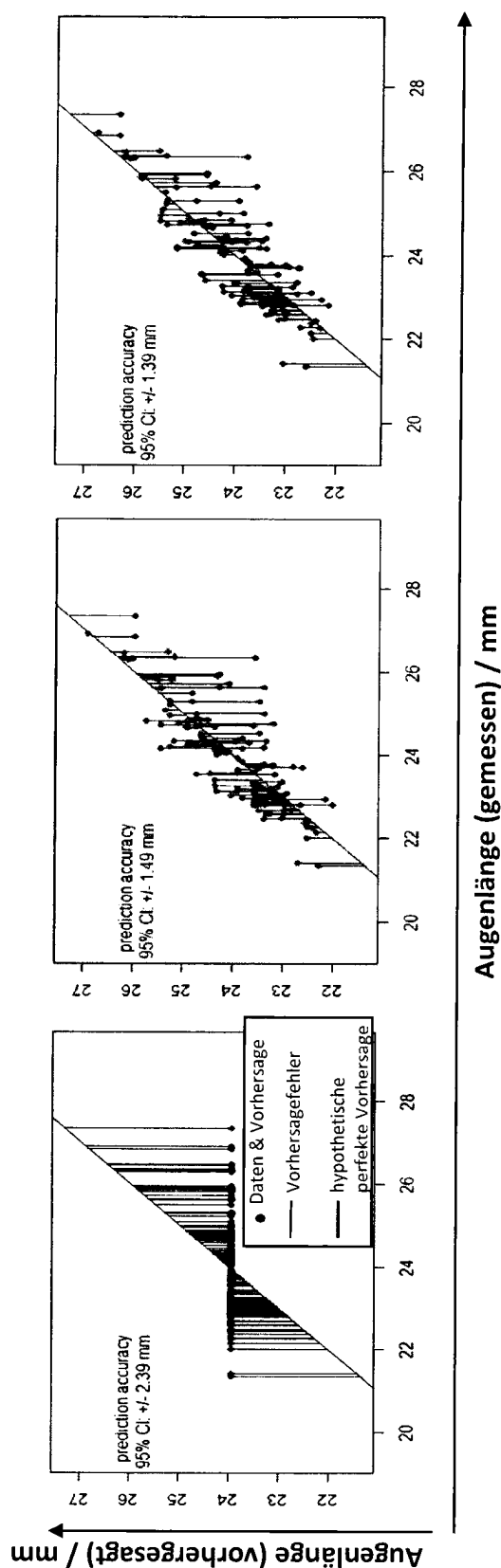


FIG. 16A

FIG. 16B

FIG. 16C