

Priv.-Doz. Dr. Wolfgang Wesemann, Köln
 Jens-Uew Bartz, Köln
 Peter Arnolds, Köln

Meßgenauigkeit und Reproduzierbarkeit von PD-Meßgeräten und Unterschiede zwischen der Zentrierung auf Pupillenmitte bzw. auf Hornhautreflex

Die Pupillendistanz von 30 Studierenden der HFAK wurde mit sieben verschiedenen PD-Meßgeräten von neun verschiedenen Untersuchern bestimmt. Die PD jeder einzelnen Person wurde insgesamt 86mal gemessen. Durch eine statistische Auswertung der Daten konnten Rückschlüsse auf die Meßgenauigkeit und die Reproduzierbarkeit der verschiedenen Geräte gezogen werden.

Die beste Reproduzierbarkeit bei Zentrierung auf Pupillenmitte von $\pm 0,31$ mm wurde mit dem Video-Infral erzielt, dicht gefolgt von den Pupillometern der Firmen Rodenstock, Essilor, Hoya und Topcon mit $\pm 0,50$ bis $\pm 0,63$ mm. Etwas geringer war die Reproduzierbarkeit der herkömmlichen PD-Meßstäbe. Im Mittelwert ergaben sich mit fünf Verfahren sehr ähnliche Werte für die PD. Ein Gerät zeigte systematisch eine um ca. 0,6 mm kleinere PD an.

Außerdem wurden die Meßergebnisse, die bei einer Zentrierung auf die Pupillenmitte erzielt werden, mit den Ergebnissen verglichen, die man bei einer Zentrierung auf das Hornhautreflexbild erhält. Dabei ergab sich, daß die Hornhautreflex-PD im Mittel um 0,51 mm kleiner ist als die Pupillenmitten-PD. Allerdings zeigten sich außerordentlich große interindividuelle Unterschiede.

1 Einleitung

Selbst die genaueste subjektive Refraktionsbestimmung ist nicht viel wert, wenn bei der anschließenden Fertigung der Brille Zentrierfehler auftreten. Dies gilt besonders für Gleitsichtgläser, denn bei Gleitsichtgläsern können Zentrierabweichungen die binokular nutzbare Breite der Progressionszone beträchtlich verringern. Deshalb ist neben dem maßgenauen Einschleifen der Gläser eine möglichst hohe Genauigkeit bei der Messung der Pupillendistanz (PD) wünschenswert.

Aus diesem Grund werden im Brillenanpaßpraktikum der Höheren Fachschule für Augenoptik Köln regelmäßig vergleichende Messungen mit einer Reihe verschiedener PD-Meßgeräte durchgeführt. Durch diese Übungen sollen die Studierenden die Leistungsfähigkeit und die Probleme der verschiedenen PD-Meßverfahren kennenlernen.

Da die Erkenntnisse über die Reproduzierbarkeit und die Meßgenauigkeit auch für die augenoptisch interessierte Leserschaft von Interesse sein könnten, wollen wir die Ergebnisse einer solchen Reihenuntersuchung in diesem Bericht kurz darstellen.

Ein zweites Thema, das in diesem Artikel angesprochen wird, ist die Frage, inwieweit sich die gemessenen Augenabstände voneinander unterscheiden, wenn die Pupillometer zum einen auf die Pupillenmitte und zum anderen auf die Hornhautreflexbilder eingestellt werden, denn in dieser Frage sind sich die Firmenschriften nicht einig. In der Bedienungsanleitung für die Pupillometer von Essilor und Topcon wird empfohlen, die Zentrierlinien auf die Hornhautreflexbilder einzustellen (Abb. 1 oben). Für das Rodenstock- und das Hoya-PD Meter sowie für das Zeiss Video-Infral wird hingegen eine Zentrierung auf die Pupillenmitte vorgeschlagen (Abb. 1 unten). Diese Zentrierung auf Pupillenmitte ist eine direkte Folgerung aus der Augendrehpunktforderung.

2 Methodik

2.1 PD-Meßgeräte

In der Untersuchung wurden drei verschiedene Typen von PD-Meßgeräten verwendet:

1. Zwei verschiedene traditionelle PD-Meßstäbe, bei denen die Ablesung nach der Viktorinschen Methode erfolgte.

2. Pupillometer der Firmen Rodenstock (Rodenstock PD Meter), Essilor (Pupillometer), Topcon (Digital PD Meter PD-5) und Hoya (Digital Pupillometer RC-810). Alle diese Geräte zentrieren sich durch eine Nasenaufgabe. Das Gerät von Rodenstock hat zwei getrennte Einblicköffnungen für das rechte und linke Auge des Untersuchers. Die anderen drei Geräte weisen einen monokularen Untersuchereinblick auf und werden durch eine Spiegeloptik auf das jeweilige Kundenaugenauge umgeschaltet.

3. Das Video-Infral-System der Fa. Zeiss. Bei diesem System

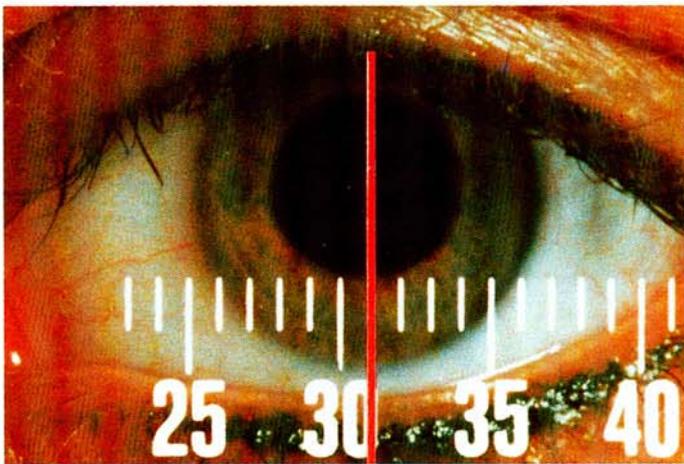
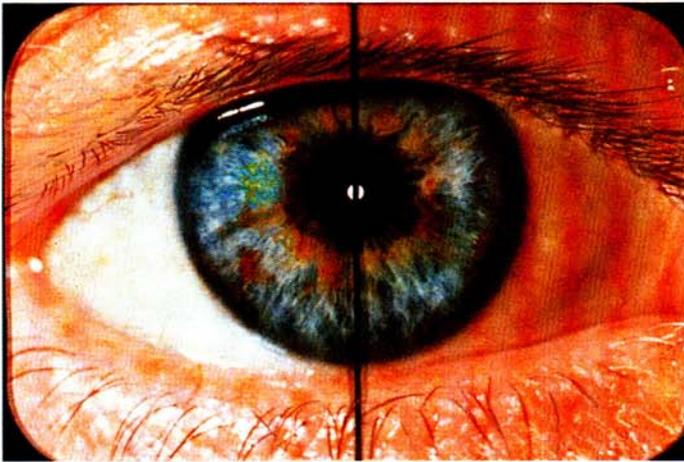


Abb. 1 Oben: Zentrierung auf das Hornhautreflexbild mit dem Essilor Pupillometer; unten: Zentrierung auf Pupillenmitte mit dem Rodenstock PD-Meter (Fotos: Essilor und Rodenstock)

werden die Augen des Prüflings durch zwei Fernsehkameras aufgezeichnet. Die Ausrichtung des Kopfes und die Messung der PD erfolgt über ein interaktives Computerprogramm, bei dem der Untersucher Zentrierkreise mit den auf dem Monitor sichtbaren Pupillen in Übereinstimmung bringen muß.

Von den unter 1. und 2. genannten PD-Messern standen jeweils zwei baugleiche Geräte zur Verfügung, die zu gleichen Anteilen verwendet wurden.

2.2 Versuchspersonen

Insgesamt nahmen 33 Studierende an der Untersuchung teil. Die Pupillendistanzen dieser Personen variierten von 56 bis 72 mm; der Mittelwert lag bei 64,02 mm. Keiner der Probanden hatte einen manifesten Schief Fehler. Extrem hohe Fehlsichtigkeiten kamen nicht vor. Drei Personen, deren Meßdaten nicht komplett gesammelt werden konnten, wurden von der endgültigen Auswertung ausgeschlossen.

2.3 Experimentelle Vorgehensweise

Zur Durchführung der Messungen wurden die 30 Versuchspersonen in drei Gruppen von je 10 Personen aufgeteilt. In jeder Gruppe wurde die PD jeder einzelnen Person von allen anderen neun Personen mit den zwei PD-Meßstäben und den vier Pupillo-

metern jeweils einmal gemessen. Mit dem Video-Infral wurde die PD jeder Person insgesamt fünfmal gemessen. Die Meßmarken aller Pupillometer und des Video-Infral wurden dabei zunächst möglichst genau auf die Pupillenmitte eingestellt. Die Ablesung erfolgte bei den Pupillometern und den PD-Meßstäben in Stufen von 0,5 mm. Beim Video-Infral wurden die Ergebnisse vom Computer in einer Stufung von 0,1 mm angezeigt.

Um zusätzliche Informationen über den Unterschied zwischen der Zentrierung auf Pupillenmitte und der Zentrierung auf den Hornhautreflex zu erhalten, wurde die PD-Messung mit drei Pupillometern, bei denen ein zentraler Hornhautreflex sichtbar ist (Essilor, Topcon und Hoya), im Anschluß an die erste Messung wiederholt.

Bei dieser Wiederholungsmessung wurden die Meßmarken möglichst genau auf das Hornhautreflexbild eingestellt. Die PD jedes Prüflings wurde auch hier von jeweils neun verschiedenen Untersuchern gemessen.

Insgesamt wurden pro Person 86 Einzelmessungen vorgenommen (2x9 mit PD-Meßstäben, 4x9 mit Pupillometern auf Pupillenmitte, 3x9 mit Pupillometern auf Hornhautreflex und fünf Messungen mit dem Video-Infral).

2.4 Auswertung der Daten

2.4.1 Reproduzierbarkeit

Wenn die PD einer Person verschiedene Male gemessen wird, ergeben sich in der Praxis kleine Unterschiede im Ergebnis, die auf eine unterschiedliche Einstellung und Ablesung der Geräte zurückzuführen sind.

Um die Größenordnung dieser unvermeidlichen Schwankungen kennenzulernen, wurde zunächst für jedes Gerät und jede Person die Standardabweichung der Einzelwerte berechnet. Im Anschluß wurden die erhaltenen Standardabweichungen über die 30 Personen gemittelt. Diese mittlere Standardabweichung kann als Kennzahl für die Reproduzierbarkeit der PD-Meßergebnisse angesehen werden.

2.4.2 Meßgenauigkeit

Zur Ermittlung der Meßgenauigkeit müßte die gemessene PD eigentlich mit der „wahren PD“ des Prüflings verglichen werden. Dies ist aber nicht möglich, da der wahre Wert der Pupillendistanz unbekannt ist. Um trotzdem einen Bezugswert zu erhalten, der der wahren PD möglichst nahe kommt, haben wir die bei jeder Person mit allen sieben Geräten gemessenen Werte zunächst gemittelt.

Dieser Mittelwert der sieben Geräte liefert für jede Person einen „Schätzwert für die wahre PD“, der zwar fehlerbehaftet ist, der aber der tatsächlichen PD relativ nahe kommt. In der englischen Sprache wird solch ein fehlerbehafteter bestmöglicher Vergleichswert auch als „Goldstandard“ bezeichnet.

Im Anschluß daran wurde die Differenz zwischen allen Einzelwerten und dem Schätzwert für die wahre PD errechnet. Als Maß für die Meßgenauigkeit jedes einzelnen Gerätes wurde schließlich die mittlere Abweichung vom Goldstandard bestimmt.

Bei der Auswertung stellte sich heraus, daß fünf der sieben Geräte im Mittel sehr ähnliche Werte anzeigten. Deshalb wurde zusätzlich der Mittelwert über diese fünf ähnlichen Geräte als zweiter Referenzwert zum Vergleich herangezogen.

3 Ergebnisse

3.1 Reproduzierbarkeit

Die Reproduzierbarkeit der PD-Messungen ist in Tab. 1 dargestellt. Die in der Tabelle angegebenen mittleren Standardabweichungen sind ein Maß für den Bereich in Millimetern, in dem 68% der von verschiedenen Untersuchern gemessenen Pupillen-

PD-Meßgerät	Standardabweichung der Wiederholungsmessungen, gemittelt über 30 Prüflinge
Zentrierung auf Pupillenmitte	
PD-Meßstab I	± 0,74 mm
PD-Meßstab II	± 0,68 mm
Rodenstock PD-Meter	± 0,50 mm
Essilor Pupillometer	± 0,51 mm
Hoya RC-810	± 0,63 mm
Topcon Digital PD 5	± 0,54 mm
Zeiss Video-Infral	± 0,31 mm
Zentrierung auf HH-Reflex	
Essilor Pupillometer	± 0,52 mm
Hoya RC-810	± 0,55 mm
Topcon Digital PD 5	± 0,46 mm

Tab. 1 Reproduzierbarkeit der PD-Meßergebnisse: Die Zahlenwerte geben die Schwankungsbreite an, die sich ergibt, wenn verschiedene Untersucher die gleiche Pupillendistanz messen

distanzen liegen. Die höchste Reproduzierbarkeit bei Zentrierung auf Pupillenmitte zeigte das Video-Infral mit 0,31 mm. Etwas größere Schwankungen von 0,50 bis 0,63 mm ergaben sich mit den vier Pupillometern. Die geringste Reproduzierbarkeit wiesen die beiden PD-Meßstäbe auf. Hier muß mit Schwankungen von 0,68 bis 0,74 mm gerechnet werden. Die Reproduzierbarkeit bei Zentrierung auf den Hornhautreflex ist tendenziell etwas besser. Hier erreichte das PD-Meter von Topcon mit 0,46 mm die höchste Reproduzierbarkeit. Dies könnte eventuell daran liegen, daß die Zentrierung der Meßmarken auf das Hornhautreflexbild etwas einfacher ist, da die Hornhautreflexbilder einen klar erkennbaren Einstellpunkt definieren, während die Lage der Pupillenmitte vom Untersucher geschätzt werden muß.

3.2 Meßgenauigkeit bei Zentrierung auf Pupillenmitte

Aussagen über die Meßgenauigkeit lassen sich aus Abb. 2 ableiten. Dargestellt ist die mittlere Abweichung der mit jedem der sieben Meßgeräte erzielten Pupillendistanzen vom Mittelwert über alle Geräte. Deutlich sieht man, daß die zwei PD-Meßstäbe und die Geräte von Essilor, Rodenstock und Zeiss im Mittel sehr ähnliche Augenabstände anzeigten, während die Pupillometer von Topcon und Hoya etwas kleinere Werte lieferten.

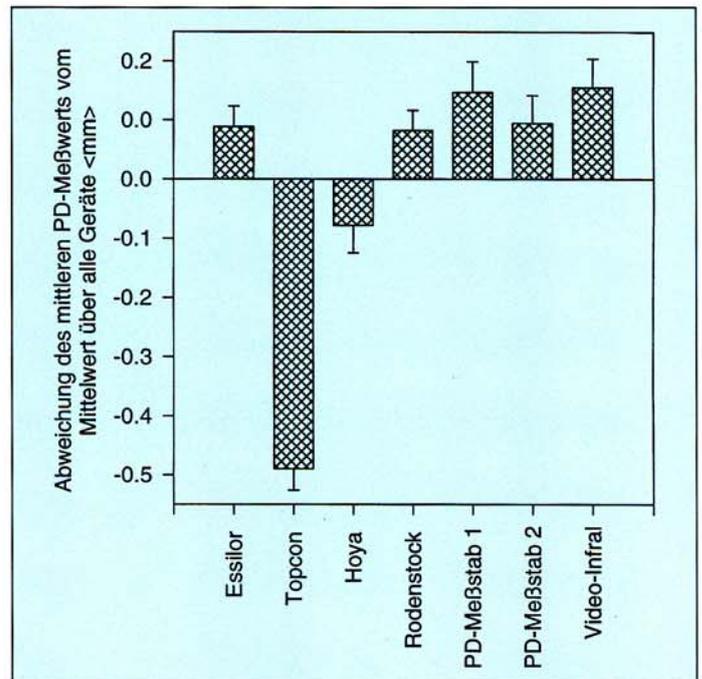


Abb. 2 Abweichungen der mit den verschiedenen Meßgeräten bestimmten PD vom Mittelwert über alle sieben Geräte. Zusätzlich eingetragen ist der Standardfehler der mittleren Abweichung

In Tab. 2 sind diese Werte noch einmal zusammengefaßt. Zusätzlich wurde in der rechten Spalte der Tabelle der Mittelwert über die fünf ähnlichsten Geräte als zweiter Referenzwert herangezogen. Im Vergleich mit diesem Referenzwert lieferte das PD-Meter von Topcon systematisch eine um ca. 0,6 mm kleinere PD. Eine ähnliche systematische Abweichung des Topcon ergab sich auch bei der Zentrierung auf das Hornhautreflexbild (siehe unten, Tab. 3). Das Pupillometer von Hoya zeigte im Mittel um 0,2 mm kleinere Werte an als die anderen fünf Geräte.

Zur Untersuchung der statistischen Signifikanz wurden die Abweichungen der verschiedenen Geräte voneinander paarweise mit dem Mann-Whitney-Rangsummentest analysiert. Dabei ergab sich, daß der systematische Unterschied des Topcon von allen

PD-Meßgerät	Abweichung vom Mittelwert über alle 7 PD-Meßgeräte	Abweichung vom Mittelwert über die ersten 5 Geräte (ohne Topcon und Hoya)
PD-Meßstab I	0,15 mm	0,03 mm
PD-Meßstab II	0,09 mm	-0,02 mm
Rodenstock	0,08 mm	-0,03 mm
Essilor	0,09 mm	-0,03 mm
Zeiss Video-Infral	0,16 mm	0,04 mm
Hoya	-0,08 mm	-0,19 mm
Topcon	-0,49 mm	-0,60 mm

Tab. 2 Mittlere Abweichung der mit den Einzelgeräten gemessenen PD vom „besten Schätzwert für die wahre PD“

anderen Geräten statistisch signifikant ist mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $p < 0,0001$ ($< 0,01\%$). Auch die Abweichung des Gerätes von Hoya von allen anderen Geräten war noch auf dem $p < 0,01$ -Niveau ($< 1\%$) statistisch signifikant.

3.3 Vergleich zwischen PD(Pupillenmitte) und PD(Hornhautreflex)

Der Vergleich zwischen der PD, gemessen auf Pupillenmitte, und der PD, gemessen auf Hornhautreflex, ergab im Mittel über alle 30 Personen die in Tab. 3 wiedergegebenen Werte. Trotz der systematischen Unterschiede zwischen den Geräten zeigten die Geräte Übereinstimmung, daß bei den hier untersuchten 30 Per-

PD-Meßgerät	Mittlere PD bei Zentrierung auf Pupillenmitte	Mittlere PD bei Zentrierung auf Hornhautreflex	Mittlere Differenz zwischen beiden Verfahren
Essilor	64,11 mm	63,63 mm	0,48 mm
Hoya	63,95 mm	63,47 mm	0,48 mm
Topcon	63,54 mm	62,97 mm	0,57 mm
Mittelwert			0,51 mm

Tab. 3 Mittlere Differenz zwischen der PD, gemessen auf Pupillenmitte, und der PD, gemessen auf Hornhautreflexbild

sonen die PD, gemessen auf Hornhautreflex, um etwa 0,5 mm kleiner ist als die PD, gemessen auf Pupillenmitte. Die Hornhautreflexbilder sind also im Mittel in jedem Auge um etwa 0,25 mm aus der Pupillenmitte nach nasal versetzt. Um die Frage zu klären, ob dieser Unterschied von 0,5 mm ein typischer Wert für die hier untersuchten Personen ist, haben wir in Abb. 3 die individuellen Differenzen zwischen diesen zwei Arten der PD-Messung graphisch dargestellt. Bei der Betrachtung der Abb. 3 sieht man, daß es erstaunlicherweise keine Häufung um einen typischen mittleren Wert gibt. Bei der Versuchsperson Nr. 1 stimmen die nach beiden Verfahren gemessenen Augenabstände praktisch genau überein. Bei der Versuchsperson Nr. 30 beträgt der Unterschied zwischen beiden Arten der Messung hingegen mehr als 1 mm. Alle anderen Versuchspersonen ordnen sich, wie an einer Perlschnur aufgereiht, fast linear zwischen den beiden Extremwerten an.

4 Abschließender Kommentar

Der Vergleich zwischen der PD-Messung auf Pupillenmitte und auf Hornhautreflex hat ergeben, daß bei der Messung auf Hornhautreflex mit einer um etwa 0,5 mm kleineren PD gerechnet werden kann. Dieser Wert sagt aber für den Einzelfall wenig aus, da die individuelle Differenz zwischen beiden Arten der PD-Messung von ca. 0 bis 1 mm schwanken kann. Es wäre sicher wünschenswert, wenn sich die Hersteller in Zukunft auf eine einheitliche Vorgehensweise einigen könnten, doch ist bis heute nicht eindeutig geklärt, welche dieser zwei Methoden der PD-Messung zu einer besser zentrierten und besser verträglichen Brille führt. Unterschiede zwischen den beiden Arten der Zentrierung von 1 mm können sich auf jeden Fall bei Gleitsichtgläsern auch subjek-

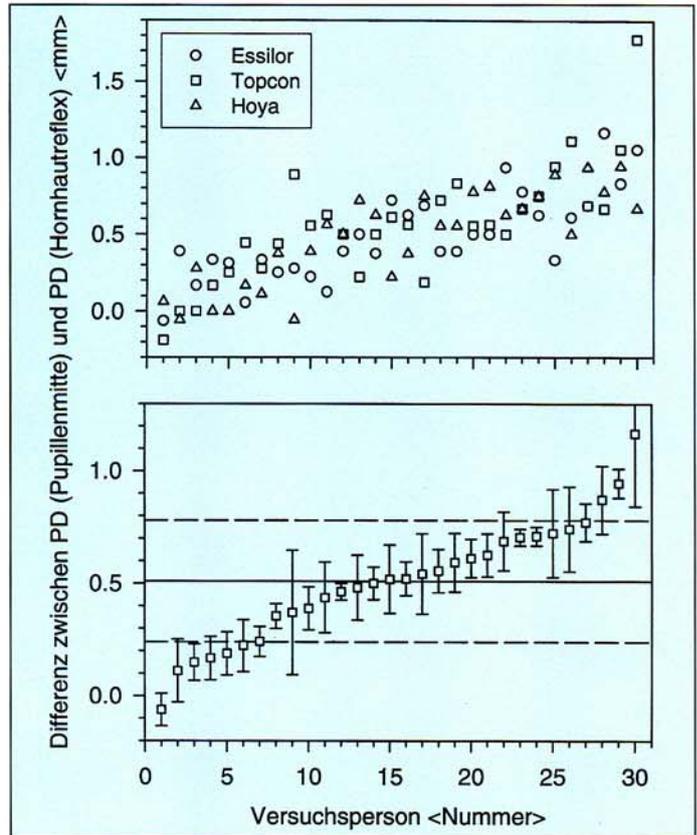


Abb. 3 Individuelle Unterschiede zwischen der PD, gemessen auf Pupillenmitte, und der PD, gemessen auf Hornhautreflex, für alle 30 Versuchspersonen. Oben: Einzelergebnisse; unten: Mittelwerte und Standardfehler des Mittelwerts. Die Unterschiede zwischen beiden Arten der PD-Messung variieren von ca. 0 bis 1 mm. Die horizontalen Linien in der unteren Grafik kennzeichnen die mittlere Differenz über alle 30 Personen und deren Standardabweichung. Deutlich erkennt man, daß die mittlere Differenz von 0,51 mm nur sehr wenig über die im Einzelfall vorliegende Differenz aussagt

tiv bemerkbar machen. Dies gilt natürlich in besonderem Maße, wenn diese Unterschiede durch systematische Fehler bei der PD-Messung und Einschleiftoleranzen noch zusätzlich vergrößert werden.

Insgesamt gesehen haben unsere Untersuchungen gezeigt, daß es sich lohnt, die PD-Messungen mit einem speziell für diesen Zweck konstruierten Pupillometer vorzunehmen. Die Abweichungen von der „wahren PD“ sind zwar auch mit den PD-Meßstäben im Mittel nicht größer als mit den Pupillometern, doch ist die Reproduzierbarkeit der Pupillometer besser. Die Zuverlässigkeit der Pupillometer ist also höher. In diesem Zusammenhang wäre es interessant zu klären, ob durch eine genauere Ausgabe des Meßwertes (zum Beispiel auf 0,1 mm genau statt auf 0,5 mm genau) die Reproduzierbarkeit noch weiter gesteigert werden kann.

Anschrift des Autors:

Priv.-Doz. Dr. Wolfgang Wesemann, Höhere Fachschule für Augenoptik, Bayenthalgürtel 6-8, 50968 Köln