



(12)

## Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2009 004 866.9**  
(22) Anmeldetag: **16.01.2009**  
(43) Offenlegungstag: **22.07.2010**  
(45) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: **04.11.2010**

(51) Int Cl.<sup>8</sup>: **A61B 3/09** (2006.01)  
**A61B 3/00** (2006.01)  
**A61B 3/103** (2006.01)

Innerhalb von drei 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:  
**Carl Zeiss Vision GmbH, 73430 Aalen, DE**

(72) Erfinder:  
**Becker, B. Monique, 73430 Aalen, DE;**  
**Cabeza-Guillén, Jesús-Miguel, 73434 Aalen, DE;**  
**Kratzer, Timo, 73434 Aalen, DE**

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
gezogene Druckschriften:

**DE 10 2005 013558 A1**  
**US 65 54 429 B1**  
**US 2004/01 69 820 A1**  
**WO 2008/0 64 379 A1**  
**WO 2008/0 49 503 A2**  
**WO 2008/0 47 385 A1**

**Goersch H.: Wörterbuch der Optometrie. 2.Aufl.  
2001, S. 2, 3**

**Diepes H.: Refraktionsbestimmung, Verlag Heinz  
Postenrieder, Pforzheim, 2.Aufl., 1975, S.414**

**Schwiegerling J.: Scaling Zernike expansion  
coefficient to different pupil size, J. Opt. Soc.  
AmA, Vol.19, No.10, S.1937- 1945**

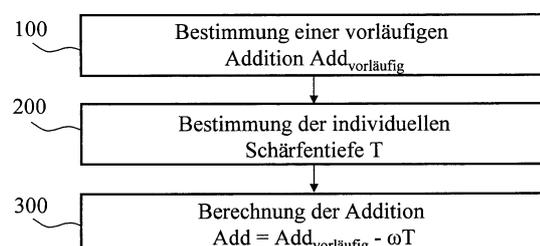
**Born M.: Principles of Optics, Cambridge  
University Press, 7th expanded edition.  
S.370-371**

**Goersch H.: Zeiss Handbuch für Augenoptik, 4.  
Aufl. 2000, S.35**

(54) Bezeichnung: **Verfahren und Vorrichtung zur Bestimmung der individuell erforderlichen Addition einer Sehhilfe**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zur Bestimmung der individuell erforderlichen Addition (Add) einer Sehhilfe für ein Auge mit folgenden Verfahrensschritten:

a) eine vorläufige Addition ( $Add_{\text{vorläufig}}$ ) wird bestimmt,  
b) die Schärfentiefe (T) des Auges wird individuell bestimmt,  
c) die Addition (Add) wird nach folgender Gleichung berechnet:  
 $Add = Add_{\text{vorläufig}} - \omega T$ , wobei  $\omega$  eine reelle Zahl darstellt, die im Bereich  $0 < \omega \leq 1$  liegt.



**Beschreibung**

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bestimmung der individuell erforderlichen Addition einer Sehhilfe, eine Vorrichtung zur Bestimmung der individuell erforderlichen Addition einer Sehhilfe, einen zur Durchführung des Verfahrens eingerichteten Computer, ein Computerprogramm und ein entsprechendes Computerprogrammprodukt mit Programmcode eingerichtet zur Ausführung des Verfahrens.

**[0002]** Nachfolgend wird zunächst eine Mehrzahl an Begriffen definiert, auf welche im Weiteren Bezug genommen wird:

Die Sehschärfe oder Visus  $V$  ist das Ausmaß der Fähigkeit eines Lebewesens, mit seinem Sehorgan Muster und Konturen in der Außenwelt als solche wahrzunehmen. Die dimensionslose Eigenschaft Visus  $V$  wird definiert zu

$$V = 1' / (\text{individuelle angulare Sehschärfe}), \quad (1)$$

wobei die Winkel-Sehschärfe das Auflösungsvermögen ist, bei dem zwei Sehobjekte noch als getrennt wahrgenommen werden (sog. Minimum Separabile).

**[0003]** Die Schärfentiefe oder Abbildungstiefe  $T$  des Auges ist nach DIN 19040, 5-3.12 die Größe des Bereiches vor und hinter dem Einstellpunkt  $A_E$ , in dem die Objektpunkte mit einer nicht wahrnehmbaren Unschärfe des Netzhautbildes abgebildet werden. Die Abbildungstiefe  $T$  des Auges hängt vom Pupillendurchmesser und von der zentralen Sehschärfe ab. Bei einem Pupillendurchmesser von 2,9 mm und einer Sehschärfe  $V$  von 1,0 ergibt sie sich theoretisch aus den 0,1 dpt entsprechenden Strecken beiderseits des Einstellpunktes  $A_E$ : 10 cm in Lichtrichtung „hinter“ dem Einstellpunkt, 10 cm in Lichtrichtung „vor“ dem Einstellpunkt ergibt eine Abbildungstiefe von 20 cm, das entspricht ca. 0,25 dpt (Quelle: Helmut Goersch, Wörterbuch der Optometrie, 2. Auflage 2001).

**[0004]** Gebrauchsentfernung  $a_{\text{Gebrauch}}$  ist die von einem Probanden gewählte Entfernung vom Augenhauptpunkt  $H_A$  zum Objekt.

**[0005]** Unter Addition Add oder Nahzusatz versteht man die Differenz zwischen der sphärischen Wirkung des Nahteils und der des Fernteils eines Gleitsicht- oder Mehrstärkenbrillenglases.

**[0006]** Akkommodation (von lateinisch accomodare „anpassen, adaptieren, anlegen, festmachen“) bezeichnet Vorgänge zur Änderung des Lichtwegs innerhalb des Auges, um Gegenstände unterschiedlicher Entfernung in der Netzhautenebene scharf abzubilden. Bei Säugetieren und Vögeln wird nach einer Theorie von Helmholtz zur Akkommodation die Form der elastischen Linse verändert, um die Brechkraft zu variieren. Eine Theorie von Schachar geht zusätzlich von einer Vorverlagerung der Augenlinse bei der Akkommodation aus.

**[0007]** Gleichzeitig mit der Anspannung des Ziliarmuskels vollziehen die Augen eine Konvergenzbewegung, das heißt, die Augen bewegen sich zueinander hin, so dass sich die Sehachsen im Fixierpunkt schneiden. Diese Konvergenzbewegung ist u. a. Voraussetzung für die Fusion der Seheindrücke beider Augen in der Nähe. Weiterhin stellt sich eine Pupillenverengung (Konvergenzmiosis) ein. Die drei gekoppelten Reaktionen bei Einstellung der Augen auf ein nahes Objekt: Akkommodation, Konvergenz und synergischer Pupillenreflex bezeichnet man als Akkommodationstrias oder Konvergenzreaktion.

**[0008]** Die Fernpunktrefraktion  $A_R$  ist der Kehrwert des Fernpunktabstands  $a_R$ , also der Entfernung  $a_{\text{Objekt}}$  des Orts des Objekts vom objektseitigen Hauptpunkt  $H_A$  des Auges, in dem das akkommodationslose Auge das Objekt scharf wahrnimmt. Die Einstellpunktrefraktion  $A_E$  ist der Kehrwert des Einstellpunktabstands  $a_E$  (veraltet: Akkommodationsentfernung), also des Abstands  $a_{\text{Objekt}}$  des Objektpunkts, der im momentanen Akkommodationszustand in der Mitte der Netzhautgrube abgebildet und damit scharf gesehen wird.

**[0009]** Als Akkommodationsgeschwindigkeit  $v_A$  in dpt/s bezeichnet man die akkommodationsbedingte Änderung der Einstellpunktrefraktion  $A_E$  pro Zeiteinheit. Die Akkommodationsgeschwindigkeit  $v_A$  ergibt sich aus dem Verhältnis von Änderung der Einstellpunktrefraktion  $A_E$  zur Akkommodationszeit  $t_A$ . Sie hängt vom Lebensalter und von den Einstellpunktrefraktionen  $A_{E_v}$ ,  $A_{E_n}$  vor und nach der Akkommodation ab und beträgt ungefähr 2 bis 5 dpt/s.

**[0010]** Unter dem in Dioptrie (dpt) angegebenen Akkommodationsbedarf  $A$  versteht man nach der DIN 5340-15 den Kehrwert des in Meter angegebenen Objektabstandes  $a_{\text{Objekt}}$  vom objektseitigen Hauptpunkt  $H_A$

des Auges. Befindet sich vor dem Auge ein optisches System, so tritt an die Stelle des Objektabstandes  $a_{\text{Objekt}}$  der Abstand des von diesem System entworfenen Bildes.

**[0011]** Die relative Akkommodation  $\Delta A_{\text{rel}}$  ist nach der DIN 5340-12 definiert als die durch Gläser mit sphärischer Wirkung erzwungene Änderung des Akkommodationserfolges  $\Delta A$  bei unveränderter Vergenzstellung und unverändert scharfem binokularem Einfachsehen.

**[0012]** Unter psychischer Akkommodation  $\Delta A_{\text{psych}}$  (proximale Akkommodation = Instrumentenmyopie) versteht man die durch nahe reale Objekte aufgrund des Bewusstseins der Nähe ausgelöste Nahakkommodation  $A_{\text{Nah}}$ .

**[0013]** Der Akkommodationsreiz  $\Delta A_{\text{Reiz}}$  ist der bei einer Änderung der Fixationsentfernung  $a_{\text{Objekt}}$  durch das dann zuerst unscharfe Netzhautbild ausgelöste Reiz zur Akkommodation.

**[0014]** Unter dem ebenfalls in Dioptrie (dpt) angegebenen Akkommodationserfolg  $\Delta A$  (veraltet: äußere Akkommodation) versteht man nach der DIN 5340-99 die Differenz zwischen Fernpunktrefraktion  $A_{\text{R}}$  und Einstellpunktrefraktion  $A_{\text{E}}$ .

**[0015]** Die DIN 5340-20 definiert den maximalen Akkommodationserfolg oder die Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max}}$  als Differenz zwischen Fernpunktrefraktion  $A_{\text{R}}$  und Nahpunktrefraktion  $A_{\text{p}}$ . Die Nahpunktrefraktion  $A_{\text{p}}$  ist der Kehrwert des Abstands  $a_{\text{p}}$  des Augenhauptpunkts  $H_{\text{A}}$  zum scharf gesehenen Objektpunkt bei stärkster Akkommodation.

**[0016]** Bei Kleinkindern beträgt die Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max}}$  ca. 14 dpt. Bezogen auf die Gesamtbrechkraft des Auges von ca. 58 dpt entspricht dies einer Variation von ca. 25%. Im hohen Alter fällt die Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max}}$  auf Werte unter 2 dpt bzw. 4% ab. Dadurch vergrößert sich der kleinste Abstand, der Nahpunkt  $a_{\text{p}}$ , in dem Gegenstände noch scharf gesehen werden können, von ca.  $a_{\text{p}} = 7$  cm bei Kleinkindern auf mehr als  $a_{\text{p}} = 50$  cm im hohen Alter.

**[0017]** Eine exakte Trennung zwischen Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max}}$  und Schärfentiefe  $T$  des menschlichen Auges ist bis dato nicht möglich. Die Summe aus tatsächlicher, durch die o. a.

**[0018]** Mechanismen des Akkommodationstrias definierter Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max}}$  und Schärfentiefe  $T$  wird daher nachfolgend als physiologische Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max}}^*$  bezeichnet.

**[0019]** Im Jahr 1922 hat Duane anhand der Seheindrücke von 5000 normalsichtigen Probanden die Altersabhängigkeit der durchschnittlichen physiologischen Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max,m}}^*$  ermittelt. Bei der Ermittlung dieser Daten wurde also nicht zwischen Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max}}$  und Schärfentiefe  $T$  unterschieden, d. h. die ermittelte Kurve ist eine Überlagerung beider Effekte. Die mittlere Kurve **802** des Diagramms nach der [Fig. 15](#) zeigt diese Altersabhängigkeit der durchschnittlichen physiologischen Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max,m}}^*$ . Die obere und die untere Kurve **804**, **806** repräsentieren jeweils die physiologische Grenze der Dispersion. Das Diagramm nach der [Fig. 16](#) zeigt die entsprechende Altersabhängigkeit der minimalen Sehweite  $a_{\text{p}}$ .

**[0020]** Ursächlich für die Abnahme der Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max}}$  ist eine im zunehmenden Alter herabgesetzte Elastizität der Linsenkapsel bzw. eine Linsenverdickung durch lebenslanges Wachstum der Linsenschale (Helmholtz-Theorie). Es wurde festgestellt, dass selbst bei verschwindender Elastizität der Linsenkapsel ein Rest an Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max}}$  verbleibt. Die sogenannte Schachar-Theorie, nach der zusätzlich von einer Vorverlagerung der Augenlinse bei der Akkommodation ausgegangen wird, kann den verbleibenden Rest an Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max}}$  erklären, welcher auch mit zunehmendem Alter nicht verloren geht.

**[0021]** Fällt die Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max}}$  inkl. Schärfentiefe  $T$  mit zunehmendem Alter (siehe [Fig. 15](#)) unter etwa 3 Dioptrien (die Zeitung muss zum Lesen mit Fernbrille in über 35 cm Abstand gehalten werden) spricht man von einer Alterssichtigkeit (Presbyopie). Eine einfache Lesebrille, eine Bifokalbrille, eine Gleitsichtbrille oder Mehrstärken-Kontakt- oder Intraokularlinsen können die Presbyopie ausgleichen.

**[0022]** Unter Gebrauchsakkommodation  $\Delta A_{\text{Gebrauch}}$  versteht man diejenige Akkommodation  $A$ , welche über einen längeren Zeitraum ohne Beschwerden aufgebracht werden kann. Sie beträgt etwa  $\frac{1}{2}$  (Reiner) bis  $\frac{2}{3}$  (Schober) der Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max}}$ .

**[0023]** Aus dem Stand der Technik ist eine Vielzahl an Verfahren zur Ermittlung einer für eine fehlsichtige Per-

son geeignet und an deren Bedürfnissen angepassten Addition  $A_{dd}$  einer multifokalen oder progressiven Brillen-, Kontakt- oder Intraokularlinse bekannt. Alle diese Verfahren haben gemein, dass die Addition Add den Kehrwert der minimalen Gebrauchsentfernung  $a_{\text{Gebrauch,min}}$  nicht überschreiten sollte. Sie unterscheiden sich jedoch in der Bestimmung des tatsächlichen Werts der Addition Add. Dieser Sachverhalt wird nachfolgend anhand eines einfachen Rechenbeispiels erläutert.

**[0024]** Es wird angenommen, ein Proband empfindet es als angenehm, beim Lesen ein Schriftstück in einem nachfolgend als  $a_{\text{Gebrauch}}$  bezeichneten Abstand von 40 cm zum Auge zu halten. Weiterhin wird angenommen, dass der minimale  $a_{\text{Gebrauch,min}}$  in dem der Proband das Schriftstück jemals hält, 33 cm beträgt. Der Kehrwert des minimalen  $a_{\text{Gebrauch,min}}$  beträgt 3 dpt. Diese 3 dpt stellen den Akkommodationsbedarf  $A$  für die minimale  $a_{\text{Gebrauch,min}}$  dar.

**[0025]** Wäre der Proband z. B. 50 Jahre alt, so besäße er nach dem Diagramm von Duane nach der [Fig. 15](#) eine Restakkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max}}$  von etwa 2 dpt. Weil der tatsächlich verwendete Akkommodationsaufwand, die  $\Delta A_{\text{Gebrauch}}$ , nach der Theorie von Reiner etwa die Hälfte (nach der Theorie von Schober etwa zwei Drittel) der noch vorhandenen Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max}}$  beträgt, würde er etwa 1 dpt (bis 1,5 dpt nach Schober) seiner  $\Delta A_{\text{max}}$  tatsächlich auch verwenden. Die richtige Addition Add für eine Brillen-, Kontakt oder Intraokularlinse für den Probanden bei dem vorstehend angegebenen minimalen  $a_{\text{Gebrauch,min}}$  des Probanden von 33 cm würde also 2 dpt nach Reiner (bzw. 1,5 dpt nach Schober) betragen.

**[0026]** Weil sich in diesem Beispiel die Schriftstücke beim Lesen jedoch überwiegend in einer Gebrauchsentfernung  $a_{\text{Gebrauch}}$  (vorliegend der Leseentfernung) von 40 cm zum Auge des Probanden (der Kehrwert  $1/a_{\text{Gebrauch}}$  hiervon ist 2,5 dpt) befinden, würde bei einer  $\Delta A_{\text{Gebrauch}}$  von etwa 1 dpt (bzw. 1,5 dpt nach Schober) eine Addition Add von 1,5 dpt (bzw. 1 dpt nach Schober) in zufriedenstellender Weise die Bedürfnisse des Probanden befriedigen. Dank seiner Restakkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max}}$  (einschließlich Schärfentiefe  $T$ ) ist er in der Lage in einer Leseentfernung  $a_{\text{Gebrauch}}$  von 33 cm mit einer Addition Add von lediglich 1,5 dpt (bzw. 1 dpt. nach Schober) scharf zu sehen. Die an die Bedürfnisse des Probanden am Besten angepasste Addition Add der Brillen-, Kontakt oder Intraokularlinse beträgt also nach der Theorie von Reiner 1,5 dpt (bzw. 1,0 dpt nach Schober) und sollte 2,0 dpt nicht übersteigen.

**[0027]** Bedauerlicherweise werden in der Praxis heutzutage zumeist höhere Additionen Add verschrieben, was häufig zu einer Unzufriedenheit des Trägers der Sehhilfe mit dem resultierenden Linsendesign führt.

**[0028]** Nachfolgende Abschnitte stellen einen Überblick über die nach Auffassung der Erfinder am häufigsten benutzten Verfahren zur Bestimmung der Addition Add einer Brillen-, Kontakt- oder Intraokularlinse und die jeweiligen Unzulänglichkeiten der Methoden dar.

### 1. Additionsbestimmung anhand einer Schätztabelle

**[0029]** Die am häufigsten verwendete Methode zur Additionsbestimmung bedient sich einer nachfolgend als Tabelle 1 wiedergegebenen Schätztabelle.

Tabelle 1: Schätztabelle zur Additionsbestimmung einer Brillen-, Kontakt- oder Intraokularlinse

Alter (Jahre)	Addition Add (dpt) für eine Gebrauchsentfernung von 33 cm	Addition Add (dpt) für eine Gebrauchsentfernung von 40 cm
45	1,0	0,75
45 ... 48	1,5	1,00
48 ... 50	2,0	1,25
50 ... 65	2,5	1,75

**[0030]** Diese Schätztabelle orientiert sich an der mittleren physiologischen Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max,m}}^*$  der Altersstufe und der gewünschten Gebrauchsentfernung  $a_{\text{Gebrauch}}$ . Sie basiert auf der oben beschriebenen und in der [Fig. 15](#) dargestellten Kurve nach Duane.

**[0031]** Bei diesem Verfahren wird zunächst die für den Probanden geeignete Gebrauchsentfernung  $a_{\text{Gebrauch}}$  bestimmt. Diese stellt die vom Probanden am häufigsten gebrauchte Entfernung zwischen dem objektseitigen

Hauptpunkt  $H_A$  des Auges und wahrzunehmendem Objekt dar.

**[0032]** Die Addition Add wird dann entsprechend dem Alter des Probanden anhand der oben gezeigten Tabelle abgeschätzt.

**[0033]** Da dieses Verfahren allein auf Schätzungen beruht und nur das Alter und die Gebrauchsentfernung  $a_{\text{Gebrauch}}$  berücksichtigt, ist es sehr ungenau.

**[0034]** Die Unzulänglichkeit dieser Methode wurde bereits früh erkannt. Es wurden Methoden entwickelt, die eine Überprüfung und gegebenenfalls auch eine Korrektur der anhand der Schätztable bestimmten Addition Add ermöglichen. Nachfolgend werden einige ausgewählte Beispiele vorgestellt.

### 2. Additionsbestimmung anhand der Schätztable nach 1. mit Rot-Grün-Kontrastausgleich

**[0035]** Bei diesem Verfahren werden dem Probanden in der entsprechenden Gebrauchsentfernung  $a_{\text{Gebrauch}}$  binokular rote und grüne Optotypen mit der nach dem unter 1. beschriebenen Verfahren ermittelten Addition Add<sub>vorläufig</sub> entsprechenden dioptrischen Wirkung präsentiert. Der Proband soll die Optotypen auf Kontrastgleichheit vergleichen. Konkret vergleicht der Proband die Helligkeiten der roten und grünen Foki der Optotypen. Wenn der rote Fokus der Optotypen dunkler erscheint, muss die Addition Add verringert oder der Objekt- abstand  $a_{\text{Gebrauch}}$  erhöht werden. Wenn der grüne Fokus der Optotypen dunkler erscheint, muss die Addition Add vergrößert oder der Objekt- abstand  $a_{\text{Gebrauch}}$  verringert werden. Wenn die Helligkeiten der Optotypen mit roten und grünen Foki gleich empfunden werden, ist die zugehörige Addition Add richtig.

**[0036]** Auch diese Methode ist sehr ungenau, da sie ebenfalls auf der Verwendung der o. a. Schätztable beruht. Darüber hinaus beruht sie auf der subjektiven Empfindung des Probanden. Gibt der Proband an, alle Optotypen spontan mit derselben Helligkeit zu sehen, ist der Optiker gehalten, den Objekt- abstand  $a_{\text{Gebrauch}}$  zu verändern, um zu prüfen, ob der Proband auf den Test überhaupt reagiert. Darüber hinaus hat sich herausgestellt, dass unter 50-jährige Probanden nicht exakt auf die Objektebene akkommodieren, sondern geringfügig vor diese. Die Differenz wird durch die Schärfentiefe T des menschlichen Auges ausgeglichen mit dem Effekt, dass der Optiker eine zu hohe Addition Add ermittelt. Je nach Alter wird daher häufig ein Korrekturbetrag entsprechend der nachfolgend angegebenen Tabelle 2 abgezogen:

Tabelle 2: Korrekturbetrag für nach Rot-Grün-Kontrastausgleich bestimmte Addition Add einer Brillen-, Kontakt- oder Intraokularlinse

Alter (Jahre)	Korrekturbetrag (dpt)
unter 50	0,5
50 ... 60	0,25

**[0037]** Da dieses Verfahren allein auf Schätzungen beruht und nur das Alter, die Gebrauchsentfernung  $a_{\text{Gebrauch}}$  und den binokularen Kontrast berücksichtigt, ist es sehr ungenau.

### 3. Additionsbestimmung unter Berücksichtigung der subjektiv bestimmten Akkommodationsbreite

**[0038]** Bei diesem Verfahren wird dem Probanden eine geeignete Sehprobe (z. B. die sogenannte Duane'sche Strichfigur) in ausreichend großer Entfernung dargeboten. Dann wird die Entfernung zwischen Auge und Sehprobe kontinuierlich verringert, bis der Proband angibt, die Sehprobe unscharf wahrzunehmen. Der Kehrwert dieser Entfernung zwischen Objekt und Hauptpunkt  $H_A$  entspricht der Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max}}$  inklusive der Schärfentiefe T des Auges. Als Addition Add nimmt man einem Vorschlag von Reiner folgend die Hälfte dieses Kehrwerts. Reiner geht nämlich davon aus, dass die tatsächliche Gebrauchsakkommodation  $\Delta A_{\text{Gebrauch}}$  gerade die Hälfte der Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max}}^*$  beträgt. Schober schlägt anstelle des Faktors  $\frac{1}{2}$  einen Faktor  $\frac{2}{3}$  vor.

**[0039]** Wenn der Test monokular durchgeführt wird, wird der Akkommodationsstimulus (Akkommodationsreiz  $\Delta A_{\text{Reiz}}$ ) allein durch die retinale Unschärfe und das Bewusstsein der Nähe ausgelöst, wohingegen beim binokularen Test auch die Konvergenz der Augen den Akkommodationsstimulus  $\Delta A_{\text{Reiz}}$  beeinflusst. Binokulares Sehen erhöht die Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max}}^*$  um etwa 0,5 dpt.

**[0040]** Die Methode berücksichtigt lediglich die subjektiv bestimmte physiologische Akkommodationsbreite

$\Delta A_{\max}^*$  welche sich aus der Summe der tatsächliche Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\max}$  und der Schärfentiefe T errechnet:

$$\Delta A_{\max}^* = \Delta A_{\max} + T \quad (2)$$

und die geschätzte Gebrauchsakkommodation  $\Delta A_{\text{Gebrauch}}$  und ist daher sehr ungenau.

#### 4. Additionsbestimmung unter Berücksichtigung der relativen Akkommodation

**[0041]** Bei dieser Methode wird zunächst wiederum mit der Schätztable (Tabelle 1) unter Anwendung des unter 1. beschriebenen Verfahrens eine geeignete Addition  $\text{Add}_{\text{vorläufig}}$  ermittelt. Dann wird eine geeignete Sehprobe (z. B. Duane'sche Strichfigur) in der Gebrauchsentfernung  $a_{\text{Gebrauch}}$  fixiert. Die Addition  $\text{Add}_{\text{vorläufig}}$  wird nun bis zu der Addition Add+ erhöht, bei der der Proband gerade noch scharf sieht. Danach wird die Addition  $\text{Add}_{\text{vorläufig}}$  erniedrigt bis zu der Addition Add-, bei der der Proband gerade noch scharf sieht. Die Summe aus der stärksten Addition Add+ und der schwächsten Addition Add- dividiert durch 2 ergibt die notwendige Addition

$$\text{Add} = (\text{Add+} + \text{Add-})/2 \quad (3)$$

**[0042]** Die Methode berücksichtigt allein das Alter, die Gebrauchsentfernung  $a_{\text{Gebrauch}}$ , die relative Akkommodation  $\Delta A_{\text{rel}}$  und eine Abschätzung der Gebrauchsakkommodation  $\Delta A_{\text{Gebrauch}}$  und ist daher ungenau.

**[0043]** Alle vorstehend beschriebenen Verfahren zur Bestimmung der Addition Add nach dem betriebsintern bekannten Stand der Technik weisen also Ungenauigkeiten auf, da sie auf Annahmen bzw. Schätzungen beruhen. Da alle genannten Verfahren subjektive Verfahren sind, unterlegen sie weiterhin den allgemeinen Nachteilen subjektiver Messverfahren (nämlich u. a. Validität der Aussagen des Probanden, Wahrnehmung des Probanden in der Messsituation etc.).

**[0044]** Aus der DE 10 2005 013 558 A1 ist es bekannt, zur Korrektur der Presbyopie die höheren Aberrationen und die K-Werte des Auges des Probanden zu messen. Dabei wird die Schärfentiefe berücksichtigt.

**[0045]** Die WO 2008/047385 A1 betrifft eine Vorrichtung und ein Verfahren zur subjektiven Bestimmung der Refraktionsfehler eines Auges. Dem Auge werden gleichzeitig zwei Ziele in unterschiedlichen Richtungen dargeboten. Der Abstand der Ziele ist größer als die Schärfentiefe des Auges, so dass die Ziele nicht gleichzeitig scharf wahrgenommen werden können. Aus dem von Probanden bevorzugt gewählten Ziel wird der Refraktionsfehler bestimmt.

**[0046]** Die US 2004/0169820 A1 beschreibt ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Bestimmung einer optischen Korrektur der Altersfehlsichtigkeit eines Patienten. Die Kombination aus Fernsicht und Nahsicht wird dabei verbessert, indem die Pupillengröße, die Restakkommodation und die Konvergenz des Patienten berücksichtigt wird. Es wird ein iteratives Optimierungsverfahren vorgeschlagen.

**[0047]** Aus der WO 2008/049503 A2 ist es bekannt, aus der subjektiven und objektiven Refraktion eines Probanden die für den Patienten beste Verordnung zu ermitteln.

**[0048]** Die Aufgabe der Erfindung besteht daher darin, ein gegenüber dem Stand der Technik präziseres Verfahren zur Bestimmung der individuell erforderlichen Addition einer Sehhilfe und eine zur Durchführung des Verfahrens geeignete Vorrichtung bereitzustellen.

**[0049]** Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren zur Bestimmung der individuell erforderlichen Addition einer Sehhilfe mit den Merkmalen des Patentanspruchs 1 sowie durch eine entsprechende Vorrichtung mit den Merkmalen des Patentanspruchs 25, ein Verfahren zur Bestimmung der individuell erforderlichen Addition einer Sehhilfe mit den Merkmalen des Patentanspruchs 9 sowie durch eine entsprechende Vorrichtung mit den Merkmalen des Patentanspruchs 31, einen Computer mit den Merkmalen des Patentanspruchs 21 sowie ein Computerprogramm mit den Merkmalen des Patentanspruchs 22 bzw. ein Computerprogrammprodukt mit den Merkmalen des Patentanspruchs 24 gelöst. Vorteilhafte Ausführungen und Weiterbildungen der Erfindung sind in den Unteransprüchen angegeben.

**[0050]** Die Erfinder haben festgestellt, dass die meisten der oben beschriebenen Verfahren auf dem Alter und dem Standardgebrauchsabstand  $a_{\text{Gebrauch}}$  von 40 cm basieren und die tatsächliche Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\max}$ , die tatsächliche Schärfentiefe T als auch die Gewohnheiten des Probanden nicht oder nur unzureichend

berücksichtigen. Diese Tatsache hat zur Folge, dass die Addition Add im Allgemeinen zu hoch angenommen wird. Eine unnötig hohe Addition Add verschlechtert das Design in Form von Verkleinerungen der nutzbaren Sehbereiche vor allem im Zwischen- und Nahbereich der Korrekturlinse mit den sich daraus ergebenden merk-  
baren Nachteilen für den Brillenträger.

**[0051]** Die Erfindung beruht nunmehr auf der Idee, die Schärfentiefe T des Auges zu berücksichtigen und/oder bislang lediglich abgeschätzte Eigenschaften des Auges der jeweiligen Probanden individuell zu bestimmen und anhand dieser vorzugsweise objektiv ermittelten Eigenschaften die erforderliche und am besten geeignete Addition Add der Sehhilfe für den Probanden zu ermitteln.

**[0052]** Ein erfindungsgemäßes Verfahren zur Bestimmung der individuell erforderlichen Addition Add einer Sehhilfe für ein Auge umfasst die folgenden Verfahrensschritte:

- a) Bestimmung einer vorläufigen Addition  $Add_{\text{vorläufig}}$  beispielsweise mit einem der vorstehend beschriebenen Verfahren,
- b) Bestimmung der individuellen Schärfentiefe T des Auges,
- c) Berechnung der Addition Add nach folgender Gleichung:

$$Add = Add_{\text{vorläufig}} - \omega T, \quad (4)$$

wobei  $\omega$  eine reelle Zahl darstellt, die im Bereich  $0 < \omega \leq 1$  liegt. Üblicherweise liegen die Werte für  $\omega$  im Bereich zwischen  $\frac{1}{4} \leq \omega \leq \frac{3}{4}$ . Geeignete Werte für den Faktor  $\omega$  zur Gewichtung der Schärfentiefe T sind also z. B. 0,5 oder  $\frac{2}{3}$ .

**[0053]** Die entsprechende Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens umfasst demgemäß folgende Komponenten:

- a) eine Additionsbestimmungseinrichtung zur Bestimmung einer vorläufigen Addition  $Add_{\text{vorläufig}}$  für ein Auge eines Probanden
- b) eine Schärfentiefenbestimmungseinrichtung zur Bestimmung der individuellen Schärfentiefe T des Auges des Probanden und
- c) eine Berechnungseinrichtung zur Berechnung der Addition Add nach der obigen Gleichung (4).

**[0054]** Ein weiteres erfindungsgemäßes Verfahren zur Bestimmung der individuell erforderlichen Addition Add einer Sehhilfe für ein Auge umfasst folgende Verfahrensschritte:

- a) die Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max}}$  wird individuell und objektiv bestimmt,
- b) die Gebrauchsentfernung  $a_{\text{Gebrauch}}$  wird individuell bestimmt,
- c) die Addition Add wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$Add = 1/a_{\text{Gebrauch}} - \sigma \Delta A_{\text{max}}, \quad (5)$$

wobei  $\sigma$  eine reelle Zahl darstellt, die im Bereich  $0 < \sigma \leq 1$  liegt. Meist liegen die Werte für  $\sigma$  im Intervall  $\frac{1}{4} \leq \sigma \leq \frac{3}{4}$ .  $\sigma$  kann also z. B.  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{2}{3}$  oder  $\frac{5}{12}$  sein.

**[0055]** Eine entsprechende erfindungsgemäße Vorrichtung umfasst

- a) eine Akkommodationsbreitenbestimmungseinrichtung zur individuellen und objektiven Bestimmung der Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max}}$ ,
- b) eine Gebrauchsentfernungsbestimmungseinrichtung zur individuellen Bestimmung der Gebrauchsentfernung  $a_{\text{Gebrauch}}$  und
- c) eine Additionsberechnungseinrichtung zur Berechnung der Addition Add nach vorstehender Gleichung (5).

**[0056]** Die oben angegebenen erfindungsgemäßen Verfahren können z. B. auf einem Computer ausgeführt werden, der zur Ausführung des jeweiligen Verfahrens entsprechend eingerichtet ist.

**[0057]** Ein Computerprogramm bzw. ein Computerprogrammprodukt mit Programmcode kann zur Ausführung des jeweiligen Verfahrens auf einem Computer eingerichtet sein. Das Computerprogramm kann auf einem maschinenlesbaren Datenträger abgespeichert sein.

**[0058]** Die vorläufige Addition  $Add_{\text{vorläufig}}$  kann z. B. anhand einer Schätzung der physiologischen Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max}}^*$  bestimmt werden. Beispielsweise kann das vorstehend beschriebene Diagramm nach Duane verwendet werden. Die Berechnung der vorläufigen Addition  $Add_{\text{vorläufig}}$  kann z. B. mit Hilfe eines der vor-

stehend beschriebenen Verfahren 1 oder 2 erfolgen. Diese Verfahren zur Berechnung der vorläufigen Addition  $Add_{\text{vorläufig}}$  zeichnen sich meist durch deren Bekanntheit bei den anwendenden Optikern aus. Eine Schulung der Optiker zur Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens kann daher weitgehend entfallen.

**[0059]** Die vorläufige Addition  $Add_{\text{vorläufig}}$  kann auch anhand einer Schätzung der tatsächlichen Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max}}$  bestimmt werden. Eine Schätzung der tatsächlichen Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max}}$  kann z. B. darin bestehen, dass der Proband mit Fernkorrektur eine geeignete Leseprobe so nah zum Auge führt, bis die Leseprobe gerade unscharf erscheint. Der Kehrwert des in Meter gemessenen Abstandes  $a_{\text{Gebrauch}}$  der Leseprobe zum Hauptpunkt  $H_A$  des Auges des Probanden ergibt die Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max}}$ .

**[0060]** Eine Schätzung der Gebrauchsakkommodation  $\Delta A_{\text{Gebrauch}}$  kann ebenfalls als Grundlage der Bestimmung der vorläufigen Akkommodation  $Add_{\text{vorläufig}}$  dienen. Die Gebrauchsakkommodation  $\Delta A_{\text{Gebrauch}}$  wird z. B. nach Reiner zur Hälfte der Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max}}$  angenommen. Schober nimmt diese zu 2/3 der Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max}}$  an.

**[0061]** Die vorläufige Addition  $Add_{\text{vorläufig}}$  kann z. B. auch anhand einer individuellen Messung der physiologischen Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max}}^*$  berechnet werden. Das in der Beschreibungseinleitung unter 3. beschriebene Beispiel stellt einen Vorschlag zur Bestimmung der vorläufigen Addition  $Add_{\text{vorläufig}}$  nach dieser Methode dar.

**[0062]** Die Bestimmung der physiologischen Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max}}^*$  kann z. B. auch dadurch erfolgen, dass der Nahpunkt in der Entfernung  $a_p$  mittels Heranführen einer geeigneten Testfigur durch den für die Ferne vollkorrigierten Probanden monokular ermittelt wird. Da der Nahpunkt bekanntermaßen die höchste Anspannung der Akkommodation fordert, ist es nötig, die Messung möglichst schnell durchzuführen, nämlich innerhalb der Akkommodationszeit ( $t < t_A$ ). Ansonsten läuft man Gefahr, nicht die physiologische Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max}}^*$  als vielmehr die Gebrauchsakkommodation  $\Delta A_{\text{Gebrauch}}$  zu messen. Die physiologische Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max}}^*$  ergibt sich dann aus dem Kehrwert des in Meter gemessenen Nahpunktabstandes  $a_p$ :

$$\Delta A_{\text{max}}^* = 1/a_p \quad (6)$$

**[0063]** Eine andere Möglichkeit besteht darin eine geeignete Testfigur auf eine Einstellentfernung  $a_E$  von z. B. 40 cm (entsprechend einer Einstellpunktrefraktion  $A_E$  von 2,5 dpt) zum Augenhauptpunkt  $H_A$  des Probanden zu positionieren. Sieht der Proband die Testfigur scharf, werden solange binokular negative sphärische Gläser vorgegeben, bis die Testfigur gerade so verschwimmt. Sieht der Proband die Testfigur nicht scharf, werden solange binokular positiv sphärische Gläser vorgegeben, bis die Testfigur gerade so scharf erscheint. Der mit entweder negativen oder positiven sphärischen Gläsern ermittelte Wert  $S'_{\text{binokular}}$  der sphärischen Wirkung des so ermittelten Glases wird notiert. Die physiologische Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max}}^*$  ergibt sich dann aus der Gleichung:

$$\Delta A_{\text{max}}^* = A_E - S'_{\text{binokular}} \quad (7)$$

mit  $A_E = 2,5$  dpt. Ein Nachteil dieser Möglichkeit stellt die durch die binokulare Messsituation Konvergenz hervorgerufene dar.

**[0064]** Eine weitere Möglichkeit, die physiologische Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max}}^*$  zu bestimmen, wird im Folgenden beschrieben:

Anhand der Kurve aus [Fig. 16](#) wird dem Probanden eine geeignete Testfigur in entsprechendem Abstand  $a_{\text{Gebrauch}}$  (entspricht der für das Alter des Probanden durchschnittlichen minimalen Sehweite  $a_p$ ) vorgehalten. Wird die Testfigur dort scharf erkannt, werden solange monokular negative sphärische Gläser vorgegeben, bis die Testfigur gerade verschwimmt. Wird die Testfigur dort nicht scharf erkannt, werden solange monokular positive sphärische Gläser vorgegeben, bis die Testfigur gerade so verschwimmt. Die individuelle physiologische Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max}}^*$  ergibt sich dann aus dem Kehrwert der durchschnittlichen minimalen Sehweite  $a_p$ . Duane (entspricht der durchschnittlichen physiologischen Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max}}^*$  aus der mittleren Kurve **802** des Diagramms nach der [Fig. 15](#)) und dem ermittelten Wert der vorgegebenen Gläser  $S'_{\text{monokular}}$ . Dazu gilt folgende Gleichung:

$$\Delta A_{\text{max}}^* = \Delta A_{\text{max,m}}^* - S'_{\text{monokular}} \quad (8)$$

wobei

$$\Delta A_{\max, m}^* = 1/a_{\text{PDuane}} \quad (9)$$

ist.

**[0065]** In den drei vorstehend im Detail beschriebenen Varianten kann ein Akkommodometer wie in [Fig. 17](#) dargestellt verwendet werden (aus Heinz Diepes, „Refraktionsbestimmung“, Verlag Heinz Postenrieder, Pforzheim, 2. Auflage, 1975, S. 414).

**[0066]** Es kann auch eine individuelle Messung der tatsächlichen Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\max}^*$  durchgeführt werden. Aus der US 6,554,429 B1 ist es mittlerweile z. B. bekannt, die tatsächliche Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\max}$  mit Hilfe einer Wellenfrontmessung objektiv zu bestimmen. Eine Durchführung der Methode unter Berücksichtigung der objektiv bestimmten Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\max}$  verbessert die Genauigkeit signifikant.

**[0067]** Schließlich kann auch eine Messung der tatsächlichen individuellen Gebrauchsakkommodation  $\Delta A_{\text{Gebrauch}}$  durchgeführt und anhand dieser wiederum die vorläufige Addition  $\text{Add}_{\text{vorläufig}}$  bestimmt werden. Ein Beispiel stellt das in der Beschreibungseinleitung unter 4. beschriebene Verfahren dar.

**[0068]** Für die Bestimmung der Gebrauchsakkommodation  $\Delta A_{\text{Gebrauch}}$  kann dem für die Ferne vollkorrigierten Probanden auch eine geschätzte Addition  $\text{Add}_{\text{geschätzt}}$  in die Messbrille eingesetzt werden. Der Proband wird nun aufgefordert, eine geeignete Testfigur monokular so nah zum Auge heranzuführen, bis er die Testfigur gerade noch scharf erkennen kann. Dies entspricht dem Nahpunkt  $a_p$ . Nun wird der Proband aufgefordert, so lange monokular auf die Testfigur zu blicken, bis diese aufgrund der nachlassenden Akkommodation  $\Delta A$  unscharf erscheint. In einem nächsten Schritt soll der Proband nun die Testfigur so weit von sich weg halten, bis diese wieder scharf erscheint (entspricht dem Einstellpunkt  $a_E$ ). Der Kehrwert des in Meter gemessenen Abstandes  $a_E$  zum Einstellpunkt ergibt die Gebrauchsakkommodation  $\Delta A_{\text{Gebrauch}}$ :

$$\Delta A_{\text{Gebrauch}} = 1/a_E \quad (10)$$

**[0069]** In einer besonderen Ausgestaltung der Erfindung kann auch eine Gebrauchsentfernung  $a_{\text{Gebrauch}}$  bestimmt werden und die vorläufige Addition  $\text{Add}_{\text{vorläufig}}$  nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$\text{Add}_{\text{vorläufig}} = 1/a_{\text{Gebrauch}} - \sigma \Delta A_{\max} \quad (11)$$

wobei  $\sigma$  eine reelle Zahl darstellt, die im Bereich  $0 \leq \sigma \leq 1$  liegt. Da die vorläufige Addition  $\text{Add}_{\text{vorläufig}}$  eine reine Rechengröße darstellt, kann diese tatsächlich auch mit dem Kehrwert des Gebrauchsabstands  $a_{\text{Gebrauch}}$  gleichgesetzt werden.

**[0070]** Die Gebrauchsentfernung  $a_{\text{Gebrauch}}$  kann z. B. individuell bestimmt werden, indem einem Probanden ein Gegenstand dargeboten wird und als Gebrauchsentfernung  $a_{\text{Gebrauch}}$  der Abstand vom objektseitigen Hauptpunkt  $H_A$  des Auges zu dem Ort angenommen wird, an dem sich der Gegenstand beim entspannten Betrachten durch den Probanden befindet. Dabei ist die individuelle Bestimmung einer Gebrauchsentfernung  $a_{\text{Gebrauch}}$  des Probanden nicht grundsätzlich auf die gewünschte Leseentfernung beschränkt, sondern kann auch für alle anderen gewünschten Entfernungen, wie z. B. Arbeit an einem Rechner mit Monitor, bestimmt werden.

**[0071]** Die Gebrauchsentfernung  $a_{\text{Gebrauch}}$  kann auch durch Anamnese mit Angabe der Hauptsehaufgaben und den dazugehörigen Entfernungen durch den Probanden bestimmt werden. Beide o. a. Methoden stellen subjektive Verfahren dar, die sich aber durch geeignete Fragestellungen an den Probanden bis zu einem gewissen Grad objektivieren lassen.

**[0072]** Häufig ist es jedoch präziser, die Gebrauchsentfernung  $a_{\text{Gebrauch}}$  objektiv individuell zu bestimmen. Objektiv kann die Gebrauchsentfernung  $a_{\text{Gebrauch}}$  z. B. dadurch ermittelt werden, dass eine Messvorrichtung eine oder verschiedene für den Probanden wichtige Gebrauchsentfernungen  $a_{\text{Gebrauch}}$  automatisch misst und gegebenenfalls mittelt. Die WO 2008/064379 A1 beschreibt beispielsweise eine Vorrichtung zum Erfassen der Lese-Sehschärfe mit der sich auch die Gebrauchsentfernung  $a_{\text{Gebrauch}}$  bestimmen lässt. Es sind Mittel vorgesehen, die den vom Probanden frei wählbaren Leseabstand  $a_{\text{Gebrauch}}$  von dem dargestellten Text oder der dargestellten Graphik auf einer Präsentationsfläche messen.

**[0073]** Die Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\max}$  kann mit Hilfe unterschiedlichster Geräte individuell und objektiv bestimmt werden. Die tatsächliche Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\max}$  kann – wie oben bereits angedeutet wurde – aus einer Wellenfrontmessung bestimmt werden. So kann z. B. zur Bestimmung der Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\max}$

eine Wellenfrontmesseinrichtung, d. h. ein Wellenfrontsensor wie z. B. ein Shack-Hartmann-Sensor, zum Einsatz kommen. Ein Verfahren zur Bestimmung der Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\max}$  unter Zuhilfenahme eines Wellenfrontsensors ist – wie oben bereits angedeutet wurde – z. B. dem Dokument US 6,554,429 B1 (siehe insbesondere Spalte 3, Zeile 23 bis Spalte 4, Zeile 25 und Anspruch 1) zu entnehmen. Dort sind auch unterschiedliche Arten geeigneter Sensoren angegeben (siehe dort Spalte 3, Zeilen 10–13).

**[0074]** Die tatsächliche Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\max}$  kann jedoch alternativ auch als Differenz zwischen der aus einer Wellenfrontmessung oder einer Autorefraktionsmessung des Auges objektiv bestimmten Fernpunktrefraktion  $A_R$  und der aus einer Wellenfrontmessung oder einer Autorefraktionsmessung des Auges objektiv bestimmten Nahpunktrefraktion  $A_P$  bestimmt werden.

**[0075]** Konkret kann diese Bestimmung der tatsächlichen Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\max}$  beispielsweise in folgenden Schritten erfolgen:

- a) Eine an der Retina reflektierte Wellenfront eines auf das nicht akkommodierende Auge treffenden Lichtstrahls mit vorbestimmter Wellenfront oder eine Autorefraktion des nicht akkommodierenden Auges wird gemessen. Vorzugsweise wird dem Auge dabei kein Akkommodationsreiz  $\Delta A_{\text{Reiz}}$  dargeboten.
- b) Aus der in Schritt a) gemessenen Wellenfront oder der in Schritt a) gemessenen Autorefraktion wird die Fernpunktrefraktion  $A_R$  des Auges berechnet.
- c) Daraufhin wird ein die tatsächliche Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\max}$  übersteigender Akkommodationsreiz  $\Delta A_{\text{Reiz}}$  für das Auge dargeboten.
- d) Dann wird eine an der Retina reflektierte Wellenfront eines auf das aufgrund des Akkommodationsreizes  $\Delta A_{\text{Reiz}}$  akkommodierende Auge treffenden Lichtstrahls mit vorbestimmter Wellenfront oder eine Autorefraktion des aufgrund des Akkommodationsreizes  $\Delta A_{\text{Reiz}}$  akkommodierenden Auges gemessen. Konkret erfolgt dies dadurch, dass die Fixationsentfernung  $a_E$ , also die Strecke vom Augenhauptpunkt  $H_A$  zum Einstellpunkt des Auges, so gewählt wird, dass das Auge nicht mehr in der Lage ist, das sich im Fixationspunkt befindliche Objekt scharf wahrzunehmen.
- e) Aus der in Schritt d) gemessenen Wellenfront oder der in Schritt d) gemessenen Autorefraktion wird die tatsächliche Einstellpunktrefraktion  $A_E$  des Auges berechnet.
- f) Die in Schritt e) berechnete tatsächliche Einstellpunktrefraktion  $A_E$  wird mit der nachfolgend als ideal bezeichneten Einstellpunktrefraktion  $A_{E,\text{ideal}}$  verglichen, die sich ergäbe, wenn die Akkommodation A des Auges dem Akkommodationsreiz  $\Delta A_{\text{Reiz}}$  folgen könnte.
- g) Danach wird der Akkommodationsreiz  $\Delta A_{\text{Reiz}}$  kontinuierlich oder in diskreten Schritten von z. B. 0.05 dpt verringert und fortlaufend entsprechend den Schritten e) und f) die tatsächliche Einstellpunktrefraktion  $A_E$  gemessen und mit der idealen Einstellpunktrefraktion  $A_E$  verglichen.
- h) Als Nahpunktrefraktion  $A_P$  wird dann z. B. die tatsächliche Einstellpunktrefraktion  $A_E$  gewählt, die bei dem unter Schritt g) durchgeführten Vergleich erstmalig der Änderung der idealen Einstellpunktrefraktion  $A_E$  folgt.

**[0076]** Alternativ ist es möglich, lediglich im Anschluss an den Schritt e) den Akkommodationsreiz  $\Delta A_{\text{Reiz}}$  kontinuierlich oder in diskreten Schritten zu verringern und fortlaufend entsprechend den Schritten e) und f) die tatsächliche Einstellpunktrefraktion  $A_E$  zu messen und als Nahpunktrefraktion  $A_P$  die gemessene tatsächliche Einstellpunktrefraktion  $A_E$  (bzw. eine der gemessenen tatsächlichen Einstellpunktrefraktionen bzw. einen Mittelwert der gemessenen tatsächlichen Einstellpunktrefraktionen) zu verwenden, bei der die gemessene Einstellpunktrefraktion  $A_E$  dem Akkommodationsreiz  $\Delta A_{\text{Reiz}}$  nicht mehr folgt.

**[0077]** Weiter alternativ ist es möglich, anstelle des Verfahrensschritts c) dem Auge einen Akkommodationsreiz  $\Delta A_{\text{Reiz}}$  darzubieten, dem dieses problemlos folgt und dann den Akkommodationsreiz  $\Delta A_{\text{Reiz}}$  kontinuierlich oder in diskreten Schritten so lange (und ggf. etwas darüber hinaus) zu erhöhen, bis die Akkommodation A des Auges diesem Reiz  $\Delta A_{\text{Reiz}}$  nicht mehr folgen kann. Die Verfahrensschritte d) bis h) können dann z. B. in entsprechender Weise abgearbeitet werden. Als Nahpunktrefraktion  $A_P$  wird dann z. B. die tatsächliche Einstellpunktrefraktion  $A_E$  gewählt, die bei dem unter Schritt g) durchgeführten Vergleich letztmalig der Änderung der idealen Einstellpunktrefraktion  $A_E$  ideal folgt. Selbstverständlich kann auch als Nahpunktrefraktion  $A_P$  die gemessene tatsächliche Einstellpunktrefraktion  $A_E$  (bzw. eine der gemessenen tatsächlichen Einstellpunktrefraktionen bzw. ein Mittelwert der gemessenen tatsächlichen Einstellpunktrefraktionen  $A_E$ ) verwendet werden, bei der die gemessene Einstellpunktrefraktion  $A_E$  dem Akkommodationsreiz  $\Delta A_{\text{Reiz}}$  gerade nicht (mehr) folgt.

**[0078]** Die vorläufige Addition  $\text{Add}_{\text{vorläufig}}$  kann z. B. nach erfolgter Bestimmung der Gebrauchsentfernung  $a_{\text{Gebrauch}}$  nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$\text{Add}_{\text{vorläufig}} = 1/a_{\text{Gebrauch}} - \Delta A_{\text{Gebrauch}} \quad (12)$$

**[0079]** Die tatsächliche Gebrauchsakkommodation  $\Delta A_{\text{Gebrauch}}$  kann z. B. wie folgt gemessen werden: Es wird die gleiche Messung wie bereits bzgl. der Messung der Akkommodationsbreite beschrieben durchgeführt, nur mit dem Unterschied, dass die Messung länger dauert und der jeweilige Akkommodationsreiz  $\Delta A_{\text{Reiz}}$  dem Auge mehrere Sekunden dargeboten wird, und zwar idealerweise so lange, bis die Akkommodation  $A$  dem Reiz  $\Delta A_{\text{Reiz}}$  vollständig gefolgt ist. Die Dauer  $t$  des Akkommodationsreizes  $\Delta A_{\text{Reiz}}$  ist also größer als die Akkommodationszeit  $t_A$  gewählt.

**[0080]** Für die Bestimmung der Gebrauchsakkommodation  $\Delta A_{\text{Gebrauch}}$  wird der für die Ferne vollkorrigierte Proband aufgefordert, eine geeignete Testfigur monokular so nah zum Auge heranzuführen, bis er die Testfigur gerade noch scharf erkennen kann. Diese Testfigur kann sich beispielsweise auf einem Akkommodometer, wie in [Fig. 17](#) dargestellt, befinden. Der so ermittelte Abstand entspricht dem Nahpunktabstand  $a_p$ . Reicht aufgrund hochgradiger Presbyopie die Länge der Akkommodometerschiene (oder, wenn die Messung ohne Akkommodometer vorgenommen wird, die Armlänge des Probanden) zur Messung nicht aus, so setzt der Untersucher auf Verdacht einen sphärischen Nahzusatz vor, der später von der gemessenen Gebrauchsakkommodation  $\Delta A_{\text{Gebrauch}}$  subtrahiert wird. Nun wird der Proband aufgefordert, so lange monokular auf die Testfigur zu blicken, bis diese aufgrund der nachlassenden Akkommodation  $\Delta A$  unscharf erscheint. In einem nächsten Schritt soll der Proband nun die Testfigur so weit von sich weg halten, bis diese wieder scharf erscheint (entspricht dem Einstellpunkt  $a_E$ ). Der Kehrwert des in Meter gemessenen Abstandes zum Einstellpunkt  $a_E$  ergibt die Gebrauchsakkommodation  $\Delta A_{\text{Gebrauch}}$ .

**[0081]** Die vorläufige Addition  $\text{Add}_{\text{vorläufig}}$  kann z. B. auch nach herkömmlicher Methode aus der Fernpunktrefraktion  $A_R$  und der Nahpunktrefraktion  $A_P$  nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$\text{Add}_{\text{vorläufig}} = A_P - A_R \quad (13)$$

**[0082]** Die Schärfentiefe  $T$  entspricht gerade dem zweifachen des maximalen Akkommodationsreizes  $\Delta A_{\text{Reiz}}$  an dem das Auge gerade noch nicht akkommodiert.

**[0083]** Die Verwendung einer Wellenfrontmesseinrichtung zur Bestimmung der Schärfentiefe  $T$  ist hier zwingend erforderlich. Die Verwendung einer Autorefraktormesseinrichtung ist zur Bestimmung der Schärfentiefe  $T$  alleine nicht möglich. Bei Aphakie oder Pseudophakie ist nur die letztgenannte Methode zur Bestimmung der Schärfentiefe  $T$  auf Basis einer Messung mit einer Wellenfrontmesseinrichtung möglich.

**[0084]** Die individuelle Schärfentiefe  $T$  des Auges eines Probanden lässt sich z. B. aus einer Sequenz von Wellenfrontmessungen oder einer Sequenz von Autorefraktionsmessungen bei Fixationsentfernungen in der näheren Umgebung des Fernpunkts bestimmt. Als maximalen Akkommodationsreiz  $\Delta A_{\text{Reiz}}$  nimmt man z. B. den Akkommodationsreiz  $\Delta A_{\text{Reiz}}$  (entsprechend dem Kehrwert der Fixationsentfernung), bei dem die gemessene Einstellpunktrefraktion  $A_E$  gerade von der aus einer Wellenfrontmessung oder einer Autorefraktionsmessung ermittelten Fernpunktrefraktion  $A_R$  abweicht oder gerade noch der entsprechenden Fernpunktrefraktion  $A_R$  entspricht. Als maximalen Akkommodationsreiz  $\Delta A_{\text{Reiz}}$  kann man auch den Akkommodationsreiz  $\Delta A_{\text{Reiz}}$  nehmen, bei dem die gemessene Wellenfront gerade noch mit der Wellenfront bei unendlicher Fixationsentfernung übereinstimmt oder bei dem die gemessene Wellenfront gerade geringfügig von der Wellenfront bei unendlicher Fixationsentfernung abweicht.

**[0085]** Ein weiteres Verfahren zur Bestimmung der Schärfentiefe  $T$  auf Basis einer Wellenfrontanalyse kann z. B. folgende Verfahrensschritte umfassen:

- a) Eine an der Retina reflektierten Wellenfront eines auf das nicht akkommodierende Auge treffenden Lichtstrahls mit vorbestimmter Wellenfront oder eine Autorefraktion des nicht akkommodierenden Auges wird gemessen. Vorzugsweise wird dem Auge dabei kein Akkommodationsreiz dargeboten.
- b) Vorher, gleichzeitig oder danach wird der Pupillendurchmesser des Auges gemessen. Wesentlich dabei ist, dass der Pupillendurchmesser im Zustand nach Schritt a) gemessen wird. Die Messung des Pupillendurchmessers kann z. B. dadurch erfolgen, dass von dem Auge eine Kameraaufnahme gemacht wird und der Durchmesser der Pupille aus der Aufnahme entnommen wird.
- c) Daraufhin erfolgt die Umrechnung der gemessenen Wellenfront auf einen gewünschten Pupillendurchmesser. J. Schwiegerling hat in seinem Artikel „Scaling Zernike expansion coefficients to different pupil sizes“, welcher in J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 19, No. 10 auf den Seiten 1937 bis 1945 veröffentlicht wurde, Möglichkeiten zur Umrechnungen aufgezeigt.
- d) In einem weiteren Schritt wird ein Fixationstarget mit einer Darstellung von Strukturen mit vorgegebenen räumlichen Frequenzen entsprechend den gewünschten Anforderungen, z. B. Visus  $V = 0,4$  beim Lesen, bereitgestellt.

e) Danach erfolgt die Festlegung eines Suchraumes von z. B.  $\pm 5$  dpt oder  $\pm 3$  dpt um die mittlere Sphäre mSph = der Fernpunktrefraktion  $A_R$  in z. B. 0.05 dpt oder 0.1 dpt Schritten, wobei

$$mSph = Sph + \frac{Zyl}{2} \quad (14)$$

mit Sph der sphärischen Wirkung und Zyl der astigmatischen Wirkung einer für den Probanden vorgesehenen Sehhilfe.

f) Daraufhin erfolgt eine Faltung der Wellenfront um die vom jeweiligen Punkt im Suchraum vorgegebene mittlere Sphäre  $mSph_{kor}$ . Diese korrigierte Wellenfront wird anschließend mit den Strukturen des Fixations-targets gefaltet. Diese Faltung dient der Simulation des Seheindrucks des Probanden mit im Suchraum geänderter Wellenfront.

g) Die nachfolgende Auswertung der Faltung besteht z. B. in der Ermittlung des Verhältnisses Q aus den maximalen und minimalen Intensitäten  $I_{max}$ ,  $I_{min}$  der durch die Faltung entstandenen Strukturen:

$$Q = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max}} \quad (15)$$

h) Die Schritte f) und g) werden nun für alle Werte  $mSph_{kor}$  innerhalb des Suchraumes durchgeführt. Somit erhält man für jedes  $mSph_{kor}$  einen Wert für das Verhältnis Q.

**[0086]** Als Schärfentiefe T wird dann der Betrag der Differenz der Werte der mittleren Sphäre  $mSph_{kor}$  im Suchraum angenommen, bei dem das Verhältnis Q ein vorgegebenes Verhältnis  $Q_{vor}$  gerade über- bzw. unterschreitet. Max Born et al geben „Principles of Optics“, Cambridge University Press, 7th expanded edition, S. 370–371 z. B. als Schwelle bei der nebeneinander liegende Strukturen gerade noch getrennt wahrnehmbar sind, ein Verhältnis Q der Intensitätsdifferenz  $I_{max} - I_{min}$  zur maximalen Intensität  $I_{max}$  von 19% an (sogenanntes Rayleigh Kriterium):

$$Q = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max}} = 0,19 \quad (16)$$

**[0087]** Ein anderes Verfahren zur Bestimmung der Schärfentiefe T auf Basis einer Wellenfrontanalyse kann folgende Verfahrensschritte umfassen:

- Eine an der Retina reflektierte Wellenfront eines auf das nicht akkommodierende Auge treffenden Lichtstrahls mit vorbestimmter Wellenfront oder eine Autorefraktion des nicht akkommodierenden Auges wird gemessen. Vorzugsweise wird dem Auge dabei kein Akkommodationsreiz  $\Delta A_{Reiz}$  dargeboten.
- Vorher, gleichzeitig oder danach wird der Pupillendurchmesser des Auges gemessen (vgl. das vorstehend beschriebene Verfahren).
- Daraufhin erfolgt eine Umrechnung der gemessenen Wellenfront auf einen gewünschten Pupillendurchmesser.
- Im Weiteren erfolgt eine Bestimmung der Kaustik im Bereich von z. B.  $\pm 3$  dpt um die mittlere Sphäre mSph der Fernpunktrefraktion  $A_R$ . Unter Kaustik versteht man die Einhüllende der Strahlen im Bildraum bei sphärischer Aberration (vgl. Helmut Goersch, Zeiss Handbuch für Augenoptik, Auflage 2000, Seite 35).
- Danach erfolgt eine Summation der Intensitäten an jeder Stelle im Bereich von z. B.  $\pm 3$  dpt um die mittlere Sphäre mSph der Kaustik in einem Zylindervolumen um die optische Achse oA.
- Die Bestimmung der Schärfentiefe T erfolgt dann aus dem Abstand der beiden Punkte entlang der Kaustik, an denen die Intensität um eine bestimmte Schwelle, z. B. 19%, kleiner ist, als die maximale Intensität.

**[0088]** Die Addition Add, Add<sub>vorläufig</sub> nach der Erfindung wird (im Allgemeinen zunächst) monokular bestimmt. Binokular lässt sich die Addition Add, Add<sub>vorläufig</sub> dadurch bestimmen, dass z. B. für die Sehhilfen beider Augen die gleiche Addition Add, Add<sub>vorläufig</sub> verwendet wird. Es kann dabei z. B. der Mittelwert der jeweils monokular ermittelten Additionen Add, Add<sub>vorläufig</sub> gewählt werden. Alternativ kann z. B. für die Sehhilfen beider Augen die größere der für die beiden Sehhilfen ermittelten Additionen Add, Add<sub>vorläufig</sub> verwendet werden.

**[0089]** Die Erfindung wird im Folgenden anhand der Zeichnungen näher beschrieben. Es zeigen:

**[0090]** [Fig. 1](#) ein Flussdiagramm aus dem sich die einzelnen Verfahrensschritte eines Ausführungsbeispiels eines erfindungsgemäßen Verfahrens zur Bestimmung der individuell erforderlichen Addition Add einer Sehhilfe für einen Probanden entnehmen lassen,

**[0091]** [Fig. 2](#) eine Vorrichtung, welche zur Bestimmung der individuell erforderlichen Addition Add nach dem

in der [Fig. 1](#) skizzierten Verfahren geeignet ist,

[0092] [Fig. 3](#) ein Flussdiagramm aus dem sich die einzelnen Verfahrensschritte eines weiteren Ausführungsbeispiels eines erfindungsgemäßen Verfahrens zur Bestimmung der individuell erforderlichen Addition Add einer Sehhilfe für einen Probanden entnehmen lassen,

[0093] [Fig. 4](#) ein Flussdiagramm eines Beispiels für die Bestimmung der individuellen Gebrauchsentfernung  $a_{\text{Gebrauch}}$  eines Probanden,

[0094] [Fig. 5](#) ein Flussdiagramm eines Beispiels für die Bestimmung der individuellen Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max}}$  und der Schärfentiefe T eines Auges eines Probanden,

[0095] [Fig. 6](#) die gemessene mittlere sphärische mSph des Auges eines Probanden in Abhängigkeit vom Akkommodationsreiz  $\Delta A_{\text{Reiz}}$ ,

[0096] [Fig. 7](#) ein Flussdiagramm eines weiteren Beispiels für die Bestimmung der individuellen Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max}}$  und der Schärfentiefe T eines Auges eines Probanden,

[0097] [Fig. 8](#) ein Flussdiagramm eines Beispiels für die Bestimmung der individuellen Schärfentiefe T des Auges eines Probanden,

[0098] [Fig. 9](#) ein Ausführungsbeispiel für ein Fixationstarget zur Durchführung des Verfahrens nach dem Flussdiagramm nach [Fig. 8](#),

[0099] [Fig. 10](#) schematische Intensitätsprofile als Maß für die Wahrnehmung zweier benachbarter Linien des Fixationstargets nach der [Fig. 9](#), wenn sich das Fixationstarget im Fernpunkt  $a_R$  und in unterschiedlichen Abständen zum Fernpunkt befindet,

[0100] [Fig. 11](#) ein Flussdiagramm eines zweiten Beispiels für die Bestimmung der individuellen Schärfentiefe T des Auges eines Probanden,

[0101] [Fig. 12](#) einen Längsschnitt durch die Kaustik eines durch das Auge eines Probanden tretenden Strahlbündels mit eingangsseitig ebener Wellenfront im Bereich der Netzhaut,

[0102] [Fig. 13](#) die in einem Zylinder im Bereich der Kaustik nach der [Fig. 12](#) eingeschlossene Lichtintensität in Abhängigkeit des Abstandes  $a_{\text{NH}}$  von der Netzhautebene,

[0103] [Fig. 14](#) ein Diagramm, in dem die Akkommodation A eines Auges unterschiedlicher Probanden über dem Akkommodationsreiz  $\Delta A_{\text{Reiz}}$  aufgetragen ist:

- A: individuelle Gebrauchsakkommodation  $\Delta A_{\text{Gebrauch},50}$  eines 50 jährigen
- B: individuelle Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max},50}$  eines 50 jährigen
- C: mittlere Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max},m,50}^*$  eines 50 jährigen nach Duane
- D: mittlere Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max},m,30}^*$  eines 30 jährigen nach Duane
- E: ideale Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max}}$

[0104] [Fig. 15](#) die Altersabhängigkeit der durchschnittlichen physiologischen Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max}}^*$  nach Duane (Stand der Technik),

[0105] [Fig. 16](#) die Altersabhängigkeit der durchschnittlichen Sehweite (= Nahpunktstand)  $a_p$  nach dem Stand der Technik,

[0106] [Fig. 17](#) Akkommodometer (Stand der Technik).

#### Ausführungsbeispiel zur Bestimmung der Addition

[0107] Die [Fig. 1](#) zeigt ein Flussdiagramm aus dem sich die einzelnen Verfahrensschritte einer Variante eines erfindungsgemäßen Verfahrens zur Bestimmung der individuell erforderlichen Addition Add einer Sehhilfe für einen Probanden entnehmen lassen. Die [Fig. 2](#) zeigt eine entsprechende Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens. Einzelheiten zum Verfahren sowie zur Vorrichtung werden nachfolgend beschrieben.

**[0108]** In einem ersten Schritt **100** wird eine vorläufige Addition  $Add_{\text{vorläufig}}$  für die Sehhilfe (z. B. Brillenlinse) eines Auges des Probanden bestimmt. Als Verfahren zur Bestimmung der vorläufigen Addition  $Add_{\text{vorläufig}}$  kann eines der vorstehend in der Beschreibungseinleitung unter 1. bis 4. beschriebenen und aus dem Stand der Technik bekannten Verfahren zur Anwendung kommen. Beispielsweise kann auch ein Verfahren verwendet werden, bei dem der Proband aus einer Mehrzahl an Testbrillen die für ihn günstigste auswählt. Es ist auch möglich, als vorläufige Addition  $Add_{\text{vorläufig}}$  die mit dem unter Zuhilfenahme der Refraktionseinheit **10** nach der [Fig. 2](#) ermittelte Addition  $Add$  zu verwenden. Diese Refraktionseinheit **10** kann beispielsweise eine Sehprobentafel oder eine von innen beleuchtete Transparenttafel umfassen, wobei sich die Unterkante der Sehprobe mindestens 1,40 m über dem Fußboden befinden muss. An der gegenüberliegenden Wand kann beispielsweise ein Umlenkspiegel angebracht sein, der so geneigt werden kann, dass der Prüfling das Bild der Sehprobe in der Mitte des Umlenkspiegels erkennt. Die Spiegelmittle liegt annähernd in Augenhöhe des sitzenden Prüflings. Weitere Details sind z. B. Heinz Diepes „Refraktionsbestimmung“ Verlag Heinz Postenrieder, Pforzheim, 2. Auflage, 1975, S. 28 zu entnehmen.

**[0109]** In einem zweiten Schritt **200** wird die individuelle Schärfentiefe  $T$  des Auges des Probanden bestimmt. Die individuelle Schärfentiefe  $T$  des Auges des Probanden kann auf unterschiedlichste Art und Weise objektiv bestimmt werden. Eine Reihe von Verfahren zur objektiven Bestimmung der individuellen Schärfentiefe  $T$  wird im Weiteren beschrieben. Insbesondere kann auch eine Messeinheit **20** zu objektiven Bestimmung der Wellenfront und der Schärfentiefe  $T$  verwendet werden, wie Sie in [Fig. 2](#) dargestellt ist.

**[0110]** Die tatsächliche Addition  $Add$  ergibt sich dann in einem dritten Schritt **300** aus der vorläufigen Addition  $Add_{\text{vorläufig}}$  abzüglich der mit einem im Bereich zwischen 0 und 1 liegenden Faktor  $\omega$  gewichteten individuellen Schärfentiefe  $T$ . Als Gewichtungsfaktor  $\omega$  kann z. B.  $\frac{1}{2}$  oder auch  $\frac{2}{3}$  angesetzt werden. Die Berechnung kann z. B. mit einem herkömmlichen Personalcomputer **30** durchgeführt werden, wie er in [Fig. 2](#) skizziert ist.

**[0111]** Additionsbestimmung, Schärfentiefebemimmung und Additionsberechnung kann auch in einem einzigen Computer erfolgen, der die Komponenten **10**, **20** und **30** in sich vereinigt.

**[0112]** Die Bestimmung der Addition  $Add$  kann monokular oder auch binokular sequentiell für die Sehhilfen (z. B. Brille) beider Augen getrennt durchgeführt werden. Es können Sehhilfen mit unterschiedlichen Additionen  $Add_{\text{links}}$ ,  $Add_{\text{rechts}}$  für das rechte und linke Auge des Probanden vorgesehen sein. Es ist jedoch auch möglich, dass z. B. für die Sehhilfen beider Augen des Probanden die gleiche Addition  $Add = Add_{\text{links}} = Add_{\text{rechts}}$  verwendet wird. Als gemeinsame Addition  $Add$  für beide Sehhilfen (z. B. die Linsen einer Brille) kann z. B. die größte der für die jeweiligen Sehhilfen der Augen bestimmten Additionen  $Add = \max [Add_{\text{links}}, Add_{\text{rechts}}]$  verwendet werden.

#### Weiteres Ausführungsbeispiel zur Bestimmung der Addition

**[0113]** Die [Fig. 3](#) zeigt ein Flussdiagramm aus dem sich die einzelnen Verfahrensschritte einer weiteren Variante eines erfindungsgemäßen Verfahrens zur Bestimmung der individuell erforderlichen Addition  $Add$  einer Sehhilfe für einen Probanden entnehmen lassen.

**[0114]** In einem ersten Schritt **105** wird die individuelle Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max}}$  abweichend vom Stand der Technik nicht subjektiv, d. h. unter Berücksichtigung des vom Probanden geäußerten Seheindrucks, sondern objektiv z. B. mit einer der nachstehend beschriebenen Methoden ermittelt.

**[0115]** In einem zweiten Schritt **120** wird die individuelle Gebrauchsentfernung  $a_{\text{Gebrauch}}$  des Probanden ermittelt. Die Bestimmung der individuellen Gebrauchsentfernung  $a_{\text{Gebrauch}}$  des Probanden kann z. B. die in der [Fig. 4](#) dargestellte Verfahrensschritte umfassen. Im Beispiel wird dem Probanden ein Schriftstück als Leseprobe überreicht. Der Proband wird angehalten, das Schriftstück in einer ihm angenehmen Entfernung zu halten und den Inhalt des Schriftstücks vorzulesen (Verfahrensschritt **122**). Dabei wird die relative Position des Schriftstücks zum Augenhauptpunkt  $H_A$  ermittelt (Verfahrensschritt **124**). Dies kann z. B. durch Auswertung eines von einer Kamera aufgenommenen Bilds des lesenden Probanden im Profil erfolgen. Danach wird der Abstand  $a_{\text{Gebrauch}}$  zwischen dem Hauptpunkt  $H_A$  des Auges des Probanden und dem Ort der Leseprobe ermittelt (Verfahrensschritt **126**).

**[0116]** Dieser Abstand  $a_{\text{Gebrauch}}$  stellt die Gebrauchsentfernung  $a_{\text{Gebrauch}}$  dar. Es ist auch denkbar, dass sich auf der Leseprobe ein Entfernungssensor befindet (z. B. als Bestandteil eines Displays), welcher den Abstand  $a_{\text{Gebrauch}}$  zum Augenhauptpunkt  $H_A$  unmittelbar misst.

**[0117]** In einem Schritt **135** wird die Addition Add der Sehhilfe z. B. mit Hilfe einer geeigneten Recheneinheit wie einem Computer errechnet als Differenz zwischen dem Kehrwert der Gebrauchsentfernung  $a_{\text{Gebrauch}}$  und der mit einem Faktor  $\sigma$  gewichteten individuellen Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max}}$ . Der Gewichtungsfaktor  $\sigma$  kann dabei Werte in einem Bereich größer als 0 und kleiner als 1 annehmen. Nach der oben erwähnten Theorie von Reiner kann der Gewichtungsfaktor  $\sigma$  z. B. einen Wert von  $\frac{1}{2}$  aufweisen. Schober schlägt z. B. einen Wert von  $\frac{2}{3}$  vor.

#### Ausführungsbeispiel zur Bestimmung der Akkommodationsbreite und der Schärfentiefe

**[0118]** Ein Beispiel für ein Verfahren **200** zur Bestimmung der Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max}}$  und der Schärfentiefe T, welches auf die Überlegungen der Erfinder zurück geht, umfasst die in der [Fig. 5](#) schematisch dargestellten und im Folgenden eingehend beschriebenen Verfahrensschritte:

**[0119]** Es erfolgt zunächst eine Messung **202** der an der Retina reflektierten Wellenfront eines auf das nicht akkommodierende Auge des Probanden treffenden Lichtstrahls mit vorbestimmter Wellenfront. Alternativ kann auch eine Autorefraktormessung durchgeführt werden. Aus der gemessenen Wellenfront oder der Autorefraktormessung wird dann die Fernpunktrefraktion  $A_R$  des Auges berechnet (Verfahrensschritt **204**).

**[0120]** Erst dann wird die eigentliche Messung der Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max}}$  durchgeführt. Dazu wird das Fixationstarget der Wellenfrontmesseinrichtung oder der Autorefraktormesseinrichtung an die Grenze des unteren Messbereiches gebracht (Schritt **206**). Dies stellt den am Gerät maximal möglichen Akkommodationsreiz  $\Delta A_{\text{Reiz}}$  für das Auge eines Probanden dar. Die Ideallinie zwischen Akkommodationsreiz  $\Delta A_{\text{Reiz}}$  in dpt und Akkommodationserfolg  $\Delta A$  in dpt ist in der Software festgelegt. Zur Veranschaulichung zeigt die [Fig. 6](#) den Zusammenhang zwischen der mittleren Sphäre mSph (entsprechend Gleichung (14)) des Auges eines Probanden und dem Akkommodationsreiz  $\Delta A_{\text{Reiz}}$ , d. h. dem Kehrwert des Abstands des Fixationstargets vom Augenhauptpunkt  $H_A$ . Die gestrichelte linear verlaufende Linie stellt den Idealfall dar, wenn die sich in einer entsprechenden mittleren Sphäre mSph widerspiegelnde Akkommodation A dem Akkommodationsreiz  $\Delta A_{\text{Reiz}}$  stets folgt.

**[0121]** Nun erfolgen eine Messung der Wellenfront oder der Autorefraktorwerte (Verfahrensschritt **208**) und daraus eine Berechnung der effektiven Rezeptwerte Sphäre, Zylinder, Achse des Auges (Verfahrensschritt **210**). Diese effektiven Rezeptwerte Sphäre, Zylinder, Achse werden mit der Einstellung des Fixationstargets verglichen und gespeichert (Schritt **212**). Nun wird das Fixationstarget in schnellen Schritten mit positiver sphärischer Wirkung Sph verändert (Schritt **212**). Anders ausgedrückt bedeutet das, dass der Fixationsabstand vergleichsweise schnell verkleinert wird. Schnell bedeutet hier, dass das Auge der Änderung des Akkommodationsreizes  $\Delta A_{\text{Reiz}}$  nicht folgen kann. Zu jeder Veränderung des Targets in Richtung zunehmender positiver sphärischer Wirkung Sph plus findet eine neue Wellenfrontmessung oder Autorefraktormessung mit anschließender Berechnung der Fernpunktrefraktion  $A_R$  des Auges statt. Eine Veränderung des Targets mit positiver sphärischer Wirkung Sph findet bis Fernpunktrefraktion  $A_R$  3 dpt + 3 dpt statt (Schritt **216**). Die Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max}}$  ergibt sich dann in der Graphik nach der [Fig. 6](#) aus der vertikalen Differenz zwischen dem Punkt auf der Messlinie, bei dem der Proband letztmalig nicht akkommodiert hat und dem Punkt bei dem der Proband erstmalig maximal akkommodiert hat (Schritt **218**). Die Schärfentiefe T ergibt sich aus der zweifachen horizontalen Differenz zwischen dem Punkt auf der Messlinie, welche an der Fernpunktrefraktion  $A_R$  liegt und dem Punkt an dem der Proband letztmalig nicht akkommodiert hat (Schritt **220**, [Fig. 6](#)).

#### Weiteres Ausführungsbeispiel zur Bestimmung der Akkommodationsbreite und der Schärfentiefe

**[0122]** Ein weiteres Beispiel für ein Verfahren **300** zur Bestimmung der Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max}}$  und der Schärfentiefe T umfasst die in der [Fig. 7](#) schematisch dargestellten und im Folgenden eingehend beschriebenen Verfahrensschritte:

Zunächst erfolgt wie beim vorangegangenen Beispiel eine Messung **302** der an der Retina reflektierten Wellenfront eines auf das nicht akkommodierende Auge des Probanden treffenden Lichtstrahls mit vorbestimmter Wellenfront. Alternativ kann selbstverständlich auch eine Autorefraktormessung durchgeführt werden. Aus der gemessenen Wellenfront oder der Autorefraktormessung wird dann die Fernpunktrefraktion  $A_R$  des Auges berechnet (Verfahrensschritt **304**).

**[0123]** Anschließend wird das Target der Wellenfrontmesseinrichtung oder der Autorefraktormesseinrichtung an die Grenze des oberen Messbereiches gebracht (Schritt **306**).

**[0124]** Nun erfolgen eine Messung der Wellenfront (Schritt **308**) oder der Autorefraktorwerte und daraus eine

Berechnung der effektiven Rezeptwerte (sphärische Wirkung, zylindrische Wirkung, und Achslage) Sph, Zyl, Achse des Auges (Schritt **310**). Diese Rezeptwerte werden mit der Einstellung des Targets verglichen (Schritt **312**) und gespeichert. Nun wird das Target in schnellen Schritten in Richtung negativer sphärischer Wirkung Sph verändert. Zu jeder Veränderung des Targets in Richtung Minus findet eine neue Wellenfrontmessung oder Autorefraktormessung mit anschließender Berechnung der Fernpunktrefraktion  $A_R$  des Auges statt (Schritt **316**).

**[0125]** Die Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\max}$  ergibt sich dann im Graph nach der [Fig. 6](#) aus der vertikalen Differenz zwischen dem Punkt auf der Messlinie, bei dem der Proband letztmalig maximal akkommodiert hat und dem Punkt bei dem der Proband erstmalig nicht akkommodiert hat (Schritt **318**). Die Schärfentiefe T ergibt sich aus der zweifachen horizontalen Differenz zwischen dem Punkt auf der Messlinie, welche an der Fernpunktrefraktion liegt und dem Punkt an dem der Proband letztmalig nicht akkommodiert hat (Schritt **320**, [Fig. 6](#)).

#### Ausführungsbeispiel zur Bestimmung der Schärfentiefe

**[0126]** Ein Verfahren zur Bestimmung der Schärfentiefe T auf Basis einer Wellenfrontanalyse **400** kann auch nachfolgend angegebene und in [Fig. 8](#) skizzierte Verfahrensschritte umfassen:

In einem ersten Schritt wird bei vorbestimmten Helligkeitsverhältnissen und bei vorbestimmtem Abstand eines Fixationstargets eine Wellenfrontmessung an einem Auge des Probanden durchgeführt (Schritt **402**). Die Messbedingungen ergeben sich aus der individuellen Problemstellung des Brillenträgers, also aus der Anamnese und können somit hier nicht eindeutig festgelegt werden.

**[0127]** Die vorbestimmte Helligkeit bestimmt die Pupillengröße des Auges des Probanden bei der Messung. Es ist bekannt, dass die sich aufgrund der Helligkeitsverhältnisse einstellende Pupillengröße die gemessene Wellenfront maßgeblich beeinflusst. Die Bedingungen bei der Messung der Wellenfront sind jedoch nicht zwingend identisch mit den Bedingungen, unter denen der Proband üblicherweise einen Gegenstand betrachtet, insbesondere unter denen er z. B. Zeitung liest. Die Erfindung sieht daher in einem weiteren Schritt **406** die Umrechnung der gemessenen Wellenfront inkl. des gemessenen Pupillendurchmessers  $P_{\text{Messung}}$  auf einen gewünschten Pupillendurchmesser  $P_{\text{Ziel}}$  vor. Der gewünschte Pupillendurchmesser  $P_{\text{Ziel}}$  kann z. B. der Pupillendurchmesser sein, der sich einstellen würde, wenn der Proband unter Tageslichtbedingungen Zeitung lesen würde. Der gewünschte Pupillendurchmesser  $P_{\text{Ziel}}$  kann z. B. auch der Durchmesser sein, der sich einstellen würde, wenn der Proband unter künstlicher Beleuchtung am Computerbildschirm arbeiten würde. Es ist einleuchtend, dass sich die entsprechenden sich einstellenden Pupillendurchmesser  $P_{\text{Ziel}}$  unter den meisten in Betracht kommenden Gebrauchsbedingungen objektiv z. B. mittels einer Videoaufnahme bestimmen lassen.

**[0128]** In einem weiteren Verfahrensschritt wird ein Fixationstarget mit definierten räumlichen Frequenzen entsprechend den gewünschten Anforderungen; z. B. Visus  $V = 0,4$  beim Lesen festgelegt. Ein Beispiel für ein derartiges Muster (Testbild **500**) zeigt die [Fig. 9](#). Das Muster besteht in diesem Beispiel aus sechs Streifen **502**, **503**, **504**, **505**, **506**, **507**, die in gleichem Abstand d zueinander angeordnet sind. Dieses Fixationstarget **500** wird dem Probanden jedoch nicht wie allgemein üblich zur Betrachtung in einem vorbestimmten Abstand  $a_{\text{Gebrauch}}$  dargeboten, sondern es wird rechnerisch z. B. mit Hilfe eines Computers ermittelt, wie der Proband das Muster des Fixationstargets **500** wahrnehmen würde, wenn ihm dieses in verschiedenen Abständen  $a_{\text{Gebrauch}}$  zum Augenhauptpunkt  $H_A$  zur Ansicht bereitgestellt würde. Konkret erfolgt dies im Beispiel dadurch, dass zunächst ein Suchraum  $R_S$  von z. B.  $\pm 3$  dpt oder  $\pm 5$  dpt um die mittlere Sphäre mSph der Fernpunktrefraktion  $A_R$  in z. B. 0.05 dpt oder 0.1 dpt Schritten festgelegt wird (Schritt **410**). Daraufhin erfolgt eine Faltung des Musters des Targets **500** mit der um den Punkt im Suchraum korrigierten Wellenfront (Verfahrensschritt **412**), d. h. eine Bestimmung des aufgrund des veränderten Abstands  $a_{\text{Gebrauch}}$  des Fixationstargets **500** zum Augenhauptpunkt  $H_A$  unterschiedlich wahrnehmbaren Musters **502**, **503**, **504**, **505**, **506** und **507** des Fixationstargets **500**.

**[0129]** In einem darauffolgenden Schritt **414** erfolgt eine Auswertung des durch die Faltung erhaltenen Musters **502**, **503**, **504**, **505**, **506** und **507** des Fixationstargets **500**. Die [Fig. 10](#) zeigt die Intensitätsprofile zweier benachbarter Linien (z. B. 503 und 504 aus [Fig. 9](#)) des Musters **502**, **503**, **504**, **505**, **506** und **507** des Fixationstargets **500** nach der Faltung in Abhängigkeit von der mittleren Sphäre mSph, d. h. der Summe aus den gemessenen sphärischen und halben zylindrischen Refraktionswerten (Sph + Zyl/2), angegeben. Ein Maß für die Qualität der Wahrnehmbarkeit des Musters ist die getrennte Wahrnehmbarkeit benachbarter Linien mit erhöhter Intensität I, der photometrische Kontrast. Aus „Principles of Optics“ (a. a. O.) ist es z. B. bekannt, dass Intensitätsunterschiede  $\Delta I$  nebeneinander liegender Bereiche dann getrennt wahrnehmbar sind, wenn die geringere Intensität  $I_{\min}$  mehr als 19% von der der stärkeren Intensität  $I_{\max}$  abweicht. Die Erfindung sieht daher vor, z. B. das Intensitätsmaximum  $I_{\max}$  und das Intensitätsminimum  $I_{\min}$  des ermittelten Intensitätsprofils I (wie z. B. die [Fig. 10](#) zeigt) zu bestimmen, die Differenz  $\Delta I$  dieser ermittelten Extremwerte  $I_{\min}$ ,  $I_{\max}$  zu berechnen und den

daraus erhaltenen Wert mit einem vorgegebenen Schwellwert  $S$  (wie z. B. dem Wert von 19%) zu vergleichen und zwar für alle Werte  $mSph_{\text{kor}}$  innerhalb des Suchraumes (Schritte **416**, **418**). Als Schärfentiefe  $T$  wird dann gerade die Differenz der Punkte im Suchraum festgelegt, bei denen die Schwelle  $S$  gerade über- bzw. unterschritten wird.

#### Weiteres Ausführungsbeispiel zur Bestimmung der Schärfentiefe

**[0130]** Ein weiteres Verfahren zur Bestimmung der Schärfentiefe  $T$  auf Basis einer Wellenfrontanalyse wird nachfolgend anhand der [Fig. 11](#) bis [Fig. 13](#) erläutert.

**[0131]** Das Verfahren geht wiederum von einer Wellenfrontmessung **502** bei vorbestimmten Helligkeitsverhältnissen und bei vorbestimmtem Abstand  $a_{\text{Fixation}}$  eines Fixationstargets aus. Danach erfolgt wie im vorstehend beschriebenen Ausführungsbeispiel eine Umrechnung **504** der gemessenen Wellenfront auf einen gewünschten Pupillendurchmesser  $P_{Ziel}$  (Schritt **506**).

**[0132]** In einem weiteren Schritt **508** wird rechnerisch die Kaustik im Bereich von z. B.  $\pm 3$  dpt oder  $\pm 5$  dpt um die mittlere Sphäre der Fernpunktrefraktion  $A_R$  bestimmt. Unter Kaustik **602** versteht man, wie dies in der [Fig. 12](#) skizziert ist, die mehr oder weniger enge Einschnürung eines Strahlenbündels, die anstelle eines Bildpunkts entsteht, welches das von einem Objektpunkt ausgehende Strahlenbündel infolge von Abbildungsfehlern zeigt, bevor es wieder auseinanderläuft. Konkret wird z. B. rechnerisch die Punktstreuungsfunktion PSF an einer Mehrzahl an Orten  $a_{NH}$  um die Retina des auf den Fernpunkt in Abstand  $a_R$  gerichteten, nicht akkommodierenden Auges des Probanden ermittelt.

**[0133]** Danach erfolgt eine Integration **510** der Intensität der Kaustik **602** bis zu einem vorgegebenen Abstand  $r_0$  zur optischen Achse **604**. Diese Integration der Intensität der Kaustik **602** veranschaulicht das zylindrische Volumen **606** in der [Fig. 12](#), welches durch den Integrationswinkel  $\varphi = 0 \dots 360^\circ$  und den Abstand  $\rho = 0 \dots r_0$  zur optischen Achse **604** gegeben ist. Der Abstand  $r_0$  kann z. B. gleich dem Kehrwert des geforderten Visus  $V$  gesetzt werden. Die [Fig. 13](#) zeigt den innerhalb des zylindrischen Volumens **606** eingeschlossenen Intensitätsverlauf der Kaustik **602** längs der optischen Achse **604**.

**[0134]** Schließlich wird die Schärfentiefe  $T$  der Darstellung der [Fig. 13](#) folgend aus dem Abstand  $d_T$  der beiden Punkte  $P_1$ ,  $P_2$  entlang der optischen Achse **604** bestimmt, an denen die Intensität  $I_1$ ,  $I_2$  um einen bestimmten Schwellwert  $S$ , z. B. 19%, kleiner als die maximale Intensität  $I_{\text{max}}$  ist (Schritt **512**).

#### Ausführungsbeispiel zur Bestimmung der Schärfentiefe für eine andere Gebrauchsbedingung

**[0135]** Es hat sich gezeigt, dass die Schwelle  $S$ , ab der unterschiedliche Intensitäten  $I_i$  als solche wahrgenommen werden können stark vom jeweiligen Probanden abhängt. Es ist daher sinnvoll, diese Schwelle  $S$  individuell zu ermitteln und damit die Schärfentiefe  $T$  noch präziser zu bestimmen.

**[0136]** Ein Verfahren zur individuellen Bestimmung der Schärfentiefe  $T$  auf Basis einer Wellenfrontanalyse skaliert auf einen gewünschten oder vorgegebenen Pupillendurchmesser  $P_{Ziel}$  kann folgende Verfahrensschritte umfassen:

Aus einem der oben zuerst beschriebenen Verfahren erhält man z. B. die Schärfentiefe  $T1$  für einen ersten Pupillendurchmesser  $P1$ . Nach einem der alternativen o. a. Verfahren wird mit einem zweiten Pupillendurchmesser  $P2 = P1$  die individuelle Schwelle  $S$  so bestimmt, dass die daraus berechnete Schärfentiefe  $T2$  gleich der gemessenen Schärfentiefe  $T1$  ist.

**[0137]** Daraufhin kann mit einem der alternativen o. a. Verfahren für einen vorgegebenen Pupillendurchmesser  $P_{Ziel}$  (z. B. 3,5 mm) und der im vorigen Schritt bestimmten Schwelle  $S$  die Schärfentiefe  $T$  bestimmt werden. Falls  $P1$  kleiner als der gewünschte Pupillendurchmesser  $P_{Ziel}$  ist, wird  $T2 = T1$  gesetzt.

#### Resümee

**[0138]** Die [Fig. 14](#) zeigt zur Verdeutlichung der Unterschiede zum Stand der Technik ein Diagramm, in dem die Akkommodation  $A$  eines Auges unterschiedlicher Probanden über dem Akkommodationsanreiz  $\Delta A_{\text{Reiz}}$  aufgetragen ist. Kurve  $E$  stellt den linearen Verlauf der idealen Akkommodation  $A_{\text{ideal}}$  dar. Das ideale Auge ist in der Lage jeden Akkommodationsanreiz  $\Delta A_{\text{max}}$  durch eine entsprechende Akkommodation  $A_{\text{ideal}}$  auszugleichen.

**[0139]** Zum Vergleich ergibt sich aus der Kurve  $D$  die mittlere Akkommodation  $A_{m,30}$  eines 30 Jährigen und

aus Kurve C die mittlere Akkommodation  $A_{m,50}$  eines 50 Jährigen nach Duane. Das Auge eines durchschnittlichen Dreißigjährigen ist in der Lage einen Akkommodationsanreiz  $\Delta A_{\text{Reiz}}$  bis zu 8 dpt auszugleichen. Für höhere Akkommodationsanreize  $\Delta A_{\text{Reiz}}$  fehlt die Elastizität der Linse seines Auges. Das Auge eines durchschnittlichen Fünfzigjährigen ist nur noch in der Lage einen Akkommodationsanreiz  $\Delta A_{\text{Reiz}}$  bis zu 2 dpt auszugleichen, weil die Elastizität der Linse seines Auges bereits derart abgenommen hat. Seine Restakkommodation  $\Delta A_{\text{max}}$  beträgt 2 dpt.

**[0140]** Es ist dem Fachmann einleuchtend, dass die Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max}}$  individuell sehr unterschiedlich ist und nicht allein vom Alter abhängt. Die Kurve A stellt die individuell ermittelte Gebrauchsakkommodation  $\Delta A_{\text{Gebrauch}}$  einer 50-jährigen Versuchsperson dar. Die Kurve B ist die zugehörige individuelle Akkommodation  $A_{50}$  des 50-jährigen Probanden. Es zeigt sich, dass das Auge des Probanden tatsächlich noch eine Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max}}$  von 3 dpt besitzt. Genutzt wird eine Gebrauchsakkommodation  $\Delta A_{\text{Gebrauch}}$  von etwa 2 dpt.

**[0141]** Das erfindungsgemäße Verfahren und die erfindungsgemäße Vorrichtung berücksichtigt die objektiv bestimmbaren und ggf. auch objektiv bestimmten Parameter Akkommodationsbreite  $\Delta A_{\text{max}}$  und Schärfentiefe T. Das bedeutet, dass das neue Verfahren nicht auf die Komplianz des Probanden angewiesen ist. Dies ist insbesondere von Vorteil, wenn Sehhilfen für ältere oder kranke Personen angepasst werden sollen. Darüber hinaus ist es nicht erforderlich, auf die übliche 0,25 dpt Quantisierung der Addition Add zurückzugreifen, sondern die Addition Add kann individuell angepasst sein, was einen weiteren Schritt zur individuell optimierten Sehhilfe bedeutet. Die Berücksichtigung der individuellen Schärfentiefe T hat den Vorteil, dass die Addition Add so klein wie unbedingt erforderlich gewählt werden kann, mit dem Ergebnis, dass insbesondere Brillenlinsen mit weichem Design hergestellt werden können, ohne Sehschärfe im Nahbereich zu verlieren.

### Patentansprüche

1. Verfahren zur Bestimmung der individuell erforderlichen Addition (Add) einer Sehhilfe für ein Auge mit folgenden Verfahrensschritten:

- a) eine vorläufige Addition ( $\text{Add}_{\text{vorläufig}}$ ) wird bestimmt,
- b) die Schärfentiefe (T) des Auges wird individuell bestimmt,
- c) die Addition (Add) wird nach folgender Gleichung berechnet:  
 $\text{Add} = \text{Add}_{\text{vorläufig}} - \omega T$ , wobei  $\omega$  eine reelle Zahl darstellt, die im Bereich  $0 < \omega \leq 1$  liegt.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass

- a) der maximale Akkommodationsreiz ( $\Delta A_{\text{Reiz,max}}$ ) bestimmt wird, an dem das Auge gerade noch nicht akkommodiert, und dass
- b) die Schärfentiefe (T) dem zweifachen des maximalen Akkommodationsreizes ( $\Delta A_{\text{Reiz,max}}$ ) gleichgesetzt wird.

3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass der maximale Akkommodationsanreiz ( $\Delta A_{\text{Reiz,max}}$ ) mit Hilfe einer Wellenfrontmessung oder einer Autorefraktionsmessung bestimmt wird.

4. Verfahren nach einem der vorangegangenen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die vorläufige Addition ( $\text{Add}_{\text{vorläufig}}$ ) anhand einer Schätzung der physiologischen Akkommodationsbreite ( $\Delta A_{\text{max}}^*$ ) und/oder einer Schätzung der tatsächlichen Akkommodationsbreite ( $\Delta A_{\text{max}}$ ) und/oder einer Schätzung der Gebrauchsakkommodation ( $\Delta A_{\text{Gebrauch}}$ ) bestimmt wird.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die vorläufige Addition ( $\text{Add}_{\text{vorläufig}}$ ) anhand einer individuellen Messung der physiologischen Akkommodationsbreite ( $\Delta A_{\text{max}}^*$ ) und/oder einer individuellen Messung der tatsächlichen Akkommodationsbreite ( $\Delta A_{\text{max}}$ ) und/oder einer individuellen Messung der tatsächlichen Gebrauchsakkommodation ( $\Delta A_{\text{Gebrauch}}$ ) bestimmt wird.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 4 oder 5, dadurch gekennzeichnet, dass eine Gebrauchs Entfernung ( $a_{\text{Gebrauch}}$ ) bestimmt wird und dass die vorläufige Addition ( $\text{Add}_{\text{vorläufig}}$ ) nach folgender Gleichung berechnet wird:  $\text{Add}_{\text{vorläufig}} = 1/a_{\text{Gebrauch}} - \sigma \Delta A_{\text{max}}^*$ , wobei  $\sigma$  eine reelle Zahl darstellt, die im Bereich  $0 \leq \sigma \leq 1$  liegt.

7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die physiologische Akkommodationsbreite ( $\Delta A_{\text{max}}^*$ ) wie folgt individuell gemessen wird:

- i) Messung des Nahpunktstandes ( $a_p$ ) innerhalb einer Zeit (t) kleiner als die Akkommodationszeit ( $t_A$ )
- ii) Berechnung der physiologischen Akkommodationsbreite ( $\Delta A_{\text{max}}^*$ ) nach folgender Gleichung:

$$\Delta A_{\max}^* = \frac{1}{a_p}$$

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 4 oder 5, dadurch gekennzeichnet, dass eine Gebrauchsentfernung ( $a_{\text{Gebrauch}}$ ) bestimmt wird und dass die vorläufige Addition ( $\text{Add}_{\text{vorläufig}}$ ) nach folgender Gleichung berechnet wird:

$$\text{Add}_{\text{vorläufig}} = 1/a_{\text{Gebrauch}} - \sigma \Delta A_{\max}, \text{ wobei } \sigma \text{ eine reelle Zahl darstellt, die im Bereich } 0 \leq \sigma \leq 1 \text{ liegt.}$$

9. Verfahren zur Bestimmung der individuell erforderlichen Addition (Add) einer Sehhilfe für ein Auge mit folgenden Verfahrensschritten:

a) die Akkommodationsbreite ( $\Delta A_{\max}$ ) wird individuell und objektiv bestimmt,

b) die Gebrauchsentfernung ( $a_{\text{Gebrauch}}$ ) wird individuell bestimmt,

c) die Addition (Add) wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$\text{Add} = 1/a_{\text{Gebrauch}} - \sigma \Delta A_{\max}, \text{ wobei } \sigma \text{ eine reelle Zahl darstellt, die im Bereich } 0 < \sigma \leq 1 \text{ liegt.}$$

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass die Gebrauchsentfernung ( $a_{\text{Gebrauch}}$ ) wie folgt individuell bestimmt wird:

i) einem Probanden wird ein Gegenstand dargeboten

ii) als Gebrauchsentfernung ( $a_{\text{Gebrauch}}$ ) wird der Abstand vom objektseitigen Hauptpunkt ( $H_A$ ) des Auges zu dem Ort angenommen, an dem sich der Gegenstand beim entspannten Betrachten durch den Probanden befindet.

11. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass die Gebrauchsentfernung ( $a_{\text{Gebrauch}}$ ) durch Anamnese mit Angabe der Hauptsehaufgaben und den dazugehörigen Entfernungen durch den Probanden bestimmt wird.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass die Gebrauchsentfernung ( $a_{\text{Gebrauch}}$ ) wie folgt objektiv individuell bestimmt wird, indem eine Messvorrichtung den Abstand ( $a_{\text{objekt}}$ ) von einem Objekt zum objektseitigen Augenhauptpunkt ( $H_A$ ) automatisch misst.

13. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass die tatsächliche Akkommodationsbreite ( $\Delta A_{\max}$ ) aus einer Wellenfrontmessung bestimmt wird.

14. Verfahren nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass die tatsächliche Akkommodationsbreite ( $\Delta A_{\max}$ ) wie folgt bestimmt wird:

a) die Fernpunktrefraktion ( $A_R$ ) und die Nahpunktrefraktion ( $A_p$ ) wird aus einer Wellenfrontmessung oder einer Autorefraktionsmessung des Auges bestimmt,

b) die tatsächliche Akkommodationsbreite ( $\Delta A_{\max}$ ) wird als Differenz zwischen der in Schritt i) gemessenen Fernpunktrefraktion ( $A_R$ ) und der in Schritt a) gemessenen Nahpunktrefraktion ( $A_p$ ) berechnet.

15. Verfahren nach einem der Ansprüche 4 oder 5, dadurch gekennzeichnet, dass eine Gebrauchsentfernung  $a_{\text{Gebrauch}}$  bestimmt wird und dass die vorläufige Addition ( $\text{Add}_{\text{vorläufig}}$ ) nach folgender Gleichung berechnet wird:

$$\text{Add}_{\text{vorläufig}} = 1/a_{\text{Gebrauch}} - \Delta A_{\text{Gebrauch}}$$

16. Verfahren nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, dass die tatsächliche Gebrauchsakkommodation ( $\Delta A_{\text{Gebrauch}}$ ) wie folgt gemessen wird:

a) Messung des Einstellpunktabstandes  $a_E$  innerhalb einer Zeit (t) größer als die Akkommodationszeit ( $t_A$ )

b) Berechnung der Gebrauchsakkommodation ( $\Delta A_{\text{Gebrauch}}$ ) nach folgender Gleichung  $\Delta A_{\text{Gebrauch}} = 1/a_E$

17. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die vorläufige Addition ( $\text{Add}_{\text{vorläufig}}$ ) nach folgender Gleichung berechnet wird:

$$\text{Add}_{\text{vorläufig}} = A_p, \text{ wobei } A_p \text{ die Nahpunktrefraktion darstellt.}$$

18. Verfahren nach einem der vorangegangenen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Addition (Add) monokular oder binokular bestimmt wird.

19. Verfahren nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, dass für die Sehhilfen beider Augen die gleiche Addition (Add) verwendet wird.

20. Verfahren nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, dass für die Sehhilfen beider Augen die größere der für die beiden Sehhilfen ermittelten Additionen ( $Add_{links}$ ,  $Add_{rechts}$ ) verwendet wird.

21. Computer, der zur Ausführung eines Verfahrens nach einem der vorangegangenen Ansprüche eingerichtet ist.

22. Computerprogramm mit Programmcode eingerichtet zur Ausführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 20, wenn das Verfahren auf einem Computer ausgeführt wird.

23. Computerprogramm nach Anspruch 22, gespeichert auf einem maschinenlesbaren Datenträger.

24. Computerprogrammprodukt mit Programmcode eingerichtet zur Ausführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 20, wenn das Verfahren auf einem Computer ausgeführt wird.

25. Vorrichtung zur Bestimmung der individuell erforderlichen Addition (Add) einer Sehhilfe für ein Auge mit:

- a) einer Additionsbestimmungseinrichtung zur Bestimmung einer vorläufigen Addition ( $Add_{vorläufig}$ ),
- b) einer Schärfentiefebemessungseinrichtung, um die Schärfentiefe (T) des Auges individuell zu bestimmen,
- c) einer Additionsberechnungseinrichtung, um die Addition (Add) nach folgender Gleichung zu berechnen:  
 $Add = Add_{vorläufig} - \omega T$ , wobei  $\omega$  eine reelle Zahl darstellt, die im Bereich  $0 < \omega \leq 1$  liegt.

26. Vorrichtung nach Anspruch 25, dadurch gekennzeichnet, dass

- i) eine Akkommodationsreizbestimmungseinrichtung vorgesehen ist, um den maximalen Akkommodationsreiz ( $\Delta A_{Reiz,max}$ ) zu bestimmen, an dem das Auge gerade noch nicht akkommodiert, und dass
- ii) die Schärfentiefebemessungseinrichtung eingerichtet ist, die Schärfentiefe (T) mit dem zweifachen des maximalen Akkommodationsreizes ( $\Delta A_{Reiz,max}$ ) gleichzusetzen.

27. Vorrichtung nach Anspruch 26, dadurch gekennzeichnet, dass die Akkommodationsreizbestimmungseinrichtung eine Wellenfrontmesseinrichtung oder einer Autorefraktionsmesseinrichtung umfasst.

28. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 25 bis 27, dadurch gekennzeichnet, dass die Additionsbestimmungseinrichtung eingerichtet ist, um eine individuelle Messung der physiologischen Akkommodationsbreite ( $\Delta A_{max}^*$ ) und/oder eine individuelle Messung der tatsächlichen Akkommodationsbreite ( $\Delta A_{max}$ ) und/oder eine individuelle Messung der tatsächlichen Gebrauchsakkommodation ( $\Delta A_{Gebrauch}$ ) zu bestimmen.

29. Vorrichtung nach Anspruch 28, dadurch gekennzeichnet, dass eine Gebrauchsentfernungsbestimmungseinrichtung zur Bestimmung der Gebrauchsentfernung ( $a_{Gebrauch}$ ) vorgesehen ist und dass die Additionsbestimmungseinrichtung eingerichtet ist, die vorläufige Addition ( $Add_{vorläufig}$ ) nach folgender Gleichung zu berechnen:

$$Add_{vorläufig} = 1/a_{Gebrauch} - \sigma \Delta A_{max}^*$$
, wobei  $\sigma$  eine reelle Zahl darstellt, die im Bereich  $0 \leq \sigma \leq 1$  liegt.

30. Vorrichtung nach Anspruch 28, dadurch gekennzeichnet, dass eine Gebrauchsentfernungsbestimmungseinrichtung zur Bestimmung der Gebrauchsentfernung ( $a_{Gebrauch}$ ) vorgesehen ist und dass die Additionsbestimmungseinrichtung eingerichtet ist, die vorläufige Addition ( $Add_{vorläufig}$ ) nach folgender Gleichung zu berechnen:

$$Add_{vorläufig} = 1/a_{Gebrauch} - \sigma \Delta A_{max}$$
, wobei  $\sigma$  eine reelle Zahl darstellt, die im Bereich  $0 \leq \sigma \leq 1$  liegt.

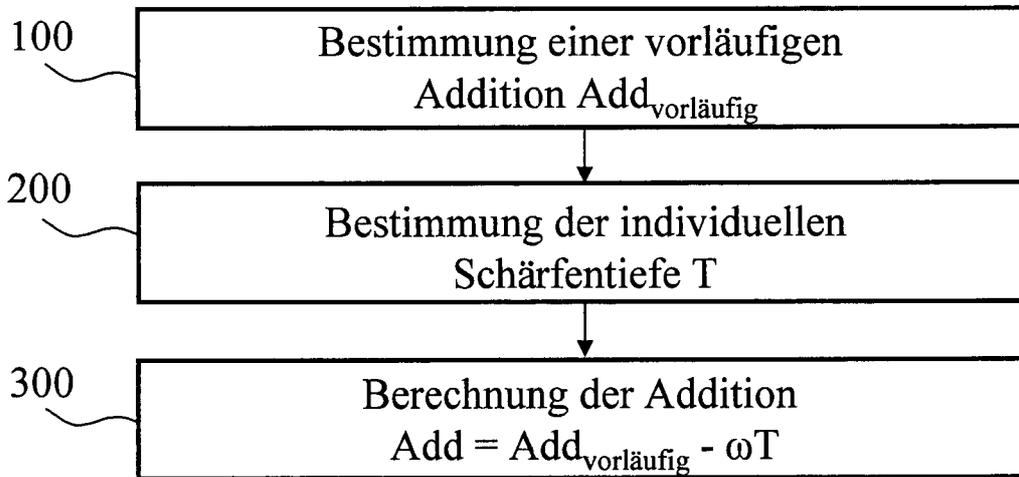
31. Vorrichtung zur Bestimmung der individuell erforderlichen Addition (Add) einer Sehhilfe für ein Auge mit:

- a) einer Akkommodationsbreitenbestimmungseinrichtung zur individuellen und objektiven Bestimmung der Akkommodationsbreite ( $\Delta A_{max}$ ),
- b) einer Gebrauchsentfernungsbestimmungseinrichtung zur individuellen Bestimmung der Gebrauchsentfernung ( $a_{Gebrauch}$ ),
- c) einer Additionsberechnungseinrichtung zur Berechnung der Addition (Add) nach folgender Gleichung:  
 $Add = 1/a_{Gebrauch} - \sigma \Delta A_{max}$ , wobei  $\sigma$  eine reelle Zahl darstellt, die im Bereich  $0 < \sigma \leq 1$  liegt.

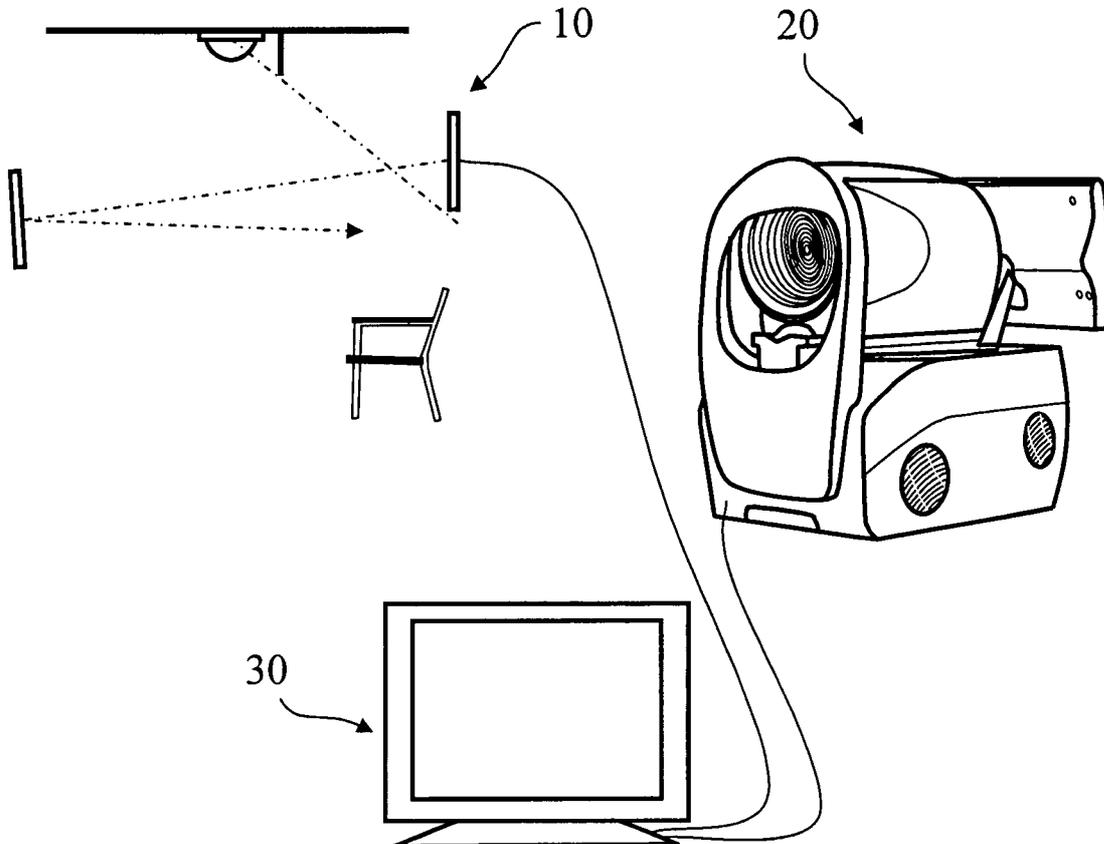
32. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 30 oder 31, dadurch gekennzeichnet, dass die Akkommodationsbreitenbestimmungseinrichtung eine Wellenfrontmesseinrichtung umfasst.

Es folgen 13 Blatt Zeichnungen

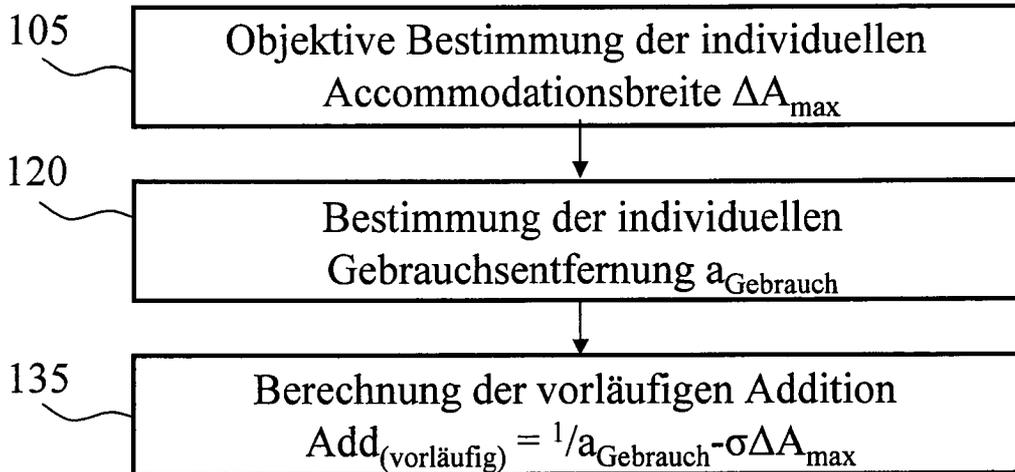
**FIG.1**



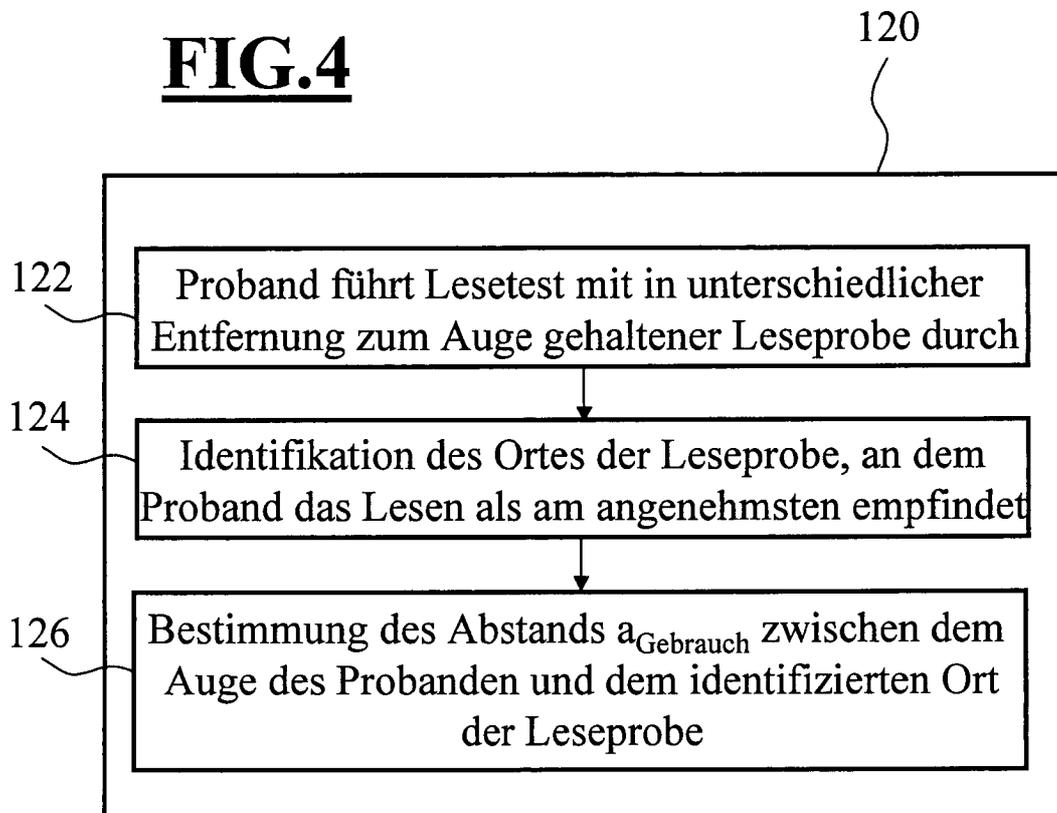
**FIG.2**



### FIG.3

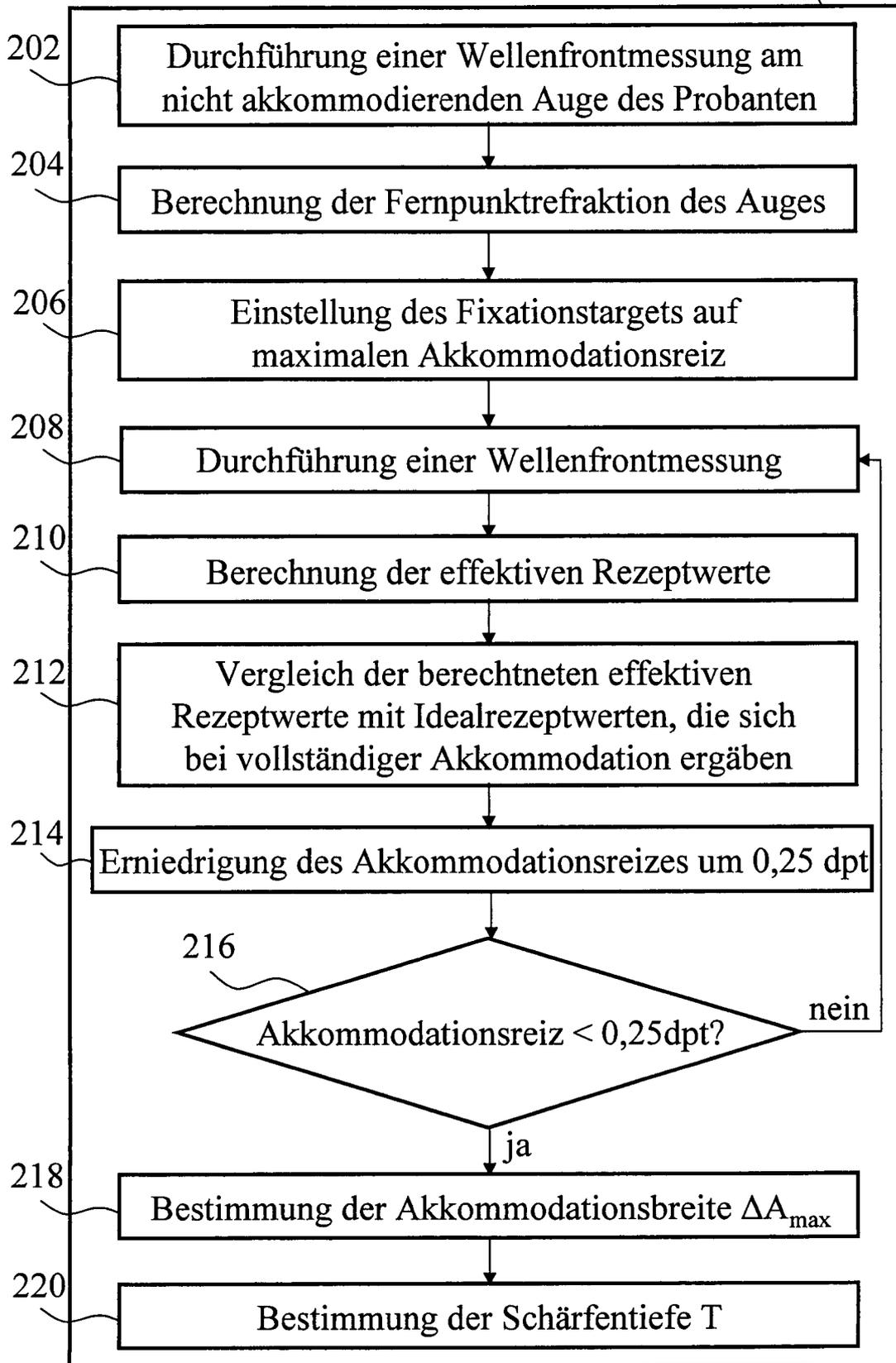


### FIG.4

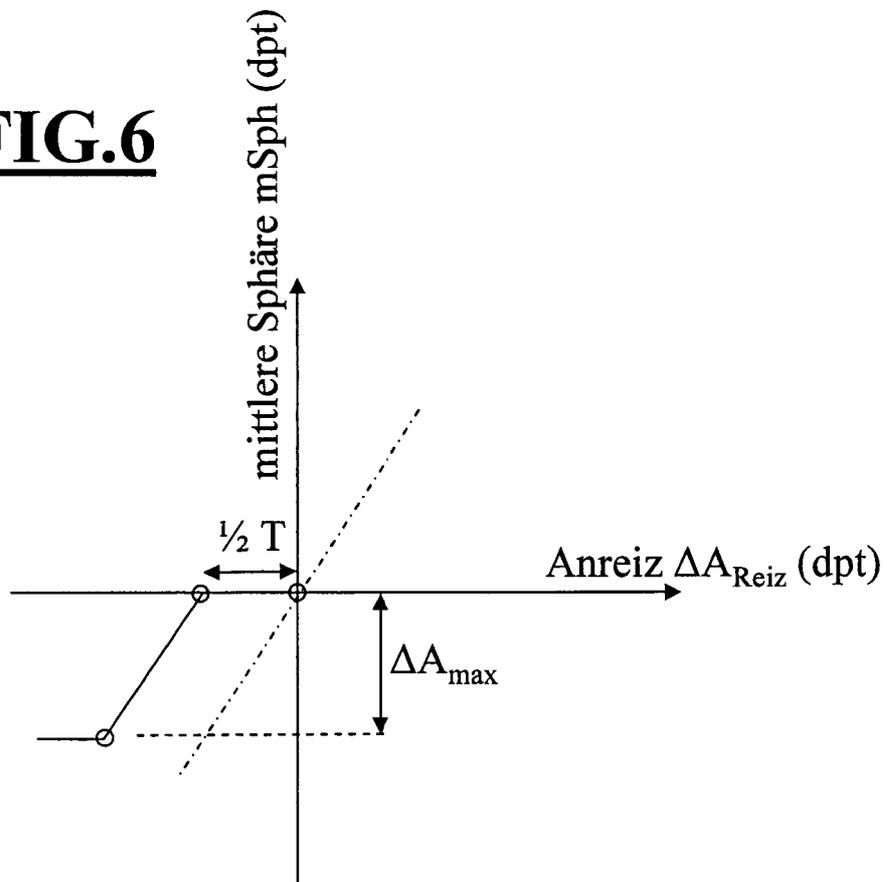


**FIG.5**

200

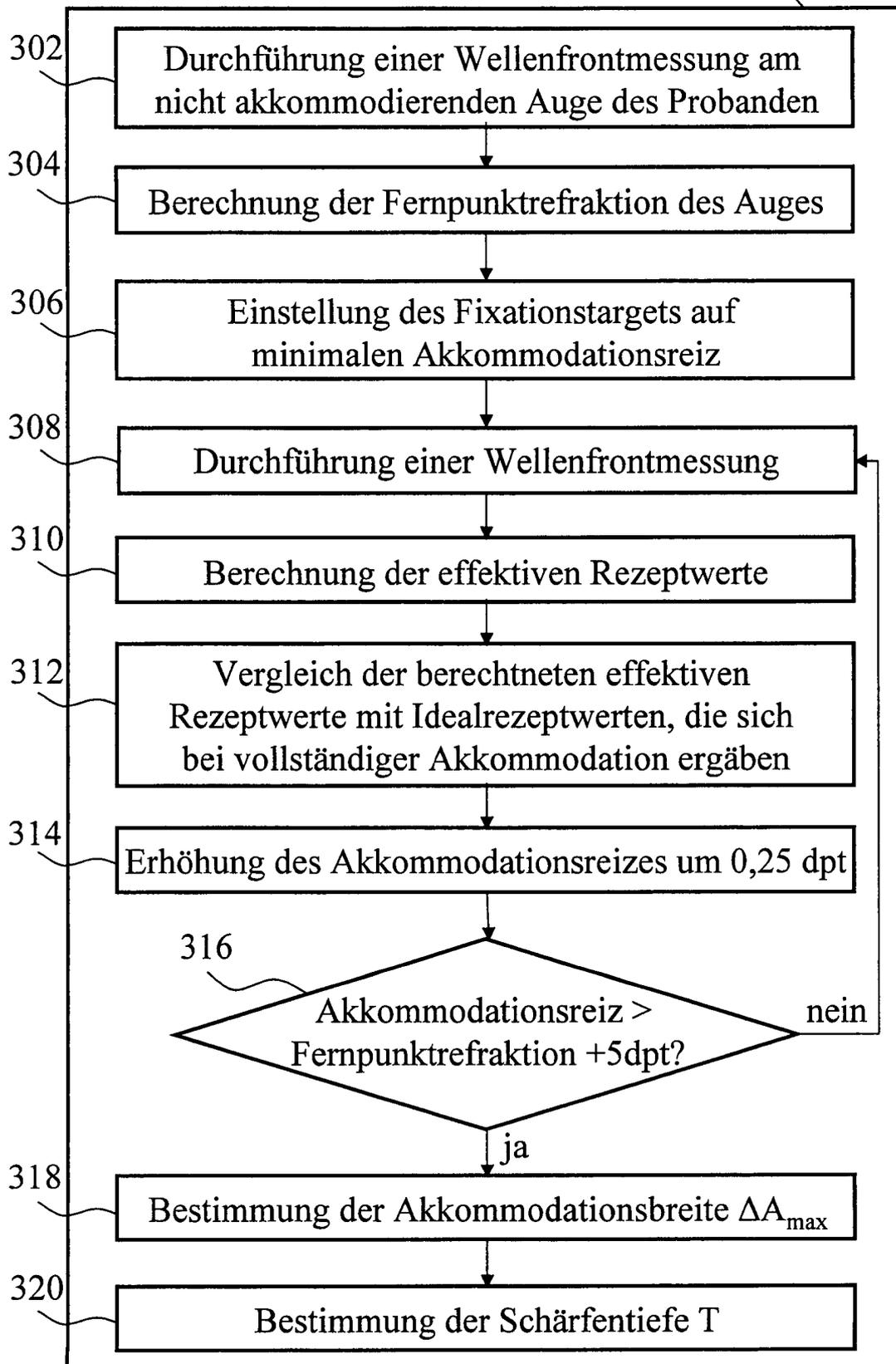


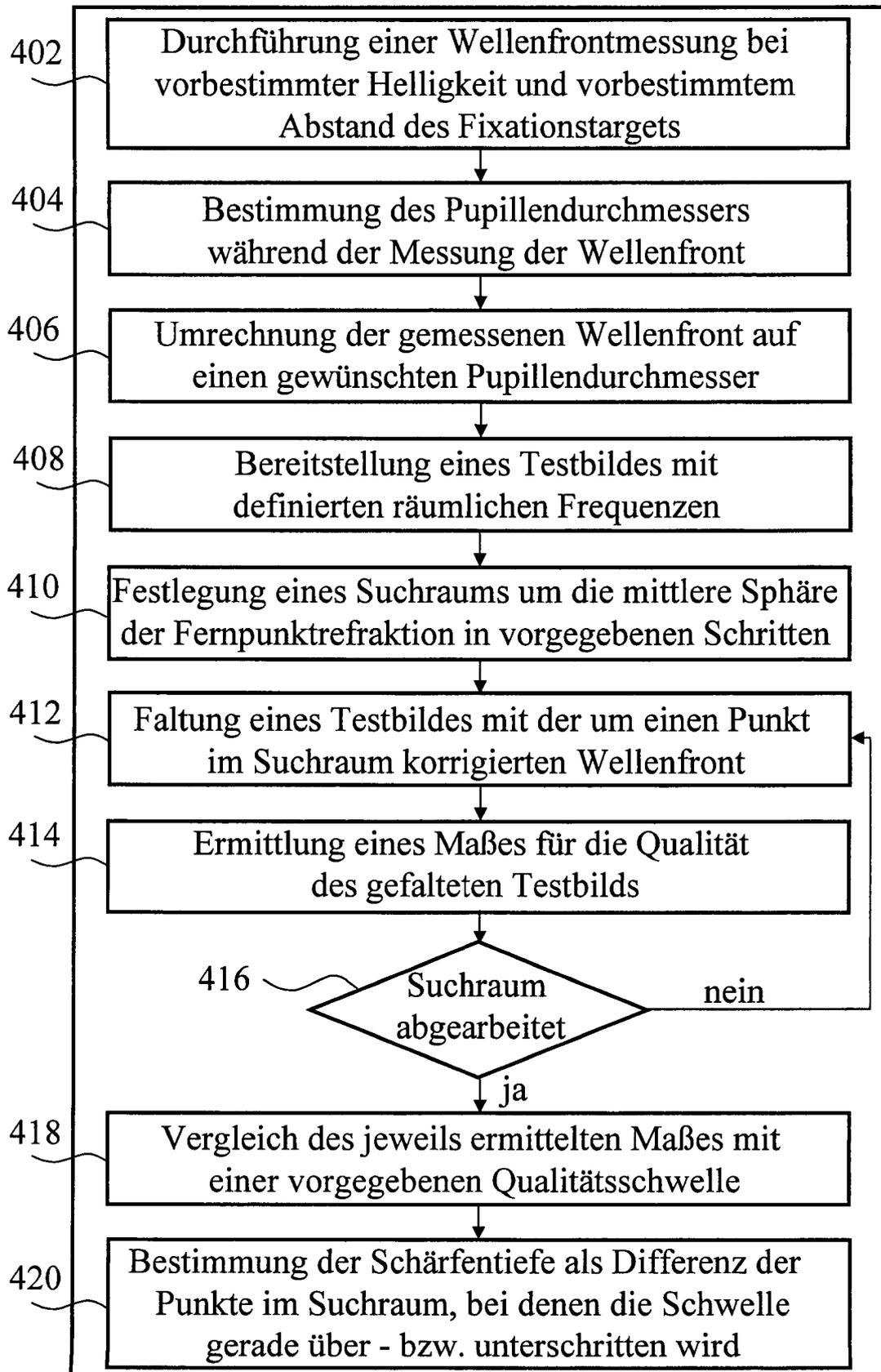
**FIG.6**



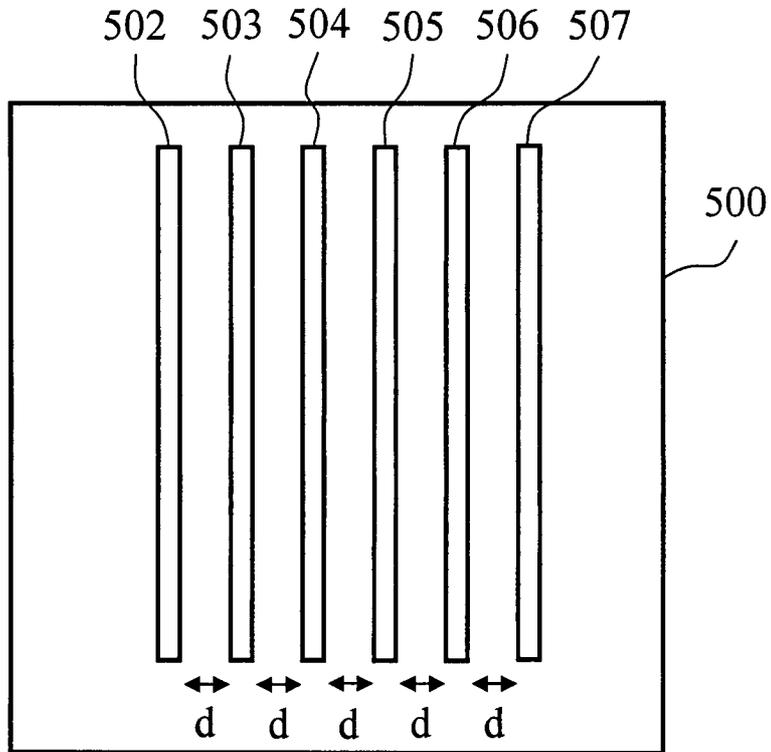
**FIG.7**

300

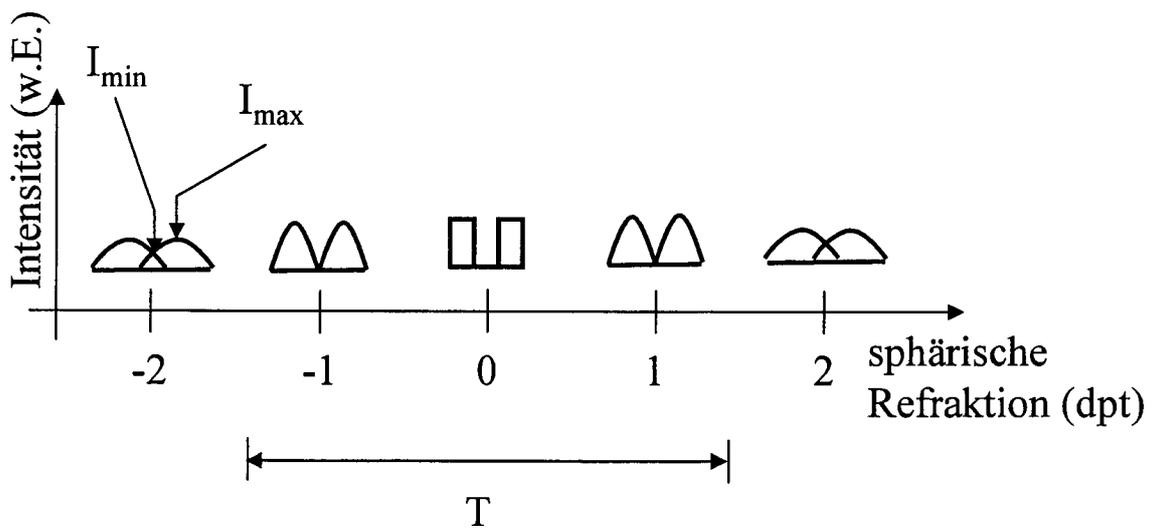


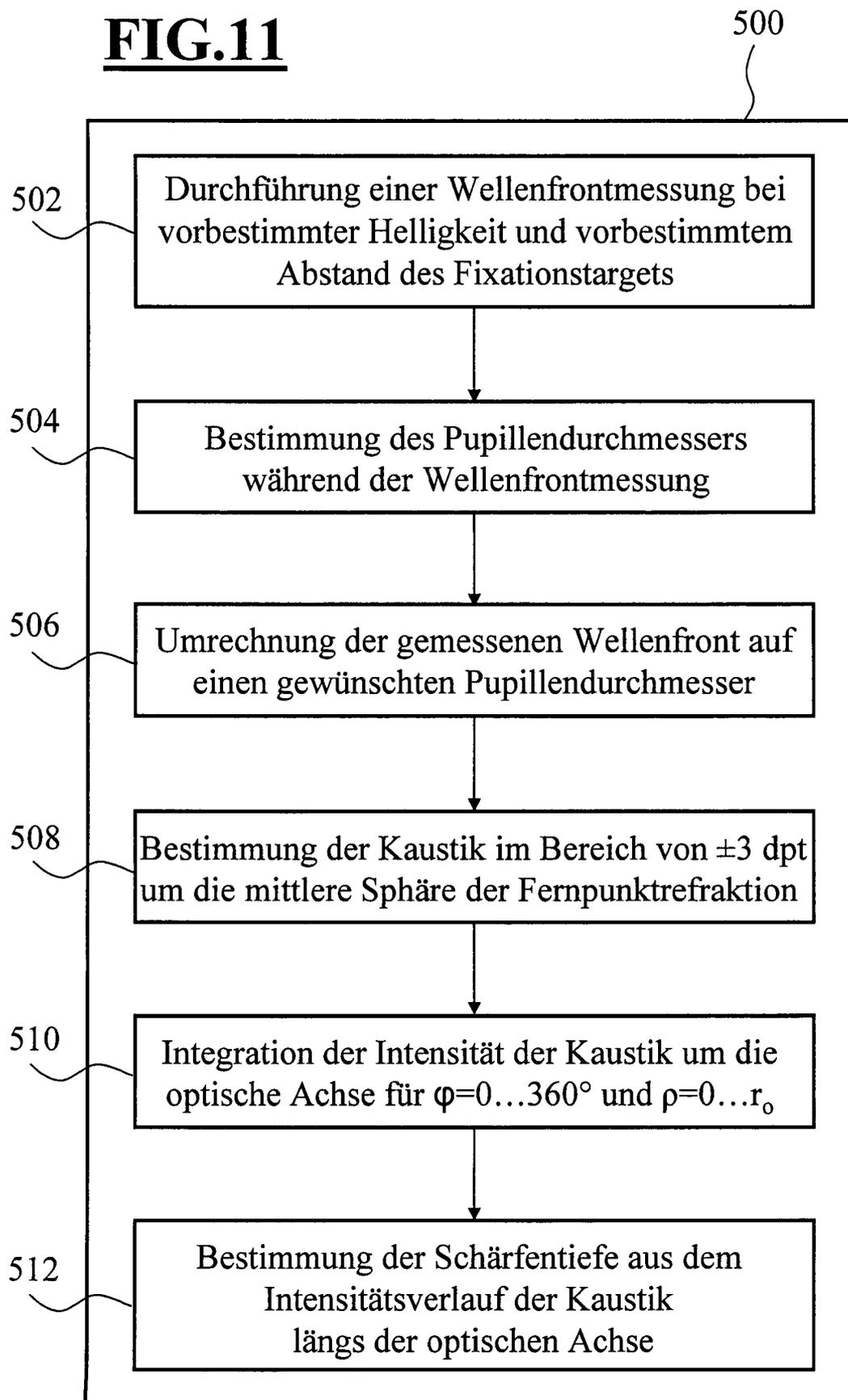
**FIG.8**

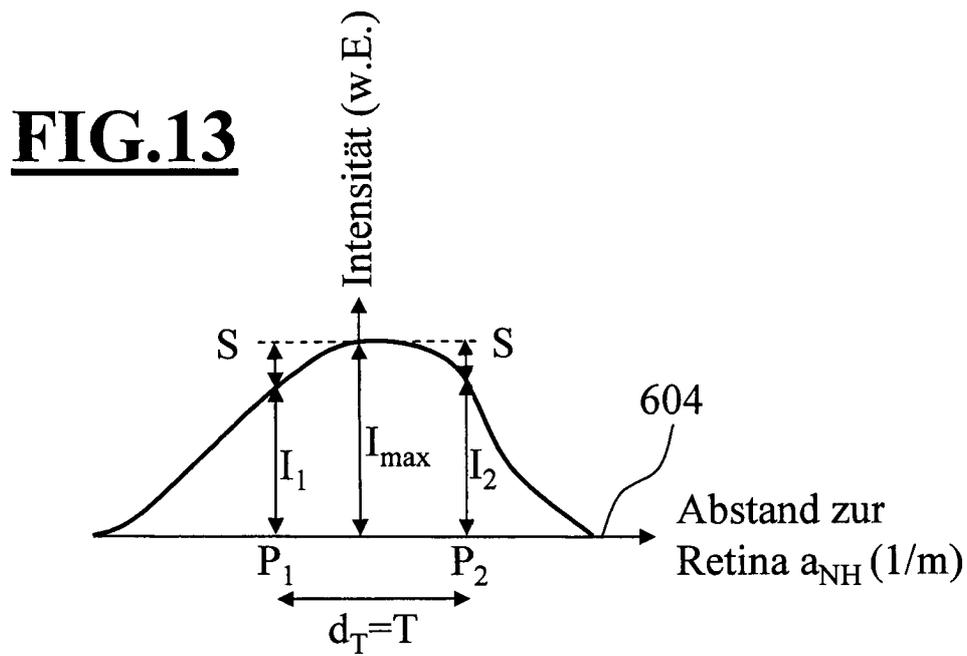
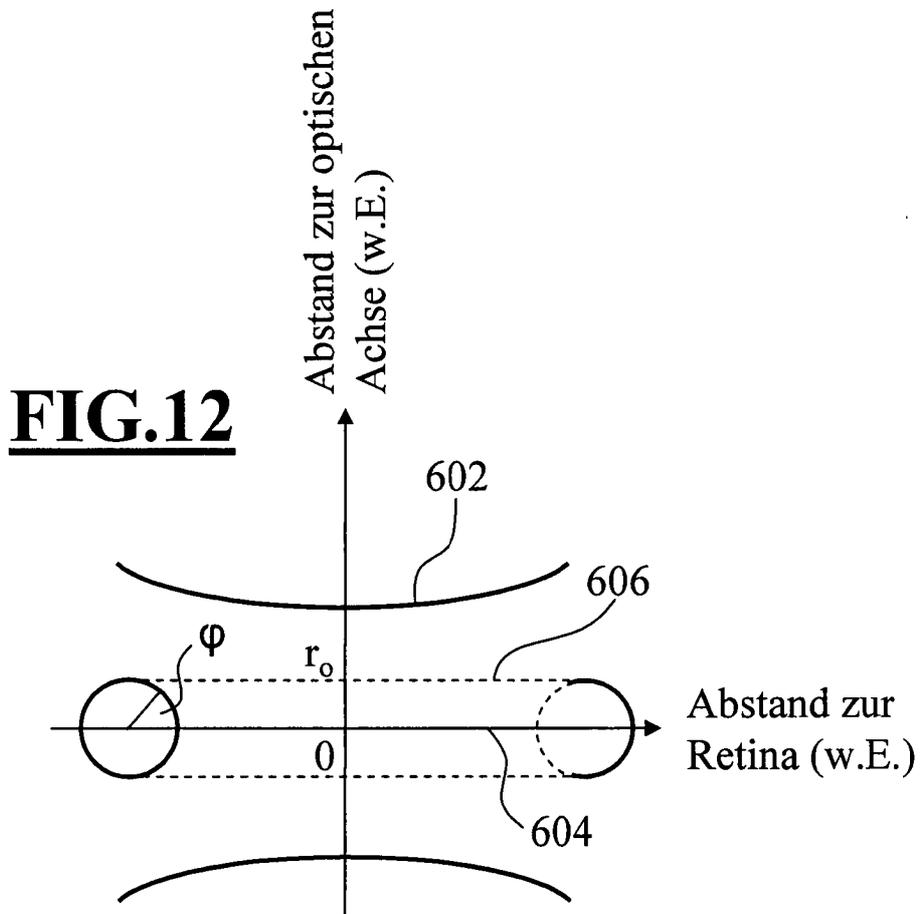
**FIG.9**



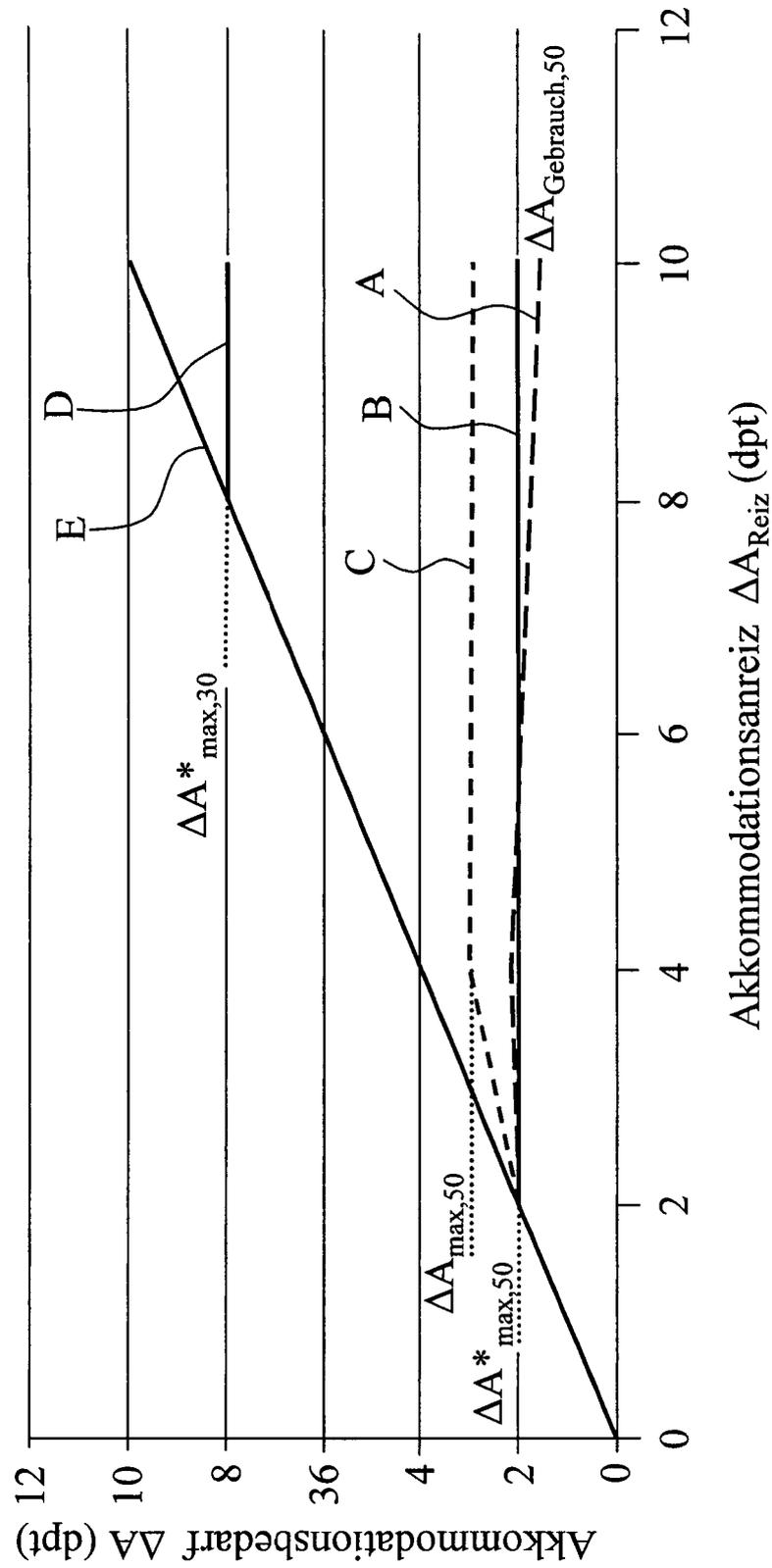
**FIG.10**



**FIG.11**

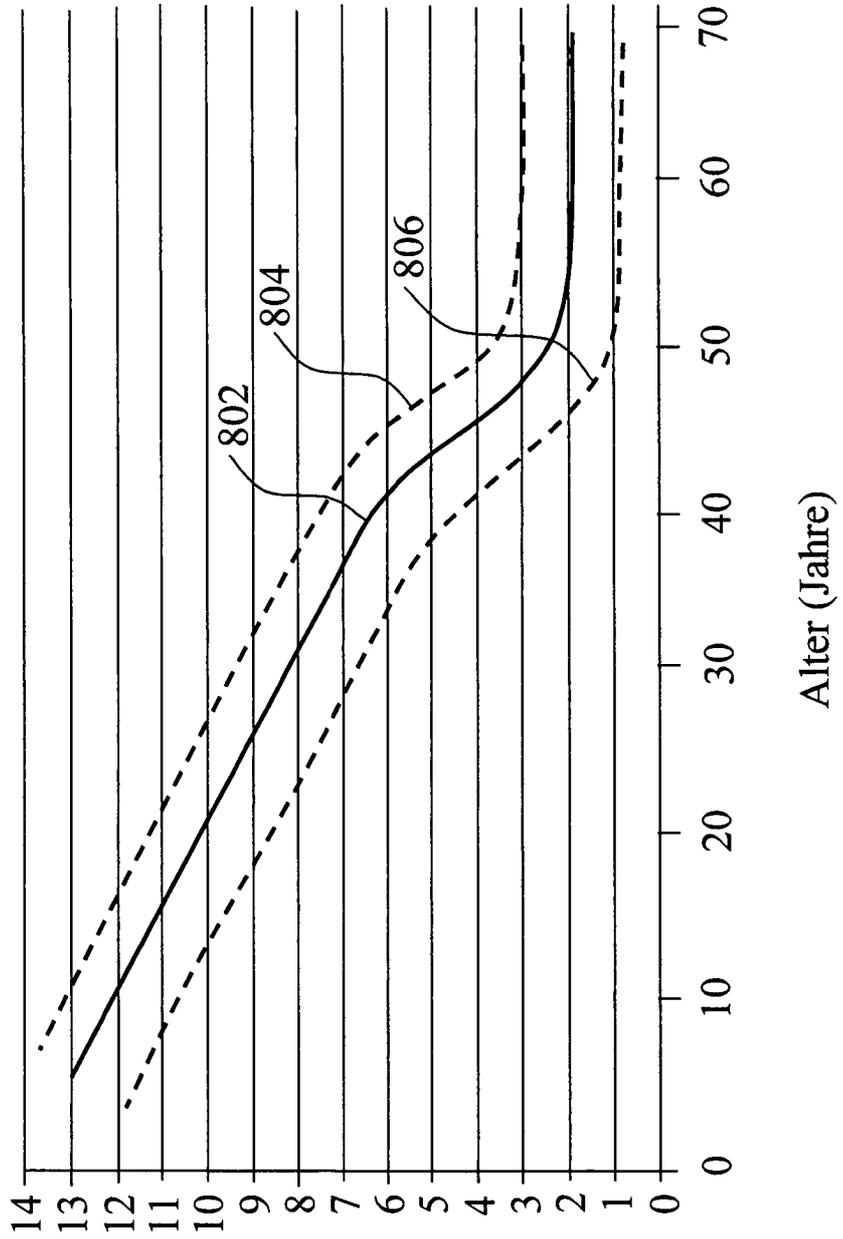


**FIG.14**

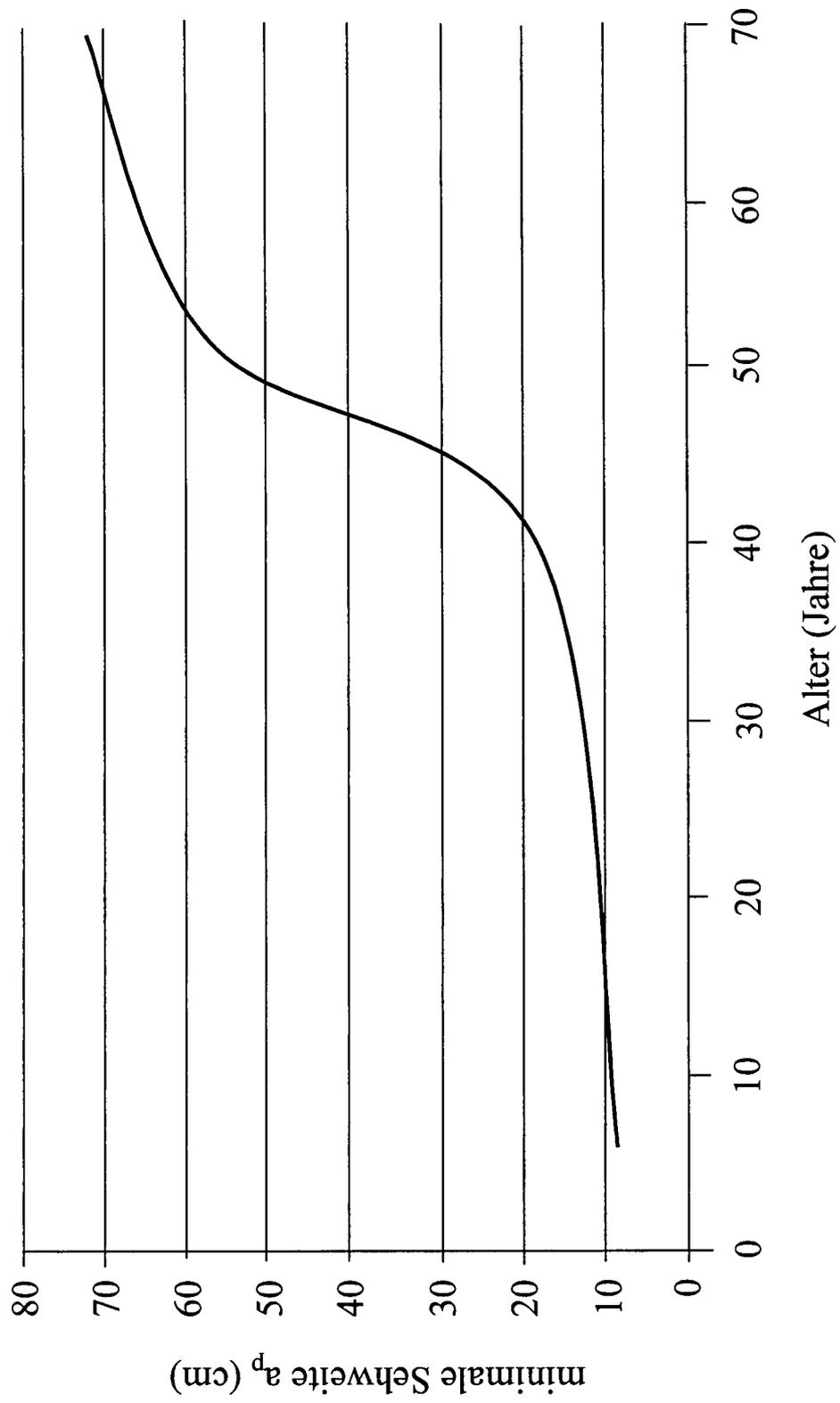


physiologische Akkomodationsbreite  $\Delta A^*_{\max} = \Delta A_{\max} + T$  (dpt)

**FIG.15** Stand der Technik



**FIG.16** Stand der Technik



**FIG.17**

Stand der Technik

