Bundeswehrkrankenhaus Ulm, Chefarzt Generalarzt Prof. Dr. Dr. Grunwald
Abteilung für Neurologie, Leitender Arzt Oberstarzt PD Dr. med. Weber
Flugmedizinisches Institut der Luftwaffe, Leiter Oberstarzt Dr. Krause
Abteilung Klinische Flugmedizin, Augenheilkunde, Leiter Oberstarzt Dr. Frischmuth

Normale Entwicklung des Visus bei gesunden Probanden
Eine longitudinale Studie

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Medizin
der Medizinischen Fakultät der Universität Ulm

Vorgelegt von
Aleksandra Kaddour
aus Hindenburg/Polen
2014

Amtierender Dekan: Prof. Dr. rer. nat. Thomas Wirth

1. Berichterstatter: PD Dr.Weber
2. Berichterstatter: Prof.Dr.Guembel

Tag der Promotion: 24.04.2015

Für meine Familie

Inhaltsverzeichnis **Seite**

Abkürzungsverzeichnis

1 Einleitung **1**

1.1. Darstellung des Sehens 1
1.2. Symptome der Myopie 5
1.3. Historischer Überblick über die Ursachen der Myopie 7
1.4. Myopie bei Piloten der Bundeswehr 9
1.5. Fragestellung der Arbeit 13

2 Material und Methoden **14**

2.1. Studienaufbau 14
2.2. Untersuchung der Probanden 15
2.3. Datenauswertung 22

3 Ergebnisse **26**

3.1. Ergebnisdarstellung 26

4 Diskussion **34**

4.1. Diskussion eigener Ergebnisse 34
4.2. Ergebnisvergleich mit anderen Studien 36
4.3. Biologie und Ursachen der Myopie 39
4.4. Presbyopie als der ausgleichende Faktor 45
4.5. Therapieoptionen 48

5 Zusammenfassung **52**

6 Literaturverzeichnis **53**

Anhang **57**

Abbildungsverzeichnis 57
Tabellenverzeichnis 58

Danksagung **60**

Lebenslauf **61**

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
CRAN	Comprehensive R Archieve Network
dpt	Dioptrie
FMI	Flugmedizinisches Institut
IFR	Instrumental Flight Rules
Konfindenzintervall	Synonym: Zufallsstreubereich, Streubereich, Vertrauensbereich
LASIK	Laser assisted in situ keratomileusis
LASEK	Laser assisted subepithelial keratomileusis
lo	links objektiv
ls	links subjektiv
Mio	Million
mm	Millimeter
n	Brechungsindex n
NA	not available
PRK	photorefractive Keratektomie
“R”	Statistikprogramm zur Datenauswertung
ro	rechts objektiv
rs	rechts subjektiv
sph	Sphäre, Definition: gibt in Dioptrien den Teil der Brechkraft eines Brillenglasses an, der in allen Richtungen gleich bleibt.
V.c.c.	Visus cum correctione
Visus	Sehschärfe, Definition: Visus = Istabstand/Sollabstand (z.B. von vorzulesenden Zahlen) = 5M/50M = 0,1
V.s.c.	Visus sine correctione

1 Einleitung

„Was ist das Schwerste von allem?
Was dir das Leichteste dünket:
mit den Augen zu sehen,
was vor den Augen dir liegt.“ *Johann Wolfgang von Goethe*

Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem natürlichen Verlauf der Refraktion bei Piloten während ihrer Laufbahn bei der deutschen Bundeswehr mit besonderer Beachtung der Entwicklung einer Myopie. Die Konsequenzen für die Auswahl der Pilotenanwärter und die Frage nach einer frühen refraktiven Chirurgie werden diskutiert.

1.1.Darstellung des Sehens

Die Myopie (Kurzsichtigkeit) die bereits bei den Griechen bekannt war (griechisch: myein= die Augen schließen; opia= die Sicht), stellt eine Erkrankung dar, für die bis zum heutigen Tag weder ein präziser Pathomechanismus noch eine kausale Heilung gefunden worden ist [41,37].

Das visuelle System ermöglicht uns Informationen aus der Umwelt aufzunehmen und zu verarbeiten. Der Begriff Sehleistung beschreibt das Auflösungsvermögen des Auges ohne korrigierende optische Hilfsmittel (Visus sine correctione: V.s.c. Visus naturalis) und die Sehschärfe (Visus cum correctione: V.c.c.) kennzeichnet den Zustand bei optimaler Korrektur durch Hilfsmittel.
Beide Begriffe richten sich danach, wie zwei sich nahe nebeneinander befindende Objekte noch getrennt wahrgenommen werden können. Die Auflösungssehschärfe (Minimum separabile) ist abhängig von der anatomischen Zapfenanordnung, wobei in der Mitte der Netzhaut die zentrale höchste Sehschärfe besteht, da dort die Zapfen am dichtesten nebeneinander liegen. Die Peripherie weist einen größeren Abstand der Zapfen auf und somit eine geringere Sehschärfe [28].

Alle Störungen der optischen Abbildung des Auges, wie Störungen der optischen Komponenten Hornhaut, Vorderkammer, Linse oder Glaskörper, und Fehler in der retinalen Verarbeitung, führen zu einer Herabsetzung der Sehschärfe.
Die Sehschärfe des menschlichen Auges wird durch folgende Komponenten eingegrenzt:
Die optische Abbildung des Auges, die Lichtstreuung in der Retina, wie auch die neuronale Verarbeitung in der Retina hängen, neben der retinalen Verarbeitung und dem Pupillenreflex, ab von der Adaptationsleuchtdichte, von der Netzhautstelle (Exzentrizität), und von der Korrektur möglicher Refraktionsfehler [26].
In jüngerem Alter sind die Augen des Menschen in der Lage, Objekte in unterschiedlicher Entfernung zwischen Unendlich und dem Nahbereich scharf sehen zu können. Dies wird ermöglicht durch die Augenlinsen, den Ziliarmuskeln und die Zonulafasern, und wird unter dem Begriff Akkommodation (Naheinstellungsvermögen) zusammengefasst [26].

Die Akkommodationsbreite, die sich aus der Subtraktion der Brechkraft (Refraktion) im Nahpunkt von der Brechkraft im Fernpunkt ergibt, beschreibt die maximal mögliche Zunahme der Brechkraft des Auges. Dabei wird der Nahpunkt (Punctum proximum) als die kürzeste Entfernung, in der noch scharf gesehen werden kann, definiert, während der Fernpunkt (Punctum remotum) den am weitesten gelegenen Punkt beschreibt, der noch scharf gesehen werden kann [28].

Die Refraktion beschreibt das Verhältnis der Brechkraft von Linse und Hornhaut (brechende Medien) zur Achsenlänge des Bulbus.
Man unterscheidet die Emmetropie, bei der das Verhältnis zwischen Brechkraft des Auges und der Baulänge ausgewogen ist, von Ametropie, die durch ein Missverhältnis zwischen den obengenannten Medien eine häufigere Achsenametropie oder eine seltenere Brechungsametropie zur Folge hat.
Nur wenige Menschen besitzen eine Refraktion von 0 dpt, bei ca. 55% der 20- bis 30- jährigen zeigen sich Refraktionswerte zwischen +1 und -1 dpt [28].
Die Gesamtbrechkraft des Auges wird international in Dioptrien (dpt) angegeben, und beträgt in etwa 63 dpt (43 dpt entfallen auf das Medium Hornhaut und ca. 10-20 dpt auf die Linse) bei einer Bulbuslänge von 23,5 mm. Die unterschiedliche Brechung des Lichtstrahls folgt dem Brechungsgesetz von Snellius, bei dem das Licht abhängig vom Einfallswinkel und vom Unterschied der Brechungsindizes n der jeweiligen Medien gebrochen wird. Als

Beispiel lautet der Brechungsindex n der Hornhaut: 1,376, n der Linse: 1,406, n des Glaskörpers 1,336 [28].

Um sich mit Fragen der Sehschärfe, des Strahlenganges und der Brechkraft beschäftigen zu können, ist eine Refraktionsbestimmung erforderlich, welche die zusätzlich benötige Brechkraft aufzeigt, um auf der Retina ein scharfes Bild zu erzeugen. Zu ihrer Prüfung stehen objektive und subjektive Methoden zur Verfügung die eine Patientenmitwirkung erfordern [26,28].
Es ergeben sich folgende häufige Refraktionsanomalien:

die Kurzsichtigkeit (Myopie),
die Weitsichtigkeit (Hyperopie)
die Stabsichtigkeit (Astigmatismus).

Die oben genannten Refraktionsanomalien stellen Sichtfehler, die klassischen Aberrationen niedriger Ordnung, dar, die das retinale Bild verzerren, und so die Sehleistung herabsetzen.
Bekannt ist aber auch, dass neben den klassischen Aberrationen, das Auge auch bei normalsichtigen Menschen von Abbildungsfehlern beeinflusst wird. Hierbei spricht man von Aberrationen höherer Ordnung. Zu ihnen zählen beispielsweise das Koma, ein Asymmetriefehler in der Optik, oder die sphärische Aberration. Bei diesen Fehlern kommt es zu einer Beeinträchtigung der Qualität des Netzhautbildes auch beim rechtsichtigen (emmetropen) oder genau akkommodierenden Auge, und damit zur Verschlechterung des Kontrastsehens [29].

Eine Rolle spielen die Aberrationen höherer Ordnung beim Dämmerungssehen (mesopisches Sehen) und beim Nachtsehen (skotopisches Sehen), was durch eine erweiterte Pupille erklärt wird. Beim Tagessehen (photopisches Sehen), bei dem die Pupille eng ist, und somit als Blende wirkt, können diese Fehler der höheren Ordnung vernachlässigt werden [30,31].

Beim myopen Auge befinden sich der Fern- und Nahpunkt mit dem dazwischenliegenden, und mit dem Lebensalter korrelierenden Akkommodationsbereich, in endlicher Entfernung vor dem Auge. Das Bild ferner Gegenstände wird vor der Netzhaut abgebildet. Dieses

Phänomen tritt auf, wenn entweder die Achse des Augapfels bei normal brechenden Medien abnorm lang ist (über 24mm, Achsenmyopie), dabei ergibt eine Verlängerung um 1 mm eine Kurzsichtigkeit von -3 dpt; oder aber wenn bei normaler Bulbuslänge die Brechkraft der Hornhaut oder der Linse zu groß ist (Brechungsmyopie) [41].

Friedrich Trichter [43] unterscheidet zwischen funktionellen Myopien, die ohne dauerhafte organische Veränderungen eine reversible Kurzsichtigkeit bewirken, und organischen Myopien, die durch irreversible Organveränderungen erzeugt werden. Folglich teilt er Kurzsichtigkeit ein in:

A. Brechungsmyopien

A.1. Funktionelle Brechungsmyopien, wie transitorische und traumatische Formen, Nacht- und Dämmerungsmyopien, Instrumenten- und Raumfahrtkurzsichtigkeit, sowie Pilocarpin- und Pseudomyopien

A.2. Organische Brechungsmyopien: Hornhautmyopie (Keratokonus – Zunahme der Brechkraft der Hornhaut) und Linsenmyopien (Sphärophakie – kugelige Linsenform)

B. Achsenmyopien

B.1. Der Hydrophthalmus oder Buphthalmus beschreibt eine krankhafte Bulbusvergrößerung die durch eine Augeninndruckerhöhung im Säuglings- oder Kleinkindalter verursacht wird und meist mit einem kongenitalen Glaukom (grüner Star) einhergeht die meist zur Erblindung führt.

B.2. Die Myopia simplex (Schulmyopie) beschreibt die Streckung des Bulbus, die kurz vor der Pubertät einsetzt und mit dem beendeten körperlichen Wachstums stoppt. Meist werden dabei minus 6 dpt nicht unterschritten.

B.3. Die Myopia complicata / maligna beschreibt eine krankhafte unregelmäßige Dehnung des Bulbus, die bis ins höhere Alter fortschreitet. Durch diese Dehnung wird die Retina deformiert und auseinandergezogen. Es kann zu Einblutungen oder zu Glaskörperabhebung kommen [43].

Der wichtigste Formunterschied ergibt sich zwischen der leichten Myopia simplex (Schulmyopie) und der progressiven Myopia maligna.
Die Schulmyopie unterschreitet selten minus 6 dpt, und entwickelt sich zwischen dem 10. und 20. Lebensjahr, während die unregelmäßige Bulbusdehnung der Myopia maligna bis ins höhere Alter fortschreitet.
Eine weitere Variante stellt die benigne progressive Form der Kurzsichtigkeit dar, die sich bis auf minus 12 dpt steigern kann, und erst um das 30. Lebensjahr sistiert.
Eine hohe Erblichkeitskomponente besitzt die Myopia maligna, die unabhängig von äußeren Einflüssen ständig fortschreitet [28,10].

Die Myopie kann ferner klassifiziert werden in milde Myopie bei Werten von -0,5 bis -1,0 dpt, in hohe Myopie bei Werten von -5,0 bis -6,0 dpt und extreme Myopie ab -10,0 dpt [47].

1.2. Symptome der Myopie

Die von der Erkrankung Betroffenen leiden unter verschwommener Sicht in der Ferne, selten auch unter Kopfschmerzen. Nach dem Prinzip „stenopäische Lücke“ kneifen sie die Augen zusammen beim Fernblick um die Sehleistung durch Pupillenverengung zu erhöhen. Es ergibt sich die Wirkung einer Lochblende, bei der störende Randstrahlen reduziert werden, die Zerstreuungskreise auf der Netzhaut verkleinert werden, und dadurch die Sehschärfe zunimmt.
Typisch ist auch, dass myope Patienten im Alter ohne Korrektur lesen können, indem sie den Lesetext etwa in den Bereich des Fernpunktes der Augen halten. Darüber hinaus bevorzugen die Patienten die Arbeit im Nahbereich, da ihnen diese Tätigkeiten durch fehlende Fernkomponente leichter fallen, weil die Patienten sehr gut in der Nähe sehen können.
Somit ergibt sich aus dem Beschwerdebild und den typischen morphologischen Veränderungen die Diagnose des Myopiesyndroms.
Außerdem erschwert Kurzsichtigkeit einerseits die Möglichkeiten, andere Augenerkrankungen zu diagnostizieren, wie beispielsweise das Glaukom, da sich durch die erniedrigte

Sklerarigidität niedrigere Augendruckwerte ergeben und durch den schrägen Sehnerven-eintritt, die Papillenexkavation schwerer zu beurteilen ist [36,42].

Andererseits ist Myopie auch prädestiniert dafür, andere Augenerkrankungen zu fördern, wie z.B. die Erhöhung des Risikos einer Netzhautablösung [28].

Die beiden Abbildungen wurden aus urheberrechtlichen Gründen entfernt.

1.3. Historischer Überblick über die Ursachen der Myopie

Obwohl schon Aristoteles beobachtete, dass die kurzsichtigen Patienten ihre Augen immer wieder zusammenkneifen, gelang es Kepler als erstem, sowohl die Zusammenhänge zwischen Myopieentwicklung und Art der Beschäftigung der Betroffenen aufzuzeigen, als auch den Zusammenhang zwischen Kurzsichtigkeit und Naharbeit darzustellen.

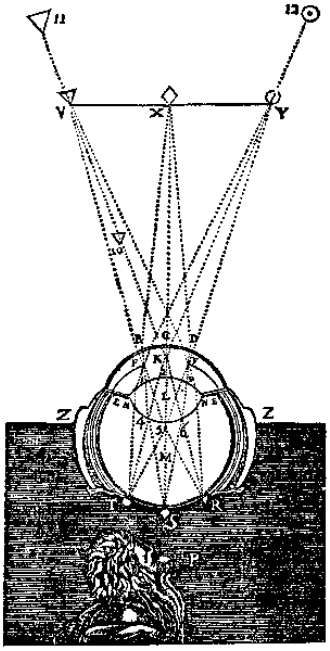

Abb. 1: Darstellung des Brechungsgesetzes. Descartes` Veranschaulichung von Keplers Theorie des Netzhautbildes (aus Diotrik, 1937)

1854 beschrieb Graefe die ersten pathologisch-anatomischen Veränderungen der degenerativen Myopie, in der Annahme, es handele sich um einen entzündlichen Prozess. Donders publizierte die Refraktionsveränderungen bei myopen Patienten.
Jahrelang schien Myopie eine Folge äußerer Ursachen zu sein, die durch Ermüdung des Auges bei der Naharbeit die hauptverantwortliche Komponente darstellte.

Steiger lehnte die exogenen Theorien ab und erklärte 1913 den Ursprung der sphärischen Refraktion des Menschen durch genealogische Studien, die den genetischen Zusammenhang darstellen sollten. Er errechnete eine binominale Kurve, die aufzeigte, dass die optischen Elemente des Auges zufällig miteinander verbunden sind und variieren, sodass bereits bei Geburt feststeht, ob und wie stark der Mensch im Laufe seines Lebens kurzsichtig werden wird.
Erst 1920 widersetzte sich Junius der Steiger`schen Erbtheorie und erklärte die Myopie als eine Disposition, die auch durch äußere Einflüsse mitbestimmt wird und somit individuell erworben wird. Schließlich konnten sich die Thesen Steigers nicht halten und die Fachwissenschaft konsolidierte die Annahme, dass Myopie neben Erbfaktoren auch durch Häufung von Umwelts- und Beschäftigungsnoxen beeinflusst wird.

Im Vordergrund der Diskussion wurden zahlreiche Theorien aufgestellt:

- Theorie der Anpassung der äußeren Bulbushüllen an das Netzhautwachstum (Vogt 1924)
- Theorie der Bedeutung von mechanischen Faktoren für die Entstehung der Achsenmyopie (Comberg 1928)
- Theorie der fehlerhaften Papillogenese als Ursache der Augenhintergrundsveränderungen bei der Myopie (Scheerer 1937 und von Sizily 1922)

- Theorie der örtlichen Einwirkung von toxisch wirkender Gewebsflüssigkeit auf den hinteren Augenpol (Lindner 1949)
- Theorie des Kräftemissverhältnisses zwischen innerem Augendruck und der geschwächten Sklera im Bereich der fötalen Protuberantia sclerae (Sondermann 1959)
- Theorie des aktiven Wachstums der Sklera durch mechanische Kräfte der Bulbusumgebung (Poos 1950)
- Theorie des Fehlwachstums der Netzhaut von Bradtke (1952)
- Theorie des Akkomodationsexzesses (Iwanoff 1869 und Sato 1957)
- Theorie der multifaktoriellen Myopiegenese (Awetissow 1980)
- Theorie der Schwächung des kollagenen Gewebes der Sklera infolge Störung der Hormonellen

Homöostase (Balacco-Gabrieli 1982)

- Blegvad, Acta opthalmologica 3/1927

Wissenschaftlich einigte man sich schließlich auf eine multifaktorielle Myopiegenese. Neben der Licht-Maladaptationstheorie der Myopieentwicklung von Trichtel 1983, galten auch „chronische neurohumorale funktionelle Störungen anlässlich des allgemeinen Adaptationssyndroms von Selye 1963 als krankheitsbestimmende Grundlagen für die myopische Dehnung der Sklera in der Jugend, und für die späteren Schädigungen der Choroidea, der Netzhaut, des Glaskörpers und der Linse“ [43], S.4. Darüber hinaus wirken sich die chronischen Überlastungen der Augen mit Licht, wie auch durch Naharbeit der Augen beim Studium oder im beruflichen Leben als myopiefördernde Risikofaktoren aus. Unter der Anerkennung individueller dispositioneller Faktoren, der im Laufe der Jahre zunehmenden technischen Ausbildungen der Bevölkerung und der Installation zahlreicher künstlicher Lichtquellen im Alltagsleben unserer Zivilisation, zählt Myopie heute zu den Zivilisationskrankheiten [43,10].

1.4. Myopie bei Piloten der Bundeswehr

Weil das Sehen für das militärische Fliegen wichtig ist, werden Piloten eingehend untersucht.

Eine Herausforderung für den Beruf des Piloten stellen beispielsweise die benötigten Reaktionszeiten dar. Die Zeitspannen vom Wahrnehmen z.B. einer Bedrohung und der Umsetzung in eine Reaktion sind enorm wichtig für einen sicheren Flug.

„Mit zunehmenden Geschwindigkeiten, mit denen Flugzeuge sich bewegen, spielen die Zeitspannen, innerhalb derer der komplexe Wahrnehmungsprozess abläuft, eine immer größere Rolle: Die Reaktion des Piloten auf eine vielleicht noch erkannte Bedrohung könnte zu spät einsetzen.

Die Zeiten von der Wahrnehmung bis zum Erkennen der Situation hängen von der Komplexität des Signals (Größe, Helligkeit, Bewegung) ab. Bevor eine Entscheidung getroffen wird, muss das Signalmuster interpretiert werden. Die Entscheidungszeit hängt von der Komplexität der Gesamtsituation ab. Sie steigt proportional zur Anzahl der Handlungsalternativen an.

Hinzu kommen individualspezifische Gegebenheiten des Piloten: neben Erfahrung und Kondition, auch die Sehleistung. Die sich aus den einzelnen Zeiten ergebenden Flugwege hängen von der Geschwindigkeit ab. Diese ergibt sich als Relativ-Geschwindigkeit:
Die Geschwindigkeit eines auf den Beobachter zufliegenden Flugzeugs addiert sich zu seiner Eigengeschwindigkeit. Diese Zusammenhänge wie auch die Grenzen ihrer physiologischen Leistungsfähigkeit werden von den Flugzeugführern in ihrer Bedeutung für die sichere Flugdurchführung oft unterschätzt, was einer der Gründe für den hohen Anteil von Flugunfällen in der Anflugphase und bei der Landung sein könnte.“ [35], S.8-129.

Tabelle 1: Mittlerer Zeitbedarf der Bundeswehrpiloten vom Erkennen des Hindernisses bei Luftraumbeobachtung bis zum Ausweichmanöver, angegeben in Sekunden [sec] Aktionszeit [Aktion] und Gesamtzeit [Total]
Kompendium der Flugmedizin, Herausgeber OTA Dr. Pongratz, ISBN: 3-00-016306-9, 128

Aktion: Luftraumbeobachtung (skysearch)	Mittlerer Zeitbedarf [sec]	
Ein Hindernis (z.B. Flugzeug) wird erkannt, der Kollision ausgewichen.	Aktion	Total
Wahrnehmung außerhalb des zentralen Sehfeldes	0,100	0,100
Vorbereitung der Okulomotorik	0,175	0,275
Augenbewegung 40°	0,050	0,325
Fixieren	0,070	0,395
Erkennen	0,650	1,045
Summe		1,045
Entscheiden	2,000	3,045
Bewegen des Steuerknüppels Control	0,400	3,445
Ausweichbewegung des Flugzeugs bis zur Flugwegänderung	2,000	5,445
Summe		5,445

Im Luftverkehr wird unterschieden zwischen Flügen nach Instrumentenflugregeln (IFR=Instrument Flight Rules) und Flügen nach Sichtflugregeln (VFR=Visual Flight Rules). Bei der Bundeswehr spielt im Gegensatz zu ziviler Fliegerei mit vorwiegend IFR, VFR eine große Rolle, wobei hier Piloten beispielsweise bei militärischen Tiefflügen nach Sichtflugregeln fliegen. Diese Regeln beschreiben, was ein Pilot berücksichtigen muss, um unter Sichtbedingungen einen sicheren Flug zu gewährleisten. Es zählt das Grundprinzip, dass der Pilot visuell die Lage des Luftfahrzeuges im Raum erkennen muss, um das Flugzeug sicher führen zu können. Außerdem muss er selbst Hindernisse erkennen, und Mindestabstände zu anderen Flugzeugen selbst sichern [50,51].

Darüber hinaus wichtig in der militärischen Fliegerei sind:

- die Objekterfassung in Abhängigkeit vom Blickwinkel zur richtigen Größeneinschätzung
- die relative Bewegung, wobei sich weiter entfernte Objekte langsamer zu bewegen scheinen als nähere Objekte
- die Höhenlage: nahe gelegene Objekte erscheinen tiefer zu liegen
- der Einfall von Licht und Schatten: eine kontrastreiche Umgebung erleichtert das Erkennen der Lage im Raum
- Verdeckung: ein Gegenstand, der einen anderen verdeckt, erscheint näher
- Dunst und Nebel lassen Gegenstände ferner erscheinen, als sie tatsächlich sind

Auch optische Täuschungen, Reflexionen, Scheinhorizonte und Lichtintensität können zu Fehleinschätzungen führen. Ebenfalls wichtig ist die Schätzfähigkeit beim Landeanflug. Hierbei müssen die Höhe über Grund, die Entfernung von der Schwelle, und die Näherungsgeschwindigkeit an den Boden richtig erfasst werden [35].

Das Problem der Kurzsichtigkeit zeigt sich besonders in militärischen Berufen, die spezielle visuelle Anforderungen erfordern.
In der Fliegerei gibt es zahlreiche Anforderungen an Piloten, die fliegerische Ausbildung ist langwierig und teuer. Um gewährleisten zu können, dass Piloten sicher und zuverlässig handeln können, muss eine strenge und korrekte Selektion der Kandidaten zu Beginn ihrer Einstellung in den fliegerischen Dienst erfolgen.
Die Auswahl dient dem Ziel, die Anwärter auszusuchen, die dem physiologischen und psychologischen Stress, den das Fliegen mit sich bringt, gewachsen sind und somit die Flugsicherheit erfüllen können.
Beispielsweise akzeptiert die israelische Air Force Kandidaten als Anwärter mit Reaktionsabweichungen, solange jedes Auge mindestens einen Wert von 20/80 Sehvermögen erbringt. Strikter sind die Kriterien für Kampffliegeranwärter, die für jedes Auge mindestens Werte von 20/25 oder für beide Augen zusammen 20/20 Sehvermögen benötigen [15].
Da der Einsatz als Luftfahrzeugführer der Bundeswehr besonders hohe Anforderungen an die physische und psychische Leistungsfähigkeit der Soldaten stellt, muss vor der Einstellung die „Wehrfliegerverwendungsfähigkeit“ (WFV) geprüft werden [5].

Die ärztliche Untersuchung gliedert sich in eine Erstuntersuchung, der in bestimmten Abständen Nachuntersuchungen oder zwischenzeitlich aus besonderem Anlass Zwischenuntersuchungen folgen.

Die Erstuntersuchung der Augen gliedert sich in Anamnese, Bestimmung des bestkorrigierten und falls erforderlich unkorrigierten Nah-, Fern-, und wenn nötig Intermediärvisus. Darüber hinaus werden die objektive Refraktion, Augenbeweglichkeit, Binocularsehen, Bestimmung das Farberkennungsvermögens, Bestimmung der Gesichtsfelder, Tonometrie, und auch eine Untersuchung das äußeren Auges und seiner Anhangsorgane, brechende Medien (Spaltlampe) und Fundoskopie verlangt.
Bezüglich der Myopie ergeben sich folgende Anforderungen an das Sehvermögen bei der Bundeswehr:
Ein Refraktionsfehler bedeutet die Abweichung von der Normalsichtigkeit, in Dioptrien im am stärksten ametropen Meridian. Die Refraktion muss mit Standardmethoden bestimmt werden. Bewerber, die die Anforderungen an das Sehvermögen nur mit Sehhilfe erfüllen, können bezüglich der Refraktionsfehler als tauglich beurteilt werden, wenn sie bestimmte Richtgrenzen für Myopie für die Wehrfliegerverwendungsfähigkeit Klasse 1 erfüllen; dabei durfte der objektiv ermittelte Myopiewert nicht mehr als -0,75 sph betragen; dies galt bis zum 31.08.2008. Seit 01.09.2008 gilt der Wert -2,0 dpt für Jets.
Wenn eine Anforderung an das Sehvermögen nur mit einer Sehhilfe erfüllt wird, wie durch den Einsatz von Brille oder Kontaktlinsen, müssen diese eine bestmögliche Korrektur darstellen, gut vertragen sein, und für fliegerische Zwecke geeignet sein.
Kontaktlinsen dürfen nur monofokal sein, und lediglich die Korrektur eines Fernvisus aufweisen. Außerdem dürfen sie weder Färbung, noch eine Tönung aufweisen.
Brille, die nur für fliegerische Zwecke getragen werden, müssen das Sehvermögen in allen Distanzen anpassen können. Alle Anforderungen müssen in einer einzigen Brille erfüllt werden.
Die Wehrfliegerverwendungsfähigkeit wird ausgeschlossen, wenn mit einer verträglichen Sehhilfe eine Sehschärfe von 1,0 auf jeder Seite nicht erreicht wird [5], S.23.

Für Pilotenanwärter der Bundeswehr gelten die folgenden Höchstgrenzen nach ZDV 46/6 für die Myopie.
Diese betragen bei den jährlichen Untersuchungen der Wehrfliegerverwendungsfähigkeit (WFV) -0,75dpt WFV I, -1,5dpt WFV II alt, -1,5dpt WFV I Jet neu -3,0dpt WFV I neu,

-3,0dpt WFV II Jet neu, -5dpt WFV II neu [3].
Allgemein wurde im Laufe der Jahre beobachtet, dass mit wenigen Ausnahmen, mit steigendem Alter höhere Werte an Myopie erreicht werden, je länger die Piloten im Dienst waren [8].

1.5. Fragestellung der Arbeit

Wie ist der natürliche Verlauf Refraktion und insbesondere der Myopie bei weitestgehend Normalsichtigen im Erwachsenenalter.

2 Material und Methoden

2.1. Studienaufbau

Die Probanden der Studie waren fast ausschießlich Piloten der Bundeswehr. Einige wenige gehörten dem Flugpersonal an.
Die Datenerhebung erfolgte am Flugmedizinischen Institut der Luftwaffe in Fürstenfeldbruck.
Dort wird jeder Pilot ab der Einstellung alle drei Jahre eingehend augenärztlich untersucht; ab dem 40. Lebensjahr jährlich. Diese prospektiv und standardisiert erhobenen Daten wurden retrospektiv ausgewertet.
Es wurden retrospektiv für jeden Probanden aus der Datenbank des Flugmedizinischen Instituts (FMI) Daten von der Erstuntersuchung bis zu seiner Entlassung aus der Bundeswehr ausgelesen. Die Erstuntersuchung erfolgte üblicherweise im Alter von 18 Jahren Entlassung, die Entlassung spätestens mit 60 Jahren.

Die mittlere Beobachtungszeit betrug 8,8 Jahre (0 Jahre bei Einstellung bis maximal 40 Jahre).
Abgefragt wurde der Zeitraum von 1967 bis 2006.
In der Datenbank wurden über 40.000 Untersuchungen mit je 2 Augen, also folglich mehr als 80.000 Augen über einen Zeitraum von bis zu 40 Jahren dokumentiert.
Mit berücksichtigt wurden auch die Daten von Flugsicherheits- und Einsatzführungsdienstuntersuchungen. Für diese Personengruppe bestehen bei der Einstellung Myopiegrenzen von -5,0 dpt.

Diese Daten wurden nach folgenden Kriterien gefiltert:

Einschlusskriterien:

- normalsichtige Probanden (-0,75 dpt bis 0,75 dpt), die sich regelmäßig untersuchen ließen
- ausschließlich männliche Probanden

Ausschlusskriterien:

- Probanden mit einer Myopie ab -1,0 dpt oder Hyperopie ab +1,0 dpt bei der Erstuntersuchung
- Astigmatismus
- Augenkrankheiten

Nach Prüfung der Datensätze ergaben sich 44922 Beobachtungen von insgesamt 12351 Kandidaten, die Gegenstand dieser Studie sind.
Die Probanden waren im Mittel 37,8 Jahre alt und die Beobachtungsdauer betrug im Mittel 3211 Tage, also 8,8 Jahre.
Da die Patienten regelmäßig bei den Untersuchungen am FMI nicht nur augenärztlich sondern auch internistisch, neurologisch, HNO-ärztlich, orthopädisch und zahnärztlich untersucht wurden, war sichergestellt, dass es sich ausschließlich um gesunden Probanden handelte.

2.2. Untersuchung der Probanden

Die routineärztlichen Untersuchungen eines jeden Probanden erfolgten am FMI (Flugmedizinischen Institut der Bundeswehr) in Fürstenfeldbruck standardisiert und fachärztlich. Der allgemeine Ablauf wird wie folgt ausgeführt:

Zuerst wird der Refraktionszustand des Auges ermittelt.
Die Refraktion wird mithilfe von einer subjektiven und einer objektiven Methode ermittelt. Zunächst wird subjektiv die Refraktion für den Fernpunkt und anschließend für den Nahpunkt ermittelt. Hierbei wird im Rahmen einer subjektiven Abfrage des Patienten versucht, mit hoher Präzision möglichst schnell und effizient die Refraktion zu ermitteln. Der subjektive Abgleich basiert auf einer objektiven Refraktionsbestimmung, um den Ablauf abzukürzen [26]. Außerdem bestimmt werden der Grob- und Feinabglich von Zylinderstärke und Zylinderachse, sowie ein binokularer Rot-Grün-Abgleich, um ein optimales Ergebnis zu erzielen.

Die subjektive und objektive Refraktion der vorliegenden Studie wurde stets in Miosis durchgeführt.

Es erfolgte zunächst die Bestimmung der objektiven Refraktion in Miosis, seit 2002 am Refraktometer Rodenstock Cx1000/RX 900 (WECO Optik GmbH Düsseldorf, Herstellungsdatum 10/02). vor 2002 erfolgte die Bestimmung manuell mittels Skiaskopie. Mit dem automatischen Refraktometer wurden die drei Parameter Sphäre, Zylinder, und Achse beobachtet.



Abb. 2: Rodenstock Cx1000/RX 900, zur Messung der objektiven Refraktion

Das Messprinzip des automatischen Refraktometers liegt darin, dass dem Patienten eine Prüffigur auf die Retina projiziert wird, die im Infrarotbereich liegt, und somit nicht sichtbar ist. Dadurch dass bei diesem Verfahren keine Blendung des Probanden stattfindet, kann direkt nach der objektiven, die subjektive Messung erfolgen [26].
Die Ergebnisse der objektiven Refraktion dienen anschließend als Grundlage für die subjektive Refraktion, die hier von größerer Bedeutung ist.
In der Regel wird zunächst bei der Refraktionsbestimmung die monokulare Fernrefraktion für jedes Auges durchgeführt. Danach erfolgt ein binokularer Abgleich beider Augen, um ein Gleichgewicht der Refraktion herzustellen. Oft muss auch eine subjektive Refraktion für die Nähe untersucht werden [26]. Die subjektive monokulare Refraktion für die Ferne

besteht aus der Bestimmung der schon oben genannten Parameter, der besten Sphäre, des Zylinders nach Achse und Stärke, und des monokularen sphärischen Feinabgleichs. Diese Bestimmung erfolgte an einem Phoropter, dem Möller-Wedel-Photopter Visutron 900+, einem digitalen Steuergerät vernetzt mit einem Sehzeichenprojektor M3000 vernetzt (Haag-Streit Deutschland GmbH, Wedel).



Abb. 3: Möller-Wedel-Phoropter Visutron 900+, zur Messung der subjektiven Refraktion, rechts oben Sehzeichenprojektor M3000



Abb. 4: Bedienpult zur Steuerung des Phoropters

Um einen Visus von 1,0 zu erreichen (DIN 58220), werden dem Probanden anhand eines Sehzeichenprojektors gemäß DIN 58220 Sehzeichen vorgelegt. Primär arbeitet man dabei mit den Landolt-Ringen als Normsehzeichen.

Durch DIN 58220 wird die Sehschärfenprüfung und somit genau die Darbietungsbedingungen des Normsehzeichens, für Gutachten geregelt [26].

Laut DIN-Norm hat der Landoltring einen Außendurchmesser von 5 Winkelminuten, eine Öffnung von 1 Winkelminute und aus 5 Metern Entfernung eine Balkendicke von 1,45mm, sowie einen Durchmesser von 7,25 mm.

Dabei müssen aus mindestens 4 Metern Prüfentfernung 60 Prozent einer Reihe erkannt werden. Benötigt wird eine helle Beleuchtung mit einer Umfeldleuchtdichte von 160-320 cd/m².

Anfangs werden in den Phoropter die genauen Parameter der objektiven Refraktion eingegeben, um als Kontrolle dienen zu können. Dann variiert man die Parameter. Bei der Sphäre arbeitet man sich von Plus zum Minus, zunächst monokular, vor. Das sichtbare Bild des Patienten soll dabei nicht kleiner werden.

Die subjektive Bestimmung der Refraktion beginnt mit dem Vorhalten von Plusgläsern (meist +0,5 dpt sphärisch). Wird hierbei das Bild schlechter, dann ist dies ein Hinweis auf Emmetropie bis Myopie, bleibt es gleich oder wird es besser deutet es auf Hypermetropie.

Sollten Plusgläser die Bilder verschlechtern, sind analog Minusgläser mit allmählich stärkeren Werten anzuwenden. Man wählt das schwächste Glas, welches gerade noch die beste Sehschärfe erbringt [41].

Daraufhin misst man den Zylinder anhand der objektiven Refraktion, und stellt dann die Achse ein. Die Achse des Zylinders wird ausgetestet mit Hilfe von Kreuzzylindern.

Da bei Erforderlichkeit eines Zylinders zwei Achsen existieren, wird entweder die Achse über dem höheren Brechwert angegeben, oder über dem niedrigeren. Dadurch ändert sich das Vorzeichen von + auf -, die Achse entsprechend um 90° [35]. Die Sphäre, abgekürzt sph, gibt in Dioptrien den Teil der Brechkraft eines Brillenglasses an, der in allen Richtungen gleich bleibt. Der Zylinder, abgekürzt cyl, wird in Dioptrien angegeben, und steht für die zusätzlich benötigte Brechkraft in eine bestimmte Richtung (Achse).

Die Achse wird in Grad angegeben, und zwar nach dem Tabo-Gradbogenschema.

Definiert ist die Achse durch 0° nach links und rechts vom Patienten in waagrechter Richtung. 270° bedeuten kaudal (unten) vom Patienten und 90° bedeuten kranial (oben) vom Patienten [1,52].

Letztendlich folgt der Feinabgleich, der Binokularabgleich. Dieser Abgleich sollte erfolgen, wenn Simultansehen vorliegt, d.h., wenn beide Augen gleichzeitig am Sehakt teilnehmen (sonst macht dies keinen Sinn) und wenn die Sehschärfe beider Augen annähernd gleich ist. Sinn des Binokularabgleichs ist es, minimale Differenzen in der Refraktion zwischen rechtem und linkem Auge so abzugleichen, dass daraus binokular ein optimales Sehen resultiert. Man kann dieses Abgleich unter Verwendung von polarisierten Rot-Grün-Tests bestimmen, wie beispielsweise des Bichrom-Balance-Tests, oder des Cowen-Tests.

Der binokuläre Feinabgleich des Zylinders geschieht wurde seitengetrennt anhand des Bichrom-Balance-Tests nach Osterberg durchgeführt. Es werden ein rotes und ein grünes Bild für beide Augen simultan ohne Trennung dargeboten. Dabei handelt es sich um einen polarisierten Rot-Grün-Test. Dies bedeutet, dass bei Vorschaltung gekreuzter Polarisatoren dem einen Auge beispielsweise die beiden oberen, und dem anderen Auge die beiden unteren Ringe zugeordnet werden. Mit diesen Tests kann unter binokularen Sehbedingungen ein monokularer Feinabgleich stattfinden [27].



Abb. 5: Kreuzzylinder zum Feinabgleich bei Refraktionsbestimmung

Der optimale Zustand ist, wenn beide Zahlen gleich scharf gesehen werden.
Daraufhin unterzieht sich der Proband dem gleichen Procedere am anderen Auge.
Hierbei werden bei Myopie nicht selten beidseitig – 0,25 dpt bis – 0,5 dpt ohne Einbuße an Visus abgezogen [41].



Abb. 6: Messung der objektiven Refraktion mittels Skiaskopie

Außer der Refraktion wurden bei jedem Probanden vorhandene Brillen mittels eines Scheitelbrechwertmessers nach ihrem Scheitelbrechwert ausgemessen. Hierbei wurden im

Flugmedizinischen Institut Fürstenfeldbruck sowohl konventionelle manuelle als auch automatisierte Ausmessungen mittels Scheitelbrechwertmesser durchgeführt.



Abb. 7: Manuelles Brillenausmessen mittels eines älteren Scheitelbrechwertmessers

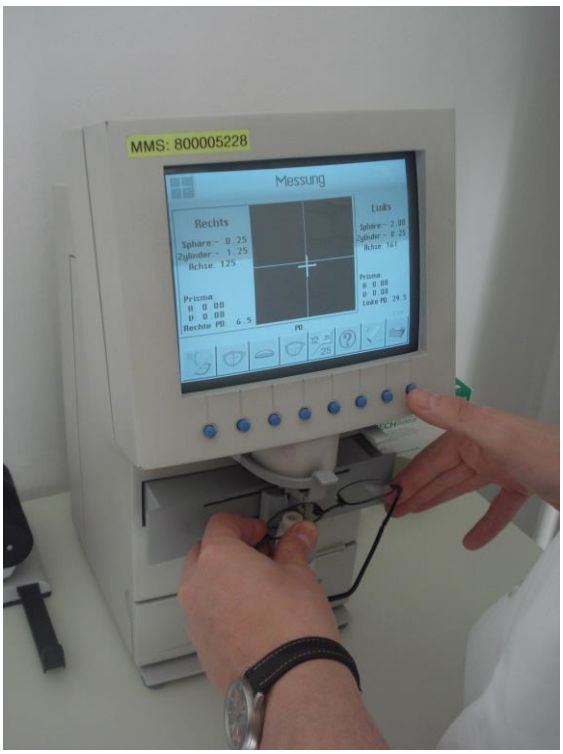

Abb. 8: Automatisiertes Brillenausmessen mittels Zeiss Humphrey 350 Scheitelbrechtwertmesser

2.3. Datenauswertung

Die Beobachtungsdaten der in die Studie eingeschlossenen Probanden wurden aus dem Institutionsformationssystem des Flugmedizinischen Instituts der Bundeswehr in Fürstenfeldbruck (FMI) in mehrere Exceldateien eingelesen.
Im Anschluss mussten die Daten zur Analyse in eine auswertbare Form gebracht werden. Sie wurden über mehrere Schritte in eine Excel-Gesamtdatei überführt, die so organisiert war, dass jede einzelne Untersuchung eines jeden Probanden in einer Zeile repräsentiert war. Somit befand sich die Untersuchung des ersten Probanden in Zeile 1, die folgenden Untersuchungen in den folgenden Zeilen, danach folgten die Untersuchungen des zweiten Probanden in jeweils einer Zeile (s. Abb. 1 und 2).
Insgesamt wurden 12351 männliche Teilnehmer mit einer mittleren Beobachtungszeit von 8,8 Jahren untersucht, die alle anfangs normalsichtig (-0,75 bis + 0,75 dpt) waren.

Die statistische Auswertung erfolgte mit dem Programm „R".
„R" ist eine freie Programmiersprache bzw. eine Software, um statistische Datenanalysen und graphische Darstellungen durchzuführen, und somit statistische Fragestellungen von Studien zu erarbeiten.
„R" wird durch das CRAN, Comprehensive R Archieve Network, einem Server-Netzwerk, kostenfrei zur Verfügung gestellt. R wurde 1992 von Ross Ihaka und Robert Gentleman an der Universität Auckland entwickelt [11].

Um die Informationen der Datenbank aus der Excel-Gesamtdatei in eine R-lesbare Form zu überführen, wurden zuvor alle leeren Felder mit „NA" (für not available) als Platzhalter gefüllt. Ferner wurde mit Hilfe einer Excelmakros der zeitliche Abstand zwischen den einzelnen Untersuchungen berechnet.
Anschließend wurden die Daten aus der Exceldatei in eine longitudinale Struktur gebracht, um diese durch verschiedene Schritte in eine Auswertungsdatei zu exportieren um mit dem Statistikprogramm „R" die Daten auswerten zu können.

Jeder Datensatz, d.h. jede Zeile der R-Datenbank bestand aus einem Parameter für die Identität (sog. Untersuchungsaktennummer), aus der Altersangabe, aus dem jeweiligen

Zeitpunkt der Untersuchung, sowie aus der Zeitspanne, die seit der vorherigen untersuchung des jeweiligen Probanden verstrichen war, außerdem aus den folgenden Parametern:

1. RA - rechtes Auge objektive Refraktion: Sphäre (dpt), Zylinder (-dpt), Achse (Grad°)
2. RA - rechtes Auge subjektive Refraktion: Sphäre (dpt), Zylinder (-dpt), Achse (Grad°)
3. LA - linkes Auge objektive Refraktion: Sphäre (dpt), Zylinder (-dpt), Achse (Grad°)
4. LA - linkes Auge subjektive Refraktion: Sphäre (dpt), Zylinder (-dpt), Achse (Grad°)

In die Studie eingeschlossen wurden, wie schon gesagt, nur Probanden ohne Astigmatismus.

Legende für Tabellen 2 und 3:

U_Akte	Untersuchungsakte des Probanden
PK	Personenkennziffer des Probanden
Alter	Alter des Probanden bei der Untersuchung in Jahren
U_Datum	Untersuchungsdatum
Diff-Tage	Zeitliche Differenz zwischen zwei aufeinanderfolgenden Untersuchungsterminen, gemessen in Tagen
U_Art	Untersuchungsart (Erstuntersuchung, Nachuntersuchung)
Sehscharf_ Re_ F	Sehschärfe rechts subjektiv
Sehscharf_ Li _F	Sehschärfe links subjektiv
Refrakt _Re _T	Refraktion rechts objektiv
Refrakt _Re	Refraktion rechts
Refrakt_ Li_ T	Refraktion links objektiv
Refrakt_ Li	Refraktion links
Sehleistung _Re_ F	Sehleistung rechts subjektiv
Sehleistung_ Li _F	Sehleistung links subjektiv
Brille 0/1	nicht vorhanden/vorhanden
FLZ_Typ	Flugzeugtyp (verschlüßelt)

Tabelle 2: Ursprungstabelle der Probandendaten von Piloten untersucht im Flugmedizinischen Institut der Bundeswehr Fuerstenfeldbruck von 1967 bis 2006 in Exceldatei überführt; Die Daten sind nach Untersuchungsakte mit jeweiliger Personenkennziffer, Alter, Untersuchungsdatum, Differenztagen, Untersuchungsart und den jeweiligen Messwerten fuer Sehschaerfe, Refraktion, Sehleistung, Brille und Flugzeugtyp angegeben

U_ AKTE	PK	ALTER	U_DATUM	DIFF-TAGE	U_ ART	SEHSCHARF _RE_F	REFRAKT _RE_T	REFRAKT _RE	SEHSCHARF _LI_F	REFRAKT _LI_T	REFRAKT _LI	SEHLEIST _RE_F	SEHLEIST _LI_F	BRILLE	FLZ _TYP
1	XXXX50XXXXXX	20	19700519	0	1			3			3	0	0	1	0
1	XXXX50XXXXXX	23	19730628	1136	2			1			1	0	0	0	0
1	XXXX50XXXXXX	26	19760122	938	2			2			2	0	0	0	201
1	XXXX50XXXXXX	29	19790201	1106	2		-25050	2		+0050;0025060	2	125	125	1	205
2	XXXX12XXXXXX	55	19670724	0	2			3			3	0	0	4	108
2	XXXX12XXXXXX	56	19680712	354	2			3			3	0	0	4	108
2	XXXX12XXXXXX	57	19690707	360	2			3			3	0	0	4	108
3	XXXX53XXXXXX	22	19750521	0	1			3			3	0	0	1	0
3	XXXX53XXXXXX	24	19771028	891	2			3			3	0	0	1	104
3	XXXX53XXXXXX	26	19791128	761	2		25	3		25	3	125	125	1	19
3	XXXX53XXXXXX	27	19800529	183	3		+ 0,25 S	3		+ 0,25 S	3	125	125	1	19
3	XXXX53XXXXXX	28	19810722	419	3		+ 0,25 S	3		+ 0,25 S	3	125	125	1	19
3	XXXX53XXXXXX	29	19820609	322	2		+ 0,25 S	3		+ 0,25 S	3	125	125	1	19
3	XXXX53XXXXXX	35	19881124	2360	2		+0,25 S	3	-0,25 CX 15=125 %	+0,25 S -0,25 CX 15	2	125	100	1	19
3	XXXX53XXXXXX	38	19910516	903	2	-0,50 S =125 %	-0,75 S	5	-0,75 S -0,5 CX 15=125 %	-1,00 S -0,50 CX 15	4	100	80	2	19
3	XXXX53XXXXXX	41	19940621	1132	2	-0,50 S =125 %	-0,75 S	5	-0,75 S -0,5 CX 15=125 %	-1,00 S -0,50 CX 15	4	80	70	2	19
4	XXXX54XXXXXX	21	19750521	0	1			2			2	0	0	1	0
4	XXXX54XXXXXX	23	19770531	741	2			4			4	0	0	0	104
4	XXXX54XXXXXX	25	19790530	729	2		-50000	4	-25000125	-50000	4	125	125	1	19
4	XXXX54XXXXXX	28	19820303	1008	2		- 0,5 CX 0	4		- 0,5 CX 0	4	125	125	1	19
4	XXXX54XXXXXX	31	19850213	1078	2		- 0,5 CX 0	4		- 0,5 CX 0	4	125	125	1	19
4	XXXX54XXXXXX	34	19880309	1120	2		- 0,5 CX 0	4		- 0,5 CX 0	4	125	125	1	19
4	XXXX54XXXXXX	39	19930203	1792	2		- 0,50 CX 0	4		-0,50 CX 0	4	125	125	1	19

Tabelle 3: Zwischenstufentabelle der Datenbearbeitung von Piloten untersucht im Flugmedizinischen Institut der Bundeswehr Fuerstenfeldbruck von 1967 bis 2006;
Die Daten sind nach Untersuchungsakte mit jeweiliger Personenkennziffer, Alter, Untersuchungsdatum, Differenztagen, Untersuchungsart und den jeweiligen Messwerten für Sehschärfe, Refraktion, Sehleistung, Brille und Flugzeugtyp angegeben

U-	PK	ALTER	U_	DIFF-	U_ART	SEHCHARF	REFRAKT			REFRAKT	SEHCHARF				REFRAKT			REFRAKT	SEHLEIST	SEHLEIST	BRILLE	FLZ
AKTE			DATUM	TAGE	Art	_RE_F	_RE_T			_RE	LI_F				_LI_T			_LI	_RE_F	_LI_F		_TYP
10002	XXXX46XXXXXX	23	19690401	0	1					3								3	0	0	1	0
10002	XXXX46XXXXXX	26	19720410	1105	2					3								3	0	0	1	201
10002	XXXX46XXXXXX	29	19750409	1094	2					3								3	0	0	1	201
10002	XXXX46XXXXXX	30	19760402	359	7					0								0	0	0	0	201
10002	XXXX46XXXXXX	32	19780503	761	2	0.5	0.75	0.5	90	2	0.25				1	0.5	90	2	125	125	1	201
10002	XXXX46XXXXXX	35	19810310	1042	2		0.75	+0,5 C	90	2					1	+0,5 C	90	2	125	125	1	201
10002	XXXX46XXXXXX	38	19840316	1102	2		0.75	+0,5 C	90	2					1	+0,5 C	90	2	125	125	1	209
10002	XXXX46XXXXXX	41	19870422	1132	2		0.75	+0,5 C	90	2					1	+0,5 C	90	2	125	125	1	209
10002	XXXX46XXXXXX	42	19880301	314	2		0.25	-0,5 C	170	6					0.25			3	125	125	1	209
10002	XXXX46XXXXXX	43	19890307	371	2		0.25	-0,5 C	170	6					0.25			3	125	125	1	209
10002	XXXX46XXXXXX	44	19900308	366	2		0.25	-0,5 C	170	6					0.25			3	125	125	1	209
10002	XXXX46XXXXXX	45	19910304	361	2		0.25	-0,5 C	170	6	0.25	-0,25 C	20	125%	0.25			3	125	100	1	209
10002	XXXX46XXXXXX	46	19920224	357	2		0.25	-0,5 C	170	6	0.25	-0,25 C	20	125%	0.25			3	125	100	1	209
10002	XXXX46XXXXXX	47	19930310	380	2		0.25	-0,50 C	170	6	0.25	-0,25 C	20	125%	0.25			3	125	100	1	209
10002	XXXX46XXXXXX	48	19940218	345	2		0.25	-0,50 C	170	6					0.25			3	125	125	1	209
10002	XXXX46XXXXXX	49	19950322	397	2	0	0.25	-0,50 C	170	6	0				0.25			3	100	125	6	209
10002	XXXX46XXXXXX	50	19960228	343	2	0	0.25	-0,50 C	170	6	0				0.25			3	100	100	6	209
10002	XXXX46XXXXXX	51	19970311	377	2	0	0			0	0				0			0	120	100	6	209
10004	XXXX48XXXXXX	21	19690311	0	1					3								2	0	0	1	0
10004	XXXX48XXXXXX	23	19710917	920	2					3								2	0	0	1	201
10004	XXXX48XXXXXX	26	19740903	1082	2					3								2	0	0	1	201
10005	XXXX48XXXXXX	21	19690311	0	1					3								3	0	0	1	0
10006	XXXX47XXXXXX	22	19690311	0	1					3								3	0	0	1	0
10007	XXXX47XXXXXX	22	19690312	0	1					3								3	0	0	1	0
10007	XXXX47XXXXXX	25	19720413	1128	2					3								3	0	0	1	201
10007	XXXX47XXXXXX	27	19741212	973	2					3								3	0	0	1	201
10007	XXXX47XXXXXX	30	19770201	782	2					2								2	0	0	1	201
10007	XXXX47XXXXXX	32	19791108	1010	2		0.5	0.5	90	2					0.5	0.5	90	2	125	125	1	205

3 Ergebnisse

3.1. Ergebnisdarstellung

Ausgewertet wurden 44922 Untersuchungen von 12351 Probanden. Die mittlere Beobachtungsdauer pro Proband betrug 8,8 Jahre (3211 Tage). Jeder Proband wurde im Schnitt 16 mal untersucht. Das mittlere Alter betrug 38 Jahre (Median 39 Jahre) mit einer beobachteten Spannweite von 18 bis 60.
Es handelt sich ausschließlich um männliche Probanden, die anfangs normalsichtig waren (-0,75 dpt bis + 0,75 dpt) und keinen Astigmatismus zeigten.

Tabelle 3 stellt die arithmetischen Mittelwerte und die Standardabweichung der subjektiven und der objektiven Refraktion der jeweiligen Altersjahrgänge dar. Weiterhin ist die Anzahl der Untersuchungen je Altersjahrgang aufgeführt. Dabei zeigt sich, dass zwischen dem 19. und 52. Lebensjahr die Untersuchungszahlen um und über 1000 liegen, danach deutlich abnehmen, da immer mehr Probanden aus dem Dienst der Bundeswehr ausscheiden. Bei den 60 jährigen wurden 88 Untersuchungen durchgeführt.

Tabelle 4: Subjektive und objective Refraktion (Sphäre) der jeweiligen Altersjahrgänge von Piloten zwischen 18. Und 60. Lebensjahr gemessen für rechtes und linkes Auge, angegeben mit arithmetischem Mittel, Standardabweichung und Anzahl der Probanden
Alter: Alter der Probanden von 18. Bis 60. Lebensjahr
mean: arithmetisches Mittel des jeweiligen optischen Parameters (dpt)
SD: Standardabweichung
N: Anzahl der Probanden
sphere.rs: Sphäre rechts subjektiv
sphere.ro: Sphäre rechts objektiv
sphere.ls: Sphäre links subjektiv
sphere.lo: Sphäre links objektiv

	sphere.rs			sphere.ro			sphere.ls			sphere.lo		
Alter	mean	SD	N	mean	SD	N	mean	SD	N	mean	SD	N
18	-0.03656463	0.9161225	294	0.4370748	1.157718	294	-0.0212585	1.020782	294	0.3027211	1.0905	294
19	-0.04170231	0.9695503	1169	0.3851582	1.173934	1169	-0.03336185	0.9414353	1169	0.251497	1.124499	1169
20	-0.02559977	1.122172	1709	0.4083675	1.234927	1709	-0.02165009	0.9557539	1709	0.2843768	1.195882	1709
21	-0.1365052	0.9554943	1445	0.2719723	1.367912	1445	-0.1411765	1.158216	1445	0.1677163	1.349143	1445
22	-0.05715706	1.008975	1509	0.3644798	1.199486	1509	-0.05532141	0.9787707	1509	0.2550364	1.15251	1509
23	-0.131264	1.095663	1337	0.2197457	1.20308	1337	-0.1319746	1.024664	1337	0.1664173	1.157497	1337
24	-0.2155582	1.251103	1263	0.1188044	1.336774	1263	-0.2022961	1.113262	1263	0.08044339	1.294826	1263
25	-0.2435192	1.100007	1273	0.08311076	1.425184	1273	-0.2419482	1.282396	1273	0.009819324	1.421837	1273
26	-0.2842608	1.287012	1204	0.05672757	1.262853	1204	-0.2863372	1.084577	1204	-0.005955149	1.20154	1204
27	-0.36612	1.31712	1067	-0.07099344	1.41415	1067	-0.358716	1.288393	1067	-0.0947985	1.354543	1067
28	-0.2974013	1.272927	1039	0.004860443	1.34305	1039	-0.2747834	1.282543	1039	-0.06135707	1.324204	1039
29	-0.3409314	1.160621	1020	-0.03700981	1.310547	1020	-0.3208333	1.282313	1020	-0.0992647	1.305472	1020
30	-0.3286604	1.382548	963	0.004413292	1.235643	963	-0.2930945	1.211233	963	-0.03738318	1.231898	963
31	-0.4403906	1.324797	973	-0.1451593	1.433899	973	-0.431963	1.416262	973	-0.18037	1.422273	973
32	-0.4608466	1.059622	945	-0.1650794	1.502689	945	-0.415873	1.26545	945	-0.1690476	1.435747	945
33	-0.342833	1.244824	886	-0.06348758	1.21228	886	-0.337754	1.041506	886	-0.0993228	1.085086	886
34	-0.4028926	1.209054	847	-0.1118654	1.37634	847	-0.3916765	1.195193	847	-0.1502361	1.301002	847
35	-0.3725437	1.278415	916	-0.1252729	1.330419	916	-0.338155	1.152187	916	-0.1246998	1.247607	916
36	-0.3982901	1.112049	848	-0.1335495	1.340029	848	-0.3522995	1.210473	848	-0.09050708	1.193185	848
37	-0.2535129	1.239653	854	0.02605386	1.216694	854	-0.2005269	1.096647	854	0.01668618	1.148206	854
38	-0.2251712	1.132266	876	0.06735159	1.331283	876	-0.2019977	1.208347	876	0.03544521	1.258923	876
39	-0.2389221	1.215365	835	0.04850299	1.193337	835	-0.2293413	1.13021	835	0.003592814	1.159617	835
40	-0.1641597	1.121107	964	0.1130705	1.231583	964	-0.1369295	1.182711	964	0.09362033	1.288071	964
41	-0.1421205	1.098523	1212	0.1330446	1.250882	1212	-0.1102517	1.054231	1212	0.09570957	1.188612	1212
42	-0.0975142	1.061126	1408	0.1312074	1.18701	1408	-0.07848012	1.051179	1408	0.0978338	1.081097	1408
43	-0.06734914	1.046965	1392	0.172773	1.172971	1392	-0.07165948	1.058129	1392	0.1156609	1.140673	1392
44	-0.02046263	1.04598	1405	0.1921637	1.149212	1405	-0.03523132	1.058856	1405	0.1532028	1.138186	1405
45	0.0152711	0.9260209	1457	0.2463967	1.110033	1457	0.01286891	1.057522	1457	0.2223747	1.075953	1457
46	0.01656805	0.9178066	1521	0.2283037	1.02967	1521	0.0295858	0.9528502	1521	0.2135437	0.9954109	1521
47	0.0730285	0.8982661	1509	0.2717031	1.016721	1509	0.08419483	0.932363	1509	0.2622598	0.957363	1509
48	0.1038899	0.8936895	1581	0.2960152	0.9274181	1581	0.1184377	0.9189926	1581	0.2762492	0.9033729	1581
49	0.1169935	0.9166128	1530	0.2861111	0.9456943	1530	0.1124183	0.9235542	1530	0.2482026	0.9172989	1530
50	0.1379661	1.03674	1475	0.3201695	0.9412391	1475	0.1474576	0.9494706	1475	0.2808475	0.9176475	1475
51	0.1486832	1.039363	1367	0.313643	1.054027	1367	0.1477688	1.027763	1367	0.2946233	0.9636144	1367
52	0.2165992	0.9852898	1235	0.3653846	1.03531	1235	0.2221053	1.061306	1235	0.3506073	0.9901509	1235
53	0.2745098	1.200648	969	0.3916409	0.9682444	969	0.2641899	1.028452	969	0.3679051	0.9912931	969
54	0.3114374	1.223239	647	0.4037867	1.1729	647	0.2805255	1.237294	647	0.3589644	1.219563	647
55	0.297556	1.098205	536	0.4104477	1.177139	536	0.306903	1.235393	536	0.3997202	1.187098	536
56	0.3649498	1.291607	398	0.4252512	1.082653	398	0.3505025	1.130614	398	0.3919598	1.065375	398
57	0.3671329	1.428983	286	0.4361888	1.176373	286	0.3645105	1.284267	286	0.3774475	1.134363	286
58	0.3797619	1.399347	210	0.4190476	1.355255	210	0.3940476	1.395619	210	0.3821429	1.240072	210
59	0.2518657	1.534795	134	0.375	1.40513	134	0.2537313	1.365521	134	0.3059702	1.294741	134
60	0.2528409	1.507871	88	0.2926136	1.500585	88	0.3352273	1.550809	88	0.2556818	1.412677	88

In den folgenden Graphiken wird das arithmetische Mittel der jeweiligen optischen Parameter aller untersuchten Probanden für das jeweilige Lebensjahr aufgetragen.

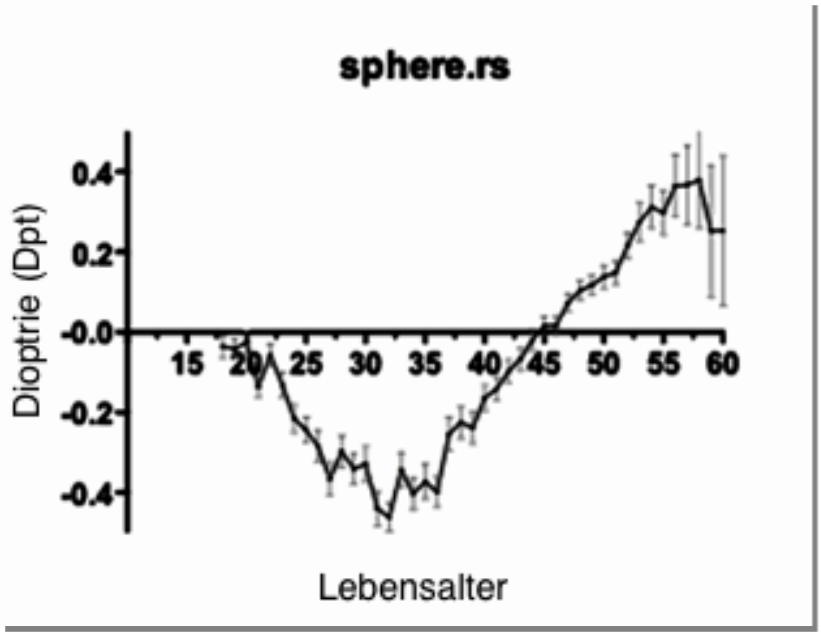

Abb. 9: subjektive Refraktion (Sphäre) rechts in Abhängigkeit vom Lebensalter der Probanden.
Die Fehlerbalken beschreiben das 95% Konfidenzintervall.
Die vertikale Achse repräsentiert die Dioptrieanzahl (Dpt) von -0.4- 0.4, die horizontale Achse das Lebensalter von 15.-60. Lebensjahr.

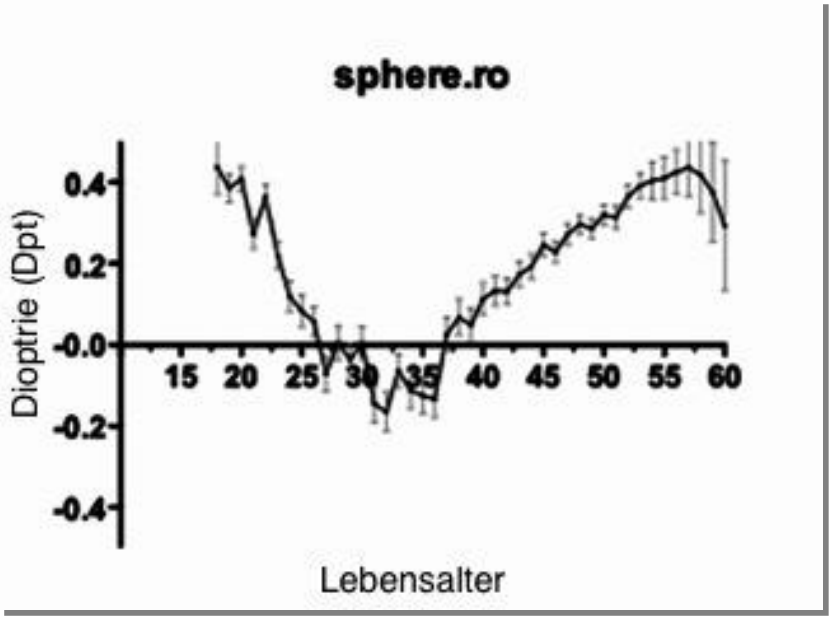

Abb. 10: objektive Refraktion (Sphäre) rechts in Abhängigkeit vom Lebensalter der Probanden.

Die Fehlerbalken beschreiben das 95% Konfidenzintervall.

Die vertikale Achse repräsentiert die Dioptrieanzahl (Dpt) von -0.4- 0.4, die horizontale Achse das Lebensalter von 15.-60. Lebensjahr.

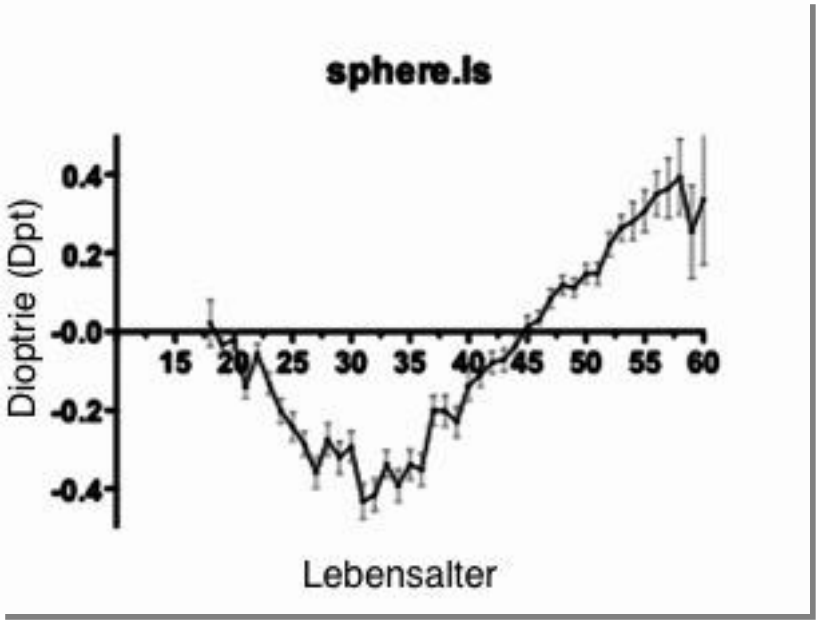

Abb. 11: subjektive Refraktion (Sphäre) links in Abhängigkeit vom Lebensalter der Probanden.
Die Fehlerbalken beschreiben das 95% Konfidenzintervall. Die vertikale Achse repräsentiert die Dioptrieanzahl (Dpt) von -0.4- 0.4, die horizontale Achse das Lebensalter von 15-60. Lebensjahr.

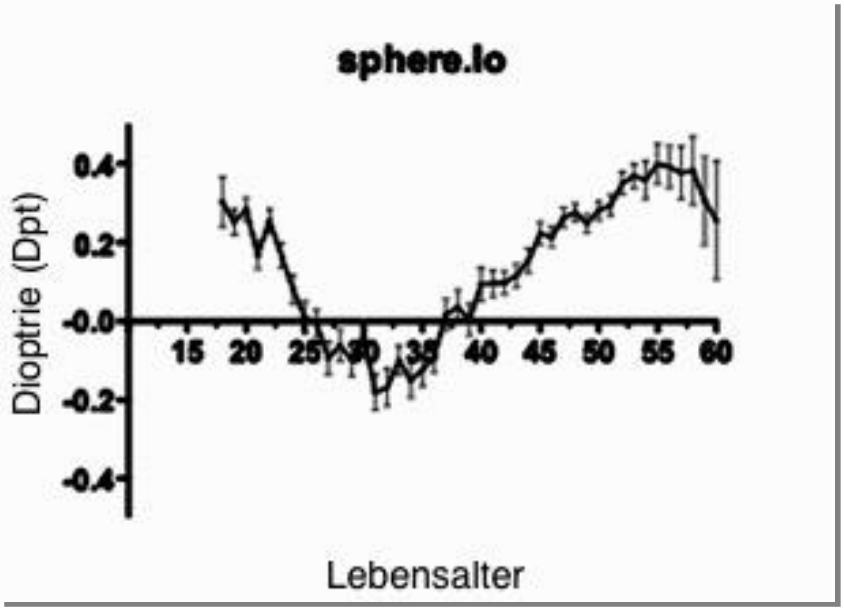

Abb. 12: objektive Refraktion (Sphäre) links in Abhängigkeit vom Lebensalter der Probanden.
Die Fehlerbalken beschreiben das 95% Konfidenzintervall.
Die vertikale Achse repräsentiert die Dioptrieanzahl (Dpt) von -0.4- 0.4, die horizontale Achse das Lebensalter von 15-60. Lebensjahr.

Bei der Darstellung der Refraktion in Abhängigkeit vom Alter (Abb. 10 bis 13) zeigt sich, beginnend im 18. Lebensjahr, sowohl bei der objektiven als auch bei der subjektiven Refraktion zunächst ein abfallender Teil, ein Minimum im 32. Lebensjahr, dann eine bis etwa zum 57. Lebensjahr relativ geradlinig steigende Kurve, die danach wieder etwas abfällt. Aufgrund der nach dem 52. Lebensjahr sinkenden Probandenzahl (n=66 im 60. Lebensjahr), ist die Aussagekraft des letzten Teils der Kurve deutlich vermindert. Somit ist keine sichere Aussage darüber möglich, ob es tatsächlich nach dem 57. Lebensjahr zu einem Kurvenabfall kommt oder nicht.

Der Kurvenverlauf ist beidseits gleich, also unabhängig von der gemessenen Seite. Das 95% Konfidenzintervall bleibt bis zum 52. Lebensjahr gleich, zeigt dann bis zum

60. Lebensjahr eine zunehmend größere Spannweite. Dies ist auf die Abnahme der Probandenzahl nach dem 52. Lebensjahr zurückzuführen.

Ist man nur am zeitlichen Verlauf der Mittelwerte interessiert, können die Graphiken mit Hilfe von lokalen Regressionstechniken (hier kubischen Splines) angepasst („gefittet“) werden.

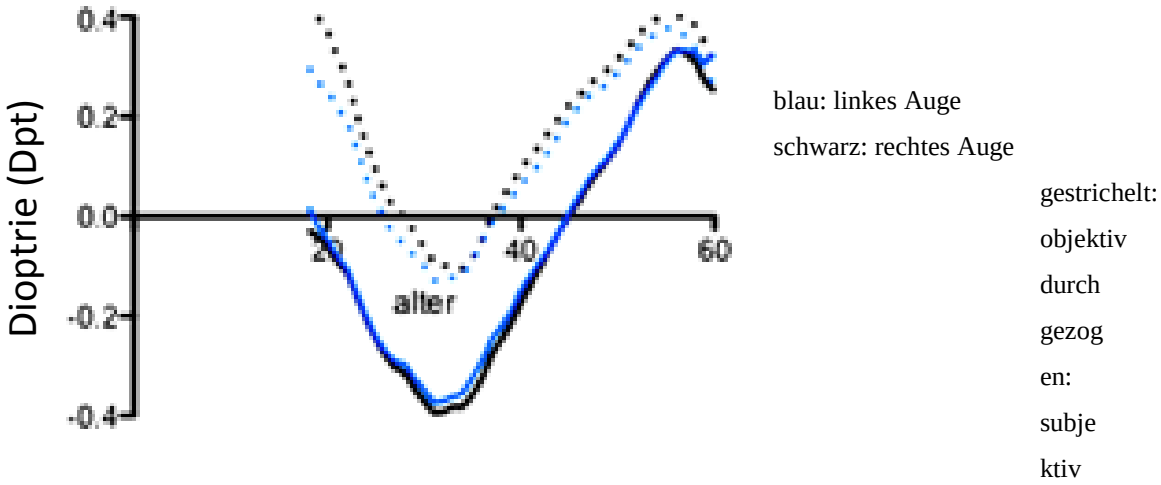

Abb. 13: Sphäre links/rechts, subjektiv/objektiv als optischer Parameter aufgetragen gegen das Lebensalter der Probanden.

Die Kurven der subjektiven Refraktion beginnen bei 0 dpt im 18. Lebensjahr. Bis zum 45. Lebensjahr zeigt sich ein negativer Kurventeil, mit einem Kurvenminimum von -0,4 dpt im 32. Lebensjahr. Ab dem 45. Lebensjahr zeigt sich ein positiver Kurventeil mit einer Steigung der Kurven bis zum 57. Lebensjahr auf ein Maximum von +0,3 dpt; danach ein erneutes Abfallen der Kurven bis zum 60. Lebensjahr Es findet sich kein Unterschied zwischen dem rechten und dem linken Auge.

Es zeigt sich also, dass bei normalsichtigen gesunden18 jährigen bis zum 32. Lebensjahr physiologischerweise eine Myopie mit Maximalwerten von -0,4 dpt auftritt, die bis zum 45. Lebensjahr wieder vollständig rückläufig ist. Nach dem 45. Lebensjahr zeigen sich in der subjektiven Refraktion positive Werte, die bis zum 57. Lebensjahr ansteigen, dann wieder leicht sinken, wobei in der letzten Dekade aufgrund geringer Probandenzahlen keine sichere Aussage möglich ist.

Die Kurven der objektiven Refraktion beginnen bei + 0,4 dpt im Alter von 18 Jahren, haben ein Minimum von -0,1 dpt im 32. Lebensjahr und ein Maximum von +0,4 dpt im 57. Lebensjahr. Die Nulldurchgänge sind im 26. und 36. Lebensjahr.
Das heißt die Minima und Maxima der Kurven der subjektiven und objektiven Refraktion zeigen sich im gleichen Alter von 32 und 57 Jahren.
Der Beginn der Kurve der objektiven Refraktion (im 18. Lebensjahr) ist im Vergleich zur subjektiven Refraktion um +0,4 dpt verschoben. Die Kurven nähern sich kontinuierlich aneinander an. Im Alter von 60 Jahren erzielen die Kurven nahezu identische Werte.
Das heißt im Mittel ergibt die objektive Refraktionsprüfung weniger myope Werte als die subjektive

Letztlich entscheidend für den Visus ist die subjektive Refraktionsprüfung.

Mit der Auswertung ist es gelungen, die wissenschaftlichen Erkenntnisse über den typischen Verlauf der Refraktion und der Myopieentwicklung bei gesunden normalsichtigen (-0,75 bis +0,75 dpt) erwachsenen Männern über einen langen Beobachtungszeitraum und mit einer aussagekräftigen Probandenanzahl zu untermauern.
Die Myopie, bestimmt mittels subjektiver Refraktion, nimmt vom 18. bis zum 32. Lebensjahr zu und vermindert sich dann im weiteren Verlauf. Um das 45. Lebensjahr zeigt sich eine Refraktion von 0 dpt, danach ergeben sich positive Werte bei der Bestimmung der subjektiven Refraktion im Sinne einer Presbyopie.
Die durchgeführte Studie bestätigt mit ihren Ergebnissen mehrere zuvor durchgeführte Studien, die jedoch kürzere Beobachtungszeiten und kleinere Probandenzahlen aufwiesen.

4 Diskussion

4.1. Diskussion eigener Ergebnisse

Die durchgeführte Studie basiert auf der retrospektiven Erfassung probandenbezogener Daten bei 12351 Probanden mit insgesamt 24702 Augen, bezogen auf den Zeitraum von 1967 bis 2006.
Es sollte festgestellt werden, wie sich die Refraktion und insbesondere die Myopie im Laufe der Jahre bei einem konstanten weitestgehend normalsichtigen Probandenkollektiv entwickelt, um den physiologischen Entwicklungsverlauf der Myopie im Laufe des Erwachsenenalters feststellen zu können. Als Probandenkollektiv dienten bei dieser Studie Piloten und vereinzelt Flugpersonal der Bundeswehr. Diese Personengruppe eignet sich besonders für die Verlaufsbeobachtung, da es sich hierbei um gesunde junge Männer handelt, die keine körperlichen Einschränkungen aufweisen, und zudem im Laufe ihrer Dienstzeit sehr genau und regelmäßig untersucht werden. Für Piloten bestehen Höchstgrenzen in Bezug auf die Myopie und auch auf die Hyperopie.

Die Refraktion der Probanden wurde regelmäßig untersucht, und die Ergebnisse schließlich miteinander verglichen. Retrospektiv konnte die Myopieentwicklung etwa zwischen dem 20. und 45. Lebensjahr an Hand hoher Fallzahlen belegt werden. Es zeigte sich eine Verschlechterung der Myopie bis zum 32. Lebensjahr, die sich bis zum 45. Lebensjahr wieder normalisierte. Von besonderem Interesse ist für die Piloten der Abschnitt zwischen dem 20. und dem 35. Lebensjahr, da in diesem Alter die meisten Piloten aktiv tätig sind.

Aufgrund der Ergebnisse wird im Anschluss diskutiert, welche Konsequenzen der physiologische Myopieverlauf für spezielle Berufsgruppen, z.B. die der Piloten, darstellt.

Zur Entwicklung der Myopie gibt es nur Veröffentlichungen mit hohen Myopien und relativ geringen Probandenzahlen, beispielsweise Blevgard 1927 mit ca. 800 Probanden.

Das besondere an der vorliegenden Studie ist, dass dabei eine große Zahl an Bewerbern erfasst wurde, die zunächst normalsichtig bzw. nur gering myop waren. Somit war es möglich, eine große Probandenanzahl (12351) über Jahre beobachten zu können, um die Myopieentwicklung sozusagen von Anfang an studieren zu können.
Die Beobachtung erstreckte sich über einen langen Zeitraum von über 20 Jahren, sodass bei dieser Studie erstmalig so hohe Probandenzahlen über Jahre kontinuierlich beobachtet werden konnten.

Physiologischerseits ist Myopie ein lebhafter Prozess ist, der bis zum 32. Lebensjahr fortschreitet. Ab diesem Zeitpunkt kommt zu einer Besserung der Kurzsichtigkeit, wahrscheinlich durch die fortschreitenden Alterssichtigkeit (Presbyopie). Somit wird Myopie mit dem Alter wieder ausgeglichen.

Bisher ging die Wissenschaft davon aus, dass die Achsenlänge des Bulbus zunimmt, und zwar im Mittel bis zum 4. Lebensjahr, um danach weitgehend unverändert zu bleiben [39].
Die vorliegende Studie zeigt, dass die Myopie bis zum 32. Lebensjahr fortschreitet. Im Mittel handelt es sich um -0,4 dpt die das Auge zwischen dem 18. und dem 32. Lebensjahr entwickelt.

Theorethisch könnte das fortlaufende Wachstum des Bulbus ein möglicher Grund für das Fortschreiten der Myopie sein. Ab etwa dem 32. Lebensjahr kommt es bei den Probanden zur langsamen Entstehung der Alterssichtigkeit (Presbyopie), wobei die Myopie nun durch die Presbyopie ausgeglichen wird, und die Probanden wieder in der Ferne besser sehen. Eine mögliche Erklärung für den Ausgleich der Myopie ab dem 32. Lebensjahr könnte sein, dass der als Hauptverursacher geltende Faktor Naharbeit im Lebensverlauf an Präsenz verliert. Ab einem gewissen Alter stehen die Menschen am Ende ihrer Ausbildung, manche sind möglicherweise der Naharbeit, wie Lernen (erhöhte Leseanforderung) oder Arbeiten am Computer weniger ausgesetzt. Der Reizstopp (s. u.) könnte ebenfalls den Myopiestopp erklär

4.2. Ergebnisvergleich mit anderen Studien

Die Myopie ist der Spitzenreiter für Visusverlust weltweit, der mindestens 2,6 Millionen Menschen betrifft. Laut Holden wird angenommen, dass die Myopie im Jahre 2020 2,5 Milliarden Menschen betreffen wird [20].
In den letzten Jahren wurden zahlreiche Studien durchgeführt, die belegten, dass Kurzsichtigkeit vor allem in asiatischen Ländern inklusive Taiwan, Singapur und Hong Kong, sehr stark zunimmt. Lin (1998) untersuchte auf Taiwan Myopie bei Kindern und stellte fest, dass bei 12 % der Kinder im Alter von 6 Jahren eine Myopie vorhanden ist, während das zu 84% bei 16-18 Jährigen der Fall ist.
In Studien aus Hong Kong wurde die Myopie bei Erwachsenen untersucht und gezeigt, dass lediglich 29 % der 40-65 Jährigen betroffen sind. Lam verdeutlichte, dass ältere Patienten dazu neigen, im Laufe der Jahre emmetrop oder sogar hyperop zu werden [16].

Die Prävalenz der Kurzsichtigkeit ist deutlich altersabhängig und variiert somit in Populationen und ethnischen Gruppen. 23 epidemiologische Studien aus 19 Ländern haben ergeben, dass die Häufigkeit der Myopie bei Jugendlichen 35% beträgt, in Industrienationen sogar bis zu 80-90%.
In Europa weisen ca. 25% der 20-30 Jährigen eine Glasstärke von mehr als -1 dpt auf. [28]
Hinsichtlich der Myopieentwicklung wurde in einigen Longitudinalstudien gezeigt, dass der Myopiefortschritt bei weiblichen Patienten schneller stoppt als bei männlichen Patienten, gleichzeitig aber Mädchen schneller myop werden als Jungen.

Ferner hingegen zeigte Lin, wie unsere Studie ja auch, dass nach der Pubertät die Kurzsichtigkeit langsam fortschreitet, und dass die zunehmende axiale Länge des Augapfels der häufigste Grund hierfür ist.

Kinder, die schon in frühem Alter kurzsichtig waren, oder eine schwere Myopie bei der Erstuntersuchung aufwiesen, entwickelten schneller einen Myopieprogress [39].

Laut Leslie Hyman [21] gibt es über 15 populationsbasierte Studien unter Erwachsenen, bei denen in den letzten 20 Jahren Informationen über Prävalenz, Veränderungen und Risikofaktoren für eine Myopie gesammelt wurden, und zwar in den USA, in Barbados, West-Indien,Asien,Australien und Europa.

Allerdings sind diese Studien limitiert, da sie unterschiedliche Datensammelmethoden verwendeten, und von verschiedenen Definitionen für Myopie ausgingen. Die Eye Disease Prevalence Research Group führte Standarddefinitionen für die Untersuchungen ein, um den Vergleich von Studien zu ermöglichen.

Die Studie von Hyman zeigt an allen Standorten und bei allen Ethnien, ebenso wie unsere Studie, dass die Häufigkeit der Myopie (< -0,5 dpt) vom 40. bis zum 60. Lebensjahr abnimmt. Danach differieren die Kurvenverläufe. In Barbados und Singapur zeigt sich eine Zunahme der Myopieprävalenz. Für den Vergleich mit unserer Studie ist sicherlich die in Baltimore an Kauskasierinnen (BES-W) durchgeführte Studie am interessantesten. Dort zeigt sich zwischen 60 und 70 eine weitere Verminderung der Myopiehäufigkeit, danach ein an leichter Anstieg. Nach dem 80. Lebenjahr sinkt die Myopiehäufigkeit wieder.
Auch die Hyperopie (>0,5) wird untersucht. Bei der BES-W Gruppe zeigt sich ein Zunahme zwischen 40. und 80. Lebensjahr, danach eine leichte Abnahme.

Die obengenannte Studie von Hyman zeigt die Häufigkeit der myopen und hyperopen Frauen pro Lebensdekade in verschiedenen Populationen, vom 40 Lebensjahr bis über das 80. Lebensjahr hinaus zu einem bestimmten Untersuchungszeitpunkt.

Unsere Studie dagegen beschäftigt sich mit dem Verlauf der Refraktion über mehrere Jahrzehnte bei gesunden nicht fehlsichtigen Männern (-0,75 bis +0,75 dpt) zwischen dem 18. und dem 60. Lebensjahr. Durch sie wird deutlich, dass es im Laufe des Alterungsprozesses longitudinale Veränderungen des Auges gibt, die - in unserer Population (Kaukasier in Nordeuropa) - physiologisch zu einer Myopie führen, die mit dem 32. Lebensjahr ihr Maximum erreicht.

Somit wird klar, dass neben den genetischen und umweltbedingten Risikofaktoren für die Entstehung von Kurzsichtigkeit, ebenfalls die Alterung des Menschen und die mit

dem Alter auftretenden Augenerkrankungen, wie Katarakt, die Entstehung bzw. die Entwicklung von Myopie beeinflussen [21].

Eine Studie von Stanley Diamond bestätigt unsere Ergebnisse, dass Myopie einem typischen Alterungsprozess folgt. Stanley Diamond kommt zu wichtigen Feststellungen bezüglich der Einstellungskriterien für Piloten.
Emmetropie (definiert als +0,25 bis -0,25 dpt) sollte nicht als normale Refraktion angesehen werden, sondern eher als potentiell instabil, da sich mit individueller Variabilität der Trend zur Entwicklung von Myopie zeigt, v. a. im Alter von Anfang Zwanzig.
Somit sollte laut Diamond für Pilotenanwärter das Wunschmaß einer hundertprozentigen Sicht plus einer hyperopischen Reserve von + 0,5 dpt gelten [8,9]. Diese Maximalforderung wird durch unsere Studie untermauert, da sich vom 18. bis zum 32. Lebensjahr eine Myopie mit maximal -0,4 dpt ausbildet, die bis zum 45. Lebensjahr vollständig rückläufig ist.

Die Vorteile der von uns durchgeführten Studie gegenüber bisher erfolgten Studien sind:
- gleiche standardisierte Methoden für alle Probanden, was Vergleiche vereinfacht
- Messung der subjektiven und der objektiven Refraktion bei allen Probanden
- weitestgehend normalsichtiges Probendengut (-0,75 dpt bis +0,75 dpt)
- Ausschluss höhergradiger Myopie bei Beginn der Studie (stärker als -0,75 dpt)
- leicht vergleichbare Ergebnisse, da ein homogenes Kollektiv, nur männliche gesunde
  Probanden, kaukasische Herkunft
- großes Patientenkollektiv
- langer Beobachtungszeitraum

In der aktuellen Literatur wurden bisher keine Studien mit vergleichbarer Anzahl an Probanden und Länge des Beobachtungszeitraums durchgeführt.

4.3. Biologie und Ursachen der Myopie

Bei der Myopie handelt es sich um die weltweit häufigste Art der verbreiteten Fehlsichtigkeit, die oft bilateral auftritt, und ein irreversibles Krankheitsbild darstellt. Was sind die Auslöser bzw. die Einflusskriterien, die diese Erkrankung begünstigen?

Eine stark ausgeprägte Myopie und damit verbundene Sichteinschränkung können zur Einschränkung der Lebensqualität führen und das Risiko für weitere Augenerkrankungen erhöhen, wie z.B. Katarakt oder Retinaablösung. Zahlreiche Statistiken zeigen Refraktionsfehler bei Kindern, bei denen aufgrund ihrer ärmeren Herkunft die Fehler wie eine Myopia maligna medizinisch nicht behoben werden können. Es handelt sich um Kinder aus armen Ländern wie Chile, Nepal, Indien oder China. Lässt man höhergradige Refraktionsfehler, beispielsweise –6 dpt, unkorrigiert, droht auf lange Sicht vielen dieser Patienten eine funktionelle Erblindung.

Aber auch in Ländern mit höherem Durchschnittseinkommen, wie Australien, findet man hohe Zahlen von Patienten mit unbehandelter Fehlsichtigkeit und daraus folgender funktioneller Blindheit. Der Grund hierfür ist möglicherweise ein gesetzliches Versicherungssystem das regelmäßige augenärztliche Untersuchungen nicht abdeckt. Will man ophthalmologische Untersuchungen abdecken, muss man sich zusätzlich privat versichern. Große Teile der Bevölkerung können sich jedoch Privatversicherungen kaum leisten, weswegen eine Myopie nicht korrigiert wird [20].

Eine mögliche Erklärung zur Ursache der Kurzsichtigkeit ist, dass Myopie zu den Zivilisationskrankheiten unserer Zeit zählt, die daraus resultieren, dass der genetische Adaptationsprozess des menschlichen Körpers nicht mit der schnellen Entwicklung der Umwelt Schritt halten kann. Aus der ständigen Überlastung im Alltag kann kurz- oder langfristig ein degeneratives Leiden entstehen für das besonders Sinnesorgane anfällig sind. In Beruf und Freizeit sind beispielsweise die Augen und die Ohren einer erhöhten Licht- und Schallenergie ausgesetzt. Durch diese erhöhte Belastung werden die Sinnesorgane täglich strapaziert und können im Laufe der Jahre geschädigt werden. Somit kann es an den Augen nicht nur aufgrund des Alterungsprozesses zu

Sichtveränderungen kommen, sondern auch durch zunehmende Umweltbelastungen, unabhängig vom Alter [43].

Die wichtigsten Faktoren einer Zivilisationskrankheit sind:

- Eine endogene, erbanlagenbedingte Disposition
- Eine exogene, die natürlichen Schutzeinrichtungen der Sinnesorgane schwächende Komponente
- die auf die Sinnesorgane einwirkende Energieintensität und Expositionsdauer (Lichtdosis)

Bereits Selye (1936) beschrieb die „Allgemeine Stress- oder Adaptationsreaktion“, die aufzeigte, dass der menschliche Organismus anpassungsfähig ist. Während in der Alarmphase Mydriasis, Retraktion der Lider, Fernakkommodation und Konvergenzschwäche Vorrang haben, zeigen sich in der Erschöpfungsphase vorwiegend Miosis und Nahakkommodation.
Trotz der veränderten Lebensbedürfnisse und der mangelhaften Adaptation des menschlichen Körpers an die sich ständig ändernden Umweltverhältnisse, greift das Stressmodel am Auge weiterhin.
Das Sinnesorgan passt sich in der Stressphase an durch:

- Fernakkommodation, um den potentiellen Feind möglichst früh zu erfassen

- Einstellung der Fernsinnesorgane auf eine maximale Empfindlichkeit durch Sollwertverstellung in den Regelkreisen der Pupillen-Lichtreaktion und den photochemischen bzw. den neuroregulatorischen Lichtadaptationen der Netzhaut

- der besseren Entfernungsschätzung und der Festlegung der absoluten Größe des gesichteten Objekts [43].

Die axiale Länge des Auges variiert mit zunehmendem Alter.
Kurzsichtigkeit zeigt sich selten von Geburt an. Die meisten Neugeborenen haben weitsichtige Augen mit einer Bulbuslänge von 18 mm. In den folgenden drei Jahren

wächst das Auge des Kindes auf eine Länge von ca. 22,5 mm, um dann bei einem 13-jährigen Kind ca. 24 mm zu erreichen. Diese normale Entwicklung führt letztendlich im Idealfall zu einem emmetropen Auge. Störungen dieser Entwicklung führen zum Krankheitsbild Myopie [10].

Zu den wichtigsten krankheitsbestimmenden Faktoren der Kurzsichtigkeit zählen neben der Erbanlage die Umwelteinflüsse, hier insbesondere die zunehmende tägliche Naharbeit [10,44,47,42].

Bereits Kepler (1611), Ware (1813) und Donders (1884) stellten den Zusammenhang zwischen der Kurzsichtigkeit und Naharbeit dar. In zahlreichen Studien wurde belegt, dass Kinder während ihrer Unterrichtszeit („Arbeitszeit“) eine ausgeprägtere Myopie entwickeln, als Kinder in den Schulferien. Als Beispiel zeigte die Studie von Goss und Rainey (1998) an der School of Optometry der Indiana University (USA), dass sich in der Schulzeit die Myopie um -0,79 dpt, in den Ferien hingegen nur um -0,39 dpt verstärkt [48].

Als wichtigste Ursache für die Kurzsichtigkeit gilt bis heute die Naharbeit, die im Laufe der kulturellen Entwicklung stetig zunimmt. Nicht nur im Beruf, sondern auch in der Freizeit werden die Augen maximal zur Arbeit in der Nähe gebraucht, sei es durch Lesen von Literatur, durch Computergebrauch, Videospiele, etc. [10,7].
Während das gesunde emmetrope Auge von Natur aus einen Zustand zwischen völlig entspannter und maximal angespannter Akkommodation anstrebt, ist noch unklar, ob Myopie, wie früher angenommen, dadurch entsteht, dass das Auge zu wenig akkommodiert ist. Oder aber, ob Kurzsichtigkeit wie nach neuen Annahmen aus zu starker Akkommodation resultiert. Es wird immer noch untersucht, ob die „Unterakkommodation, die mit der Schärfenebene hinter der Netzhaut liegt, das Längenwachstum des Auges stimulieren kann, wie dies vom Tiermodell beim Vorsetzen von Negativlinsen nahe gelegt wird“ [40] , S.1. [26].
Ausserdem wurde in einigen Studien auch ein klarer Zusammenhang mit der Entwicklung von Myopie in Zusammenhang mit Risikofaktoren wie Frühgeburt und niedriges Geburtsgewicht gefunden [39,46].

Refraktionsanomalien sind in unserer Gesellschaft sehr häufige Krankheitsbilder und ihre Behandlung ist mit hohen Kosten verbunden.
Mit großem Interesse wird seit vielen Jahren nach Risikofaktoren geforscht, in der Hoffnung die Refraktionsfehlbildungen durch Faktoreliminierung verhindern bzw. stoppen zu können.
Im Laufe der Jahre zeigte sich eine Mehrzahl an Faktoren verantwortlich für Myopieentwicklung bzw. Myopieprogression. Zu diesen zählen neben demographischen und genetischen Faktoren, ebenfalls extrinsische Ursachen, wie intensives Arbeiten in der Nähe, beispielsweise Computerarbeit oder vermehrtes Lernen [34,33].
Darüber hinaus kann es im Laufe eines Lebens durch andere Erkrankungen wie Diabetes mellitus zu Visusveränderungen kommen, trotz gleich bleibender Refraktion [10].
Außerdem kann Myopie auch als Folge des regulären Alterungsprozesses auftreten durch Veränderungen in der Augenstruktur selbst.

Friedrich Trichtel beschäftigt sich in seinem Buch „Zur Entstehung und Therapie der Myopie“, mit beiden Formen der Myopie, der Myopia simplex und der Myopia complicata. Er beruft sich auf die Tatsache, dass beide Myopieformen trotz unterschiedlicher Pathomorphologie das Auge dazu bringen, auf Licht nicht korrekt zu reagieren, und dass die Augen bei beiden Formen einer überhöhten Strahlenbelastung speziell durch Naharbeit in der Schule oder im Beruf ausgesetzt sind. Der Autor berichtet über verschiedene Stadien der Myopie im Laufe eines menschlichen Lebens.
Während es in der Zeit vor der Pubertät mit gehäufter Schulmyopie hormonell bedingte Bindegewebsschwächen gibt, treten nach dem Epiphysenfugenschluss und der Festigung des Bindegewebes, die Komplikationen einer Myopia complicata in den Vordergrund. Die pathologischen Veränderungen, die den Visus herabsetzen, stellen laut Trichtel normale Abnutzungserscheinungen mit fortschreitendem Alter dar.
Außerdem beschriebt der Autor einige Ursachen, die zur Dehnung der Sklera am hinteren Augenpol führen, und somit die Ausbildung einer Achsenmyopie bei Myopia simplex begünstigen.

Bei diesen Ursachen handelt es sich um:

- eine allgemeine Bindegewebsschwäche durch Disposition in der Jugend, wie auch Hyperkortisolämie und Hyperthermie aufgrund von Stress
- eine lokale Stoffwechselbelastung der Sklera am Ort mit der stärksten Licht- und Wärmeeinwirkung am hinteren Augenpol
- eine Erhöhung des Augeninnendrucks durch funktionelle Veränderungen in der Pupillenweite, durch Hyperkortisolämie und durch Hyperthermie

Neben den Ursachen von Myopia simplex, beschäftigt sich Trichtel ebenfalls mit den Ursachen der Myopia complicata die zu weiteren degenerativen Veränderungen führt. Die Fundusveränderungen betreffen hier chorioretinale Strukturen im Zentrum und in der Peripherie. Ferner bleibt die Pupille weit, die akkommodativen Einrichtungen und der Kammerwinkel degenerieren, die retinalen und chorioidalen Gefäßlumina sind verengt, was letztendlich zur Herabsetzung der Augendurchblutung führt.

Trichtel beschreibt ferner, dass das Auge eines myopen Menschen, das ständig stark lichtbelastet wird und bei dem es durch schlechte Wärmeleitfähigkeit hohe Energiekonzentrationen innerhalb des Glasraums gibt, Wärmestauungen entwickelt. Diese führen im Laufe der Zeit zu einer Ausflockung von löslichen Proteinen, die Glaskörpertrübungen, Glaskörperdestruktionen, Abnahme des Glaskörpervolumens, und als Folge Glaskörperabhebungen und Ablatio retinae verursachen können.
Außerdem entwickeln myope Augen früher als nicht betroffene Augen, und zwar zwischen dem 40.-und 50. Lebensjahr, Linsentrübungen, bruneszierenden Katarakt mit Erhöhung des Brechungsindex [43].

Das endgültige Refraktionsstadium eines Auges wird neben der dioptrischen Stärke, durch biometrische Komponenten bestimmt wie axiale Bulbuslänge, Linsendicke, Tiefe der vorderen Kammer, Glaskörpertiefe und die Hornhautkrümmung [21].
Leslie Hyman erklärt anhand von zwei Studien, dem Tanjong Pagar Survey, und der Los Angeles Latino Eye Studie, dass die axiale Länge des Auges in Verbindung mit Refraktionsanomalienentwicklungen bei Erwachsenen steht
Beide Studien sammelten Ergebnisse von biometrischen Messungen, und ergaben, dass sowohl axiale Länge, als auch die Glaskörpertiefe mit Refraktionsfehlern bis zum 80. Lebensjahr in Verbindung stehen.

Dieselben Studien ergaben ebenfalls, dass es einen „Myopic-Shift“ nach dem 50. bis 60. Lebensjahr gibt [21].
Neben dem Alterungsprozess, scheint die Kurzsichtigkeit auch mit Augenerkrankungen, wie Katarakt, myopischer Retinopathie, myopischer Makulopathie, und Glaukom assoziiert zu sein [21,42].
Da optische Korrekturen einschließlich refraktärer Chirurgie nicht die Augenlänge verändern können, verbleiben die betroffenen Personen mit dem Risiko behaftet, eine weitere Progression ihrer Myopie und deren Folgen zu entwickeln [21].
Obwohl viele Ophthalmologen übereinstimmten, dass es keine relevante Beziehung zwischen Akkommodationsverzögerung und Myopieprogression als dessen Folge gibt, wurde in vielen Studien die Annahme aufgestellt, dass eine Behandlung der schwächenden Akkommodation bei bereits myopen Kindern die Progression der Kurzsichtigkeit verlangsamt.

Man versucht mögliche Ursachen auszuschalten, um ein Fortschreiten der Myopie zu verhindern.
Da viele Studien das Arbeiten auf kurze Entfernung als hauptverantwortlich für eine solche Progression nennen, gilt die Lebensmodifikation als eine mögliche Therapieoption. Man möchte mehr Draußen-Aktivitäten empfehlen, um die ständige Akkommodation im Alltag zu unterbrechen [34,33,23].

Beide Augen verhalten sich in der vorliegenden Studie beinahe identisch.
Dies lässt sich einerseits dadurch erklären, dass beide Augen genetisch gleich determiniert und gleich alt sind. Außerdem sind ebenfalls beide Augen zusammen den gleichen Einflüssen ausgesetzt. Bei diesen Einflüssen handelt es sich zum Beispiel um Arbeit im Nahbereich, um gleiche Beleuchtung, gleiche Umweltbelastung, denn es arbeitet nicht jedes Auge für sich, sondern beide erzeugen zusammen das binokulare Sehen. Dadurch verhalten sie sich in ihrer Entwicklung annähernd gleich.

4.4. Presbyopie als der ausgleichende Faktor

Es stellt sich die Frage, warum die Presbyopie im Verlauf der Jahre eine ausgleichende Wirkung auf die Myopie hat.
Es ist bekannt, dass sich mit zunehmendem Alter eine Presbyopie oder Alterssichtigkeit entwickelt, bei der das Auge mit den Jahren an Akkommodationskraft verliert. Die Akkommodation ist am effektivsten im Alter von etwa 4 Monaten.
Die Presbyopie beginnt bereits um das 10. Lebensjahr, und schreitet stetig fort, um in der vierten Lebensdekade funktionell relevant zu werden.
Ab dem 40. Lebensjahr wird verstärkt eine Presbyopie diagnostiziert [6].

Die Abnahme der Akkommodationsbreite beginnt bereits im Alter von 10-12 Jahren, und endet mit einem fast vollständigem Akkommodationsfähigkeitsverlust mit 50-55 Jahren [2] (Abb. 22).
Während Kinder noch eine Akkommodationsamplitude von 15 dpt aufweisen, beträgt diese bei Jugendlichen noch ca. 10 dpt. Im Alter von 35 Jahren sind bereits zwei Drittel der ursprünglichen Akkommodationsfähigkeit verloren gegangen, und um das 60. Lebensjahr ist diese Fähigkeit zum Erliegen gekommen [2].
Klinisch manifestiert sich der Akommodationsverlust ab dem 40. Lebensjahr. Zu dem Zeitpunkt besteht eine Akommodationsbreite von 4 dpt, was einen Nahpunkt von 25 cm entspricht.

Zwei Theorien zur Ursache der Presbyopie stehen im Konflikt. Die extralentikuläre Theorie von Donders (1864), beruft sich auf Kontraktionsabnahme des Ziliarmuskels im Laufe der Jahre als Ursache der Presbyopie. Die konträre lentikuläre Theorie von Helmholtz (1855) beschreibt als Ursache für die Alterssichtigkeit die Linse, die im Laufe der Jahre ihre Fähigkeit zur Verformung verliert [14].

Es wird angenommen, dass beide Theorien, sowohl altersbedingte Veränderungen des Ziliarkörpers, als auch der Linse in der Presbyopieentstehung eine Rolle spielen. Akkomodation und Presbyopie scheinen eine multifaktorielle Ätiologie zu haben, die für die weitere Forschung im Mittelpunkt stehen. Diese Forschung ist notwendig, da

fast 100% der Bevölkerung nach dem 50. Lebensjahr unter Presbyopie leiden, aber bisher keine effiziente Therapie dagegen existiert.

Es gibt zahlreiche Veränderungen des menschlichen Körpers, die im Laufe des Alterungsprozesses eine Presbyopie auslösen können, was zu einigen weiteren Theorien zur Presbyopieentstehung führt. Darunter findet sich als mögliche Ursache die Verhärtung der Linse mit den Jahren, oder aber auch geometrische Komponenten, wie beispielsweise mit den Jahren zunehmende Linsendicke, und Linsendurchmesser, oder extralentikuläre Faktoren, wie veränderter Winkel der Zonulafasern. Außerdem können ebenfalls Umweltfaktoren im Laufe der Jahre eine Auswirkung auf Presbyopieentstehung haben. Hier zu nennen wären städtische oder ländliche Umgebung, Ultraviolettstrahlung, chronischer Mangel essentieller Fettsäuren, Kontakt mit toxischen Komponenten, wie Haarfärbemittel [2,25,24].
Zusammenfassend kann man im Laufe des Alterungsprozesses beobachten, dass die Linse während des gesamten Lebens wächst, die vordere Segmentlänge (von Kornea bis zur hinteren Linsenoberfläche) mit den Jahren konstant bleibt, und auch dass mit Dickenzunahme der Linse die vordere Kammertiefe sinkt. Diese Veränderungen wurden in mehreren Studien durch MRT-Untersuchungen an in vivo menschlichen Augen festgestellt [2].

Weitere Beobachtungen während des menschlichen Alterungsprozesses wurden an der Universität von Zürich festgehalten. In der Studie „The Basel longitudinal study on aging (1955-1978). Ophthalmo-gerontological research results.“ konnte man feststellen, dass beispielsweise der menschliche Schädel keinen Wachstumsstillstand erreicht, die Entfernung zwischen beiden Pupillen kann mit 17 Jahren vollendet sein, aber kann auch bis zum 30. Lebensjahr wachsen. Die Kornea wächst bis zum 6. Lebensjahr, und bleibt dann konstant. Um das 20. Lebensjahr kommt es zum Beginn von degenerativen Veränderungen der Konjunktiva, die um das 60. Lebensjahr ihren Höhepunkt erreichen [4].

In der Studie „Physiological effects of ageing“ beschäftigt sich der Autor Helps mit dem Alterungsprozess. Zum Vergleich erreicht ein Mensch mit ca. 10 Jahren seinen Hörhöhepunkt, die Muskelkraft erreicht ihr Maximum mit 25 Jahren, während die

Presbyopie bereits nach der Geburt stetig fortschreitet, mit individuellen Unterschieden [19].
Fisher erforschte in seiner Studie „The force of contraction of the human ciliary muscle during accommodation.“ die Veränderungen in der Kontraktionskraft des Ziliarmuskels, und den daraus resultierenden Einfluss auf die Akkommodation im Laufe der Jahre, was eine dioptrische Veränderung des menschlichen Auges nach sich zieht. Das Ergebnis zeigte, dass nach dem 30. Lebensjahr die Kontraktionskraft des Ziliarmuskels eine maximale Akkommodation erzeugt, die bis zum 50. Lebensjahr steigt, um dann später langsam wieder abzufallen. Das bedeutet, dass der Ziliarmuskel mit 50 Jahren um 50% stärker ist als in der Jugend [13].

Obwohl kurz vor klinisch manifestiertem Eintritt der Presbyopie die Kontraktionskraft des Ziliarmuskels ihr Maximum erreicht, was als Folge einer Muskelhypertrophie erklärt wird, hat dies wenig Einfluss auf den Presbyopiefortschritt, da der Kontraktionsanstieg keinen proportionalen Akkommodationsanstieg erzeugt [13].
Eine denkbare Erklärung wäre, dass die Rigidität der Linse kontinuierlich zunimmt, und der Ziliarmuskel dies durch verstärkte Kontraktion solange ausgleicht, bis die Linse zu rigide ist.

R.F. Fisher beschriebt ebenfalls in der Studie „Presbyopia and the changes with age in the human crystalline lens“, dass der Akkommodationsabfall im Laufe der Jahre aus Linsenveränderungen resultiert. Bei diesen Veränderungen handelt es sich um Elastizitätsabfall der Kapsel, Elastizitätsanstieg der Linsensubstanz, und Linsenabflachung.
Die Abflachung der Linse führt zu einer Dioptrienverminderung.
Dieser Akkommodationsabfall hat im Laufe der Jahre einen Presbyopieansteig zur Folge [12].

4.5. Therapieoptionen

Um der Myopie entgegenzuwirken, gibt es konservative und chirurgische Behandlungskonzepte.
Laut Trichtel sollte sich die Therapie der Myopie in erster Linie prophylaktischen Ansätzen widmen. Damit meint er, Kurzsichtigkeit verursachende Stressoren sollten identifiziert und ausgeschaltet werden. Darüber hinaus schlägt er eine „Lichtdiät“ vor, da die myopen Augen stärker lichtbelastet seien.
Schließlich bezieht sich Trichtel auch auf eine pharmazeutische Therapie, durch Pilocarpin, das die Pupillen in einen Miosiszustand bringt, und Timolol, einem Betablocker, der den Augendruck senkt, ohne Einfluß auf die Pupillenweite zu nehmen.
Zuletzt empfiehlt der Autor Ergänzungstherapien mit Vitaminen zur Festigung des alterierenden Bindegewebes. Als besonders wirksam werden die Vitamine A, B_2, B_6, C, D und E dargestellt [43].

Heutzutage gibt es neben der konservativen Therapie, einige chirurgische Therapieoptionen für die Behandlung von Refraktionsanomalien.

Die refraktive Hornhautchirurgie stellt eine operative Möglichkeit dar, Refraktionsanomalien als Erkrankung zu verbessern bzw. zu beheben.
Am häufigsten werden weltweit die Verfahren LASIK (laserassistierte in situ Keratomileusis), LASEK (laserassistierte subepitheliale Keratomileusis), aber auch die PRK (photorefraktive Keratektomie) eingesetzt. Bei allen Verfahren wird der Excimer-Laser verwendet. Um bei einem Patienten überhaupt ein operatives Verfahren zur Sichtverbesserung wählen zu können, müssen die Ausschlusskriterien geprüft, und okuläre Voraussetzungen überprüft werden.

In Deutschland werden jährlich über 130.000 LASIK-Operationen zur Myopiekorrektur durchgeführt. Als das optimale Alter für die refraktive Chirurgie wird bisher das 30. Lebensjahr empfohlen.

Die U.S. Air Force genehmigte aufgrund der guten Operationsergebnisse, der hohen Erfolgsrate, der stabilen Erfolge und der hohen Sicherheit die photorefraktive Keratektomie (PRK) für Piloten im Jahre 2000.

Da bei Piloten der Bundeswehr zwischen der Einstellung mit 18 und dem Ausscheiden aus dem Flugdienst mit 35 Jahren eine optimale Sehkraft vorausgesetzt wird, wäre es zu diskutieren, ob es sinnvoll ist , die refraktive Chirurgie zum Myopieausgleich bereits vor dem 30. Lebensjahr Jahre einzusetzen.
Aktuell bestehen Schwierigkeiten, genügend Bewerber mit Emmetropie oder nur geringen Refraktionsfehlern zu rekrutieren ohne die Grenze für die tolerierten Refraktionsfehler zu hoch anzusetzen. Könnte man durch frühen Einsatz der refraktiven Chirurgie die Anzahl der angehenden normalsichtigen Piloten steigern ohne die Toleranzgrenzen für die Myopie hochzusezten?

Auch könnten Bewerber auf die Idee kommen, sich vor Ihrer Bewerbung, also mit 18 bis 20 Jahren, einer refraktiven Chirurgie zu unterziehen, um Ihre Bewerbungschancen zu verbessern.

Es ergeben sich im fliegerischen Dienst besondere Herausforderungen für konservative Korrekturmethoden der Sehkraft. Beispielsweise ist die Einsatzfähigkeit durch das Tragen von Kontaktlinsen eingeschränkt, wenn die Piloten im Auslandeinsatz in Länden wie z. B. Afghanistan dienen, und dabei starker Staubbelastung ausgesetzt sind. Die Sicht wäre hierbei eingeschränkt. Das Beschlagen der Brille beim Schwitzen und in der Kälte schränkt die Sicht ein. Somit wäre unter diesen Aspekten eine frühere operative Myopiekorrektur vorteilhaft, um Störfaktoren zu eliminieren.

Die Erkenntnisse der vorliegenden Studie ergeben, dass die Probanden im Mittel bis zum 32. Lebensjahr einem optischen Veränderungsprozess unterliegen, der die Myopie bis zu diesem Zeitpunkt fortlaufend stärker werden lässt. Erst ab diesem Zeitpunkt sistiert dieser Prozess, um durch die fortschreitende Entwicklung der Presbyopie korrigiert zu werden.

Sollte ein Myoper erwägen, sich mit 20 Jahren lasern zu lassen, so müsste er nach unserer Studie die im Mittel bis zum 32. Lebensjahr zusätzlich dazu kommenden -0,4 dpt als Veränderung mit ausgleichen, oder mit der Laserchirurgie Refraktionsfehler erst ab dem 32. Lebensjahr beheben. Wie sich jedoch die Refraktion an einem Auge entwickelt, welches mit 20 Jahren gelasert wurde lässt sich ohne entsprechende Studien nicht voraussagen.

Was das optimale Alter für eine chirurgische Intervention zur Myopiekorrektur bezüglich des fliegerischen Dienstes darstellt, müsste noch erforscht werden. Es sind noch kaum Langzeitergebnisse und Langzeitkomplikationen der refraktiven Chirurgie in frühen Lebensjahren vor dem 30. Geburtstag bekannt. Welchen Einfluss hätte eine frühere refraktive Chirurgie auf Langzeitentwicklung der Myopie? Wie groß wäre ggf. die Gefahr einer wiederholten Laser-Operation?

Ferner muss der ethische Aspekt diskutiert werden, ob man einem Pilotenanwärter einen invasiven medizinischen Eingriff, der potentiell das Augenlicht gefährden kann, anraten darf, um ihm eine Karriere als Pilot ermöglichen zu können. Es handelt sich ja um einen Eingriff in ein gesundes Auge, welches lediglich einen Refraktionsfehler aufweist.
Es gibt noch keine Langzeituntersuchungen der Augentüchtigkeit nach einer Lasertherapie, wie beispielsweise die Funktionsfähigkeit eines voroperierten Auges bis ins hohe Lebensalter von 80 Jahren oder mehr.

Als weitere Argumente gegen eine refraktive Chirurgie bei Piloten ist anzuführen, dass es durch die Operation zu einer Einschränkung des Dämmerungs- und Nachtsehens, weiterhin zu Glanzeffekten und Halobildung kommen kann. Außerdem treten insbesondere beim Fliegen von Jets hohe Beschleunigungskräfte, Luftdruckschwankungen und starke Blutdruckschwankungen auf. Es wird versucht dem Blutdruckabfall durch eine sog. Pressatmung entgegenzuwirken. Dies kann zu einer Erhöhung der intraokularen Drucks führen. Durch die refraktive Chirurgie wird die Hornhaut geschwächt und es besteht ein erhöhtes Risiko eine Keratektasie zu entwickeln, insbesondere bei erhöhtem Augeninnendruck.

Somit ist vom theoretischen Standpunkt her einem Piloten von einer refraktiven Chirurgie abzuraten, zu mal die Langzeitverläufe nicht bekannt sind.

Idealerweise sollten Piloten bei Ihrer Einstellung eine geringe Hyperopie (+0,4 dpt) aufweisen, damit während ihres Flugdienstes keine Myopie auftritt.

Für Nicht-Piloten besteht seitens der Ophthalmologen, die refraktive Chirurgie durchführen, die Empfehlung, erst ab dem 30. Lebensjahr zu operieren, da dann das Maximum der Myopie erreicht sei. Diese Aussage wird durch unsere Arbeit weitestgehend gestützt, sollte jedoch um zwei Jahre auf 32 Jahre korrigiert werden.

5 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde die natürliche Entwicklung der subjektiven und der objektiven Refraktion im Erwachsenenalter unter besonderer Beachtung der Myopie untersucht. Die Probanden waren Bundeswehrpiloten, die ein gesundes, nahezu normalsichtiges (-0,75 bis +0,75 dpt) Patientenkollektiv darstellten.
Das Probandengut bestand aus 12351 Probanden, die im Zeitraum von 1967 bis 2006 beobachtet wurden.
Die gesammelten Daten wurden in eine Exceldatei überführt, um danach mit dem Programm „R“ statistisch bearbeitet zu werden.
Es ergaben sich Kurven für die subjektive und die objektive Refraktion mit der natürlichen Entwicklung der Myopie im Laufe der Jahre.

In unserer Studie fanden wir, dass Normalsichtige natürlicherweise bis zum 32. Lebensjahr eine Myopie von im Mittel maximal -0,4 dpt entwickeln, gemessen mit Hilfe der subjektiven Refraktion. Bis zum 45. Lebensjahr ist die Myopie vollständig rückläufig, danach treten positive Refraktionen auf . Diese erreichen am Ende der sechsten Lebensdekade ihr Maximum von +0,3 dpt.

Die Entwicklung ab dem 32 Lebensjahr ist wahrscheinlich auf die fortschreitende Presbyopie zurückzuführen.

In der Literatur zeigten sich ähnliche Myopieverläufe, allerdings ist in unserer Studie erstmalig die Myopie bei einer so großen Probandenzahl über einen so langen Zeitraum vom 18. Bis zum 60. Lebensjahr beobachtet worden. Hinsichtlich möglicher Auslöser der Myopie wurden auch Therapieoptionen erläutert, um dem Krankheitsverlauf entgegen zu wirken.

Nach diesen Untersuchungen könnte als mögliche Empfehlung ausgesprochen werden, Piloten einzustellen, die eine geringe Hyperopie (+0,4 dpt) aufweisen, damit während ihres Flugdienstes keine Myopie auftritt. Weiterhin kann empfohlen werden, eine refraktive Chirurgie erst ab dem 32. Lebensjahr durchzuführen, da dann das Maximum der Myopie erreicht ist.

Literaturverzeichnis

1. Augustin A, Collins J: Augenheilkunde. Springer, Berlin Heidelberg New York, S.1191 (2001)
2. Baumeister M, Kohnen T: Accommodation and presbyopia. Der Ophthalmologe 105: 605-608 (2008)
3. Binnewies J: Besondere Anweisung Generalarzt der Luftwaffe 707/5096. Anweisung für den Fliegerärztlichen Dienst in der Bundeswehr: 21-22, 77-78
4. Brückner R, Batschelet E, Hugenschmidt F: The Basel longitudinal study on aging (1955-1978). Documenta ophthalmologica 64: 235–310 (1986)
5. Zentrale Dienstvorschrift der Bundeswehr ZDv 46/1:

   Allgemeine Durchführungsbestimmungen zu der ärztlichen Untersuchung bei Musterung und Dienstantritt von Wehrpflichtigen, Annahme und Einstellung von Bewerberinnen und Bewerbern für den freiwilligen Dienst in den Streitkräften sowie bei der Entlassung von Soldatinnen und Soldaten Ziffer 22

   Zentrale Dienstvorschrift der Bundeswehr ZDv 46/6:

   Bestimmungen über die Wehrfliegerverwendungsfähigkeit Ziffer 337
6. Charman W: The eye in focus: accommodation and presbyopia. Journal of the Australian Optometrical Association 91: 207–225 (2008)
7. Ciuffreda K, Vasudevan B: Nearwork - induced transient myopia and permanent myopia - is there a link? Ophthalmic & physiological optics: the journal of the British College of Ophthalmic Opticians 28: 103 (2008)
8. Diamond S: Acquired myopia in airline pilots. The Journal of aviation medicine 28: 561-568 (1957)
9. Diamond S: Acquired myopia in airline pilots. The Journal of aviation medicine 28: 559-560 (1957)
10. Dunphy E: The biology of myopia. The New England journal of medicine 283: 796-798 (1970)
11. Faes G: Einführung in R. Books on Demand GmbH, Norderstedt, S.9 (2010)

12. Fisher R: Presbyopia and the changes with age in the human crystalline lens. The Journal of physiology 228: 775–776 (1973)

13. Fisher R: The force of contraction of the human ciliary muscle during accommodation. The Journal of physiology 270: 51-71 (1977)

14. Fisher R: The mechanics of accommodation in relation to presbyopia. Eye 2: 646-649 (1988)

15. Froom P, Biger Y, Erel J, Davidson B, Shochat I: The incidence of myopia in the Israel Air Force rated population: a 10-year prospective study. Aviation, space, and environmental medicine 63: 299 (1992)

16. Garcia G: Handbook of refraction. Little, Brown and Company, Boston, S.29-30 (1989)

17. Grosvenor T: Why is there an epidemic of myopia? Clinical & experimental optometry: journal of the Australian Optometrical Association 86: 273-274 (2003)

18. Gwiazda J: Treatment options for myopia. Optometry and vision science : official publication of the American Academy of Optometry 86: 624-626 (2009)

19. Helps E: Physiological effects of ageing. Proceedings of the Royal Society of Medicine 66: 816 (1973)

20. Holden B: The myopia epidemic: is there a role for corneal refractive therapy? Eye & contact lens 30: 244 (2004)

21. Hyman L: Myopic and hyperopic refractive error in adults: an overview. Ophthalmic epidemiology 14: 192-195 (2007)

22. Hysi P, Young T, Mackey D, Andrew T, Fernández-Medarde A, Solouki A: A genome-wide association study for myopia and refractive error identifies a susceptibility locus at 15q25. Nature genetics 42: 902–905 (2010)

23. Jacobsen N, Jensen H, Goldschmidt E: Does the level of physical activity in university students influence development and progression of myopia? Investigative ophthalmology & visual science 49: 1322, 1325 (2008)

24. Jain I, Ram J, Gupta A: Early onset of presbyopia. American journal of

optometry and physiological optics 59: 1002–1004 (1982)

25. Kasthurirangan, S: Age related changes in accommodative dynamics in humans. Vision research 46: 1507-1519 (2005)
26. Lachenmayr B: Auge - Brille - Refraktion. Enke, Stuttgart, S.12-19, S.7-52 (1996)
27. Lachenmayr B: Pitfalls in the determination of distance glasses. Der Ophthalmologe 108: 318–323 (2011)
28. Lang, G: Augenheilkunde. Thieme, Stuttgart Berlin Erlangen, S.423-435 (2008)
29. Liang J: Aberrations and retinal image quality of the normal human eye. Optical Society of America 14: 2873-2883 (1997)
30. Liang J, Williams D, Miller D: Supernormal vision and high-resolution retinal imaging through adaptive optics. Journal of the Optical Society of America 14: 2884–2892 (1997)
31. Mrochen M, Iseli H, Kaemmerer M, Mierdel P, Krinke H, Seiler T: Relevance of Wavefront Aberrations of the Human Eye in Corneal Laser Surgery. Medical Laser Application 19: 126-135 (2004)
32. Ng B: Medical selection of military pilots: a Republic of Singapore Air Force perspective. Annals of the Academy of Medicine Singapore 23: 665 (1994)
33. Ostrow G, Kirkeby L: Update on myopia and myopic progression in children. International ophthalmology clinics 50: 87-89 (2010)
34. Ostrow G, Kirkeby L: Update on myopia and myopic progression in children. International ophthalmology clinics 50: 92 (2010)
35. OTA Dr. Pongratz: Kompendium der Flugmedizin. Generalarzt der Luftwaffe Flugmedizinisches Institut der Luftwaffe 8: 125-134 (2002)
36. Park D, Congdon N: Evidence for an "epidemic" of myopia. Annals of the Academy of Medicine Singapore 33: 21 (2004)
37. Pechmann A, Czepita D: Epidemiology of myopia. Klinika oczna 102: 297 (2000)

38. Rohrbach J: Ophthalmologische Traumatologie. Schattauer, Stuttgart, S.119 (2002)

39. Saw S, Katz J, Schein O, Chew S, Chan T: Epidemiology of myopia. Epidemiologic reviews 18: 177-178 (1996)

40. Schaeffel F: Das Rätsel der Myopie. Der Ophthalmologe 99: 120 (2002)

41. Schreck E: Differentialdiagnose in der Ophthalmologie. Enke, Stuttgart, S.267-269 (2002)

42. Tang W, Yap M, Shea P, Yip H: A review of current approaches to identifying human genes involved in myopia. Clinical & experimental optometry: journal of the Australian Optometrical Association 91: 4-5 (2008)

43. Trichtel F: Zur Entstehung und Therapie der Myopie. Enke, Stuttgart, S.1-8, S.47-83 (1986)

44. Vitale S, Sperduto R, Ferris F: Increased prevalence of myopia in the United States between 1971-1972 and 1999-2004. Archives of ophthalmology 127: 1632-1633 (2009)

45. Walline J, Jones L, Sinnott L: Corneal reshaping and myopia progression. The British journal of ophthalmology 93: 1181-1185 (2009)

46. Whitmore W: Congenital and developmental myopia. Eye 6: 362-363 (1992)

47. Wojciechowski R: Nature and nurture: the complex genetics of myopia and refractive error. Clinical genetics 79: 301-314 (2011)

48. http://www.optiker-webseite.de/Lexikon/Myopie.asp (24.11.2014)

49. http://www.gyrocopter-hamburg.de/index.php/luftraum.html (24.11.2014)

50. http://www.aerosecure.de/lexikon/vfr-sichtflug.php (24.11.2014)

51. http://www.pro-retina.de/glossar?buchstabe=Z (24.11.2014)

Anhang

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung des Brechungsgesetzes. Descartes` Veranschaulichung von Keplers Theorie des Netzhautbildes
(aus Diotrik, 1937)

Abbildung 2: Rodenstock Cx1000/RX 900, zur Messung der objektiven Refraktion

Abbildung 3: Möller-Wedel-Phoropter Visutron 900+, zur Messung der subjektiven Refraktion, rechts oben Sehzeichenprojektor M3000

Abbildung 4: Bedienpult zur Steuerung des Phoropters

Abbildung 5: Kreuzzylinder zum Feinabgleich bei Refraktionsbestimmung

Abbildung 6: Messung der objektiven Refraktion mittels Skiaskopie

Abbildung 7: Manuelles Brillenausmessen mittels eines älteren Scheitelbrechwertmessers

Abbildung 8: Automatisiertes Brillenausmessen mittels Zeiss Humphrey 350 Scheitelbrechtwertmesser

Abb. 9: subjektive Refraktion (Sphäre) rechts in Abhängigkeit vom Lebensalter der Probanden. Die Fehlerbalken beschreiben das 95% Konfidenzintervall.
Die vertikale Achse repräsentiert die Dioptrieanzahl (Dpt) von -0.4- 0.4, die horizontale Achse das Lebens¬alter in Jahren von 15-60. Lebensjahr.

Abb. 10: objektive Refraktion (Sphäre) rechts in Abhängigkeit vom Lebensalter der Probanden.
Die Fehlerbalken beschreiben das 95% Konfidenzintervall.

Die vertikale Achse repräsentiert die Dioptrieanzahl (Dpt) von -0.4- 0.4, die horizontale Achse das Lebens¬alter in Jahren von 15-60. Lebensjahr.

Abb. 11: subjektive Refraktion (Sphäre) links in Abhängigkeit vom Lebensalter der Probanden. . Die Fehlerbalken beschreiben das 95% Konfidenzintervall. Die vertikale Achse repräsentiert die Dioptrieanzahl (Dpt) von -0.4- 0.4, die horizontale Achse das Lebens¬alter in Jahren von 15-60. Lebensjahr.

Abb. 12: objektive Refraktion (Sphäre) links in Abhängigkeit vom Lebensalter der Probanden.
Die Fehlerbalken beschreiben das 95% Konfidenzintervall.
Die vertikale Achse repräsentiert die Dioptrieanzahl (Dpt) von -0.4- 0.4, die horizontale Achse das Lebens¬alter in Jahren von 15-60. Lebensjahr.

Abb. 13: Sphäre links/rechts, subjektiv/objektiv als optischer Parameter aufgetragen gegen das Lebensalter der Probanden. Die vertikale Achse repräsentiert die Dioptrieanzahl (Dpt) von -0.4- 0.4, die horizontale Achse das Lebensalter in Jahren von 15-60. Lebensjahr.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Mittlerer Zeitbedarf der Bundeswehrpiloten vom Erkennen des Hindernisses bei Luftraumbeobachtung bis zum Ausweichmanöver, angegeben in Sekunden [sec], betrachtet als Aktionszeit [Aktion] und Gesamtzeit [Total]
Kompendium der Flugmedizin, Herausgeber OTA Dr. Pongratz,
ISBN: 3-00-016306-9, Kapitel 8, 128

Tabelle 2: Ursprungstabelle der Probandendaten von Piloten untersucht im Flugmedizinischen Institut der Bundeswehr Fuerstenfeldbruck von 1967 bis 2006 in Exceldatei überführt;
Die Daten sind nach Untersuchungsakte mit jeweiliger Personenkennziffer,

Alter, Untersuchungsdatum, Differenztagen, Untersuchungsart und den jeweiligen Messwerten fuer Sehschaerfe, Refraktion, Sehleistung, Brille und Flugzeugtyp angegeben

Tabelle 3: Zwischenstufentabelle der Datenbearbeitung von Piloten untersucht im Flugmedizinischen Institut der Bundeswehr Fuerstenfeldbruck von 1967 bis 2006;
Die Daten sind nach Untersuchungsakte mit jeweiliger Personenkennziffer, Alter, Untersuchungsdatum, Differenztagen, Untersuchungsart und den jeweiligen Messwerten fuer Sehschaerfe, Refraktion, Sehleistung, Brille und Flugzeugtyp angegeben

Tabelle 4: Subjektive und objektive Refraktion(Sphäre) der jeweiligen Altersjahrgänge
von Piloten zwischen 18. und 60. Lebensjahr gemessen fuer rechtes und linkes Auge, angegeben mit arithmetischem Mittel, Standardabweichung und Anzahl der Probanden

Danksagung

Zum Schluss meiner Arbeit ist es mir ein besonderes Anliegen Herrn PD Dr. Weber und Herrn Oberstarzt Dr. Frischmuth zu danken für die Möglichkeit diese Arbeit am Flugmedizinischen Institut in Fürstenfeldbruck durchführen zu können. Die Betreuung und die Korrekturen, sowie das Besprechen des Themas trugen stark zum Gelingen meiner Doktorarbeit bei.

Mein ganz besonderer Dank gilt auch Herrn Dr. Stein, Oberarzt der Hautklinik Rosenhöhe in Bielefeld, für ergänzende Besprechung und Unterstützung beim Zustandekommen der vorliegenden Arbeit.

Mein großer Dank gilt außerdem meinen Eltern, die mich in allen Phasen meines Lebens liebevoll unterstützt haben.

Schließlich möchte ich mich bei Herrn Andrew Deeble, Herrn Christian Steinkohl und all denjenigen bedanken, die mich in dieser Zeit stets unterstützt haben.

Lebenslauf

Persönliche Angaben

Name	Aleksandra Kaddour
Geburtstag	16.04.1982
Geburtsort	Hindenburg, Polen
Staatsangehörigkeit	Deutsch
Religionszugehörigkeit	römisch-katholisch
Familienstand	ledig

Schulbildung

1989 – 1993	Grundschule Hindenburg
1993 – 1994	Grundschule Bamberg
1994 – 2000	Gymnasium Alexandrinum Coburg
2000 – 2003	Stiftlandgymnasium Tirschenreuth (Abitur)

Studium

2004 – 2010	Studium der Humanmedizin an der medizinischen Universität Ulm
03.12.2010	Approbation als Ärztin

Famulaturen

Bundeswehrkrankenhaus Ulm, Abteilung Dermatologie

Klinikum Saarbrücken, Abteilung Neurochirurgie

Klinikum Saarbrücken, Abteilung Anästhesie

Klinikum der medizinischen Universität Palermo, Abteilung Dermatologie

Internistische Praxis Dr.Kaddour, Kirchenlamitz

Praktisches Jahr

31.08.2009 – 25.1.2009	Inselspital Bern der Universität Bern/Schweiz, Abteilung Dermatologie
26.10.2009 – 20.12.2009	Royal Melbourne Hospital der University of Melbourne/Australien, Abteilung Dermatologie
21.12.2009 – 11.04.2010	Royal Perth Hospital der University of Western Australia Perth/Australien, Abteilung der Kardiothoraxchirurgie
12.04.2010 – 04.07.2010	Bundeswehrkrankenhaus Ulm, Abteilung Innere Medizin, Angiologie, Gastroenterologie

Festanstellung

01.05.2011 – 01.02.2012	Assistenzärztin in der Hautklinik am Johannes Wesling Klinikum Minden, zertifiziertes Haut-Tumor-Centrum Minden, Professor Dr. med. Stadler
12.02.1012 – 01.02.2013	Assistenzärztin in der Hautklinik Rosenhöhe/Bielefeld, Professor Dr. med. Effendy

Fortbildungen

18.05.2011	Dermatologenabend, Minden
01.07.2011	11. Jahressymposium der Berliner Stiftung, Berlin
23. – 25.09.2011	EORTC-CTCL-Meeting, Minden
29. – 30.09.2011	Derma Start Up, Kiel
19.11.2011	Derma-Onkoforum, Minden
25. – 27.11.2011	14. Tagung der Dermatologischen Wissenschafts- und Fortbildungsakademie,Köln

Besondere Kenntnisse

Deutsch (fließend in Wort und Schrift)

Polnisch (fließend in Wort und Schrift)

Englisch (fließend in Wort und Schrift)

Französisch (Grundkenntnisse)

Russisch (Grundkenntnisse)

Führerscheinklasse 3

Kirchenlamitz, den 26.04.2015,

Aleksandra Kaddour