



(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2022 125 421.6**
(22) Anmeldetag: **30.09.2022**
(43) Offenlegungstag: **04.04.2024**

(51) Int Cl.: **A61B 34/10** (2016.01)
A61F 9/007 (2006.01)
A61F 2/16 (2006.01)
A61B 3/10 (2006.01)
G06N 20/00 (2019.01)
G06N 3/02 (2006.01)

(71) Anmelder:
Carl Zeiss Meditec AG, 07745 Jena, DE

(74) Vertreter:
**LifeTech IP Spies & Behrndt Patentanwälte PartG
mbB, 80687 München, DE**

(72) Erfinder:
**Burwinkel, Hendrik, 80339 München, DE; Trost,
Michael, 07646 Stadtroda, DE; Bensaid, Nicolas,
10719 Berlin, DE; Saur, Stefan, 73431 Aalen, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

US	2017 / 0 027 437	A1
US	2020 / 0 015 894	A1

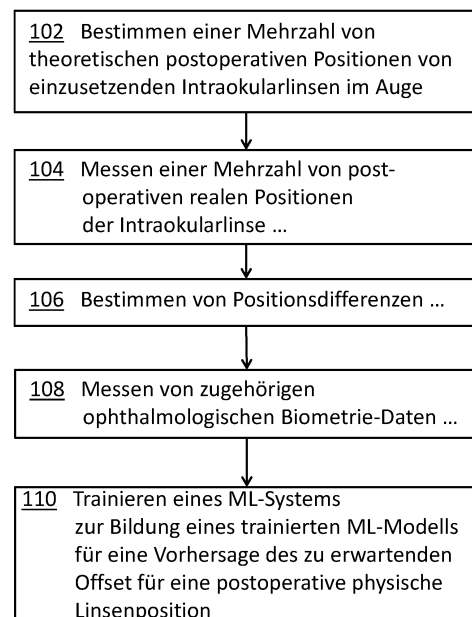
Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **PHYSISCHE IOL-POSITIONSBESTIMMUNG AUF BASIS UNTERSCHIEDLICHER
INTRAOKULARLINSENTYPEN**

(57) Zusammenfassung: Es wird ein Computer-implementiertes Verfahren zum Trainieren eines maschinellen Lernsystems für ein Bestimmen eines zu erwartenden Offsets für eine postoperative physische Linse beschrieben. Das Verfahren weist ein Bestimmen einer Mehrzahl von theoretischen Positionen von verschiedenen einzusetzenden Intraokularlinsen im Auge auf, wobei das Bestimmen für die Mehrzahl der theoretischen postoperativen Positionen eine jeweilige Nutzung einer Relation und einer jeweiligen linsenspezifischen Konstante aufweist. Das Verfahren weist weiterhin auf: Messen einer Mehrzahl von postoperativen Positionen der Intraokularlinse, wobei die postoperativen realen Positionen jeweiligen zugehörigen theoretischen postoperativen Positionen zugeordnet werden, Bestimmen von Positionsdifferenzen zwischen jeweils einander zugehörigen theoretischen postoperativen Positionen und realen postoperativen Positionen, Messen von zugehörigen ophthalmologischen Biometrie-Daten für jedes Tupel, und Trainieren eines maschinellen Lernsystems zur Bildung eines trainierten maschinellen Lernmodells für eine Vorhersage des zu erwartenden Offsets für eine postoperative physische Linse für eine einzusetzende Intraokularlinse eines bestimmten Typs.

100



Beschreibung

Gebiet der Erfindung

[0001] Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zum Trainieren eines maschinellen Lernsystems und ein Verfahren für ein Bestimmen eines zu erwartenden Offsets für eine postoperative physische Linsenposition einer einzusetzenden Intraokularlinse. Die Erfindung bezieht sich ferner auf ein Trainingssystem zum Trainieren eines maschinellen Lernsystems und ein Vorhersagesystem für ein Bestimmen einer postoperativen realen Position einer Intraokularlinse unter Nutzung des maschinellen Lernsystems sowie ein Computerprogrammprodukt.

Technischer Hintergrund

[0002] Der Einsatz von künstlicher Intelligenz (KI bzw. AI = Artificial Intelligence) beflügelt dieser Tage immer mehr wissenschaftliche Gebiete. KI und Systeme des maschinellen Lernens (ML), bei denen Vorhersagemodelle (prediction models) zum Einsatz kommen haben auch Einzug in den Alltag von Medizinern, zum Beispiel bei Kataraktoperationen, gehalten. Bei diesen Operationen werden die natürlichen Linsen von Augen durch künstliche Linsen - sogenannte Intraokularlinsen - ersetzt. Für den Chirurgen ist eine Bestimmung einer Brechkraft der einzusetzenden Intraokularlinse vor Operationen von großer Bedeutung, da eine falsch ausgewählte Intraokularlinse nicht nachträglich justiert werden kann. Für eine Bestimmung einer postoperativen Lage der eingesetzten Intraokularlinse, und folglich auch der resultierenden Brechkraft, werden bereits erfolgreich maschinelle Lernsysteme eingesetzt. Damit diese Lernsysteme möglichst zuverlässige Vorhersagen machen können, ist es erforderlich, dass sie mit einer ausreichenden Anzahl von Trainingsdaten trainiert werden, so dass ein maschinelles Lernmodell entsteht, welches zuverlässige Vorhersagen ermöglicht.

[0003] Auf der anderen Seite existiert aber eine Vielzahl von unterschiedlichen Typen von Intraokularlinsen. Selbst wenn die nominale Brechkraft von zwei Typen von Intraokularlinsen identisch ist, kann die effektive postoperative Brechkraft, die die eingesetzte Intraokularlinse im Patientenaug entfaltet, unterschiedlich sein. Dies kann unter anderem daran liegen, dass die eingesetzte Intraokularlinse je nach Typ in einer anderen Ebene des Patientenauges einwächst.

[0004] Dieser Umstand führt dazu, dass Daten, die von Kataraktoperationen gesammelt werden, Daten von unterschiedlichen Intraokularlinsentypen in unterschiedlichen Mengen aufweisen. Natürlich kommt es auch immer wieder vor, dass für bestimmte Linsentypen und Brechkraften nur eine geringe

Anzahl von Trainingsdaten vorhanden ist. Da diese absolut notwendige Menge an Trainingsdaten unter Umständen zu klein sein kann - bzw. eine kritische Menge unterschreitet - um ein effektives Lernmodell zu trainieren, kann es vorkommen, dass ein Chirurg in solchen Fällen nicht oder nur unzuverlässig auf die Hilfe von maschinellen Lernsystemen zurückgreifen kann.

[0005] Angesichts dieser Situation besteht in der Kataraktchirurgie deshalb der Wunsch, auch dann auf die Unterstützung von maschinellen Lernsystemen zurückzugreifen, wenn nur eine geringe Anzahl an Trainingsdaten verfügbar ist, um so einen möglichst großen Erfolg bei Operationen zu erzielen. Ideal wäre es, wenn man Trainingsdaten zur Entwicklung des maschinellen Lernmodells nutzen könnte die von unterschiedlichen Typen von Intraokularlinsen stammen. Allerdings verkomplizieren die unterschiedlichen Eigenschaften der unterschiedlichen Intraokularlinsentypen den Lernvorgang des maschinellen Lernsystems durch eine Domänenbedingte Verschiebung der unterschiedlichen Linsentypen, was zu einer schlechteren Vorhersagequalität des trainierten maschinellen Lernsystems führen kann, wenn dieses Problem nicht entsprechend adressiert wird.

[0006] Somit besteht ein Bedarf dafür, auch dann maschinelle Lernsysteme mit hoher Leistungsfähigkeit trainieren zu können, wenn für einzelne Linsentypen nur eine geringe Anzahl an Trainingsdaten vorhanden ist.

ÜBERSICHT ÜBER DIE ERFINDUNG

[0007] Diese Aufgabe wird durch die hier vorgeschlagenen Verfahren, die entsprechenden Systeme und jeweils zugehörigen Computerprogrammprodukte entsprechend den unabhängigen Ansprüchen gelöst. Weitere Ausgestaltungen werden durch die jeweils abhängigen Ansprüche beschrieben.

[0008] Entsprechend einem Aspekt der vorliegenden Erfindung wird ein Computer-implementiertes Verfahren zum Trainieren eines maschinellen Lernsystems für ein Bestimmen eines zu erwartenden Offsets für eine postoperative physische Linsenposition einer einzusetzenden Intraokularlinse vorgestellt. Das Verfahren weist dabei ein Bestimmen einer Mehrzahl von theoretischen postoperativen Positionen von einzusetzenden Intraokularlinsen im Auge auf, wobei die einzusetzenden Intraokularlinsen zu verschiedenen Typen von Intraokularlinsen gehören, und wobei das Bestimmen für die Mehrzahl der theoretischen postoperativen Positionen eine jeweilige Nutzung einer Relation und einer jeweiligen linsenspezifischen Konstante aufweist.

[0009] Weiterhin kann das Verfahren ein Messen einer Mehrzahl von postoperativen, realen - d.h. nach einer Operation - Positionen der Intraokularlinse aufweisen, wobei die postoperativen realen Positionen jeweiligen zugehörigen theoretischen postoperativen Positionen zugeordnet werden und jeweils ein Tupel bilden.

[0010] Zusätzlich kann das Verfahren ein Bestimmen von Positionsdifferenzen zwischen jeweils einander zugehörigen theoretischen postoperativen Positionen und realen postoperativen Positionen, und ein Messen von zugehörigen ophthalmologischen Biometriedaten für jedes Tupel aufweisen.

[0011] Schließlich kann das Verfahren noch ein Trainieren eines maschinellen Lernsystems zur Bildung eines trainierten maschinellen Lernmodells für eine Vorhersage des zu erwartenden Offsets für eine postoperative physische Linsenposition für eine einzusetzende Intraokularlinse eines bestimmten Typs aufweisen, wobei die ophthalmologischen Patientendaten für jedes Tupel und zugehörige Positionsdifferenzen als Eingangsdaten für das Training des maschinellen Lernsystems genutzt werden.

[0012] Gemäß einem zweiten Aspekt der vorliegenden Erfindung wird ein Verfahren zum Bestimmen einer postoperativen realen Position einer Intraokularlinse unter Nutzung des maschinellen Lernsystems vorgestellt, welches mittels des vorgenannten Verfahrens nach trainiert wurde. Dabei weist das Verfahren auf: einen Nutzen der Relation zur Bestimmung der theoretischen postoperativen Linsenposition der einzusetzenden Intraokularlinse, ein Bestimmen von ophthalmologischen Biometriedaten aus einer Messung am Patientenauge, ein Bestimmen des zu erwartenden Offsets für die postoperative physische Linsenposition für eine einzusetzende Intraokularlinse mittels des trainierten maschinellen Lernsystems, wobei die bestimmten ophthalmologischen Biometriedaten als Eingangsdaten genutzt werden, und ein Bestimmen einer korrigierten postoperativen Linsenposition durch Addition der theoretischen postoperativen Linsenposition der einzusetzenden Intraokularlinse und des bestimmten zu erwartenden Offsets für die postoperative physische Linsenposition.

[0013] Gemäß einem dritten Aspekt der vorliegenden Erfindung wird ein Verfahren zum Bestimmen eines postoperativen refraktiven Ergebnisses vorgestellt, welches ein Bestimmen der postoperativen realen Position einer Intraokularlinse unter Verwendung des vorstehend beschriebenen Verfahrens aufweist.

[0014] Dieses Verfahren weist zusätzlich ein Bestimmen des erwarteten postoperativen refraktiven Ergebnisses einer Kataraktchirurgie mittels

eines trainierten maschinellen Lernsystems auf, wobei ein realer Brechkraftwert der einzusetzenden Intraokularlinse und die bestimmte postoperative reale Position einer Intraokularlinse als Eingangsdaten genutzt werden, und wobei das maschinelle Lernsystem mit Tupeln von postoperativen Linsenpositionswerten, realen Brechkraftwerten entsprechender Intraokularlinsen und zugehörigen postoperativen refraktiven Ergebnissen als Ground-Truth-Daten trainiert wurde, um ein entsprechendes Lernmodell zur Vorhersage des postoperativen refraktiven Ergebnisses der einzusetzenden Intraokularlinse auszubilden.

[0015] Gemäß einem vierten Aspekt der vorliegenden Erfindung wird ein Trainingssystem zum Trainieren eines maschinellen Lernsystems für ein Bestimmen eines zu erwartenden Offsets für eine postoperative physische Linsenposition einer einzusetzenden Intraokularlinse vorgestellt. Dieses Trainingssystem weist einen Prozessor und einen mit dem Prozessor operativ verbundenen Speicher auf, der Programmcode-Elemente speichert, die, wenn sie ausgeführt werden, für ein Zusammenwirken der folgenden Einheiten aktiv sind:

[0016] Ein Bestimmungsmodul zum Bestimmen einer Mehrzahl von theoretischen postoperativen Positionen von einzusetzenden Intraokularlinsen im Auge, wobei die einzusetzenden Intraokularlinsen zu verschiedenen Typen von Intraokularlinsen gehören, wobei das Bestimmen für die Mehrzahl der theoretischen postoperativen Positionen eine jeweilige Nutzung einer Relation und einer jeweiligen linsenspezifischen Konstante aufweist; ein erstes Messsystem zum Messen einer Mehrzahl von postoperativen realen Positionen der Intraokularlinse, wobei die postoperativen realen Positionen jeweiligen zugehörigen theoretischen postoperativen Positionen zugeordnet werden und jeweils ein Tupel bilden; eine Bestimmungseinheit zum Bestimmen von Positionsdifferenzen zwischen jeweils einander zugehörigen theoretischen postoperativen Positionen und realen postoperativen Positionen, ein zweites Messsystem zum Messen von zugehörigen ophthalmologischen Biometriedaten für jedes Tupel; und eine Trainingssteuerungseinheit zum Trainieren eines maschinellen Lernsystems zur Bildung eines trainierten maschinellen Lernmodells für eine Vorhersage des zu erwartenden Offsets für eine postoperative physische Linsenposition für eine einzusetzende Intraokularlinse eines bestimmten Typs, wobei die ophthalmologischen Patientendaten für jedes Tupel und zugehörige Positionsdifferenzen als Eingangsdaten für das Training des maschinellen Lernsystems genutzt werden.

[0017] Gemäß einem fünften Aspekt der vorliegenden Erfindung wird ein Vorhersagesystem für ein Bestimmen einer postoperativen realen Position

einer Intraokularlinse unter Nutzung des maschinellen Lernsystems, welches mittels des gerade vorher beschriebenen Trainingssystems trainiert wurde, vorgestellt.

[0018] Dabei weist das Vorhersagesystem einen Prozessor und einem mit dem Prozessor operativ verbundenen Speicher auf, der Programmcode-Elemente speichert, die, wenn sie ausgeführt werden, für ein Zusammenwirken der folgenden Einheiten aktiv sind:

eine Relationsbestimmungseinheit zum Nutzen der Relation zur Bestimmung der theoretischen postoperativen Linsenposition der einzusetzenden Intraokularlinse;

eine Augendaten-Bestimmungseinheit zum Bestimmen von ophthalmologischen Biometriedaten aus einer Messung am Patientenauge;

eine Offset-Bestimmungseinheit zum Bestimmen des zu erwartenden Offsets für die postoperative physische Linsenposition für eine einzusetzende Intraokularlinse mittels des trainierten maschinellen Lernsystems, wobei die bestimmten ophthalmologischen Biometriedaten als Eingangsdaten genutzt werden, und

eine Linsenpositionseinheit zum Bestimmen einer korrigierten postoperativen Linsenposition durch Addition der theoretischen postoperativen Linsenposition der einzusetzenden Intraokularlinse und des bestimmten zu erwartenden Offsets für die postoperative physische Linsenposition.

[0019] Das vorgeschlagene Computer-implementierte Verfahren zum Trainieren eines maschinellen Lernsystems für ein Bestimmen eines zu erwartenden Offsets für eine postoperative physische Linsenposition einer einzusetzenden Intraokularlinse sowie die weiteren Verfahren weisen mehrere Vorteile und technische Effekte auf, die auch entsprechend für die jeweils zugehörigen Systeme gelten:

[0020] Die vorgeschlagenen Verfahren und Systeme adressieren u.a. in vorteilhafter Weise, ein maschinelles Lernsystem so zu trainieren, dass ein hoch performantes maschinelles Lernmodell zur Vorhersage einer postoperativen Position einer Intraokularlinse im Auge eines Patienten entsteht, wenn für einzelne Typen von Intraokularlinsen nur eine vergleichsweise geringe Menge an Trainingsdaten zur Verfügung steht. Andersherum heisst das, dass als Trainingsdaten solche Daten verwendet werden können, die aus einer Mischung von Angaben zu unterschiedlichen Typen von Intraokularlinsen bestehen.

[0021] Dies ist auch deshalb vorteilhaft, weil eine zuverlässige Vorhersage der postoperativen Position einer Intraokularlinse abhängig vom Typ der Intrao-

kularlinse mittels eines maschinellen Lernsystems erfolgen kann. D.h., dass es nicht erforderlich ist, für jeden Typ von Intraokularlinse ein eigenes maschinelles Lernsystem zu trainieren und zu betreiben. D.h. auch, dass sich ein Offset zwischen unterschiedlichen Typen von Intraokularlinsen in Bezug auf deren postoperative Position im Auge zuverlässig mittels des trainierten maschinellen Lernsystems vorhersagen lässt. Auf dieser Basis ist auch eine zuverlässige Vorhersage in Bezug auf die reale postoperative vom Patienten wahrgenommene Brechkraft möglich. Dies gilt auch dann, wenn ursprünglich für das Training des maschinellen Lernsystems zur Entwicklung des zugrunde liegenden Lernmodells nur eine geringe Anzahl an Trainingsdaten verfügbar war.

[0022] Dazu wird auf eine theoretische Linsenpositionsberechnung und einen bekannten Wert für einen bestimmten Linsentyp oder eine bestimmte Linse zurückgegriffen. Auf diese Weise wird erreicht, dass der kritische Abstand der Linse zur Cornea in die Vorhersage der postoperativen Brechkraft einbezogen werden kann, da dieser Abstand die reale postoperative Brechkraft beeinflusst.

[0023] Bisherige Ansätze einer theoretischen effektiven Positionierung der Intraokularlinse innerhalb eines individuellen Modellierungskonzeptes - und insbesondere Unterschiede zwischen unterschiedlichen Intraokularlinsentypen - konnten dieses Problem bisher nicht erfolgreich adressieren.

[0024] Wir definieren Parameter Para_IOL, die linsenspezifische Informationen enthalten, und Parameter Para_Patient, die patientenspezifische Informationen enthalten (typischerweise Biometriedaten). Obwohl der einfachste Ansatz wäre, die Parameter Para_IOL und Para_Patient in den Trainingsprozess zu integrieren, wäre dies kein gangbarer Weg, der sicher zum angestrebten Ziel führt. Dies liegt daran, dass besonders die Parameter Para_IOL typischerweise durch Konstanten, wie zum Beispiel die bekannte A-Konstante für die bekannte SRK/T-Formel bestimmt sind. Dies führt dazu, dass während des Trainings des maschinellen Lernsystems das System nur isolierte Datenpunkte für unterschiedliche, isolierte Typen von Intraokularlinsen lernen würde. Selbst eine kleine Modifikation in der entsprechenden Konstante würde zu einem komplett unerwarteten Verhalten des maschinellen Lernsystems führen, weil das maschinelle Lernsystem während des Trainings vergleichbare Eingangsdaten nicht „gesehen“ hätte.

[0025] Deshalb wird hier ein anderer Ansatz gewählt, der auf einer Relation $ELP = R(Para_IOL)$ beruht. Dabei bedeutet ELP: effektive postoperative Linsenposition; R: Relation; Para_IOL: die in der Relation verwendeten linsenspezifischen Parameter

für den Typ der Intraokularlinse, z.B. die A-Konstante.

[0026] Nun kann man unterschiedliche Dateneingaben für zwei unterschiedliche Typen von Intraokularlinsen Para_IOL1 und Para_IOL2 betrachten. Es ergibt sich, dass der Unterschied zwischen effektiven IOL-Positionen sich als $\Delta ELP = R(\text{Para_IOL1}) - R(\text{Para_IOL2})$ darstellen lässt.

[0027] Obwohl die effektive Linsenposition (ELP) und die physikalische Linsenposition (PLP) nicht direkt voneinander abhängen, definieren sie trotzdem jeweils eine optische Ebene innerhalb des Systems des Auges. Daraus folgt, dass die Verschiebung der effektiven Linsenposition und der physikalischen Linsenposition und die damit verbundene Verschiebung der optischen Ebenen in erster Näherung einander entsprechen, sodass man schließen kann, dass näherungsweise $\Delta ELP = \Delta PLP$.

[0028] Daraus ergibt sich unmittelbar: $\Delta PLP = R(\text{Para_IOL1}) - R(\text{Para_IOL2})$.

[0029] Damit lässt sich das Ziel einer Kompensation von jedweden Unterschieden zwischen unterschiedlichen Datendomänen, die zu unterschiedlichen Typen von Intraokularlinsen gehören - also IOL1 vs. IOL2 - erreichen.

[0030] Dies wiederum ermöglicht es dem Chirurgen das ML-basierende Berechnungsmodell für einen ersten Typ einer Intraokularlinse IOL1 mit Daten eines anderen Typs einer Intraokularlinse IOL2 zu optimieren. Aus diesem Grund kann vorteilhafter Weise der PLP-Wert in den Trainingsprozess für das maschinelle Lernmodell integriert werden. Basierend auf gemessenen postoperativen IOL-Positionen PLP für einen gegebenen Satz von Trainingsdaten wird ein PLP-Vorhersagesystem repräsentiert durch:

$$PLP = R(\text{Para_IOL}) - \text{Korrektursystem}(\text{Para_Patient}) \quad (1)$$

[0031] Das Korrektursystem übernimmt dabei die Rolle einer Korrektur einer Abweichung gegenüber der Relation R in Bezug auf eine aktuelle Linsenposition, was wiederum zum Beispiel durch ein ML Modell oder eine vergleichsweise einfache lineare Regression repräsentiert werden kann. Der präsentierte Ansatz trennt die linsenspezifischen und patientenspezifischen Parameter voneinander. Die Relation R liefert die theoretische Linsenposition gemäß Para_IOL, das Korrektursystem lernt den notwendigen Offset für die Vorhersage der tatsächlichen PLP abhängig von Para_Patient. Weil der Wert PLP somit eine gleichmäßig verteilte Variable ist, vermeidet man das Problem, dass bei dem maschinellen Lernsystem nur isolierte Datenpunkte

berücksichtigt werden. Außerdem folgt aus der oben angegebenen Gleichung (1), dass zwei Eigenschaften abgeleitet werden können, welche direkt dabei helfen, das Domain-Verschiebungsproblem (bedingt durch die unterschiedlichen Typen von Intraokularlinsen) zu adressieren:

[0032] Zum einen: Wenn für alle Typen von Intraokularlinsen, die in dem Trainingsdatensatz vorhanden sind, entsprechende IOL-Positionen PLP nach dem operativen Eingriff gesammelt werden, kann das PLP-Vorhersagesystem basierend auf der vorgehend beschriebenen Gleichung (1) arbeiten. Weil die Relation R, die systematischen Differenzen zwischen unterschiedlichen Typen von Intraokularlinsen in der PLP-IOL-Position eliminiert, kann das entsprechende maschinelle Lernsystem (Korrektursystem) korrekte und identische Korrelationen für alle Typen von Intraokularlinsen vorhersagen. Das resultierende PLP-Vorhersagen maschinelle Lernsystem kann folglich auch vorteilhafter Weise für alle Typen von Intraokularlinsen verwendet werden.

[0033] Basierend darauf, kann die so bestimmte PLP (postoperative physikalische Linsenposition) deshalb als ein Eingabewert für ein maschinelles Lernsystem benutzt werden, welches für eine Brechkraftbestimmung einer einzusetzenden Intraokularlinse genutzt wird. Das vorgestellte Korrektursystem kann jetzt also genutzt werden, um die postoperative physikalische Linsenposition PLP für neue Datenpunkte bereitzustellen sowie als Eingabewerte für die Vorhersage der Brechkraft der einzusetzenden Intraokularlinse.

[0034] Zum Zweiten: Wenn die postoperativen IOL-Positionen nur von einigen Typen von Intraokularlinsen innerhalb des Trainingsdatensatzes bekannt sind, kann trotzdem ein Vorhersagesystem für die oben genannte Gleichung (1) basierend auf den zur Verfügung stehenden PLP-Werten realisiert werden. Wegen der Relation R, kann ein Transfer zu anderen Typen von Intraokularlinsen gelingen, ohne dass das entsprechende maschinelle Lernsystem hierfür explizit trainiert wurde.

[0035] Im Ergebnis erlaubt die Nutzung von PLP innerhalb des maschinellen Lernmodells eine kontinuierliche und damit generell einsetzbare Möglichkeit für ein Training mit Trainingsdaten, die zu unterschiedlichen Typen von Intraokularlinsen gehören.

[0036] Hierdurch gelingt es auch, im medizinischen Alltag - beispielsweise bei Kataraktoperationen - folgende Anwendungsbereiche erfolgreich zu adressieren:

- (i) Sammeln von Daten für einen Typ von Intraokularlinse, für welche ein maschinelles Lernsystem für eine Vorhersage einer Brechkraft einer Intraokularlinse optimiert werden soll;

(ii) Zurverfügungstellen von zusätzlichen Daten basierend auf anderen Typen von Intraokularlinsen;

(iii) Trainieren einer Korrekturfunktion unter Nutzung aller verfügbaren Daten für alle Intraokularlinsen und Bereitstellen der entsprechenden Ground-Truth-Daten;

(iv) Nutzung der Korrekturfunktion innerhalb der Vorhersagen von PLP-Werten;

(v) Trainieren des maschinellen Lernmodells und der Nutzung der Vorhersage-/Korrekturfunktion und Sammeln von Daten, die zu unterschiedlichen Typen von Intraokularlinsen gehören (hierbei sollte der Fokus auf gewünschten Typen von Intraokularlinsen liegen und dadurch berücksichtigt werden, dass unterschiedliche Gewichtungen bei der Loss-Funktion während des ML-System-Trainings eingesetzt werden, eine Wiederholung des Trainings mit gewünschten Datenpunkten, ...);

(vi) Nutzung des resultierenden maschinellen Lernsystems zur Bestimmung einer IOL-Brechkraft eines bestimmten Typs einer Intraokularlinse für neue Patienten.

[0037] Insbesondere der letzte Punkt ist aus Sicht von Patienten von erheblicher Bedeutung. Denn nun kann die Arbeit von Chirurgen bei Kataraktoperationen deutlich verbessert werden und das Risiko, dass die eingesetzte Intraokularlinse in einer anderen Ebene des Auges einwächst als geplant, kann auch dann deutlich reduziert werden, wenn es nur wenige Datenpunkte für ein Training des genutzten ML-Systems gab, wie es für die spezielle Situation des aktuellen Patienten erforderlich gewesen wäre.

[0038] Die hier vorgeschlagenen Verfahren und Systeme adressieren also ein weites Spektrum an Vorteilen gegenüber bisherigem Vorgehen, insbesondere dann, wenn für das Training eines maschinellen Lernsystems für bestimmte Typen von Intraokularlinsen nur geringe Datenmengen zur Verfügung stehen. Ein konkretes Beispiel wird noch weiter unten angegeben.

[0039] Im Folgenden werden weitere Ausführungsbeispiele vorgestellt, die sowohl im Zusammenhang mit den vorgestellten Verfahren, wie auch mit den entsprechenden Systemen, Gültigkeit haben können.

[0040] Gemäß einem Ausführungsbeispiel des Computer-implementierten Verfahrens zum Trainieren eines maschinellen Lernsystems für ein Bestimmen eines zu erwartenden Offsets für eine postoperative physische Linsenposition einer einzusetzenden Intraokularlinse, kann die Relation auf einer SRK/T-Relation beruhen. Die SRK/T-R-

Relation und die zugehörige SRK/T-Formel wird schon lange in der Ophthalmologie genutzt und geht auf die Urheber Sanders, Retzlaff und Kraff zurück.

[0041] Gemäß einem anderen Ausführungsbeispiel des Computer-implementierten Verfahrens können die ophthalmologischen Biometriedaten Para_Patient mindestens einen Messwert eines Auges aufweisen, der aus der Gruppe ausgewählt ist, die aus einer aktuellen axialen Länge (AL), einer Vorderkammertiefe (ACD) und einer Linsendicke besteht. Typischerweise werden allerdings alle drei biometrischen Daten eines Auges gleichzeitig mit bekannten Messinstrumenten erfasst.

[0042] Gemäß weiteren Ausführungsbeispielen des Computer-implementierten Verfahrens kann das maschinelle Lernsystem ein lineares Regressionsmodell aufweisen. Dies ist deshalb vorteilhaft, um so sicherzustellen, dass auch diejenigen Bereiche erfasst werden, für die keine expliziten Trainingsdaten zur Verfügung stehen. Damit lassen sich auch diejenigen Bereiche sinnvoll vorhersagen, in denen es keine historischen Trainingsdaten für den gleichen Intraokularlinsentyp gibt, oder dort, wo der gewünschte Vorhersagebereich zwischen bekannten Intraokularlinsentypen liegt, d.h. also auch für neue Intraokularlinsentypen mit anderen A-Konstanten.

[0043] Gemäß spezifischen Ausführungsbeispielen des Computer-implementierten Verfahrens kann die Vorhersage des zu erwartenden Offsets für die postoperative physische Linsenposition für die einzusetzende Intraokularlinse des bestimmten Typs unabhängig von einer Brechkraft der einzusetzenden Intraokularlinse sein. Auch hierin ist ein klarer Vorteil zu sehen, da in die Berechnung der theoretischen Position der Intraokularlinse nach der Operation auf die Kenntnis der Brechkraft bei der Verwendung der Relation verzichtet werden kann

[0044] Gemäß einem vorteilhaften Ausführungsbeispiel des Computer-implementierten Verfahrens kann die linsenspezifische Konstante die A-Konstante sein. Diese Konstante ist für jeden Typ von Intraokularlinse gut bekannt und beschreibt im Wesentlichen die theoretische Position der IOL innerhalb der SRK/T Relation.

[0045] Es sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass sich praktisch alle Verfahren und Systeme durch entsprechende Versionen der vorgenannten Ausführungsbeispiele modifizieren lassen.

[0046] Darüber hinaus können sich praktisch alle Ausführungsformen auf Computerprogrammprodukte beziehen, auf welche von einem Computer-verwendbaren oder Computer-lesbaren Medium

zugriffen werden kann, die Programm-Code zur Nutzung durch, oder in Verbindung mit, einem Computer oder anderen Instruktionsverarbeitungssystemen aufweisen. Im Kontext dieser Beschreibung kann ein Computer-verwendbares oder Computerlesbares Medium jede Vorrichtung sein, die zur Speicherung, zum Kommunizieren, zur Weiterleitung oder zum Transport des Programm-Codes geeignet ist.

ÜBERSICHT ÜBER DIE FIGUREN

[0047] Es sei darauf hingewiesen, dass Ausführungsbeispiele der Erfindung mit Bezug auf unterschiedliche Implementierungskategorien beschrieben sein können. Insbesondere sind einige Ausführungsbeispiele in Bezug auf Verfahren beschrieben, während andere Ausführungsbeispiele im Kontext von entsprechenden Vorrichtungen beschrieben sein können. Unabhängig davon ist es einem Fachmann möglich, aus der hier vorstehenden und nachfolgenden Beschreibung - wenn nicht anderweitig darauf hingewiesen - mögliche Kombinationen der Merkmale des Verfahrens sowie mögliche Merkmalskombinationen mit dem entsprechenden System zu erkennen und zu kombinieren, auch, wenn sie zu unterschiedlichen Anspruchskategorien gehören.

[0048] Bereits oben beschriebene Aspekte sowie zusätzliche Aspekte der vorliegenden Erfindung ergeben sich unter anderem aus den beschriebenen Ausführungsbeispielen und aus den zusätzlichen weiteren, durch Bezug auf die Figuren beschriebenen, konkreten Ausgestaltungen.

[0049] Bevorzugte Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung werden beispielhaft und mit Bezug auf die folgenden Figuren beschrieben:

Fig. 1 stellt eine flussdiagrammartige Darstellung eines Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Computer-implementierten Verfahrens zum Trainieren eines maschinellen Lernsystems für ein Bestimmen eines zu erwartenden Offsets für eine postoperative physische Linsenposition einer einzusetzenden Intraokularlinse dar.

Fig. 2 zeigt ein Auge mit potenziellen Parameternesswerten.

Fig. 3 zeigt eine flussdiagrammartige Darstellung eines Ausführungsbeispiels für eine Bestimmung einer korrigierten postoperativen Linsenposition ausgehend von dem Verfahren gemäß **Fig. 1**.

Fig. 4 zeigt eine flussdiagrammartige Darstellung eines Ausführungsbeispiels für eine Bestimmung eines erwarteten postoperativen refraktiven Ergebnisses einer Kataraktchirurgie.

Fig. 5 stellt eine schematische Darstellung zum Trainieren eines maschinellen Lernsystems entsprechend einem Ausführungsbeispiel des vorgestellten Konzeptes dar.

Fig. 6 stellt eine schematische Darstellung für eine PLP-Vorhersage basierend auf einem maschinellen Lernsystem dar, welches mittels des Trainings gemäß **Fig. 5** trainiert wurde.

Fig. 7 zeigt eine schematische Darstellung eines Trainingssystems zum Trainieren eines maschinellen Lernsystems für ein Bestimmen eines zu erwartenden Offsets für eine postoperative physische Linsenposition einer einzusetzenden Intraokularlinse.

Fig. 8 zeigt eine schematische Darstellung für ein Bestimmen einer postoperativen realen Position einer Intraokularlinse unter Nutzung des maschinellen Lernsystems, welches mittels des Trainingssystems trainiert wurde.

Fig. 9 zeigt eine schematische Darstellung eines Computersystems, welches im Zusammenhang mit den hier beschriebenen Systemen genutzt werden kann.

DETAILLIERTE FIGURENBESCHREIBUNG

[0050] Im Kontext dieser Beschreibung sollen Konventionen, Begriffe und/oder Ausdrücke folgendermaßen verstanden werden:

[0051] Der Begriff 'maschinelles Lernsystem' beschreibt ein System, welches auf der Basis von Eingangsdaten Vorhersagewerte (predictions) erzeugt. Dabei ist ein maschinelles Lernsystem nicht prozedural programmiert sondern „erlernt“ sein Verhalten auf der Basis eines Trainings mit Trainingsdaten. Dabei werden dem maschinellen Lernsystem Eingangsdaten sowie auch gewünschte Ausgangsdaten als so genannte „Ground-Truth-Daten“ zur Verfügung gestellt. Typischerweise basieren maschinelle Lernsysteme für den hier angegebenen Kontext auf neuronalen Netzwerken. Diese können sowohl als Software-Konstrukt wie auch in Hardware implementiert sein. Außerdem können maschinelle Lernsysteme neben den Vorhersagedaten auch eine zugehörige Qualitätsaussage machen, z.B. in der Form „der vorhergesagte Wert ist mit einer Wahrscheinlichkeit x % richtig“.

[0052] Hervorgehoben werden soll in diesem Zusammenhang auch der Unterschied zwischen einem maschinellen Lernsystem und einem maschinellen Lernmodell. Das maschinelle Lernsystem stellt die grundsätzliche Architektur des Lernsystems dar, während das maschinelle Lernmodell sich im Laufe des Trainings mit Trainingsdaten herausbildet.

[0053] Der Begriff ‚erwarteter Offset für eine postoperative physische Linsenposition‘ kann eine Differenz zwischen einer theoretisch berechneten postoperativen Linsenposition und der tatsächlich realisierten Linsenposition nach der Operation beschreiben.

[0054] Der Begriff ‚Intraokularlinse‘ beschreibt hier eine künstliche Linse, die anstelle der natürlichen Linse eines Auges durch einen Chirurgen in ein Auge eingesetzt wird. Ein typischer Anwendungsfall ist eine Katarakt-Operation.

[0055] Der Begriff ‚theoretische postoperative Position‘ beschreibt die Lage - d.h. die optische Ebene, in der eine in ein Patientenaugen eingesetzte Intraokularlinse basierend auf einer Relation liegt - die in einem entsprechenden Berechnungsmodell verwendet wird.

[0056] Der Begriff ‚Typen von Intraokularlinsen‘ beschreibt unterschiedliche Arten von Intraokularlinsen. Diese können sich beispielsweise im Material, der Form oder Verankerungsauslegern um die eigentliche Linse herum unterscheiden.

[0057] Der Begriff ‚linsenspezifische Konstante‘ beschreibt hier Konstanten wie die so genannte A-Konstante, die häufig für eine Berechnung von Linsenposition oder Brechkraft verwendet wird.

[0058] Der Begriff ‚Relation‘ beschreibt eine mathematische Beziehung, welche Parameter als Argumente einer Funktion verwendet, um einen Ausgangswert zu berechnen.

[0059] Der Begriff ‚postoperative reale Position‘ - insbesondere einer Intraokularlinse - beschreibt keine berechnete oder vorhergesagte Lage der Intraokularlinse, sondern die gemessene Lage der Intraokularlinse oder einer entsprechenden Ebene nachdem die Linse im Auge eingewachsen ist.

[0060] Der Begriff ‚Positionsdifferenz‘ kann die postoperative reale Position einer Intraokularlinse im Vergleich zu einer Vorhersage durch ein ML-System oder durch eine theoretische Formel beschreiben.

[0061] Der Begriff ‚ophthalmologische Biometriedaten‘ kann im Kontext dieser Erfindung hauptsächlich folgende Variablen eines Auges beschreiben: axiale Länge (AL), Vorderkammertiefe (ACD) und Linsendicke eines Auges.

[0062] Der Begriff ‚SRK/T-R-Relation‘ - oder abgewandelte oder verwandte Formeln - beschreibt die bekannte mathematische Funktion zur Berechnung einer theoretischen postoperativen Linsenposition innerhalb der SRK/T-Formel.

[0063] Der Begriff ‚SRK/T-Formel‘ - oder abgewandelte oder verwandte Formeln - beschreibt die bekannte mathematische Funktion zur Berechnung einer theoretischen postoperativen Brechkraft einer Intraokularlinse basierend auf der angenommenen Lage/Position der Intraokularlinse.

[0064] Der Begriff ‚lineares Regressionsmodell‘ beschreibt das bekannte statistische Vorgehen, bei dem versucht wird, eine beobachtete abhängige Variable durch eine oder mehrere unabhängige Variablen zu erklären. Bei der linearen Regression wird dabei ein lineares Modell vorausgesetzt.

[0065] Im Folgenden wird eine detaillierte Beschreibung der Figuren angegeben. Dabei versteht es sich, dass alle Details und Anweisungen in den Figuren schematisch dargestellt sind. Zunächst wird eine flussdiagrammartige Darstellung eines Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Computer-implementierten Verfahrens zum Trainieren eines maschinellen Lernsystems für ein Bestimmen eines zu erwartenden Offsets für eine postoperative physische Linsenposition einer einzusetzenden Intraokularlinse dargestellt. Nachfolgend werden weitere Verfahren und Ausführungsbeispiele, bzw. Ausführungsbeispiele für die entsprechenden Systeme beschrieben:

[0066] Fig. 1 stellt eine flussdiagrammartige Darstellung eines bevorzugten Ausführungsbeispiels des Computer-implementierten Verfahrens 100 zum Trainieren eines maschinellen Lernsystems für ein Bestimmen eines zu erwartenden Offsets für eine postoperative physische Linsenposition (d.h. PLP = postoperative anterior chamber depth) einer einzusetzenden Intraokularlinse dar. Das Verfahren weist ein Bestimmen 102 - d.h. Sammeln, Erfassen, Speichern, Auswerten, etc. - einer Mehrzahl von theoretischen postoperativen Positionen von einzusetzenden Intraokularlinsen im Auge auf, wobei die einzusetzenden Intraokularlinsen zu verschiedenen Typen von Intraokularlinsen (dies umfasst auch gleiche Typen von IOL mit unterschiedlichen Brechkraften) gehören. Dabei weist das Bestimmen für die Mehrzahl der theoretischen postoperativen Positionen eine jeweilige Nutzung einer Relation - z.B. SKR/T^* - und einer jeweiligen linsenspezifischen Konstante - insbesondere der typabhängigen A-Konstante auf.

[0067] Das Verfahren 104 weist weiterhin ein Messen 104 einer Mehrzahl von postoperativen realen Positionen - insbesondere als Ground-Truth-Daten - der Intraokularlinse mit bekannten Messsystemen - auf, wobei die postoperativen realen Positionen jeweiligen zugehörigen theoretischen postoperativen Positionen zugeordnet werden und jeweils ein Tupel bilden.

[0068] Das Verfahren 100 weist zusätzlich ein Bestimmen 106 - z.B. Berechnen - von Positionsdifferenzen zwischen jeweils einander zugehörigen theoretischen postoperativen Positionen und realen postoperativen Positionen und ein Messen 108 von zugehörigen ophthalmologischen Biometriedaten für jedes Tupel auf.

[0069] Schließlich weist das Verfahren 100 ein Trainieren 110 eines maschinellen Lernsystems - analog zu dem oben genannten Korrektursystem - zur Bildung eines trainierten maschinellen Lernmodells für eine Vorhersage des zu erwartenden Offset für eine postoperative physische Linsenposition für eine einzusetzende Intraokularlinse eines bestimmten Typs auf, wobei die ophthalmologischen Patientendaten für jedes Tupel und zugehörige Positionsdifferenzen als Eingangsdaten für das Training des maschinellen Lernsystems genutzt werden.

[0070] Hiermit können Großteile der oben genannten Vorteile des erfinderischen Konzeptes erreicht werden. In Fortführung des oben genannten vorteilhaften Konzeptes wird hier nun ein konkretes Beispiel angegeben.

[0071] Basierend auf dem oben diskutierten vorteilhaften theoretischen Hintergrund der SRK/T- und vergleichbarer Formeln - ist es möglich, die durchschnittliche Kammerdicke (ACD = anterior chamber depth) nach der Operation, welche der realen IOL-Position entspricht, Konstanten wie z.B. der A-Konstante zuzuordnen. Die SRK/T-R-Relation kann hier angegeben werden als:

$$\text{ACD - Konstante} = 0,62467 * \text{A - Konstante} - 68,747,$$

(vgl.] Retzlaff, John A. Sanders, Donald R. Kruff, Manus C., Development of the SRK/T intraocular lens implant power calculation formula, Journal of Cataract and Refractive Surgery, 16 (3), 333-340, 1990).

[0072] Damit ist der Offset ΔPLP direkt gleich dem Offset

$$\Delta\text{ACD - Konstante} = 0,62467 * \Delta\text{A - Konstante}$$

zuzuordnen. Auf dieser Basis wird deshalb ein Vorhersagesystem - also ein maschinelles Lernmodell für ein zugrunde liegendes Lernsystem - zur Vorhersage der postoperativen, realen IOL-Position erzeugt, d.h. trainiert. Dies basiert auf zwei Teilen: dem Korrektursystem, welches mittels der Trainingsdaten trainiert wurde, und als Ausgabedaten die Differenz zwischen der gemessenen, postoperativen IOL-Position und der ACD-Konstante vorhersagt, und der A-Konstante wie folgt:

$$\text{PLP} = 0,62467 * \text{A - Konstante} - 68,747 + \text{Korrekturwert}$$

[0073] Ein derartiges Vorhersagesystem erlaubt nun einerseits die PLP für eine neue Linse vorherzusagen, für die keine postoperativen biometrischen Daten verfügbar sind. Dies geschieht z.B. durch Einfügen der entsprechenden A-Konstante oder durch eine Entfernung des Verteilungs-Offsets für zwei Korrektursysteme, die für zwei unterschiedliche Linsentypen trainiert wurden, wenn für beide Linsentypen postoperative Informationen vorliegen.

[0074] Folglich wird vorteilhafter Weise also durch das vorgeschlagene Verfahren ein genereller Ansatz beschrieben, um Domain-Verschiebungen zwischen Daten zu unterschiedlichen IOL-Typen zu kompensieren, sodass ein effektives Training für ein maschinelles Lernsystem auf der Basis von Daten von unterschiedlichen Typen von Intraokularlinsen innerhalb des gleichen Trainingsdatensatzes ermöglicht wird.

[0075] Fig. 2 stellt ein Auge 200 mit verschiedenen biometrischen Parametern des Auges dar. Insbesondere sind folgende Parameter dargestellt: axiale Länge 202 (AL, axial length), vordere Kammerdicke 204 (ACD, anterior chamber depth), Keratometriewert 206 (K, Radius), Brechkraft der Linse, Linsendicke 208 (LT, lense thickness), zentrale Korneadicke 210 (CCT, central cornea thickness), Weiß-zu-Weiß-Abstand 212 (WTW, white-to-white distance), Pupillengröße 214 (PS, pupil size), hintere Kammertiefe 216 (PCD, posterior chamber depth), Retinadicke 218 (RT, retina thickness).

[0076] Fig. 3 zeigt eine flussdiagrammartige Darstellung eines Ausführungsbeispiels für ein Verfahren 300 für eine Bestimmung einer korrigierten postoperativen Linsenposition ausgehend von dem Verfahren gemäß Fig. 1, d.h. unter Nutzung des maschinellen Lernsystems, welches mittels des vorgeschriebenen Verfahrens trainiert wurde. Dabei weist dieses Verfahren 300 das Nutzen 302 der Relation zur Bestimmung der theoretischen postoperativen Linsenposition der einzusetzenden Intraokularlinse und ein Bestimmen 304 von ophthalmologischen Biometriedaten aus einer Messung am Patientenauge - insbesondere vor der Operation - auf. Dabei kann das Bestimmen der ophthalmologischen Biometriedaten auf verschiedene Weise geschehen, z.B. durch direktes Messen, Auswerten von Messungen, Abrufen aus einem Speicher, usw.

[0077] Das Verfahren 300 weist außerdem auf: ein Bestimmen 306 des zu erwartenden Offsets für die postoperative physische Linsenposition für eine einzusetzende Intraokularlinse mittels des trainierten maschinellen Lernsystems, wobei die bestimmten ophthalmologischen Biometriedaten als Eingangsdaten genutzt werden, und ein Bestimmen 308 einer korrigierten postoperativen Linsenposition durch Addition der theoretischen postoperativen Lin-

senposition der einzusetzenden Intraokularlinse und des bestimmten zu erwartenden Offsets für die postoperative physische Linsenposition. Dies wird auch später noch einmal durch **Fig. 6** plastisch dargestellt.

[0078] **Fig. 4** zeigt eine flussdiagrammartige Darstellung eines Ausführungsbeispiels 400 für eine Bestimmung eines erwarteten postoperativen, refraktiven Ergebnisses z.B. einer Kataraktchirurgie. Dazu wird zunächst auf das vorgehend beschriebene Verfahren 300 (vgl. **Fig. 3**) zum Bestimmen 402 der postoperativen realen Position einer Intraokularlinse zurückgegriffen.

[0079] Mit dem Schritt schließt sich dann das eigentliche Bestimmen 404 des erwarteten postoperativen refraktiven Ergebnisses einer Kataraktchirurgie mittels des trainierten maschinellen Lernsystems an. Dabei werden ein realer Brechkraftwert der einzusetzenden Intraokularlinse und die bestimmte postoperative reale Position einer Intraokularlinse als Eingangsdaten für ein entsprechendes maschinelles Lernsystem genutzt.

[0080] Dieses entsprechende Lernsystem wurde vorher mit Tupeln von postoperativen Linsenpositionswerten, realen Brechkraftwerten entsprechender Intraokularlinsen und zugehörigen postoperativen refraktiven Ergebnissen als Ground-Truth-Daten trainiert, um ein entsprechendes Lernmodell zur Vorhersage des postoperativen refraktiven Ergebnisses der einzusetzenden Intraokularlinse auszubilden.

[0081] **Fig. 5** greift nochmals das Trainingsverfahren auf. Somit stellt **Fig. 5** eine schematische Darstellung zum Trainieren eines maschinellen Lernsystems entsprechend einem Ausführungsbeispiel des vorgestellten Konzeptes dar. Für einen bestimmten Typ einer Intraokularlinse 502 wird die numerische A-Konstante 504 als Eingabewert für die SRK/T-Relation 506 genutzt, um eine theoretische IOL-Position 508 zu berechnen. Danach wird die theoretische IOL-Position 508 von der realen, bekannten IOL-Position 510 subtrahiert. Das Ergebnis sowie die biometrischen Trainingsdaten (Geometrie-Daten) 512 werden als Eingabewerte für das Korrekturmodell 514 genutzt und so ein trainiertes Korrekturmodell 516 in Form eines maschinellen Lernsystems erzeugt.

[0082] **Fig. 6** greift nochmals die Vorhersagephase für die postoperative Position der einzusetzenden IOL auf. Somit stellt **Fig. 6** eine schematische Darstellung 600 für eine PLP-Vorhersage basierend auf einem maschinellen Lernsystem, welches mittels des Trainings gemäß **Fig. 5** trainiert wurde, dar.

[0083] Ausgehend von einer tatsächlich einzusetzenden Intraokularlinse 602 wird dessen numerische

A-Konstante 604 genutzt, um mittels der SRK/T-Relation 606 die theoretische IOL-Position 608 zu bestimmen. Auf der anderen Seite stehen die biometrischen Daten 612 in Form der biometrischen Trainingsdaten 610 für das trainierte Korrekturmodell 516 zur Verfügung. Dieses sagt den Korrektur-Offset 614 in Bezug auf die Linsenposition voraus. Eine Addition der theoretischen IOL-Position 608 und des Korrektur-Offsets 614 ergibt so schließlich eine PLP-Vorhersage 616.

[0084] **Fig. 7** zeigt eine schematische Darstellung eines Trainingssystems 700 zum Trainieren eines maschinellen Lernsystems für ein Bestimmen eines zu erwartenden Offsets für eine postoperative physische Linsenposition einer einzusetzenden Intraokularlinse. Das Trainingssystem 700 weist dabei einen Prozessor 702 und einen mit dem Prozessor 702 operativ verbundenen Speicher 704, der Programmelemente speichert auf, die, wenn sie ausgeführt werden, für ein Aktivieren und Zusammenwirken der folgenden Einheiten aktiv sind:

(i) ein Bestimmungsmodul 706 zum Bestimmen einer Mehrzahl von theoretischen postoperativen Positionen von einzusetzenden Intraokularlinsen im Auge, wobei die einzusetzenden Intraokularlinsen zu verschiedenen Typen von Intraokularlinsen gehören, wobei das Bestimmen für die Mehrzahl der theoretischen postoperativen Positionen eine jeweilige Nutzung einer Relation und einer jeweiligen linsenspezifischen Konstante aufweist,

(ii) ein erstes Messsystem 708 zum Messen einer Mehrzahl von postoperativen realen Positionen der Intraokularlinse, wobei die postoperativen realen Positionen jeweiligen zugehörigen theoretischen postoperativen Positionen zugeordnet werden und jeweils ein Tupel bilden, (iii) eine Bestimmungseinheit 710 zum Bestimmen von Positionsdifferenzen zwischen jeweils einander zugehörigen theoretischen postoperativen Positionen und realen postoperativen Positionen, (iv) ein zweites Messsystem zum Messen von zugehörigen ophthalmologischen Biometriedaten für jedes Tupel, und (v) eine Trainingssteuerungseinheit zum Trainieren eines maschinellen Lernsystems zur Bildung eines trainierten maschinellen Lernmodells für eine Vorhersage des zu erwartenden Offsets für eine postoperative physische Linsenposition für eine einzusetzende Intraokularlinse eines bestimmten Typs, wobei die ophthalmologischen Patientendaten für jedes Tupel und zugehörige Positionsdifferenzen als Eingangsdaten für das Training des maschinellen Lernsystems genutzt werden.

[0085] Es sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die genannten Module und Einheiten - insbe-

sondere der Prozessor 702, der Speicher 704, das Bestimmungsmodul 706, das 1. Messsystem 708, das Bestimmungssystem 710, das 2. Messsystem 712 und das Trainingssteuerungssystem 714 - mit elektrischen Signalleitungen oder über ein systeminternes Bussystem 716 zum Zwecke des Signal- oder Datenaustausches verbunden sein können.

[0086] Fig. 8 zeigt eine schematische Darstellung für ein Vorhersagesystem 800 zum Bestimmen einer postoperativen realen Position einer Intraokularlinse unter Nutzung des maschinellen Lernsystems, welches mittels des Trainingssystems trainiert wurde. Dabei weist das Vorhersagesystem einen Prozessor 802 und einen mit dem Prozessor 802 operativ verbundenen Speicher 804 auf, der Programmcode-Elemente speichert, die, wenn sie ausgeführt werden, für ein Zusammenwirken der folgenden Einheiten aktiv sind: (i) eine Relationsbestimmungseinheit 806 zum Nutzen der Relation zur Bestimmung der theoretischen postoperativen Linsenposition der einzusetzenden Intraokularlinse, (ii) eine Augendaten-Bestimmungseinheit 808 zum Bestimmen von ophthalmologischen Biometriedaten aus einer Messung am Patientenauge, (iii) eine Offset-Bestimmungseinheit 810 zum Bestimmen des zu erwartenden Offsets für die postoperative physische Linsenposition für eine einzusetzende Intraokularlinse mittels des trainierten maschinellen Lernsystems, wobei die bestimmten ophthalmologischen Biometriedaten als Eingangsdaten genutzt werden, und (iv) eine Linsenpositionseinheit zum Bestimmen einer korrigierten postoperativen Linsenposition durch Addition der theoretischen postoperativen Linsenposition der einzusetzenden Intraokularlinse und des bestimmten zu erwartenden Offsets für die postoperative physische Linsenposition.

[0087] Auch hier sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die genannten Module und Einheiten - insbesondere der Prozessor 802, der Speicher 804, die Relationsbestimmungseinheit 806, die Augendatenbestimmungseinheit (Messsystem zum Erfassen von biometrischen Daten) 808, die Offset-Bestimmungseinheit 810 und die Linsenpositionseinheit 812 - mit elektrischen Signalleitungen oder über ein systeminternes Bussystem 814 zum Zwecke des Signal- oder Datenaustausches verbunden sein können.

[0088] Fig. 9 beschreibt ein Computersystem 900, welches im Zusammenhang mit den bereits beschriebenen Systemen genutzt werden kann. Das Computersystem 900 weist eine Mehrzahl von allgemein nutzbaren Funktionen (general purpose functions) auf. Dabei kann das Computersystem ein Tablet-Computer, ein Laptop-/Notebook-Computer, ein anderes tragbares oder mobiles elektronisches Gerät, ein Mikroprozessorsystem, ein Mikroprozessor - basiertes System, ein Smartphone, ein Compu-

tersystem mit speziell eingerichteten Sonderfunktionen, oder auch ein Bestandteil von einem Mikroskopsystem sein. Das Computersystem 900 kann eingerichtet sein zur Ausführung vom Computersystem ausführbaren Anweisungen - wie beispielsweise Programmmodulen - die ausgeführt werden können, um Funktionen der hier vorgeschlagenen Konzepte umzusetzen. Dazu können die Programmmodule Routinen, Programme, Objekte, Komponenten, Logik, Datenstrukturen usw. aufweisen, um bestimmte Aufgaben oder bestimmte abstrakte Datentypen zu implementieren.

[0089] Die Komponenten des Computersystems können Folgendes aufweisen: einen oder mehrere Prozessoren oder Verarbeitungseinheiten 902, ein Speichersystem 904 und ein Bussystem 906, welches verschiedene Systemkomponenten, inklusive des Speichersystems 904, mit dem Prozessor 902 verbindet. Typischerweise weist das Computersystem 900 eine Mehrzahl von durch das Computersystem 900, zugreifbaren flüchtigen oder nicht-flüchtigen Speichermedien auf. Im Speichersystem 904 können die Daten und/oder Instruktionen (Befehle) der Speichermedien in flüchtiger Form - wie beispielsweise in einem RAM (random access memory) 908 - gespeichert sein, um von dem Prozessor 902 ausgeführt zu werden. Diese Daten und Instruktionen realisieren einzelne oder mehrere Funktionen bzw. Schritte des hier vorgestellten Konzeptes. Weitere Komponenten des Speichersystems 904 können ein Permanentspeicher (ROM) 910 und ein Langzeitspeicher 912 sein, in dem die Programmcode und Daten (Bezugszeichen 916), wie auch Workflows, gespeichert sein können.

[0090] Das Computersystem weist zur Kommunikation eine Reihe von dedizierten Vorrichtungen (Tastatur 918, Maus/Pointing Device [nicht dargestellt], Bildschirm 920, usw.) auf. Diese dedizierten Vorrichtungen können auch in einem berührungsempfindlichen Display vereint sein. Ein separat vorgesehener I/O-Controller 914 sorgt für einen reibungslosen Datenaustausch zu externen Geräten. Zur Kommunikation über ein lokales oder globales Netzwerk (LAN, WAN, beispielsweise über das Internet) steht ein Netzwerkadapter 922 zur Verfügung. Auf dem Netzwerkadapter kann durch andere Komponenten des Computersystems 900 über das Bussystem 906 zugegriffen werden. Dabei versteht es sich, dass - obwohl nicht dargestellt - auch andere Vorrichtungen an das Computersystem 900 angeschlossen sein können.

[0091] Zusätzlich können mindestens Teile des Trainingssystems 700 zum Trainieren eines maschinellen Lernsystems für ein Bestimmen eines zu erwartenden Offsets für eine postoperative physische Linsenposition einer einzusetzenden Intraokularlinse (vgl. Fig. 7) genauso wie das System entsprechend

Fig. 8 an das Bussystem 906 angeschlossen sein. Dabei können das System gemäß **Fig. 7** bzw. gemäß **Fig. 8** und das Computersystem 900 ggfs. teilweise Bussysteme, Speicher und/oder Prozessoren gemeinsam nutzen.

[0092] Die Beschreibung der verschiedenen Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung wurde zum besseren Verständnis dargestellt, dient aber nicht einer unmittelbaren Einschränkung der erfinderischen Idee auf diese Ausführungsbeispiele. Weitere Modifikationen und Variationen erschließt sich der Fachmann selbst. Die hier genutzte Terminologie wurde so gewählt, um die grundsätzlichen Prinzipien der Ausführungsbeispiele am besten zu beschreiben und sie dem Fachmann leicht zugänglich zu machen.

[0093] Das hier vorgestellte Prinzip kann sowohl als System, als Verfahren, Kombinationen davon und/oder auch als Computerprogrammprodukt verkörpert sein. Dabei kann das Computerprogrammprodukt ein (oder mehrere) Computer-lesbare/s Speichermedium/-medien aufweisen, welches Computer-lesbare Programmstrukturen aufweist, um einen Prozessor oder ein Steuerungssystem dazu zu veranlassen, verschiedene Aspekte der vorliegenden Erfindung auszuführen.

[0094] Als Medien kommen elektronische, magnetische, optische, elektromagnetische, Infrarot-Medien oder Halbleitersysteme als Weiterleitungsmedium zum Einsatz; beispielsweise SSDs (solid state device/drive als Festkörperspeicher), RAM (Random Access Memory) und/oder ROM (Read-Only Memory), EEPROM (Electrically Erasable ROM) oder eine beliebige Kombination davon. Als Weiterleitungsmedien kommen auch sich ausbreitende elektromagnetische Wellen, elektromagnetische Wellen in Wellenleitern oder anderen Übertragungsmedien (z.B. Lichtimpulse in optischen Kabeln) oder elektrische Signale, die in Drähten übertragen werden, in Frage.

[0095] Das Computer-lesbare Speichermedium kann eine verkörpernde Vorrichtung sein, welche Instruktionen für eine Nutzung durch ein Instruktionenausführungsgerät vorhält bzw. speichert. Die Computer-lesbaren Programmstrukturen, die hier beschrieben sind, können auch auf ein entsprechendes Computersystem heruntergeladen werden, beispielsweise als (Smartphone-)App von einem Service-Provider über eine kabelbasierte Verbindung oder ein Mobilfunknetzwerk.

[0096] Die Computer-lesbaren Programmstrukturen zur Ausführung von Operationen der hier beschriebenen Erfindung können maschinenabhängig sein oder maschinenunabhängige Instruktionen, Microcode, Firmware, Status-definierende Daten

oder jeglicher Source-Code oder Objektcode sein, der beispielsweise in C++, Java oder ähnlichen bzw. in konventionellen prozeduralen Programmiersprachen, wie beispielsweise der Programmiersprache „C“ oder ähnlichen Programmiersprachen geschrieben sein. Die Computer-lesbaren Programmstrukturen können komplett durch ein Computersystem ausgeführt werden. In einigen Ausführungsbeispielen können es auch elektronische Schaltkreise, wie beispielsweise programmierbare Logikschaltkreise, Feld-programmierbare Gate Arrays (FPGA) oder programmierbare Logik-Arrays (PLA), sein, die die Computer-lesbaren Programmstrukturen durch Nutzung von Statusinformationen der Computer-lesbaren Programmstrukturen ausführen, um die elektronischen Schaltkreise entsprechend Aspekten der vorliegenden Erfindung zu konfigurieren bzw. zu individualisieren.

[0097] Darüber hinaus ist die hier vorgestellte Erfindung mit Bezug auf Flussdiagramme und/oder Blockdiagramme von Verfahren, Vorrichtungen (Systemen) und Computerprogrammprodukten entsprechend Ausführungsbeispielen der Erfindung dargestellt. Es sei darauf hingewiesen, dass praktisch jeder Block der Flussdiagramme und/oder Blockdiagramme als Computer-lesbare Programmstrukturen ausgestaltet sein kann.

[0098] Die Computer-lesbaren Programmstrukturen können einem General-Purpose-Computer, einem Spezialcomputer oder einem anderweitig programmierbaren Datenverarbeitungssystem zur Verfügung gestellt werden, um eine Maschine herzustellen, so dass die Instruktionen, welche durch den Prozessor oder den Computer oder andere programmierbare Datenverarbeitungsvorrichtungen ausgeführt werden, Mittel erzeugen, um die Funktionen oder Vorgänge, die in dem Flussdiagramm und/oder Blockdiagrammen dargestellt sind, zu implementieren. Diese Computerlesbaren Programmstrukturen können entsprechend auch auf einem Computer-lesbaren Speichermedium gespeichert werden.

[0099] In diesem Sinne kann jeder Block in dem dargestellten Flussdiagramm oder den Blockdiagrammen ein Modul, ein Segment oder Anteile an Instruktionen darstellen, welche mehrere ausführbare Instruktionen zur Implementierung der spezifischen Logikfunktion darstellt. In einigen Ausführungsbeispielen können die Funktionen, die in den einzelnen Blöcken dargestellt sind, in einer anderen Reihenfolge - gegebenenfalls auch parallel - ausgeführt werden.

[0100] Die dargestellten Strukturen, Materialien, Abläufe und Äquivalente aller Mittel und/oder Schritte mit zugehörigen Funktionen in den untenstehenden Ansprüchen sind dazu gedacht, alle Struktu-

ren, Materialien oder Abläufe anzuwenden, wie es durch die Ansprüche ausgedrückt ist.

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

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

Zitierte Nicht-Patentliteratur

- Retzlaff, John A. Sanders, Donald R. Kraff, Manus C., Development of the SRK/T intraocular lens implant power calculation formula, Journal of Cataract and Refractive Surgery, 16 (3), 333-340 [0071]

Patentansprüche

1. Ein Computer-implementiertes Verfahren zum Trainieren eines maschinellen Lernsystems für ein Bestimmen eines zu erwartenden Offsets für eine postoperative physische Linsenposition einer einzusetzenden Intraokularlinse, das Verfahren aufweisend

- Bestimmen einer Mehrzahl von theoretischen postoperativen Positionen von einzusetzenden Intraokularlinsen im Auge, wobei die einzusetzenden Intraokularlinsen zu verschiedenen Typen von Intraokularlinsen gehören, wobei das Bestimmen für die Mehrzahl der theoretischen postoperativen Positionen eine jeweilige Nutzung einer Relation und einer jeweiligen linsenspezifischen Konstante aufweist,
- Messen einer Mehrzahl von postoperativen realen Positionen der Intraokularlinse, wobei die postoperativen realen Positionen jeweiligen zugehörigen theoretischen postoperativen Positionen zugeordnet werden und jeweils ein Tupel bilden,
- Bestimmen von Positionsdifferenzen zwischen jeweils einander zugehörigen theoretischen postoperativen Positionen und realen postoperativen Positionen,
- Messen von zugehörigen ophthalmologischen Biometriedaten für jedes Tupel,
- Trainieren eines maschinellen Lernsystems zur Bildung eines trainierten maschinellen Lernmodells für eine Vorhersage des zu erwartenden Offsets für eine postoperative physische Linsenposition für eine einzusetzende Intraokularlinse eines bestimmten Typs, wobei die ophthalmologischen Patientendaten für jedes Tupel und zugehörige Positionsdifferenzen als Eingangsdaten für das Training des maschinellen Lernsystems genutzt werden.

2. Das Verfahren gemäß Anspruch 1, wobei die Relation auf einer SRK/T-Relation beruht.

3. Das Verfahren gemäß Anspruch 1 oder 2, wobei die ophthalmologischen Biometriedaten mindestens einen Messwert eines Auges aufweisen, der aus der Gruppe ausgewählt ist, die aus einer aktuellen axialen Länge (AL), einer Vorderkammertiefe (ACD) und einer Linsendicke bestehen.

4. Das Verfahren gemäß einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei das maschinelle Lernsystem ein lineares Regressionsmodell aufweist.

5. Das Verfahren gemäß einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei die Vorhersage des zu erwartenden Offsets für die postoperative physische Linsenposition für die einzusetzende Intraokularlinse des bestimmten Typs unabhängig von einer Brechkraft der einzusetzenden Intraokularlinse ist.

6. Das Verfahren gemäß einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei die linsenspezifische Konstante die A-Konstante ist.

7. Ein Verfahren zum Bestimmen einer postoperativen realen Position einer Intraokularlinse unter Nutzung des maschinellen Lernsystems, welches mittels des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 6 trainiert wurde, wobei das Verfahren aufweist:

- Nutzen der Relation zur Bestimmung der theoretischen postoperativen Linsenposition der einzusetzenden Intraokularlinse,
- Bestimmen von ophthalmologischen Biometriedaten aus einer Messung am Patientenauge,
- Bestimmen des zu erwartenden Offsets für die postoperative physische Linsenposition für eine einzusetzende Intraokularlinse mittels des trainierten maschinellen Lernsystems, wobei die bestimmten ophthalmologischen Biometriedaten als Eingangsdaten genutzt werden, und
- Bestimmen einer korrigierten postoperativen Linsenposition durch Addition der theoretischen postoperativen Linsenposition der einzusetzenden Intraokularlinse und des bestimmten zu erwartenden Offsets für die postoperative physische Linsenposition.

8. Ein Verfahren zum Bestimmen eines postoperativen refraktiven Ergebnisses, das Verfahren aufweisend:

- Bestimmen der postoperativen realen Position einer Intraokularlinse unter Verwendung des Verfahrens gemäß Anspruch 7,
- Bestimmen des erwarteten postoperativen refraktiven Ergebnisses einer Kataraktchirurgie mittels eines trainierten maschinellen Lernsystems, wobei ein realer Brechkraftwert der einzusetzenden Intraokularlinse und die bestimmte postoperative reale Position einer Intraokularlinse als Eingangsdaten genutzt werden, wobei das maschinelle Lernsystem mit Tupeln von postoperativen Linsenpositionswerten, realen Brechkraftwerten entsprechender Intraokularlinsen und zugehörigen postoperativen refraktiven Ergebnissen als Ground-Truth-Daten trainiert wurde, um ein entsprechendes Lernmodell zur Vorhersage des postoperativen refraktiven Ergebnisses der einzusetzenden Intraokularlinse auszubilden.

9. Ein Trainingssystem zum Trainieren eines maschinellen Lernsystems für ein Bestimmen eines zu erwartenden Offsets für eine postoperative physische Linsenposition einer einzusetzenden Intraokularlinse, das Trainingssystem aufweisend

- einen Prozessor und einen mit dem Prozessor operativ verbundenen Speicher, der Programmcode-Elemente speichert, die, wenn sie ausgeführt werden, für ein Zusammenwirken der folgenden Einheiten aktiv sind :
- ein Bestimmungsmodul zum Bestimmen einer

Mehrzahl von theoretischen postoperativen Positionen von einzusetzenden Intraokularlinsen im Auge, wobei die einzusetzenden Intraokularlinsen zu verschiedenen Typen von Intraokularlinsen gehören, wobei das Bestimmen für die Mehrzahl der theoretischen postoperativen Positionen eine jeweilige Nutzung einer Relation und einer jeweiligen linsenspezifischen Konstante aufweist,

- ein erstes Messsystem zum Messen einer Mehrzahl von postoperativen realen Positionen der Intraokularlinse, wobei die postoperativen realen Positionen jeweiligen zugehörigen theoretischen postoperativen Positionen zugeordnet werden und jeweils ein Tupel bilden,
- eine Bestimmungseinheit zum Bestimmen von Positionsdifferenzen zwischen jeweils einander zugehörigen theoretischen postoperativen Positionen und realen postoperativen Positionen,
- ein zweites Messsystem zum Messen von zugehörigen ophthalmologischen Biometriedaten für jedes Tupel,
- eine zum Trainieren eines maschinellen Lernsystems zur Bildung eines trainierten maschinellen Lernmodells für eine Vorhersage des zu erwartenden Offsets für eine postoperative physische Linsenposition für eine einzusetzende Intraokularlinse eines bestimmten Typs, wobei die ophthalmologischen Patientendaten für jedes Tupel und zugehörige Positionsdifferenzen als Eingangsdaten für das Training des maschinellen Lernsystems genutzt werden.

10. Ein Vorhersagesystem für ein Bestimmen einer postoperativen realen Position einer Intraokularlinse unter Nutzung des maschinellen Lernsystems, welches mittels des Trainingssystems gemäß Anspruch 9 trainiert wurde, wobei das Vorhersagesystem aufweist,

- einen Prozessor und einen mit dem Prozessor operativ verbundenen Speicher, der Programmcode-Elemente speichert, die, wenn sie ausgeführt werden, für ein Zusammenwirken der folgenden Einheiten aktiv sind:
- eine Relationsbestimmungseinheit zum Nutzen der Relation zur Bestimmung der theoretischen postoperativen Linsenposition der einzusetzenden Intraokularlinse,
- eine Augendaten-Bestimmungseinheit zum Bestimmen von ophthalmologischen Biometriedaten aus einer Messung am Patientenauge,
- eine Offset-Bestimmungseinheit zum Bestimmen des zu erwartenden Offsets für die postoperative physische Linsenposition für eine einzusetzende Intraokularlinse mittels des trainierten maschinellen Lernsystems, wobei die bestimmten ophthalmologischen Biometriedaten als Eingangsdaten genutzt werden, und
- eine Linsenpositionseinheit zum Bestimmen einer korrigierten postoperativen Linsenposition durch Addition der theoretischen postoperativen Linsenpo-

sition der einzusetzenden Intraokularlinse und des bestimmten zu erwartenden Offsets für die postoperative physische Linsenposition.

11. Ein Computerprogrammprodukt zum Trainieren eines maschinellen Lernsystems für ein Bestimmen eines zu erwartenden Offsets für eine postoperative physische Linsenposition einer einzusetzenden Intraokularlinse, wobei das Computerprogrammprodukt ein Computer-lesbares Speichermedium aufweist, welches darauf gespeicherte Programmstrukturen aufweist, wobei die Programmstrukturen durch einen oder mehrere Computer oder Steuereinheiten ausführbar sind und den einen oder die mehreren Computer oder Steuereinheiten dazu veranlasst, das Verfahren entsprechend einem der Ansprüche 1 bis 6 auszuführen.

Es folgen 9 Seiten Zeichnungen

100

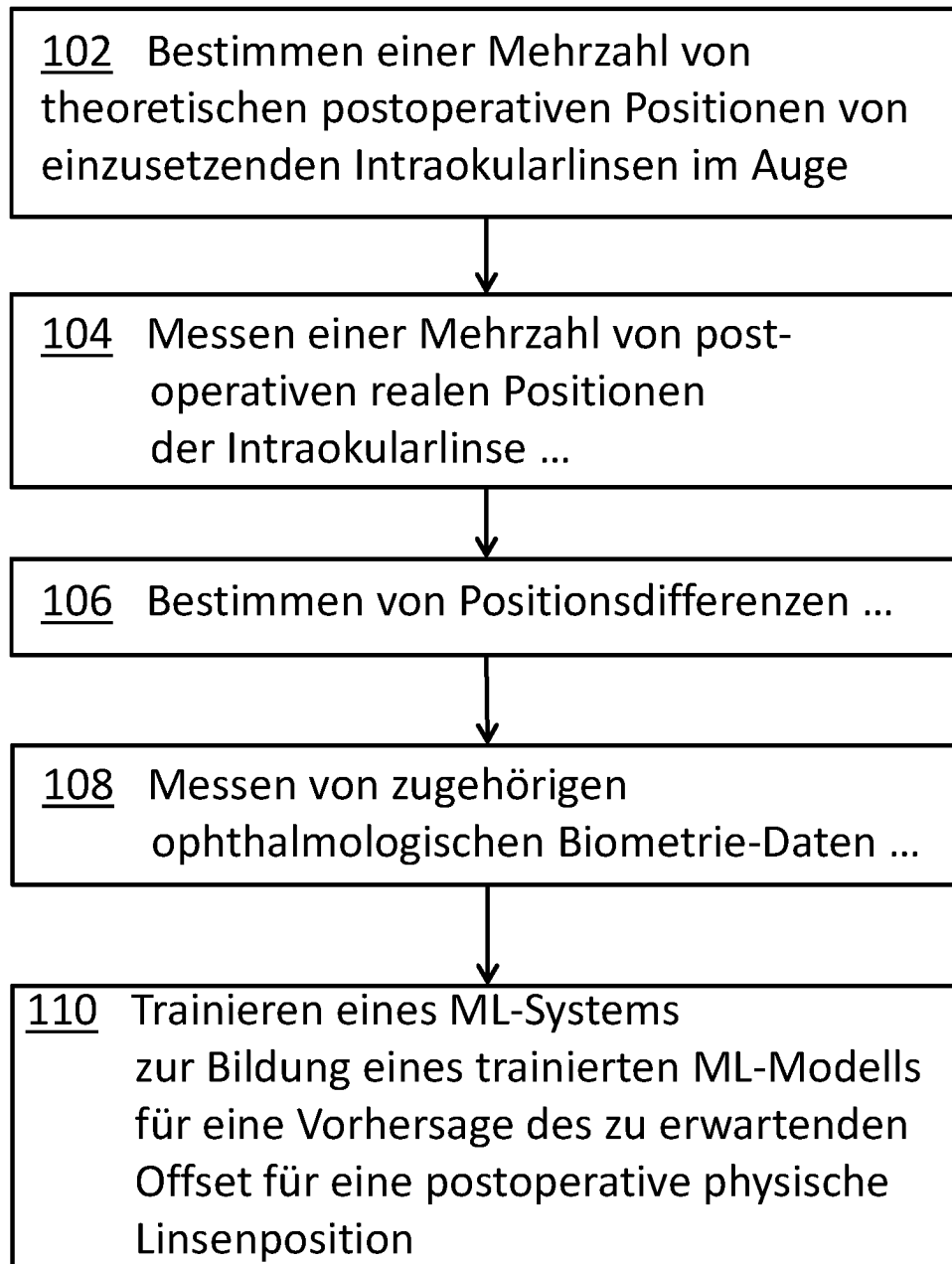


FIG. 1

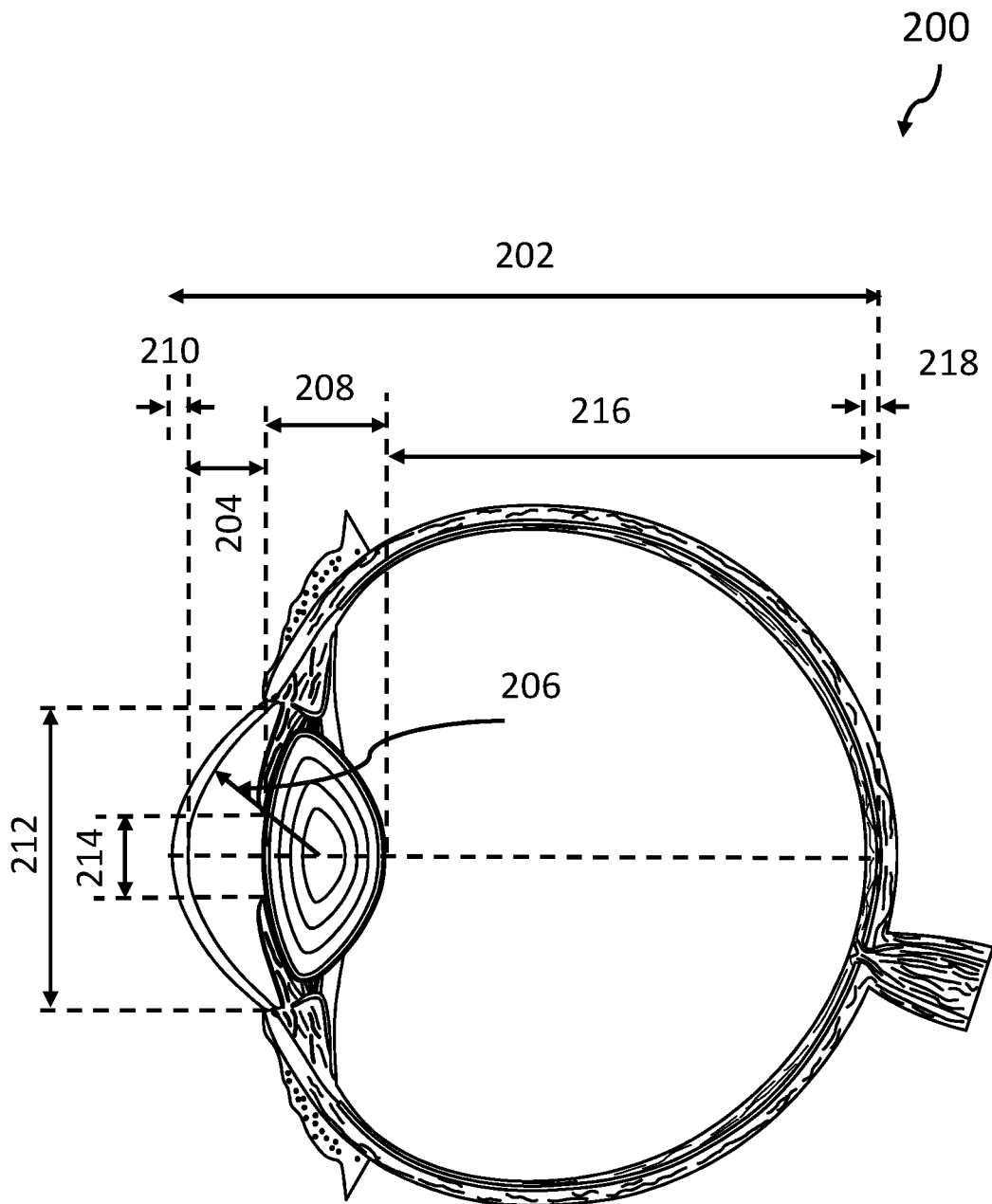


FIG. 2

300

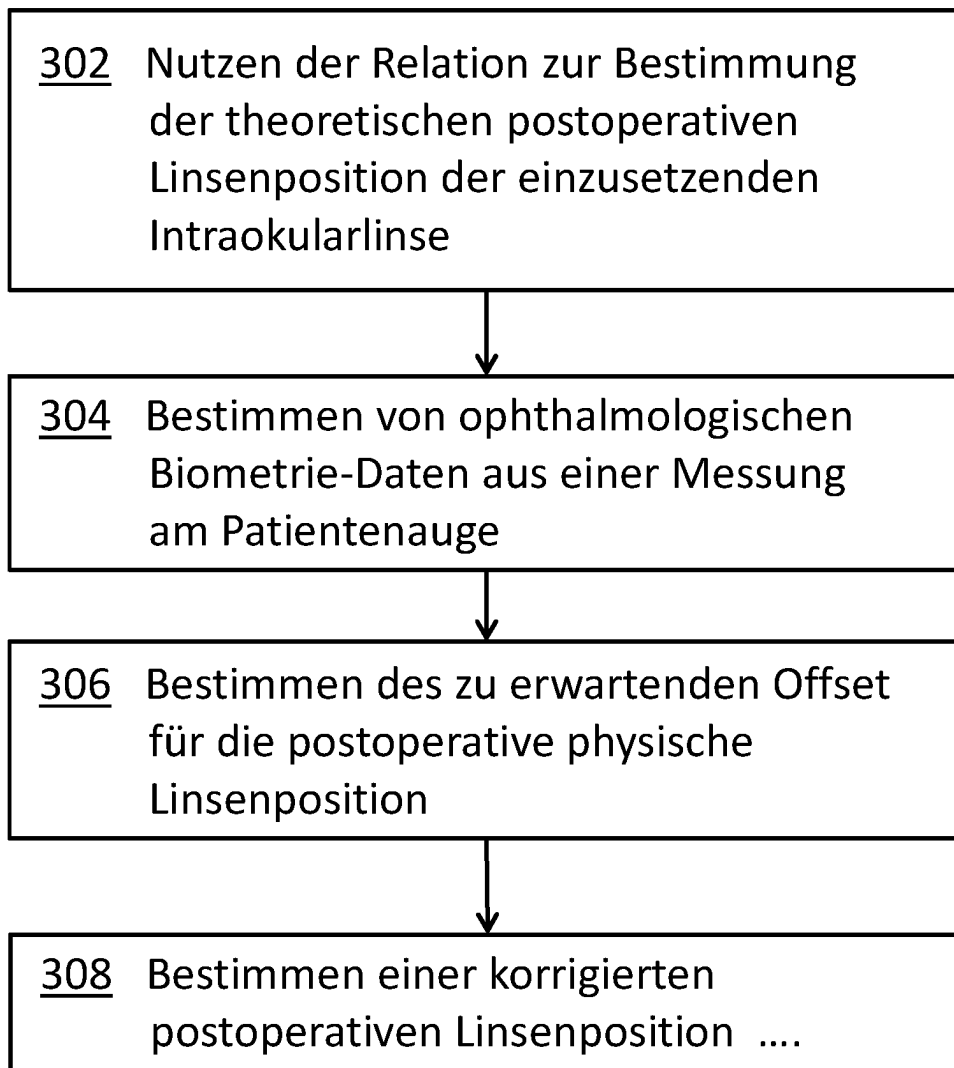


FIG. 3

400

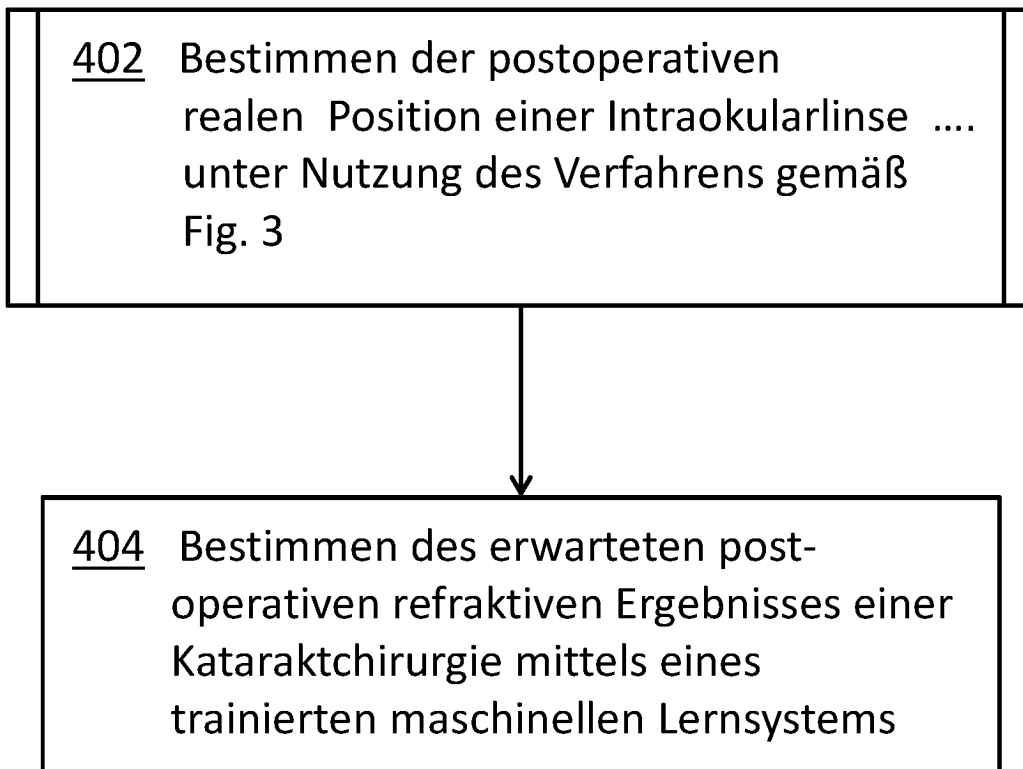


FIG. 4

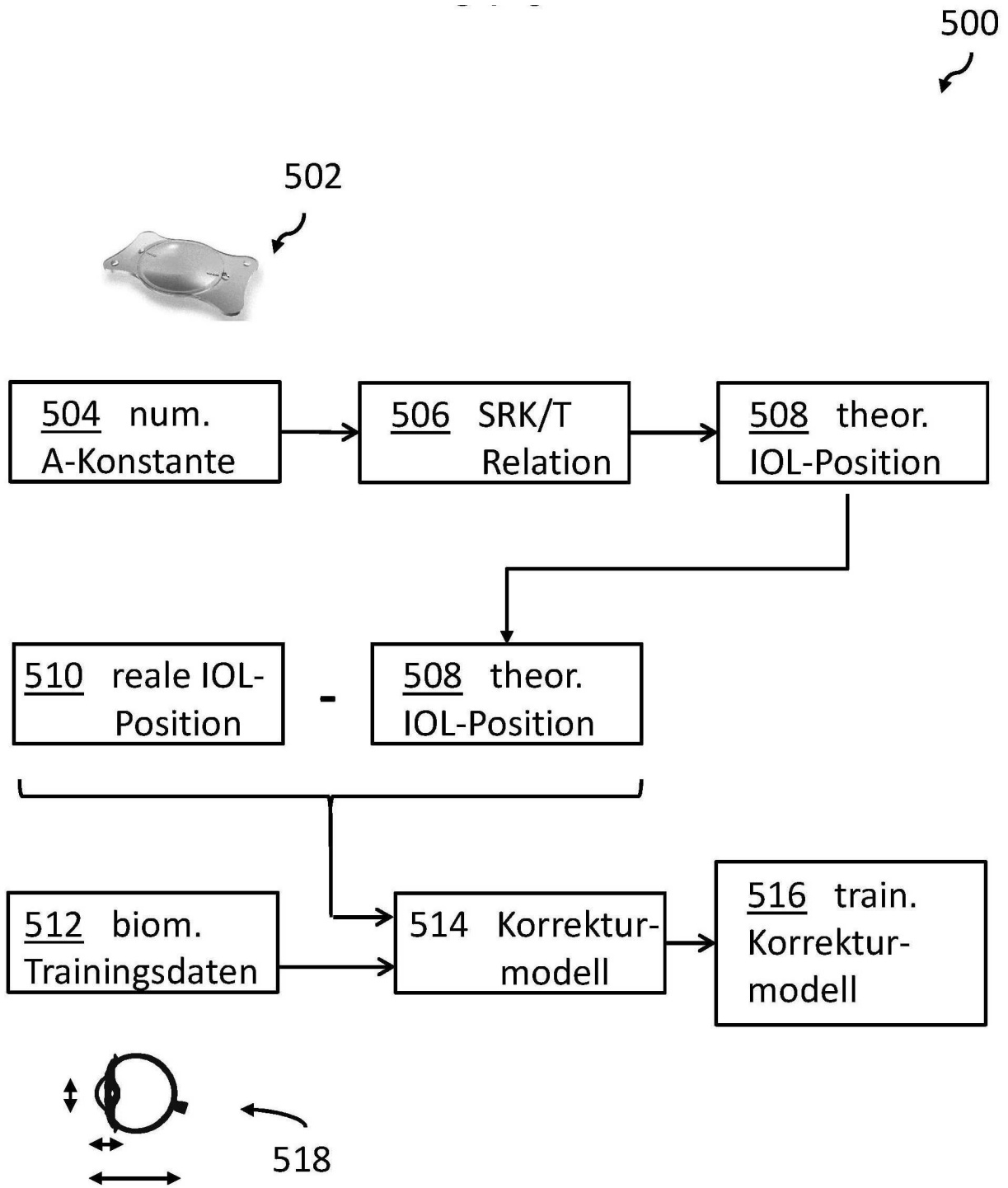


FIG. 5

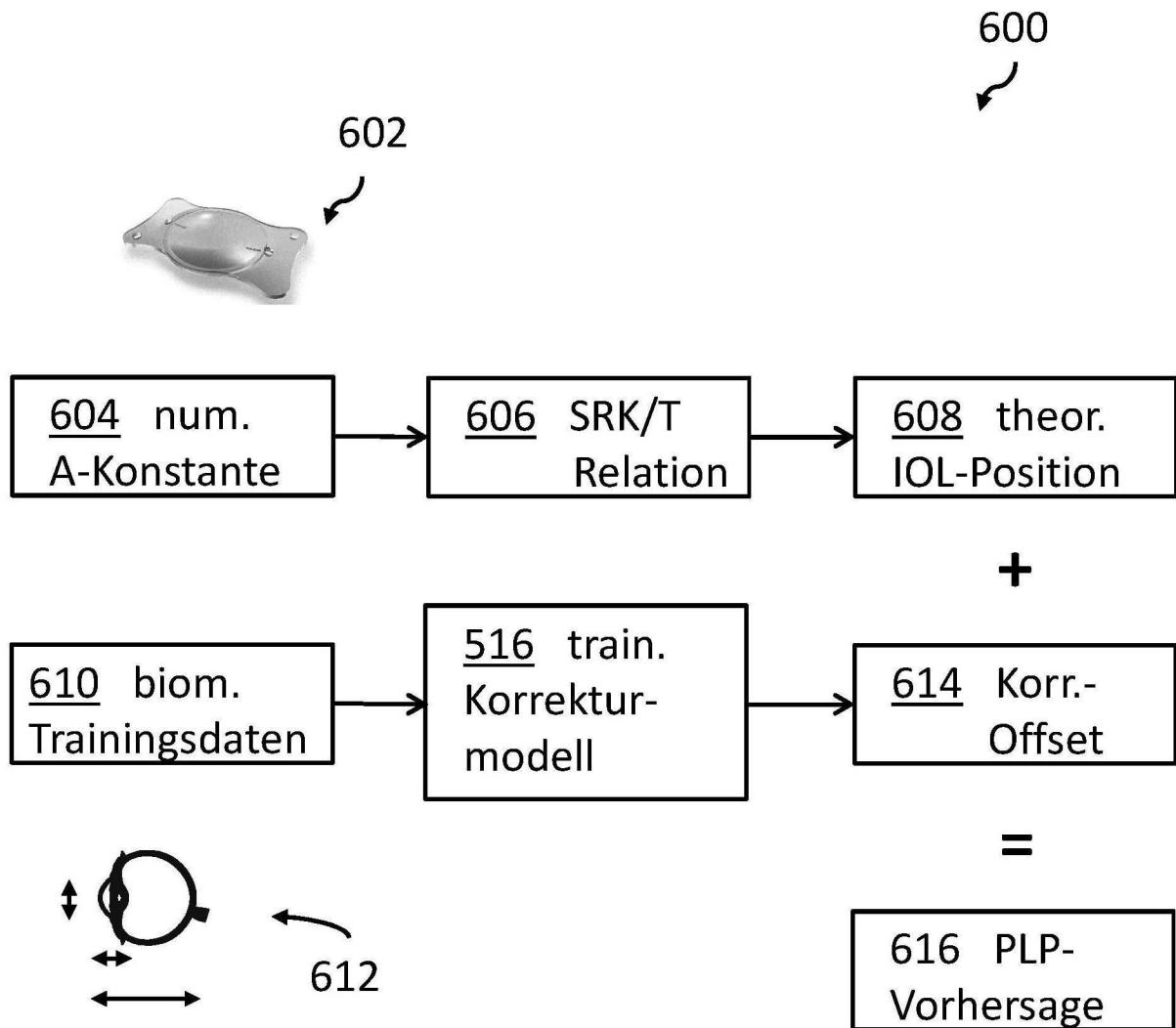


FIG. 6

700 System

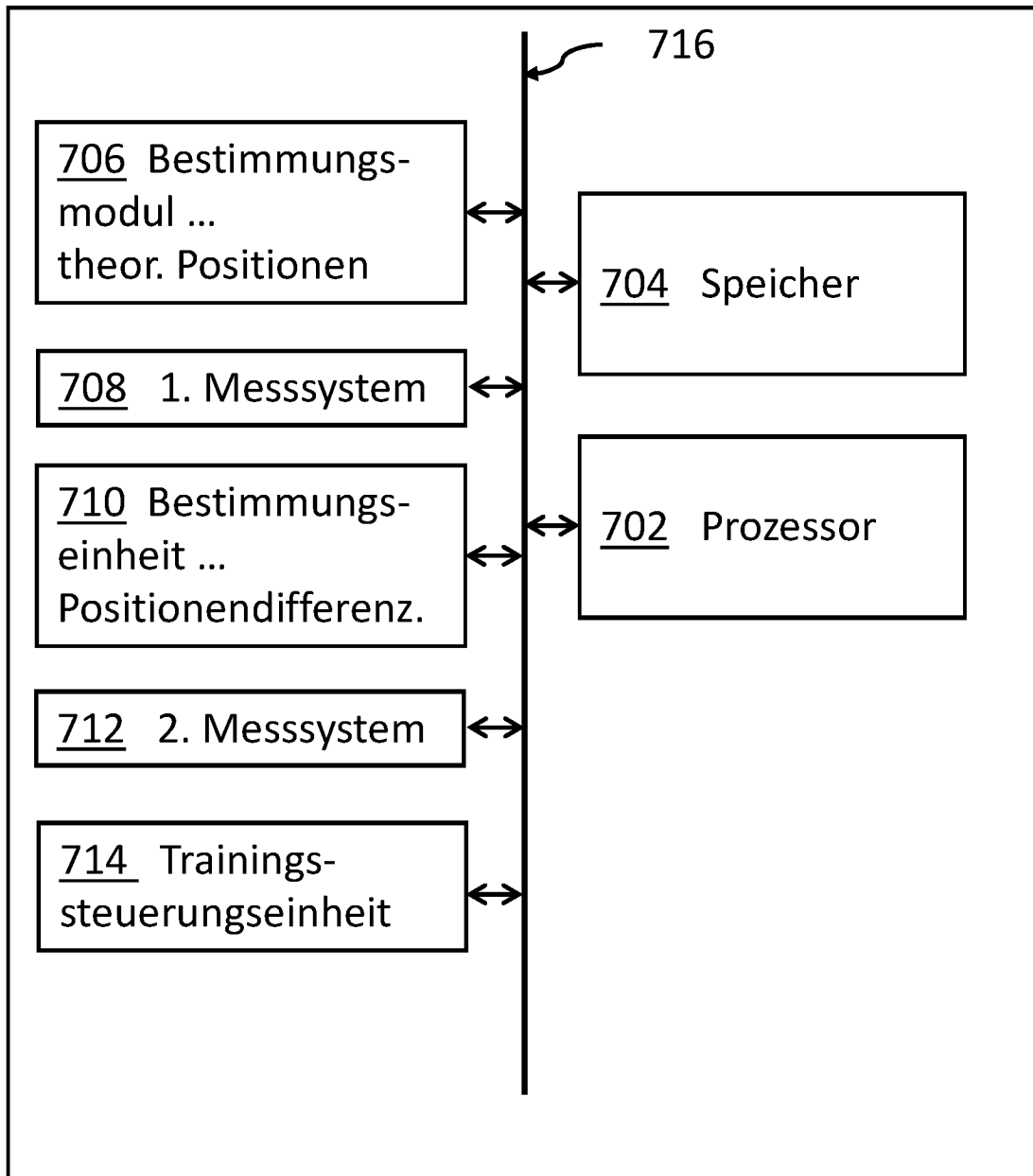


FIG. 7

800 System

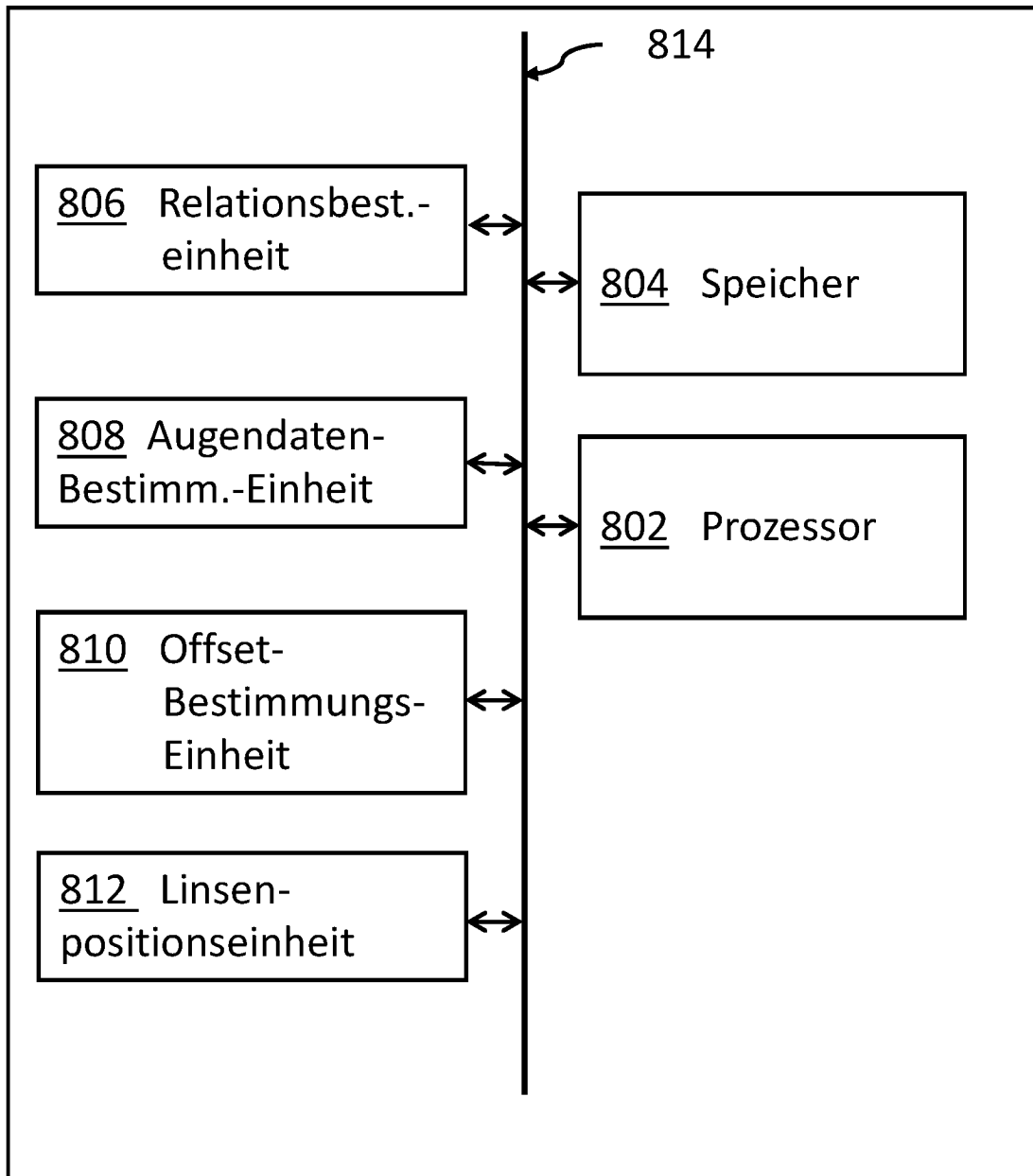


FIG. 8

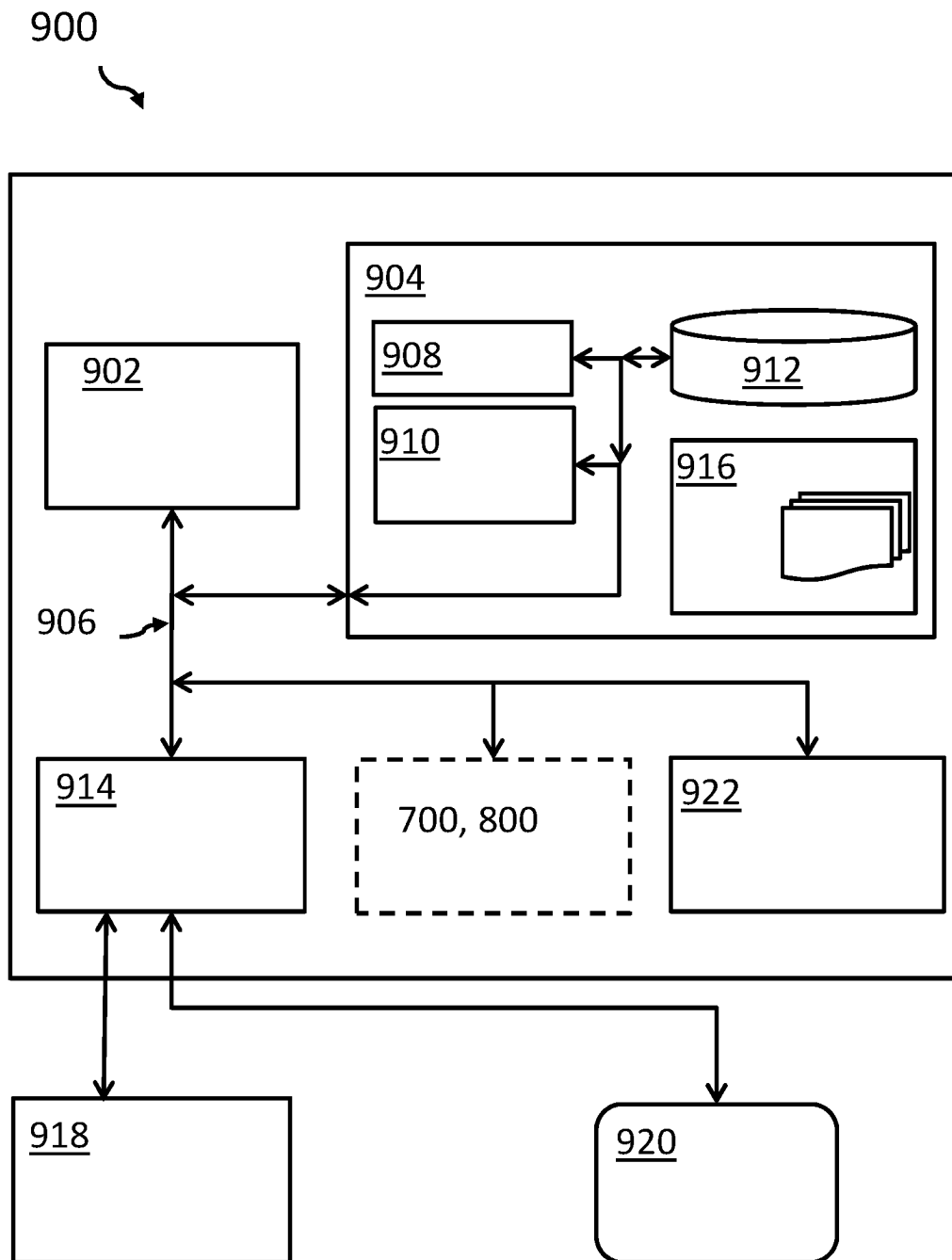


FIG. 9