

Aus der Augenklinik und Poliklinik  
der Universitätsmedizin der Johannes Gutenberg-Universität Mainz

„Analysemethode zur Untersuchung der Schießperformance von Soldaten am  
Beispiel der Nutzung moderner Nachtsichtgeräte mit unterschiedlichen  
Phosphorfarben“

Inauguraldissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades der  
Medizin  
der Universitätsmedizin  
der Johannes Gutenberg-Universität Mainz

Vorgelegt von

Sven Rommel  
aus Kassel

Mainz, 2020

Wissenschaftlicher Vorstand:

1. Gutachter:

2. Gutachter:

Tag der Promotion:

08. Dezember 2020

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>III</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>III</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Literaturdiskussion</b> .....	<b>3</b>
2.1 Lichtspektrum und Entwicklung der Nachtsichttechnik.....	3
2.1.1 Erste Entwicklungen: Bildwandlertechnik und Infrarotumwandlung.....	4
2.1.2 Bildverstärker (BIV) der 1. Generation.....	4
2.1.3 Bildverstärker der 2. Generation.....	5
2.1.4 Bildverstärker der 3. Generation.....	6
2.2 Aufbau und Funktion moderner Bildverstärkerröhren.....	7
2.3 Monokular, Biokular, Binokular.....	8
2.4 Physiologie, physikalische Grundlagen und Begriffserklärung.....	9
2.4.1 Nächtliche Lichtspektren und Lichtquellen.....	10
2.4.2 Physikalisch-photometrische Grundbegriffe.....	12
2.4.3 Sensitivität.....	13
2.4.4 Auflösung.....	14
2.4.5 Helligkeits-Verstärkung (Gain).....	14
2.4.6 Signal-Rausch-Verhältnis (Signal-to-Noise Ratio, SNR).....	15
2.4.7 Figure of Merit (FOM).....	15
2.5 Physiologie unter Nachtsichtbedingungen.....	16
2.6 Stereoptisches (stereoskopisches) Sehen.....	17
2.7 Vergleich zu 3D-Bild- und Kamertechnik.....	19
2.8 Bisherige Studien zur Anwenderperformance mit NVGs.....	20
<b>3 Material und Methoden</b> .....	<b>24</b>
3.1 Ortswahl und Versuchskollektiv.....	24
3.2 Einschlusskriterien.....	24
3.3 Versuchsaufbau und Ablauf.....	24
3.3.1 Phase 1: Augenärztliche Funktionsprüfung und Haltepunktermittlung.....	25
3.3.2 Phase 2: Nachtsichtparcours, Nachtsichtvisus, Selbsteinschätzung.....	30
3.4 Auswertungsmethodik.....	37
3.5 Statistische Analyse.....	38
<b>4 Ergebnisse</b> .....	<b>39</b>
4.1 Aussagen zum Versuchskollektiv.....	39
4.2 Visusergebnisse.....	40
4.3 Trefferaufnahme.....	41
4.4 Trefferrückmeldung.....	42

---

4.5	Trefferzentrierung.....	43
4.6	Unterschiede zwischen Durchgang 1 und 2.....	44
4.7	Durchlaufzeit .....	45
4.8	Subjektive Selbsteinschätzung.....	46
<b>5</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>50</b>
5.1	Präzision des Versuchskollektivs.....	50
5.2	Diskussion der Methodik.....	51
5.3	Vergleich der Performance unter Nutzung von grüner und weißer Phosphorfarbe .....	56
5.4	Subjektive Selbsteinschätzung.....	57
5.5	Vergleich von Tageslicht- und Nachtsichtbedingungen .....	61
5.6	Offene Fragen und Ausblick auf kommende Untersuchungen.....	64
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>66</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>68</b>
7.1	Internetquellen.....	70

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1</b> - Lage des sichtbaren Lichts innerhalb des elektromagnetischen Spektrums. ....	3
<b>Abbildung 2</b> - Schematische Darstellung einer Mikrokanalplatte.....	6
<b>Abbildung 3</b> - Vergleich des L3 Quad-Eye-NVG-Systems mit Standard-Nachtsichtgerät.....	9
<b>Abbildung 4</b> - Ablaufschema des Versuchs.....	25
<b>Abbildung 5</b> - Ishihara Farbtafel.....	26
<b>Abbildung 6</b> - Parcoursplan mit Stationsdurchlauf.....	27
<b>Abbildung 7</b> - Zielchart Tageslichtdurchlauf .....	27
<b>Abbildung 8</b> - Sicht des Schützen an der Startposition. ....	29
<b>Abbildung 9</b> - Zielchart Nachtsichtparcours mit Stationen.....	31
<b>Abbildung 10</b> - Sicht des Schützen bei Schießübung 1.....	32
<b>Abbildung 11</b> - Sicht des Schützen bei Schießübung 2.....	32
<b>Abbildung 12</b> - Sicht des Schützen bei Beginn von Schießübung 3.....	33
<b>Abbildung 13</b> - Sicht des Schützen bei Schießübung 4.....	34
<b>Abbildung 14</b> - ETDRS-Chart, rechts Hoffmann Engineering AVN20/20 .....	34
<b>Abbildung 15</b> - Trefferwertung .....	37
<b>Abbildung 16</b> - Treffergruppierung .....	37
<b>Abbildung 17</b> - Trefferzentrierung.....	38
<b>Abbildung 18</b> - Soldat mit L 3 Quad-Eye-NVG-System sowie Infrarot-Ziellaser.....	63

## Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 1</b> - Übersicht natürlicher Lichtquellen.....	11
<b>Tabelle 2</b> - Übersicht künstlicher Lichtquellen .....	12
<b>Tabelle/Diagramm 3</b> – Visusergebnisse.....	40
<b>Tabelle/Diagramm 4</b> – Trefferaufnahme.....	41
<b>Tabelle/Diagramm 5</b> – Treffergruppierung.....	42
<b>Tabelle/Diagramm 6</b> – Trefferzentrierung .....	43
<b>Tabelle/Diagramm 7</b> – Durchlaufzeit.....	45
<b>Tabelle/Diagramm 8</b> - Korrigierte Durchlaufzeit pro Schuss .....	46

# 1 Einleitung

In der Geschichte der Gefechtsführung waren neben den Konfigurationen der kontrahierenden Kräfte zwei Faktoren von maßgeblicher Bedeutung für strategische Entscheidungen: Räumliche und zeitliche Gegebenheiten der Konfliktaustragung [Flor 1990]. Während räumliche Gegebenheiten von Gefecht zu Gefecht wechselnd zu beurteilen waren, gab es bezüglich der zeitlichen Komponenten bis in die Zeit des zweiten Weltkrieges weitgehend einheitliche Bewertungsgrundlagen. Als Zeitraum für militärische Operationen, insbesondere Gefechtsführung wurden die Tagesstunden gewählt, um koordinierte Truppenkommunikation sowie -bewegung unter Tageslichtbedingungen gewährleisten zu können. Nachtoperationen sind zwar bereits aus den frühesten Gefechtsaufzeichnungen bekannt, hatten allerdings immer einen sekundären Charakter, da die fehlende Sehfähigkeit bei Dunkelheit eine deutliche Kampfkraftminderung der Truppen und Waffensysteme darstellte und diese somit stets ausgesprochen risikobehaftet waren [Pevoski 1991].

Die technische Entwicklung im Bereich der Nachtsichttechnik hat diese traditionelle Sichtweise in den Jahren seit dem Ende des 2. Weltkrieges zunehmend in Frage gestellt. Erfolgsberichte von nachtsichtgestützten Militäroperationen sowie die breitere Verfügbarkeit von moderner Nachtsichttechnik für Truppen, auch jenseits der Spezialeinheiten, haben die Beschränkungen des Kampftages auf die Tageslichtstunden weitestgehend aufgehoben [Pevoski 1991]. Die moderne Gefechtsführung sowie der in den letzten Jahren vermehrte operative Einsatz von Spezialeinheiten erfordert die Fähigkeit, auch und insbesondere im Schutz der Dunkelheit agieren zu können. Auch die Verlagerung der gewaltsamen Auseinandersetzungen in den terroristischen Bereich, macht es notwendig auch im Dunkeln handlungsfähig zu bleiben. Um diese Fähigkeit zu gewährleisten kommen Nachtsichtgeräte in verschiedenen technischen Ausführungen zum Einsatz. Die zentrale Technik der individuellen, tragbaren Version des Nachtsichtgeräts ist derzeit das Prinzip der Mikrokanal-Bildverstärkerröhre mit Phosphorschirm, welche je nach Hersteller und Bauweise in einfacher bis vierfacher Anordnung Verwendung findet. Diese Bildverstärkertechnik konnte seit Beginn der Ersteinführung in den 1960er Jahren entscheidend technisch verbessert werden, das Grundprinzip ist jedoch seitdem unverändert und basiert auf einer Restlichtverstärkung durch Photonenumwandlung mittels Fotokathode sowie anschließender Elektronenamplifizierung auf einen Phosphorschirm. Dies führt zu einem monochromatischen Bild, welches von der Farbe des verwendeten Phosphorschirms abhängig ist [Adomeit 2016, Jacks 2009].

Moderne Nachtsichtgeräte nutzen heute entweder grüne (P22 bzw. P43) oder weiße (P45) Phosphorschirme in ihren Bildverstärkerröhren (grüner bzw. weißer Phosphor) [Adomeit 2016, Photonis.com]. Hierdurch entsteht für den Anwender ein grün-schwarzes oder ein weiß-schwarzes

Kontrastbild. Die technischen Angaben zur Leistung der Bildverstärkerröhren ist entsprechend den Herstellerangaben weitestgehend identisch, wobei der weiße Phosphor als überlegen beworben wird [White 2016].

Die subjektiven Angaben zur individuellen Performance unter Nachtsichtbedingungen zeigen unter den Angehörigen des Kommandos Spezialkräfte (KSK) der Bundeswehr unter regelmäßiger Anwendung von Nachtsichttechnik ebenfalls eindeutige Präferenzen zu jeweils einer von beiden Phosphorfarben, mehrheitlich zu Weiß. Aus diesem Grund entstand die Frage aus den Reihen der Spezialkräfte hinsichtlich einer belegbaren Überlegenheit einer dieser beiden Phosphorfarben gegenüber der jeweils anderen.

Die Recherche der aktuellen Studienlage konnte diese Fragen nicht hinreichend beantworten. Das Fehlen neuerer Ergebnisse sowie die mehrheitlich statischen Versuchsansätze der bisherigen Studien konnten keine zufriedenstellende Antwort auf die überwiegend auf Bewegung ausgerichtete Nutzung der Nachtsichttechnik geben. Insbesondere im Hinblick auf die Verwendung für eine operative Einsatzmission, wie sie, im Gegensatz zur reinen statischen Beobachteraufgabe, im Einsatzspektrum der Spezialkräfte die Regel ist. Durch die Eigenschaft der Nachtsichtgeräte, ihre Performance schlecht aus technischen Angaben heraus erkennen zu können, musste ein Ansatz her, welcher die Performance unter zumindest annähernd realen Bedingungen der Einsatzverwendung der Geräte vergleichen kann. [Jacks 2009]

Es entstand in Kooperation mit dem KSK in Calw ein Studienansatz, dessen Auswertung Kern dieser Arbeit sein soll. Ziel sollte sein herauszufinden, ob Bildverstärker mit weißem Phosphor in Nachtsichtgeräten zu qualitativ besseren Nachtsichtbedingungen führen und somit die Beobachterleistung sowie Performance unter Nachtsichtbedingungen im Vergleich zur Verwendung von Bildverstärkern mit grünem Phosphor verbessern. Hierbei sollte bewusst ein aktiver Ansatz zur Performancemessung unter Nachtsicht gewählt werden, welcher die besonderen Aspekte der subjektiven Unterschiede zwischen den beiden Phosphorfarben aus den Erfahrungsberichten der Spezialkräfte ausreichend berücksichtigt. Dazu zählten insbesondere die verbesserte Orientierung im Raum, eine erhöhte zentrale Sehschärfe sowie deutlich geringere Ermüdungserscheinungen. Um ein Versuchsszenario nahe der realen Einsatzbedingung zu schaffen, musste ein scharfer Waffeneinsatz in den Rahmenbedingungen realisiert werden. Gleichzeitig konnten somit Rückschlüsse auf das tatsächliche Anwendungsfeld der Nachtsichttechnik unter Einsatzbedingungen geschlossen werden.

## 2 Literaturdiskussion

### 2.1 Lichtspektrum und Entwicklung der Nachtsichttechnik

Zum Verständnis der modernen Nachtsichttechnik ist ein kurzer Blick in die Geschichte ihrer Entwicklung notwendig. Im Folgenden soll ein Überblick über die Meilensteine der Entwicklung bis zum heutigen Stand der Technik gelingen.

Zum besseren Verständnis an dieser Stelle zunächst jedoch eine kleine Übersicht über das elektromagnetische Spektrum und das vom Menschen wahrnehmbare Licht:

Sichtbares Licht besteht aus elektromagnetischen Wellen mit Wellenlängen zwischen 380 nm und 780 nm. An diesen Bereich schließt sich mit niedrigeren Frequenzen die Ultraviolettstrahlung an (Wellenlängen von 380 nm bis 10 nm), der mit weiter sinkender Frequenz Röntgenstrahlen und Gammastrahlen folgen. Dem sichtbaren Licht mit steigenden Wellenlängen folgend, findet sich die Infrarotstrahlung mit Wellenlängen von 780 nm bis 1 mm. Weiter im Frequenzbereich abfallend (steigende Wellenlänge), folgen der Reihe nach Terahertzstrahlung, Mikrowellen, Radiowellen, sowie Niederfrequenzstrahlung. Der Frequenzbereich des sichtbaren Lichts innerhalb des elektromagnetischen Spektrums ist demnach nur ein sehr kleiner Anteil des gesamten Spektrums. Generell gilt, je höherfrequent die Strahlung, desto energiereicher ist sie und umgekehrt. Relevant für die folgenden Abschnitte sind der Bereich des sichtbaren Lichts, sowie die Bereiche Ultraviolett und Infrarot, welche mithilfe der Nachtsichttechnik ebenfalls sichtbar gemacht werden können.



[DIN 5031]

Wellenlänge: 10 nm      380nm      780nm      1mm

Unter den Wellenlängenangaben befindet sich eine horizontale Linie, die von links nach rechts verläuft und mit einem Pfeil endet.

**Abbildung 1** - Lage des sichtbaren Lichts innerhalb des elektromagnetischen Spektrums (hochfrequent/hochenergetisch links, niederfrequent/niederenergetisch rechts). Pfeillängen nicht maßstabsgerecht.

### 2.1.1 Erste Entwicklungen: Bildwandler-technik und Infrarotumwandlung

Die moderne Nachtsichttechnik hat ihre Ursprünge in den Anfangsjahren des 2. Weltkrieges. Zwar gehen die ersten Entwicklungsformen bereits auf das Jahr 1929 zurück, allerdings konnten relevante militärische Verwendungen von Nachtsichttechnik erst 1942 zum Einsatz gebracht werden [Naughton 2004]. 1936 begann das Heereswaffenamt mit der Allgemeinen-Elektrizitätsgesellschaft (AEG) Berlin-Reineckendorf an der Entwicklung militärisch nutzbarer Bildwandler-technik zu arbeiten. Die Erprobung erfolgte vielseitig zwischen 1936 und 1939 und war insbesondere für die Nutzung zum nächtlichen Fahrzeugführen vielversprechend. Die deutsche Wehrmacht nutzte die noch schweren und sperrigen Nachtsichtapparaturen hauptsächlich als Fahrzeugaufsatz, insbesondere für den Panzerkampfwagen V Panther sowie die Panzerabwehrkanone 40, teils mit Unterstützung eines separaten Infrarotbeleuchtungswagens „Uhu“, auf Basis eines mittleren Schützenpanzerwagens, zur aktiven (Infrarot-)Ausleuchtung möglicher Ziele. Eine erste tragbare Version in Form eines Zielfernrohrs für das Sturmgewehr 44 konnte erstmals Anfang 1945 realisiert werden [Jahn 2004].

Diese ersten Erscheinungsformen der Nachtsichttechnik basierten auf einer simplen, jedoch für die Entwicklung dieser Technik entscheidenden funktionalen Anordnung: Einer S1- Fotokathode aus Silberoxid und Cäsium (AgOCs) an einem Ende und einem Phosphorschirm am anderen Ende einer Vakuumröhre [Adomeit 2016; Jacks 2009]. Hierdurch führt einfallendes Licht von ca. 450 nm bis etwa 1,8  $\mu\text{m}$  Wellenlänge zu einer Freisetzung von Elektronen an der Fotokathode. Diese freien Elektronen werden durch die Vakuumröhre auf den Phosphorschirm beschleunigt und können hier durch eine Optik als monochromatisches Bild durch den Anwender erkannt werden. Diese Technik verwendet noch keine Lichtverstärkung im eigentlichen Sinne, kann aber für den Menschen nicht sichtbares Infrarotlicht sichtbar machen. Hierzu benötigt wird allerdings eine aktive Infrarotausleuchtung des Ziels, was in zweierlei Hinsicht nachteilig ist. Einerseits bedingt die benötigte aktive Bestrahlung einen deutlich erhöhten Energieverbrauch des Gesamtsystems, andererseits und militärisch entscheidend, ist die vereinfachte Aufklärbarkeit, sobald der Gegner ebenfalls ein Nachtsichtgerät verwendet, da die Infrarotstrahlenquelle unter Nachtsicht bereits von Weitem sichtbar ist [Golino 1984; Jacks 2009].

Nach Ende des 2. Weltkrieges wurde durch erbeutete Technik insbesondere in den Vereinigten Staaten von Amerika (USA) die Weiterentwicklung vorangetrieben [Jahn 2004].

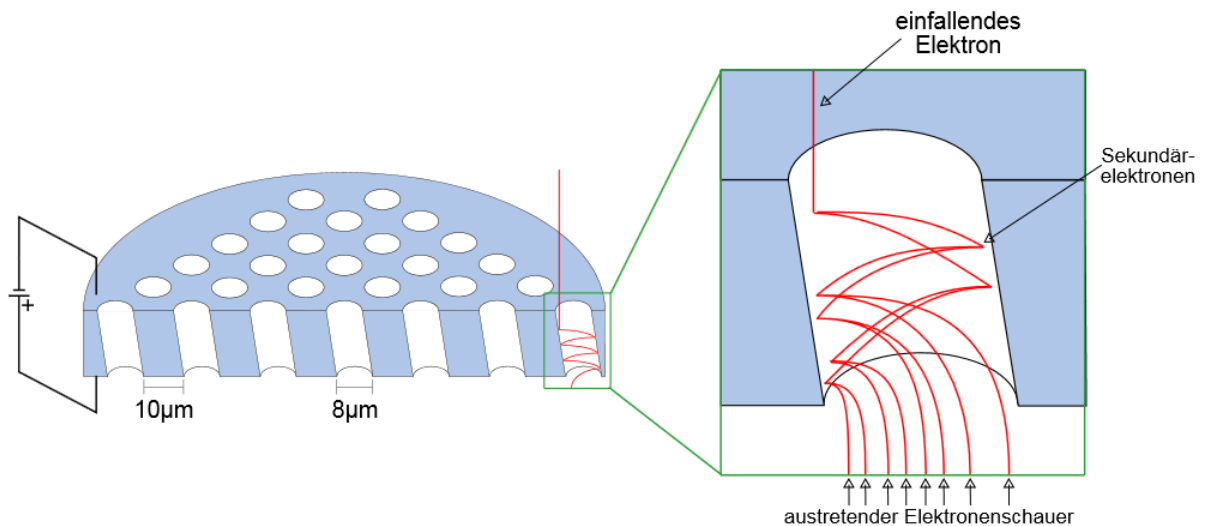
### 2.1.2 Bildverstärker (BIV) der 1. Generation

Die Nachtsichttechnik der ersten Generation unterscheidet sich von ihrer Vorgängertechnik durch den Wegfall der benötigten Aktivbestrahlung durch Infrarotlicht. Durch Materialverbesserungen

der Fotokathoden hin zu S11-Cäsiumantimonid (Sb-Cs) und später S20-Multialkali (Na-K-Sb-Cs) sowie eine kaskadenartige Reihung von zumeist drei dieser Anordnungen konnte eine ausreichende Verstärkung des Restlichts in der Größenordnung 1000- bis 8000-fach erreicht werden, ohne dass hierzu zusätzliche Infrarotbeleuchtung notwendig war [Adomeit 2016]. Zudem waren die Geräte durch den Wegfall der Infrarot-Strahlungsquelle kleiner, leichter und weniger energieintensiv, so dass beispielsweise helmmontierte Versionen realisierbar wurden [Flor, Weissmann 1991]. Mit diesen Geräten war eine Nutzung des Spektralbereichs von ca. 350 nm bis ca. 900 nm möglich (UV bis nahes Infrarot). Dies ermöglichte eine Sicht von bis zu 400 m in mondloser Nacht [Pevoski 1991; Flor 1990]. Maßgeblich vorangetrieben wurde diese Entwicklung durch die Erfahrungen des Koreakrieges in den frühen 1950er Jahren. Durch einen Strategiewechsel hin zur überwiegenden Anwendung von Nachtangriffen durch die Streitkräfte Nordkoreas waren die amerikanischen Streitkräfte als Verbündete Südkoreas gezwungen, sich intensiver mit der Nachtkampfdoktrin des Gegners auseinanderzusetzen. Erste serienmäßige Einsätze dieser Erst-Generationsgeräte wurden während des Vietnamkrieges auf amerikanischer Seite beobachtet. Trotz großen Fortschritts dieser Technologie brachte allerdings auch die überlegene Nachtsichttechnik nicht den notwendigen Vorteil um den Konflikt zu gewinnen, was in der Folge unter anderem dazu beitrug, den Fokus der wehrtechnologischen Forschung von der Nachtsichttechnik zurück zu den traditionellen Gebieten, Kampfflugzeuge und Panzerwaffe, zu führen [Mashall 1988; Palmer 1984].

### 2.1.3 Bildverstärker der 2. Generation

Der wesentliche technische Sprung, welcher zum Generationswechsel führte, war die Entwicklung von Mikrokanalplatten [Adomeit 2016; Schulz 2009]. Hierbei handelt es sich um Sekundärelektronenverstärker basierend auf flächig angeordneten Hohlfasern mit innenseitiger Halbleiterbeschichtung. Die an der Fotokathode entstandenen Elektronen werden auf diese Platte beschleunigt und treffen in den beschriebenen Mikrokanälen auf die Halbleiterbeschichtung, was zu einer Freisetzung von weiteren Elektronen pro Kontakt führt. Diese neu freigesetzten Elektronen werden durch die dem System anliegende Spannung ebenfalls beschleunigt und geraten ihrerseits mit der Halbleiterbeschichtung in Kontakt, was eine weitere Elektronenmultiplikation verursacht. Hierdurch kann eine Steigerung des Elektronenstroms auf den Phosphorschirm am Ende der Röhre auf das 20 000-fache erreicht werden. Die Empfindlichkeit dieser Geräte liegt mit zwischen 240 und 500  $\mu\text{m}/\text{lm}$  Licht etwa doppelt so hoch wie die Vorgängergeneration [Schulz 2009]. Zudem erhöhten sich die Lebensdauer auf etwa das fünffache. Diese Generation der Nachtsichttechnik konnte Mitte der 1970er Jahre Serienmäßig eingesetzt werden [Flor 1990].



**Abbildung 2** - Schematische Darstellung einer Mikrokanalplatte (links) und Ablauf der Elektronenamplifikation. Rechts vergrößert: die Detailansicht innerhalb eines Mikrokanals. In Rot dargestellt, die Flugbahn der Elektronen und der Amplifikationsmechanismus bei Kontakt mit der Halbleiterbeschichtung. Quelle: „Wikimedia.org“ (gemeinfrei)

#### 2.1.4 Bildverstärker der 3. Generation

Die dritte Generation der Nachtsichttechnik ist im Wesentlichen eine materialbedingte Leistungsverbesserung. Während weiterhin die Mikrokanaltechnik verwendet wird, sorgt hier eine Fotokathode aus Galliumarsenid für eine Verbesserung der Lichtempfindlichkeit auf bis zu 188 bis  $800\ \mu\text{A}/\text{lm}$  sowie eine Verschiebung des Spektralbereichs von 450 nm bis 930 nm. Hiermit kann eine Restlichtverstärkung bis auf das 50 000-fache erreicht werden. Die ersten Geräte dieser Generation kamen in den frühen 1990er Jahren zum Einsatz. Weiterhin konnten die Bildverstärkerröhren neben ihrer reinen Verstärkerleistung in ihrer Bauweise und Energieversorgung verbessert werden, um den mobilen Einsatz z.B. als Aufsatz am Gefechtschirm zu erleichtern [Schulz 2009].

International führend sowohl im Bereich Forschung und Entwicklung als auch in der Produktion der Nachtsichttechnik sind die USA. Die Veränderung der globalen Bedrohungslage, weg von den klassischen Zwei-Parteien-Kriegsszenarien, welche die Zeit des Kalten Krieges dominierten, hin zu asymmetrischer Gefechtsführung überregional-agierender, terroristisch orientierter Gruppierungen, lassen die Nachtsichttechnik als einen wesentlichen Technologievorsprung hervorstechen. Dies wurde in den Konflikten im Irak und Afghanistan deutlich, da hier Spezialkräfte speziell Nachtoperationen mit besonderer Effizienz umsetzen konnten [Blank 2017]. Aus diesem Grund unterliegt die Forschung auf diesem Gebiet einer besonderen Geheimhaltung. Selbst Forschungsergebnisse zu europäischen Bildverstärkern ab einer bestimmten Leistungsgrenze ( $\text{FOM} > 1600$  (Figure of Merit s.u.)) liegen meist unter Verschluss. Zudem besteht eine Exportbeschränkung aus den USA für Bildverstärkerröhren oberhalb einer festgelegten

Güteklasse (FOM>1200) Zwischen FOM 1200 und 1600 dürfen Bildverstärker an NATO-Partner und ausgewählte Länder (Australien, Japan) abgegeben werden. Oberhalb davon werden keine Bildverstärkerröhren aus den USA exportiert [Adomeit, Müller 2014; www.intas.org].

## 2.2 Aufbau und Funktion moderner Bildverstärkerröhren

Wird heutzutage von moderner Nachtsichttechnik gesprochen, ist im Wesentlichen von Bildverstärkern ab der 3. Generation die Rede.

Wie im Abschnitt zur geschichtlichen Entwicklung bereits angesprochen basieren Bildverstärkerröhren der 3. Generation auf einer Fotokathode aus Galliumarsenid in Verbindung mit einer Mikrokanalplatte auf Halbleiterbasis. Durch eine Eingangsoptik treffen Photonen, ausgehend von vorhandenen Lichtquellen, auf die Fotokathode. Das Galliumarsenid reagiert auf Photonen im Spektralbereich von ca. 450 nm bis 930 nm mit einer Elektronenfreisetzung und liegt mit seinem sensitivsten Bereich zwischen 600 nm und 850 nm (Rot und nahes Infrarot). Es findet hier somit praktisch eine Photon-Elektron-Umwandlung statt. Diese freigesetzten Elektronen werden durch eine anliegende elektrische Spannung auf eine Mikrokanalplatte beschleunigt [Schulz 2009; Jacks 2009].

Die Mikrokanalplatten bestehen aus millionenfach gleichmäßig angeordneten Hohlfasern, welche als Kanäle durch eine Trägerplatte fungieren. Diese Kanäle haben eine Innenbeschichtung aus Halbleitermaterialien. An der Fotokathode freigesetzte Elektronen lösen bei Kontakt mit diesen Halbleitermaterialien Sekundärelektronen aus der Oberfläche heraus, welche durch die bestehende Spannung weiter durch die Kanäle beschleunigt werden. Hierbei treffen auch diese Sekundärelektronen auf die Kanalbeschichtung was erneut zur Freisetzung von weiteren Elektronen führt. Um diesen Effekt zu verstärken bzw. die Wahrscheinlichkeit heraufzusetzen, einen Wandkontakt der Elektronen zu erzielen, werden die Kanäle nicht gerade, sondern mit leicht versetzten Eingangs- bzw. Ausgangsöffnungen versehen [Schmickley 2001]. Zudem werden in neueren Geräten zwei oder drei dieser Platten in V- bzw. Z-Formation arrangiert, wodurch ein deutlich höherer Elektronenstrom erzeugt werden kann. Dieser amplifizierte Elektronenstrom trifft nach Austritt aus der Mikrokanalplatte auf einen Phosphorschirm. Da die Geschwindigkeit der Elektronen unter der anliegenden Spannung konstant gehalten wird, sowie der Elektronenstrom im Spannungsfeld in geraden Bahnen fließt, kann am Phosphorschirm durch Kathodolumineszenz für jedes auftreffende Elektron ein Photon entstehen. Somit wird eine Elektron-Photon-Rückumwandlung bewirkt, wodurch mit einer auf diesen Phosphorschirm gerichteten Optik ein Bild erkannt werden kann, welches in der Helligkeit proportional zum

Eingangsbild ist. Dieses Bild ist technisch bedingt jedoch immer monochromatisch und farblich abhängig vom verwendeten Phosphormaterial [Schulz 2009; Jacks 2009].

Bildverstärkerröhren mit einer FOM > 1600 sind aufgrund der bestehenden Exportbeschränkungen zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht in der Bundeswehr verfügbar. Entwicklungstendenzen hin zu Fusionsgeräten mit integrierter Wärmebildtechnik sind bereits in der Umsetzung. Ebenso wird eine Verkleinerung der Röhrendurchmesser von bisher üblichen 18 mm auf 16 mm vorangetrieben [Adomeit 2016].

### 2.3 Monokular, Biokular, Binokular

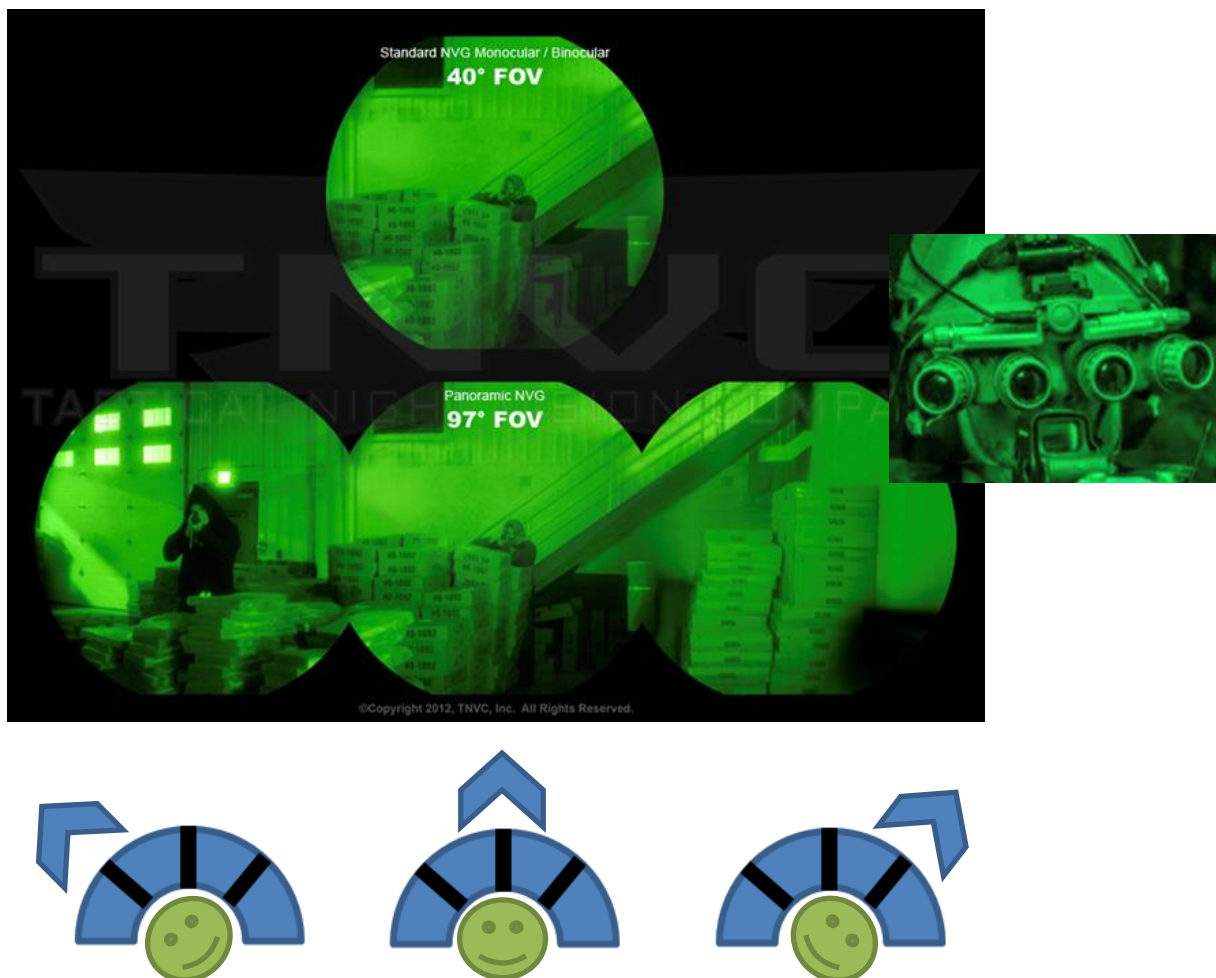
Moderne Nachtsichtgeräte werden je nach Verwendungszweck in verschiedenen Bauweisen angeboten. Monokulare Nachtsichtgeräte bestehen aus einer einzelnen Bildverstärkerröhre und werden z.B. in Zielfernrohren, gelegentlich auch helm montiert als Monokelversion verwendet. Vorteile dieser Variante sind die leichtere sowie kompaktere Bauweise sowie die Möglichkeit, auf dem freien Auge dunkeladaptiert zu bleiben und mit diesem weiterhin das eigene Gesichtsfeld zu behalten. Zudem sind diese NVG bei nur einer benötigten Bildverstärkerröhre entsprechend kostengünstiger. Nachteilig zeigt sich die Beschränkung des Nachtsicht-Gesichtsfeld auf die einzelne Röhre (ca. 20°) sowie die fehlende Stereopsis [CuQlock-Knopp et al. 1995].

In biokularen Nachtsichtgeräten sind in aller Regel eine Eingangsoptik jedoch zwei Beobachteroptiken verbaut, so dass mit beiden Augen auf den gleichen Phosphorschirm geschaut wird. Diese Bauweise benötigt ebenfalls nur eine Bildverstärkerröhre und bringt entsprechende Vorteile in Gewicht und Kosten. Gleichzeitig gibt es keine unterschiedliche Beobachterwahrnehmung der beiden Augen. Trotzdem sehen beide Augen das Nachtsichtbild so dass die Nachtsicht erhalten bleibt, wenn z.B. ein Auge kurzfristig ausfällt (Staubkorn, Träne etc.). Nachteilig zeigen sich auch hier die Gesichtsfeldbeschränkung, welche ebenfalls auf das Sichtfeld der einen BIV-Röhre beschränkt ist, sowie die fehlende Stereopsis, welche durch den Aufbau dem Beobachter zwar suggeriert, jedoch durch wenig verfügbare Hinweise zur Tiefenwahrnehmung, insbesondere durch die fehlende unterschiedliche Bildinformation des zweiten Bildschirms, selbst vom Beobachter meist nur qualitativ reduziert wahrgenommen wird [CuQlock-Knopp et al. 1995].

Die binokulare Bauweise verwendet eine Bildverstärkerröhre pro Auge, entsprechend zwei Eingangsoptiken, zwei Verstärkerröhren und zwei Phosphorschirme. Hierdurch ergibt sich eine Verdopplung des Gesichtsfelds sowie eine Wahrnehmung nahe an einer tatsächlichen Stereopsis. Durch die voneinander abweichenden Bildinformationen, die durch die horizontale Abweichung der BIV-Röhren gegeben ist, stehen dem Anwender deutlich mehr Tiefeninformationen zur Verfügung, aus denen ein dreidimensionaler Seheindruck entsteht, welcher nahe an einer echten

Stereopsis verwendet werden kann [Kooi, Toet 2004]. Nachteilig sind das entsprechend zusätzlich benötigte Baugewicht und die Mehrkosten für die zweite Bildverstärkerröhre [Wiley 1989; Grayson et al. 1995].

Die in dieser Studie verwendete L3-Quadeye ist somit ein zweifach-binokulares System, bei dem der Beobachter jeweils durch zwei benachbarte Bildverstärkerröhren schaut. Hierdurch gibt es drei überlagerte Gesichtsfelder (links/mitte-links, mitte-links/mitte-rechts sowie mitte-rechts/rechts, s. Abb. 3) sodass insgesamt  $97^\circ$  Gesichtsfeld erreicht werden [Technische Angaben, Beiblatt L3].



**Abbildung 3** - Vergleich der Sicht durch das  $97^\circ$  Gesichtsfeld des L3 Quad-Eye-NVG-Systems (unten) mit der Sicht durch ein  $40^\circ$  Gesichtsfeld eines Standard-Nachtsichtgeräts (oben) (mit freundlicher Genehmigung der TNVC Inc.) sowie unterhalb, schematisch, die binokulare Nutzung der jeweiligen 2 benachbarten Bildverstärkerröhren innerhalb der Vierfachanordnung. Jedes Auge schaut durch eine von zwei nebeneinanderliegenden Bildverstärkerröhren, so dass drei Blickkonfigurationen ohne notwendige Schwenkbewegung des Kopfes möglich sind (Vgl. eingefügten Ausschnitt aus Abb. 18 mitte-rechts).

## 2.4 Physiologie, physikalische Grundlagen und Begriffserklärung

Neben der historischen Betrachtung ist eine kurze Übersicht der physikalischen Grundlagen zum Verständnis der Nachtsichttechnik unumgänglich. Die spezifischen Messparameter, durch welche

die technischen Eigenschaften und Qualitäten der Bildverstärkerröhren beschrieben werden, bedürfen hier einer genaueren Betrachtung.

#### 2.4.1 Nächtliche Lichtspektren und Lichtquellen

Natürliches Licht stammt hauptsächlich und insbesondere tagsüber von der Sonne. Je nach Weg durch die Atmosphäre kommt jedoch ein anderer Teil des Lichtspektrums an der Erdoberfläche an. Mittags auf Äquatorbreite strahlt die Sonne annähernd senkrecht auf die Erdoberfläche, so dass das Lichtspektrum von kurzwelligem Licht (450-500 nm) bestimmt wird. In den Morgen- und Abendstunden strahlt das Licht der Sonne über einen deutlich längeren Weg durch die Erdatmosphäre, weshalb hier vermehrt die langwelligen Anteile (700 – 750 nm) überwiegen, welche im Gegensatz zu den kurzwelligen Anteilen nicht auf dem Weg durch die Atmosphäre absorbiert werden. In der Nacht entfällt die direkte Sonneneinstrahlung, so dass im Bereich der natürlichen Lichtquellen primär am Mond reflektiertes Sonnenlicht sowie Sternenlicht vorherrschend sind, welche im Verhältnis ihrer Beleuchtungsstärke zueinander maßgeblich von der Mondphase bestimmt werden. Das vom Mond reflektierte Licht hat ein dem Tageslicht ähnliches Spektrum und verhält sich ähnlich je nach Mondstand. Steht der Mond im Zenit, erreicht die Erdoberfläche schwerpunktmäßig kurzwelliges Licht, steht der Mond tief, erreichen die Erdoberfläche primär die langwelligen Anteile. Bezogen auf die Mondphasen verhält sich die reflektierte Lichtmenge wie folgt: bei Vollmond wird das meiste Sonnenlicht reflektiert, bei Neumond am wenigsten und jeweils in den Phasen dazwischen jeweils so viel, wie Mondoberfläche vom Sonnenlicht erreicht und reflektiert werden kann. Sternenlicht verhält sich ähnlich: das von ihnen ausgehende Lichtspektrum verhält sich entsprechend der Strecke zur Erdatmosphäre und ist durch die große Entfernung prinzipiell dem langwelligen Bereich des Lichtspektrums zuzuordnen mit relevanten Anteilen im nahen Infrarot [Jacks 2009].

Lichtquelle	Beleuchtungsstärke in Lux (lx)	Lichtspektrum- Schwerpunkt	Unbeleuchtetes Objekt (1,80m) auf 100m erkennbar*	Unbeleuchtetes Objekt (4m) auf 100m erkennbar *
Sonne, Zenit	100.000	Kurzwellig	+	+
Sonne, Zenit (bewölkt)	10.000 - 1000	Kurzwellig	+	+
Sonne, Abenddämmerung	1000 - 1	Langwellig	+	+
Vollmond, Zenit	0,3	Kurzwellig	+	+
Vollmond, tief	0,1	Langwellig	+	+
Sternenlicht	0,001	Langwellig	-	+
Sternenlicht, bewölkt	0,0001	Langwellig	-	-

**Tabelle 1** - Übersicht natürlicher Lichtquellen sowie Sichtbarkeit unbeleuchteter Objekte: 1,80m (Person) und 4m (Haus). \*Erkennbar bedeutet hier als Umriss identifizierbar. Ab einer Beleuchtungsstärke unter 0,1 lx ist die menschliche Fernsicht deutlich reduziert. [Jacks 2009]

Dies vorausgesetzt, ist die Häufigkeit natürlicher Lichtspektren abhängig von der Position von Sonne und Mond zum jeweiligen Punkt der Erdoberfläche. Somit sind in Äquatornähe durch den häufigen Zenitstand von Sonne und Mond öfter und länger Phasen mit primär kurzwelligem Lichtspektrum zu messen als in äquatorfernen Regionen, in denen längere Dämmerungsphasen mit entsprechend langwelligen Lichtspektren vorherrschen [Flor 1990].

Durch die für moderne menschliche Sichtweise eher geringe Beleuchtungsstärke der nächtlichen, natürlichen Lichtquellen, sind insbesondere in stark von Menschen besiedelten Teilen der Welt nachts primär nicht-natürliche Lichtquellen bestimmend für die jeweils vorhandene Lichtmenge. Diese künstlichen Lichtquellen sind in großer Vielzahl und Variabilität vorhanden und reichen von einfachen Kerzenflammen über Straßenlaternen bis zu Halogenscheinwerfern zur Steuerung von Flug- und Schiffverkehr. Je nach Bauart und verwendeten Materialien unterscheiden sich diese Lichtquellen in Lichtstärke und Lichtspektrum. Prinzipiell liegt das nächtliche künstliche

Lichtspektrum jedoch im kurzwelligen Bereich im Vergleich zum Lichtspektrum der natürlichen Lichtquellen.

Lichtquelle/Situation	(Geforderte) Beleuchtungsstärke (DIN EN 12464) in lx	Lichtspektrum-Schwerpunkt	Vorkommen in der Anwendung
Büroarbeitsplatz	500	kurzwellig	Vergleich zur Alltagsumgebung
Fußwegbeleuchtung (Tempo 30 Zone)	2-15	Je nach Beleuchtungskonzept, meist kurzwellig	mittlere, nächtlich-urbane Umgebung
Beleuchtung Fußgängerüberweg („Zebrastreifen“)	30	kurzwellig	helle, nächtlich-urbane Umgebung
Kerzenflamme 1m entfernt	1	langwellig	Dunkle Raumbeleuchtung
Kerzenflamme 10m entfernt	0,001	langwellig	Sehr dunkle Raumbeleuchtung
Militärische Taschenlampe (ca. 2000 lm) 1m entfernt	10 000	kurzwellig	z.B. Suchlampe Wachstreife
Militärische Taschenlampe (ca. 2000 lm) 400m entfernt	2	kurzwellig	z.B. Suchlampe Wachstreife

**Tabelle 2** - Übersicht künstlicher Lichtquellen mit jeweils zugeordnetem Lichtspektrum und Relevanz beim Einsatz eines NVGs. Zu beachten ist eine deutlich sinkende Beleuchtungsstärke bei zunehmender Entfernung der Lichtquelle [Flohr 1990].

#### 2.4.2 Physikalisch-photometrische Grundbegriffe

Das Maß für die Lichtmenge, welche an einem Ort eine bestimmte visuelle Helligkeit erzeugt, ist die Beleuchtungsstärke (engl. illuminance) und wird in  $Lux(lx)$  gemessen. Diese ist abhängig vom jeweiligen Lichtstrom (engl. luminous flux) einer Lichtquelle welcher in  $Lumen(lm)$  gemessen wird. Grundlage für diesen Lichtstrom ist die Lichtstärke (engl. luminous intensity) der Lichtquelle gemessen in  $Candela(cd)$  sowie der durchstrahlte Raumwinkel ( $sr$ ,  $Steradian$ ) [Physikalisch-Technische Bundesanstalt]. Somit beschreibt die Lichtstärke die visuelle Helligkeit einer Lichtquelle

bzw. wie viel Licht von ihr ausgeht. Der Lichtstrom beschreibt, wie viel Licht in eine bestimmte Richtung strahlt und die Beleuchtungsstärke beschreibt, wie viel Licht an einem bestimmten Punkt ankommt und vor Ort visuelle Helligkeit erzeugt.

Die natürliche Beleuchtungsstärke reicht von ca. 100 000 Lux in direktem Sonnenlicht und ca. 10 000 bis 1000 Lux bei Tageslicht über ca. 0,1 Lux bei Vollmond hinzu ca. 0,0001 Lux bei bedecktem Nachthimmel ohne sichtbares Sternenlicht [Jacks 2009, www.Photonis.com]. Für bisherige Studien zur Nachtsichttechnik wurden die Beleuchtungsniveaus Full Moon (0,1 lx), Quarter Moon (0,01 lx), Starlight (0,001 lx) sowie Overcast Starlight (0,0001 lx) unterschieden und trotz natürlicher Schwankungen diese Werte zur besseren Vergleichbarkeit angenommen [Wiley 1989; Grayson et al. 1995].

### 2.4.3 Sensitivität

Der Begriff der Sensitivität beschreibt in der Nachtsichttechnik die Fähigkeit, Photonen zu detektieren und in Elektronen umwandeln zu können. Hohe Sensitivitätswerte bedeuten zunächst nur eine bessere Detektierung von Photonen, was jedoch den Beginn des Bildverstärkungsprozesses darstellt. Die Sensitivität einer Bildverstärkerröhre ist dabei abhängig vom Material der Fotokathode und von der Qualität der vorangeschalteten Eingangsoptik. Die Eingangsoptik verhält sich hier einerseits wie ein Fokus, welcher die einfallenden Photonen bündelt und auf die Fotokathode lenkt, andererseits auch wie ein Filter, da geringe Photonenmengen durch die Optik selbst für den Verstärkungsprozess verloren gehen, ähnlich wie es bei Mikroskopen oder Teleskopen der Fall ist. Das Material der Fotokathode spielt bei der Sensitivität jedoch die größere Rolle: Je nach Material bestehen typische Empfindlichkeiten gegenüber bestimmten Wellenlängen des einfallenden Lichts. Ein Kathodenmaterial mit hohem Empfindlichkeitswert bei ca. 450 nm (Blau, kurzwelliger Bereich) ist demnach bei reinem Sternenlicht (Wellenlängen >750 nm, Lichtspektrum nahes Infrarot) deutlich weniger leistungsfähig und führt zu weniger Photonen-Elektronen-Umwandlung als ein Kathodenmaterial mit hohem Empfindlichkeitswert im Bereich des nahen Infrarots. Somit können geringere Sensitivitätseigenschaften bei passendem Beleuchtungsspektrum bessere Sicht ermöglichen als vergleichbar bessere Sensitivitätseigenschaften bei weniger passendem Beleuchtungsspektrum. Bezogen auf den Bildverstärkungsprozess interagiert die Sensitivität stark mit den anderen Parametern: Eine hohe Sensitivität verbessert zunächst zusammen mit der Qualität der Eingangsoptik das Eingangsbild und reduziert somit die notwendige Verstärkung, um ein qualitativ hochwertiges Ausgangsbild zu erzeugen. Allerdings führt eine hohe Sensitivität allein ebenfalls zu einem erhöhten Hintergrundrauschen, da auch diffus einfallende Photonen detektiert werden. Um eine hohe

Ortsauflösung des Ausgangsbildes zu erreichen, muss somit eine hohe Sensitivität durch entsprechende Eingangsoptik sowie passende Verstärkung ergänzt werden, da bei hoher Sensitivität (und damit hohem Rauschen) und gleichzeitig hoher Verstärkung ein verrauschtes Bild ausschließlich heller und nicht schärfer dargestellt wird. Entsprechend ist die Sensitivität allein kein aussagekräftiges Qualitätsmerkmal. Gemessen wird die Sensitivität in Mikroampere pro Lumen ( $\mu\text{A}/\text{lm}$ ) [Jacks 2009].

#### 2.4.4 Auflösung

Die Auflösung eines Nachtsichtgeräts beschreibt die Bildschärfe des verstärkten Bilds und ist somit ein Maß für die Bildqualität. Die Auflösung ist primär abhängig von den technischen Eigenschaften und dem Darstellungsverhalten des Phosphorschirms. Diese können jedoch nur optimal ausgenutzt werden, wenn die weiteren Bestandteile der Bildverstärkerröhre hierauf abgestimmt sind. Maßgeblich ist das Zusammenspiel von Sensitivität und Verstärkung der Röhre. Ist die Gesamtzahl der einfallenden Elektronen zu hoch für den Phosphorschirm, können Konturen schlechter dargestellt werden und die Auflösung sinkt bei steigender Helligkeit des Bildes. Andersherum entsteht bei zu geringer Verstärkung bzw. Sensitivität durch unspezifisch einfallende Elektronen ein Rauschen, aus dem heraus das eigentliche Bild nicht abgegrenzt werden kann. Zudem spielt die Qualität der Eingangs- und Ausgangsoptik eine Rolle, da sowohl die Abbildungsgenauigkeit des einfallenden Bildes auf die Fotokathode, als auch die Darstellbarkeit des Bildes des Phosphorschirms für den Beobachter relevante Bildqualitätsunterschiede hervorrufen.

Gemessen wird dies als Auflösung der Bildverstärkerröhre, genauer des Phosphorschirms, in Linienpaaren pro Millimeter (Line Pairs per Millimeter, lp/mm) bzw. als Auflösung des Gesamtsystems in Cycles per Milliradian (cy/mr) [Basic Guide].

#### 2.4.5 Helligkeits-Verstärkung (Gain)

Das Merkmal der Verstärkung eines Bildverstärkers beschreibt die Fähigkeit, die detektierten Photonen zu amplifizieren. Unterschieden wird hier im Allgemeinen zwischen einer Röhrenverstärkung und einer Systemverstärkung. Während die Röhrenverstärkung die reine Elektronenamplifizierung durch die Bildverstärkerröhre beschreibt, ist die Systemverstärkung ein Maß für die Gesamtverstärkung des Nachtsichtgeräts inkl. Eingangs- und Ausgangsoptik. Somit ist auch diese Größe abhängig von Material und Aufbau des Systems. Ähnlich wie die Sensitivität, ist auch die Verstärkung allein kein aussagekräftiges Merkmal, da eine gute Verstärkerleistung bei gleichzeitig schlechter Sensitivität ein schlechtes Bild ausschließlich heller und nicht besser darstellt [Jacks 2009]. Bei geringen Beleuchtungsverhältnissen konnte allerdings gezeigt werden, dass die

Geräteperformance des NVGs maßgeblich von der Verstärkungsleistung der Bildverstärkerröhre abhängig ist [Adomeit, Müller 2014].

#### **2.4.6 Signal-Rausch-Verhältnis (Signal-to-Noise Ratio, SNR)**

Das Signal-Rausch-Verhältnis beschreibt die wichtige Eigenschaft des Nachtsichtgeräts, unter niedrigen Beleuchtungsstärken klare Kontraste gegenüber dem vorhandenen Hintergrundrauschen zu generieren. Definiert ist es als Verhältnis von Nutzsignalleistung alternativ Nutzsignalamplitude (hier: vom Beobachtungsobjekt ausgehende oder reflektierte Strahlung) zur Rauschleistung bzw. alternativ Rausch-Standardabweichung. In der Bildverstärkerröhre wird das Hintergrundrauschen maßgeblich durch diffus einfallende Photonen erzeugt, welche zwar durch die Eingangsoptik detektiert werden, jedoch nicht unmittelbar aus der Blickrichtung stammen. Entsprechend sind hierbei sowohl die Sensitivität als auch die Verstärkungsleistung maßgeblich beeinflussend: sind diese hoch, jedoch z.B. durch eine unpassende Eingangsoptik kein optimierter Photoneneingang möglich, entsteht durch verstärkte, diffus-einfallende Photonen ein stärkeres Rauschen. Gleichzeitig entsteht, technisch bedingt, durch den Photon-Elektron-Umwandlungsprozess und die durch Betriebsspannung zurückgelegte Wegstrecke der Elektronen durch die Bildverstärkerröhre ein geringfügiger zeitlicher Versatz zwischen dem Eingang der Photonen an der Eingangsoptik und dem Auftreffen auf dem Phosphorschirm, wodurch ebenfalls ein Anteil des Rauschens zustande kommt. Weiterhin mitbeteiligt ist die Auflösung des Bildschirms: je schlechter die Auflösung, desto größer der Einfluss der detektierten, diffusen Elektronen und somit des wahrgenommenen Rauschens. Bedingt durch optimierte Abstimmung der einzelnen Bestandteile kann eine hohe SNR erreicht werden. Hierfür müssen diese Bestandteile jedoch nicht zwangsläufig jeweils gute Einzelleistungen aufweisen, da auch bei geringerer Sensitivität und/oder Verstärkung bei passender Eingangsoptik und Phosphorschirm eine hohe SNR und damit eine gute Bildqualität, bei geringerer Geräteperformance, erreicht werden kann. Somit gewährleistet eine hohe SNR weniger Flimmern des dargestellten Beobachterbildes. Die SNR ist daher ein wesentliches Maß für die Bildqualität des NVGs und spiegelt sich in der Berücksichtigung bei der FOM (s.u.) wider. Für sich allein genommen lassen sich jedoch auch aus der SNR allein keine Rückschlüsse auf die Geräteperformance schließen [Jacks 2009].

#### **2.4.7 Figure of Merit (FOM)**

Die Figure of Merit ist eine errechnete Größe zur Gütebestimmung der Bildverstärkerröhren und berechnet sich aus dem Produkt aus Auflösung und Signal-Rausch-Verhältnis ( $FOM = \text{Resolution} \times \text{SNR}$ ) [Jacks 2009; www.Intas.org].

Während diese Kenngröße allgemein als Gütekriterium der Bildverstärkerröhren verwendet wird und z.B. die Exportbegrenzung für Bildverstärkerröhren aus den USA über die FOM definiert ist, zeigen neuere Untersuchungen, dass auch diese Kenngröße allein die Geräteperformance nicht umfassend wiedergibt. Insbesondere bei schlechten Beleuchtungsverhältnissen konnte eine deutliche Abhängigkeit der Gesamtperformance des Nachtsichtgeräts von der Helligkeitsverstärkung der Bildverstärkerröhre nachgewiesen werden. Diese wird jedoch in der Berechnung der FOM nicht betrachtet. Dennoch sind aktuell keine Tendenzen zu einer allgemeinen Neubetrachtung der Gütekriterien zu erkennen [Adomeit, Müller 2014].

## 2.5 Physiologie unter Nachtsichtbedingungen

Physiologisch findet bei sinkender Beleuchtung eine Dunkeladaptation statt. Das Auge reagiert mit Pupillendilatation sowie Umstellung zur vermehrten Nutzung der fotosensibleren Stäbchenzellen in der Netzhautperipherie. Hier können bei sehr geringer Photonenzahl diese wenigen Lichtinformationen über eine verzögerte Reizweiterleitung zeitlich gebündelt werden, um ein vollständigeres Bild zu generieren. Dies geschieht jedoch bei gleichzeitigem Verlust der Farbsehfähigkeit sowie Aufgabe der zentralen Sehschärfe. Die vollständige Dunkeladaptation dauert bis zu 40 Minuten und wird bereits durch kurzzeitige, stärkere Lichtreize bis zu vollständig zurückgesetzt [neuronresearch.net].

Bei Nutzung eines Nachtsichtgeräts findet keine Dunkeladaptation statt, da bei eingeschaltetem Bildverstärker der Bildschirm als künstliche Lichtquelle fungiert, welche ausreichend Licht erzeugt, um eine Dunkeladaptation zu verhindern. Das Sehen ist entsprechend nur an die Helligkeit des Nachtsichtgeräts adaptiert. Dem folgend findet unter Nachtsichtbedingungen ein zentrales Sehen statt. Die Visusleistung entspricht somit der Auflösungsqualität des Nachtsichtgerätebildes. Das Gesichtsfeld ist auf den Blick durch die Bildverstärkerröhre beschränkt, diese variiert je nach Hersteller und Gerät in Abhängigkeit der Bauweise zwischen  $20^\circ$  und  $40^\circ$ . Diese Beschränkung wird bei der hier verwendeten L3-Quadeye durch die vierfach-Anordnung der Röhren auf  $97^\circ$  erhöht [Techn. Datenblatt L3 2015].

Zentrales Sehen wird durch die Fotorezeptoren vom Zapfen-Typ der zentralen Retina ermöglicht. Diese haben im Gegensatz zu den Fotorezeptoren vom Stäbchen-Typ in der peripheren Retina eine geringere Lichtempfindlichkeit, dafür jedoch die Möglichkeit zur Farbdifferenzierung und sind im Netzhautzentrum, am Punkt des schärfsten Sehens (Fovea centralis), sehr dicht liegend und ermöglichen hierdurch die hohe Ortsauflösung unseres Tageslichtvisus. Die Zapfen liegen beim Menschen in 3 Subtypen mit jeweils eigenem Absorptionsmaximum vor: S-Zapfen (Short wavelength receptor) haben ihr Absorptionsmaximum bei etwa 455 nm und sind somit

empfindlich im Bereich des blauen Lichts. M-Zapfen (Medium wavelength receptor) weisen ihr Absorptionsmaximum bei etwa 534 nm auf und sind empfindlich bei grünem Licht, sowie L-Zapfen (Long wavelength receptor) mit ihrem Absorptionsmaximum im Bereich von 563 nm, welches einem gelb-grünen Farbton entspricht, über den jedoch die Rotwahrnehmung erfolgt. Insgesamt ist das Absorptionsspektrum der Zapfen relativ breit, so dass auch S-Zapfen (Absorptionsmaximum 455 nm) durch grünes Licht (Wellenlänge 500 nm) gereizt werden. Allerdings kann aus einem einzelnen Typ Zapfen nicht abgeleitet werden, ob das einfallende Licht nun schwach aus dem Bereich des Absorptionsmaximums kommt, oder mit starker Intensität aus einem Bereich jenseits davon. Die Farbwahrnehmung entsteht somit erst durch Verrechnung der Information der drei Zapfentypen. Fallen einzelne Zapfentypen aus (z.B. durch Gendefekte) ist eine Farbsinnstörung die Folge. Ist der S-Zapfen betroffen (sehr selten) resultiert eine Blauschwäche (Tritanopie/Tritanomalie). Häufiger sind M-Zapfen (Grünschwäche, Deuteranopie/Deuteranomalie) und L-Zapfen (Rotschwäche, Protanopie/Protanomalie) betroffen [Duale Reihe 2010; neuronresearch.net].

Bezogen auf das Sehen mit dem Nachtsichtgerät findet bei Verwendung eines grünen Phosphorschirms zwar eine gleichzeitige Aktivierung aller 3 Zapfentypen statt, allerdings findet die Weiterleitung und Verrechnung schwerpunktmäßig über die M-Zapfen statt, welche durch die Frequenz des Bildschirmlichts im Grünbereich in ihrem Absorptionsmaximum gereizt werden. Bei Nutzung eines weißen Phosphorschirms findet eine additive Farbmischung statt, die durch eine gleichmäßigere Reizung und Weiterleitung über alle drei Zapfentypen realisiert wird. Somit wird beim grünen Phosphor im Schwerpunkt das Zapfensystem mit der mittleren Frequenzwahrnehmung und in der Natur häufigsten Farbwahrnehmung angesprochen, beim weißen Phosphor besteht hingegen eine gleichmäßigere Verteilung über alle drei Zapfensysteme. Wird das Anpassungsverhalten des visuellen Systems an unterschiedliche Lichtverhältnisse (z.B. Hell/Dunkel, Rot-/Grünadaptation mit jeweiligen Nachhalleffekten) zu Grunde gelegt, gibt es entsprechend für beide Phosphorfarben aus physiologischer Sicht Argumente für eine Überlegenheit gegenüber der jeweils anderen Farbe. Aussagekräftige Untersuchungen zu z.B. Ermüdungserscheinungen sind bisher jedoch noch nicht veröffentlicht [webvision].

## 2.6 Stereoptisches (stereoskopisches) Sehen

Das menschliche visuelle System verfügt bei normaler Sehentwicklung über die Fähigkeit zum stereoptischen Sehen. Grundlage hierfür sind zwei Augen mit ähnlicher Visusentwicklung, funktionierender Augen-Muskelkoordination, sowie jeweils korrespondierenden Netzhautarealen, sodass gleichzeitig über jedes Auge jeweils ein horizontal zum anderen Auge verschobenes Bild

aufgenommen werden kann, welche dann zusammen zentral fusioniert und räumlich verarbeitet werden. Dementsprechend gibt es drei Stufen der Stereopsis: Simultansehen, binokulares Einfachsehen und echtes stereoptisches Sehen. Beim Simultansehen können (im Gegensatz um Einäugigen) zwei Bilder parallel und unabhängig voneinander wahrgenommen werden. Diese können jedoch nicht zentral zu einem Bild fusioniert werden, sondern werden z.B. als Doppelbilder wahrgenommen. Alternativ hierzu wird jedoch meist ein Bild zentral supprimiert, um den Doppelbildefekt auszublenden. Somit können beim Simultansehen zwar zwei Bilder gleichzeitig gesehen, aber nicht gleichzeitig verarbeitet werden, so dass hierbei gewöhnlich nur ein Bild tatsächlich wahrgenommen und genutzt wird. Können beide Bilder zentral fusioniert werden, liegt binokulares Einfachsehen vor. Hierbei entsteht jeweils ein zentrales Bild, welches aus zwei Einzelbildern zusammengefügt wird. Ohne eine weitere zentrale Verrechnung dieser Bildinformationen gibt es noch keine Stereopsis, allerdings besteht im Vergleich zum Simultansehen ein größeres Gesichtsfeld, da die Informationen aus beiden Bildern zur Verfügung stehen. Echte Stereopsis erfordert zusätzlich eine räumliche Verarbeitung der Informationen aus beiden Bildern, welche aus der jeweiligen Horizontalverschiebung der einzelnen Objekte erfolgt. Hieraus gewinnt der Betrachter zusätzliche Informationen, insbesondere zur Lage und zur Bewegung von Objekten im Raum [Duale Reihe 2010].

Je näher ein Objekt beim Beobachter ist, desto größer wird der Bildunterschied zwischen linkem und rechtem Auge. Ab einer bestimmten Entfernung wird begonnen, die Blickrichtung der Augen muskulär zueinander hin zu bewegen (Konvergenzbewegung) um Doppelbilder zu vermeiden. Diese Konvergenz unterstützt die Tiefenwahrnehmung, da das menschliche visuelle System in der Lage ist, diese stereoskopische Disparität (Sehen von Objekten aus unterschiedlichen Blickwinkeln) in eine Tiefenwahrnehmung umzusetzen [Kooi, Toet 2004]. Umgekehrt kann die Tiefenwahrnehmung in der Ferne erhöht werden, wenn beispielsweise über ein Scherenfernrohr (auf Basis eines Telestereoskops) der Augenabstand künstlich verbreitert wird und somit die Querdisparation von weiter entfernten Objekten größer wird [Helmholtz 1857].

Das zweite Auge vergrößert das kombinierte Sichtfeld, die Tiefenwahrnehmung ist unter bestimmten Umständen viel besser und zudem fungiert es als Ersatzteil, falls ein Auge die Funktion verliert. Die binokulare Tiefenwahrnehmung funktioniert allerdings nur dann richtig, wenn das Bild beider Augen genau korrespondiert. Wenn beide Bilder nicht zusammenpassen, kann der binokulare Vorteil leicht zum Nachteil werden. Es können Beschwerden in Form von Ermüdung bis hin zu Schmerzen verursacht werden, die zu einer aktiven Unterdrückung des Bildes von einem Auge führen können, was schließlich zur Entwicklung einer Amblyopie führen kann [Kooi, Toet 2004]. Insbesondere im Rahmen der Sehentwicklung während der frühen Kindheit ist dies relevant

und macht einen frühzeitigen Ausgleich möglicher Sehfehler (Refraktionsfehler, Schielen, etc.) wichtig um einer Amblyopie vorzubeugen.

Unabhängig vom stereoskopischen Sehen erfolgt ein relevanter Teil der menschlichen Tiefenwahrnehmung über Erfahrungswerte. Die Kenntnis bekannter Größen und Entfernungen, sowie Erfahrungen mit Perspektive und z.B. Schattenwürfen in Abhängigkeit von Beleuchtung, ermöglichen auch einem Einäugigen eine räumliche Tiefenwahrnehmung, welche jedoch dem Beobachter eine funktionierende Stereopsis nur suggeriert [Kanski 2015].

Bezogen auf die Nachtsichttechnik ist eine Stereopsis auf realitätsnahe Tiefenwahrnehmung beschränkt. Da im Nachtsichtgerät auf 2D-Bildschirme geschaut wird, können allenfalls durch unterschiedliche Bildinformation von zwei Bildschirmen (einer pro Auge) genug Tiefenhinweise vermittelt werden, um eine 3D-Wahrnehmung zu imitieren, welche einer echten Stereopsis so nahe kommt, dass in der Verarbeitung dieser Wahrnehmung keine Anpassungen des Umgangs damit notwendig sind. Dem Anwender fällt nicht auf, dass er auf Bildschirme schaut. Diese realitätsnahe Tiefenwahrnehmung ist primär abhängig vom Aufbau des Nachtsichtgeräts. Sind nicht zwei Bildverstärkerröhren verbaut, welche jeweils auf einen Phosphorschirm projizieren, ist mit dem NVG keine stereopsisnahe Wahrnehmung möglich. Schauen beide Augen bei biokularer Bauweise (s. dort) auf denselben Schirm, gibt es diese Bildinformationen zur Tiefenwahrnehmung nicht, so dass zwar mit beiden Augen geschaut werden kann, jedoch trotzdem kaum Tiefenwahrnehmung stattfindet.

## 2.7 Vergleich zu 3D-Bild- und Kameratechnik

Der grundlegende Aufbau moderner Nachtsichtgeräte und Bildverstärkerröhren lässt einen Vergleich zur 3D-Bildtechnik sowie der Virtual-Reality (VR) zu, welche zunehmend sowohl zu Unterhaltungszwecken (Computerspiele, 3D-Filme), als auch vermehrt zu Ausbildungszwecken (3D-Simulatoren) entwickelt und genutzt wird. Vergleichbar ist hier, insbesondere im Bereich der Virtual Reality bzw. Augmented Reality (AR), der Aufbau des Nutzergeräts: Durch eine Beobachteroptik wird der Blick des Nutzers auf unmittelbar vor der Optik installierte Bildschirme gerichtet, auf welchen das gewünschte Bild generiert wird. Diese Optik ist in der Regel auf Fernsicht eingestellt, so dass der Nutzer mit seiner ggf. notwendigen Fernkorrektur (Brille, Kontaktlinsen) das Gerät ohne Änderung der Optik nutzen kann. Eine ggf. im Alltag notwendige Nahkorrektur (z.B. Lesebrille bei Presbyopie) ist durch die Einstellung der Optik für die Nutzung des Geräts in der Regel nicht notwendig, obwohl sich der Bildschirm in unmittelbarer Nähe der

Optik befindet. Eine resultierende Sehschärfe bei Nutzung dieser Systeme ist wie beim Nachtsichtgerät von der Auflösung des Bildschirms bzw. von der visuellen Übertragungsperformance des Kamerasystems im Zusammenspiel mit den jeweiligen Optiken abhängig.

Da jeweils auf einen 2D-Bildschirm geschaut wird, auf welchem das eigentliche Blickfeld übertragen wird, ist die resultierende Tiefenwahrnehmung immer virtuell. Die 3D-Technik nutzt hierzu Hinweise zur Tiefenwahrnehmung basierend auf Erfahrung: Stereoskopische Displays präsentieren jedem Auge ein eigenes Bild und ahmen die Unterschiede in der Objektposition nach, die durch die leicht unterschiedliche Position des linken und rechten Auges entstehen [Kooi, Toet 2004]. Gebräuchliche Methoden zur Darbietung unterschiedlicher Bildeindrücke für linkes und rechtes Auge sind Rot-/Grün-Brillen, Shutterbrillen oder Polarisierungsfolien. In NVGs und anderen VR-Geräten hat zumeist jedes Auge ein eigenes Display mit unterschiedlicher Bilddarstellung.

Eine Reihe von subjektiven Untersuchungen mit verschiedenen 3D-Displays, deuten darauf hin, dass die Tiefenwahrnehmung von stereoskopischen Bildern proportional zur Tiefendifferenz ist und umgekehrt mit der Kamera-/Bildschirmdistanz korreliert [Sangwook, Chulhee 2016].

## **2.8 Bisherige Studien zur Anwenderperformance mit NVGs**

Zum Zeitpunkt dieser Versuchsreihe war noch keine weitere Forschung zum Vergleich der Phosphorfarben Grün und Weiß veröffentlicht. Ebenso waren keine Veröffentlichungen von Schießergebnissen unter Nutzung von Nachtsichtgeräten, insbesondere nicht im Vergleich zum Tageslichtsehen zu finden. Selbst Veröffentlichungen zu Tageslichtpräzision von Anwendern im Umgang mit Schusswaffen waren bei Erstellung dieser Arbeit nicht vergleichbar existent. Die Existenz von derzeit noch unter Verschluss stehenden Forschungsergebnissen soll hier bei der gegebenen militärischen Relevanz der Thematik jedoch nicht ausgeschlossen werden.

Seit der Einführung der Nachtsichttechnik in den Streitkräften wurden regelmäßig Studien zur Visusbestimmung, sowie Performancemessung mit verschiedenen Nachtsichtgeräten durchgeführt. Wiederholend wurden, wie erwartet, steigende Visusergebnisse in Abhängigkeit von steigenden Beleuchtungsstärken und Kontrastverhältnissen gemessen, oder umgekehrt: je weniger Beleuchtungsniveau und je geringer der Zielkontrast, desto schlechter waren die Visusergebnisse, wobei mit modernerer Technik jeweils bessere Ergebnisse gemessen wurden als mit der verglichenen Vorgängertechnik. Insgesamt bleibt die zentrale Sehschärfe unter Nachtsichtbedingungen selbst mit jeweils modernster Nachtsichttechnik noch weit hinter dem

zentralen Sehen ohne Hilfsmittel bei Tageslicht zurück und schwankt je nach Studie im Bereich um 0.4 logMar [Wiley 1989; Kotulak, Rash 1992].

Vergleichend bezüglich der Phosphorfarbe wurden bisher lediglich zwei Untertypen des grünen Phosphors unter statischem Versuchsaufbau hinsichtlich des Visus der Probanden untersucht [Rabin, McLean 1996]. Diese Untersuchung aus dem Jahre 1996 verglich unter statischen Bedingungen Visus und Kontrastsehen unter Nutzung der grünen Phosphortypen P22 und P43, sowie kombiniert mit je einem der beiden Typen pro Auge. Hier konnten unter sinkenden Beleuchtungsverhältnissen von Vollmondäquivalent bis zu bedecktem Nachthimmel keine signifikanten Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Nachtsichtbedingungen (P22, P43, kombiniert) gemessen werden. Unter der gleichen Annahme wie in der Studie von Rabin und McLean, sollten auch mit den Nachtsichtgeräten in unserer aktuellen Studie bei gleichen Beleuchtungs- und Kontrastniveaus der Abbildungen, sowie technischen Eigenschaften der Bildverstärkerröhren keine Performanceunterschiede zwischen den beiden getesteten Phosphorfarben nachweisbar sein. Dennoch fehlten bisher hierzu empirische Beweise und auch diesmal könnten mögliche zusätzliche Faktoren wie chromatische Aberration oder die spektrale Bandbreite der gebotenen Stimuli einen Einfluss auf die Testergebnisse haben.

Aufgrund der Nutzungshäufigkeit stehen Piloten von Militärflugzeugen sowie Militärhubschraubern im Zentrum der bisherigen Versuchsanordnungen. Hierbei liegt gemäß der Nutzungsanforderung ein deutlicher Untersuchungsschwerpunkt auf Visus und Stereopsis, da die direkte Sicht aus dem Cockpit, zumindest bei Tageslicht, auch bei modernen Fluggeräten das wichtigste Navigations- und Orientierungswerkzeug darstellt [Wiley, 1989]. Wiley verglich hierzu in genannter Studie monokulare, biokulare sowie binokulare Nachtsichtgeräte hinsichtlich Visus und Stereopsis unter sinkenden Beleuchtungsverhältnissen. Gemessen wurde hier mit einem Howard-Dolman-Apparat, bei dem die Probanden einen beweglichen vertikalen Stab ferngesteuert auf die gleiche Entfernungsebene zu einem in der Position fixierten Stab bringen mussten. Dieser Apparat dient der Stereopsismessung mit Blick in die Ferne (optisch im Unendlichen) und ist gleichzeitig NVG-kompatibel. Hierbei werden optische Hinweise, welche eine Tiefenwahrnehmung über Perspektive und Erfahrung simulieren, bewusst auf ein mögliches Minimum reduziert. Es konnte gezeigt werden, dass unabhängig der okularen Bauweise eine echte Stereopsis unter Nutzung eines Nachtsichtgeräts weitestgehend aufgehoben war. Erklärt wurde dies, bei dem verwendeten binokularen Aufbau, durch die auf die Ferne gerichtete parallele Anordnung der Bildverstärkerröhren, ohne Möglichkeit zur Konvergenz, welche im nahen bis mittleren Sehbereich einen entscheidenden Anteil an der Stereopsis hat, sowie den tatsächlichen Blick auf 2D-Bildschirme, der bei fehlenden Hinweisen für eine Tiefenwahrnehmung

(Überlagerung, bekannte Größen, Perspektive, Schattenwurf) keine Performance entsprechend einer echten Stereopsis ermöglicht.

Die Visusergebnisse waren bei den verwendeten Nachtsichtgeräten vergleichbar. Eine weitere Studie zum okularen Aufbau von CuQlock-Knopp et al. (1995) untersuchte das Bewegungsverhalten in unterschiedlichen Geländeformationen unter Nutzung von monokularen, biokularen und binokularen Nachtsichtgeräten. Hier konnte gezeigt werden, dass unter binokularen Nachtsichtgeräten eine signifikant bessere Performance erreicht wurde. Die Probanden bewegten sich schneller durch alle gegebenen Geländeformationen (Waldgelände, abfallendes Gelände sowie flaches Wiesengelände) und machten weniger Fehler (Stolpern, Straucheln, Stoppen, etc.) im Vergleich zur Nutzung von monokularen sowie biokularen Nachtsichtgeräten. Bei den beiden letztgenannten konnten keine signifikanten Unterschiede gemessen werden. Somit scheint trotz aufgehobener Stereopsis der binokulare Aufbau durch die realitätsnähere Tiefenwahrnehmung den einfachen Ausfertigungen der NVGs überlegen.

Bezüglich der Beleuchtungsbedingungen der Messreihen konnten Kotulak und Rash (1992) zeigen, dass unter Laborbedingungen mit entsprechender künstlicher Beleuchtung und unter Einsatz von spektralen Filtern für Nachtsichtgeräte der zweiten und dritten Generation ähnliche Visusergebnisse reproduziert werden konnten, wie sie in vorherigen Studien unter tatsächlichen Nachtsichtbedingungen unter freiem Himmel festgestellt wurden. Ein Ergebnis welches die Wahl der Indoor-Schießanlage mit künstlicher Beleuchtung als Ort der Versuche ermöglichte.

Rabin (1994) untersuchte visuell-evozierte Potentiale (VEP) bei Nutzung von Nachtsichtgeräten. Hierbei konnte gezeigt werden, dass VEP unter NVG-Nutzung messbar sind, jedoch eine klare Relation von VEP zur Anwenderperformance unklar bleibt.

Niall (1999) untersuchte die Einschätzung von Entfernungen unter Nutzung von NVGs. Hierbei mussten die Versuchsteilnehmer Entfernungen zwischen Markierungen in Abständen von 25 ft bis 210 ft (7,6 m bis 64 m) unter Nachtsichtbedingungen schätzen. Die initialen Schätzungen neigten hierbei zu kürzeren Ergebnissen als die tatsächlichen Entfernungen, woraufhin ein direktes Feedback gegeben wurde. Als Resultat waren die folgenden Schätzungen signifikant besser. Ein erneuter Testdurchlauf eine Woche später zeigte einen Erhalt des vorausgegangenen Lerneffekts mit signifikant besseren Schätzungen als im Erstdurchlauf. Dieses Ergebnis weist somit auf ein Lernkurvenverhalten in der NVG-Nutzung bzgl. richtiger Entfernungseinschätzung hin. Da Entfernungsschätzungen aufgrund der ballistischen Eigenschaften der Geschosse wesentliche Grundlage einer effektiven Waffennutzung sind empfiehlt sich somit ein NVG-erfahrenes Versuchskollektiv für unsere Untersuchung. Des Weiteren wurden in diversen Studien zur Performance von medizinischen Handlungen (Legen intravenöser Zugänge, endotracheale

Intubationen, offene Operationen an Versuchstieren) unter Nutzung von Nachtsichtgeräten durchgeführt [Schwartz et al. 2001; Bilge et al. 2017; Vázquez et al. 2010]. Zusammenfassend sind prinzipiell alle getesteten Handlungen möglich, werden allerdings von den Probanden als erschwert im Vergleich zum Normalsehen beschrieben, so dass einerseits Erfahrung der Probanden im Ablauf der jeweiligen Handlung an sich, als auch Training der Handlung unter Nutzung eines Nachtsichtgeräts maßgebliche Einflüsse auf die Performance mit diesen Geräten haben. Hierbei kamen unterschiedliche Versionen und Aufbauten der Nachtsichtgeräte zum Einsatz. Relevante Abhängigkeiten der Performance von bestimmten NVG-Typen waren jedoch im Vergleich zu den Parametern Erfahrung und Übung zu vernachlässigen.

## **3 Material und Methoden**

### **3.1 Ortswahl und Versuchskollektiv**

Die Versuche der Arbeit fanden im Schießzentrum des KSK in Calw statt. Hierbei handelt es sich um eine Indoor-Schießanlage, welche für die Ausbildung der Spezialkräfte genutzt wird. Hauptgrund für die Ortswahl war die hier verfügbare 360° Schussfangvorrichtung, durch welche im Gegensatz zu regulären Schießbahnen ein flexibler, dynamischer Versuchsaufbau eingesetzt werden konnte. Gleichzeitig konnte aus den Angehörigen der Spezialkräfte vor Ort das Kollektiv der Versuchsgruppe gewonnen werden.

Zur Versuchsgruppe gehörten 49 Angehörige der Spezialkräfte (48 M / 1 W). Die Auswahl der Teilnehmer erfolgte aufgrund der speziellen Vorausbildung bezüglich der individuellen Schießfähigkeit. Kommandosoldaten durchlaufen eine 3-jährige Basisausbildung u.a. mit intensiver Schießausbildung [Blank 2017]. Im Vergleich zu anderen Versuchskollektiven, beispielsweise Soldaten aus anderen Truppengattungen, finden sich hier Unterschiede in der individuellen Schießleistung erst auf einem sehr hohen Niveau, so dass für unsere Auswertung von nicht-signifikanten Unterschieden zwischen den individuellen Schießleistungen ausgegangen werden konnte. Hierdurch konnten Änderungen der Schießleistung direkt den Änderungen der Schießbedingungen zugeordnet werden. Gleichzeitig waren die Teilnehmer in der Anwendung der Nachtsichtgeräte ausbildungsbedingt handlungssicher.

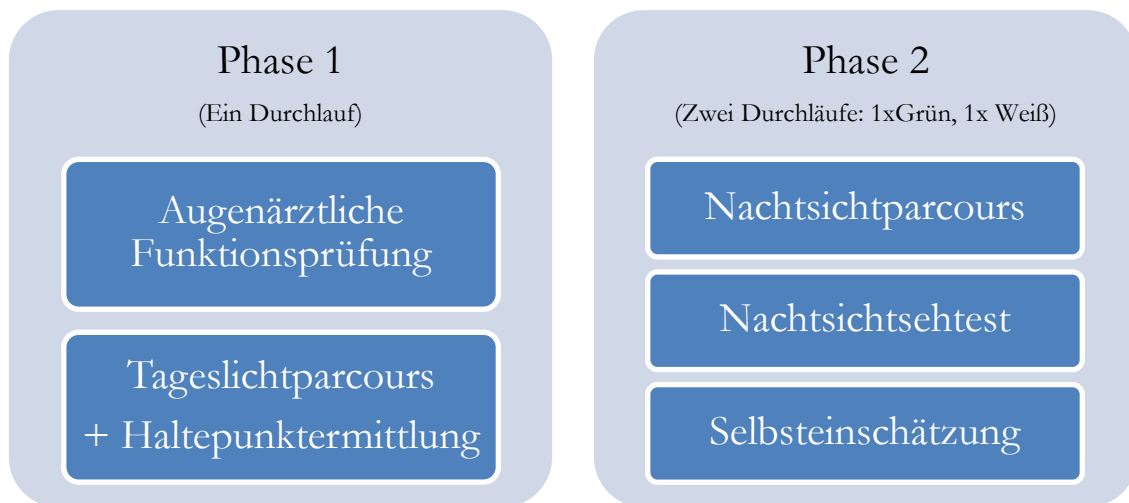
### **3.2 Einschlusskriterien**

Bedingung zur Teilnahme an der Versuchsreihe waren zusätzlich zur Zugehörigkeit zu den Spezialkräften ein binokularer Visus von mindestens 0,8 (0.1 LogMar) welcher von allen Teilnehmern erreicht sowie überwiegend (48 Teilnehmer) übertroffen wurde. Gewählt wurde für den gesamten Ablauf das binokulare Sehen, da dies der tatsächlichen Einsatzrealität entspricht.

### **3.3 Versuchsaufbau und Ablauf**

Diese 49 Personen durchliefen eine zweiphasige Versuchsanordnung. Der Deklaration von Helsinki in der aktuellen Version (2013) wurde entsprochen. Der Datenschutz wurde durch Anonymisierung der Daten bei der Erfassung sichergestellt.

Nach Aufklärung und Einverständniserklärung zur Teilnahme erfolgte der Durchlauf der beiden Versuchsphasen, welche ihrerseits jeweils noch in zwei Teilabschnitte unterteilt waren.



**Abbildung 4** - Ablaufschema des Versuchs mit den Phasen 1 und 2 und den jeweiligen Teilabschnitten

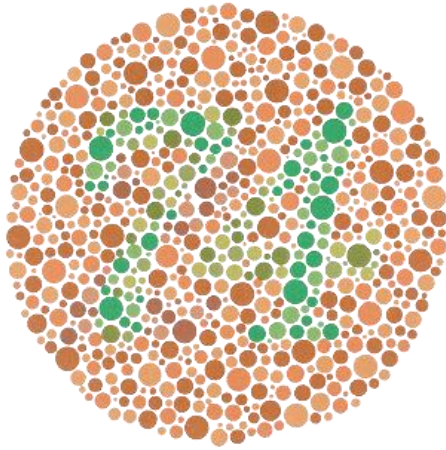
### 3.3.1 Phase 1: Augenärztliche Funktionsprüfung und Haltepunktermittlung

Ziel dieser Phase war einerseits eine augenärztliche Funktionsüberprüfung der Probanden hinsichtlich Visus, Stereopsis und Farbsichtigkeit, andererseits die Feststellung von Sicherheit an der Waffe sowie Ermittlung des lasergestützten Zielhaltepunkts der Waffensysteme (s.u.). Hierzu wurden in Phase 1 zwei Teilabschnitte unterschieden, welche die Probanden in zwei Untergruppen durchliefen.

#### Teilabschnitt 1: Augenärztliche Funktionsüberprüfung:

Hier erfolgte die Überprüfung möglicher Ausschlusskriterien: Die Probanden sollten einen bestkorrigierten binokularen Visus von 0,8 (0.1 LogMar) erreichen. Hierzu diente ein binokularer Visustest mittels Buchstabenchart nach ETDRS-Protokoll (Early Treatment Diabetic Retinopathy Study) auf 6 Meter Entfernung unter optimierter Beleuchtung entsprechend der Originalstudienvorgaben mit einer Leuchtdichte von 250 cd/m<sup>2</sup> [Todd et. al.]. Der erforderliche Zielbereich von LogMar 0.1 bis 0.0 war gesondert markiert, um einen schnelleren Ablauf zu ermöglichen. Gezählt wurden entsprechend des ETDRS-Protokolls die einzeln erkannten Sehzeichen als ETDRS-Score um eine genaue Abgrenzung bei gleichzeitig hoher Trennschärfe zu ermöglichen, da bei dem gewählten Kollektiv gute Visuswerte zu erwarten waren [Todd et al. 2013]. Zudem erfolgte ein Screening hinsichtlich Farbsichtigkeit mit Ishihara-Farbtafeln sowie ein Stereopsistest mit Tithmus-Ringen, da diese im Rahmen des augenärztlichen Begutachtungsverfahrens der Bundeswehr regelhaft zur Anwendung kommen und somit eine einfache Vergleichbarkeit zu anderen Kollektiven ermöglichen. Beim Ishihara Farbttest werden dem Probanden Abbildungen gezeigt, bestehend aus runden Farbpunkten unterschiedlicher Farbnuancen mit zentraler Darstellung von beispielsweise Zahlen oder Buchstaben in

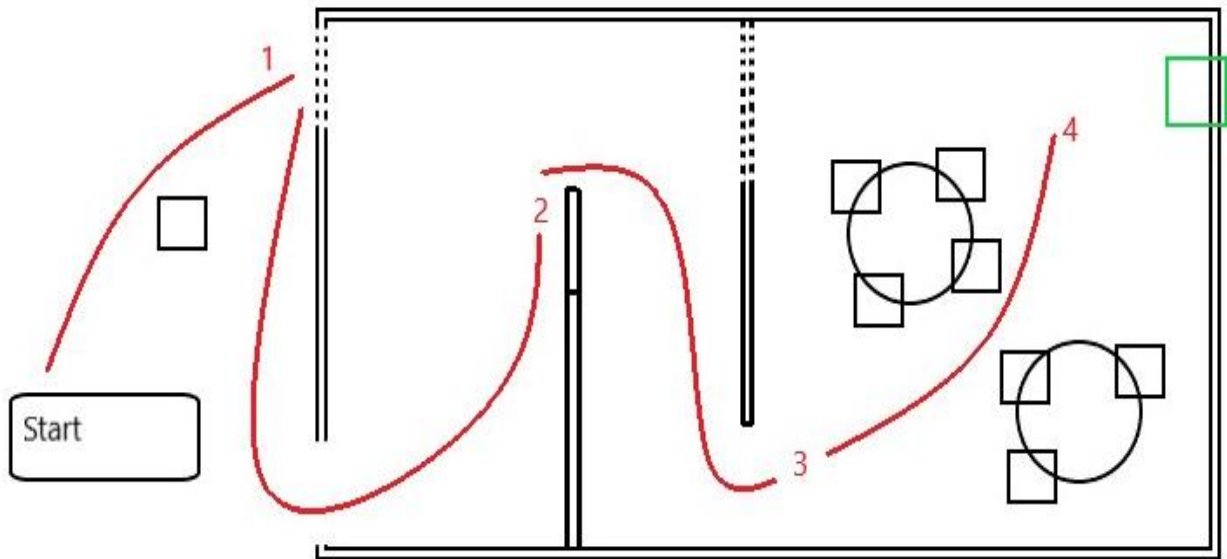
kontrastierter Farbgestaltung, aber gleicher Intensität und Helligkeit. Bei bestehender Farbschwäche können die zentral abgebildeten Zahlen bzw. Buchstaben nicht aus den Umgebungspunkten heraus erkannt werden.



**Abbildung 5** - Beispiel Ishihara Farbtafel zur Rot-Grün Unterscheidung. Zentral zu sehen eine 74, bei Rot-Grünschwäche kann eine 21, 71 oder gar keine Zahl identifiziert werden.

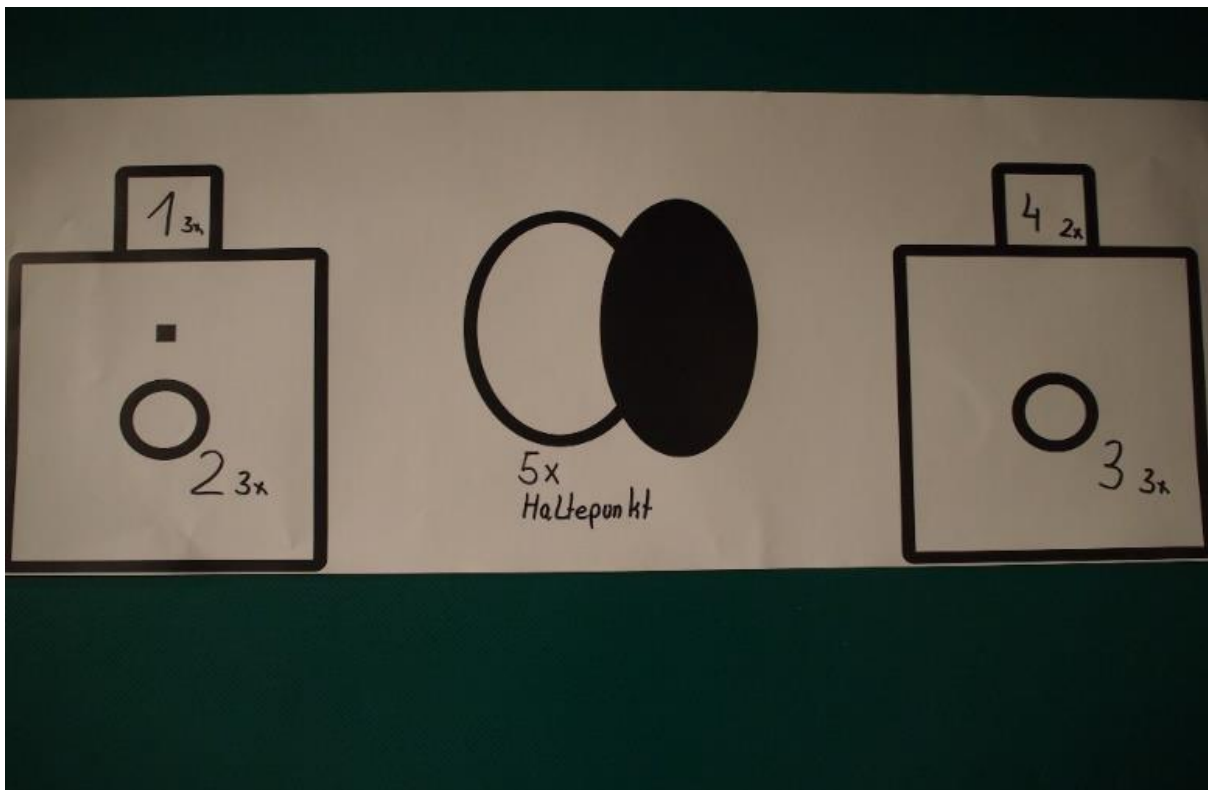
#### Teilabschnitt 2: Versuchsdurchlauf bei Tageslicht sowie Zielhaltepunktermittlung:

Dieser Abschnitt nutzte die 25 m-Schießbahn des Schießzentrums. Hier wurde der in Phase 2 zur Anwendung kommende Schießparcours installiert, so dass ein Sicherungs- und Einweisungsdurchgang erfolgen konnte.

Parcoursdetails:

**Abbildung 6** - Parcoursplan mit Stationsdurchlauf und Schießstationen (rot) und Zielchart (grün)

Der Parcours beinhaltete vier Schießübungen, die sich hinsichtlich Entfernung, Schießposition sowie Zielfeld unterschieden und der Reihe nach durchlaufen werden mussten.



**Abbildung 7** - Zielchart Tageslichtdurchlauf mit Stationen und Schussanzahl (rechts und links). In der Mitte Zielchart zur Haltepunktermittlung des Infrarot-Ziellasers.

### Das Ziel-Chart:

Genutzt wurde das Bildverstärker (BIV)-Target des KSK (s. Abb. 7). Zur Wahl dieses Zielcharts gegenüber möglichen anderen Optionen (z.B. Ringcharts, wie sie im Schießsport Anwendung finden) führte der Aspekt der Zielorientierung: Primär sollte nicht generell die Mitte eines großen Ziels gesucht werden, sondern einsatznäher, in einem Zielbereich kleinere Zielfelder von Situation zu Situation voneinander differenziert und gezielt bekämpft werden. Gleichzeitig musste sichergestellt werden, dass einer Identifizierung des Zielbereichs im Raum (Charttafel) auch eine Zielidentifizierung innerhalb des Zielbereichs (Zielfelder) zeitnah folgen konnte. Hierzu war eine entsprechende Kontraststärke von Zielfeld zu Zielbereich, sowie von Zielbereich von Umgebungsbereich notwendig, welches in Kombination vom gewählten BIV-Target erfüllt wurde. Zusätzlich wurde durch die Felderung des BIV-Targets eine klare Abgrenzung der einzelnen Schießübung in der Auswertungsphase ermöglicht.

Parcoursabfolge: Gestartet wurde auf Kommando von der Startposition ca. 4 m vor der Parcourskonstruktion. Auf dem geraden Weg zur Übung 1 befand sich ein kleines Hindernis in Form eines Gartenstuhls welches umlaufen werden musste.

### Übung 1: Drei Schuss, kniend aufgelegt. Zielentfernung: 12 m, Zielgröße: 5 × 5 cm

Der Schütze fand an dieser Stelle eine Fensteröffnung in der Wandbarriere vor, durch welche das Zielchart durch eine weitere Öffnung in einer Zwischenwand im hinteren Teilbereich des Parcours an der Wand hängend sichtbar war. Hier musste der Schütze unter Zuhilfenahme der Fensterbank (aufgelegt) in kniender Position drei Schuss auf das linke obere Teilzielfeld abgeben.

### Übung 2: Drei Schuss, stehend angestrichen. Zielentfernung: 10 m, Zielgröße: 16,5 × 18,5 cm

Nach erfolgter Übung 1 erfolgte das Betreten der Parcourskonstruktion bis zur Übung 2.

Hier fand sich der Schütze vor der oben beschriebenen Öffnung in der Zwischenwand, durch welche das Zielchart erneut sichtbar war. Hier sollten unter Ausnutzung der Deckungsmöglichkeit durch die endende Wand bei 2 (s. Parcourskizze Abb. 6) drei Schuss im Stehen unter Zuhilfenahme der o.g. Wand zur Stabilisierung der Zielbewegung (angestrichen) auf das größere, Teilzielfeld links unten erfolgen.

### Übung 3: Drei Schuss gehend, freihändig. Zielentfernung: 9-4 m, Zielgröße: 16,5 × 18,5 cm

Nach Umlaufen der o.g. Zwischenwand betrat der Schütze den hinteren Raum des Parcours, in welchem das Zielchart an der Wand angebracht war. Hier sollten in nähernder Bewegung zum Ziel drei Schuss freihändig auf das größere, Teilzielfeld rechts unten abgegeben werden.

In diesem Raum waren zwei Garnituren Gartenmöbel (jeweils 1 Tisch, einmal 3, einmal 4 Stühle) installiert, so dass der Raum nicht geradlinig durchlaufen werden konnte. Die Hindernisse mussten im Rahmen der Schussabgabe umlaufen werden.

**Übung 4: Zwei Schuss stehend, freihändig. Zielentfernung: 3 m, Zielgröße: 5 × 5 cm**

Nach Abschluss der Bewegung durch den Raum in Übung 3 erreichte der Schütze eine Positionsmarkierung 3 m vor dem Zielchart. Hier sollten zwei Schuss auf das kleinere, rechte obere Teilzielfeld abgegeben werden.

Dieser Parcours wurde von allen Probanden unter Tageslichtbedingungen einmal absolviert.

Gemessen wurden Trefferaufnahme sowie benötigte Gesamtzeit des Durchlaufs.



**Abbildung 8** - Sicht des Schützen an der Startposition. Zu sehen ist der Gartenstuhl als zu umlaufendes Hindernis und dahinter Schießposition 1 („Fensteröffnung“ zwischen grauer und gelber Wand).

**Zielhaltepunktermittlung:**

Nach Abschluss des Durchlaufs erfolgte auf dem Zielchart die Zielhaltepunktermittlung. Hierzu wurden unter Nachtsichtbedingungen fünf Schuss auf die zentralen Ovale des Zielcharts abgegeben mit dem Ziel, möglichst mittig zu treffen. Unter Nachtsicht erfolgt die Zielfindung nicht

mittels Zielvisier der Waffe, wie es unter Tageslichtbedingungen der Fall ist, sondern mittels Projektion eines Infrarotstrahls auf das Ziel. Dieser ist ausschließlich mit Nachtsichtgerät sichtbar. Hierdurch ist es dem Nutzer des Waffensystems möglich, ohne die Verzögerung der Visiernutzung zielsicher zu wirken. Erforderlich ist dafür jedoch die Ermittlung des Zielhaltepunkts, da die tatsächliche Trefferwirkung zwar stets konstant zum Zielpunkt gelegen ist, jedoch unter Umständen geringfügig von diesem abweicht (je nach Feineinstellung der Infrarot-Zieleinrichtung). Da die Waffe, mit welcher der jeweilige Proband die verschiedenen Versuchsdurchläufe absolvierte, identisch war, konnte eine Haltepunktermittlung für den gesamten Ablauf als ausreichend identifiziert werden.

Geschossen wurde in allen Phasen mit je einem von vier G36K-Sturmgewehren der Firma Heckler & Koch aus dem Bestand der aktiven Einsatzwaffen der Spezialkräfte, wodurch die einwandfreie Funktion von Waffe und Visiereinrichtung sichergestellt waren. Diese Waffen wurden zahlenmarkiert, so dass eine Verwechslung zwischen den einzelnen Durchläufen ausgeschlossen werden konnte.

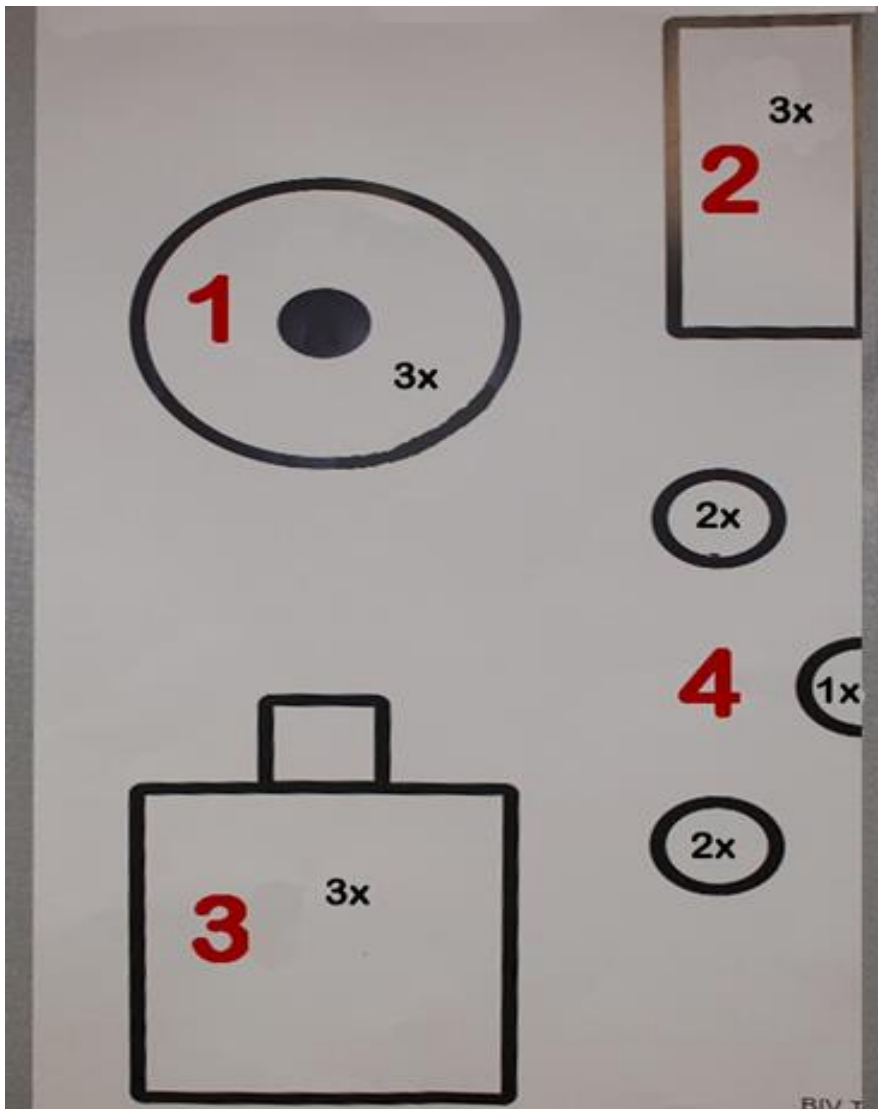
Als Nachtsichtgeräte verwendet wurden vier baugleiche QuadEye-Systeme der Firma L3, jeweils zwei mit grünen (P43) und zwei mit weißen Phosphorschirmen (P45) in den eingebauten Bildverstärkerröhren, ebenfalls aus dem Bestand der Einsatzsysteme und ebenfalls zahlenmarkiert zur Sicherstellung des einheitlichen Einsatzes.

### **3.3.2 Phase 2: Nachtsichtparcours, Nachtsichtvisus, Selbsteinschätzung**

Phase 2 erfolgte aufgeteilt in drei Stationen, welche in festgelegter Reihenfolge jeweils zweimal durchlaufen wurden. Die verwendete Phosphorfarbe blieb pro Durchgang konstant. Die Probanden waren hinsichtlich der zuerst verwendeten Phosphorfarbe randomisiert. Ort des Geschehens war diesmal das Schießtheater des Schießzentrums, eine Schießanlage mit mehreren, abgrenzbaren Räumen und Etagen inklusive Treppenauf- und -abgängen, welche es ermöglichte, die verschiedenen Stationen im Rundlauf durchlaufen zu können, ohne dass unbeteiligte Personen Räume mit Schießaktivität durchlaufen mussten.

#### **Station 1: Durchlauf des Schießparcours unter Nachtsichtbedingungen**

Der Parcoursaufbau war identisch zur Phase 1, die Schießaufgaben waren von vergleichbarer Schwierigkeit.



**Abbildung 9** - Zielchart Nachtsichtparcours mit Stationen (rote Zahlen) und Schusszahl (schwarze Zahlen), Die Beschriftung wurde nachträglich eingefügt.

Verglichen zum Tageslichtdurchlauf waren sowohl Zielcharts als auch Aufgabenstellung dezent verändert:

Bei Übung 1 war die Zielfläche im Vergleich zum Vorabdurchlauf deutlich vergrößert (Zielgröße:  $\varnothing$  16,5 cm). Und hatte zudem mit der schwarzen Kreisfläche zentral eine kontrastreiche Orientierungshilfe zum Zentrum der Zielfläche

Übung 2 war im Vergleich zur Voraufgabe in der Fläche halbiert (Zielgröße: 8,5 x 18,5 cm)

Übung 3 war zur Voraufgabe identisch,

Übung 4 bestand diesmal aus fünf Schuss auf drei Ringziele, wovon jedes volle Ziel zweimal, das halbe Ziel einmal zu treffen waren. (Zielgröße:  $\varnothing$  5,5 cm volles Ziel)



**Abbildung 10** - Sicht des Schützen bei Schießübung 1, Zielchart an der hinteren Wand (gelber Pfeil)



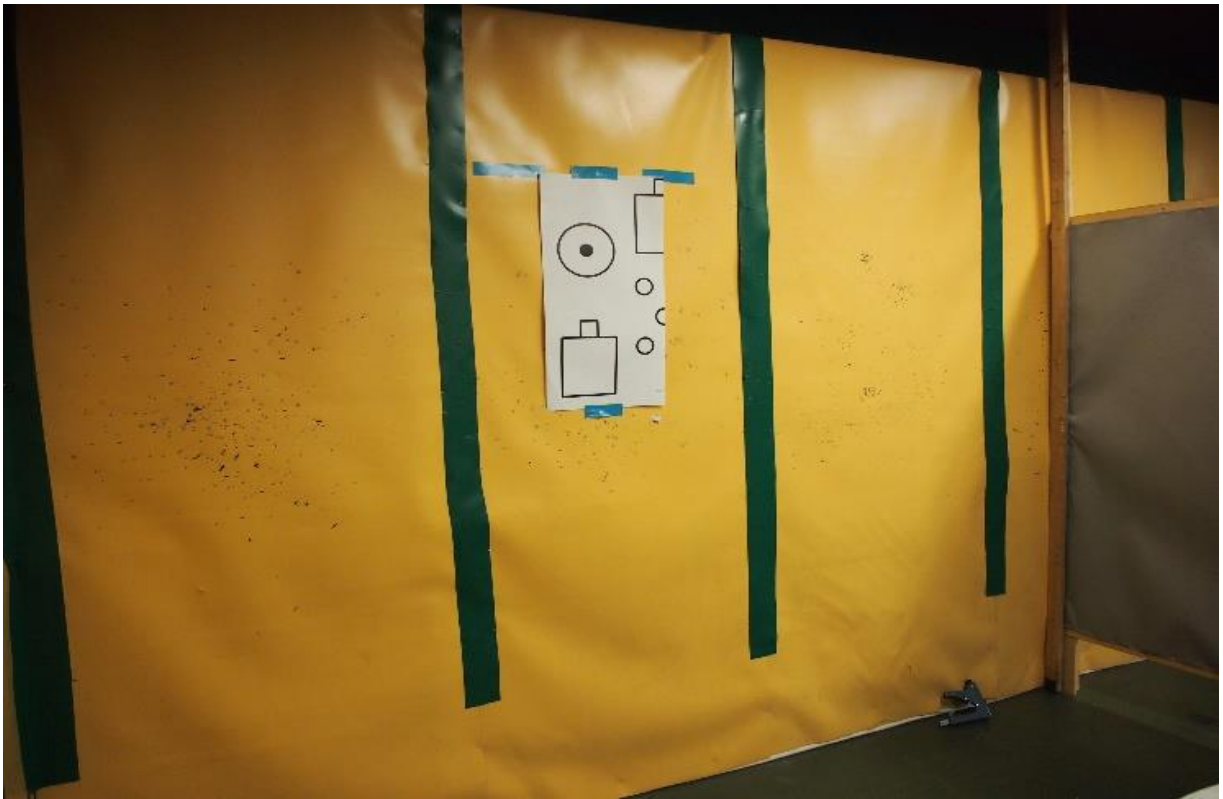
**Abbildung 11** - Sicht des Schützen bei Schießübung 2

Gemessen wurden wiederum Trefferaufnahme sowie Gesamtzeit des Durchlaufs.

Die Nachtsichtbedingungen waren durch Abdunkelung der Versuchsräume gegeben. Somit konnten im gesamten Bereich des Parcours und vor der Visustafel Beleuchtungsniveaus von 0,00001 lx realisiert werden. Dies entspricht einer für das bloße Auge vollständigen Dunkelheit, in der auch nach vollständiger Dunkeladaptation selbst große Umrisse auf 6 m Entfernung nicht mehr wahrgenommen werden können. Zur Beleuchtung wurde die vorhandene Infrarotbeleuchtung der Schießanlage aktiviert. Der Frequenzbereich der Beleuchtung entsprach im Schwerpunkt dem Bereich der nahen bis mittleren Infrarotstrahlung (ca. 800 nm bis 50000 nm) und sorgte für eine vollständige Ausleuchtung der Versuchsräume. Dies gewährleistete konstante optimale Nachtsichtbedingungen unter NVG-Nutzung sowie völlige Dunkelheit für das bloße Auge während der gesamten Versuchszeit. Aus Sicherheitsgründen war der Ablauf Videoüberwacht.



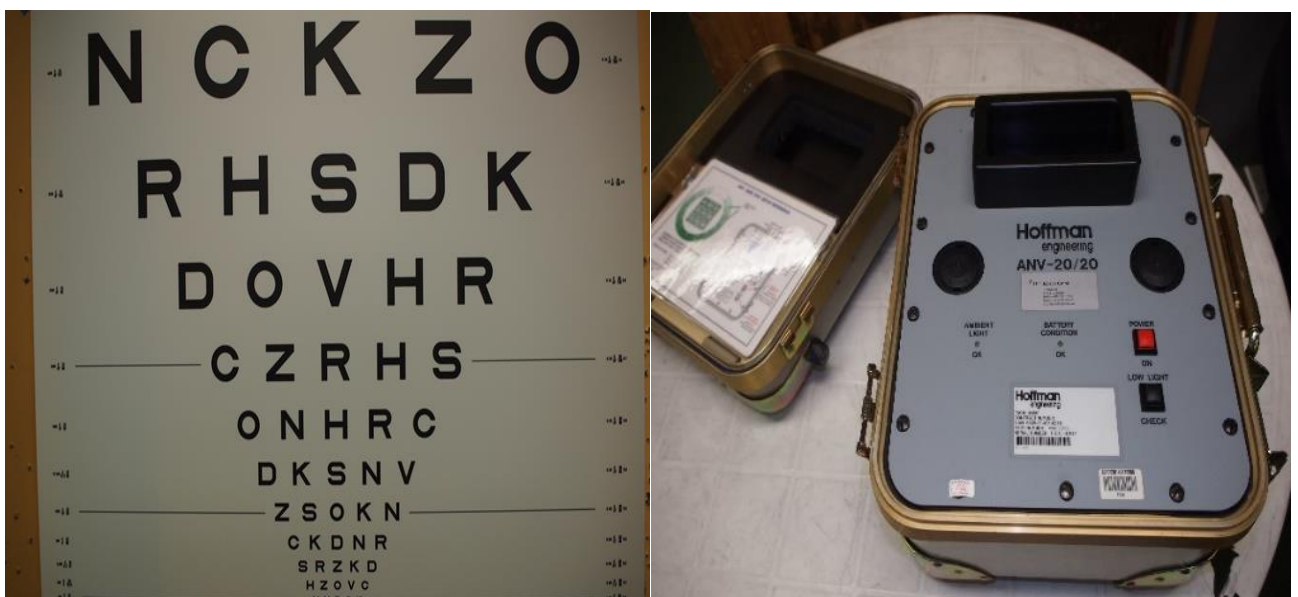
**Abbildung 12** - Sicht des Schützen bei Beginn von Schießübung 3, an der Wand das Ziel-Chart, im Vordergrund das zu umlaufende Möbelhindernis



**Abbildung 13** - Sicht des Schützen bei Schießübung 4. Zielchart in ca. 3 m Entfernung

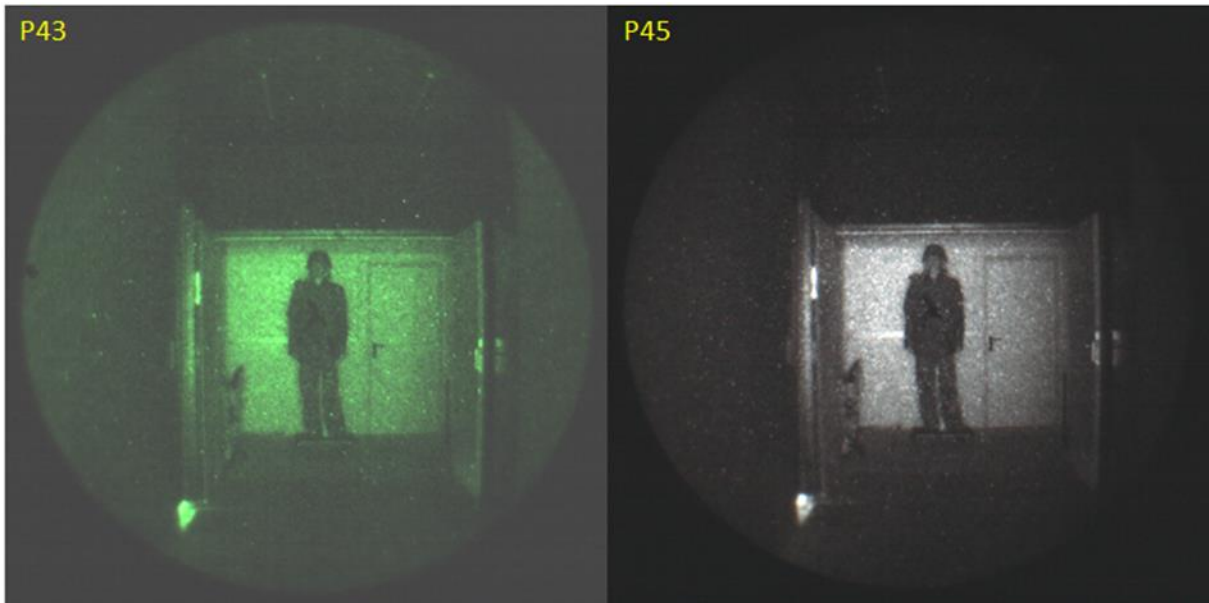
### Station 2: Visustest unter Nachtsichtbedingungen

Hier erfolgte die Ermittlung des binokularen Visus unter Nachtsichtbedingungen. Zunächst erneut mittels eines ETDRS-Charts in 6 m Entfernung. Hier wurden wie bereits in Phase 1 die einzelnen erkannten Buchstaben gezählt, um eine präzisere Abgrenzung der ermittelten Visuswerte zu erreichen. Zusätzlich erfolgte die Überprüfung der Kontrastauflösung mittels der Hoffmann



**Abbildung 14** - links ETDRS-Chart, rechts Hoffmann Engineering AVN20/20

Engineering AVN 20/20. Hierbei mussten die Probanden in Kontrastfeldern feiner werdende Linien voneinander abgrenzen und das Feld mit den feinsten noch voneinander abgrenzbaren Linien bestimmen.



**Abbildung 15** - Sicht durch ein Nachtsichtgerät mit P43 (grün) bzw. P45 (weiß) Phosphor bei vergleichbarer Geräteleistung zur Veranschaulichung des Farbunterschieds. Da im Versuch ein anderes Gerät verwendet wurde, ist die Bildauflösung nicht vergleichbar (mit freundlicher Genehmigung, Fraunhofer IOSB, Ettlingen).

### Station 3: Fragebogen zur subjektiven Einschätzung

Hier erfolgte nach Durchlaufen der Schießaufgaben sowie der Visusbestimmung eine subjektive Ermittlung der Selbsteinschätzung der Probanden zum Versuchsablauf. Es mussten 14 Fragen nach Kategorien von 1 (trifft voll zu) bis 6 (trifft überhaupt nicht zu) beantwortet werden.

1. Die gestellten Aufgaben waren klar verständlich.
2. Die gestellten Aufgaben waren einfach umzusetzen.
3. Ich konnte meine Schießleistung sicher einschätzen.
4. Während der Aufgabe kam es zu keinerlei Komplikationen.
5. Ich fühlte mich im Umgang mit dem NVG sicher.
6. Der Seheindruck mit NVG gleicht dem Seheindruck ohne NVG bei Tageslicht.
7. Der 3-dimensionale Seheindruck gleicht dem Seheindruck ohne NVG bei Tageslicht.
8. Meine Schießleistung war bei Tageslicht besser.
9. Mein Gleichgewichtsgefühl in Vorwärtsbewegung mit NVG war wie bei Tageslicht.

- 10. Mein Gleichgewichtsgefühl in Rückwärtsbewegung mit NVG war wie bei Tageslicht.**
- 11. Der Gleichgewichtstest war mit NVG schwieriger als im Testdurchlauf.**
- 12. Das Hindernisgehen war mit NVG schwieriger als bei Tageslicht.**
- 13. Meine Schutzbrille zeigte Nebelbeschlag.**
- 14. Während des Ablaufs bemerkte ich Schwindel oder Übelkeit.**

Die Fragen 1-4 dienten der allgemeinen Einschätzung der Aufgaben sowie der Ablaufbeurteilung.

Die Fragen 5-8 dienten dem subjektiven Vergleich der beiden Nachtsichtfarben mit Tageslichtbedingungen

Die Fragen 9-14 waren ergänzende Fragen zur Gleichgewichtsmessung (ergänzende Untersuchungen) (s.u.) sowie Fragen nach selten berichteten Begleiterscheinungen unter Nachtsichtbedingungen. Den Probanden war für die Beantwortung kein Zeitlimit gegeben.

Nach Abschluss von Station 3 erfolgte ein zweiter Durchlauf der drei Stationen mit der jeweils anderen Phosphorfarbe.

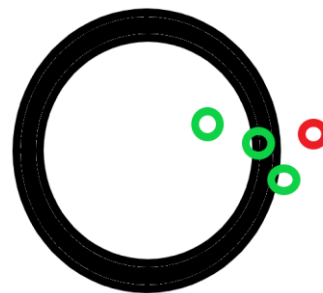
Parallel hierzu erfolgten Messungen zum Gleichgewichtsverhalten unter Nachtsichtbedingungen mittels des Vertiguard-Systems durch die Klinik für HNO des BWZK Koblenz, welche Teil einer gesonderten Arbeit sind.

### 3.4 Auswertungsmethodik

Aus den Versuchsdurchläufen wurde pro Teilnehmer eine zusammengehörige Datenmenge erhoben. Hierunter befanden sich u.a. die drei Zielcharts aus den jeweiligen Parcoursdurchgängen mit den darauf befindlichen Einschusslöchern. Diese wurden nach drei Kriterien ausgemessen:

1. Erfüllungsquote:

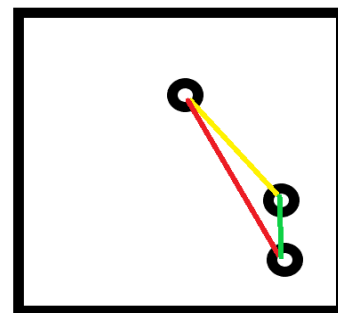
Gezählt wurde, wie viele Schuss pro Übung das jeweilige Ziel getroffen hatten. Die Trefferwertung orientierte sich an den gängigen Regelungen im Schießsport: Als Treffer wurde jeder Schuss gewertet, dessen Einschussöffnung innerhalb des Ziels lag oder den schwarzen Zielumgebungsrand berührte. Somit wurden auch „Streifschüsse“ als Treffer gewertet. Treffer außerhalb des Zielfelds welche aber noch auf dem Zielchart lagen wurden separat erfasst. Ebenfalls wurde erfasst, wenn Treffer nicht mehr auf dem Zielchart lagen (fehlende Einschusslöcher).



**Abbildung 15** - Trefferwertung:  
Grün: erfüllt    Rot: nicht erfüllt

2. Treffergruppierung:

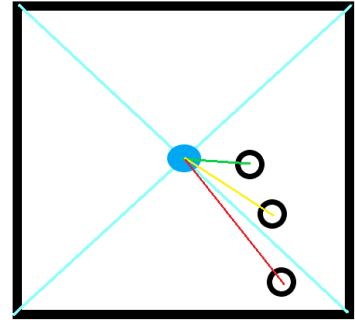
Gemessen wurden die Abstände der Treffer zueinander. Es wurden pro Übung größtenteils drei Schuss abgegeben (s. Ablauf). Da zum Zeitpunkt der Auswertung nicht mehr nachvollziehbar war, in welcher Reihenfolge die Treffer innerhalb einer Übung erfolgten, wurde in den Kategorien „längster Abstand“, „mittlerer Abstand“ und „kurzer Abstand“ zwischen jeweils zwei Treffern gemessen. Bei Übungen mit nur zwei Schuss entsprechend nur der einfache Abstand dieser beiden Treffer. Hierbei blieb die Zielerfüllung ohne Betrachtung und auch Treffer außerhalb des Zielbereichs wurden gemessen. Fehlten Einschusstreffer auf dem Zielchart wurden die vorhandenen Treffer soweit möglich ausgewertet. Die Kategorien „längster Abstand“ sowie gegebenenfalls zusätzlich „mittlerer Abstand“ entfielen in diesen Fällen.



**Abbildung 16** -  
Treffergruppierung: Abstände der  
Treffer zueinander. Grün: Kurz,  
Gelb: Mittel, Rot: Lang

### 3. Trefferzentrierung:

Gemessen wurde hier der Abstand der Treffer zum Mittelpunkt des jeweiligen Übungsziels. Hierzu konnten mithilfe einer durchsichtigen Folienschablone die jeweiligen Zielmittelpunkte markiert werden und anschließend die Abstände der Übungstreffer zu diesem Mittelpunkt bestimmt werden. Analog zur Treffergruppierung wurde hier ebenfalls die Zielerfüllung nicht betrachtet. Bei fehlenden Einschusstreffern wurden auch hier die vorhandenen Distanzen aufsteigend gewertet.



**Abbildung 17 -**  
Trefferzentrierung: Abstand vom  
Zielmittelpunkt Grün: Kurz,  
Gelb: Mittel, Rot: Lang

Eine Auswertung der o.g. Kriterien erfolgte zunächst für jeden der Parcoursdurchläufe getrennt (Tageslicht, Nachtsicht-Grün, Nachtsicht-Weiß). Anschließend wurde pro Versuchsteilnehmer der jeweils erste Durchlauf mit dem zweiten Durchlauf verglichen.

## 3.5 Statistische Analyse

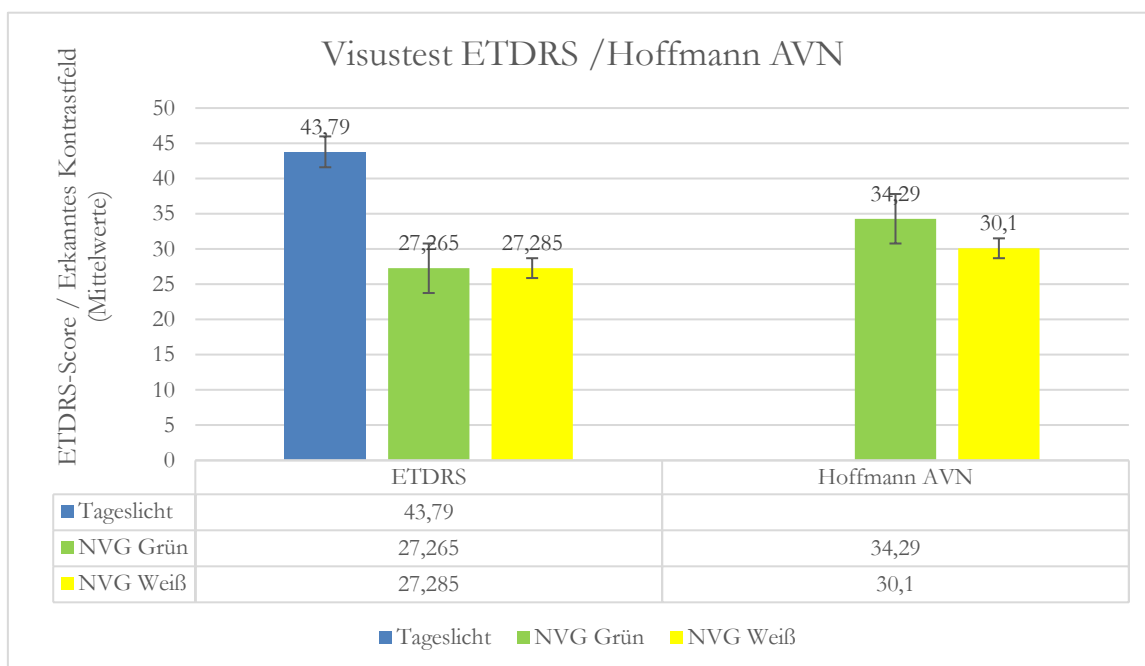
Die Unterschiede der jeweiligen Testergebnisse wurden mithilfe gepaarten Student's t-Test analysiert, wobei als signifikant unterschiedlich all jene Ergebnisse mit einem Wert von  $p < 0,05$  beurteilt wurden. Hierfür wurde die Software Microsoft Excel 2016 genutzt.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Aussagen zum Versuchskollektiv

Zunächst bestätigten sich die Erwartungen an das Versuchskollektiv. Aus der Gruppe der freiwillig Teilnehmenden erfüllten alle die Einschlusskriterien. Die erforderliche Visusstufe von binokular 0,8 (0.1 LogMar, entspricht einem ETDRS-Score von 40 Zeichen) wurde von allen Teilnehmern erfüllt und weitgehend übertroffen (48 Teilnehmer). Zudem konnten durchgehend sehr gute Trefferergebnisse erzielt werden. Durchschnittlich gelang es unabhängig von den Testbedingungen, die Treffer mit 3,08 cm Entfernung zueinander zu gruppieren, sowie 3,77 cm abweichend vom Mittelpunkt des jeweiligen Aufgabenziels zu zentrieren. Dies resultierte in einer durchschnittlichen Aufgabenerfüllung von 72,9 % unter Tageslichtbedingungen sowie 82,36 % bzw. 82,65 % unter den jeweiligen Nachtsichtbedingungen. Sofern die Übung Nr. 3, in welcher in Bewegung geschossen wurde, gesondert betrachtet wird, ergeben sich sogar durchschnittliche Treffergruppierungen von 2,35 cm sowie Trefferzentrierungen von durchschnittlich 3,54 cm. Zudem zeigten sich die Erfüllquoten auf den größeren Zielflächen (Tag Übung 2 und 3, Nachtsicht Übung 1, 2 und 3) im hohen 90 % Bereich.

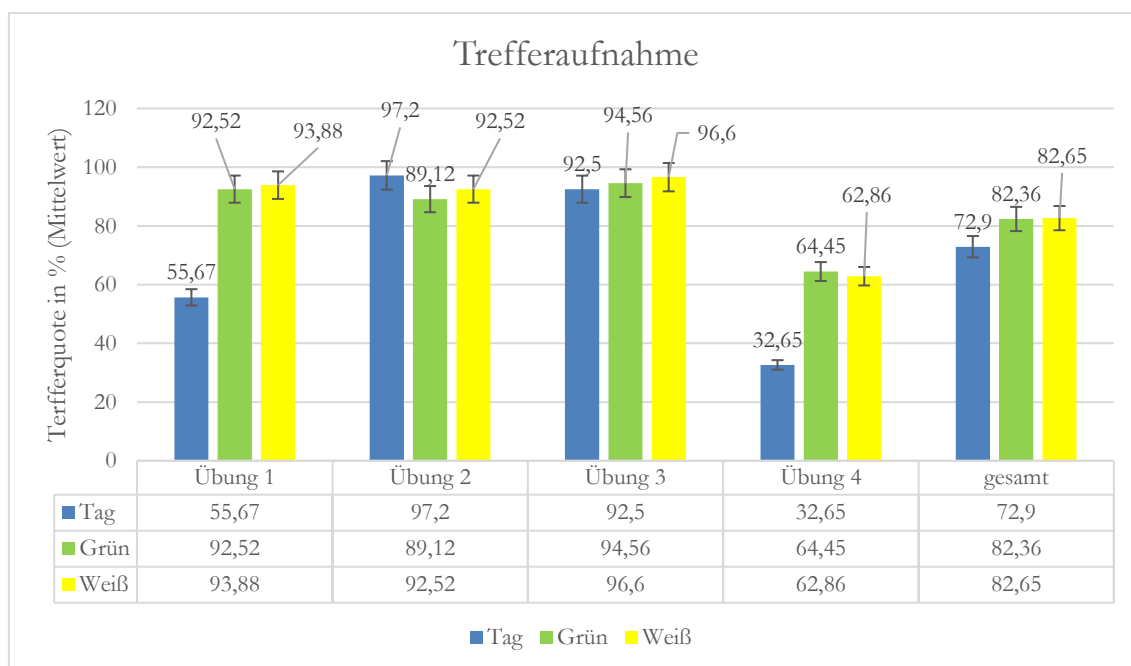
## 4.2 Visusergebnisse



**Tabelle/Diagramm 3** - Visusergebnisse: links ETDRS: Zu erkennen ist die hochsignifikant reduzierte zentrale Sehschärfe unter Nutzung eines Nachtsichtgeräts unabhängig von der Phosphorfarbe im Vergleich zum Tageslichtsehen. Rechts Hoffmann AVN: mit weißem Phosphor konnte ein Kontrastfeld (Feld 30) mehr erkannt werden als mit grünem Phosphor (Feld 35).

Die Visustests mit den ETDRS-Charts ergaben hochsignifikant bessere Ergebnisse in der Tageslichtsehschärfe im Vergleich zur Nachtsichtsehschärfe ( $p= 2,2 \times 10^{-30}$  (grün) bzw.  $7,58 \times 10^{-36}$  (weiß)). Die Unterschiede im Vergleich der beiden Phosphorfarben waren nicht signifikant ( $p= 0,97$ ) und durchschnittlich nahezu identisch. In der Hoffmann AVN 20/20 sind die zu erkennenden Felder in 5er-Schritten abgestuft, je kleiner das letzterkannte Feld beziffert ist, desto mehr Felder konnten erkannt werden. Kleine Werte bedeuten entsprechend bessere Visusergebnisse. Bei diesem Test konnte mit weißem Phosphor durchschnittlich eine Kontraststufe mehr differenziert werden (Feld 30) im Vergleich zum grünen Phosphor (Feld 35). Dieser Unterschied war hochsignifikant ( $p= 0,00068$ ).

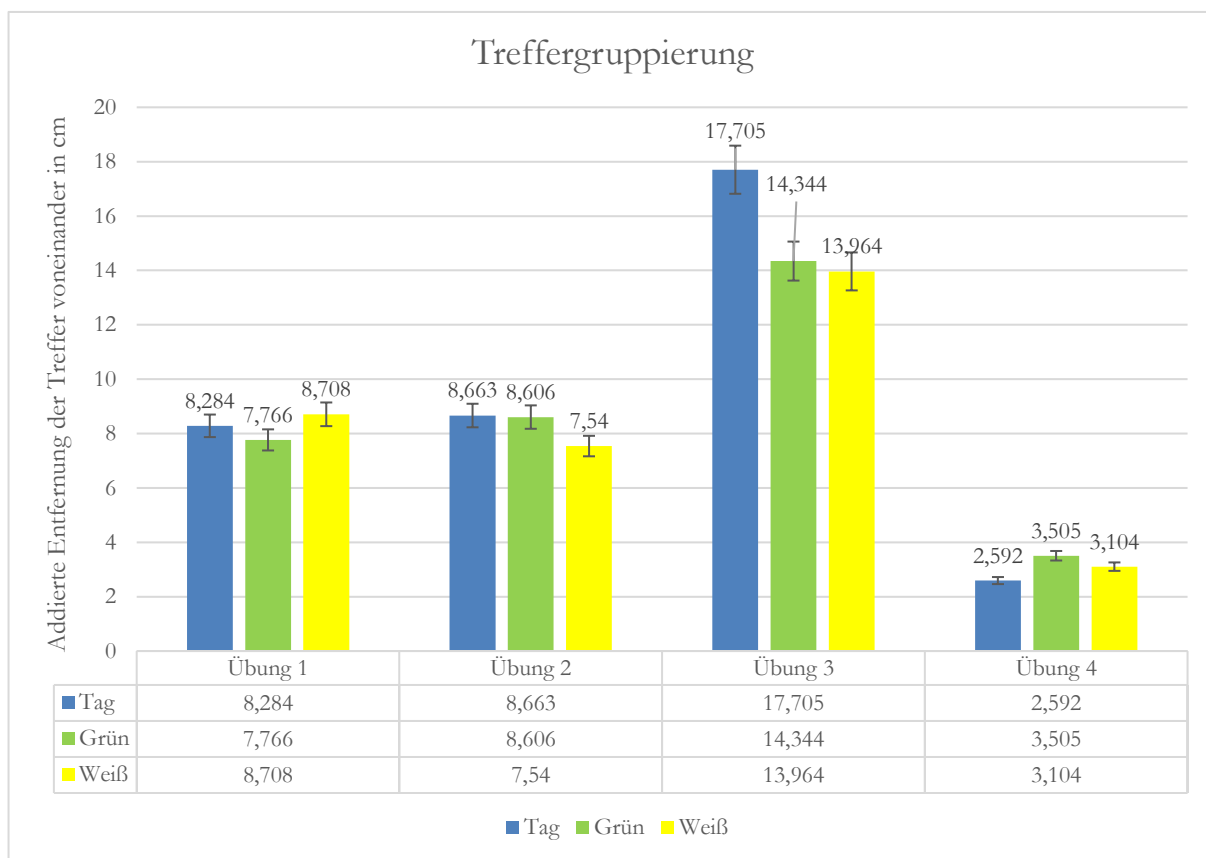
### 4.3 Trefferaufnahme



**Tabelle/Diagramm 4** - Trefferaufnahme: Prozentuale Trefferquote nach Übung aufgeteilt, zu erkennen ist die hochsignifikant bessere Trefferquote unter Nachtsicht durch die bessere Performance der Teilnehmer bei den kleineren Übungszielen bei Übung 1 und 4 welche durch die unterschiedliche Aufgabenstellung nicht vergleichbar sind.

Die Auswertungen der Trefferaufnahme ergaben zunächst hochsignifikant bessere Ergebnisse unter Nachtsichtbedingungen im Vergleich zu Tageslichtbedingungen ( $p=0,0005376$  Grün bzw.  $p=0,00038126$  Weiß). Die Gesamttrefferquote war mit weißem Phosphor im Vergleich zum grünen Phosphor durchschnittlich minimal besser, die Ergebnisse waren jedoch nicht signifikant ( $p=0,89$ ). Die großen Unterschiede in den Übungen 1 und 4 bei Tageslicht verglichen mit den Nachtsichtergebnissen resultieren aus der unterschiedlichen Aufgabenstellung dieser beiden Teilbereiche. Eine deutlich kleinere Zielfläche in Übung 1 sowie zwei zusätzliche Schuss bei Aufgabe 4 unter Nachtsichtbedingungen lassen bei diesen Übungen keinen sinnvollen Vergleich zwischen Tages- und Nachtsichtbedingungen zu.

## 4.4 Treffergruppierung

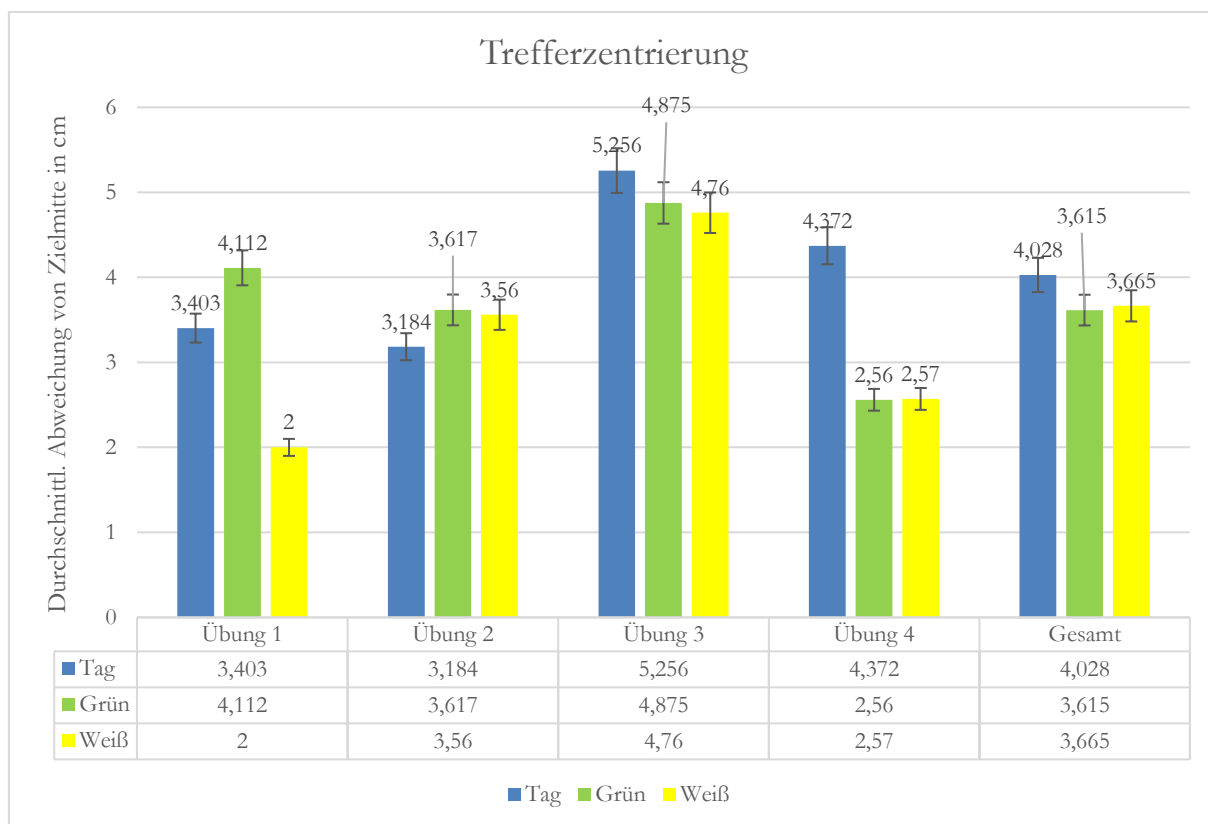


**Tabelle/Diagramm 5** - Treffergruppierung: addierte Entfernung der Treffer zueinander. Zu erkennen ist die hochsignifikant erhöhte Streuung der Treffer bei Übung 3 bei Tageslicht. Übung 4 ist aufgrund der unterschiedlichen Schusszahl nicht vergleichbar.

Die Treffergruppierung zeigte ein ähnliches Bild. Die addierten Gesamtstrecken der Einzeltreffer innerhalb einer Übung waren unter Tageslichtbedingungen durchschnittlich größer als unter Nachtsichtbedingungen. In der Gesamtrechnung über alle vier Übungen sind diese Ergebnisse hochsignifikant ( $p=0,00034$  Grün bzw.  $p=0,00014$  Weiß), allerdings maßgeblich bedingt durch die großen Unterschiede in Übung 3 ( $p=0,00062$  Grün bzw.  $p=0,000083$  Weiß). Separat betrachtet sind die Unterschiede in Übung 1 ( $p=0,27$  Grün bzw.  $p=0,59$  Weiß) und Übung 2 ( $p=0,84$  Grün bzw.  $p=0,078$  Weiß) nicht signifikant. Übung 4 kann hier aufgrund der unterschiedlichen Schusszahl nicht sinnvoll vergleichend betrachtet werden.

Die Unterschiede unter den beiden Nachtsichtbedingungen sind in Übung 1 und Übung 2 nur knapp nicht signifikant ( $p=0,056$  sowie  $p=0,058$ ). Allerdings zeigte sich in Übung 1 Grün, und in

Übung 2 Weiß besser. In Übung 3 und Übung 4 zeigte sich Weiß durchschnittlich etwas besser, diese Ergebnisse waren jedoch nicht signifikant (Übung 3:  $p=0,59$  und Übung 4:  $p=0,23$ )



**Tabelle/Diagramm 6** - Trefferzentrierung: Abstand der Treffer vom Zielmittelpunkt. Erneut zu erkennen sind die signifikant größeren Abstände zur Zielmitte unter Tageslichtbedingungen im Vergleich zur NVG-Nutzung.

## 4.5 Trefferzentrierung

Bei der Trefferzentrierung zeigte sich ein geringfügig anderes Bild. Erneut waren die Nachtsichtergebnisse insgesamt besser als die Tageslichtergebnisse ( $p=0,00498$  Grün bzw.  $p=0,0176$  Weiß) wobei hier Übung 3 und 4 den entscheidenden Anteil ausmachen. Über alle Übungen hinweg gemessen zeigten die Probanden unter weißem Phosphor durchschnittlich bessere Trefferzentrierungen. Dies ist allerdings durch die deutlichen Unterschiede in Übung 1 ( $p=0,022$ ) zu erklären. Für sich betrachtet konnten in Übung 2 bis 4 keine signifikanten Unterschiede zwischen grünem und weißem Phosphor erkannt werden (Übung 2:  $p=0,92$ , Übung 3:  $p=0,64$ , Übung 4:  $p=0,09$ ). Im Vergleich zu den Tageslichtbedingungen zeigten sich die Ergebnisse hier ebenfalls anders als in den Vorabmessungen. In Übung 1 waren die Tageslichtergebnisse hochsignifikant besser als die grünen Nachtsichtergebnisse ( $p=0,0079$ ) jedoch hochsignifikant schlechter als die weißen Nachtsichtergebnisse ( $p=0,000049$ ). In Übung 2 waren die

Tageslichtergebnisse durchschnittlich besser als die Nachtsichtergebnisse, verglichen zu Grün zeigten sich hier auch eine Signifikanz ( $p= 0,016$ ). Gegenüber zu Weiß waren die Werte trotz geringeren durchschnittlichen Abstands nur knapp nicht signifikant ( $p= 0,056$ ). Im Vergleich zueinander waren die Nachtsichtergebnisse in Übung 2 nicht signifikant ( $p= 0,91$ ). In Übung 3 war die Trefferzentrierung unter Tageslichtbedingungen signifikant, teils hochsignifikant schlechter als die Nachtsichtbedingungen (verglichen zu Grün  $p= 0,0006$  und zu Weiß  $p= 0,045$ ). Die Ergebnisse untereinander waren wiederum nicht signifikant ( $p= 0,64$ ). Ebenso wenig waren in Übung 4 signifikante Unterschiede zwischen den beiden Nachtsichtfarben erkennbar. Da hier drei Zielmittelpunkte als Referenz dienten, wurden hier das obere, das untere und das mittlere, halbe Ziel separat betrachtet (Oben:  $p= 0,62$ , Unten:  $p= 0,74$ , Mitte:  $p= 0,69$ )

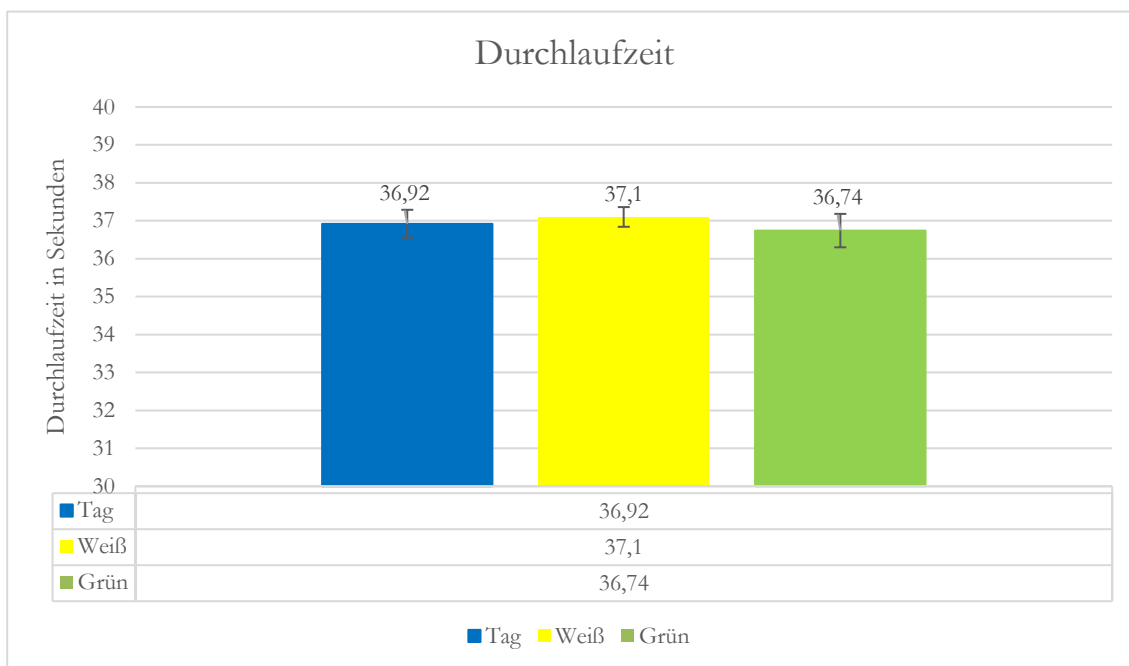
#### 4.6 Unterschiede zwischen Durchgang 1 und 2

Die gemessenen Daten des Nachtsichtdurchlaufs wurden in einer separaten Betrachtung hinsichtlich möglicher Unterschiede zwischen Erst- und Zweidurchlauf, unabhängig der verwendeten Phosphorfarbe erneut untersucht.

Die benötigte Durchschnittszeit des ersten Durchgangs lag bei 38,29 Sekunden (s), die des zweiten Durchgangs bei 38,36 s. Genauer betrachtet lag die Durchschnittszeit im ersten Durchgang mit weißem Phosphor bei 38,15 s und mit grünem Phosphor bei 39,07 s. Im zweiten Durchgang lagen die Durchschnittszeiten mit weißem Phosphor bei 38,29 s und mit grünem Phosphor bei 38,5 s. Keiner dieser Unterschiede war signifikant ( $p= 0,89$  weiß; bzw.  $p= 0,78$  grün)

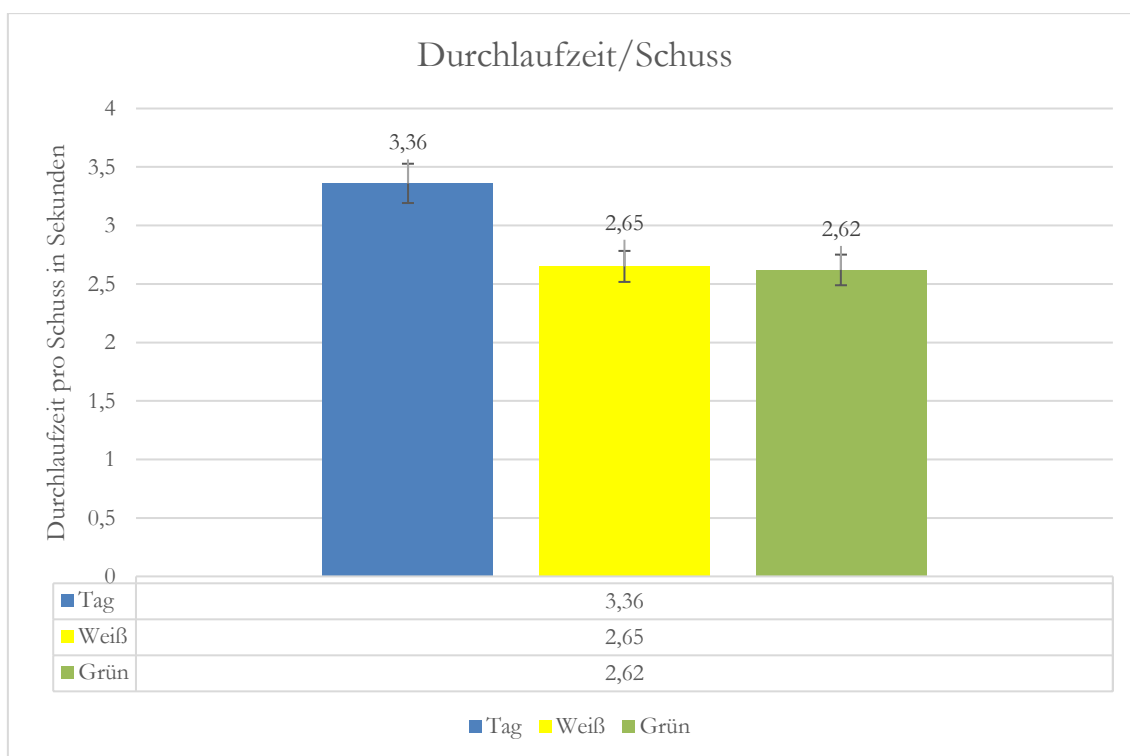
Die Trefferaufnahme zeigte durchschnittlich 11,67 Treffer in Durchgang 1 und 11,43 Treffer in Durchgang 2. Aufgeteilt in die Phosphorfarben zeigten sich durchschnittlich in Durchgang 1 unter Weiß 11,52 Treffer und unter Grün 11,17 Treffer. In Durchgang 2 konnten durchschnittlich 11 Treffer mit Weiß und 11,96 Treffer mit Grün erzielt werden. Auch diese Ergebnisse waren im Vergleich der Durchgänge nicht signifikant ( $p= 0,76$  weiß bzw.  $p= 0,59$  grün) Ebenso wenig zeigten sich signifikante Unterschiede bei der Betrachtung der einzelnen Schießübungen.

## 4.7 Durchlaufzeit



**Tabelle/Diagramm 7** - Durchlaufzeit: Vergleich der durchschnittlich benötigten Parcours-Durchlaufzeit unter jeweiligen Sichtbedingungen (Tag/NVG weiß/NVG grün). Zu erkennen sind annähernd identische Durchlaufzeiten unter den verschiedenen Bedingungen.

Die durchschnittlich benötigte Zeit für den jeweiligen Parcoursdurchlauf war mit 36,74 s für Grün dezent schneller als die benötigte Zeit für Weiß (37,1 s), die Ergebnisse waren jedoch nicht signifikant ( $p=0,88$ ). Die Tageslichtdurchläufe zeigten sich mit durchschnittlich 36,92 s ebenfalls in diesem Bereich. Auch hier waren die Unterschiede nicht signifikant  $p=0,76$  (Grün) bzw.  $p=0,79$  (Weiß). Werden die Durchlaufzeiten um die Schusszahl korrigiert, ergeben sich Zeitwerte von 2,62 s/Schuss (Grün), 2,65 s/Schuss (Weiß) sowie 3,36 s/Schuss (Tag). Diese Unterschiede sind im Vergleich Grün/Weiß weiterhin nicht signifikant ( $p=0,88$ ), allerdings ergeben sich hier hochsignifikante Unterschiede im Vergleich zu den Tageslichtergebnissen (jeweils  $p < 0,001$ ).



**Tabelle/Diagramm 8** - Um die Schusszahl korrigierte Durchlaufzeit in Sekunden. Zu erkennen ist die signifikant verminderte Durchlaufzeit pro Schuss in den Nachtsichtdurchgängen im Vergleich zum Tageslichtdurchgang.

## 4.8 Subjektive Selbsteinschätzung

Die subjektive Selbsteinschätzung erfolgte am Ende des jeweiligen Durchlaufs. Die Teilnehmer beurteilten die unten aufgeführten Fragen in den Kategorien 1 (trifft voll zu) bis 6 (trifft überhaupt nicht zu). Im Folgenden werden die Ergebnisse der Antworten einzeln aufgeführt. Die Mittelwerte für den jeweiligen Durchgang sind in den Farben Grün (grüner Phosphor) und Gelb (weißer Phosphor) unterlegt, Signifikanz und Standardabweichungen (MD) sind auf die dritte Nachkommastelle gerundet.

### 1. Die gestellten Aufgaben waren klar verständlich.

$p= 1$ ; MD(weiß) = 0,403; MD(grün) = 0,451

1,2

1,2

Die Teilnehmer konnten die Aufgaben unabhängig der verwendeten Phosphorfarbe gut verstehen. Es lagen keine signifikanten Unterschiede vor. Mögliche Artefakte in der Auswertung durch Verständnisprobleme sind somit unwahrscheinlich.

### 2. Die gestellten Aufgaben waren einfach umzusetzen.

$p= 0,28$ ; MD(weiß) = 0,495; MD(grün) = 0,565

1,31

1,39

Die Aufgaben wurden durchweg und unabhängig der Phosphorfarbe als einfach umsetzbar beschrieben. Es wurden erneut keine signifikanten Unterschiede angegeben. Eine wichtige Einschätzung, um die Güte der Trefferauswertung beurteilen zu können und mögliche Artefakte in der Auswertung aufgrund von Umsetzungsschwierigkeiten aufzudecken.

**3. Ich konnte meine Schießleistung sicher einschätzen.**

$p = 0,089$ ; MD(weiß) = 0,687; MD(grün) = 0,825

1,65

1,82

Ein Kriterium welches die subjektive Beurteilung einer Einsatzsituation maßgeblich beeinflusst. Kann der Schütze einen Treffer sicher einschätzen, kann er sagen, ob von seinem Ziel noch Gefahr ausgeht, womit die Einschätzung der Schießleistung an einer Sicherheitsbeurteilung führend beteiligt ist.

Zwar sind die Unterschiede hier nicht signifikant, jedoch ist ein Trend zu weißem Phosphor erkennbar.

**4. Während der Aufgabe kam es zu keinerlei Komplikationen.**

$p = 0,108$ ; MD(weiß) = 0,78; MD(grün) = 1,15

1,41

1,67

Die Frage diente einer generellen Qualitätskontrolle des Parcoursablaufs, um eventuell vorkommende auffällig schlechte Trefferergebnisse einer Ablaufkompliktion zuordnen zu können und ggf. separat zu betrachten. Dies kam im Verlauf jedoch nicht vor, kleinere angegebene Komplikationen hatten keine Auswirkungen im Sinne eines auffälligen Trefferbildes bzw. einer erhöhten Durchlaufzeit. Die Unterschiede im Phosphorvergleich waren nicht signifikant, erneut mit erkennbarer Tendenz zur besseren Performance mit weißem Phosphor.

**5. Ich fühlte mich im Umgang mit dem NVG sicher.**

$p = 0,182$ ; MD(weiß) = 0,641; MD(grün) = 0,808

1,45

1,57

Die Frage diente zur Einschätzung des Ausbildungsstands an der Nachtsichttechnik, erneut um eventuell auftretende Auffälligkeiten in der Performancemessung auf ein mögliches Ausbildungsdefizit zurückführen zu können. Hier konnten keine Performanceunterschiede auf einen Ausbildungsstand zurückgeführt werden. Die Unterschiede im Phosphorvergleich waren nicht signifikant.

**6. Der Seheindruck mit NVG gleicht dem Seheindruck ohne NVG bei Tageslicht.**

$p = 0,0003$ ; MD(weiß) = 0,898; MD(grün) = 0,99

2,83

3,43

Hier beschreiben die Teilnehmer einen hochsignifikant besseren Seheindruck (näher am Tageslichtsehen) mit weißem Phosphor als mit grünem Phosphor. Die allgemeine Einstufung liegt zwar im nur teilweise zutreffenden Bereich, allerdings ist hier im Vergleich zweier monochromatischer Bilder eine Präferenz zu weißem Phosphorbild zu erkennen.

**7. Der 3-dimensionale Seheindruck gleicht dem Seheindruck ohne NVG bei Tageslicht.**

$p = 0,002$ ; MD(weiß) = 0,913; MD(grün) = 0,0893

2,85

3,24

Bezogen auf den 3-dimensionalen Seheindruck machen die Teilnehmer erneut hochsignifikant bessere Angaben bei Nutzung von weißem Phosphor.

**8. Meine Schießleistung war bei Tageslicht besser.**

$p = 0,086$ ; MD(weiß) = 1,487; MD(grün) = 1,387

2,69

2,47

Die Frage diente dem subjektiven Vergleich zum Schießen unter Tageslichtbedingungen. Im Gegensatz zu den anderen Fragen ist diese Frage negativ orientiert. Höhere Werte entsprechen demnach subjektiv besser empfundenen Schießleistungen im Vergleich zum Tageslichtschießen. Die Unterschiede sind erneut nicht signifikant, jedoch ist die Frage unabhängig von der Phosphorfarbe mehrheitlich positiv beantwortet worden. Somit wurde die Schießleistung bei Tageslicht subjektiv hochsignifikant besser eingeschätzt als unter Nachtsichtbedingungen ( $p = 0,00037$ ) obwohl die objektive Trefferauswertung ein gegenteiliges Bild zeigt.

**9. Mein Gleichgewichtsgefühl in Vorwärtsbewegung mit NVG war wie bei Tageslicht.**

$p = 0,249$ ; MD(weiß) = 1,03; MD(grün) = 1,082

2,43

2,63

Die Fragen zur Bewegung und zum Gleichgewichtsgefühl waren primär Teil der parallel durchgeführten Vertiguard-Gleichgewichtsmessungen. Vorwärtsbewegung war allerdings auch wesentlicher Teil des Parcours, weshalb dies auch in die Bewertung mit einfluss. In Vorwärtsbewegung gab es keinen signifikanten Unterschied, jedoch wurden erneut durchschnittlich bessere Werte bei weißem Phosphor angegeben.

**10. Mein Gleichgewichtsgefühl in Rückwärtsbewegung mit NVG war wie bei Tageslicht.**

$p = 0,004$ ; MD(weiß) = 0,85; MD(grün) = 1,161

2,37

2,82

Im Gegensatz zur Vorwärtsbewegung konnten bei Rückwärtsbewegung hochsignifikante Unterschiede in der subjektiven Wahrnehmung erkannt werden. Unter Nutzung von NVGs mit weißem Phosphor wurde das Gleichgewichtsgefühl deutlich näher am Tageslichtsehen beschrieben als unter Nutzung von NVGs mit grünem Phosphor.

- 11. Der Gleichgewichtstest war mit NVG schwieriger als im Testdurchlauf.** 3,65  
 $p = 0,376$ ; MD(weiß) = 1,393; MD(grün) = 1,41 3,57

Bezogen auf den Gleichgewichtstest wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen den Phosphorfarben angegeben. Durchschnittlich wurde der Gleichgewichtstest unter allen Bedingungen als ähnlich schwer eingestuft.

- 12. Das Hindernisgehen war mit NVG schwieriger als bei Tageslicht.** 3,47  
 $p = 0,142$ ; MD(weiß) = 1,387; MD(grün) = 1,29 3,27

Ebenso wie der Gleichgewichtstest wurden beim Hindernisgehen keine signifikanten Unterschiede angegeben. Tendenziell wurde unter Nachtsichtbedingungen das Hindernisgehen zwar schwieriger eingestuft als der Gleichgewichtstest, allerdings lagen auch hier die Werte im Bereich einer ähnlichen Schwierigkeit.

- 13. Meine Schutzbrille zeigte Nebelbeschlag.** 5,33  
 $p = 0,308$ ; MD(weiß) = 1,167; MD(grün) = 1,324 5,21

Eine ergänzende Frage zur Erfassung von Beschlageereignissen der persönlichen Schutzbrille. Die Beschlageproblematik von Schutzbrillen in der Gefechtssituation ist eine separate Fragestellung, die seitens der Klinik für Augenheilkunde des BWZK Koblenz in eigenen Untersuchungen behandelt wird. Insgesamt kam es zwar vereinzelt zu Beschlageverhalten der Schutzbrille, jedoch gab es weder signifikante Unterschiede bezogen auf die Phosphorfarbe, noch gab es in den Fällen einer Beschlagangabe auffällige Ergebnisse in der Performancemessung.

- 14. Während des Ablaufs bemerkte ich Schwindel oder Übelkeit.** 6  
 $p = 1$ ; MD(weiß) = 0; MD(grün) = 0 6

Eine weitere ergänzende Frage zur Gleichgewichtsmessung welche im Rahmen der Vertiguard-Messung anamnestisch mit erhoben werden sollte. Durchweg wurde ein Auftreten von Schwindel oder Übelkeit verneint.

## 5 Diskussion

Moderne Nachtsichtgeräte nutzen heute entweder grüne (P22 bzw. P43) oder weiße (P45) Phosphorschirme in ihren Bildverstärkerröhren [Adomeit 2016, [www.Photonis.com](http://www.Photonis.com)]. Hierdurch entsteht für den Anwender ein grün-schwarzes oder ein weiß-schwarzes Kontrastbild. Die technischen Angaben zur Leistung der Bildverstärkerröhren sind entsprechend der Herstellerangaben weitestgehend identisch [White 2016].

Die subjektiven Angaben zur individuellen Performance unter Nachtsichtbedingungen zeigen unter den Angehörigen des Kommandos Spezialkräfte der Bundeswehr unter regelmäßiger Anwendung von Nachtsichttechnik jedoch eindeutige Präferenzen zu jeweils einer von beiden Phosphorfarben, mehrheitlich zu Weiß. Aus diesem Grund entstand eine zentrale Frage aus den Reihen der Spezialkräfte hinsichtlich einer belegbaren Überlegenheit einer dieser beiden Phosphorfarben gegenüber der jeweils anderen, welche zur Beantwortung an die Abt. IV Augenheilkunde des Bundeswehrzentralkrankenhauses gerichtet wurde. Im Folgenden sollen die Ergebnisse der Versuche im Kontext der verfügbaren Literatur diskutiert werden.

### 5.1 Präzision des Versuchskollektivs

Zentrale Bedingung für die Auswertbarkeit des Versuchsaufbaus war die Annahme, dass das Versuchskollektiv individuelle Schwankungen der Schießfertigkeiten erst auf einem Niveau zeigt, auf welchem diese Unterschiede für eine Zielerfüllung statistisch irrelevant sind und somit die Schießfertigkeit als konstant angesehen werden kann. In der Trefferauswertung zeigte sich eine durchschnittliche Abweichung vom Zielmittelpunkt von 3,6 cm unter Nachtsichtbedingungen bzw. 4,1 cm unter Tageslichtbedingungen über alle Entfernungen (von 12 m bis 3 m) und Schießpositionen. Unter Berücksichtigung der Waffenwirkung eines G36-Sturmgewehrs mit Kaliber  $5,56 \times 45$  mm sowie einer Zielgröße von  $15 \text{ cm}^2$  bzw. 7,5 cm Durchmesser der Zielcharts kann von einer sicheren Wirkung des Treffers ausgegangen werden. Die Streuung der Treffer mit durchschnittlichen Entfernungen voneinander von unter 3 cm bei stehenden Übungen, sowie unter 6 cm in Bewegung, beweist die Konstanz der Trefferergebnisse über mehrere Schüsse hinweg, was unter Berücksichtigung des Feuer- bzw. des Rückstoßverhaltens der Waffe eine besondere Schwierigkeit im Waffenumgang darstellt. Zusammengefasst konnten durchschnittlich drei Treffer auf einer Fläche von  $7,2 \text{ cm}^2$  (NVG) bzw.  $8,2 \text{ cm}^2$  (Tag) platziert werden. Bei einer Einschussfläche des Treffers von ca. 0,55 cm Durchmesser sowie einer Zielfläche von  $15 \text{ cm}^2$ , kann hieraus ebenfalls von einer sicheren Trefferwirkung ausgegangen werden. Somit bestätigte sich die vorausgenommene Annahme, dass beim gewählten Kollektiv individuelle Unterschiede in der

Schießfertigkeit naturgemäß existent, jedoch bezogen auf eine Trefferwirkung statistisch zu vernachlässigen sind. Gleichzeitig können hierdurch mögliche Lerneffekte der Probanden in der Schießpräzision durch wiederholten Parcoursdurchlauf als vernachlässigbar eingestuft werden. Ein Vergleich zu anderen Kollektiven war zum aktuellen Zeitpunkt aus der Literatur heraus nicht möglich, da keine Veröffentlichungen zu Präzisionsergebnissen bei Schießübungen vorlagen, insbesondere nicht unter Nachtsichtbedingungen und in Bewegung. Festzuhalten ist an dieser Stelle, dass der subjektiv bestätigte Trend der Probanden zur bevorzugten Nutzung von NVGs mit weißem Phosphorschirm seine Ursachen nicht in unterschiedlichen technischen Parametern, z.B. Rauschverhalten, Auflösung oder Verstärkerleistung der NVGs haben dürfte, da diese nach Herstellerangaben identisch sind. Der systematische Trend zum weißen Phosphor scheint daher eher ein physiologisch/psychologisches als ein technisches Phänomen zu sein.

## 5.2 Diskussion der Methodik

Grundlegend ist die Fragestellung nach einer belegbaren Überlegenheit einer der beiden Nachtsichtfarben ein Problem aus der praktischen Anwendung der NVGs. Da die Performance von Nachtsichtgeräten bekannter Weise am besten in der jeweiligen Praxissituation getestet wird [Jacks 2009], musste ein möglichst praxisnaher Anwendungsversuch entwickelt werden. Die Frage, die sich nun stellte war, was Spezialkräfte in der Praxis mit den Nachtsichtgeräten im Schwerpunkt genau tun, bzw. wobei sie sich am meisten auf die Performance mit den NVGs verlassen müssen. Die Antwort der Spezialkräfte hierauf war eindeutig die Gefechtssituation in Gebäuden, nachts und/oder in dunklen Räumen, z.B. im Rahmen einer Geiselfreiung. Selbstverständlich werden NVGs auch z.B. bei nächtlichen Fallschirmlandemanövern sowie längerfristigen Beobachtungsaufgaben (Fernspäher-/Aufklärungsmission) eingesetzt, jedoch ist die Abhängigkeit von einer guten Performance mit dem NVG bei diesen Aufgaben bei Weitem nicht so groß wie bei der genannten Kurzdistanzgefechtssituation. Entsprechend mussten die Aspekte dieser Gefechtssituation simuliert werden. Dazu gehörten Orientierung und Bewegung im Raum sowie Identifizierung und Bekämpfung von möglichen Zielen auf kurze Distanz bei möglichst völliger Dunkelheit. Hierzu boten sich einerseits diverse Einzeluntersuchungen an, um die jeweiligen Aspekte getrennt voneinander zu untersuchen und andererseits Kombinationsversuche, bei denen mehrere bzw. alle Aspekte gleichzeitig getestet werden konnten, jedoch unter Umständen dann einzelne Ergebnisse miteinander zusammenhängen, ohne dass dies erkennbar und im Nachhinein differenzierbar ist. Der Testparcours mit der Kombination von Orientierung, Bewegung, Zielidentifizierung sowie Zielbekämpfung erwies sich aus allen durchdachten Versuchsanordnungen am praxisnächsten. Die Trennung von Parcourslauf (Überprüfung von Orientierung und Bewegung) und Schießübung (Überprüfung primär der Zielbekämpfung, die

Zielidentifizierung ist hierbei schwieriger zu überprüfen, da bei einer statischen Schießübung das Ziel vom Standpunkt aus sichtbar sein muss) schien nicht sinnvoll, da es in der zu untersuchenden Praxissituation immer ein Zusammenspiel von Schießaufgaben und Bewegung gibt und sich Ziele somit immer erst nach stattgefundener Bewegung ergeben. Sicherlich führt eine kombinierte Untersuchung zur Vermischung von Einzelergebnissen, welche sich im Nachhinein nicht individuell trennen lassen. Es ist davon auszugehen, dass eine reine Schießübung aus stehender Position, bei beliebigem Zeitrahmen, zu deutlich besseren Ergebnissen in der Schießpräzision geführt hätte. Umgekehrt ist anzunehmen, dass unter Akzeptierung schlechterer Schießergebnisse eine schnellere Durchlaufzeit zu erreichen wäre (bis hin zu einem reinen Durchlaufen ohne Schussabgabe/Treffer). Es ist entsprechend nicht möglich zu sagen, ob individuell von einzelnen Teilnehmern zugunsten von Durchlaufzeit oder Trefferpräzision priorisiert wurde und ob jeweils bessere Ergebnisse bei Änderung der Priorisierung hätten erreicht werden können. Allerdings bietet gerade diese Kombination eine sehr gute Übersicht über die Gesamtperformance, die eben genau durch dieses Zusammenspiel von Durchlaufgeschwindigkeit und Zielpräzision wiedergegeben wird und wofür es irrelevant ist, wo die individuellen Schwerpunkte gesetzt wurden.

Dass eine Schießübung mit scharfem Schuss realisiert werden musste, ergab sich aus der notwendigen Praxisnähe. Sicherlich wären hier Simulatorübungen (z.B. AGSHP, Ausbildungsgerät Schießsimulator für Hand- und Panzerabwehrwaffen) möglich gewesen, allerdings erlauben einerseits derzeit routinemäßig zur Verfügung stehende Simulatoren nicht die Menge an Bewegung, welche eine Praxisnähe imitieren würde, andererseits ist auch das Verhalten der Waffen durch Gewicht, Beweglichkeit und Rückschlagverhalten im Simulator zumindest geringfügig abweichend von der Realsituation. Wesentliche Nachteile der durchgeführten scharfen Übungen waren die Notwendigkeit einer entsprechend gesicherten Umgebung, sowie einer differenzierten Zielauswertung, da diese im Simulator digital erfasst und somit einfacher hätte ausgewertet werden könnte. Die Umgebungsproblematik löste sich durch die Nutzung des Schießkinos des KSK, in welchem durch vorhandene Schussfang-Mauern die notwendige Sicherheit gegeben war. Die Problematik der Zielauswertung wurde über die Übungs- und Zielgestaltung angegangen: Genutzt wurde als Ziel das Bildverstärker-Target des KSK (s. Abb. 7). Zur Wahl dieses Zielcharts gegenüber möglichen anderen Optionen (z.B. Ringcharts, wie sie im Schießsport Anwendung finden) führte der Aspekt der Zielorientierung: Primär sollte nicht generell die Mitte eines großen Ziels gesucht werden, sondern einsatznäher, in einem Zielbereich kleinere Zielfelder von Situation zu Situation voneinander differenziert und gezielt bekämpft werden. Gleichzeitig musste sichergestellt werden, dass einer Identifizierung des Zielbereichs im Raum (Charttafel) auch eine Zielidentifizierung innerhalb des Zielbereichs (Zielfelder) zeitnah folgen konnte. Hierzu ist eine entsprechende Kontraststärke von Zielfeld zu Zielbereich, sowie von Zielbereich zu Umgebungsbereich

notwendig, welches in Kombination vom gewählten BIV-Target erfüllt wurde. Durch die Felderung des BIV-Targets konnte einzelnen Übungen ein eigenes Ziel innerhalb eines Gesamtcharts zugewiesen werden, was eine klare Abgrenzung der einzelnen Schießübung in der Auswertungsphase ermöglichte. Wesentliches Problem war weiterhin, dass die Reihenfolge der Treffer innerhalb einer Übung im Nachhinein nicht mehr feststellbar war, da im Ergebnis ein Papier-Zielchart mit Einschusslöchern vorlag, zwar nach Übung getrennt, jedoch innerhalb der Übung ohne genauere Information zur Reihenfolge der Treffer. Somit war nicht ersichtlich, ob z.B. jeweils ein erster Treffer besser war als die Folgenden, oder ob z.B. nach einem ersten Fehltreffer die Folgeschüsse besser justiert wurden. Auswertbar war somit ausschließlich, was aus den vorhandenen Einschusslöchern heraus messbar war. Die Wahl der Trefferauswertung hinsichtlich eines Treffers im Soll-Zielbereich der Übung (Zielerfüllung: Treffer ja oder nein) war naheliegend. Hierbei zeigten sich hohe Erfüllquoten, die eine Auswertungsmethode zur weiteren Differenzierung erforderten. Die zur Präzisierung naheliegendsten Fragen waren, wie weit die jeweiligen Treffer auseinander lagen und wie weit die Treffer vom Mittelpunkt des jeweiligen Ziels entfernt lagen. Einerseits, da ein wesentliches Merkmal hoher Schießfertigkeit die Präzision aufeinanderfolgender Schüsse ist und hierauf ein Schwerpunkt der Schießausbildung gelegt wird und andererseits, da im Rahmen des Ziel- und Anpeilungsvorgangs natürlicher Weise immer auf die Mitte eines Ziels gezielt wird, falls nicht bekannte Faktoren klar dagegen sprechen (z.B. Hoch- oder Niedrigzielen bei bekanntem Verhalten von ballistischen Flugbahnen bei bestimmten Zielentfernungen). Fraglich war, ob die gestellten Parcours- und Schießaufgaben einen ausreichenden Schwierigkeitsgrad hatten, um damit kleine Unterschiede in der Performance mit den NVGs aufdecken zu können, da prinzipiell zu erwarten war, dass sobald eine ausreichende Visusstufe zur Auftragserfüllung erreicht ist, gute Erfüllungsquoten bzw. Performanceergebnisse resultieren, unabhängig davon, ob eine Phosphorfarbe oberhalb dieser Minimalanforderung bessere Leistungen ermöglichen würde. Diese Frage konnte nach Auswertung der Ergebnisse nicht sicher beantwortet werden. In den Visustests konnten mit NVG keine signifikanten Unterschiede der Performance gezeigt werden. Und ebenfalls war kein signifikanter Unterschied in den verschiedenen Parcoursauswertungen zu finden. Ob dies allerdings an der ähnlichen Visusleistung lag oder ob diese einfach nur ausreichend zur Erfüllung der Aufgabe war, und die subjektiv wahrgenommenen Unterschiede beim weißen Phosphor Verbesserungen jenseits der Erfüllungsanforderung darstellen bleibt im Ergebnis weiteren Untersuchungen vorbehalten.

Für die Visustests hingegen war die Methodik schnell gefunden. International wird für Studienzwecken das ETDRS-Protokoll verwendet, um vergleichbare Visuswerte zu produzieren. Da die hierbei verwendeten Sehtafeln mit den NVGs erkennbar waren, wurden andere Verfahren zur Visusbestimmung zügig verworfen. Bedenken gab es initial aufgrund der eventuell bestehenden

Vorteile des weißen Phosphors aufgrund des Schwarz-Weiß-Kontrasts der Sehtafeln, jedoch würde ein solcher, tatsächlich bestehender Vorteil im Kontrastsehen für weiße Phosphorschirme sprechen, weshalb hier das Ergebnis abgewartet werden sollte. Dass für den Tageslichtvisus ebenfalls das ETDRS-Protokoll gewählt wurde verstand sich von selbst, um keine zusätzlichen Abweichungen der Testverfahren untereinander zu produzieren.

Ursprünglich war geplant, unter Nachtsichtbedingungen ebenfalls Stereopsistests durchzuführen, wie sie in der Eingangsuntersuchung stattfanden. Allerdings stellte sich heraus, dass die Tests zur Stereopsis mit den Nachtsichtgeräten nicht anwendbar waren. Dies hat die im Kapitel zur Stereopsis-Physiologie erklärten Ursachen: Einerseits ist eine tatsächliche Stereopsis unter Nutzung von Nachtsichtgeräten durch den Blick auf zwei flache Bildschirme aufgehoben, eine dreidimensionale Tiefenwahrnehmung erfolgt ausschließlich über Bildhinweise, welche durch die Trennung der Seheindrücke von linkem und rechtem Auge dem Beobachter suggeriert werden. Andererseits ist für die Untersuchung der Stereopsis mittels der zur Verfügung stehenden Stereotests (Tithmus-Ringe und Frisby-Stereotest) die Bildauflösung der Nachtsichtgeräte nicht gut genug, um die einzelnen Sehzeichen identifizieren zu können. Hierzu müsste ein sicherer Lesevisus von deutlich besser als LogMar 0.4 erreicht werden. Ein Howard-Dolman-Apparat stand zum Zeitpunkt der Untersuchung nicht zur Verfügung.

Wesentliche Herausforderung war es zudem, die limitierte Zeit der großen Gruppe der Spezialkräfte möglichst effizient nutzen zu können, da für diese Untersuchung ein relevanter Anteil des KSK gebunden war. Somit war ersichtlich, dass es im Falle getrennter Untersuchungen mehrere Abläufe hätte geben müssen, welche der zeitliche Rahmen nicht hergab. Es hätten folgend Priorisierungen stattfinden müssen und dementsprechend bestimmte Teilaspekte bei fehlenden Kapazitäten schlichtweg nicht untersucht werden können.

Daher wurde trotz Bewusstsein für eine wahrscheinliche Beeinflussung der Untersuchungsparameter untereinander der Ansatz eines Kombinationsversuchs gewählt, da einerseits ursprünglich nach einer Gesamtperformance gefragt wurde, diese sich so aus der Praxisnähe vergleichbar darstellen ließ und sich nicht im Nachhinein aus diversen Einzelfaktoren künstlich rekonstruieren lassen musste, andererseits, da so bei begrenzter Verfügbarkeit des Versuchskollektiv die meisten Daten aus den Untersuchungen gewonnen werden konnten. Retrospektiv betrachtet, hätte bei mehr zur Verfügung stehender Zeit der Versuchsablauf differenzierter ausgestaltet werden können, um die Aspekte Orientierung und Bewegung deutlicher von der Schießperformance zu trennen, allerdings ist unter der Betrachtung der Aspekte Praxisnähe und Einsatzrelevanz (z.B. entscheidende Phase einer Geiselnbefreiung) wenig Spielraum zu weiterer Verbesserung des Ablaufs.

Weiter zu hinterfragen ist die verwendete Beleuchtung während der Versuchsreihe. Zum Einsatz kam in den völlig abgedunkelten Räumen des Schießkinos die Infrarotbeleuchtungsanlage, welche eine ausgeprägte Ausleuchtung der Räume im infraroten Spektrum sicherstellt. Vorteil sind hierbei die konstant gleichbleibenden Beleuchtungsbedingungen, zeitlich über den gesamten Ablauf hinweg und örtlich an allen Einzelstationen. Nachteil ist die fragliche Praxisnähe: ein echtes Szenario wäre nicht künstlich vollbeleuchtet, hier kommen z.B. Infrarot-Knicklichter zum Einsatz, welche von den Spezialkräften mitgeführt und bei Bedarf (mangelnder Beleuchtung) in den zu beleuchtenden Raum geworfen werden. Somit wäre eine künstliche Infrarotbeleuchtung in der Realität weniger gleichmäßig raumbeleuchtend, sondern punktförmig von der Lage des Knicklichtes ausgehend gewesen. Geht man von ausreichender Raumbeleuchtung durch natürliches oder künstliches Restlicht aus, wäre das entsprechende Lichtspektrum ein anderes (je nach Lichtquelle, aber höchstwahrscheinlich kurzwelliger als der hier zur Beleuchtung verwendete Infrarotbereich). Da die spektrale Empfindlichkeit einer Bildverstärkerröhre maßgeblich von der Beschaffenheit der Fotokathode abhängt und diese bei den verwendeten Geräten identisch ist, dürften hierdurch jedoch keine Auswirkungen auf den Vergleich der Performance entstanden sein. Allerdings sei hier angemerkt, dass die Performance der Geräte bei anderem (ggf. besser passendem) Beleuchtungsspektrum durchaus anders und sogar besser hätte sein können. Somit wurde die Infrarotbeleuchtung zwar als Übungskünstlichkeit gesehen, die Vorteile der Beleuchtungskonstanz überwiegen jedoch aus unserer Sicht die Nachteile.

Eine Aussage zu einer notwendigen Beleuchtung zur Auftrags Erfüllung ist schwierig zu verallgemeinern. Der Versuch zeigte, dass ein völliges Fehlen von Licht (Frequenzen im sichtbaren Spektrum,  $<0,00001$  lx) bei gleichzeitig verfügbarer Infrarotbeleuchtung tolerierbar ist, sowohl für einen Nachtsichtvisus von etwa 0.4 LogMar als auch für einen Parcoursdurchlauf mit kombinierter Schießübung. In den bisherigen Studien konnte gezeigt werden, dass bei fehlender Infrarotausleuchtung (in der Praxis die Regel) mindestens Beleuchtungsniveaus benötigt werden, welche einem bedeckten Sternenhimmel entsprechen ( $0,0001$  lx), unabhängig davon, ob die Beleuchtung natürlichen oder künstlichen Ursprungs ist. Allerdings sind bei abnehmenden Beleuchtungsniveaus ebenfalls die Visuswerte sinkend beschrieben [Kotulak, Rash 1992]. Bei der Parcoursperformance ist nach Auswertung dieser Versuche davon auszugehen, dass bis zu einer bestimmten Untergrenze des Beleuchtungsniveaus keine wesentlichen Unterschiede nachweisbar sind. Sobald diese Beleuchtungsuntergrenze jedoch unterschritten wird, sollte eine Aufgabenerfüllung bei entsprechend fehlender Beleuchtung praktisch unmöglich werden. Ob sich eine Schieß-/Parcoursperformance tatsächlich so schlagartig verhält, müsste in weiterführenden Untersuchungen überprüft werden.

### 5.3 Vergleich der Performance unter Nutzung von grüner und weißer Phosphorfarbe

Der Vergleich der Versuchsdurchläufe unter Nachtsichtbedingungen bei Nutzung der unterschiedlichen Phosphorfarben ergab ein weitestgehend einheitliches Bild. Zunächst zeigte sich kein signifikanter Unterschied in der Durchlaufzeit. In der Trefferauswertung konnten in einzelnen Übungen für sich betrachtet zwar signifikante Unterschiede gemessen werden, diese sprachen jedoch zu etwa gleichen Anteilen mal für grünen und mal für weißen Phosphor. Über alle Übungen hinweg gemessen, konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Phosphorfarben in der Trefferpräzision erkannt werden. Eine mögliche Erklärung hierfür lässt sich in der Aufgabenstellung und der Methodik finden (s. 5.2 Diskussion der Methodik): Die jeweiligen Wegstrecken durch den Parcours sowie die Übungsziele konnten bei gegebenen Kontrast- und Beleuchtungsniveaus mit beiden Phosphortypen gut genug erkannt werden, damit die Probanden ihre erlernten Fähigkeiten in diesen Übungssituationen abrufen und anwenden konnten. Eine genauere Differenzierung in Abhängigkeit der Phosphorfarben bedarf dementsprechend einer detaillierteren Aufgabenstellung, welche Gefahr laufen könnte, die Praxisnähe zu verlieren und damit eher theoretischen Charakter zu bekommen. Dies bedeutet nicht, dass die technischen Leistungen der verwendeten Geräte allgemein bereits so gut sind, dass sich unabhängig der Aufgabe nur noch die individuellen, physiologischen Parameter auswirken, lediglich die hier gestellte Aufgabe konnte keinen wesentlichen Performanceunterschied darstellen. Es ist daher aus diesen Ergebnissen davon auszugehen, dass unter den gegebenen Parametern der Versuchsaufgabe (Hindernisparcours, Schießen über kurze Distanz auf kleine, unbewegliche Ziele) selbst eine deutliche Verbesserung der technischen Leistung allenfalls geringfügige Auswirkungen auf die Parcoursperformance haben werden. Hiervon unabhängig sind die Performance im Visustest, wo durch verbesserte technische Leistung noch deutliche Steigerungen zu erwarten sind, sowie die subjektive Selbsteinschätzung und deren Einfluss auf die Performance. Zusätzliche Sehschärfe führt erwartet zu mehr (Selbst-)Sicherheit bei der Aufgabenerfüllung und ist in ihren Auswirkungen auf die tatsächliche Performance nur schwer vorherzusagen.

Diese Ergebnisse decken sich mit den identischen Leistungsangaben des Herstellers. Die Visusergebnisse zeigten sich im Bereich von 0,4 LogMar bzw. mit einem ETDRS-Score von 27,3 ebenfalls ohne signifikante Unterschiede zwischen den Durchgängen mit grünem und weißem Phosphor. Auffällig ist hierbei, dass trotz optimierter Infrarot-Beleuchtung und starker Kontraste der ETDRS-Tafeln die bestgemessenen Visuswerte mit den verwendeten modernen L3-Quadeye-NVGs, nur im Bereich der bereits vor über 20 Jahren stattgefundenen Studien lagen. Bereits Wiley erhob 1989 mit den 2. Generations Bildverstärkersystemen AN/PVS-5A bzw. AN/PVS-7 bei

hohen Kontrasten und entsprechender Beleuchtung Visuswerte von um  $20/50 \pm 6 \approx 0,4$  LogMar. Kotulak und Rash ermittelten 1992 mit 3. Generations-Bildverstärkerröhren Visuswerte von  $20/54 \pm 9$ . Subramanian et al. konnten 2003 diese Werte in ihren Untersuchungen reproduzieren. Ein direkter Vergleich ist jedoch schwierig, da den damaligen Studien noch kein standardisiertes ETDRS-Protokoll zur Verfügung stand, dennoch bleiben die gemessenen Werte aufgrund der zumindest seitens der Hersteller propagierten technischen Verbesserung der letzten Jahrzehnte deutlich hinter den Erwartungen zurück.

Objektiv beantworten diese Ergebnisse große Teile der initial gestellten Frage der Spezialkräfte nach einer belegbar besseren Performance in Abhängigkeit der verwendeten Phosphorfarbe in Nachtsichtgeräten: Im kurzzeitigen Versuchsansatz und bezogen auf Bewegung im Raum, verbunden mit Trefferpräzision, ist kein signifikanter Unterschied zu erkennen gewesen. In diesem Versuchsansatz unbeobachtet sind die Auswirkungen bei längerer Nutzungsdauer der Nachtsichtgeräte. Hier können zukünftige Untersuchungen weitere Erkenntnisse, insbesondere in Hinblick auf Ermüdung und Leistungsabnahme unter Einsatz verschiedener Phosphorschirme bringen. Ebenfalls ergänzend werden die gemessenen Daten der Gleichgewichtstest dienen.

#### 5.4 Subjektive Selbsteinschätzung

In der subjektiven Selbsteinschätzung beantworteten die Versuchsteilnehmer Fragebögen nach Beendigung des Parcoursdurchlaufs in den Kategorien 1 bis 6 („trifft voll zu“ bis „trifft überhaupt nicht zu“). Neben annähernd identischen Ergebnissen, ohne signifikante Unterschiede in den Fragen zu Schwierigkeit und Ausbildungsstand, konnten in den Fragen zur Performance deutliche Präferenzen hin zu weißem Phosphor erkannt werden. Hochsignifikante Unterschiede gab es in den Angaben zum subjektiven Seheindruck im Vergleich zum Tageslicht. Hier wurde der Blick auf den weißen Phosphorschirm deutlich näher am Tageslicht beschrieben als der auf den grünen Phosphorschirm (2,8 weiß; 3,4 grün;  $p = 0,0003$ ;  $MD(\text{weiß}) = 0,898$ ;  $MD(\text{grün}) = 0,99$ ). Hier sind zwei mögliche Ursachen dieses Unterschieds zu bedenken. Einerseits entspricht der Seheindruck auf dem grünen Phosphorschirm, welcher seit Entwicklung der ersten NVGs den Standard darstellt, der allgemeinen Assoziation mit dem Sehen unter Nachtsichtbedingungen [Blank 2017]. Aufgrund der breiteren Verfügbarkeit von grünen NVGs innerhalb der Bundeswehr sind die Teilnehmer auch schwerpunktmäßig mit grünen NVGs an der Nachtsichttechnik ausgebildet worden. Ein Wechsel zu weißem Phosphor lässt somit einen anderen Seheindruck entstehen als der ursprünglich gelernte, so dass die Fragestellung mit Vergleich zum Tageslicht die Präferenz des

weißen Phosphors begünstigen könnte. Eine andererseits mögliche Ursache ist durch das physiologische Farbsehen zu erklären. Beide Phosphorschirme bieten ein monochromatisches Bild, allerdings liegt das vom grünen Phosphor ausgehende Licht mit Schwerpunkt im Absorptionsmaximum der M-Zapfen (534 nm), welche für die Grünwahrnehmung verantwortlich sind, wohingegen der weiße Phosphor einen gleichmäßigeren Seheindruck durch ähnliche Absorption über S-, M-, und L-Zapfen verursacht, wie er beim Tageslichtsehen normalerweise stattfindet [neuronresearch.net]. Dem zugehörig ist das Phänomen des Stäbchensehens bei Dunkelheit: „Tageslichtsehen“ bei Dunkelheit findet nach entsprechender Adaptation durch die Stäbchenrezeptoren statt, welche keine Farbwahrnehmung ermöglichen. Daher ist das natürliche nächtliche Sehen mit Graustufen assoziiert (vgl. umgangssprachlich: „Nachts sind alle Katzen grau.“) und die schwarz-weiße Bilddarstellung mit weißem Phosphor kommt dem näher als die schwarz-grüne Darstellung. Hier könnten weiterführende Untersuchungen angestrebt werden, um z.B. mögliche Ermüdungserscheinungen unter längerer Nutzung der NVGs mit den verschiedenen Phosphortypen zu überprüfen. Bezogen auf den kurzfristigen Seheindruck lässt sich hier allerdings kein Hinweis auf ein tatsächlich besseres Sehen ableiten. Eine gleichmäßigere Beteiligung der verschiedenen Zapfentypen ist nicht mit einer unterschiedlichen Auflösung des resultierenden Bildes verbunden, da auch die Zapfentypen außerhalb des Absorptionsmaximums am Sehprozess beteiligt sind. Bezogen auf das Kontrastsehen konnte in der Hoffmann AVN 20/20 mit dem weißen Phosphor eine Kontraststufe mehr erkannt werden, welche sich im Test an den ETDRS-Charts jedoch nicht visusrelevant dargestellt hat. Dementsprechend könnte dieser Kontrastunterschied unterhalb der Schwelle der Visusrelevanz von den Probanden wahrgenommen und als angenehm empfunden worden sein. Es ist somit davon auszugehen, dass das subjektive Empfinden in irgendeiner Form auf die Sehanstrengung rückschließen lässt, welche kurzfristig zwar ausgeglichen werden kann, aber in Langzeituntersuchungen unter physiologisch-ergonomischer Betrachtung eine bedeutendere Rolle spielen dürfte, wie es beispielsweise vom Sehen durch schlecht ausgeglichene Brillengläser oder von der Höranstrengung bekannt ist.

Ein weiterer signifikanter Unterschied wurde von den Teilnehmern in der subjektiven Wahrnehmung des dreidimensionalen Seheindrucks beschrieben (2,9 weiß; 3,2 grün;  $p=0,002$ ;  $MD(\text{weiß}) = 0,913$ ;  $MD(\text{grün}) = 0,893$ ) Aufgrund der parallelen, auf die Ferne gerichteten Anordnung der Bildverstärkerröhren mit Blick auf zweidimensionale Bildschirme ist eine Stereopsis aufgehoben [Wiley 1989], die Wahrnehmung eines dreidimensionalen Seheindrucks ist somit rein subjektiv. Allerdings ist in der dreidimensionalen Tiefenwahrnehmung beim Umgang mit NVGs entscheidend, wie ähnlich die suggerierte Tiefenwahrnehmung der Realität ist, sprich, ob die durch Bildhinweise gegebenen Möglichkeiten zur Entfernungseinschätzungen tatsächlich zu realitätsechten Entfernungsschätzungen der Anwender führen. Passen suggerierte Entfernung

und Realität gut überein, müssen keine Anpassungen im Verhalten erfolgen bzw. bedacht werden und der Anwender kann wie gewohnt agieren und die Seheindrücke in seinen Bewegungen umsetzen. Je weiter verfügbare Bildhinweise echte Entfernungen verzerren, desto mehr Übung braucht der Anwender, um mit dem jeweiligen NVG sicher umzugehen. Hiervon sind im Übrigen nicht nur 3D-Tiefenhinweise, sondern z.B. auch optische Vergrößerungen betroffen (Vergleiche normales Gehen mit vorgehaltenem Fernglas: hier müssen Bewegung und optische Wahrnehmung auch zunächst in Einklang gebracht werden, bis ein subjektiv angenehmes Gefühl beim Gehenden eintritt). Bezogen auf den Trainingsstand im Umgang mit den NVGs ist davon auszugehen, dass alle Probanden durch die Ausbildung zu Kommandosoldaten ausreichend Trainingszeit sowohl mit grünen als auch mit weißen Phosphorschirmen in NVGs hatten, um die jeweils gebotenen Tiefenhinweise in einen für sie nutzbaren Einklang mit den notwendigen Handlungsschritten zu bringen, was durch die durchweg guten Testergebnisse bestätigt wird. Passend hierzu konnte nachgewiesen werden, dass eine binokulare NVG-Anordnung (im Vergleich zu biokularen oder monokularen NVG-Versionen) zu deutlich besserer Performance im Überwinden von unebenem Gelände führt, da hier entsprechend mehr Tiefenhinweise, unter anderem für beide Augen getrennt und unterschiedlich zur Verfügung stehen. Somit führt selbst bei praktisch aufgehobener Stereopsis der subjektive Eindruck einer vorhandenen Stereopsis, zumindest bei entsprechender Übereinstimmung von suggerierter zu tatsächlicher Entfernung, zu einer erhöhten Sicherheit im Geländegang [CuQlock-Knopp et al. 1995]. Aufgrund der optimalen Infrarotausleuchtung sowie der gewählten Umgebung innerhalb eines Gebäudes mit künstlichen Wänden und geraden Kontrastkanten, ist eine verbesserte Kontrastwahrnehmung auf dem weißen Phosphorschirm möglich. Diese verbesserte Kontrastwahrnehmung ist potenziell ebenfalls an einem subjektiven dreidimensionalen Seheindruck beteiligt. Obwohl tatsächlich nur subjektives dreidimensionales Sehen stattfindet, führt dieser subjektive Eindruck einer möglichen Stereopsis zu einem natürlicheren Empfinden und somit zu einem tageslicht-ähnlicheren Seheindruck.

Ein weiterer signifikanter Unterschied in der subjektiven Wahrnehmung wurde im Rahmen der Gleichgewichtsuntersuchung bei Rückwärtsbewegung angegeben. Auch hier wurde die Verwendung des weißen Phosphors näher am Tageslichtsehen empfunden (2,4 weiß; 2,8 grün;  $p=0,004$ ; MD (weiß) = 0,85; MD (grün) = 1,161). Im Gegensatz dazu konnten bei Vorwärtsbewegung sowie beim Hindernisgehen, welches ebenfalls in Vorwärtsbewegung untersucht wurde, keine signifikanten Unterschiede in der subjektiven Wahrnehmung ermittelt werden. Naturgemäß spielt bei Gleichgewichtsanforderungen das Sehen und insbesondere die Fähigkeit zur Fixierung eine entscheidende Rolle. Kleinere Unterschiede am Seheindruck zwischen den beiden Phosphorfarben könnten hier bei der Rückwärtsbewegung bereits eine subjektiv wahrnehmbare Rolle gespielt haben. Zudem ist zu beachten, dass das Training unter Nachtsichtbedingungen naturgemäß

mehrheitlich Vorwärtsbewegung beinhaltet und somit die Rückwärtsbewegung, welche an sich bereits erhöhte kognitive Anforderungen stellt, deutlich seltener trainiert wird. Somit können kleinere Unterschiede in der subjektiven Wahrnehmung, welche unter Umständen tatsächlich Auswirkungen auf die Performance haben, weniger gut kompensiert werden. An dieser Stelle bleibt die Auswertung der tatsächlichen Gleichgewichtsperformance mittels Vertiguard-Messung abzuwarten, ob objektive Unterschiede zwischen den beiden Phosphorfarben nachweisbar sind und sich der subjektive Eindruck der Teilnehmer bestätigt.

Der auffälligste Unterschied in der subjektiven Wahrnehmung findet sich bezüglich der Schießleistung. Zwar gab es hinsichtlich des Vergleichs der Phosphorfarben keine signifikanten Unterschiede ( $p = 0,086$ ; MD (weiß) = 1,487; MD (grün) = 1,387) allerdings gaben die Teilnehmer unabhängig der Phosphorfarbe an, bei Tageslicht subjektiv besser geschossen zu haben ( $p = 0,0003$ ), obwohl dies objektiv nicht der Fall war (s.u.: Vergleich Tageslicht- und Nachtsichtbedingungen).

Diese Angabe ist ein deutlicher Hinweis auf eine mehrheitlich bestehende Fehlwahrnehmung der eigenen Performance. Wahrscheinlichste Ursache hierfür ist die unter Nachtsichtbedingungen reduzierte zentrale Sehschärfe, welche die Einschüsse auf dem Zielchart nicht erkennbar macht. Da sich das Zielchart bis auf die neu entstehenden Einschusslöcher, welche bei reduzierter zentraler Sehschärfe meist nicht direkt sichtbar sind, im Rahmen der Versuchsdurchläufe nicht verändert, fehlt eine direkte Kontrolle der Trefferwirkung. Diese fehlende Selbstkontrolle ist sicherlich eine Übungskünstlichkeit. Bei realem Waffeneinsatz führt ein wirksamer Treffer zwangsläufig zu einer Bewegungsreaktion des Ziels, welche auch sicher unter Nachtsichtbedingungen wahrnehmbar ist. Das Training der Spezialkräfte findet derzeit bereits mit Übungszielen statt, welche eine solche Reaktion simulieren können und auf die im Training Schüsse gerichtet werden, bis eine sichtbare Reaktion eintritt [Blank 2017]. Dennoch sollte für den Umstand der fehlenden Selbstkontrolle im Rahmen der Ausbildung Bewusstsein geschaffen werden, insbesondere für die Tatsache, dass die Schießergebnisse unter Nachtsichtbedingungen tatsächlich besser sind, als es die Selbsteinschätzung vermuten lässt und somit das Vertrauen in die eigene Schießleistung unter NVG-Nutzung gestärkt werden kann. In den bisherigen Studien zur Anwenderperformance wurden keine subjektiven Selbsteinschätzungen der Teilnehmer erhoben, so dass ein Vergleich mit Literaturangaben schwierig ist. Lediglich Niall et al. haben 1999 in ihrer Studie subjektive Entfernungsschätzungen unter Nachtsichtbedingungen untersucht und im Nachhinein mit zuvor aus anderen Studien bekannten Ergebnissen aus Tageslichtschätzungen verglichen. Hier konnten jedoch zwischen Tages- und Nachtsichtbedingungen ähnliche initiale Fehleinschätzungen beobachtet werden. Vergleichbare subjektive Einschätzungen zur Schießpräzision liegen nicht vor.

Die übrigen Fragen zur subjektiven Selbsteinschätzung bezüglich möglicher Begleitphänomene (Nebelbeschlag, Schwindel) ergaben keine signifikanten Unterschiede. Über alle Fragen zur Performance hinweg ist allerdings trotz jeweils fehlender Signifikanz eine Tendenz zum weißen Phosphor zu erkennen. Hier stellt sich ebenfalls die Frage, ob diese subjektive Präferenz unter längerer NVG-Nutzung tatsächlich zu einem objektiv messbaren Performanceunterschied führt.

## 5.5 Vergleich von Tageslicht- und Nachtsichtbedingungen

Initial nur als Probedurchlauf angedacht, zeigte sich der Tageslichtdurchgang als Ausgangspunkt einer interessanten Datenmenge. Hierdurch ergab sich die Gelegenheit, die Nachtsichtergebnisse mit einem Kontrolldurchlauf zu vergleichen. Zum Planungszeitpunkt der Studie wurde von einem Performanceunterschied zwischen den beiden Phosphorfarben ausgegangen, welcher durch optimalen Vergleich herausgestellt werden sollte. Mit diesem Ziel diente der Tageslichtdurchgang vorab hauptsächlich als Sicherheitseinweisung. Aus diesem Grund wurde hierfür der obere Teil des BIV-Charts gewählt, da dieser bei Teilung des unteren Abschnitts in zwei identische Hälften für den Vergleich der Nachtsichtdurchgänge übrigblieb. Somit war die Aufgabenstellung in Zielgröße und Schusszahl im Tageslichtdurchgang leicht abweichend von den Nachtsichtdurchgängen. Als im Rahmen der Auswertung die Unterschiede zwischen Tages- und Nachtsichtbedingungen zu überraschenden Ergebnissen führten, stellte sich dieser Aufgabenunterschied anteilig als Problem heraus, da eine direkte Vergleichbarkeit nur noch bedingt möglich war, insbesondere was Zielerfüllung sowie Durchlaufzeit anging. In zukünftigen Versuchen sollte hier trotz Mehraufwand an Ressourcen ein einheitliches Ziel verwendet werden, unabhängig der ursprünglichen Auswertungsplanung.

Die Visuswerte sowie ETDRS-Scores waren bei Tageslicht erwartungsgemäß hochsignifikant besser als unter Nachtsichtbedingungen. Ebenso waren diese Kriterien bei Dunkelheit mit NVG hochsignifikant besser als ohne NVG (jeweils  $p < 0,001$ ).

Die Auswertung der Treffergenauigkeit zeigte in allen Kriterien (Trefferaufnahme, Treffergruppierung und Trefferzentrierung) signifikant (teils hochsignifikant) bessere Ergebnisse unter Nachtsichtbedingungen verglichen mit Tageslichtbedingungen bei nicht signifikanten Unterschieden in der Durchlaufzeit  $p = 0,76$  (Grün) bzw.  $p = 0,79$  (Weiß). Wird berücksichtigt, dass bei gleicher Durchlaufzeit unter Nachtsichtbedingungen drei zusätzliche Treffer erzielt werden mussten, ergibt der Vergleich der pro Schuss korrigierten Durchlaufzeit einen hochsignifikant schnelleren Parcoursdurchlauf unter Nachtsichtbedingungen (jeweils  $p < 0,001$ ). Somit konnte unter Nachtsichtbedingungen eine bessere Performance im Parcours erzielt werden als unter Tageslichtbedingungen, trotz objektiv reduzierter zentraler Sehschärfe. Dieses Ergebnis liegt

höchstwahrscheinlich am unterschiedlichen Zielverfahren unter Nachtsichtbedingungen im Vergleich zu Tageslichtbedingungen. Bei Tageslicht nutzt der Schütze die optische Visiereinrichtung des Gewehrs, bestehend aus einem vergrößernden Zielfernrohr mit Visierkreuz für große Distanzen sowie einem nicht vergrößernden Reflexvisier mit eingeblendetem Visierpunkt für kürzere Distanzen. Hiermit muss der jeweilige Visierpunkt in eine Linie zwischen Auge und Ziel gebracht werden, um einen Treffer zu erzielen. Im Gegensatz dazu wird unter Nutzung eines NVGs ein Infrarot-Ziellaser verwendet, welcher nach Bedarf ein- und ausgeschaltet werden kann. Dieser Laser projiziert einen für den NVG-Nutzer sichtbaren Zielpunkt auf das Ziel. Somit muss keine Zieloptik zwischen Auge und Ziel gebracht, sondern ausschließlich der Zielpunkt auf das Ziel gerichtet werden. Zusätzlich bleibt dem Schützen auf diese Weise das Gesichtsfeld des Nachtsichtgeräts zur Verfügung, in welchem er den Ziellaser frei bewegen und sehen kann und welches größer ist, als das bei Tageslicht zur Verfügung stehende Gesichtsfeld des Zielfernrohrs (Visierblick). Somit reduzieren sich einerseits die benötigten, richtig einzunehmenden Positionen der Zielfindung von drei bei Tageslichtbedingungen (Auge - Zieloptik - Ziel) auf zwei bei Nachtsichtbedingungen (Zieloptik - Ziel), da dem Schützen direkt angezeigt wird, wo die Waffe trifft. Andererseits steht beim Zielvorgang ein größeres, binokular nutzbares Gesichtsfeld zur Verfügung [Blank 2017]. Die besseren Trefferergebnisse lassen auf eine entweder präzisere und/oder schnellere Zielfindung schließen. Ein Zeitgewinn beim Zielvorgang führt in der Folge zu mehr Zeit zum Zielen und somit ebenfalls zu erhöhter Präzision der Trefferplatzierung. Da die Durchlaufzeit im Vergleich Tag/Nacht nicht signifikant unterschiedlich war und unter Nachtsichtbedingungen drei zusätzliche Schüsse abgegeben wurden, wird die hierfür zusätzlich benötigte Zeit unter NVG-Nutzung beim Zielvorgang gewonnen worden sein, da ein schnelleres Laufen bzw. eine schnellere Bewegung durch den Raum unter Nachtsichtbedingungen schlichtweg nicht zu erklären ist. Ein Faktor, der hier zu berücksichtigen ist, ist ein möglicher Trainingseffekt im Durchlaufverhalten. Durch den Trainingszustand der Probanden sollte gewährleistet sein, dass sich innerhalb der einzelnen Durchgänge keine relevanten Trainingseffekte aus den Durchgängen selbst bemerkbar machen. Zusätzlich wirkt die Randomisierung bezogen auf die zuerst verwendete Phosphorfarbe ausgleichend bzw. vorbeugend. Dies war allerdings im Hinblick auf die Nachtsichtdurchgänge geplant, wozu im Vorfeld ein Tageslichtdurchgang zum Kennenlernen des Parcours und der Übungsabfolge dienen sollte. Durch die nachträgliche Auswertung der Tageslichtergebnisse ist ein Ausschluss möglicher Trainingseffekte aus diesem heraus nicht sicher zu postulieren. Sicher haben die Teilnehmer in ihrer bisherigen Ausbildung und auch im echten Einsatz diverse Szenarien ähnlichen Aufbaus, mit und ohne NVG absolviert, allerdings ist gerade bei entsprechend detaillierter Auswertung (z.B. Auswertung der Durchlaufzeit im Sekundenbereich, Treffergenauigkeit in Millimeter) ein geringer Einfluss von durchlaufenen

Vordurchgängen nicht auszuschließen. Der Zeitgewinn in den folgenden Nachtsichtdurchläufen könnte hier ebenfalls einen Trainingseffekt widerspiegeln, obwohl dies im Vergleich zur Ursache im Zielverfahren deutlich unwahrscheinlich ist. In der zur Verfügung stehenden Literatur wurden Schießergebnisse unter Nachtsichtbedingungen bisher nicht untersucht. Da Schießergebnisse bei schlechter ausgebildeten Versuchskollektiven, den Anforderungen der Tätigkeit entsprechend, einer hohen Schwankung durch die individuell unterschiedlichen Schießfertigkeiten unterliegen, ist die Untersuchung von konstanter und reproduktiver zu bestimmenden Parametern wie Visus und Stereopsis selbstverständlich naheliegender. Die Erkenntnis, dass Nutzung von Nachtsichttechnik mit Einsatz von Laserzieleinrichtungen zu signifikant besserem Trefferverhalten im Nahbereichsschießen führt, ist für zukünftige Einsatzplanung von nicht zu unterschätzender Bedeutung. Insbesondere unter Berücksichtigung der subjektiven Selbsteinschätzung der Probanden, nach der die Trefferergebnisse bei Tageslicht besser eingeschätzt wurden, ist für das tatsächlich bessere Trefferverhalten unter Nachtsicht im Rahmen der Ausbildung an der Nachtsichttechnik Bewusstsein zu schaffen und auf die mögliche Fehleinschätzung hinzuweisen.



**Abbildung 18** - Soldat mit einem auf dem Gefechtshelm montierten und vor die Augen geschwenkten L 3 Quad-Eye-NVG-System sowie Infrarot-Ziellaser (Bildlizenz by GettyImages).

## 5.6 Offene Fragen und Ausblick auf kommende Untersuchungen

Objektiv geklärt werden konnte, dass es im kurzfristigen Einsatz und auf nahe Distanz keine gravierenden Unterschiede in der Performance mit Nachtsichtgeräten mit grünen oder weißen Phosphorschirmen gibt. Fragen wirft allerdings die subjektive Präferenz zum weißen Phosphor auf. Was bedingt sie? Verbessert sie die Ausdauer?

Zunächst stellt sich die Frage nach den Gegensätzen der oben genannten Aussage: Wie verhält es sich bei längerfristigem Einsatz der Nachtsichttechnik und auf längere Distanz? Gibt es Unterschiede im Ermüdungsverhalten bei unterschiedlicher Bildschirmfarbe? Hier könnten Langzeitrageversuche mit zwischenzeitlichen Konzentrationstests folgen, um diese Fragen zu beantworten. Gibt es Unterschiede in der Entfernungsbeobachtung, einerseits qualitativ bezogen auf tatsächliche Sehschärfe, andererseits auch hier langfristig im Hinblick auf Faktoren wie Ermüdung. Somit könnte eine weitere Untersuchung die Ermüdung bei längeren Beobachteraufgaben untersuchen und hier ebenfalls Tag/Nacht (Grün/Weiß) vergleichen.

Weiterhin untersucht werden kann, ob die Aufgabenstellung außerdem differenziert und präzisiert werden kann, um Performanceunterschiede zwischen den verschiedenen Phosphorfarben weiter herauszuarbeiten. Die Auswertung der Gleichgewichtsmessungen verspricht weitere Erkenntnisse, welche in die Planung zukünftiger Untersuchungen miteinbezogen werden sollten. Ebenfalls untersucht werden kann, ob eine Parcoursperformance, ähnlich wie die Vissutests, bei abnehmenden Beleuchtungsverhältnissen gleichförmig abnimmt, oder ob hier bis zu einem Beleuchtungsgrenzwert wenig Unterschiede nachweisbar sind und die Performance unterhalb dieser notwendigen Minimalbeleuchtung schlagartig abfällt. Dies wiederum sinnvollerweise verglichen zwischen einem geübten und einem ungeübten Versuchskollektiv, um hier den Einfluss eines Trainings herauszuarbeiten. Interessant ist es ebenfalls, den gewählten Ansatz als Modell für weitere Performancemessungen anderer Art heranzuziehen. Somit können andere Nachtsichtgeräte, Waffen und weiteres Material in der jeweiligen Performance damit auf diese Weise vergleichend getestet werden.

Weiterhin interessant wären zudem Wiederholungsversuche bei Tageslicht mit anderen Kollektiven, um das Maß der Präzision der Spezialkräfte in Vergleich setzen zu können z.B. mit Anfängern nach Waffenerstausbildung, fortgeschrittenen Schützen, wie Absolventen des Schießlehrerlehrgangs der Bundeswehr, sowie Spezialkräften der Polizei und ggf. Spezialkräften verbündeter Streitkräfte. Aus diesen Ergebnissen können wertvolle Rückschlüsse auf die Effektivität der Schießausbildung gezogen werden, welches direkten Einfluss auf die Gestaltung weiterer Lehrgangsinhalte hätte.

---

Die Angehörigen des KSK können zukünftig erneut als reliables Versuchskollektiv eingesetzt werden, wenn Faktoren in ihrer Auswirkung auf Schießergebnisse und somit Kampfkraft der Soldaten untersucht werden sollen, da sich die individuellen Unterschiede bezogen auf eine durchschnittliche Trefferwirkung als nicht signifikant mit geringer Streubreite erwiesen haben.

## 6 Zusammenfassung

Die Fähigkeit im Dunkeln sehen und militärische Operationen durchführen zu können ist für moderne Streitkräfte unverzichtbar. Die hierzu verwendete Nachtsichttechnik basiert im Wesentlichen auf dem Prinzip der Bildverstärkung, bei der mittels Elektronenamplifizierung ein Bild auf einem Phosphorschirm erzeugt wird, welches in Abhängigkeit vom verwendeten Phosphor monochromatisch in meist grüner, sowie gelegentlich weißer Farbe dargestellt wird. Die Bundeswehr verwendet derzeit NVGs mit grüner und mit weißer Phosphorfarbe parallel, ohne bisher vorliegende Nachweise hinsichtlich einer Überlegenheit einer dieser beiden Phosphorfarben gegenüber der anderen. In der bisherigen Literatur ist individuelle Performance unter NVG-Nutzung nur spärlich abgedeckt. Im Vergleich verschiedener Phosphorfarben wurden bisher lediglich zwei Untertypen des grünen Phosphors durch einen modifizierten Visustest untersucht. In Studien zu allgemeiner Bewegungs-Performance konnten binokulare NVGs gegenüber biokularen sowie monokularen NVGs als überlegen eingestuft werden. Literatur zur individuellen Schießperformance war zum aktuellen Zeitpunkt nicht veröffentlicht, weder bei Tageslicht noch unter Nutzung von NVGs. Insgesamt zeigte sich die zentrale Sehschärfe unter Nachtsichtbedingungen in allen Studien mit Bestwerten um 0.4 LogMar deutlich reduziert.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde unter Ausnutzung der hohen Homogenität des Versuchskollektivs ein Modell zur Performancemessung geschaffen. Die Angehörigen des KSK zeigten insbesondere hinsichtlich ihrer Schießfertigkeit individuelle Unterschiede bezogen auf die Wirkung der Treffer auf nicht signifikantem Niveau. Da Nachtsichtgeräte in ihrer Performance nah an der realen Verwendung getestet werden müssen, wurde die Versuchsanordnung als kurzzeitiges Einsatzszenario (kombinierter Parcours mit Schießübung) gestaltet.

Dabei konnte hinsichtlich der Kurzzeitperformance sowie auf kurze Wirkdistanz kein signifikanter Performanceunterschied zwischen den beiden getesteten Phosphorfarben nachgewiesen werden. Subjektiv bevorzugten die Probanden unserer Studie die weiße Phosphorfarbe, da sie am ehesten wie Tageslicht wahrgenommen wird. Objektiv zeigten sich jedoch keine signifikanten Unterschiede. Hochsignifikant besser erfüllten die Probanden die gestellten Aufgaben unter Nachtsichtbedingungen trotz objektiv deutlich reduzierter zentraler Sehschärfe verglichen mit Tageslichtbedingungen. Dies lag an wahrscheinlich an der unterschiedlichen Zielerfassungstechnik. Die klassische Zieloptik scheint den Lasertechniken hier deutlich unterlegen.

Trotzdem wurde in der Selbsteinschätzung das Tageslicht bevorzugt und die eigene Leistung im Vergleich zur Nachtsicht besser eingestuft. Die wahrscheinlichste Ursache hierfür findet sich in der fehlenden Selbstkontrolle der Trefferwirkung, durch die unter Nachtsicht reduzierte, zentrale Sehschärfe. Es zeigte sich somit insgesamt eine auffällige Fehleinschätzung der eigenen

Performance, für die im Rahmen der Ausbildung zum Umgang mit der Nachtsichttechnik Bewusstsein geschaffen werden sollte, um somit die Sicherheit der Anwender im Umgang mit der Nachtsichttechnik zu erhöhen. Da in der bisher zur Verfügung stehenden Literatur keine Veröffentlichungen zur Schießperformance existieren, kann dieser Versuchsaufbau als Ausgangsmessung zum Leistungsvergleich unterschiedlicher Kollektive hinsichtlich ihrer jeweiligen Schießfertigkeit dienen. Hiermit können verschiedene Schießausbildungskonzepte auf ihre Wirksamkeit überprüft werden. Ebenso können nun weitere Versuche im Hinblick auf längere Anwendungsdauer der NVGs und damit verbundene Ermüdungserscheinungen im Vergleich der beiden Phosphorfarben erfolgen.

## 7 Literaturverzeichnis

1. Adomeit U. (2016) „Grundlagen und neueste Entwicklung der Nachtsichttechnik. Vortrag 4. KSK Symposium Rüstung Wart 21. Sept. 2016
2. Adomeit U. Müller K. (2014) „Analyse und Leistungsbewertung von Restlichtverstärkern ALR2 Abschlussbericht“ Fraunhofer IOSB, Ettlingen
3. Behrends J. et al. (2010) *Duale Reihe Physiologie*, Georg Thieme Verlag 2010
4. Bilge et al. (2017) „A Study on the Tactical Safety of Endotracheal Intubation Under Darkness” *Military medicine* 182(7):e1722-e1725
5. Blank T. (2017) „Nachtsichttechnik aus der Sicht des KSK“ Vortrag i.R. der Studienvorbereitung Calw 23. Februar 2017
6. Bradley A. Kaiser M. K. (1994) „Evaluation of Visual Acuity with Gen III Night Vision Goggles” NASA Technical Memorandum 108792 Jan. 1994
7. CuQlock-Knopp V.G., et al. (1995) „A Comparison of Monocular, Biocular and Binokular Night Vision Goggles for Traversing Off-road Terrain on Foot” U.S. Army Research Laboratory Technical Report ARL-TR-747 1995
8. Flohr R. (1990) „Nachtsichttechnik und Gefechtsbild“, Studien und Berichte, Institut für strategische Grundlagenforschung an der Landesverteidigungsakademie Wien
9. Flohr R., Weissmann W. (1991) „Nachtsichttechnik und Gefechtsbild“, *Truppendienst* 5/1991 S. 422-327
10. Fuhrlong R. D. M. (1990) „Nachtsichtgeräte für die Infanterie“ *Armada International* 14/1990 Juni/Juli S. 6,8,13,14,16,20,22,24  
Golino L. (1984) „Instruments for seeing in the night” *Defence Today* Nr 8 1984 s 495f
11. Helmholtz H. (1857): *Das Telestereoskop*. In: *Annalen der Physik und Chemie*. Band 178, 1857, S. 167–175
12. Jacks T. (2009) „A Basic Guide to Night Vision” Hrsg. Thomas Jacks Ltd, Stratford-upon-Avon UK 2009
13. Jahn K. (2004) „Uhu und Falke – Die Entwicklung von Nachtsichtgeräten durch das Waffenamt (Heer) der Deutschen Wehrmacht“, *Panzergrenadiere – Eine Truppengattung im Spiegel Ihrer Geschichte*, Kapitel V. Hrsg Richter K.C. Munster/Örtze 2004
14. Kanski (2015) *Klinische Ophthalmologie*, "Elsevier, Urban&FischerVerlag", 2015
15. Kooi F. L., Toet A. (2004) *TNO Human Factors*, Soesterberg, The Netherlands *Visual Comfort of Binocular and 3-D Displays*
16. Kotulak J. C. Rash C. E. (1992) „Visual Acuity with Second and Third Generation Night Vision Goggles Obtained from a New Method of Night Sky Simulation Across a Wide Range of Target Contrast” U.S. Army Aeromedical Research Laboratory Report No 92-9
17. Macht H. G. (1972) „Zum Problem der Nachtsicht“, *Fachliche Mitteilungen* Nr. 172 Amt für Wehrgeophysik
18. Mashall S. L. A. (1998) „Infantry Operations and Weapons Usage in Korea” London 1988 S. 3ff
19. Naughton R. (2004). "Kalman Tihanyi (1897 - 1947)". Monash University. Retrieved 2013
20. Niall K. K. et al. (1999) „Distance estimation with night vision goggles: a little feedback goes a long way” *Human factors: the journal of the Human Factors and Ergonomics Society* S.495-506, discussion 507-10

21. Palmer D. R. (1984) "Summons of the Trumpet. A History of the Vietnam War from a Military Man's Viewpoint" New York 1984 S. 177ff
22. Pevoski R. J. (1991) "Erweiterung der Nachtkampffähigkeit: Taktische und operative Konsequenzen" Jahresarbeit Führungsakademie d. Bundeswehr, Hamburg 1991
23. Pinkus A. Lee Task H. (1998) "Measuring Observers' Visual Acuity Through Night Vision Goggles" Air Force Research Laboratory, Human Effectiveness Directorate
24. Rabin J. (1994) "Visual evoked potentials through night vision goggles" Aviation, space & environmental medicine: The official journal of Aerospace Medical Association 65(4) S. 345-7
25. Rabin J. McLean W. (1996) "A Comparison between Phosphors for Aviator's Night Vision Imaging System" U.S. Army Aeroedical Research Laboratory Report No. 96-39
26. Sangwook B. Chulhee L. (2016) "Depth perception estimation of various stereoscopic display" Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, 134 Shinchon-Dong, Seodaemun-Ku, Seoul 120-749, South Korea
27. Schmickley D. L. (2001) "Night Vision Goggles" Boeing Helicopter Co. Kap. 7 by CRC Press LLC
28. Schulz W. (2009) "Nachtsichttechnik, Funktionsweise von Restlichtverstärkern, Teil 1 - Im Dunkeln" Das deutsche Waffen-Journal: DWJ 45 (2009) H.12 S. 45 - 51
29. Schwartz et al. (2001) „Orotracheal Intubation in Darkness Using Night Vision Goggles" Military Medicine 166(11):984-6
30. Sünkler S. (2014) "SOF: uns gehört die Nacht!" K-isom: international special operations magazine 2014 H.2, S. K-60-K-63
31. Subramanian P. S. et al. (2003) "Visual performance with night vision goggles after photorefractive keratectomy for myopia" Ophthalmology off. Journal of the American Academy of Ophthalmology, Band 110(3) S. 525-30
32. Technisches Datenblatt "L3 – Quadeye" L3 2015
33. Told R. et. al. (2013) „ETDRS (Early Treatment Diabetic Retinopathy Study)-Visus", Der Ophthalmologe 10/2013 S.960ff
34. Vázquez et al. (2010) "Open surgery while wearing night vision goggles" Journal of Cyber Therapy and Rehabilitation 3 (3):307-311
35. White A. (2016) „On the bright side", Land warfare international 7(2016) Heft 3 S. 27-32
36. Wiley R. W. (1989) "Visual Acuity and Stereopsis with Night Vision Goggles", U.S. Army Aeroedical Research Laboratory Report No 89-9 1989
37. DIN 5031 Teil 7: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik; Benennung der Wellenlängenbereiche. Januar 1984 (IR, VIS und UV).

## 7.1 Internetquellen

1. [www.neuronresearch.net](http://www.neuronresearch.net).  
Light & Dark Adaptation in human vision (Zugriff letztmalig. 20.03.2019)
2. [Webvision.med.utah.edu](http://Webvision.med.utah.edu)  
The Organization of the Retina and Visual System (Zugriff letztmalig 10.12.2019)
3. [www.ptd.de](http://www.ptd.de)  
Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Definition und Realisierung photometrischer Einheiten (Zugriff letztmalig. 20.03.2019)
4. [www.intas.org](http://www.intas.org).  
Night-Vision-Goggles (Zugriff letztmalig 07.07.2018)
5. [www.photonis.com](http://www.photonis.com)  
Learning Center (Zugriff letztmalig 12.12.2018)

## Lebenslauf