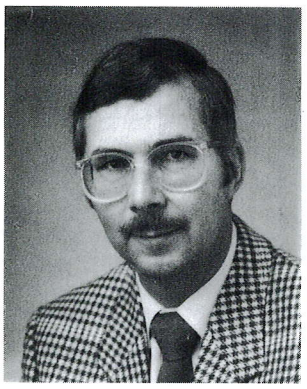


**Dipl.-Phys.
Werner Köppen,
Charenton/Frankreich**

Konzeption und Entwicklung von Progressivgläsern*

In den meisten Vorträgen und Publikationen über Progressivgläser werden die optischen Eigenschaften ausführlich diskutiert, der eigentliche Entwicklungsprozeß wird dagegen nur am Rande gestreift. Darum ist es das Ziel dieser Veröffentlichung, detailliert die verschiedenen Stufen zu beschreiben, nach denen ein Gleitsichtglas konzipiert wird. Es ist nicht überraschend, daß in diesem Zusammenhang die Berücksichtigung der physiologischen Anforderungen einen besonderen Platz einnimmt. Bei der Diskussion dieses Punktes wird die Abhandlung speziell auf die Leistungsfähigkeit von Progressivgläsern im Straßenverkehr eingehen.

*Nach einem Referat auf dem WVAO-Jahreskongreß (25.–28.5.1995) in Goslar

1 Der „Design-Loop"

Um den Ablauf des Entwicklungsprozesses eines Gleitsichtglases verstehen zu können, ist es notwendig, sich einen grundsätzlichen Sachverhalt klar zu machen.

In der ophthalmologischen Optik gibt es heute weder ein mathematisches Modell noch irgendein Experiment, das das Sehverhalten und den Seheindruck des Brillenträgers simulieren kann. Dieser Sachverhalt bedeutet, daß sich die Konzeption eines neuen Glases nicht allein auf die Berechnung der Fläche beschränken kann, sondern das Ergebnis eines komplexen Prozesses ist, an dessen Anfang und Ende der Brillenträger eine wesentliche Rolle spielt (Abb. 1). Das Design, das heißt die Geometrie eines progressiven Glases zu berechnen, heißt veschiedene Zonen (räumlich) nebeneinander auf dem Glas anzuordnen, die beim natürlichen Sehen in die Ferne, in die Nähe und in die Zwischenentfernungen (zeitlich) nacheinander benutzt werden.

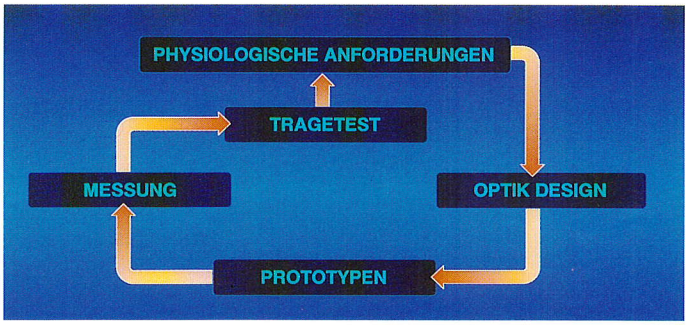


Abb. 1 Design-Kreisprozeß für ein Progressivglas

So sind für die Leistungsfähigkeiten des Glases die Vorgaben über die Größe, Anordnung und Abbildungsgüte der verschiedenen Sehzonen von entscheidender Bedeutung. Diese Vorgaben sind das Ergebnis von Experimenten, die die einzelnen Elemente des Sehvorgangs analysieren und quantitativ beschreiben. Ob die berechneten Flächen den angestrebten Sehkomfort liefern, kann – wie eben erwähnt – nur der Brillenträger beurteilen, und zwar mit Hilfe sogenannter Tragetests. Vorab sind Prototypen des neuen Glases anzufertigen, und Messungen der Oberflächen stellen sicher, daß keine Abweichungen zum rechnerischen Konzept auftreten. In Abhängigkeit vom Resultat der Tragetests muß dieser Kreis unter Umständen mehrere Male durchlaufen werden. Im nächsten Abschnitt betrachten wir einige Stationen des „Design-Loop" im Detail.

2 Die Flächenoptimierung

Um die nicht rotationssymmetrische asphärische Geometrie eines Gleitsichtglases mathematisch zu beschreiben, legt man im übertragenen Sinn ein feinmaschiges Netz über die Fläche, wie dies bei der exotischen Fläche in Hutform in Abb. 2 gezeigt ist. Die

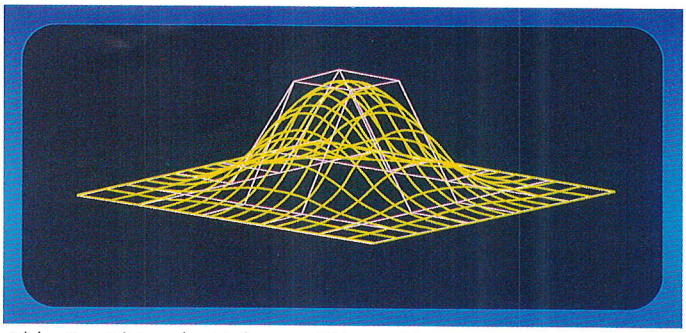


Abb. 2 Gitter der Polynomstützpunkte

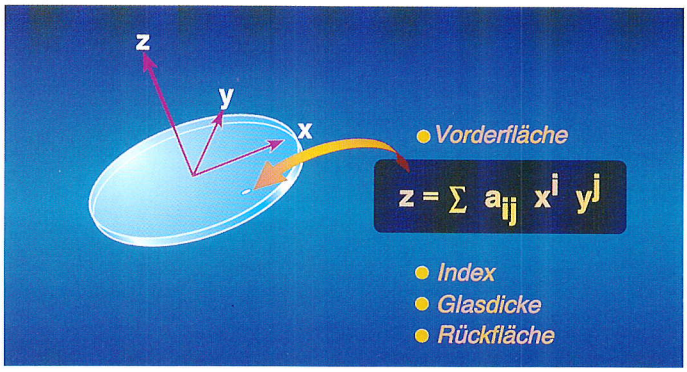


Abb. 3 Parameter eines Progressivglases

Knotenpunkte dieses Netzes dienen als Stützpunkte für mathematische Funktionen, sogenannte Polynome, die für jedes Flächenelement X, Y die Pfeilhöhe Z und die Flächennormale, das heißt die Orientierung des Flächenelementes, angeben (Abb. 3). Die Experten für die Flächenoptimierung kennen verschiedene Typen von Polynomen: die klassischen Splines, die Polynome von Zernicke und andere. Sie unterscheiden sich dadurch, daß sie verschiedene Flächentypen, zum Beispiel „harte" und „weiche" Flächen, zu berechnen gestatten; sie können unter anderem auch miteinander kombiniert werden. Für eine präzise Beschreibung der Fläche muß das Netz sehr engmaschig und die Zahl der Knotenpunkte groß sein. Eine typische Größenordnung ist eine Zahl von etwa 1000 bis 1500 Knotenpunkten. Entsprechend hoch ist die Zahl der Koeffizienten aij. Diese Koeffizienten aij beschreiben nun die Lage und die Ausdehnung der Sehfelder für Ferne, Nähe, Zwischenentfernung sowie die Peripherie des Gleitsichtglases. Um die optimalen Werte dieser Koeffizienten zu bestimmen, geht man wie folgt vor (Abb. 4): Von einer Ausgangsfläche mit bekannten Eigenschaften startend, ändert ein Computerprogramm systematisch die Koeffizienten des Polynoms, bis die gewünschte Flächenverbesserung erzielt ist. Dabei ist die Zielvorgabe durch die sog. Sollwertfunktion definiert, die im Englischen „merit-function" heißt. Sie steuert und kontrolliert die Variation der Koeffizienten aij. Die Merit-Funktion ist grundsätzlich einfach und übersichtlich aufgebaut (Abb. 5). Aj beschreibt in einem definierten Punkt eine bestimmte Eigenschaft der Ausgangsfläche, zum Beispiel die optische Wirkung. Tj ist der angestrebte Wert der optischen Wirkung in diesem Punkt. Die Aufgabe des Rechneroptimierungsprogrammes ist es, den Unterschied zwischen Ausgangswert und Zielwert der optischen Wirkung möglichst klein zu machen, das heißt zu minimieren. Die Merit-Funktion berücksichtigt natürlich nicht nur die optische Wirkung, sondern auch andere Flächeneigenschaften wie Astigmatismus und Distorsion, dies drückt sich im Summenzeichen $\sum_j$ aus. Das Summenzeichen $\sum_i$ bedeutet, daß die Flächeneigenschaften in allen Flächenpunkten i zu berücksichtigen sind. Sehr wichtig sind die Koeffizienten Wj und Pi, die sogenannten Gewichtungen. So gibt beispielsweise Wj an, welche Anforderung an die Flächeneigenschaften in einem bestimmten Punkt besonders zu berücksichtigen ist, zum Beispiel die präzise Einhaltung der optischen Wirkung oder einen bestimmten Astigmatismusgrenzwert nicht zu überschreiten. Im Wert des Koeffizienten Pi drückt sich die Bedeutung des betrachteten Flächenpunktes für das Sehen aus. So ist der Wert für Pi zum Beispiel für einen Punkt im zentralen Bereich größer als für die Randzone. Über die Koeffizienten T, P und W fließen nun die physiologischen Anforderungen ein, das heißt, sie werden aus der Analyse des Sehvorgangs bestimmt.

Grob gesehen können bei einem Gleitsichtglas drei Qualitäten von Sehbereichen unterschieden werden, nämlich

- der Hauptmeridian, der unbedingt abbildungsfehlerfrei zu halten ist,

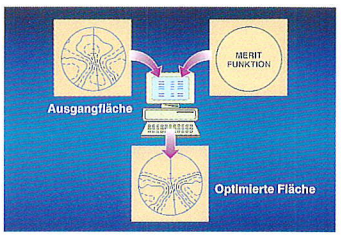
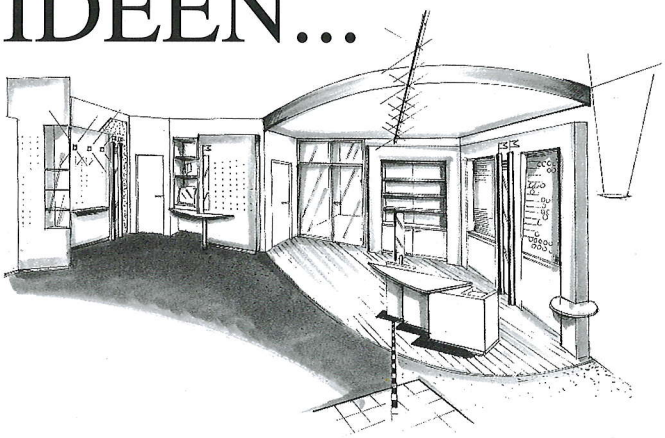


Abb. 4 Flächenoptimierung eines Progressivglases (links)
Abb. 5 Sollwertfunktion zur Flächenoptimierung (rechts)

IDEEN...



...AUF DEN PUNKT GEBRACHT

J.B. JÄSCHKE
CREATIVER LADENBAU

J.B. JÄSCHKE GMBH & CO. KG
NIEDENSTRASSE 145-147
40721 HILDEN

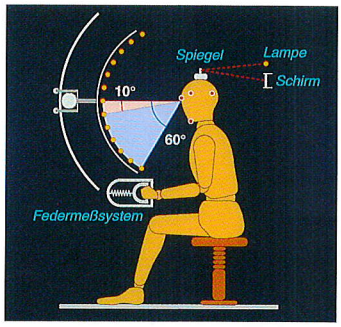
TELEFON 02103/54717+54271
TELEFAX 02103/56330

FÜR OPTIKER

- die fovealen Sehzonen für Ferne, Nähe und Mitteldistanz, innerhalb derer bestimmte Schwellenwerte der Abbildungsfehler strikt berücksichtigt werden müssen, und
- die Flächenperipherie, die für das foveale Sehen von geringer Bedeutung, aber wichtig für die Orientierung ist.

3 Berücksichtigung der physiologischen Anforderungen

Die physiologischen Untersuchungen, die erforderlich sind, um die Koeffizienten T, W und P zu ermitteln, werden am Beispiel der Sehzonen für das foveale Sehen erläutert. Was den Hauptmeridian und die Flächenperipherie anbelangt, haben der Verfasser [1] und E. Kampmeier [2] einige einschlägige Analysemethoden vorgestellt (Abb. 6 und 7). Um das zentrale Sehen zu beschreiben sind die folgenden zwei Informationen erforderlich:



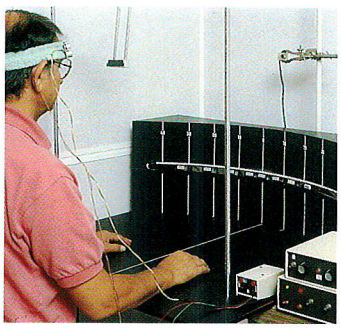


Abb. 6 Messung der Anstrengung bei Augensenkung (links)
Abb. 7 Messung der Augenauslenkungen und Kopfbewegungen bei peripheren Lichtreizen (rechts)

a) Lage und Ausdehnung der Gebrauchsblickfelder;
b) Bestimmung der Schwellenwerte der Abbildungsfehler, die in Abhängigkeit der verschiedenen Zonen nicht überschritten werden dürfen.

Welche Eigenschaften muß ein Gleitsichtglas besitzen, um beispielsweise beim Autofahren größtmöglichen Komfort und Sicherheit zu bieten? Abb. 8 zeigt, wie das Sehverhalten im Straßenverkehr ermittelt wird. Ein Ultraschallmeßsystem erfaßt

Abb. 8 Messung der Kopf- und Augendrehungen bei der Autofahrt

die Kopfbewegungen, und die Augenauslenkungen werden nach dem Elektrookulographieprinzip erfaßt, das heißt, Elektroden, die seitlich sowie ober- und unterhalb des Auges angebracht sind, messen die Aktionsströme. Eine erste grobe Information

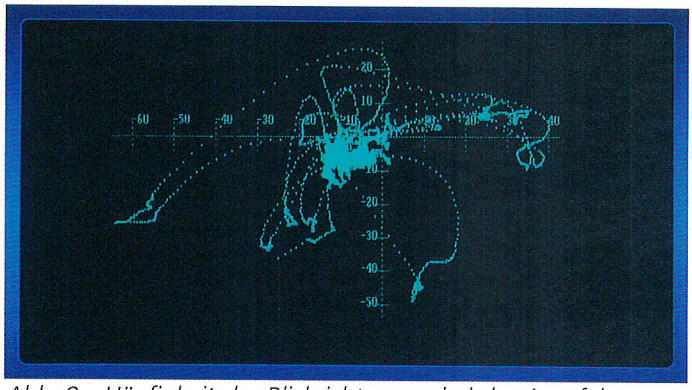


Abb. 9 Häufigkeit der Blickrichtungen bei der Autofahrt

liefert uns das Diagramm der Abb. 9, das die verschiedenen Blickrichtungen des Fahrers wiedergibt: der flächenhafte hellblaue Bereich beschreibt den Blick des Fahrers auf die Straße, darüber hinaus sieht man vereinzelte Augenauslenkungen auf den linken Außenspiegel, den Innenspiegel und das Armaturenbrett. Die angeblickten Objekte befinden sich maximal 45° seitlich vom Fahrer und bis zu 25° unterhalb der horizontalen Blickrichtung. In welcher Weise richtet nun der Autofahrer den Blick auf die Objekte: durch Kopfbewegungen oder durch Augenrotationen? Die Antwort darauf gibt uns die Graphik der Abb. 10. Sie zeigt, daß beim Erfassen der seitlichen Objekte unter den speziellen Bedingungen des Autofahrens die Kopfdrehun-

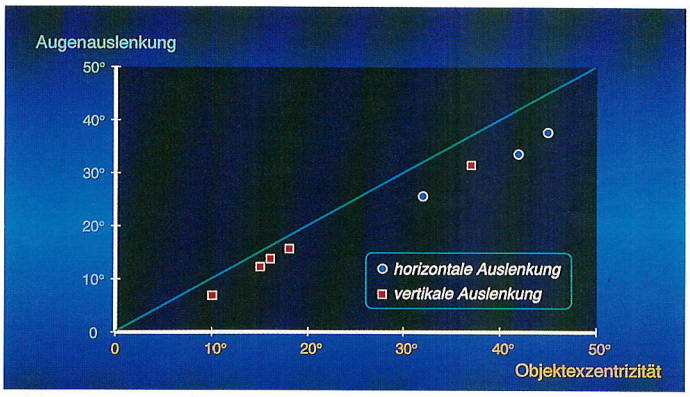


Abb. 10 Augenbewegungen beim Autofahren

gen gering bleiben, das heißt weniger als 10° in horizontaler und vertikaler Richtung. Für das progressive Glas bedeutet dies unter anderem, daß ein gut abbildendes Fernteil bis zu 30°/40° zur Verfügung stehen muß. Die Abb. 11 und 12 veranschaulichen, wie für eine andere Benutzung des Glases, nämlich für die Arbeit

Abb. 11 Registrierung der Augen- und Kopfbewegungen bei der Büroarbeit

im Büro, die Gebrauchszonen bestimmt werden. Die Graphik zeigt zwei Peaks der Benutzungshäufigkeit, die dem Schreibobjekt und der Vorlage entsprechen. Bezüglich der Sollwertfunktion liefern uns die eben geschilderten Untersuchungen die Informationen, um die Koeffizienten P und W festzulegen, das heißt zu bestimmen, welche Flächenpunkte für das zentrale Sehen besonders wichtig sind und in welcher Ordnung die verschiedenen optischen Eigenschaften zu berücksichtigen sind.

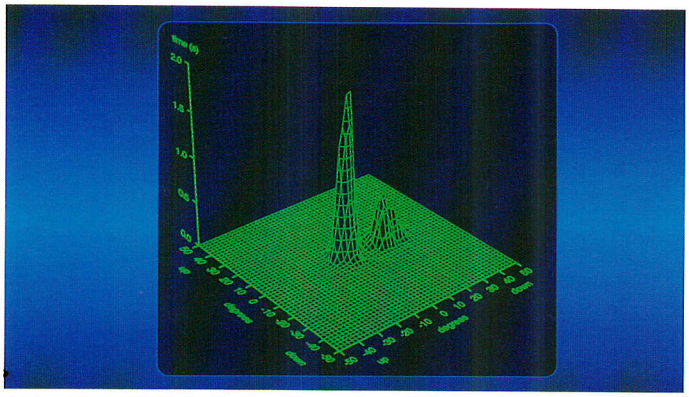


Abb. 12 Häufigkeitsverteilung der Blickrichtungen bei der Büroarbeit

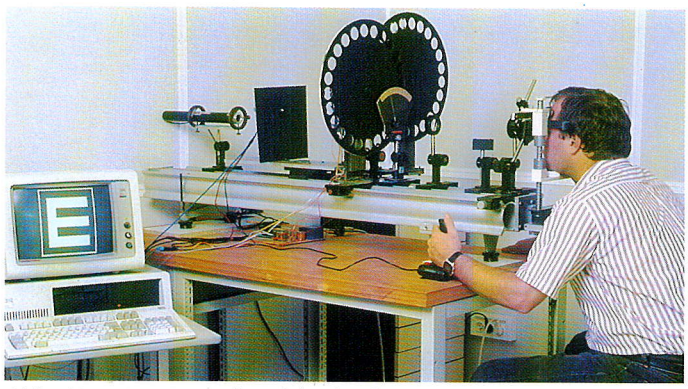


Abb. 13 Messung der Sehschärfe in Abhängigkeit von den Abbildungsfehlern

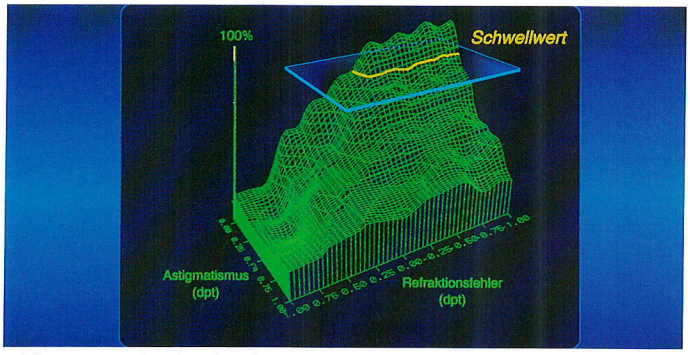


Abb. 14 Sehschärfe als Funktion der Abbildungsfehler

Neben Lage und Ausdehnung der Sehzonen sind die Sollwerte und die Schwellenwerte der optischen Eigenschaften die zweite Spezifikation, die für die Definition der Sollwert-Funktion erforderlich ist. Für das zentrale Sehen ist zweifellos die Sehschärfe die wichtigste Funktion. Mit der Apparatur in Abb. 13 wird gemessen, wie die Sehschärfe mit dem Betrag des Astigmatismus und der Refraktionsabweichung abnimmt, und das Ergebnis ist aus dem Diagramm in Abb. 14 ersichtlich. Die erforderliche Sehschärfe ist entsprechend den unterschiedlichen Anforderungen der Sehzonen für Ferne, Nähe und Zwischendistanz verschieden. So lassen sich mit Hilfe dieser Graphik für jede Sehzone spezifische Schwellenwerte bestimmen, die von den Abbildungsfehlern nicht überschritten werden dürfen. In ähnlicher Weise legen die Physiologen die Zielvorgaben oder Maximalwerte für andere wichtige Komponenten des Sehens fest. Beispielsweise hängt die Qualität des peripheren Sehens entscheidend von der Wahl der Änderungsgeschwindigkeit der optischen Parameter Sphäre, Zylinder und Prisma ab. Die Gesamtheit dieser Resultate liefert die Größen T der Sollwertfunktion.

4 Kontrolle der progressiven Fläche

Um die Leistungsfähigkeit der neuen Flächengeometrie zu testen, werden Prototypen angefertigt. Vor den Trageversuchen muß jedoch sichergestellt werden, daß die Gläser mit dem theoretischen Konzept identisch sind. Darüber hinaus kann man sich nicht damit begnügen, nur die relativ wenigen Prototypen der Testphase zu kontrollieren. In der späteren Produktion ist es notwendig, systematisch zu überprüfen, daß die engen Toleranzen eingehalten werden. Ein präzises Meßverfahren allein genügt nicht, es muß auch in der Lage sein, die Messung sehr schnell auszuführen.

Die mechanische Pfeilhöhenmessung, die in Abb. 15 darge-

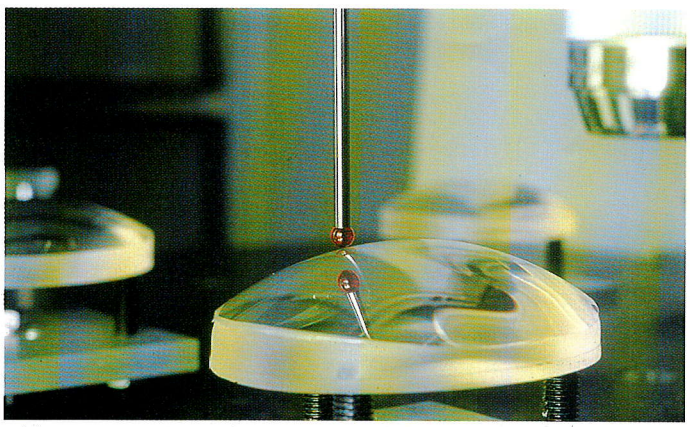


Abb. 15 Mechanische Vermessung einer progressiven Fläche

stellt ist, ist wohl hinreichend genau, aber langsam. Die Meßzeit liegt in der Größenordnung von 30 bis 60 Minuten. Optische Messungen lassen sich dagegen sehr schnell ausführen und sind extrem präzise. Die herkömmlichen Methoden, die auf dem Prinzip der Interferometrie beruhen, sind auf die Messung quasisphärischer Flächen beschränkt und für eine Kontrolle progressiver Gläser, zumindest in der Fertigung, nicht geeignet. So haben wir ein spezielles Meßgerät, das patentiert wurde, entwickelt, das das Prinzip der Deflektometrie benutzt (Abb. 16). Von einer punktförmigen Lichtquelle gehen sphärische Lichtwellen aus, die

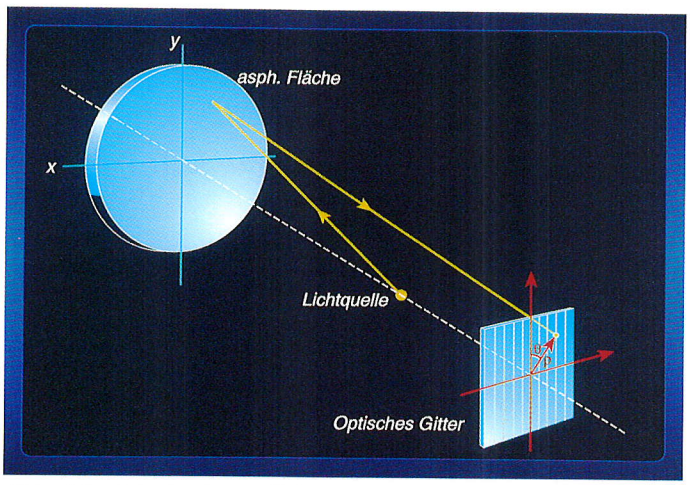


Abb. 16 Prinzip des Deflektometers

von der zu messenden Fläche reflektiert werden. Nach der Reflexion passiert die Lichtwelle ein optisches Gitter, das zum Beispiel aus einer Folge von vertikalen durchlässigen und undurchlässigen Streifen besteht. Bringt man hinter dem Gitter einen Schirm an, so wirft das Gitter einen „Schatten" auf diesen Schirm. Wertet man die Hell-Dunkelverteilung dieses Schattens elektronisch aus, so kann man die Ablenkung berechnen, die der Strahl durch die asphärische Oberfläche erfahren hat; darum die Bezeichnung Deflektometrie. Diese Ablenkungen schließlich erlauben es, Rückschlüsse auf die Geometrie der Fläche zu ziehen.

Mit dieser optischen Methode können progressive Flächen in etwa zwei bis drei Minuten auf wenige hundertstel Dioptrien genau vermessen werden, und dies nicht nur in den Kontrollpunkten für Ferne und Nähe, sondern über die gesamte asphärische Fläche (Abb. 17 und 18).

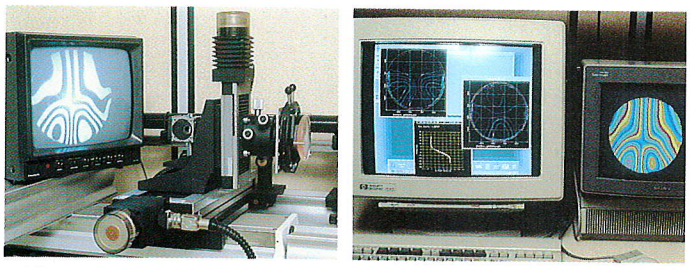


Abb. 17 Laborversion des Deflektometers (links)
Abb. 18 Auswertung des Deflektometersignals: Linien mit konstanter Wirkung bzw. konstantem Astigmatismus (rechts)

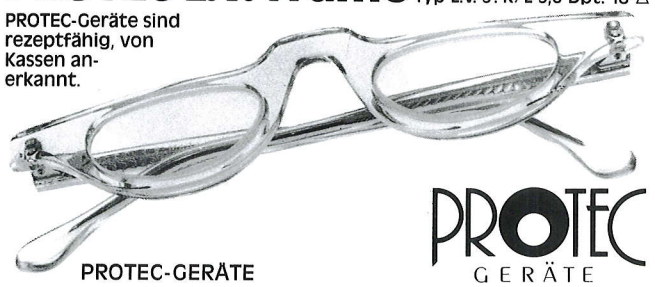
5 Der Tragetest

Der Design-Kreisprozeß (Abb. 1) schließt sich nun mit dem Tragetest. Trotz aller ausgeklügelter physiologischer Untersuchungen und der dazu verwendeten hochgenauen Meßverfahren bleibt der Brillenträger das schließlich allein maßgebende Kriterium. Zum einen muß jedes noch so kompliziert aufgebaute Progressivglas immer einen Kompromiß darstellen, da einer Vielzahl von physiologischen Forderungen die stark begrenzte Freiheit des Konstrukteurs gegenübersteht, der nur zwei Flächen, also Vorder- und Rückfläche, variieren kann. Zum anderen besitzen wir – wie eingangs erwähnt – kein rechnerisches Modell oder physikalisches Experiment, das den Sehvorgang simulieren kann. Um progressive Gläser mit manchmal nur geringen Leistungsniveauunterschieden sicher einstufen zu können, ist ein hoher Aufwand notwendig. Vergleichtests nach dem Doppelblindverfahren, eine hohe Anzahl von Versuchsteilnehmern in der Größenordnung von 100 sowie eine eingehende Versuchsvorbereitung und -durchführung durch Verhaltenspsychologen bedeuten, daß der Tragetest im Design-Loop heute – nach der Bestimmung der physiologischen Forderungen – den von der Zeit und den Kosten her aufwendigsten Abschnitt darstellt. So ist der Design-Kreisprozeß einerseits zweifellos ein komplexer Weg, ein Progressivglas zu entwickeln, er bietet andererseits die Gewähr, daß Möglichkeiten, progressive Flächen zu verbessern, nicht unbeachtet bleiben. Das heißt, daß wir auch in Zukunft noch leistungsfähigere Gleitsichtgläser erwarten können.

Literaturhinweise

[1] Köppen, W.: „Varilux Comfort" DOZ 9 (48) : 32-39, 1993
[2] Kampmeier, E.: „Varilux Comfort", Vortrag auf dem WVAO-Jahreskongreß 1993

Anschrift des Verfassers:
Dipl.-Phys. Werner Köppen, Direktion Marketing Brillengläser, Essilor International, rue de Paris 147, 94227 Charenton, Frankreich

Vergrößernde Sehhilfen
Binokulare Lupenbrille mit Konvergenzunterstützung
PROTEC L.V. frame Typ L.V. 7: R/L 7,0 Dpt. 14°Δ Typ L.V. 9: R/L 9,0 Dpt. 18°Δ
PROTEC-Geräte sind rezeptfähig, von Kassen anerkannt.

PROTEC GERÄTE
PROTEC-GERÄTE
EPPENDORFER WEG 274 · 20251 HAMBURG · TEL. 040/484483