

Aus der  
- Klinik und Poliklinik für Kinderchirurgie -  
der Universitätsmedizin der Johannes Gutenberg Universität Mainz

**„Einfluss des Probandenalters auf die natürliche operative  
Performance am Mimic dV-Trainer®“**

D i s s e r t a t i o n  
zur Erlangung des Doktorgrades der Medizin  
der Universitätsmedizin  
der Johannes-Gutenberg-Universität Mainz  
vorgelegt von  
Julia Seubert–Elaaboudi, geb. Seubert  
Trier

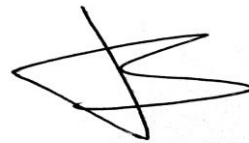
Mainz, 2022

Tag der Promotion: 06.12.2022

## Eidesstattliche Erklärung

„Ich versichere, dass ich die Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen oder anderen Quellen (auch Internet) entnommen sind, habe ich als solche eindeutig kenntlich gemacht. Die Arbeit ist noch nicht veröffentlicht und noch nicht zur Anerkennung oder Bewertung vorgelegt worden. Mir ist bekannt, dass Verstöße gegen diese Anforderungen zur Bewertung der Arbeit mit der Note „nicht ausreichend“ führen sowie die Nichterteilung des angestrebten Leistungsnachweises zur Folge haben.“

Kelberg, den 27.06.2022

A handwritten signature in black ink, consisting of several overlapping loops and lines, positioned above a horizontal line.

---

## Inhalt

<b>1. Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Allgemeines .....	1
1.2 Fragestellung und Zielsetzung .....	3
<b>2 Literaturdiskussion</b> .....	<b>5</b>
2.1 Simulationsrobotik und Digitalisierung in der Medizin .....	5
2.2 Phasen der motorischen Entwicklung (motorische Ontogenese).....	11
2.3 Kognitive Entwicklung .....	16
2.4 Berufstypologie und Produktivität im Alter .....	21
2.5 Ruhestandsregelungen für Chirurgen .....	23
<b>3 Material und Methoden</b> .....	<b>30</b>
3.1 Studienformat.....	30
3.2 Probandenkollektiv und Akquise .....	30
3.2.1 Einschlusskriterien .....	30
3.2.2 Altersstufen .....	31
3.3 Ethikvotum und Registrierung.....	31
3.4 Studienfinanzierung .....	31
3.5 Studienablauf.....	32
3.5.1 Pilotstudie.....	32
3.5.2 Hauptstudie .....	33
3.6 Datenerhebung und Statistik.....	35
3.6.1 Excel- und SPSS-Datei .....	35
3.6.2 Deskriptive Statistik und explorative Datenanalyse .....	36
3.7 Operativer Trainingssimulator Mimic dV-Trainer® .....	37
3.7.1 Allgemeiner Aufbau und Funktionsweise .....	37
3.7.2 Mögliche Leistungsmetriken .....	40
3.7.3 Ausgewählte Übungen im Rahmen der Studie.....	42

---

<b>4</b>	<b>Ergebnisse</b> .....	<b>47</b>
4.1	Gesamtzusammenfassung der Ergebnisse .....	47
4.2	Ergebnisse im Detail .....	49
4.2.1	Pick and Place.....	49
4.2.2	Basic Camera Targeting.....	60
4.2.3	Thread The Rings.....	70
<b>5</b>	<b>Diskussion</b> .....	<b>81</b>
5.1	Interpretation der Ergebnisse und Vergleich mit bestehender Literatur	81
5.2	Limitierungen und Ausblick .....	89
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>92</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>93</b>

---

## Abkürzungsverzeichnis

AR	Augmented Reality
VR	Virtual Reality
FRS	Fundamentals of Robotic Surgery
PP	Pick and Place
BCT	Basic Camera Targeting
TTR	Thread the Rings
EOM	Economy of motion
EIF	Excessive Instrument Force
IC	Instrument Collision
IOV	Instruments out of View
MWSR	Master Workspace Range
TTCE	Time to complete Exercise
SA	Standardabweichung
VA	Variationskoeffizient
HK	Humankapital
CRASS	Cognitive Changes and Retirement among Senior Surgeons
v.a.	vor allem
Abb.	Abbildung
dV-Trainer	da Vinci-Trainer
z.B.	zum Beispiel

---

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 : Konsens über die Gewichtung der wichtigsten Eigenschaften bei der Auswahl der chirurgischen Auszubildenden, Cuschieri et al 2001(7).....	9
Abbildung 2: Durchschnittliche Altersentwicklung der verschiedenen Komponenten, S. Veen [21]	20
Abbildung 3: Durchschnittliche Altersproduktivitäts-Profile der drei Berufstypen: S. Veen [21] ....	22
Abbildung 4: Die Auswirkungen des Alterns auf die Biologie des Gehirns und dessen Funktion [42] .....	23
Abbildung 5: Pilotstudie, Overallscore PP pro Altersstufe (eigene Darstellung) .....	33
Abbildung 6: Pilotstudie, Overallscore BCT pro Altersstufe (eigene Darstellung).....	33
Abbildung 7: Flowchart zum geplanten Studienablauf (eigene Darstellung).....	35
Abbildung 8: dV-Trainer® Main Hardware Components [56].....	37
Abbildung 9: Master Grips und Tension Cables [56] .....	38
Abbildung 10: Fußschalter [56] .....	39
Abbildung 11: Übung: Pick and Place [56] .....	43
Abbildung 12: Ergebnisübersicht Pick and Place [56].....	43
Abbildung 13: Übung: Basic Camera Targeting [56].....	44
Abbildung 14: Ergebnisübersicht Basic Camera Targeting [56] .....	45
Abbildung 15: Übung: Thread The Rings [56].....	46
Abbildung 16: Ergebnisübersicht Thread the Rings, eigenen Aufnahme .....	46
Abbildung 17: : Kruskal-Wallis-Test PP_Drops, niedriger Wert bedeutet bessere Performance (eigene Darstellung).....	51
Abbildung 18: Kruskal-Wallis-Test PP_EOM, niedriger Wert bedeutet bessere Performance (eigene Darstellung) .....	52
Abbildung 19: Kruskal-Wallis-Test PP{EIF, niedriger Wert bedeutet bessere Performance (eigene Darstellung) .....	54
Abbildung 20 : Kruskal-Wallis-Test PP_IC, niedriger Wert bedeutet bessere Performance (eigene Darstellung) .....	55
Abbildung 21 : Kruskal-Wallis-Test PP_IOV, niedriger Wert bedeutet bessere Performance (eigene Darstellung) .....	56
Abbildung 22 : Kruskal-Wallis-Test PP_MWSR, niedriger Wert bedeutet bessere Performance (eigene Darstellung).....	57
Abbildung 23 : Kruskal-Wallis-Test PP_TTCE, niedriger Wert bedeutet bessere Performance (eigene Darstellung).....	58
Abbildung 24 : Kruskal-Wallis-Test BCT_EOM. niedriger Wert bedeutet bessere Performance (eigene Darstellung).....	62
Abbildung 25: Kruskal-Wallis-Test BCT_IC, niedriger Wert bedeutet bessere Performance (eigene Darstellung) .....	64

---

<b>Abbildung 26 : Kruskal-Wallis-Test BCT_IOV, niedriger Wert bedeutet bessere Performance (eigene Darstellung) .....</b>	<b>65</b>
<b>Abbildung 27 : Kruskal-Wallis-Test BCT_MWSR, niedriger Wert bedeutet bessere Performance (eigene Darstellung).....</b>	<b>66</b>
<b>Abbildung 28 : Kruskal-Wallis-Test BCT_TTCE, niedriger Wert bedeutet bessere Performance (eigene Darstellung).....</b>	<b>68</b>
<b>Abbildung 29 : Kruskal-Wallis-Test TTR_Drops, niedriger Wert bedeutet bessere Performance (eigene Darstellung).....</b>	<b>72</b>
<b>Abbildung 30 : Kruskal-Wallis-Test TTR_EOM, niedriger Wert bedeutet bessere Performance (eigene Darstellung).....</b>	<b>73</b>
<b>Abbildung 31 : Kruskal-Wallis-Test TTR{EIF, niedriger Wert bedeutet bessere Performance (eigene Darstellung) .....</b>	<b>75</b>
<b>Abbildung 32 : Kruskal-Wallis-Test TTR_IC, niedriger Wert bedeutet bessere Performance (eigene Darstellung) .....</b>	<b>76</b>
<b>Abbildung 33 : Kruskal-Wallis-Test TTR_IOV, niedriger Wert bedeutet bessere Performance (eigene Darstellung) .....</b>	<b>77</b>
<b>Abbildung 34 : Kruskal-Wallis-Test TTR_MWSR, niedriger Wert bedeutet bessere Performance (eigene Darstellung).....</b>	<b>78</b>
<b>Abbildung 35 : Kruskal-Wallis-Test TTR_TTCE, niedriger Wert bedeutet bessere Performance (eigene Darstellung).....</b>	<b>80</b>



---

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 : Mittelwert, Standardabweichung, Variationskoeffizient und Medianwert der verschiedenen Altersstufen bezogen auf die Values der Übung PP (eigene Darstellung).....	49
Tabelle 2: Mittelwert, Standardabweichung, Variationskoeffizient und Medianwert der verschiedenen Altersstufen bezogen auf die Values der Übung PP (eigene Darstellung).....	49
Tabelle 3 : Mittelwert, Standardabweichung, Variationskoeffizient und Medianwert der verschiedenen Altersstufen bezogen auf die Values der Übung PP (eigene Darstellung).....	50
Tabelle 4 : signifikante Unterschiede beim paarweisen Vergleich der Altersgruppen untereinander, inklusive Effektstärke PP_Drops.....	51
Tabelle 5 : signifikante Unterschiede beim paarweisen Vergleich der Altersstufen untereinander, inklusive Effektstärke PP_EOM (eigene Darstellung).....	53
Tabelle 6 : signifikante Unterschiede beim paarweisen Vergleich der Altersstufen untereinander, inklusive Effektstärke PP_IOV .....	56
Tabelle 7 : signifikante Unterschiede beim paarweisen Vergleich der Altersstufen untereinander, inklusive Effektstärke PP_TTCE (eigene Darstellung).....	59
Tabelle 8 : Mittelwert, Standardabweichung, Variationskoeffizient und Medianwert der verschiedenen Altersstufen bezogen auf die Values der Übung BCT (eigene Darstellung).....	60
Tabelle 9 : Mittelwert, Standardabweichung, Variationskoeffizient und Medianwert der verschiedenen Altersstufen bezogen auf die Values der Übung BCT (eigene Darstellung).....	60
Tabelle 10 : Mittelwert, Standardabweichung, Variationskoeffizient und Medianwert der verschiedenen Altersstufen bezogen auf die Values der Übung BCT (eigene Darstellung).....	60
Tabelle 11 : signifikante Unterschiede beim paarweisen Vergleich der Altersstufen untereinander, inklusive Effektstärke BCT_EOM (eigene Darstellung).....	62
Tabelle 12 : signifikante Unterschiede beim paarweisen Vergleich der Altersstufen untereinander, inklusive Effektstärke BCT_MWSR (eigene Darstellung).....	67
Tabelle 13 : signifikante Unterschiede beim paarweisen Vergleich der Altersstufen untereinander, inklusive Effektstärke BCT_TTCE (eigene Darstellung).....	69
Tabelle 14 : Mittelwert, Standardabweichung, Variationskoeffizient und Medianwert der verschiedenen Altersstufen bezogen auf die Values der Übung TTR (eigene Darstellung).....	70
Tabelle 15 : Mittelwert, Standardabweichung, Variationskoeffizient und Medianwert der verschiedenen Altersstufen bezogen auf die Values der Übung TTR (eigene Darstellung).....	70
Tabelle 16 : Mittelwert, Standardabweichung, Variationskoeffizient und Medianwert der verschiedenen Altersstufen bezogen auf die Values der Übung TTR (eigene Darstellung).....	71
Tabelle 17 : signifikante Unterschiede beim paarweisen Vergleich der Altersstufen untereinander, inklusive Effektstärke TTR_Drops (eigene Darstellung) .....	72
Tabelle 18 : signifikante Unterschiede beim paarweisen Vergleich der Altersstufen untereinander, inklusive Effektstärke TTR_EOM (eigene Darstellung).....	74

---

<b>Tabelle 19 : signifikante Unterschiede beim paarweisen Vergleich der Altersstufen untereinander, inklusive Effektstärke TTR{EIF (eigene Darstellung).....</b>	<b>75</b>
<b>Tabelle 20 : signifikante Unterschiede beim paarweisen Vergleich der Altersstufen untereinander, inklusive Effektstärke TTR{IOV (eigene Darstellung).....</b>	<b>77</b>
<b>Tabelle 21 : signifikante Unterschiede beim paarweisen Vergleich der Altersstufen untereinander, inklusive Effektstärke TTR{MWSR (eigene Darstellung).....</b>	<b>79</b>
<b>Tabelle 22 : signifikante Unterschiede beim paarweisen Vergleich der Altersstufen untereinander, inklusive Effektstärke TTR{TTCE (eigene Darstellung).....</b>	<b>80</b>

---

# 1. Einleitung

## 1.1 Allgemeines

Die fortschreitende Technisierung in der Medizin führt auch im Bereich der Chirurgie zu weiteren Möglichkeiten, wie der „roboterassistierten Chirurgie“. Darunter versteht man den Einsatz von Operationsrobotern bei operativen Eingriffen, der heutzutage aufgrund der digitalen Transformation im Medizinsektor sowie des drastischen Fortschreitens der Digitalisierung stetig an Bedeutung gewinnt. Es existieren verschiedene Robotiksysteme, welche in aktive Systeme, die nur beaufsichtigt werden und selbstständig arbeiten, in semi-aktive Systeme, bestehend aus einem Zusammenspiel von Operateur<sup>1</sup> und Roboter und Master-Slave-Systeme eingeteilt werden. Beim Master-Slave-System wird der Roboter vollständig durch den Operateur gesteuert. Eine Variante dieser Systeme stellt dabei das Da-Vinci-System dar (1).

Roboter-assistierte Operationen finden heutzutage Verwendung unter anderem in Bereichen der Herzchirurgie, der Urologie, der Gynäkologie, der Kinderchirurgie und der Allgemeinchirurgie. Es findet ein stetiger Fortschritt in der Entwicklung der Roboter statt, sodass immer weitere Einsatzgebiete erarbeitet werden. Der Da-Vinci-Roboter zählt mit 80 verschiedenen Systemen in Deutschland aktuell zu den wichtigsten Vertretern von Operationsrobotern (1, 2).

Häufig angegebene Vorteile des Da-Vinci-Roboters bestehen unter anderem in der guten Visualisierung des Operationsgebietes durch bis zu zehnfacher Vergrößerung sowie das Arbeiten in Dreidimensionalität. Darüber hinaus erlauben die sieben Freiheitsgrade der Arbeitsarme eine Beweglichkeit und Präparation, die der konventionellen Laparoskopie deutlich überlegen sind. Ein weiterer positiver Gesichtspunkt stellt der Tremorfilter dar, der in der Lage ist, das Zittern der Hände des Operateurs auszugleichen, wodurch die Instrumente präzise und sicher geführt werden können. Vorteilhaft für den Patienten sind unter anderem die schnelle postoperative Erholung durch verringerten Blutverlust, häufig geringere Schmerzen und der damit einhergehende verkürzte Klinikaufenthalt (2).

---

<sup>1</sup>Zur Erleichterung der Lesbarkeit wird in dieser Arbeit insgesamt nicht in geschlechtsspezifischen Personenbezeichnungen unterschieden. Die gewählte männliche Form schließt eine weibliche Form gleichberechtigt ein.

---

Die negativen Aspekte bilden die hohen Kosten für die Anschaffung, Betrieb und Instandhaltung der Robotersysteme, als auch das zwingend notwendige Training der Operateure, bis diese in der Lage sind, das System sicher zu bedienen (3). Um diese Einarbeitung zu gewährleisten, steht ein validierter Simulationsroboter, der Mimic dV-Trainer®, zur Verfügung, der dem Da-Vinci-Roboter nachempfunden wurde (2) und die Grundlage dieser Dissertation bildet. Dabei handelt es sich um einen eigenständigen Virtual-Reality (VR-) -Simulator mit einem automatischen und leistungsorientierten Bewertungssystem zur Beurteilung psychomotorischer Fähigkeiten – das System arbeitet also als digitaler Zwilling zum realen Roboter. Die Beurteilung dieser Fähigkeiten erfolgt anhand von Übungen und den untergeordneten Metriken, die im Teil Material und Methoden dieser Arbeit näher erläutert werden (4). An diesem Simulator können Operateure ausgebildet werden, sowie bereits erfahrene Chirurgen möglichst realitätsnah und kostengünstig außerhalb des Operationssaals ihre Fähigkeiten verbessern und ein gezieltes Training zu bestimmten Fällen absolvieren (5).

Die minimalinvasive und neuerdings auch die robotergestützte Chirurgie erfordern in noch höherem Maße als die offene Chirurgie die richtige Mischung aus psychomotorischen, manipulativen, visuell-räumlichen und tiefenpsychologischen Fähigkeiten (6). Diese Fähigkeiten sind somit für die Bedienung des Mimic dV-Trainers® von zentraler Bedeutung.

In einer Delphi-Studie, an der international anerkannte Meisterchirurgen, die chirurgische Ausbildungsprogramme leiteten, teilnahmen, nannten alle die angeborene Geschicklichkeit als den wichtigsten Faktor, für den Erwerb technischer Fertigkeiten eines angehenden Chirurgen, noch vor kognitiven Faktoren und Persönlichkeitsmerkmalen (7). Eine weitere Studie aus dem Jahre 2006 von W.E. Thomas beschrieb die folgenden Eigenschaften als notwendige Kompetenzen, die ein guter Chirurg mitbringen sollte: eine solide Wissensbasis, gute Kommunikationsfähigkeiten, kompetente technische Fähigkeiten und ein ausgezeichnetes klinisches Urteilsvermögen (8).

Das Alter spielt bei der Entwicklung psychomotorischer Fertigkeiten eine große Rolle und kann in verschiedene altersbezogene Phasen (9) eingeteilt werden. Sie erstreckt sich von der Phase der pränatalen motorischen Entwicklung über die entsprechenden Phasen der Kindheit und Adoleszenz bis hin zu Erwachsenenalter. Im mittleren

---

bis späten Erwachsenenalter sind der Rückgang sowie der Verlust bestimmter, vor allem komplizierter Fertigkeiten zu erkennen.

Neben der Entwicklung der motorischen Fertigkeiten sind die Entwicklung und der im Alter beschriebene Abbau der kognitiven Fertigkeiten Schwerpunkt dieser Studie und sollen ebenfalls im Weiteren genauer betrachtet und diskutiert werden.

## **1.2 Fragestellung und Zielsetzung**

In dieser Dissertation soll die Fragestellung untersucht werden, inwieweit das Probandenalter die natürliche Performance am Mimic dV-Trainer® beeinflusst. Ziel ist es, herauszufinden, in welchem Alter die größtmögliche Leistung an dem Robotersimulator erbracht werden kann und inwiefern das Altern die natürliche operative Performance beeinflussen kann.

Chirurgisches Training sollte ab einem bestimmten Lebensalter gefördert werden, da ab diesem Alter bereits eine hohe natürliche operative Performance besteht, die dann optimal und sinnvoll gefördert werden könnte. Durch ein frühzeitigeres, gezieltes chirurgisches Training z.B. an Simulationsrobotern könnte die hohe Produktivität eines Arztes früher erreicht werden. Heutzutage beginnt die berufliche Laufbahn eines Chirurgen oft erst zwischen dem 25. und 35. Lebensjahr, bedingt durch die 13-jährige Schulzeit, eventuell erforderliche Wartesemester, das 6-jährige Medizinstudium und die nachfolgende Facharztausbildung. Eventuell ist hier der Zeitpunkt für ein optimales Training am Operationsroboter bereits überschritten, sodass der bestmögliche Lernerfolg dadurch nicht mehr gewährleistet werden kann. Zudem bietet die Ausbildung am digitalen Zwilling der Geräte bereits im Studium der Medizin die Möglichkeit, zukünftige Geräte, Techniken und Anforderungen kennen und bewerten zu lernen. Zur näheren Betrachtung der oben genannten Fragestellung werden die Versuche durch Probanden innerhalb definierter Altersstufen durchgeführt. Die daraus gewonnenen Ergebnisse könnten eine Grundlage bieten, um bereits rechtzeitig Unterricht am Simulationsroboter zu etablieren. Dies könnte dazu beitragen, zukünftige Chirurgen bestmöglich auf ihre berufliche Tätigkeit vorzubereiten. Zusätzlich könnte eine Diskussion angeregt werden, ob das Setzen einer bestimmten Lebensaltersgrenze für gewisse chirurgische Tätigkeiten oder aber wiederholende Eignungsprüfungen zur Bestimmung der Leistung ab einem bestimmten Alter sinnvoll wären.

---

Das optimale Alter mit der größtmöglichen Leistungsfähigkeit an Robotersimulatoren ist weiterhin unbekannt und soll im Rahmen dieser Studienarbeit für den Mimic dV-Trainer® und letztendlich damit für den Da-Vinci-Roboter erstmals natürlich ermittelt werden.

---

## 2 Literaturdiskussion

### 2.1 Simulationsrobotik und Digitalisierung in der Medizin

In der Literatur existieren bereits mehrere Studien, die sich mit dem Mimic dV-Trainer® und weiteren Simulationsrobotern beschäftigen. Dabei geht es unter anderem um die Thematik der deutlich zunehmenden und sich ständig weiterentwickelnden Digitalisierung im Gesundheitswesen. Auch die Fragestellung nach der Implementierung eines bundeseinheitlichen chirurgischen Curriculums für angehende Chirurgen zur bestmöglichen Vorbereitung auf ihre spätere Tätigkeit, auch in Hinblick auf robotergestützte Chirurgie, ist Teil der Studienlage. Diese Studien befassen sich jedoch meist mit der Entwicklung von Lernkurven an verschiedenen chirurgischen Simulatoren. Die Frage nach dem idealen Zeitpunkt für den Beginn eines solchen Curriculums aufgrund der bereits vorhandenen natürlichen operativen Performance wird hierbei nicht bearbeitet. Somit versucht die vorliegende Dissertation diese Forschungslücke zu schließen. Im Folgenden wird näher auf die für den Fokus dieser Arbeit relevantesten Studien eingegangen.

Eine Studie von S. Kuhn et al. der Universitätsklinik in Mainz (10) aus 2021 beschäftigt sich mit der chirurgischen Ausbildung im digitalen Zeitalter. Aufgrund der aktuell herrschenden Corona-Pandemie und der damit verbundenen Notwendigkeit der digitalen Lehre sowie des rasanten Fortschrittes der Digitalisierung der Gesellschaft, der Wirtschaft, aber ebenso des Medizinsektors wurde das Curriculum „Medizin im digitalen Zeitalter“ geschaffen. Dieses integriert die digitale Ausbildung der Studierenden in den Lehrplan des Humanmedizinstudiums und wird erstmals strukturiert evaluiert. Das Modul 4 dieses Curriculums beschäftigte sich mit der Thematik der Virtual Reality (VR), der Augmented Reality (AR) und der Robotik. 35 Studierende der Humanmedizin nahmen an dem Projekt teil. Dabei wurden unter anderem erstmals Basisfertigkeiten für robotische Chirurgie anhand des Mimic dV-Trainers® eingeübt. Die Evaluation in Form von semistrukturierten Interviews zeigte die hohe Akzeptanz des Kurskonzeptes. Sowohl die Möglichkeiten zum Expertengespräch mit erfahrenen Chirurgen als auch die Übung an und mit neuer Simulationstechnik wurde von den Studierenden sehr positiv aufgefasst. Die Prä-post-Evaluation zeigte eine positive Selbsteinschätzung des Lernerfolgs in den Teilkompetenzen Wissen und Fertigkeiten. Somit zeigt diese Studie die hohe Akzeptanz zur Integration eines solchen Curri-

---

culums in den Lehrplan der Humanmedizin. Weder der Nationale Kompetenzbasierte Lernzielkatalog (NKLM) aus dem Jahr 2015 noch der Masterplan Medizinstudium 2020 beinhalten entsprechende Aspekte der digitalen Transformation.

Bhakhri et al. (11) beschäftigten sich 2021 mit der Thematik, ob die Simulation robotergestützter Chirurgie schon frühzeitig in der chirurgischen Ausbildung eingeführt werden sollte. Dazu wurde eine qualitative Literaturrecherche durchgeführt. Die Einschlusskriterien umfassten die Auswahl akademischer Ressourcen, die sich auf die robotergestützte Chirurgesimulation und das chirurgische Kerncurriculum konzentrieren. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass der Einsatz von Robotern im Gesundheitswesen noch nicht so weit gediehen ist wie in anderen Branchen. Dennoch kann die Robotersimulation bei chirurgischen Eingriffen, unter anderem in der Urologie, eingesetzt werden. Die Forschung zeigt, dass der Einsatz von Robotern in der Gesundheitsbranche, insbesondere in der chirurgischen Ausbildung, für die Studenten von großem Nutzen ist, da er den Erwerb von Fertigkeiten und Kenntnissen der Chirurgen fördert und verbessert und somit die Gefahr von Patientenschäden verringert werden kann. Ein Ausbildungsmodell, ein entsprechender Lehrplan sowie eine Bewertung für die Ausbildung von Chirurgiestudierenden vor Beginn ihrer chirurgischen Tätigkeit wird vorgeschlagen. In der untersuchten Literatur wird der Einsatz der Roboterchirurgie als zentrales Instrument für die gesamte Ausbildung diskutiert. Die Einführung der robotergestützten Chirurgesimulation hat somit das Potenzial, die chirurgische Ausbildung erheblich zu verbessern.

Kenney et al. (12) publizierten eine prospektive Studie in Bezug auf die Oberflächen-, Inhalts- und Konstruktvalidität des Mimic dV-Trainers®. Dazu führten Anfänger und erfahrene Chirurgen unterschiedliche Übungen am Mimic dV-Trainer® durch. Durch den Vergleich der Leistungen beider Gruppen wurde die Konstruktvalidität bestimmt. Anschließend wurde mit Hilfe einer Umfrage innerhalb der beiden Gruppen die Gültigkeit für die Oberfläche und den Inhalt des Simulators festgelegt. Alle Anfänger stufte den Mimic dV-Trainer® als realistische Übungsvariante ein. Die erfahrenen Chirurgen beurteilten den Simulator als nützlich für die Schulung von Ärzten und Chirurgen. Der Vergleich zwischen Anfängern und erfahrenen Chirurgen zu Zwecken der Testung der Konstruktvalidität ergab, dass die erfahrenen Chirurgen alle Module deutlich schneller absolvierten. Außerdem wurden die Anfänger in gewissen Übungen in der Instrumentenbewegung, der Anzahl der Instrumentenkollision und dem Bewegungsradius übertroffen. Schlussfolgernd ergab sich eine hohe Validität von



---

Inhalt, Oberfläche und Konstruktion des Mimic dV-Trainers®, womit gezeigt werden konnte, dass er als nützlicher Simulator für das Training und die Bewertung in der Roboterchirurgie dienen könnte. Einige Module müssten jedoch inhaltlich noch verbessert und angepasst werden.

In einer Studie von Kyaw et al. (13) aus dem Jahre 2019 wurde festgestellt, dass, verglichen mit traditioneller Lehre, AR- und VR-Simulationsszenarien den Wissensstand und die kognitiven Fähigkeiten der Teilnehmer in höherem Maße verbessern.

Auch Satava et al. (14) beschäftigten sich 2019 in einer internationalen, verblindeten, randomisierten Kontrollstudie mit der Fragestellung, ob ein Lehrplan für die Grundlagen der Roboterchirurgie (Fundamentals of Robotic Surgery, FRS) für die Vermittlung grundlegender roboterchirurgischer Fertigkeiten vorteilhaft sein könnte. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass alle Probanden eine signifikante Leistungsverbesserung nach dem Kompetenztraining im Vergleich zu ungeschulten Probanden zeigten. Die teilnehmenden Assistenzärzte und Stipendiaten führten die Aufgaben schneller und mit weniger Fehlern als die Kontrollgruppe aus. Somit konnte die Wirksamkeit des FRS-Curriculums nachgewiesen werden.

Meier et al. (15) führten im Jahre 2016 eine Studie am da-Vinci-Skills-Simulator durch, die sich mit der Fragestellung beschäftigte, ob die Lernkurve des Simulatortrainings von Merkmalen wie Alter oder der laparoskopischen bzw. allgemeinchirurgischen Vorerfahrung der Probanden abhängt. Dazu wurden 28 Probanden in sechs Gruppen eingeteilt: drei erfahrene Roboterchirurgen, fünf Chirurgen mit Erfahrung als da-Vinci-Tisch-Assistenten, fünf urologische Chirurgen mit laparoskopischer Erfahrung, fünf urologische Chirurgen ohne laparoskopische Erfahrung, fünf völlige Neulinge im Alter von 25 Jahren und jünger und fünf Neulinge im Alter von 40 Jahren und älter. Es galt herauszufinden, ob eine Gruppe definiert werden kann, die am ehesten von einem Simulatortraining in der robotergestützten Chirurgie profitiert oder ob das Simulatortraining allgemein anwendbar und für Chirurgen aller Karrierestufen von Vorteil ist. Alle Gruppen führten drei verschiedene Übungen aus. Zuvor erhielten alle Teilnehmer die gleiche verbale Einführung in den Da-Vinci-Skills-Simulator. Weiterhin diente die Aufgabe „Camera Targeting“ als Aufwärmübung, um sich mit dem Da-Vinci-Skills-Simulator vertraut zu machen. Im Anschluss durfte jede der drei Übungen innerhalb der vorgegebenen Zeit beliebig oft wiederholt werden. Die maximale Trainingsdauer von einer Stunde durfte dabei nicht überschritten werden. In allen Grup-

---

pen war eine Leistungsverbesserung durch die Wiederholungsläufe zu verzeichnen. Dies bestätigte die Nützlichkeit des Da-Vinci-Skills-Simulators für die Ausbildung in der Roboterchirurgie. Lediglich die Gruppen der erfahrenen Roboterchirurgen, der Da-Vinci-Tischassistenten und der Neulinge unter 25 Jahren erreichten innerhalb der vorgegebenen Zeit des Trainings das Expertenniveau. Die Gruppe der erfahrenen Roboterchirurgen erzielte die besten Ergebnisse im Vergleich zu den restlichen Probanden. Die Da-Vinci-Tischassistenten schnitten am zweitbesten ab. Die Erfahrung mit laparoskopischen Eingriffen zeigte einen leicht positiven Effekt auf die Simulationsleistung, während die allgemein chirurgische Erfahrung keinen positiven Einfluss auf die Leistung zu haben schien. Bezogen auf das Alter der völligen Neulinge fiel auf, dass alle unter 25-Jährigen mit durchschnittlich maximal vier Wiederholungen das Expertenniveau erreichten. Bei den Neulingen über dem 40. Lebensjahr erreichten nur 60 % der Probanden mit durchschnittlich sieben Wiederholungen das Expertenniveau. Ob dies mit einer höheren Geschicklichkeit oder der vermehrten Computerspielerfahrung in jüngeren Jahren zusammenhängt, konnte im Rahmen der Studie nicht abschließend beantwortet werden. Im Allgemeinen kamen die Autoren zu dem Ergebnis, dass die Leistung in der robotergestützten Chirurgie vom Alter und der Vorerfahrung in robotergestützter und laparoskopischer Chirurgie abhängt. Damit war also die Konstruktvalidität des Da-Vinci-Simulators bestätigt. Die Lernkurven wurden von diesen Faktoren jedoch nicht signifikant beeinflusst, sodass davon auszugehen ist, dass der Da-Vinci-Skills-Simulator ein nützliches Übungsinstrument für alle ist, die robotergestützte Eingriffe erlernen wollen. Eine frühzeitige Auswahl besonders talentierter Chirurgen erscheint dieser Studie zufolge weder möglich noch notwendig. Allerdings zeigt die Studie eine gewisse Altersabhängigkeit der Performance, oder jedenfalls der Lernfähigkeit.

In einer Delphi-Studie von Cuschieri et al. (7) bestimmten Meisterchirurgen, die chirurgische Ausbildungsprogramme leiteten, die drei wichtigsten Grundvoraussetzungen für das effiziente Erwerben von technischen Fertigkeiten, die ein angehender Chirurg dringend benötigt. Dies sind kognitive Faktoren, die angeborene Geschicklichkeit und die Persönlichkeit. Es herrschte Einigkeit darüber, dass die angeborene Geschicklichkeit des Einzelnen der stärkste Bestimmungsfaktor für das Niveau der technischen (operativen) Fertigkeiten ist, die der Einzelne mit Ausbildung und Erfahrung erreicht. Der Einfluss von kognitiven Fähigkeiten und Persönlichkeitsmerkmalen auf die spätere technische Kompetenz wurde von der Gruppe als weniger wichtig

und gleichwertig angesehen. Dieser Zusammenhang wird in der nachfolgender Abbildung 1 verdeutlicht. Zu den Fähigkeiten, die die chirurgische Geschicklichkeit beeinflussen, zählen unter anderem die räumliche Wahrnehmung, die Hand-Augen-Koordination, das Zielen, die Koordination mehrerer Gliedmaßen sowie die Stabilität von Händen und Armen.

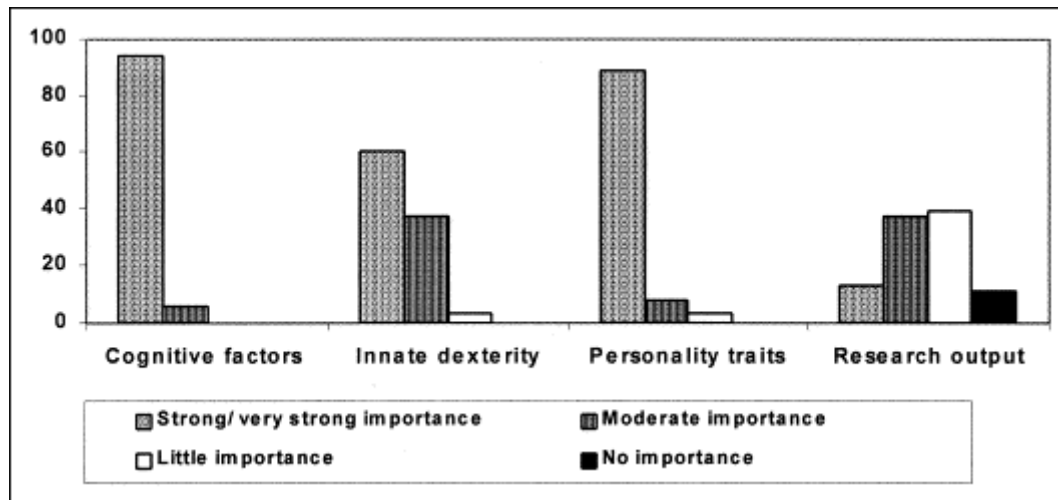


Abbildung 1 : Konsens über die Gewichtung der wichtigsten Eigenschaften bei der Auswahl der chirurgischen Auszubildenden, Cuschieri et al 2001(7)

Moglia et al. (16) veröffentlichten 2014 eine Studie, die sich mit der Fragestellung befasste, ob die angeborenen Eigenschaften für die Chirurgie in der Population der Medizinstudenten normalverteilt sind. Dazu untersuchten sie 121 Medizinstudenten mit einem Durchschnittsalter von 23 Jahren ohne vorherige Erfahrung an Simulationsrobotern und ohne vorherige chirurgische Erfahrung. Weiterhin wurden vier erfahrene Chirurgen, die durchschnittlich bereits 250 Eingriffe am Da-Vinci-Roboter durchgeführt haben, als Kontrollgruppe definiert. Alle Teilnehmer führten 26 verschiedene Übungen am Da-Vinci-Skills-Simulator durch. Da die Studie darauf abzielte, die angeborenen manipulativen und psychomotorischen Fähigkeiten zu bewerten, wurde auf die Lehrvideos vor jeder Übung verzichtet. Dem Test ging lediglich ein standardisiertes Einarbeitungsprotokoll voraus, welches praktische Anweisungen zur Verwendung des Da-Vinci-Skills-Simulators beinhaltete. Nach Abschluss der Übungen wurde von jedem Teilnehmer ein Fragebogen zu seinen Eindrücken am Simulator ausgefüllt. Von den 26 Übungen wurden sechs, besonders für die Bewertung der angeborenen Geschicklichkeit geeigneten Übungen von einem erfahrenen Chirurgen der Allgemeinchirurgie ausgewählt, um die manipulativen und psychomotorischen Fähigkeiten zu bewerten. Es konnte gezeigt werden, dass die Ausführungszeit (Time

---

to complete exercise: TTCE) und die Bewegungsökonomie (Economy of motion: EOM) positiv korrelieren und als starke Prädiktoren für das Vorhandensein chirurgischer Fähigkeiten, wie Effizienz und technische Begabung, gelten. Weiterhin können die visuell-räumliche Wahrnehmung sowie die psychomotorische Eignung als Kriterien für die Beurteilung von Kandidaten für die chirurgische Ausbildung verwendet werden (17). Betrachtet man die Ergebnisse der Studie, so stellten Moglia et al. fest, dass acht Probanden (6,5 %) zu den leistungsstarken Medizinstudenten und 14 Probanden (11,6 %) zu den leistungsschwachen Medizinstudenten zugehörig waren. Die übrigen Teilnehmer erreichten durchschnittliche Ergebnisse. Zu den leistungsstarken Probanden zählten die Studenten, die eine Gesamtpunktzahl erreichten, die mindestens doppelt so hoch war wie die der restlichen Probanden. Zu den leistungsschwachen Studenten zählte man diejenigen, die weniger als die Hälfte der Gesamtpunktzahl im Vergleich zu den restlichen Teilnehmern erzielten. Weiterhin wurde festgestellt, dass die Leistung der Kontrollgruppe im Vergleich zu den leistungsstarken Studenten zwar besser war, es konnten jedoch keine signifikanten Unterschiede erzielt werden. Somit kamen die Autoren zu der Schlussfolgerung, dass es sinnvoll wäre, entsprechende Eignungstests an VR-Simulatoren für Medizinstudenten zu etablieren, um Studenten mit einer unterdurchschnittlichen bzw. überdurchschnittlichen Begabung für handwerkliche Fähigkeiten identifizieren zu können.

In einer ähnlichen Studie aus dem Jahr 2018 beschäftigten sich ebenfalls Moglia et al. (4) mit der Fragestellung, ob es einen Test gibt, der die angeborene Eignung von Ärzten für die Chirurgie als Fachgebiet objektiv bewerten kann. Ziel war es, die Gruppe von Medizinstudenten zu identifizieren, die ein hohes Maß an angeborenen psychomotorischen Fähigkeiten besitzt, die vor allem für die minimalinvasive und robotergestützte Chirurgie von besonderer Bedeutung sind. Dadurch könnte das Auswahlverfahren von Assistenzärzten in der Chirurgie ergänzt werden, um diejenigen Assistenten auszuwählen, die in der Lage sind, technische Fertigkeiten mit Hilfe von Training schnell und effizient zu erlernen. Assistenten mit einer unterdurchschnittlichen Eignung für manipulative psychomotorische Fähigkeiten könnte man somit raten, eine Spezialisierung in anderen, nicht handwerklich medizinischen Fachgebieten in Betracht zu ziehen. Eine Gruppe von 158 untrainierten Medizinstudenten, die zuvor noch keinen Kontakt mit chirurgischen Simulatoren hatte, führte am Mimic dV-Trainer® fünf verschiedene Übungen aus. Dabei musste jede Aufgabe zweimal erfolgreich beendet werden, bevor zur nächsten Übung übergegangen wur-

---

de. Jede Übung wurde nach Zeit und Anzahl der Versuche gewichtet, die zum Erreichen der Fertigkeit benötigt wurde. Zuvor erhielten die Teilnehmer eine identische Einweisung in den Mimic dV-Trainer®. Die Übung „Pick and Place“ diente dazu, sich mit dem Simulator vertraut zu machen und wurde zu Beginn zweimal durchgeführt. Weiterhin wurde den Probanden das Anleitungsvideo für jede weitere Übung gezeigt. Der Tutor gab zusätzliche Informationen zu den häufigsten Fehlern, die von dem Simulator erkannt werden, beispielsweise die Kollision von Instrumenten. Die Medizinstudenten mit hervorragenden psychomotorischen Fähigkeiten wurden als diejenigen definiert, die weniger als die Hälfte der durchschnittlichen Zeit im Vergleich zur übrigen Kohorte benötigten, um alle fünf Übungen erfolgreich abzuschließen. Die Medizinstudenten mit schlechten psychomotorischen Fähigkeiten definierte man als diejenigen, die mehr als das Doppelte der durchschnittlichen Zeit benötigten. Ebenfalls wurden die Simulationsergebnisse beim ersten Versuch jeder Aufgabe mit Hilfe der Gesamtpunktzahl, die für alle Metriken berechnet wurde, analysiert, um das Ausgangsniveau eines jeden Probanden zu erfassen. Das Durchschnittsalter der Probanden betrug 23,4 Jahre. Die Autoren kamen zu dem Ergebnis, dass 5,8 % der Gesamtkohorte zu der Gruppe der Medizinstudenten mit einer hohen angeborenen Begabung für manipulative Fähigkeiten zählen. Im Vergleich zur übrigen Kohorte benötigten diese Probanden signifikant weniger Zeit sowie Versuche, um die vorgegebenen Aufgaben mindestens zweimal erfolgreich zu bestehen. 11 % der Gesamtkohorte konnten als Medizinstudenten mit geringerer angeborener Begabung identifiziert werden. Diese Probanden schnitten im Vergleich zu den restlichen Probanden in der benötigten Zeit sowie in der Anzahl der benötigten Versuche signifikant schlechter ab. Betrachtet man den Erstversuch der Probanden, um das Ausgangsniveau zu bestimmen, zeigten die Ergebnisse, dass die Probanden mit einer hohen angeborenen Begabung für manipulative Fähigkeiten in vier von fünf Aufgaben signifikant bessere Overall-Scores gegenüber dem Rest der Teilnehmer erzielten. Die Gruppe mit den am wenigsten begabten Studenten schnitt bezogen auf den Overall-Score in allen fünf Aufgaben signifikant schlechter ab. Somit untermauern die Ergebnisse dieser Studie, dass objektive Tests an einem validierten VR-Simulator das Auswahlverfahren für chirurgische Ausbildungsprogramme ergänzen sollten (4).

## **2.2 Phasen der motorischen Entwicklung (motorische Ontogenese)**

Im Laufe der menschlichen motorischen Entwicklung können die erworbenen motorischen Fertigkeiten, die für die chirurgische Tätigkeit und für das Arbeiten mit roboter-

---

gestützter Chirurgie von zentraler Bedeutung sind, in verschiedene Phasen eingeteilt werden (9, 18). Die motorischen Entwicklungsverläufe können innerhalb dieser einzelnen Phasen erheblich variieren, was unter anderem in unterschiedlichen Umweltbedingungen und individuell unterschiedlichen Reifeprozessen begründet ist. Von Geburt an entwickelt sich der Mensch. Er möchte die Welt verstehen, beeinflussen, seinen Platz darin haben. Jeder Mensch tut dies auf seine ganz persönliche Art. Er erwirbt Fähigkeiten auf verschiedenen Gebieten, z.B. geistig und körperlich und entwickelt sich weiter. Mit zunehmendem Alter kommt es dann zu einer altersassoziierten Abnahme der Funktionsfähigkeit (19). Die Ergebnisse der Studie zur Gesundheit Erwachsener in Deutschland (DEGS1) (19) zeigen sowohl eine Abnahme der körperlichen Funktionsfähigkeit als auch eine Abnahme im Bereich der kognitiven Leistungsfähigkeit, auf die im nachfolgenden Kapitel näher eingegangen wird. Die Abnahme der Funktionsfähigkeit ist dabei multifaktoriell bedingt. Neben dem Alter haben genetische Faktoren, Umwelteinflüsse sowie individuelle Verhaltensweisen (Rauchen, Ernährung, Bewegung) einen Einfluss auf altersassoziierte Veränderungen auf zellulärer und Organebene (19). Altersbedingte motorische Veränderungen treten im Sinne von Verminderungen/Einschränkungen z.B. in folgenden Bereichen auf:

- Kraft und Bewegung,
- Geschwindigkeits- und Genauigkeitsabgleich,
- Reaktionszeit,
- Bewegungskoordination,
- Ausdauer und Beweglichkeit

Im Folgenden werden die einzelnen Phasen der motorischen Ontogenese näher erläutert.

### **Frühes Kindesalter (Beginn 4. bis 7. Lebensjahr)**

Kennzeichnend sind die rasche motorische Entwicklung, die Vervollkommnung der Bewegungsformen und die Aneignung erster Bewegungskombinationen. Ab dem 5. Lebensjahr kommt es zu einem Zuwachs an Reaktionsschnelligkeit (9). Mit vier Jahren beginnt die Entwicklung der Feinmotorik der Finger. Dieser Zeitraum bietet das ideale Alter zum Erlernen eines Musikinstrumentes und der motorischen Schreibfähigkeit. Geschlechterspezifische Unterschiede bezüglich motorischer Fertigkeiten

---

sind in diesem Alter weitestgehend ausgeglichen (18). Gezielte Fördermaßnahmen in dieser Phase zeigen eine signifikante Wirkung auf die motorische Entwicklung der Kinder (20).

### **Mittleres Kindesalter (7. bis 9. Lebensjahr)**

Diese Phase umfasst die schnelle Zunahme der motorischen Lernfähigkeit. Begründet wird dies durch die günstigen körperbaulichen Voraussetzungen, die qualifizierte Ausprägung psychischer Prozesse (Fähigkeit zur Informationsaufnahme und -verarbeitung), die für die Lernfähigkeit notwendig sind, sowie den starken Anstieg koordinativer Fähigkeiten. Es kommt erneut zu einer erheblichen Steigerung der Reaktionsgeschwindigkeit. Bezogen auf die Bewegungsausführung ist eine beträchtliche Kraft- und Temposteigerung zu beobachten, welche meist nach Vollendung des 9. Lebensjahres ein gutes Niveau erreicht (20).

### **Spätes Kindesalter (10. bis 12. Lebensjahr)**

Das späte Kindesalter wird als das beste motorische Lernalter der Kindheit charakterisiert. Die Entwicklung der Feinkoordination befindet sich auf dem Höhepunkt, der koordinative Leistungszuwachs ist nun am größten (18). Im kognitiven Bereich kommt es durch das Zusammenspiel von Bewegungserfahrungen, Bewegungswahrnehmungen und dem motorischen Gedächtnis zur stetigen Verbesserung der bewussten Bewegungsregulation. Dadurch erlernen die Kinder eine größere Beherrschung und Sicherheit ihrer Bewegungsausführung. Das Kind ist jetzt in der Lage, selbstständig festzustellen, ob der Bewegungsablauf richtig ist oder noch einer Korrektur bedarf. Die Reaktionszeiten verkürzen sich weiterhin rasch und nähern sich zum Ende dieser Entwicklungsphase fast den Werten der Erwachsenen an (9).

### **Frühes Jugendalter (13. bis 15. Lebensjahr)**

In diesem Zeitraum kommt es zu Umstrukturierung von motorischen Fähigkeiten. Der Leistungszuwachs im Bereich der koordinativen Fähigkeiten, der Gewandtheit sowie der Reaktionsgeschwindigkeit ist verglichen mit der vorherigen Entwicklungsstufe des späten Kindesalters, deutlich verlangsamt (9).

### **Spätes Jugendalter (15. bis 19. Lebensjahr bei Jungen / 13. bis 17. Lebensjahr bei Mädchen)**

---

In dieser Phase kommt es zu ausgeprägten geschlechterspezifischen Differenzierungen durch geringere Zuwachsraten bzgl. der Motorik bei Mädchen. Ein weiterer Aspekt ist die zunehmende Beständigkeit im Bereich der motorischen Fähigkeiten, die durch sich festigende Bewegungsstrukturen und Bewegungspräzision gekennzeichnet ist (9). In der Phase der Adoleszenz gibt es nochmals einen Anstieg der koordinativen Leistungsfähigkeit, es wird eine persönliche Motorik ausgebildet. Motorische Steuerungsprozesse erfahren hier eine Feinjustierung und der Adoleszent erreicht seine maximale Leistungsfähigkeit. Er ist jetzt in der Lage, zu jeder Zeit über seine motorischen Kapazitäten zu verfügen (18). Die im frühen Jugendalter vorherrschende Umstrukturierung motorischer Fähigkeiten schwächt sich am Ende des späten Jugendalters zunehmend ab. Tendenziell ist mit dem Abschluss des Umstrukturierungsprozesses eine erneut verbesserte motorische Lernfähigkeit verbunden (9).

### **Frühes Erwachsenenalter (20. bis 30. Lebensjahr)**

Dieser Zeitabschnitt wird als Phase der vollständigen Ausprägung und allmählichen Verfestigung der individuellen Merkmale der menschlichen Motorik bezeichnet. Charakteristisch für die Motorik in diesem Lebensjahrzehnt ist die Tendenz zur erhöhten Zweckmäßigkeit und Ökonomie, sowie die Automatisierung und präzise Steuerung der Bewegungen. Im Bereich der Fein- und Grobmotorik zeigt sich im Vergleich zu den darauffolgenden Lebensdekaden die höchste Ausprägung (9).

### **Mittleres Erwachsenenalter (30. bis 50. Lebensjahr)**

Menschen in dieser Lebensphase stehen bei motorisch anspruchsvoller Arbeit, wie beispielsweise handwerklichen Berufen, auf der Höhe ihrer Leistungsfähigkeit. Durch die jahrelange Berufserfahrung werden Tätigkeiten sicher beherrscht und mit hoher Präzision ausgeführt. Eine weiter zunehmende Tendenz im Bereich der motorischen Zweckmäßigkeit und Ökonomie ist zu erkennen. Das Ende dieser Phase ist gekennzeichnet durch die allmähliche motorische und kognitive Leistungsminderung und die Abnahme der koordinativen Leistungsfähigkeit, vorerst und vor allem bei schwerer körperlicher Arbeit und bei Tätigkeiten mit hoher nervlicher Beanspruchung (9).

### **Spätes Erwachsenenalter (50. bis 60. Lebensjahr)**

Dieser Abschnitt ist gekennzeichnet durch die verstärkte motorische und koordinative Leistungsminderung im Bereich der Alltags- und Arbeitsmotorik. Dieser Rückbildungsprozess vollzieht sich nicht abrupt, sondern allmählich und stellt letztendlich



---

einen irreversiblen Vorgang dar. Vorrangig betroffen sind berufliche Tätigkeiten, die eine hohe physische und psychische Anforderung stellen, beispielsweise bei Waldarbeitern, Bergleuten, sowie Flugzeugführern. Körperlich geistige Tätigkeiten, die mit einer geringen physischen und psychischen Belastung einhergehen und Genauigkeit und Verlässlichkeit in der Ausübung fordern, beispielsweise Uhrmacher oder Feinmechaniker, sind von diesem Rückbildungsprozess erst nach der Phase des späten Erwachsenenalters betroffen. Fordert eine berufliche Tätigkeit größere Umstellungen oder den Neuerwerb motorischer Fähigkeiten, treten bei Menschen in diesem Lebensabschnitt verstärkte Schwierigkeiten auf, sodass die motorische Lernfähigkeit im Vergleich zu jüngeren Menschen deutlich reduziert ist (9). Die Defizite werden jedoch in diesem Alter in gewissem Umfang durch ein hohes Maß von Erfahrung kompensiert.

### **Späteres Erwachsenenalter (ab 60. Lebensjahr)**

Dieser Lebensabschnitt zeichnet sich durch eine ausgeprägte motorische Involution aus und hebt sich deutlich von den vorherigen Phasen der motorischen Ontogenese des Menschen ab. Die motorische Leistungsminderung betrifft die Gesamtmotorik - sie ist sowohl in der Alltags-, Arbeits- und Sportmotorik unübersehbar. Es kommt zu langsameren Bewegungsausführungen, zur eingeschränkten Beweglichkeit und zum allmählichen Verlust der Fähigkeit zur Simultankombination (9). Die Aufnahme- und Verarbeitungsgeschwindigkeit, die Verarbeitung von Informationen sowie die Merkfähigkeit werden reduziert. Des Weiteren lässt die Funktionsfähigkeit der Sinnesorgane nach, wobei die Seh- und Hörfähigkeit deutlich abbauen (18).

Bei der motorischen Ontogenese ist darauf hinzuweisen, dass innerhalb der einzelnen Altersstufen eine deutliche individuelle Variabilität bezogen auf die motorische Leistungsfähigkeit besteht. Dies ist bedingt durch die bisherigen Einflüsse des Berufs und der gesamten Lebensweise, durch den Gesundheitszustand, sowie die unterschiedlichen körperlichen Voraussetzungen.

S. Veen beschreibt in seinem Buch „Demographischer Wandel, alternde Belegschaften und Betriebsproduktivität“ (21) die physischen Veränderungen, die mit dem Alterungsprozess einhergehen. Ab dem 25. Lebensjahr ist bereits eine Abnahme der körperlichen Belastbarkeit zu verzeichnen. Die im Alter sinkende Stressresistenz kann sich ebenfalls negativ auf die Leistungsfähigkeit auswirken. Bei Berufen, die schwere körperliche Arbeiten voraussetzen, wie beispielsweise im Handwerksbe-

---

reich oder bei einfachen Dienstleistungen, ist daher mit einer sinkenden Produktivität im Alter zu rechnen. Bezogen auf die Leistungsfähigkeit im Kraft- und Ausdauerbereich scheint es so, dass diese bis zum Rentenalter ausreichend gegeben ist und erst ab dem 70. Lebensjahr stark abfällt. Insgesamt ist die Physis von biologischen Alterungsprozessen sehr früh und am stärksten betroffen, was sich durch eine mit dem Alter generell sinkende körperliche Leistungsfähigkeit zeigt. Bezogen auf die Sensorik sind altersbedingte Veränderungen vor allem im Bereich des Hörens und des Sehens zu verzeichnen. Das Gehör verschlechtert sich ab dem 55. Lebensjahr kontinuierlich. Beim Sehen tritt dieser Abbauprozess wesentlich früher auf, so dass Kontrastsensitivität, Lichtsensitivität und die Farbwahrnehmung bereits ab dem 30. Lebensjahr nachlassen (22). Gleichzeitig ist der Verlust der Feinmotorik, der Fingerfertigkeit und des Tastsinnes zu beobachten. Die Schnelligkeit und die Präzision der Feinmotorik der Extremitäten scheinen ab dem 45. Lebensjahr relativ stark abzunehmen (21).

### **2.3 Kognitive Entwicklung**

Auch kognitive Fertigkeiten sind bei der robotergestützten Chirurgie grundlegende Voraussetzungen für den sicheren Umgang mit Simulationsrobotik und somit essenziell für die Gewährleistung der Patientensicherheit. Ebenso wie die psychomotorischen Fertigkeiten kommt es auch bei kognitiven Prozessen im Laufe des Lebens zu Veränderungen. Die aktuelle Studienlage beschäftigt sich vor allem mit der kognitiven Entwicklung im Kindes- und Jugendalter sowie mit dem kognitiven Abbau, der mit dem Alter einherzugehen scheint.

Lindberg und Hasselhorn (23) definieren die kognitive Leistungsfähigkeit als den Aufbau und die Struktur mentaler und gedanklicher Prozesse, die an der individuellen Informationsverarbeitung und dem Wissensaufbau beteiligt sind. Zu den wichtigsten kognitiven Grundlagen der allgemeinen Lernfähigkeit zählen nach Baddeley et al. (24) die Funktionstüchtigkeit des Arbeitsgedächtnisses sowie die Intelligenz, wobei die individuelle Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit als zentraler Bestandteil Letzterer angesehen wird (24).

Manche kognitiven Fähigkeiten nehmen altersbedingt ab, während andere zunehmen. Die Maxima verschiedener kognitiver Kompetenzen liegen dabei an unterschiedlichen Zeitpunkten und bilden oft keine ausgeprägten Höhepunkte, sondern

---

verbleiben über einen langen Zeitraum auf einem gleich hohen Niveau (21). Es ist festzustellen, dass die kognitive Leistungsfähigkeit lange erhalten bleibt, verschiedene Kompetenzen zu unterschiedlichen Zeitpunkten besser ausgeprägt sind und gegebenenfalls den Abbau der übrigen Kompetenzen teilweise kompensieren können. Es ergeben sich somit unterschiedlich ausgeprägte kognitive Fähigkeiten bei jungen und alten Menschen. Ab dem 70. Lebensjahr kann man schließlich massive kognitive Verluste aller Komponenten beobachten (25).

Um die verschiedenen kognitiven Kompetenzen besser einordnen zu können, ist es sinnvoll, den Begriff der Intelligenz näher zu betrachten.

Intelligenz lässt sich nach Cattell et al. (26) in zwei Fähigkeiten unterteilen: Zum einen die fluide Intelligenz, welche das spontane, schlussfolgernde Denken, die Plastizität, Lernfähigkeit und Kompensation sowie die Geschwindigkeit von Gedächtnis- und Informationsverarbeitungsprozessen beschreibt. Zum anderen die kristallin-pragmatische Intelligenz, worunter man das spezifische Faktenwissen versteht, (beispielsweise das Erfahrungs- und Alltagswissen sowie das Sprach- und Wortverständnis) (26). Generell nimmt die fluid-mechanische Intelligenz bereits ab dem frühen Erwachsenenalter ab, während sich die kristallin-pragmatische Intelligenz bis ins hohe Alter akkumuliert, lange stabil bleibt und die biologische Abnahme teilweise kompensieren kann (27).

Fasst man die Leistungsfähigkeit der fluid-mechanischen Komponenten (vor allem die Verarbeitungsgeschwindigkeit und Gedächtnisleistung) zusammen, so lässt sich feststellen, dass sie zwischen dem 20. und 30. Lebensjahr deutlich zunimmt, bereits nach dem 35. Lebensjahr leicht abnimmt und bis zum 50. Lebensjahr auf einem hohen und stabilen Niveau verbleibt und anschließend verstärkt abfällt (28). Fast alle kognitiven Fähigkeiten basieren auf der Schnelligkeit der Informationsverarbeitung. Ab dem 55. Lebensjahr wird der Mensch bei Wiedererkennung- und Repetitionsaufgaben langsamer und macht häufiger Fehler. Weiterhin ist die Auffassungsgeschwindigkeit, die schnelle mentale Zu- und Einordnung von Informationen und die daraus folgende Entscheidungsfindung bei älteren Menschen um 20 % bis 40 % langsamer als bei jüngeren (29). Neben dem Verlust der mentalen Geschwindigkeit ist auch ein Rückgang der Genauigkeit im Alter zu verzeichnen (21). Weiterhin ist die Fähigkeit zur Unterdrückung nicht relevanter Informationen im Alter reduziert, sodass dies ebenfalls die Verarbeitungskapazität beeinflusst. Es konnte in Studien gezeigt

---

werden, das bereits ab dem 35. bis 40. Lebensjahr jährlich etwa 1 % bis 2 % der Schnelligkeit und Kognition fluider Mechanik verloren gehen (30). Weiterhin ist bei älteren Erwachsenen festzustellen, dass es durch die sinkende Neuroplastizität nicht nur zum Nachlassen der Verarbeitungsgeschwindigkeit kommt, sondern dass sich auch die Fähigkeit sich neue Fertigkeiten anzueignen oder sich schnell an völlig neue Situationen geistig anzupassen verändert (31). Diese Anpassungsprozesse und das Erlernen neuer Sachverhalte ist im Alter nicht völlig unmöglich, dauern jedoch deutlich länger und erfordern meist höhere Anstrengungen (31), (29). Ab einem Alter von 50 Jahren verschlechtern sich diese Lern- und Anpassungsprozesse allmählich, können jedoch oft durch andere geistige Fähigkeiten, wie die kristalline Pragmatik, zum Teil kompensiert werden. Ab dem 70. Lebensjahr scheinen die Plastizität und Kompensation ihre Grenzen erreicht zu haben und der kognitive Niedergang scheint unausweichlich (25).

Der Bereich der kristallinen Intelligenz beinhaltet Erfahrungs- und Alltagswissen, Sprach- und Wortverständnis, Denkstrategien, soziale Kompetenz, praxisgenerierte Intelligenz und Ambivalenzfähigkeit. Sie basiert dabei grundsätzlich auf Erfahrungs- und Wissensakkumulation. Durchschnittlich steigt der Bereich der kristallinen Intelligenz bis zum 45. Lebensjahr kontinuierlich an, bleibt stabil bis zum 70. Lebensjahr, dann beginnt der allmähliche Abbau (32). Einen Großteil der kristallinen Intelligenz macht das allgemeine und das spezifische Humankapital (HK) aus. Dabei versteht man unter allgemeinem HK die Ansammlung von Allgemeinwissen, Lebenserfahrung und Denkstrategien. Unter spezifischem HK wird die Ansammlung von betrieblichen Erfahrungen und praxisgenerierter Intelligenz zusammengefasst. Eine Kombination beider Komponenten steigert die individuelle berufliche Produktivität. Altersbedingt zeigen sich jedoch unterschiedliche Entwicklungen beider Komponenten, was in Abbildung 2 graphisch verdeutlicht wird (21). Die größte Steigerung des allgemeinen HK tritt relativ früh, während der formalen Schul- und Berufsausbildung auf (33). Es kommt durchschnittlich zu einer kontinuierlichen Akkumulation mit dem Alter. Ein Abbau setzt erst spät durch Vergessen und dementielle Erkrankungen sowie teilweise durch technologischen und gesellschaftlichen Wandel ein (28). Bezogen auf das spezifische HK, welches durch zunehmende Berufserfahrung erworben wird, erkennt man ebenfalls eine steigende Tendenz mit dem Alter. Die spezifischen Tätigkeiten können somit von erfahrenen Arbeitnehmern schneller, effizienter und akkurater ausgeführt werden als von unerfahrenen Kollegen. Somit sind diese spezifischen

---

Fähigkeiten eine entscheidende positive Eigenschaft älterer und erfahrener Mitarbeiter (28). Demgegenüber steht der stetige technologische Wandel, vor allem die heutzutage wichtige Digitalisierung, bei dem stets neue Fähigkeiten erlangt werden müssen. Hierbei ist, aufgrund der oben beschriebenen Problematik des Erlernens völlig neuer Sachverhalte, der ältere Arbeitnehmer gegenüber jungen Kollegen im Nachteil, da dieses Erlernen aufgrund des Rückganges der neuronalen Plastizität im Alter deutlich langsamer und erschwerter verläuft.

In der Berliner Altersstudie befassten sich Lindenberger et al.(34) unter anderem mit den Grenzen und Potentialen der kognitiven Leistungsfähigkeit im Alter. Hierbei kamen 14 verschiedene kognitive Tests zur Anwendung, die sich auf folgende Fähigkeiten bezogen: logisches Denken, Gedächtnis und Wahrnehmungsgeschwindigkeit aus den breiten fluid-mechanischen Domänen sowie Wissen und Geläufigkeit aus den breiten kristall-pragmatischen Domänen. All diese kognitiven Fähigkeiten wiesen einen negativen linearen Zusammenhang mit dem Alter auf, wobei die fluid-mechanischen Fähigkeiten altersbedingt stärker abnahmen als die kristallisiert-pragmatischen Fähigkeiten. Bei ausreichender Hilfestellung blieb die Merk- und Lernfähigkeit bei Personen ohne klinische Demenzdiagnose jedoch bis ins höchste Alter erhalten (34).

Bezogen auf die Intelligenzentwicklung im Jugendalter scheint es so, dass sich die zwei verschiedenen Intelligenzbereiche unterschiedlich entwickeln. Mit dem Beginn der Schulzeit sind laut Kray und Lindenberger ein deutlicher Zuwachs der kristallinen sowie der fluiden Intelligenz zu beobachten (35), wobei der Anstieg der kristallinen Intelligenz nach Rindermann (36) stärker ausgeprägt ist. In einer Studie von Paus et al. (37) wird das Jugendalter als entscheidende Phase für die Entwicklung zentral-exekutiver Arbeitsgedächtnisfunktionen beschrieben. Im Übergang von der Kindheit zur Jugend entwickelt sich die Fähigkeit des Wechsels zwischen unterschiedlichen Aufgaben deutlich weiter, wohingegen allgemeine Kontroll- und Planungsfunktionen noch bis ins junge Erwachsenenalter weiterentwickelt werden (37). Die Gedächtniskapazität erfährt im Übergang vom Vorschulalter bis zum Jugendlichen deutliche Verbesserungen, sodass Jugendliche eine doppelt so große Gedächtnisfähigkeit aufweisen wie Vorschulkinder. Weiterhin wurde in dieser Studie festgestellt, dass bei besonders komplexen Aufgaben im Jugendalter bereits ähnliche Werte verglichen mit dem Erwachsenenalter zu verzeichnen sind (38). Alloway et al. (39) stellten in einer Übersichtsarbeit zur Entwicklung des Arbeitsgedächtnisses fest, dass im Alter

zwischen fünf und 20 Jahren der Zuwachs der Kapazität und Leistungsfähigkeit so groß ist wie in sonst keinem anderen Altersabschnitt. Der Höhepunkt des Leistungsgedächtnisses scheint nach Alloway et al. (39) jedoch nicht im Jugendalter, sondern im Alter von 30 Jahren erreicht zu sein. Kunert et al. (40) stellten fest, dass aufgrund neuronaler Reifungsprozesse ein deutlicher Anstieg der Verarbeitungs- und Reaktionsgeschwindigkeit im Jugendalter zu verzeichnen ist. Bezogen auf Fähigkeiten des Multitasking wurde in einer Studie von Mills et al. (41) herausgefunden, dass Jugendliche scheinbar noch sensibler auf zusätzliche kognitive Belastungen reagieren als Erwachsene.

Die nachfolgende Abbildung 2 nach S. Veen (21) fasst die kognitive und psychomotorische Entwicklung bezogen auf die Lebensspanne noch einmal graphisch zusammen.

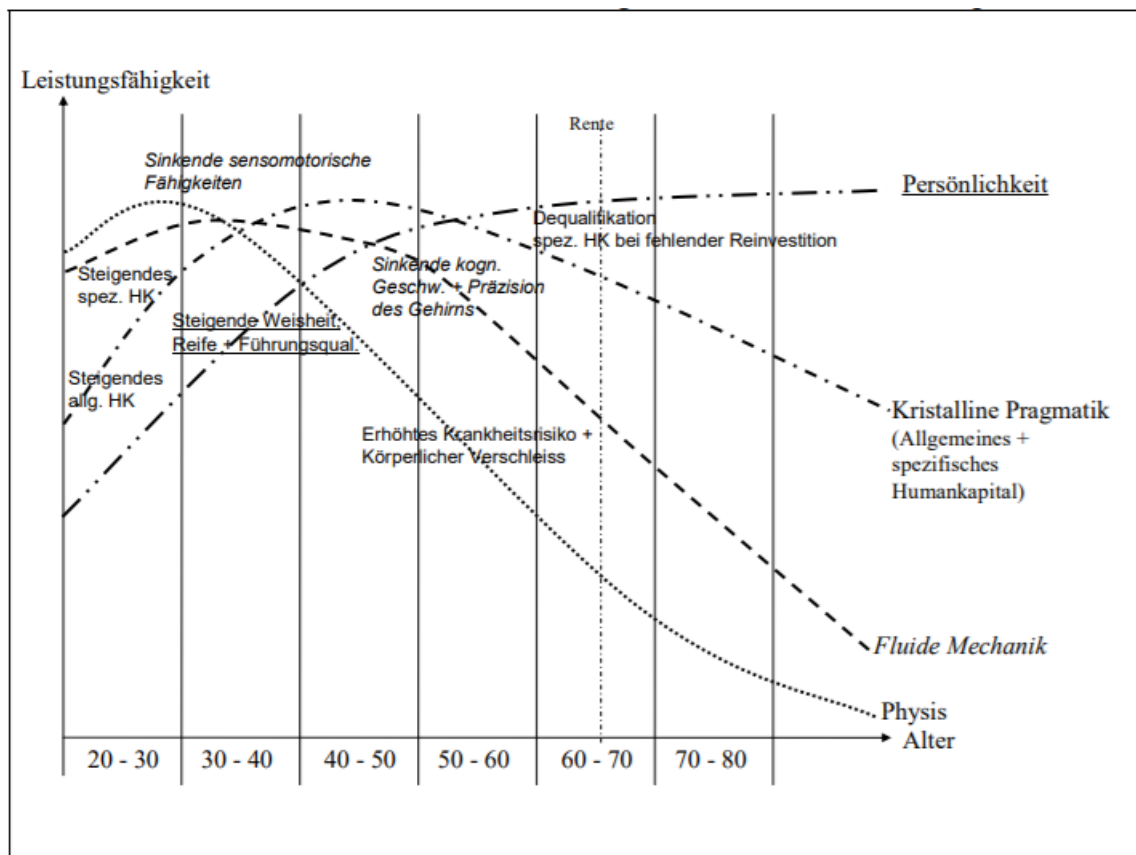


Abbildung 2: Durchschnittliche Altersentwicklung der verschiedenen Komponenten, S. Veen [21]

---

## 2.4 Berufstypologie und Produktivität im Alter

Stefan Veen (21) beschreibt in seiner Arbeit „Demographischer Wandel, alternde Belegschaften und Betriebsproduktivität“ unter anderem die Entwicklung der individuellen Produktivität mit dem Alter. Dabei geht er zum einen auf die beschriebenen, physischen Veränderungen, die sich mit zunehmendem Alter ergeben, zum anderen auf die kognitiven Veränderungen im Laufe einer Lebensspanne ein. Dabei ist es besonders wichtig, die Alterungsprozesse anhand verschiedener Berufstypen und deren Produktivitätsprofile zu analysieren. Veen beschreibt drei verschiedene Berufstypen: Bei Berufstyp I handelt es sich um sogenannte altersproblematische Berufe. Hierzu gehören körperliche, qualifizierte manuelle Tätigkeiten, beispielsweise handwerkliche Berufe sowie einfache kaufmännische und Verwaltungsberufe. In diesem Berufstyp sind physische und feinmotorische Leistungsfähigkeit und die Belastbarkeit unter Zeitdruck besonders wichtig. All diese Eigenschaften erfahren bereits ab dem 30. Lebensjahr einen kontinuierlichen Rückgang. Eine Kompensation dieses physischen Abbaus kann teilweise durch spezifisches technisches Wissen und fluide kognitive Mechanik erfolgen, allerdings ist auch bei diesen Eigenschaften ab dem 35. Lebensjahr ein allmählicher Rückgang und ab dem 50. Lebensjahr ein rapider Rückgang zu verzeichnen. So liegt die beste Leistungsfähigkeit für den Berufstyp I zwischen dem 25. und 35. Lebensjahr (21).

Der Berufstyp II beschreibt altersneutrale Berufe, bei denen entweder kein negativer Alterseffekt vorliegt, oder dieser teilweise kompensiert werden kann. Hierzu zählen beispielsweise technische Berufe, qualifizierte kaufmännische und Verwaltungsberufe (Bank- und Bürokaufmann, Elektrotechniker, Mechatroniker). Bezogen auf die physische Leistungsfähigkeit sind in diesem Berufstyp feinmotorische Fähigkeiten und Stressresistenz von besonderer Bedeutung. Die Schnelligkeit und Präzision der Feinmotorik scheint ab ca. 35 bis 40 Lebensjahren deutlich abzunehmen und auch stressbasierte Krankheitsbilder verstärken sich mit dem Alter. Dieser Rückgang kann allerdings durch kognitive Fähigkeiten, wie zum Beispiel durch fluide Intelligenz zur schnellen und präzisen Informationsverarbeitung und -speicherung, praktische Problemlösungsfähigkeiten und Kreativität sowie hohes spezifisches Humankapital kompensiert werden. Somit geht man bei Berufstyp II von einem Leistungsmaximum im Alter von 35 bis 55 Jahren aus (21).

Der Berufstyp III beschreibt altersbeförderte Berufe. Dabei handelt es sich um hochqualifizierte Dienstleistungsberufe, wie beispielsweise Anwalt, Manager oder Professor. Auch der Bereich des Arztes fällt unter diesen Berufstyp. Die wichtigste Eigenschaft dieses Berufstyps ist allgemeines und organisationsspezifisches Humankapital, welches in Kombination mit Lebens- und Arbeitserfahrung ab dem 40. Lebensjahr ein hohes Niveau erreicht und im Alter stabil bleibt. Das Maximum der Leistungsfähigkeit liegt somit im Alter zwischen 45 und 70 Jahren. Die altersbedingt nachlassende physische Leistungsfähigkeit scheint in dieser Gruppe trotz vermehrter psychosomatischer Krankheiten, Burnout-Syndromen oder stressbasierter Krankheitsbilder relativ unwichtig zu sein. Auch nachlassende Geschwindigkeit und Präzision fluider Mechanik spielen nur eine untergeordnete Rolle und können durch optimierte Denk- und Lösungsstrategien ausgeglichen werden. (21) Die nachfolgende Abbildung 3 gibt einen Überblick über die Produktivität der verschiedenen Berufstypen bezogen auf die gesamte Lebensspanne.

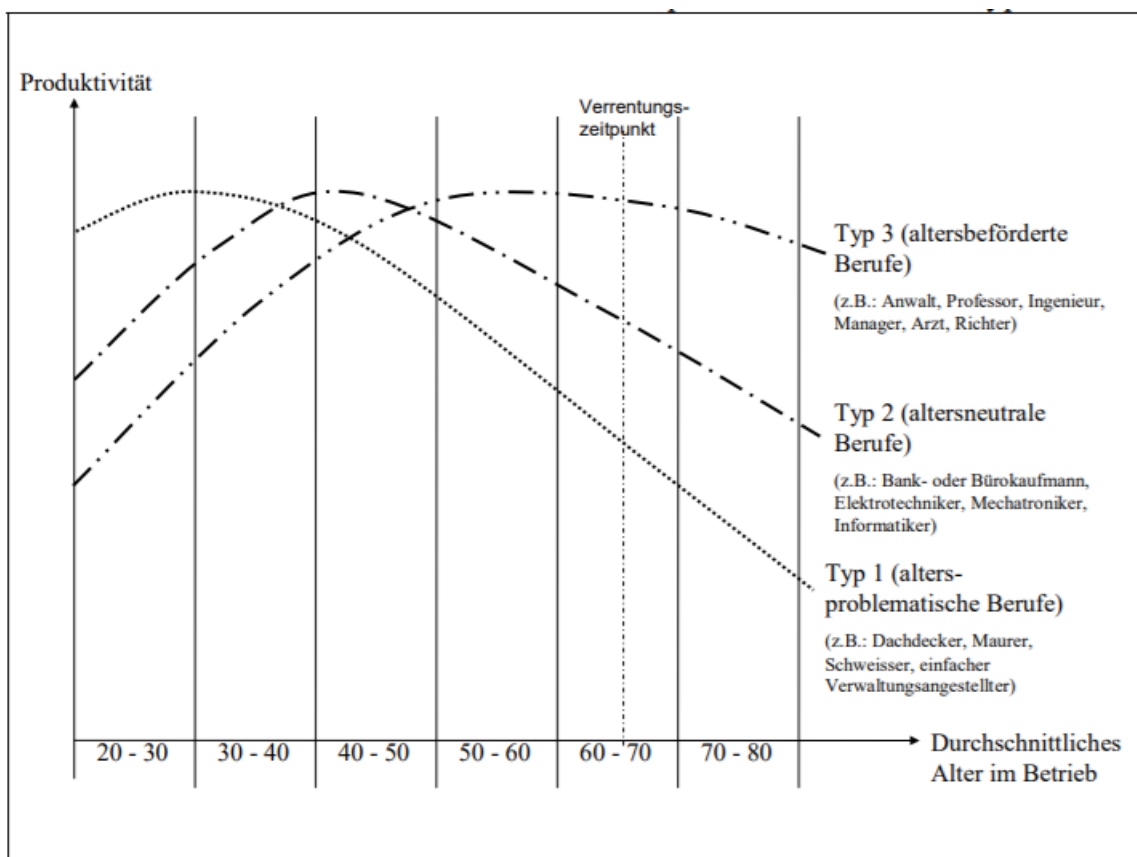


Abbildung 3: Durchschnittliche Altersproduktivitäts-Profile der drei Berufstypen: S. Vein [21]



## 2.5 Ruhestandsregelungen für Chirurgen

Das gesunde menschliche Gehirn unterliegt im Alter signifikanten Veränderungen. Dies wird in der nachfolgenden Abbildung 4 nach Bhatt et al. (42) veranschaulicht.

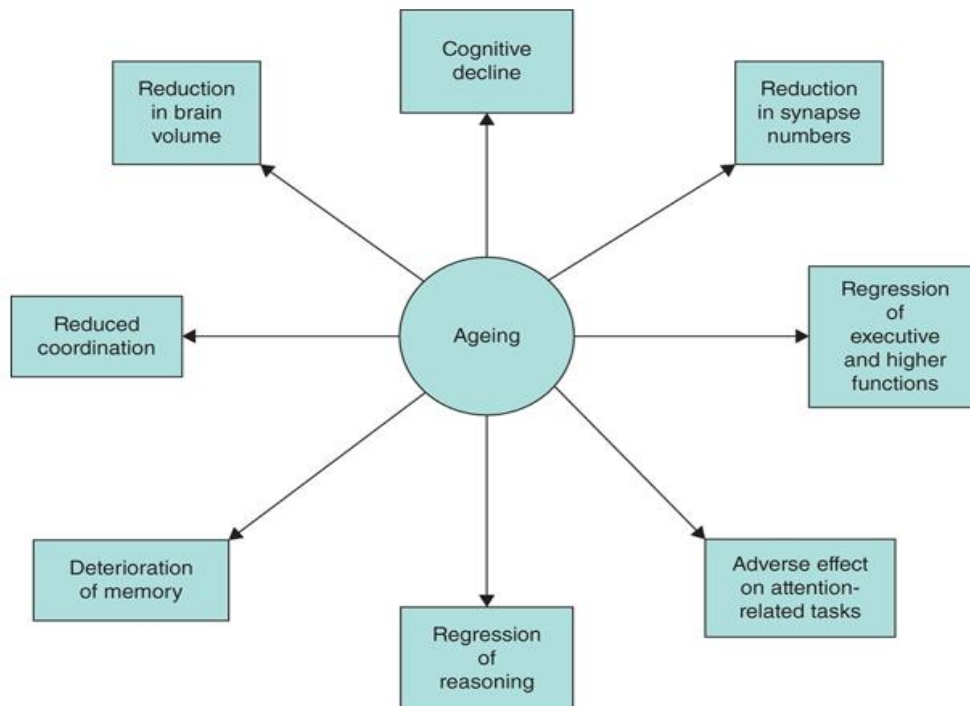


Abbildung 4: Die Auswirkungen des Alterns auf die Biologie des Gehirns und dessen Funktion [42]

Demnach beobachtet man die Reduktion des Gehirnvolumens, sowie der Anzahl an Synapsen. Es kommt zu einer altersbedingten Abnahme spezifischer **kognitiver** Fähigkeiten, wie die Abnahme der Verarbeitungsgeschwindigkeit, der Koordination, der exekutiven Funktionen, der Reaktionsgeschwindigkeit, der Aufmerksamkeit und des episodischen Gedächtnisses. **Sensorische** Veränderungen sind in Bezug auf das Sehvermögen, die visuelle Verarbeitungsgeschwindigkeit und das Hörvermögen zu beobachten. Eine Abnahme der **motorischen** Fähigkeiten mit dem Alter ist in gewissem Umfang zu verzeichnen (43). Des Weiteren wirkt sich das Altern negativ auf die Fähigkeit aus, neue Bewegungen durch Übung zu erlernen, da die kortikale Kodierung der kinematischen Details geübter Bewegungen abnimmt. Jüngste Daten deuten darauf hin, dass der motorische Kortex neue Informationen, die durch wiederholtes Training gewonnen wurden, bei Erwachsenen über 50 Jahren möglicherweise nicht so effektiv reorganisiert und aufnimmt wie bei jüngeren Personen (44).

---

In einer Studie von Voelcker-Rehage et al. (45) zeigte sich, dass mit zunehmendem Alter die Fähigkeit abnimmt, motorische und kognitive Aufgaben zu kombinieren. Ziel der Studie war es, den Zusammenhang zwischen Kraftkontrolle und kognitiver Leistung unter Dual-Task-Bedingungen bei jüngeren (18 bis 22 Jahre) und älteren Erwachsenen (65 bis 77 Jahre) zu untersuchen. Kognitive und motorische Leistungen (Kraftkontrolle) wurden unabhängig und gleichzeitig gemessen. Die Ergebnisse zeigten allgemeine altersbedingte Unterschiede in beiden Bereichen. Diese Unterschiede verstärkten sich bei Dual-Task-Bedingungen. Während jüngere Erwachsene unter Dual-Task-Bedingungen keine Abnahme der kognitiven oder motorischen Leistung zeigten, war bei älteren Erwachsenen eine Abnahme sowohl der motorischen als auch der kognitiven Leistung zu verzeichnen. Die Ergebnisse legen nahe, dass kognitiv-motorische Defizite für die Leistungseinbußen älterer Erwachsener unter Dual-Task-Bedingungen verantwortlich sind.

Die Auswirkungen des Alterns auf die Geschicklichkeit der Hände sind für Chirurgen von großer Bedeutung. Hackel et al. (46) untersuchten das Spektrum der Handfunktionen durch den Jepsen-Test. Dieser Test dient zur Beurteilung eines breiten Spektrums von Handfunktionen, die für Aktivitäten des täglichen Lebens erforderlich sind. Gemessen wird die Zeit, die für die Durchführung einer Reihe von Untertests benötigt wird, wobei hohe Punktzahlen auf Anomalien hinweisen. Es wurden Werte für Männer und Frauen in den folgenden zwei Altersgruppen ermittelt: 20 bis 59 Jahre und 60 bis 94 Jahre. Die Studie sollte feststellen, ob die mit dem Jepsen-Test gemessene Handfunktion bei Personen über 60 Jahren mit zunehmendem Alter abnimmt. Man kam zu dem Ergebnis, dass sich die Handfunktion und die manuelle Geschicklichkeit mit zunehmendem Alter sowohl bei Männern als auch bei Frauen verschlechtern.

Aufgrund des demographischen Wandels steigt auch das Durchschnittsalter der Chirurgen immer weiter an. Daher ist die Frage nach dem richtigen Zeitpunkt für den Ruhestand des Chirurgen ein wichtiges Anliegen der Patientensicherheit. Die Frage nach einheitlichen Ruhestandregelungen für Chirurgen stellt somit eine wichtige Thematik dar und variiert bis heute weltweit. Nach Waljee et al.(43) erfordert die Chirurgie Präzision, Genauigkeit und Ausdauer, um technisch und mental anspruchsvolle Eingriffe durchzuführen. Langwierige Fälle und feine Instrumentierung können die Fähigkeiten der Ärzte belasten und erfordern ein hohes Maß an Fingerfertigkeit, Sehschärfe sowie kognitiven und motorischen Funktionen. Das Älterwerden ist eindeutig mit einem unterschiedlichen Verlust an Fähigkeiten verbunden. Die kognitiven

---

Fähigkeiten älterer Chirurgen nehmen, wie bei alternden Erwachsenen im Allgemeinen, deutlich ab. In der Studie Cognitive Changes and Retirement among Senior Surgeons (CCRASS) (47) wurde eine Verschlechterung der Aufmerksamkeit, der Reaktionszeit und des Gedächtnisses sowie sensorische Veränderungen des Sehvermögens, der visuellen Verarbeitungsgeschwindigkeit und des Hörvermögens festgestellt.

Bhatt et al. (42) fasste 36 verschiedene Studien zusammen, die sich mit den Auswirkungen des Alterns eines Chirurgen auf seine operative Performance und dem individuellen Alterungsprozess eines jeden Menschen beschäftigten. Ziel war es, die Auswirkungen des Alterns auf die Leistungsfähigkeit von Chirurgen zu untersuchen und aktuelle und praktische Methoden für den Übergang von Chirurgen aus der Praxis in die Rente zu einem angemessenen Zeitpunkt und Alter zu identifizieren.

Die in dieser Übersichtsarbeit untersuchten Studien ergaben erhebliche individuelle Unterschiede im Alterungsprozess. Beispielsweise ist zu erkennen, dass die Leistungsfähigkeit bezogen auf die Geschicklichkeit im Alter stark variiert. Dies könnte nach Hertzog et al. (48) mit dem bis dato geführten Lebensstil der jeweiligen Person zusammenhängen. Die Autoren kamen zu dem Ergebnis, dass die Aufrechterhaltung eines kognitiv angereicherten sowie körperlich aktiven Lebensstils die intellektuelle Entwicklung beeinflussen und den kognitiven Abbau im späten Erwachsenenalter und im hohen Alter abschwächen könnte. Auch wenn solche Lebensstilmaßnahmen dazu beitragen können, das Unvermeidliche hinauszuzögern, bleibt der Alterungsprozess doch unaufhaltsam und selbst Menschen, die sich optimal um eine kognitiv bereichernde Lebensweise bemühen, werden irgendwann einen kognitiven Rückgang erleben.

Das Altern wirkt sich demnach nachteilig auf die kognitiven und motorischen Fähigkeiten eines Chirurgen aus. Allerdings wird das Alter auch mit Erfahrung in Verbindung gebracht und es ist unklar, wie diese Faktoren zusammenwirken und die Ergebnisse nach einer Operation beeinflussen. Betrachtet man den Zusammenhang zwischen dem Chirurgenalter, der ärztlichen Erfahrung und dem postoperativen Patienten Outcome, so ergeben sich in der Literatur widersprüchliche Studienergebnisse.

Beispielsweise untersuchten Neumayer et al. (49) 1629 Patienten, die sich einer laparoskopischen unilateralen Hernienreparatur unterzogen. Es sollte ein Zusammenhang zwischen Rezidivrate und der Erfahrung sowie dem Alter des Arztes nachge-

---

wiesen oder widerlegt werden. Dabei wurden die Versuchsgruppen in ältere Probanden (> 45 Jahre) und jüngere Probanden (< 45 Jahre) sowie in erfahrene (> 250 bereits erfolgte Eingriffe) und unerfahrene (< 250 Eingriffe) Probanden eingeteilt. Die Ergebnisse zeigten, dass das Alter des Chirurgen (45 Jahre und älter) in Verbindung mit der Unerfahrenheit bei laparoskopischen Leistenhernien das Risiko eines Rezidivs erhöht. Bei einem unerfahrenen Chirurgen im Alter von 45 Jahren oder älter war die Wahrscheinlichkeit eines Rezidivs 1,72-mal höher als bei einem jüngeren, unerfahrenen Chirurgen.

Demgegenüber steht die Studie von Satkunasivam et al. (50). Hier wurde eine multivariate Analyse durchgeführt, die die Assoziation zwischen dem Chirurgenalter (29 bis 80 Jahre), dem Fallvolumen und dem negativen postoperativen 30-Tage-Outcome beleuchtete. Die Autoren kamen zu dem Ergebnis, dass ein höheres Alter des Chirurgen mit einer nahezu linearen Abnahme der Rate von postoperativen Todesfällen, Wiederaufnahmen und Komplikationen verbunden war. Die schlussfolgernde Interpretation der Ergebnisse ergab, dass ältere Chirurgen möglicherweise eher in der Lage sind, risikoabgewogene Indikationen zu stellen. Ältere Chirurgen, die weiterhin hochqualifizierte Arbeit leisten können, sollten ermutigt werden, ihre Tätigkeit fortzusetzen. Die Ergebnisse dieser Studie sprechen somit gegen eine obligatorische Altersrente für Chirurgen und für individuelle Bewertungsstrategien und Assessments.

Zusätzlich untersuchten Prystowsky et al. (51) die Ergebnisse nach komplexen Eingriffen am Verdauungstrakt bezogen auf das Alter des Arztes. Analysen zeigten, dass die Erfahrung des Chirurgen ein signifikanter Faktor für die Mortalitäts- und Morbiditätsraten war. In dieser Studie hatten jüngere Chirurgen bei hochkomplexen Eingriffen am Verdauungstrakt schlechtere Ergebnisse als ihre älteren und erfahreneren Kollegen. Bei weniger komplexen Eingriffen hingegen gab es keine signifikante Diskrepanz zwischen jungen und erfahreneren Chirurgen.

In der Studie von Waljee et al. (52) wurde herausgefunden, dass der Einfluss des Alters sich auf solche Chirurgen beschränkte, die gewisse Tätigkeiten weniger häufig durchführten, beziehungsweise weniger Erfahrung aufwiesen. Bei einigen komplexen Eingriffen ergab sich bei Chirurgen, die älter als 60 Jahre waren, insbesondere diejenigen mit geringem Eingriffsvolumen, eine höhere postoperative Sterblichkeitsrate als bei ihren jüngeren Kollegen. Bei den meisten Eingriffen war das Alter des Chirur-

---

gen jedoch kein wichtiger Prädiktor für das Operationsrisiko. Zusammenfassend stellten die Autoren fest, dass allein das Alter eines Chirurgen nicht die postoperative Mortalität des Patienten vorhersagen kann. Mangelnde Erfahrung und ein geringes Operationsvolumen könnten hingegen, unabhängig vom Alter, an der höheren postoperativen Sterblichkeit beteiligt sein. Die Definition, was unter einem adäquaten Eingriffsvolumen zu verstehen ist, bleibt weiterhin ungeklärt.

Die durch Bhatt et al. (42) untersuchten Studien zeigten erhebliche individuelle Variationen im Alterungsprozess. Daher sollten Entscheidungen über das chirurgische Arbeiten eher auf dem funktionellen Alter und den individuellen Fähigkeiten eines jeden Chirurgen als auf dem chronologischen Alter basieren. Eine alleinige altersbegrenzte Zwangsversetzung in den Ruhestand erscheint unter diesem Aspekt wenig sinnvoll.

Die Ermittlung dieses funktionellen Alters gestaltet sich sehr schwierig, denn es gibt bis heute keine altersbasierten staatlichen oder bundesstaatlichen Anforderungen für die Bewertung der beruflichen Fähigkeiten oder altersspezifische Kriterien für die Zertifizierung, Rezertifizierung oder Pensionierung. In der Literatur gibt es kaum Belege für ein einheitliches Modell zur Festlegung der Ruhestandsregelung für Chirurgen. Der Beruf des Chirurgen ist in hohem Maße von Gedächtnis, sensorischer Schärfe, klinischer Entscheidungsfähigkeit, technischem Geschick und körperlicher Ausdauer abhängig. All diese Fähigkeiten können mit dem Alter nachlassen. Mehrere Studien befassen sich daher mit der Thematik, welche möglichen Strategien existieren, um eine objektive Kompetenzbeurteilung der chirurgischen Leistung durchzuführen und ab welchem Alter dies am sinnvollsten erscheint. Nach Bhatt et al. (42) könnten neben der kognitiven Bewertung auch körperliche Tests und andere Bewertungen, gegebenenfalls sogar bildgebende Verfahren wie die fMRT, für die objektive Bewertung altersbedingter Veränderungen im Gehirn nützlich sein.

So beschäftigt sich beispielsweise eine Studie von Frazer et al. (53) mit der Ermittlung bestehender Kompetenzbeurteilungen praktizierender Chirurgen. Dazu wurde eine Literaturrecherche angelegt, in der Maßnahmen zur Beurteilung alternder Ärzte, einschließlich Chirurgen, herausgearbeitet wurden. Eine dieser Maßnahmen ist die Beurteilung der Leistungsfähigkeit mit Hilfe von chirurgischen Simulatoren. Ähnlich wie bei der Prüfung von Piloten und Fluglotsen gibt es chirurgische Simulatoren, die eine objektive Bewertung chirurgischer technischer Fähigkeiten ermöglichen. Obwohl

---

diese Simulatoren in erster Linie für Assistenzärzte in der Chirurgie verwendet werden, um deren Ausbildungsstand zu beurteilen, können sie auch zur Bewertung praktizierender Chirurgen oder anerkannter Experten eingesetzt werden. Diese Simulatoren können verwendet werden, um die chirurgische Kompetenz nicht nur älterer Chirurgen, sondern aller Chirurgen im Rahmen ihrer medizinischen Ausbildung zu beurteilen und aufzuzeigen, bei wem möglicherweise eine Nachschulung oder Pensionierung notwendig wäre. Eine der größten Herausforderungen bei der Verwendung dieser Simulatoren zur Kompetenzbeurteilung älterer Chirurgen ist jedoch die fehlende Möglichkeit, die Fähigkeit zu bewerten, die für chirurgisches Fachwissen und Kompetenz mitentscheidend ist: intraoperative kognitive Fähigkeit. Bislang bieten nur sehr wenige, wenn überhaupt, chirurgische Simulationen die Möglichkeit, fortgeschrittene mentale Prozesse wie Entscheidungsfindung, Urteilsvermögen und Mustererkennung zu bewerten. Diese kognitiven Denkfähigkeiten gehören, neben der angeborenen Geschicklichkeit, zu den wichtigsten Fähigkeiten eines guten Chirurgen. Um diese Fähigkeiten zu messen, sind weitere Methoden erforderlich. Die Autoren aus (53) kamen zu dem Ergebnis, dass die Chirurgie ein Beruf ist, der sowohl gutes chirurgisches Urteilsvermögen als auch manuelle Geschicklichkeit und körperliche Fähigkeiten für die Durchführung einer Operation erfordert. Das Alter allein ist kein Indikator für chirurgische Kompetenz, daher ist eine regelmäßige Überprüfung dieser Eigenschaften notwendig, um sicherzustellen, dass der alternde Chirurg kompetent bleibt und in der Lage ist, die Sicherheitsstandards des Berufs zu erfüllen. Diese Überprüfung mit Hilfe von fähigkeitsbasierten Simulationen, die heutzutage bereits bei nicht-medizinischen Fachkräften weit verbreitet ist, könnte auch im Bereich der chirurgischen Kompetenzprüfung mit Hilfe von VR-Simulatoren erfolgen. Zwar sind weitere Studien zur Untersuchung der Validität dieser Simulatoren erforderlich, doch könnte der künftige Einsatz dieser Simulatoren sicherstellen, dass alle alternden Chirurgen einen angemessenen professionellen Standard für die Patientensicherheit aufrechterhalten.

Die Evaluation des funktionellen Alters eines Chirurgen stellt bis heute eine Herausforderung dar. Dennoch könnte eine solche objektive Bewertung die Würde eines engagierten Arztes und seinen Wert für die Gesellschaft mit der Patientensicherheit und dem Haftungsrisiko in Einklang bringen. Optimalerweise sollten zur objektiven Bewertung Assessments hinzugezogen werden, die sich auf kognitive, physische und technische Fähigkeiten spezialisieren. Hier könnte auch, wie von Frazer et al

---

(53) vorschlagen, der Einsatz von VR-Simulatoren zur regelmäßigen objektiven Kompetenzüberprüfung eines Arztes eine geeignete Möglichkeit darstellen.

Zielsetzung:

Aufgrund der interessanten Vorarbeiten zur Frage nach der Leistungsfähigkeit im Bezug auf das Alter sollen in dieser Studienarbeit folgende Fragestellungen beantwortet werden:

- Gibt es bei der roboter-assistierten Chirurgie am Simulator eine Abhängigkeit der Leistungsfähigkeit vom Alter von Probanden?
- Sind bestimmte Übungen von einer solchen Altersdynamik besonders betroffen?
- Wann ist der geeignetste Zeitpunkt angehende Chirurgen für die roboter-assistierte Chirurgie vorzubereiten?

Die wissenschaftliche Hypothese lautet: Das Alter eines Probanden hat einen Einfluss auf die natürliche operative Performance am Mimic dV-Trainer®.

---

## **3 Material und Methoden**

### **3.1 Studienformat**

Bei dieser Studie handelt es sich um eine klinische, prospektive Studie.

### **3.2 Probandenkollektiv und Akquise**

Die Untersuchung erfolgt an Probanden jeglicher Herkunft aus dem Querschnitt der Bevölkerung im Alter von fünf bis 70 Jahren. Um diese Probanden zu gewinnen, wurde Kontakt zu Kindergärten und Schulen hergestellt. Bei Kindern bis zum 14. Lebensjahr war es notwendig, zusätzlich das Einverständnis der Erziehungsberechtigten schriftlich festzuhalten. Des Weiteren wurde in Altenheimen nach Probanden gesucht, sowie Personen aus dem Bekanntenkreis befragt. Zusätzlich wurde die Studie an der Kinderchirurgie der Universitätsmedizin Mainz vorgestellt, wodurch weitere Kinder zur Teilnahme gewonnen werden konnten.

Die Hauptstudie umfasst 126 Probanden, die in zwölf verschiedene Altersgruppen eingeteilt wurden. Die genaue Einteilung der Altersstufen wird im Punkt 3.2.2. erläutert.

#### **3.2.1 Einschlusskriterien**

- freiwillige Teilnahme
- Mindesterreichen des Vorschulalters
- die Erlaubnis der Teilnahme für Probanden unter dem 14. Lebensjahr durch beide Erziehungsberechtigte
- keine Vorerfahrung im Umgang mit dem Mimic dV-Trainer® oder ähnlichen Simulatoren, um die natürliche, individuelle Performance außerhalb von Lernprozessen zu testen.

Auch während der bereits laufenden Studie war jederzeit die Ablehnung der Studienteilnahme möglich. Die bis zu diesem Zeitpunkt erhobenen Daten wurden vernichtet und durch Nachrekrutierung neuer Probanden wieder aufgefüllt.



---

### **3.2.2 Altersstufen**

Anhand der durch Kurt Meinel und Günter Schnabel beschriebene Ontogenese des Menschen (9), die sich mit der motorischen Entwicklung befasst, wurden die folgenden zwölf Altersstufen festgelegt. Pro Altersstufe wurden mindestens zehn Probanden getestet.

- fünf Jahre
- sechs Jahre
- sieben bis neun Jahre
- zehn bis zwölf Jahre
- 13 bis 15 Jahre
- 16 bis 19 Jahre
- 20 bis 25 Jahre
- 26 bis 30 Jahre
- 31 bis 40 Jahre
- 41 bis 50 Jahre
- 51 bis 60 Jahre
- 61 bis 70 Jahre

### **3.3 Ethikvotum und Registrierung**

Die Studie wurde der Ethikkommission der Landesärztekammer Rheinland-Pfalz zur Begutachtung vorgelegt und am 16.10.2017 mit positivem Votum belegt (Bearbeitungsnummer: 837.320.17 (11154)). Eine internationale Studienregistrierung in der Onlinedatenbank „Research Registry“ ([www.researchregistry.com](http://www.researchregistry.com)) ist erfolgt (Research Registry UIN: researchregistry3178).

### **3.4 Studienfinanzierung**

Der Verein Sterntaler e.V. ist ein eingetragener gemeinnütziger Verein, der sich für eine Verbesserung der Rahmenbedingungen von Unfallverletzten und operativ zu versorgenden Kindern einsetzt. Dieser Verein vergibt jährlich bis zu zwei Förderstipendien für Forschungsprojekte an der Universitätsmedizin Mainz. Durch die finanzielle Unterstützung mit insgesamt 2.500 € konnten somit insgesamt vier Studien am Mimic dV-Trainer®, unter anderem die vorliegende Studie, durchgeführt werden.

---

## 3.5 Studienablauf

### 3.5.1 Pilotstudie

Zunächst erfolgte in Rücksprache und Planung zusammen mit dem Institut für Medizinische Biometrie, Epidemiologie und Informatik der Universitätsmedizin Mainz die Durchführung einer Pilotstudie. Ziel dieser Vorstudie war es die statistisch notwendige Teilnehmerzahl für die nachfolgende Hauptstudie zu ermitteln. Die Pilotstudie beinhaltete eine Anzahl von 50 Probanden im Alter von fünf bis 70 Jahren. Das Curriculum bestand aus zwei verschiedenen Übungen: „Pick and Place“ und „Basic Camera Targeting“. Auf alle angewendeten Übungen wird in Abschnitt 3.7.3 näher eingegangen. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse pro Altersstufe der jeweiligen Übung. Auf der x-Achse befinden sich die Altersstufen, auf der y-Achse der Overall Score (Gesamtpunktzahl). Dieser Score setzt sich aus verschiedenen Metriken zusammen, die im Verlauf ebenfalls noch weiter erläutert werden. Bei Pick and Place zeigte sich ein deutlich verringerter Overall Score bei Kindern im Alter von fünf bis neun Jahren, sowie ein erneutes Abfallen des Overall Scores ab dem 26. Lebensjahr. Der höchste Overall Score zeigte sich in der Gruppe der 20 bis 25-Jährigen. Bei Basic Camera Targeting fiel auf, dass alle Probanden zwischen dem 16. und 70. Lebensjahr annähernd die Höchstpunktzahl erreichten. Lediglich in den Altersgruppen der Fünf- bis Zwölfjährigen waren geringere Overall Scores zu verzeichnen. Aus diesem Grund wurde eine dritte anspruchsvollere Übung ins Curriculum aufgenommen. Damit sollten v.a. innerhalb der Erwachsenenengruppe signifikante Aussagen bzgl. der natürlichen Performance ermöglicht werden. So wurde für die Hauptstudie eine Probandenzahl von  $n = 120$  festgesetzt, die in zehn Probanden (fünf weibliche, fünf männliche) pro festgelegte Altersstufe aufgeteilt wurde.

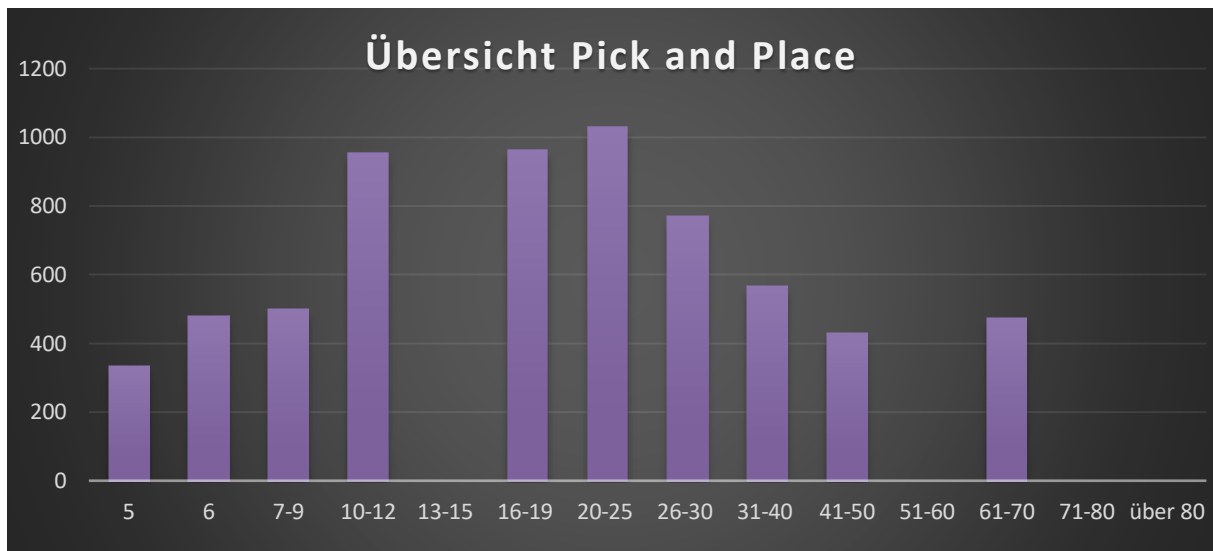


Abbildung 5: Pilotstudie, Overallscore PP pro Altersstufe (eigene Darstellung)

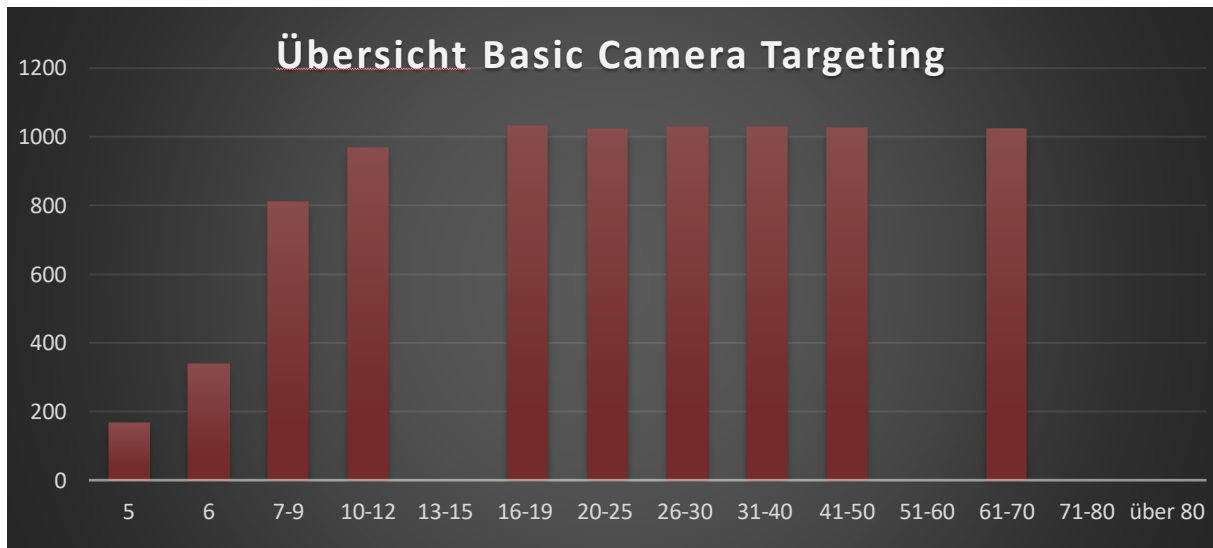


Abbildung 6: Pilotstudie, Overallscore BCT pro Altersstufe (eigene Darstellung)

### 3.5.2 Hauptstudie

Eine zeitliche Übersicht über den Studienablauf zeigt Abb. 7. Nach Probandenrekrutierung und Einwilligung absolvierte der Proband das Curriculum, bestehend aus drei verschiedenen Übungen: Pick and Place, Basic Camera Targeting und Thread The Rings. Auf diese Übungen wird im Abschnitt 3.7.3. näher eingegangen. Im Vorfeld wurde jedem Probanden lediglich das Demovideo der jeweiligen Übung gezeigt und die Handhabung des Mimic dV-Trainers® erläutert. Hierbei war darauf zu achten, dass diese Erläuterungen bei jedem Probanden identisch waren, um Vorteile zu

---

vermeiden. Sämtliche Ablenkung des Probanden, zum Beispiel in Form von Gesprächen oder Störgeräuschen war zu vermeiden. Des Weiteren wurde ein Fragebogen entwickelt, bei dem folgende Punkte abgefragt wurden: Alter, Geschlecht, Händigkeit, Sport, Musikinstrument, Computerspiele und Beruf, um im Verlauf der Arbeit gegebenenfalls Zusammenhänge mit der Leistung des jeweiligen Probanden und diesen Parametern herauszufiltern. Die Ergebnisse und der Fragebogen wurden ausgewertet und mit den Leistungen der anderen Teilnehmer verglichen.

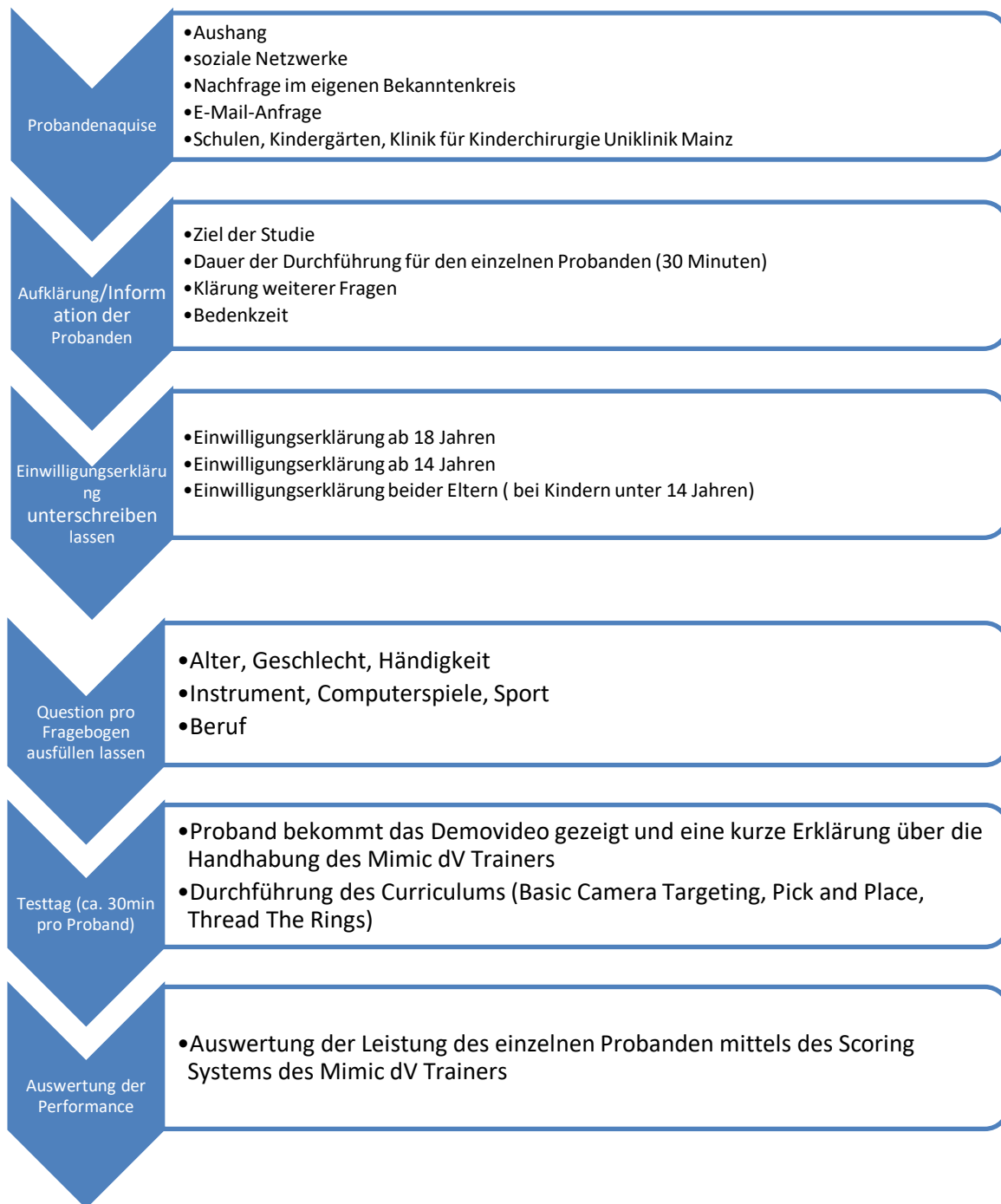


Abbildung 7: Flowchart zum geplanten Studienablauf (eigene Darstellung)

### 3.6 Datenerhebung und Statistik

#### 3.6.1 Excel- und SPSS-Datei

Die Zusammenstellung aller gewonnenen Daten erfolgte in einer anonymisierten Microsoft-Excel-Tabelle, bestehend aus:

- Probanden-ID

- 
- Geschlecht
  - Alter und zugehörige Altersklasse
  - Händigkeit
  - Sport
  - Instrument
  - Computer
  - Beruf
  - Overall-Score und Values der einzelnen Metriken

Zur Durchführung der statistischen Auswertung wurde die Excel-Tabelle in eine SPSS-Datei konvertiert.

### **3.6.2 Deskriptive Statistik und explorative Datenanalyse**

Eine statistische Beratung erfolgte durch das Institut für Medizinische Biometrie, Epidemiologie und Informatik der Universitätsmedizin Mainz. Im Rahmen der deskriptiven Statistik wurden bezogen auf die einzelnen Metriken pro Altersklasse und pro Übung der Mittelwert, die Standardabweichung, der Variationskoeffizient, sowie der Medianwert tabellarisch aufgeführt. Bei der explorativen Statistik wurde für jede Übung, die einzelnen Values bezogen auf jede einzelne Altersklasse der Kruskal-Wallis Test durchgeführt. Dieser vergleicht mehr als zwei unabhängige Stichproben anhand der Ränge der abhängigen Variable auf signifikante Unterschiede. Somit konnte entschieden werden, ob die Nullhypothese beibehalten oder verworfen werden musste. Die Nullhypothese besagt, dass es keine signifikanten Leistungsunterschiede zwischen den einzelnen Altersstufen gibt und konnte bei einem  $p$ -Wert  $< 0,05$  verworfen werden und somit die Alternativhypothese angenommen werden. Im Anschluss erfolgte der paarweise Vergleich der einzelnen Altersstufen untereinander, um festzustellen, zwischen welchen Altersstufen genau signifikante Unterschiede vorliegen. Diese signifikanten Unterschiede wurden als Signifikanz/ P-Werte in tabellarischer Form festgehalten. Weiterhin wurde für jeden signifikanten Unterschied ebenfalls die Effektstärke mit Hilfe der folgenden Formel berechnet:

$$r = \left| \frac{z}{\sqrt{n}} \right|$$

Dabei stellt  $r$  den Korrelationsquotienten dar,  $z$  die Standardteststatistik und  $n$  die Anzahl der Probanden. Liegt  $r$  zwischen 0,1 und 0,3, so ergibt sich ein schwacher Effekt, liegt  $r$  zwischen 0,3 und 0,5 ergibt sich ein mittlerer Effekt, beträgt  $r > 0,5$ , so

spricht man von einem starken Effekt (54). Grafisch wurden die Ergebnisse der verglichenen Altersgruppen pro Übung und für jeden einzelnen Value in Form eines Box-Plots verdeutlicht.

### 3.7 Operativer Trainingssimulator Mimic dV-Trainer®

Der Mimic dV-Trainer® ist ein validierter Roboter-Simulator für den da Vinci Roboter mit einem automatischen Scoring-System zur Bewertung der Leistung eines Probanden in Bezug auf sieben Kategorien (Übungsgesamtzeit, Ökonomie der Bewegung, Instrumentenkollisionen, Instrumentenkraft, Instrument außerhalb des Sichtbereiches, Hauptarbeitsbereich und Fallen von Gegenständen). Gleichfalls wird automatisch eine Punktzahl für die Gesamtbewertung abgegeben. Am Mimic dV-Trainer® können so realitätsnah wie möglich die operativen Fähigkeiten eines Probanden für die spätere Arbeit am da-Vinci-Roboter ermittelt und durch entsprechendes Training verbessert werden (55), (56).

#### 3.7.1 Allgemeiner Aufbau und Funktionsweise

Die nachfolgende Abbildung verdeutlicht den Aufbau des Mimic dV-Trainers®.



Abbildung 8: dV-Trainer® Main Hardware Components [56]

---

## Master Grips und Tension Cables:



Abbildung 9: Master Grips und Tension Cables [56]

Über die beiden Master Grips kann der Benutzer mit dem Mimic dV-Trainer® interagieren. Die Tension Cables sind nylonüberzogene Stahlkabel, die mit dem Master Grip verbunden sind und unter Spannung stehen. Somit können diese während der Simulation Bewegungen erkennen und spannungsbasierte Informationen rückmelden. Dieses Zusammenspiel ermöglicht somit die Bedienung der virtuellen Greifer sowie der Kameraoptik (57).

## Verstellbares Stereoskop:

Das Stereoskop zeigt hochwertige Stereobilder an und erstellt während der Simulation eine da-Vinci-ähnliche Trainingsumgebung (57).

## Fußschalter:

In Abbildung 10 wird der Aufbau des Fußschalters graphisch verdeutlicht. Anschließend werden die einzelnen Komponenten näher erläutert.



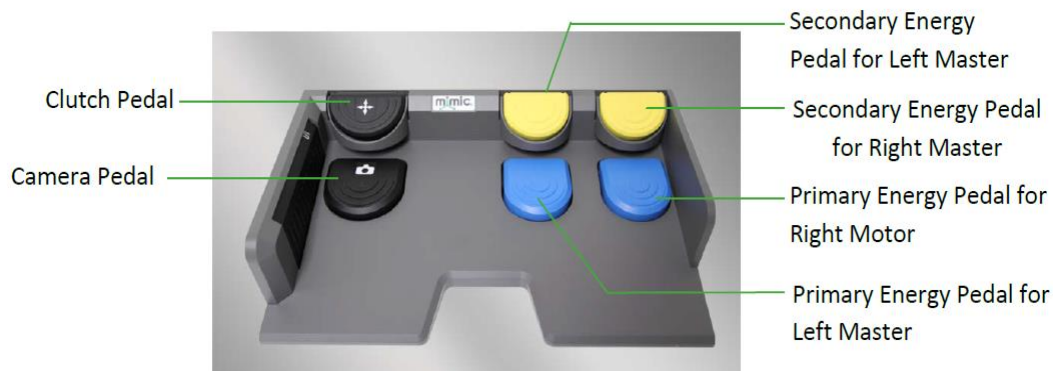


Abbildung 10: Fußschalter [56]

### **Kupplungspedal:**

Durch Drücken des Kupplungspedals werden die Instrumente in der VR-Umgebung unabhängig von den tatsächlichen Händen „eingefroren“. Auf diese Weise können die Master Grips im physischen Raum neu positioniert werden, ohne die Instrumente in der virtuellen Umgebung zu bewegen. Das Kupplungspedal wird verwendet, um eine angenehme Handhaltung einzustellen, sowie um zu verhindern, dass die Master Grips mit dem Boden des Mimic dV-Trainers® kollidieren und um den Arbeitsbereich effizient zu nutzen. Um die Instrumente „einzufrieren“, lässt man das Kupplungspedal gedrückt, bewegt die Hände in die gewünschte Position und lässt anschließend das Kupplungspedal wieder los (57).

### **Kamerapedal:**

Das Kamerapedal wird verwendet, um die Ansicht relativ zur virtuellen Umgebung zu verschieben. Dafür lässt man das Kamerapedal gedrückt, bewegt die Mastergrips in die gewünschte Position (nach hinten, nach vorne, nach oben, nach unten, nach rechts oder nach links) und lässt es wieder los. Wenn das Kamerapedal gedrückt wird, befindet sich der dV-Trainer im Kameramodus. Ein Kamerasymbol, welches die Ausrichtung festhält, wird im Stereoskop angezeigt.(57)

### **Bipolares Energiepedal:**

Bipolare Energie ist simulierte Energie, die von bipolaren Instrumenten angewendet wird. Durch Drücken des primären (blauen) Energiepedals wird diese aktiviert. Um die Energie in einer Übung zu nutzen, drückt und hält man das entsprechende Pedal. Um sie zu beenden, lässt man das Pedal wieder los (57).

---

## **Monopolare Energiepedale:**

Monopolare Energie ist simulierte Energie, die monopolaren Instrumenten zugeführt wird. Die monopolaren Instrumente können entweder eine Koagulationsfunktion (mono coag energy) oder eine Schneidefunktion (mono cut function) ausführen. Die Koagulationsfunktion wird vom primären (blauen) Pedal und die Schneidefunktion vom sekundären (gelben) Pedal aktiviert. Um monopolare Energie in einer Übung zu nutzen, drückt und hält man das entsprechende Mono-Energie-Pedal. Zum Beenden der Energie lässt man das Pedal wieder los (57).

### **3.7.2 Mögliche Leistungsmetriken**

Die Software des Mimic dV-Trainers® bietet verschiedene Übungen in unterschiedlichen Schwierigkeitsgraden. Um diese Übungen absolvieren zu können, werden die Master Grips auf virtuelle Greifer projiziert. Somit kann man die Grips nutzen, um die Greifwerkzeuge innerhalb der Übung zu steuern. (57)

Am Ende jeder Übung wird dem Benutzer die Bewertung seiner Leistung mit einer Vielzahl von Leistungsmetriken durch einen entsprechenden Wert (Value) und ein Gesamtscore präsentiert. Nachstehend werden zunächst die einzelnen Leistungsmetriken erläutert (57).

## **Übersicht der Leistungsmetriken**

### **Drops**

Wenn während der Übung ein vom Probanden geführter Gegenstand wie ein Ring oder eine Nadel versehentlich in einen nicht dafür vorgesehen Bereich fällt, erfolgt ein Punktabzug (57).

### **Master Workspace Range (MWSR)**

Durch ein definiertes kugelförmiges Volumen sollen alle Positionen der beiden Mastergriffe während der Übungen widergespiegelt werden. Innerhalb dieser gedachten Kugel wird die Strecke in Zentimetern gemessen, die ein Proband darin mit den Greifern zurücklegt. Je kleiner die Gesamtstrecke ist, desto höher ist die Punktzahl (57).

### **Instrument Collision (IC)**

---

Die Metrik der Instrumentenkollision gibt an, wie oft die Instrumente aneinanderstoßen. Diese Zusammenstöße werden addiert. Je häufiger sie aneinanderstoßen, desto mehr Punkte werden abgezogen (57).

### **Excessive Instrument Force (EIF)**

Gibt die sekundengenaue Gesamtzeit wieder, in der eine übermäßige Instrumentenkraft angewendet wird, die über der vorgeschriebenen Grenzkraft liegt. Kräfte auf ein Instrument können durch Kollisionen, durch Handlungen wie dem Zurückziehen des Gewebes, dem Einstechen einer Nadel oder dem Ziehen an einer Naht entstehen. Je kürzer diese Kraftanwendung dauert, desto mehr Punkte werden vergeben (57).

### **Economy of Motion (EOM)**

Diese Metrik misst die Gesamtstrecke (in Zentimetern), die alle Instrumente während einer Übung zurücklegen. Je weniger Zentimeter insgesamt an Strecke zurückgelegt werden, desto höher ist die Punktzahl. Somit bewertet diese Metrik die Effizienz/ Bewegungsökonomie innerhalb der Übung (57).

### **Instruments out of View (IOV)**

Diese Metrik erfasst die Gesamtstrecke (in Zentimetern), die von Instrumenten außerhalb des Sichtfeldes des Benutzers zurückgelegt wurde. Je kleiner die Gesamtstrecke ist, desto mehr Punkte erhält der Anwender dafür (57).

### **Time to complete Exercise (TTCE)**

Diese Metrik erfasst die Gesamtzeit, die der Proband vom Start bis zur Beendigung der Übung benötigt. Je weniger Zeit (in Sekunden) benötigt wird, desto mehr Punkte werden angerechnet (57).

Die Metriken Drops, Excessive Instrument Force, Instruments out of view sowie Instrument Collision bestimmen unter anderem die Risikobereitschaft beziehungsweise das Sicherheitsempfinden eines jeden Probanden. Die Metriken Economy of Motion, Master Workspace Range und Time to complete Exercise hingegen zielen auf die Qualität und die Effizienz der durchgeführten Übung ab (57).

Nachfolgend werden die für die Probanden ausgewählten Übungen konkretisiert und die dazugehörigen Leistungsmetriken aufgezeigt.

---

### 3.7.3 Ausgewählte Übungen im Rahmen der Studie

Die vorgestellten Leistungsmetriken sind über verschiedene Übungsszenarien erhebbar, von denen in der vorliegenden Studienarbeit die nachfolgenden drei Übungen ausgewählt wurden.

Grund für die Auswahl dieser Übungen war die Tatsache, dass durch die ausgewerteten Ergebnisse die notwendig geforderten Fähigkeiten einer chirurgischen Tätigkeit widergespiegelt werden. Dazu gehören vor allem spezielle psychomotorische und manipulative Fähigkeiten, die anhand der vorliegenden Metriken, wie Sicherheit der Instrumentenführung, Schnelligkeit, Geschicklichkeit, Effizienz und Bewegungsökonomie bewertet werden können. In früheren Studien konnte gezeigt werden, dass vor allem die Metriken Economy of motion und Time to complete Exercise positiv korrelieren und als starke Prädiktoren für das Vorhandensein chirurgischer Fähigkeiten, wie Effizienz und technische Begabung, angesehen werden (17). Da Probanden ab dem 5. Lebensjahr mit in die Studie einbezogen wurden, wurden initial einfache Übungen (Pick and Place und Basic Camera Targeting) mit ins Curriculum aufgenommen. So konnte eine Überforderung der jüngsten Teilnehmer vermieden und ein Leistungsvergleich zwischen Kindern und der Erwachsenen erbracht werden.

#### **Pick and Place:**

Lernziel: Einführung in die Verwendung von Instrumenten zum Aufnehmen und Ablegen, sowie zum Lokalisieren und Erfassen von Objekten (58). Die Übung beurteilt in erster Linie, die Fingerfertigkeit, das räumliche Vorstellungsvermögen. und das Übergeben eines Objektes von einem Instrument in das andere (58).

Aufgabenstellung: Einsortieren der farbigen Objekte in die dazu farblich passenden Behälter (58).

Durchführung: Durch Öffnen und Schließen der Master Grips werden die virtuellen Greifer aktiviert. Nach dem korrekten Einsortieren des jeweiligen Objektes in den farblich dazugehörigen Behälter verfärbt sich dieses grün. Um eine möglichst hohe Punktzahl zu erzielen, sollte eine Kollision der Instrumente miteinander, mit dem Boden, sowie den Behältern vermieden werden. Nachdem alle Objekte korrekt einsortiert sind, ist die Übung beendet (58).

Auswertung: Am Ende der Übung werden die unter 3.7.2 erläuterten Leistungsmetriken auf Basis der erbrachten Leistung automatisch ausgewertet. Insbesondere werden die Fingerfertigkeit und das räumliche Vorstellungsvermögen beurteilt.



Abbildung 11: Übung: Pick and Place [56]

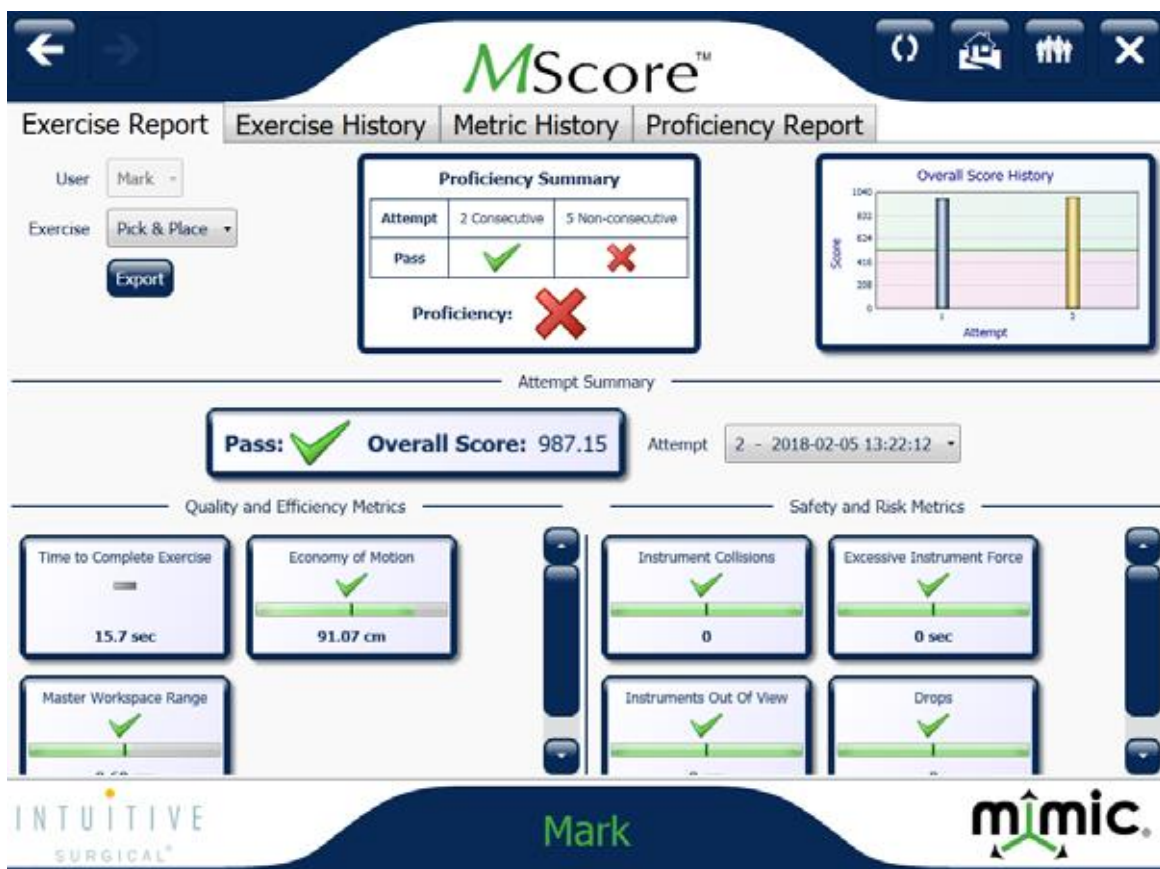


Abbildung 12: Ergebnisübersicht Pick and Place [56]

---

### **Basic Camera Targeting:**

Lernziel ist das Positionieren der Kamera und das Entwickeln einer dreidimensionalen Betrachtung. Diese Übung erfordert das Zusammenspiel von Kameraführung, Hand-Augen-Koordination, manipulativen Fähigkeiten sowie räumlichen Vorstellungsvermögen (58).

Aufgabenstellung: Die Kamera ist so zu positionieren, dass der weiße Kreis in der Mitte des Bildschirms die blaue Kugel umschließt (58).

Durchführung: Durch Öffnen und Schließen der Master Grips werden die virtuellen Greifer aktiviert. Um die Kamera zu starten, wird das Kamerapedal mit dem linken Fuß gedrückt gehalten. Nun ist es möglich, mit beiden Master Grips den weißen Kreis in alle Richtungen zu bewegen und den blauen Ball zu umschließen. Hierbei ist es wichtig, dass die blaue Kugel den weißen Kreis komplett ausfüllt. Um die Kameraoptik zu vergrößern, zieht man die Master Grips bei gedrücktem Kamerapedal zu sich. Zum Verkleinern werden sie weggedrückt. Die Kugel verschwindet, wenn sie richtig positioniert wurde und die nächste Kugel erscheint. Das Spiel ist beendet, wenn alle fünf Kugeln verschwunden sind (58).

Auswertung: Am Ende der Übung werden die unter 3.7.2 erklärten Leistungsmetriken auf Basis der erbrachten Leistung automatisch ausgewertet (58).

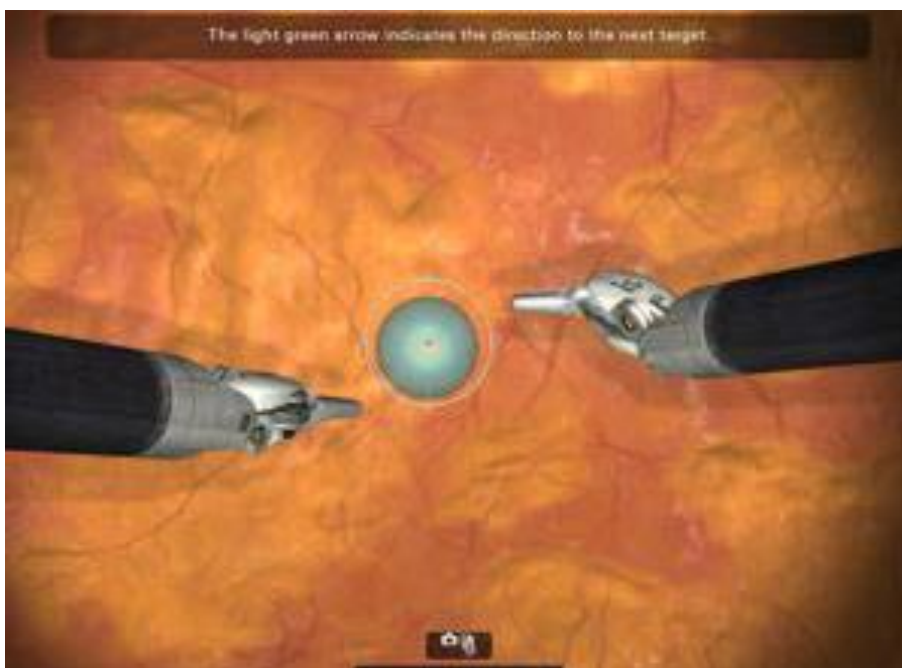


Abbildung 13: Übung: Basic Camera Targeting [56]

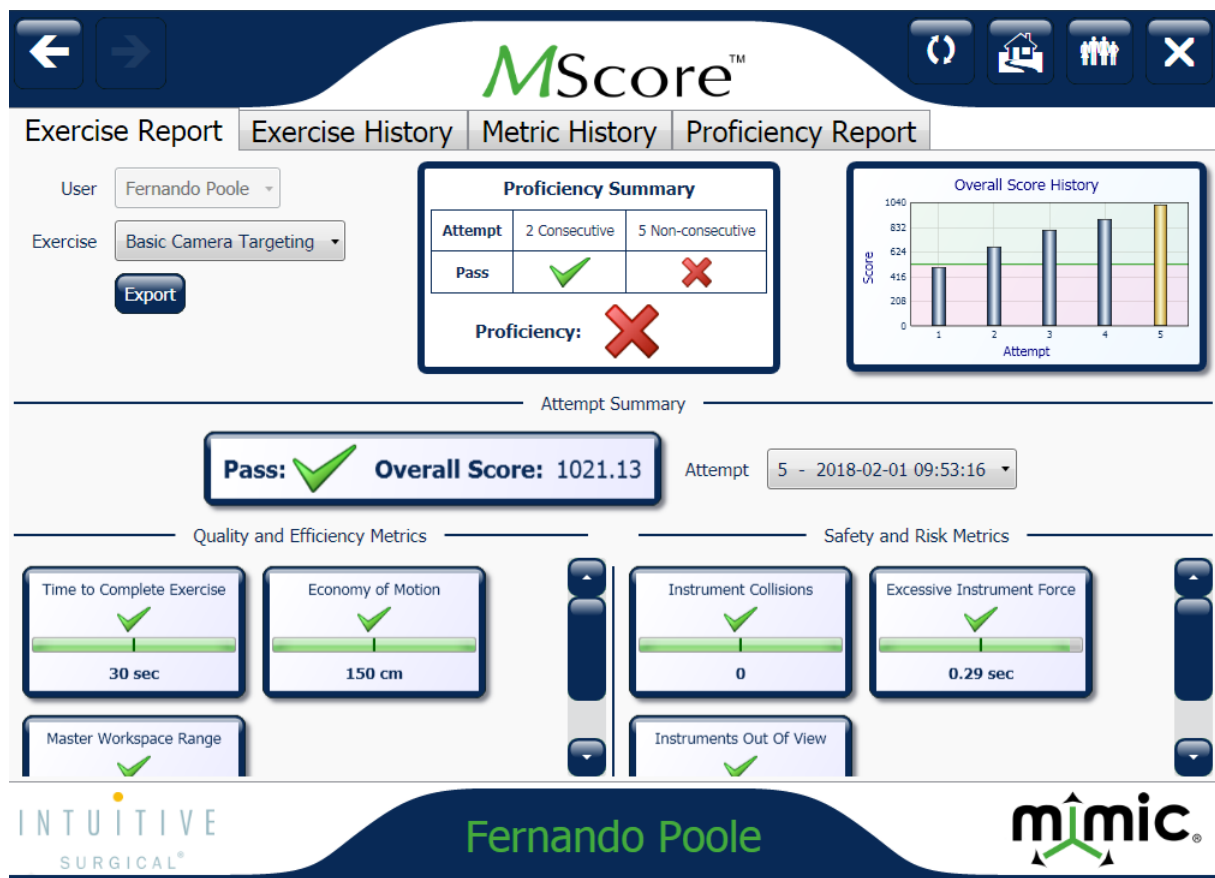


Abbildung 14: Ergebnisübersicht Basic Camera Targeting [56]

### **Thread The Rings:**

**Lernziel:** Verbesserung der Interaktion beider Hände durch das Übergeben der Nadel zwischen beiden Instrumenten (58). Hierbei werden die Hand-Auge-Fuß-Koordination, die Fingerfertigkeit, die bimanuelle Geschicklichkeit, die Kameraführung und genaue manipulative Fähigkeiten getestet (58).

**Aufgabenstellung:** Ziel der Übung ist das Durchfädeln einer gebogenen Nadel durch neun flexible Ösen (58).

**Durchführung:** Durch Öffnen und Schließen der Master Grips werden die virtuellen Greifer aktiviert. Mit einem der beiden Greifer wird die Nadel aufgenommen und mit Hilfe des zweiten durch die erste gelb blinkende Öse geführt. Dabei ist darauf zu achten Kollisionen der Greifer untereinander, mit dem Boden, mit den Ösen sowie das Herunterfallen der Nadel zu vermeiden. Beim Passieren der Öse kann diese durch zu starken Zug von der Gegenseite verbogen werden und ausreißen. In die-



sem F\_all muss der Vorgang wiederholt werden. Die Übung ist abgeschlossen, wenn die Nadel erfolgreich durch alle neun Ösen gefädelt wurde (58).

Auswertung: Am Ende der Übung werden die unter 3.7.2 erklärte Leistungsmetriken auf Basis der erbrachten Leistung automatisch ausgewertet (58).



Abbildung 15: Übung: Thread The Rings [56]

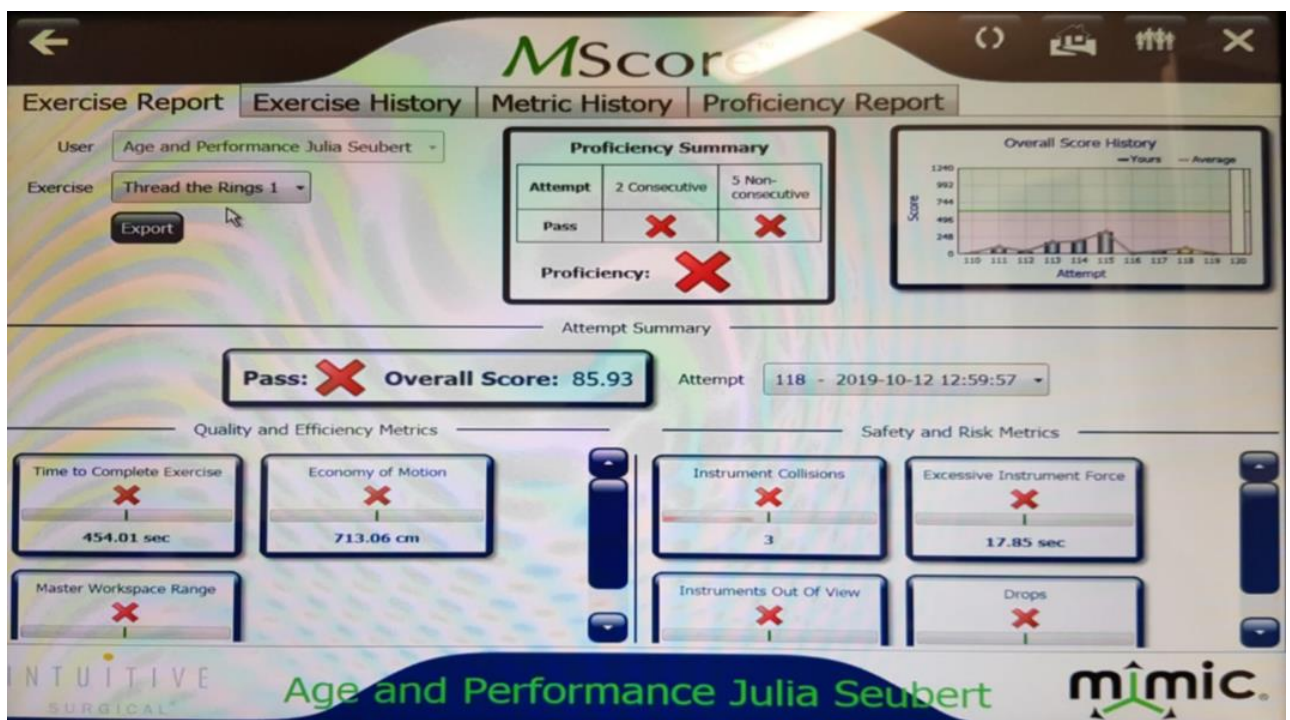


Abbildung 16: Ergebnisübersicht Thread the Rings, eigenen Aufnahme



---

## 4 Ergebnisse

Im Rahmen dieser Studienarbeit wurden insgesamt 126 Probanden am Simulationsroboter Mimic dV-Trainer® getestet. Das Kollektiv bestand aus Probanden aus dem Querschnitt der Bevölkerung im Alter von fünf bis 70 Jahren ohne jegliche Erfahrung im Umgang mit Simulationsrobotern. Eingeteilt wurden sie in die in Abschnitt 3.2.2 aufgeführten Altersstufen. Jede Altersstufe bestand aus fünf männlichen und fünf weiblichen Probanden.

### 4.1 Gesamtzusammenfassung der Ergebnisse

#### **Pick and Place:**

In Zusammenschau aller bewerteten Values ergibt sich folgendes Gesamtergebnis: Bezogen auf den Medianwert erreichten die jüngsten Probanden im Alter zwischen fünf und sechs Jahren in fast allen Values die schlechtesten Ergebnisse. Im Value IOV erzielten alle Altersstufen einen Medianwert von 0, sodass alle Probanden die Instrumente während der gesamten Übung innerhalb des Gesichtsfeldes hatten. Die besten Ergebnisse wurden im Alter von 16 bis 30 Jahren erreicht, wobei bei Drops, EIF, IC und IOV nur geringfügige Leistungsunterschiede in der Altersspanne zwischen 13 und 70 Jahren zu verzeichnen waren. Im Bereich der Schnelligkeit (TTCE) ist deutlich zu erkennen, dass im Alter zwischen 16 und 30 Jahren die besten Ergebnisse erzielt wurden. Je älter beziehungsweise je jünger das Probandenalter, desto mehr Zeit wird benötigt, die Übung zu absolvieren. Im Bereich der Präzision und Effizienz (EOM) ist eine ähnliche Tendenz zu verzeichnen. Bei den paarweisen Vergleichen der verschiedenen Altersstufen sind in den Values EIF, IC und MWSR keine signifikanten Unterschiede aufzuzeichnen. Bei den restlichen Values fällt auf, dass die signifikanten Unterschiede meist zwischen den Altersstufen der Fünf- und Sechsjährigen und den älteren Probanden herrschen.

#### **Basic Camera Targeting:**

In Zusammenschau aller bewerteten Values ergibt sich folgendes Gesamtergebnis: Bezogen auf den Medianwert ergaben sich bei EIF, bei IC und bei IOV jeweils ein Medianwert von 0 in allen untersuchten Altersklassen. Somit sind hier keine signifikanten Leistungsunterschiede zwischen den verschiedenen Altersstufen festzustellen. Im Allgemeinen fällt auf, dass die schlechtesten Ergebnisse bei den jüngeren Probanden unter dem zehnten Lebensjahr zu verzeichnen sind. Im Bereich der

---

Schnelligkeit (TTCE) erzielten die Probanden im Alter von 13 bis 30 Jahren die besten Ergebnisse. Je jünger die Probanden, desto schlechtere Ergebnisse wurden im Bereich Schnelligkeit erzielt. Im Alter lässt sich ebenfalls eine Leistungsreduktion feststellen, die jedoch nicht so stark ausgeprägt ist wie bei den jüngeren Testpersonen. Im Bereich der Präzision und der Effizienz (EOM) erzielten die Probanden im Alter zwischen 16 und 60 Jahren die besten Ergebnisse, wobei die Probanden im Alter von 20 bis 25 Jahren am besten abschnitten. Auffallend waren die Ergebnisse bezogen auf den Value MWSR, welcher ebenfalls die Qualität und die Effizienz der durchgeführten Übung beurteilt. Hier erzielten die ältesten Probanden im Alter zwischen 61 und 70 Jahren die besten Ergebnisse. Beim paarweisen Vergleich erkennt man signifikante Unterschiede bei MWSR, TTCE und EOM lediglich zwischen den Altersstufen der jungen Probanden (fünftes bis neuntes Lebensjahr) und den älteren Probanden.

### **Thread The Rings:**

In Zusammenschau aller bewerteten Values ergibt sich folgendes Gesamtergebnis: Bezogen auf den Medianwert erzielte die Altersgruppe der 26- bis 30-Jährigen in fast allen Values die besten Ergebnisse. In den Altersgruppen der Fünfjährigen sowie der Sechsjährigen war kein verwertbares Ergebnis zu erzielen, da die Konzentrationsfähigkeit für die Durchführung aller Übungen hintereinander offensichtlich nicht ausreichte und die letzte Übung daher von allen Probanden dieser Altersstufen vorzeitig abgebrochen werden musste oder gar nicht erst versucht wurde. In fast allen Values erzielte die Altersgruppe der Zehn- bis Zwölfjährigen, zusammen mit der Altersgruppe der Sieben- bis Neunjährigen die schlechtesten Ergebnisse. Beim Value TTCE schnitt die Altersgruppe der 51 bis -60-Jährigen am schlechtesten ab. Somit ist in der Übung Thread the Rings ein sehr homogenes Verteilungsmuster zu erkennen: Je jünger das Probandenalter, beziehungsweise je älter das Probandenalter, desto geringer ist die Leistungsfähigkeit, wohingegen die Leistung im Alter weniger stark reduziert ist als bei Kindern im Alter von sieben bis zwölf Jahren. Die beste natürliche Performance scheint im Alter zwischen 20 und 30 Jahren zu liegen. Beim paarweisen Vergleich der einzelnen Altersstufen untereinander erkennt man die Tendenz, dass die signifikanten Unterschiede vor allem zwischen den jüngsten Probanden (sieben bis zwölf Jahren) und den älteren Altersgruppen, vor allem der 26- bis 30-Jährigen liegt.

## 4.2 Ergebnisse im Detail

### 4.2.1 Pick and Place

In den Tabellen 1 bis 3, 8 bis 10 und 14 bis 16 sind für jede Übung der Mittelwert, der Medianwert, die Standardabweichung und der Variationskoeffizient pro Altersstufe und bezogen auf jedes einzelne Value übersichtlich aufgeführt. Bei allen Values gilt (bezogen auf den Mittelwert und den Medianwert): je niedriger die Punktzahl, desto besser ist die Performance. Im Nachfolgenden wird lediglich auf die wesentlichen Ergebnisse innerhalb der einzelnen Values genauer eingegangen.

**Tabelle 1 :** Mittelwert, Standardabweichung, Variationskoeffizient und Medianwert der verschiedenen Altersstufen bezogen auf die Values der Übung PP (eigene Darstellung)

Altersstufen	Drops				EOM			
	Mittelwert	SA	VK	Median	Mittelwert	SA	VK	Median
5	2.87	2.72	0.95	2.00	430.96	183.05	0.42	424.67
6	2.1	1.37	0.65	2.50	240.28	61.09	0.25	243.00
7 bis 9	1.11	1.36	1.23	0.00	184.27	52.72	0.29	186.66
10 bis 12	0.4	0.699	1.75	0.00	150.97	33.46	0.22	143.01
13 bis 15	0.3	0.48	1.60	0.00	146.73	26.34	0.18	135.12
16 bis 19	0.3	0.48	1.60	0.00	137.24	30.55	0.22	126.85
20 bis 25	0.2	0.42	2.10	0.00	135.74	12.02	0.09	136.69
26 bis 30	0.5	0.85	1.70	0.00	137.22	13.46	0.10	142.51
31 bis 40	0.3	0.95	3.17	0.00	142.88	25.45	0.18	136.73
41 bis 50	0.45	0.69	1.53	0.00	148.61	23.4	0.16	143.04
51 bis 60	0.18	0.41	2.28	0.00	156.97	34.81	0.22	143.87
61 bis 70	0.6	1.27	2.12	0.00	166.12	56.73	0.34	148.31

**Tabelle 2:** Mittelwert, Standardabweichung, Variationskoeffizient und Medianwert der verschiedenen Altersstufen bezogen auf die Values der Übung PP (eigene Darstellung)

Altersstufen	EIF				IC			
	Mittelwert	SA	VK	Median	Mittelwert	SA	VK	Median
5	1.04	1.63	1.57	0.25	2.2	4.63	2.10	0.00
6	0.88	1.13	1.28	0.41	2.6	3.24	1.25	1.50
7 bis 9	0.92	1.55	1.68	0.00	2.86	2.26	0.79	3.00
10 bis 12	0.44	0.75	1.70	0.17	1.9	2.38	1.25	1.00
13 bis 15	0.34	0.65	1.91	0.00	0.7	1.49	2.13	0.00
16 bis 19	0.39	0.08	0.21	0.00	1.2	1.75	1.46	0.00
20 bis 25	0.01	0.04	4.00	0.00	0.6	1.08	1.80	0.00
26 bis 30	0.04	0.11	2.75	0.00	0.3	0.68	2.27	0.00
31 bis 40	0.05	0.11	2.20	0.00	0.2	0.63	3.15	0.00
41 bis 50	0.07	0.17	2.43	0.00	1.45	2.98	2.06	0.00
51 bis 60	2.65	8.48	3.20	0.00	1.64	2.87	1.75	1.00
61 bis 70	0.3	0.64	2.13	0.00	2.2	4.44	2.02	0.00

**Tabelle 3 :** Mittelwert, Standardabweichung, Variationskoeffizient und Medianwert der verschiedenen Altersstufen bezogen auf die Values der Übung PP (eigene Darstellung)

Altersstufen	IOV				MWSR				TTCE			
	Mittelwert	SA	VK	Median	Mittelwert	SA	VK	Median	Mittelwert	SA	VK	Median
5	1.98	4.38	2.21	0.00	9.53	1.37	0.14	9.48	240.48	107.68	0.45	213.53
6	0.18	0.58	3.22	0.00	9.46	1.44	0.15	9.57	110.14	27.01	0.25	111.4
7 bis 9	0	0	0	0	9.21	1.38	0.15	9.20	77.73	19.84	0.26	78.66
10 bis 12	0	0	0	0	9.16	1.51	0.16	8.87	68.71	18.8	0.27	61.06
13 bis 15	0	0	0	0	8.82	1.06	0.12	8.81	54.26	22.33	0.41	52.66
16 bis 19	0	0	0	0	8.97	1.28	0.14	9.21	55.12	19.24	0.35	50.43
20 bis 25	0	0	0	0	8.23	1.46	0.18	8.27	54.12	9.51	0.18	55.43
26 bis 30	0	0	0	0	9.18	1.57	0.17	9.06	50.1	22.71	0.45	42.77
31 bis 40	0	0	0	0	8.74	0.91	0.10	8.90	66.38	20.66	0.31	58.68
41 bis 50	0	0	0	0	9.24	1.3	0.14	9.10	69.25	25.88	0.37	57.27
51 bis 60	0	0	0	0	8.98	1.97	0.22	8.54	89.55	35.54	0.40	72.86
61 bis 70	0	0	0	0	8.74	1.24	0.14	9.37	80.07	14.31	0.18	79.8

### Drops:

Bezogen auf den Mittelwert schnitt die Altersgruppe der 51 bis 60-Jährigen leistungsmäßig am besten ab, wohingegen die Fünfjährigen die schlechtesten Ergebnisse erzielten. Der Medianwert, der robust gegen Ausreißer ist, zeigte, dass die Altersgruppe der Fünf- und Sechsjährigen schlechtere Ergebnisse erzielten als die restlichen Probanden. Anhand des Kruskal-Wallis-Test ließen sich folgende Tendenzen feststellen: Die Altersgruppen der 20- bis 25-Jährigen, der 31- bis 40-Jährigen sowie der 51- bis 60-Jährigen erzielten die besten Ergebnisse. Die 13- bis 15-Jährigen, die 16- bis 19-Jährigen und die 61- bis 70-Jährigen erzielten vergleichbar gute Ergebnisse, gefolgt von den Zehn- bis Zwölfjährigen, den 26-bis 30-Jährigen und den 41- bis 50-Jährigen. Die Probanden im Alter von sechs bis neun Jahren erreichten etwas schlechtere Ergebnisse, gefolgt von den Fünfjährigen. Der paarweise Vergleich der Altersstufen untereinander zeigte signifikante Leistungsunterschiede zwischen den Fünfjährigen und allen anderen Altersklassen, ausgenommen der Sechs- bis Zwölfjährigen, der 26- bis 30-Jährigen und der 61- bis 70-Jährigen. Weiterhin erkennt man signifikante Leistungsunterschiede zwischen den Sechsjährigen und den 31- bis 40-Jährigen sowie den 51- bis 60-Jährigen. Demnach ist bei diesen Probanden die Nullhypothese, die besagt, dass keine signifikanten Leistungsunterschiede vorliegen, zu verwerfen und die Alternativhypothese anzunehmen. Alle anderen Altersgruppen untereinander lieferten keine signifikanten Unterschiede.

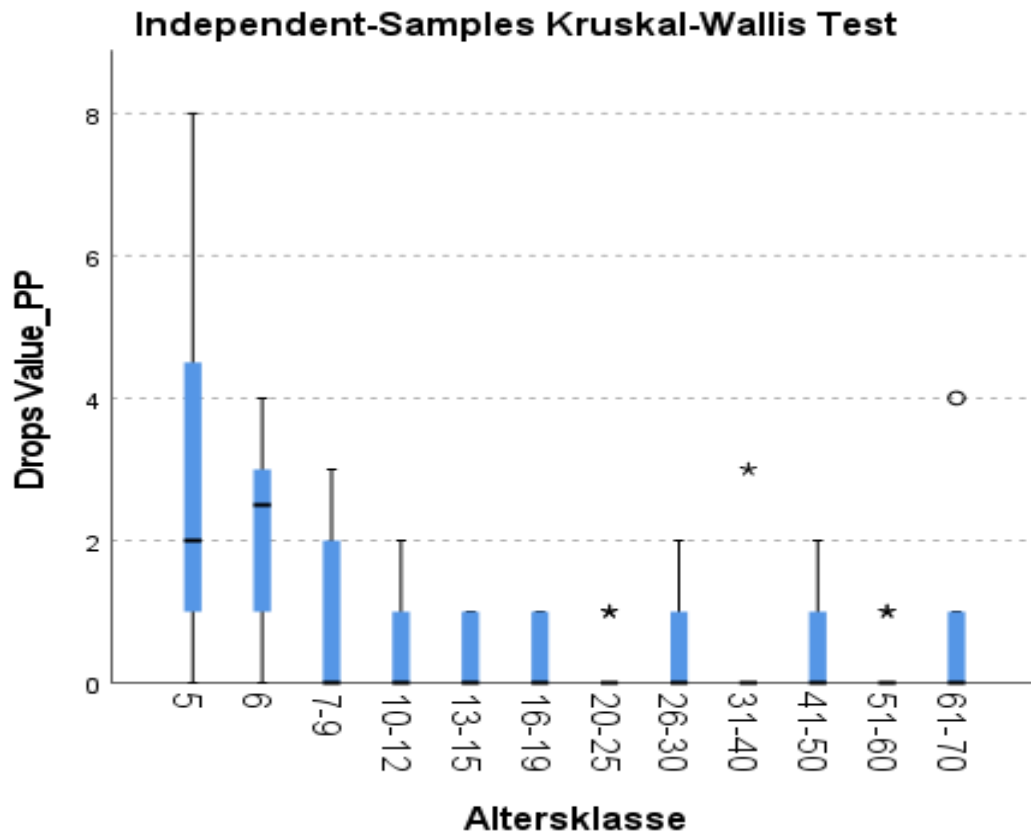


Abbildung 17: Kruskal-Wallis-Test PP\_Drops, niedriger Wert bedeutet bessere Performance (eigene Darstellung)

Tabelle 4 : signifikante Unterschiede beim paarweisen Vergleich der Altersgruppen untereinander, inklusive Effektstärke PP\_Drops

Drops		
Altersgruppen	P-Wert	Effektstärke
31-40/5	0.031	0.79
31-40/6	0.005	0.78
51-60/5	0.005	0.77
51-60/6	0.032	0.76
20-25/5	0.01	0.76
16-19/5	0.045	0.68
13-15/5	0.045	0.68

## Economy of Motion:

Sowohl beim Mittelwert als auch beim Medianwert zeigten sich die schlechtesten Ergebnisse bei den Fünf- und Sechsjährigen. Die besten Ergebnisse erzielte die Gruppe der 20- bis 25-Jährigen mit einem Mittelwert von 135,74 cm. Beim Medianwert zeigte die Altersgruppe der 16- bis 19-Jährigen die besten Ergebnisse. Beim Kruskal-Wallis Test waren deutliche Tendenzen zu erkennen: Zwischen 16 und 40 Jahren waren ähnlich gute Ergebnisse erreicht worden. Etwas schlechtere Ergebnisse erzielten die 13- bis 15-Jährigen sowie die Probanden zwischen 41 und 60 Jahren, gefolgt von den Zehn- bis Zwölfjährigen und den 61- bis 70-Jährigen. Deutlich schlechtere Ergebnisse erzielten die Sechsjährigen, gefolgt von den Fünfjährigen. Beim paarweisen Vergleich erkannte man signifikante Leistungsunterschiede zwischen den Fünfjährigen und allen anderen Altersstufen, ausgenommen der Sechsjährigen. Weiterhin waren die Probanden zwischen 16 und 40 Jahren den Sechsjährigen signifikant überlegen.

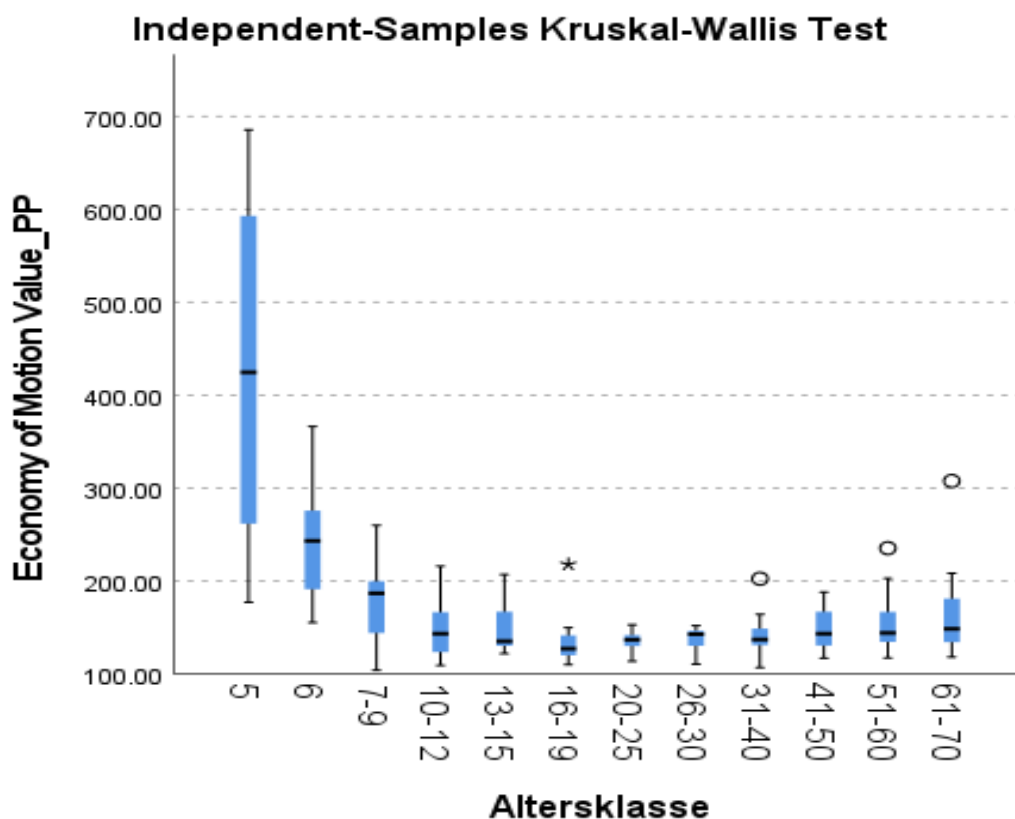


Abbildung 18: Kruskal-Wallis-Test PP\_EOM, niedriger Wert bedeutet bessere Performance (eigene Darstellung)

**Tabelle 5** : signifikante Unterschiede beim paarweisen Vergleich der Altersstufen untereinander, inklusive Effektstärke PP\_EOM (eigene Darstellung)

Economy of Motion		
Altersgruppen	P-Wert	Effektstärke
16-19/5	0	1.08
16-19/6	0.003	0.91
20-25/5	0	1.02
20-25/6	0.011	0.84
26-30/5	0	0.96
26-30/6	0.03	0.78
31-40/5	0	0.933
31-40/6	0.045	0.76
13-15/5	0.001	0.88
10-12/5	0.002	0.83
41-50/5	0.002	0.83
51-60/5	0.008	0.75
61-70/5	0	0.72

### Excessive Instrument Force:

Die 20- bis 25-Jährigen erzielten die besten Ergebnisse. Die 51- bis 60-Jährigen schnitten mit einem Mittelwert von 2,65 Sekunden leistungsmäßig am schlechtesten ab. Bezogen auf den Medianwert erkennt man die schlechtesten Ergebnisse in der Altersgruppe der Sechsjährigen. Beim Kruskal-Wallis-Test verzeichneten die Probanden im Alter von 13 bis 70 Jahren ähnlich gute Ergebnisse. Bei jüngeren Probanden fielen die Ergebnisse schlechter aus. Beim paarweisen Vergleich sind keine signifikanten Leistungsunterschiede nachweisbar.

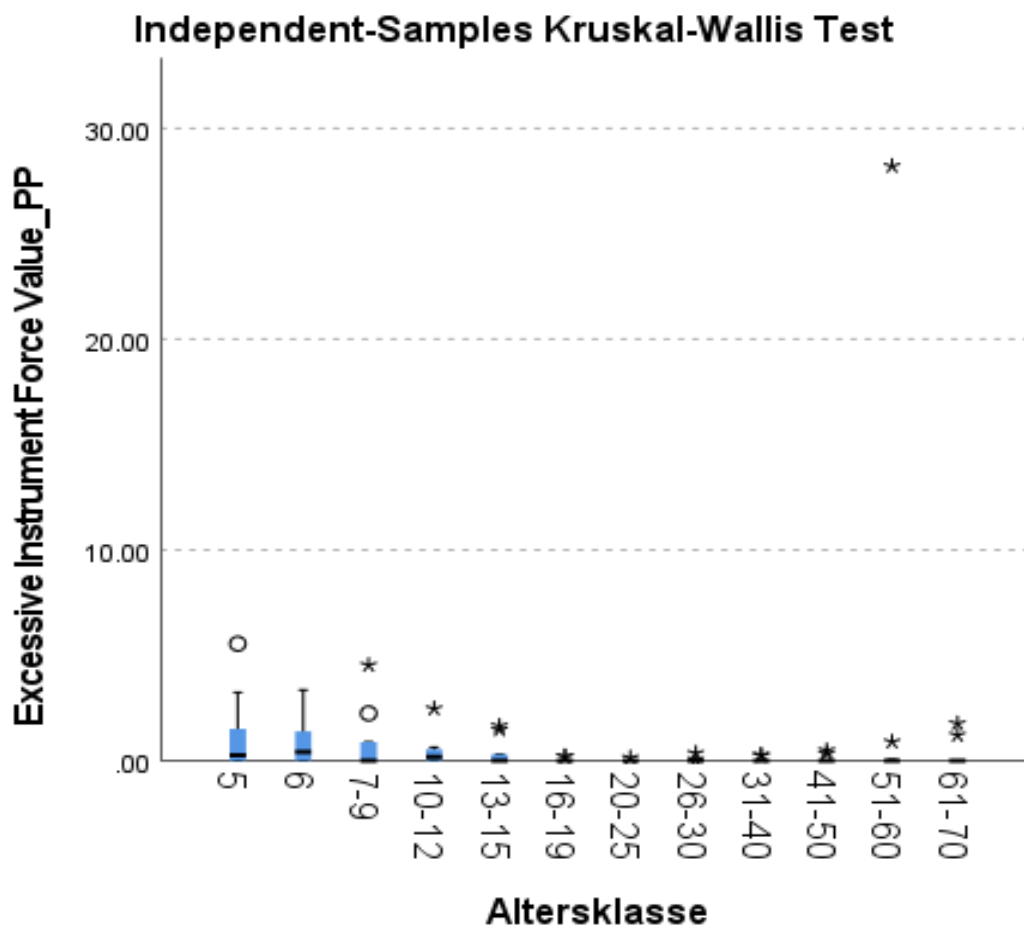


Abbildung 19: Kruskal-Wallis-Test PP{EIF, niedriger Wert bedeutet bessere Performance (eigene Darstellung)

### Instrument Collisions:

Bei den 31- bis 40-Jährigen kollidierten die Instrumente am wenigsten, wohingegen die Sieben- bis Neunjährigen häufigere Kollisionen aufwiesen. Der Kruskal-Wallis-Test zeigte ein sehr inhomogenes Verteilungsmuster. Die 13- bis 15-Jährigen, die 26- bis 30-Jährigen, sowie die 31- bis 40-Jährigen zeigten ähnlich gute Ergebnisse. Die 20- bis 25-Jährigen und die 61- bis 70-Jährigen erreichten etwas schlechtere Ergebnisse. Im Mittelfeld lagen die Fünfjährigen, die 16- bis 19-Jährigen und die 41- bis 50-Jährigen, gefolgt von den Zehn- bis Zwölfjährigen und den Sechsjährigen. Die schlechtesten Ergebnisse erzielten die Sieben- bis Neunjährigen. Beim paarweisen Vergleich waren keine signifikanten Leistungsunterschiede nachweisbar.



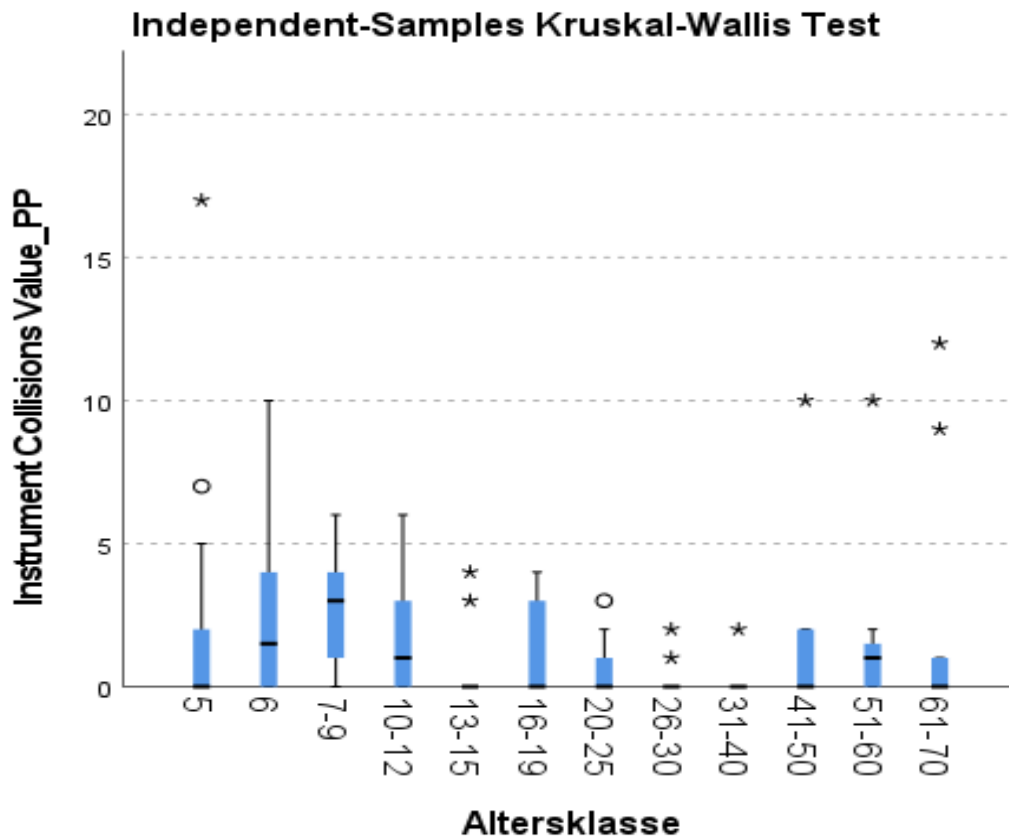


Abbildung 20 : Kruskal-Wallis-Test PP\_IC, niedriger Wert bedeutet bessere Performance (eigene Darstellung)

### Instruments out of view:

Die Fünf- und Sechsjährigen hatten bezüglich des Mittelwertes die Instrumente am häufigsten außerhalb des Sichtfeldes. Alle anderen Altersgruppen behielten die Instrumente während der kompletten Übung innerhalb ihres Sichtfeldes. Diese Tendenz lässt sich auch anhand des Kruskal-Wallis Tests in Abbildung 21 verdeutlichen. Der paarweise Vergleich ergab eine signifikante Überlegenheit der Probanden zwischen 41 und 60 Jahren gegenüber den Fünfjährigen. Weitere paarweise Vergleiche zwischen den verschiedenen Altersstufen ergaben keine signifikanten Unterschiede.

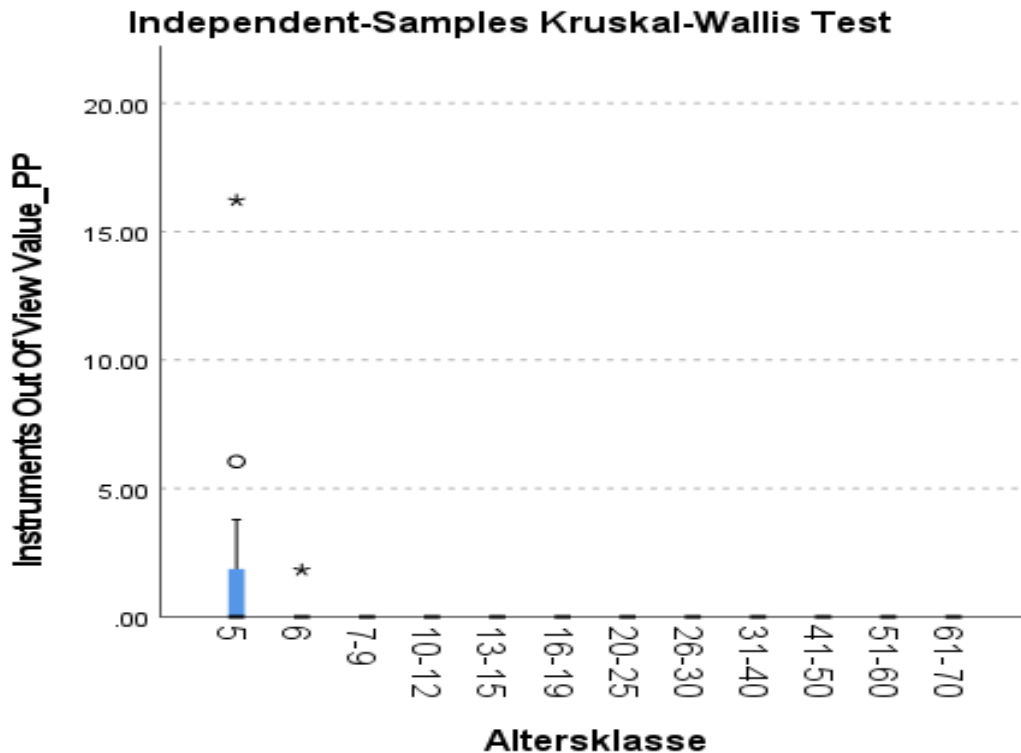


Abbildung 21 : Kruskal-Wallis-Test PP\_IOV, niedriger Wert bedeutet bessere Performance (eigene Darstellung)

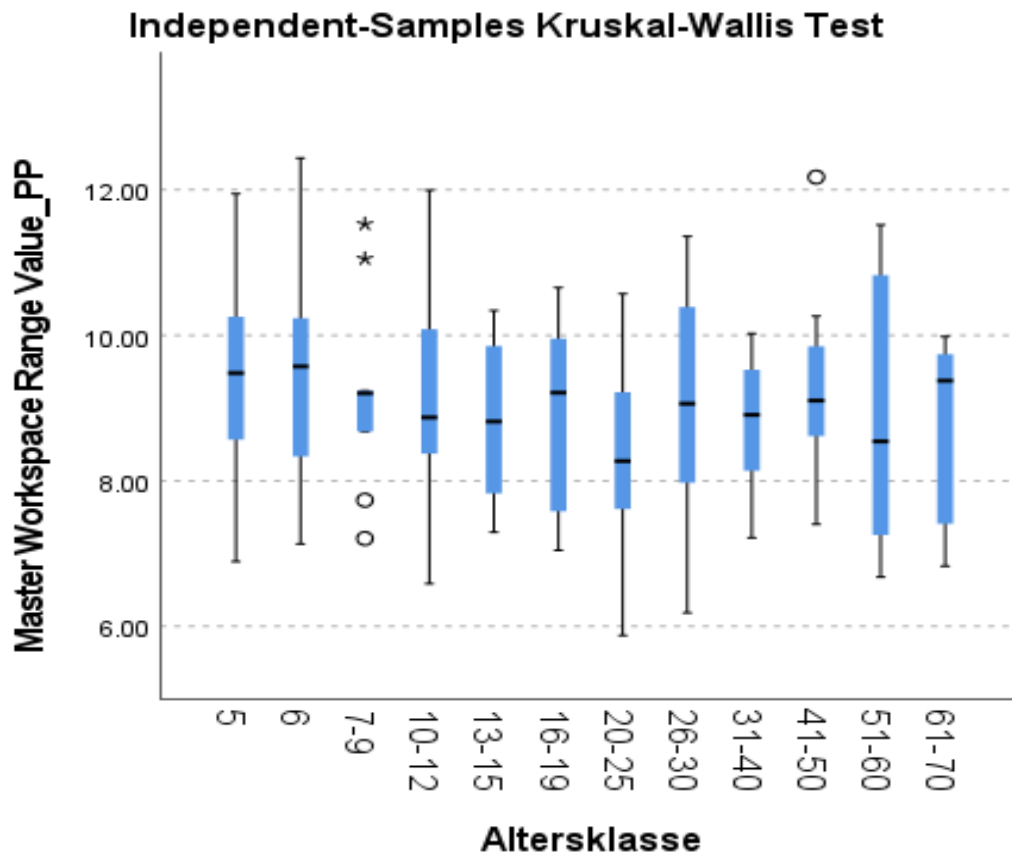
Tabelle 6 : signifikante Unterschiede beim paarweisen Vergleich der Altersstufen untereinander, inklusive Effektstärke PP\_IOV

Instruments out of view		
Altersgruppen	P-Wert	Effektstärke
41-50/5	0.036	0.68
51-60/5	0.036	0.68

### Master Workspace Range:

Die Altersgruppe der 20- bis 25-Jährigen erzielte mit einem Mittelwert von 8,23 cm die besten Ergebnisse, wohingegen die Altersgruppe der Fünfjährigen mit 9,53 cm am schlechtesten abschnitt. Bezüglich des Medianwertes zeigten sich ebenfalls die besten Ergebnisse bei den 20- bis 25-Jährigen (8,2cm). Die schlechtesten Ergebnisse erzielten allerdings mit einem Medianwert von 9,57 cm die Gruppe der Sechsjährigen. Bezogen auf den Kruskal-Wallis-Test zeigte sich ein sehr homogenes Verteil-

lungsmuster. Alle Probanden erzielten ähnlich gute Ergebnisse, sodass zwischen den einzelnen Altersstufen keine signifikanten Unterschiede zu verzeichnen waren.



**Abbildung 22** : Kruskal-Wallis-Test PP\_MWSR, niedriger Wert bedeutet bessere Performance (eigene Darstellung)

### Time to complete exercise:

Bezogen auf den Mittel- und den Medianwert erzielten die 26- bis 30-Jährigen die besten Ergebnisse, die Fünfjährigen schnitten am schlechtesten ab. Beim Kruskal-Wallis-Test zeigte sich folgende Tendenz: Die 26- bis 30-Jährigen zeigten die besten Ergebnisse. Die Probanden im Alter von 13- bis 25 Jahren erzielten ähnlich gute Ergebnisse. Die Zehn- bis Zwölfjährigen sowie Probanden zwischen dem 31. und 50. Lebensjahr erreichten etwas schlechtere Ergebnisse. Im unteren Mittelfeld lagen die Sieben- bis Neunjährigen sowie Probanden zwischen 51 und 70 Jahren, gefolgt von den Sechsjährigen und den Fünfjährigen. Der paarweise Vergleich ergab signifikante

Unterschiede zwischen den Probanden im Alter zwischen zehn und 50 Jahren und den Fünfjährigen. Bei der Altersgruppe der Sechsjährigen zeigten die Probanden im Alter zwischen 13 und 30 Jahren signifikant bessere Ergebnisse.

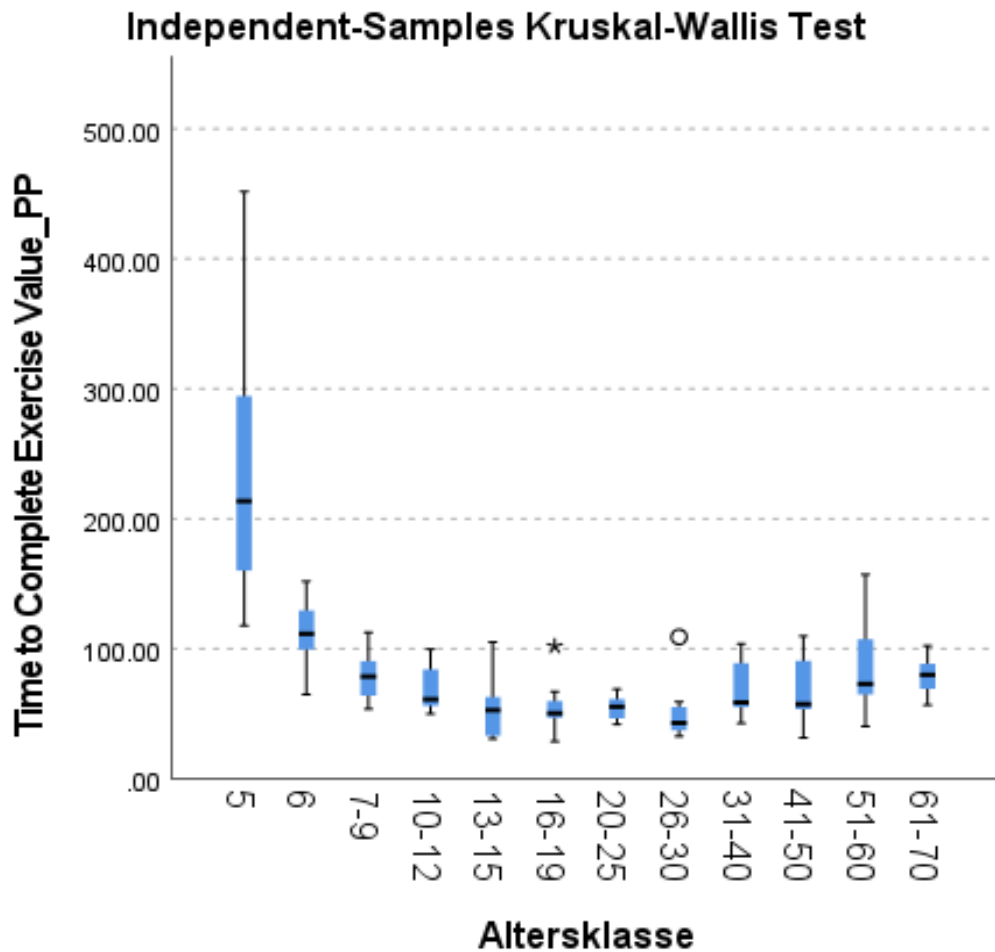


Abbildung 23 : Kruskal-Wallis-Test PP\_TTCE, niedriger Wert bedeutet bessere Performance (eigene Darstellung)

**Tabelle 7** : signifikante Unterschiede beim paarweisen Vergleich der Altersstufen untereinander, inklusive Effektstärke PP\_TTCE (eigene Darstellung)

Time to complete exercise		
Altersgruppen	P-Wert	Effektstärke
26-30/6	0.002	0.94
26-30/5	0	1.21
16-19/6	0.012	0.84
16-19/5	0	1.11
13-15/6	0.016	0.82
13-15/5	0	1.09
20-25/6	0.017	0.82
20-25/5	0	1.09
31-40/5	0.001	0.87
41-50/5	0.001	0.85
10-12/5	0.003	0.82

## 4.2.2 Basic Camera Targeting

**Tabelle 8 :** Mittelwert, Standardabweichung, Variationskoeffizient und Medianwert der verschiedenen Altersstufen bezogen auf die Values der Übung BCT (eigene Darstellung)

Altersstufen	EOM				EIF			
	Mittelwert	SA	VK	Median	Mittelwert	SA	VK	Median
5	17.05	34.59	2.03	5.83	0,00	0,00	0,00	0
6	47.49	56.72	1.19	17.76	0,00	0,00	0,00	0
7 bis 9	53.65	61.51	1.15	32.88	0,00	0,00	0,00	0
10 bis 12	24.1	31.18	1.29	9.44	0,00	0,00	0,00	0
13 bis 15	18.47	16.79	0.91	16.18	0,00	0,00	0,00	0
16 bis 19	3.55	6.66	1.88	1.15	0,00	0,00	0,00	0
20 bis 25	3.79	7.56	1.99	0.92	0,00	0,00	0,00	0
26 bis 30	3.52	4.02	1.14	2.44	0,00	0,00	0,00	0
31 bis 40	3.42	4.36	1.27	0.97	0,00	0,00	0,00	0
41 bis 50	2.71	4.04	1.49	1.08	0,00	0,00	0,00	0
51 bis 60	3.43	6.97	2.03	1.39	0,00	0,00	0,00	0
61 bis 70	18.62	26.47	1.42	2.63	0,00	0,00	0,00	0

**Tabelle 9 :** Mittelwert, Standardabweichung, Variationskoeffizient und Medianwert der verschiedenen Altersstufen bezogen auf die Values der Übung BCT (eigene Darstellung)

Altersstufen	IC				IOV			
	Mittelwert	SA	VK	Median	Mittelwert	SA	VK	Median
5	0,07	0,26	3,71	0	1.03	3.03	2.94	0.00
6	0,40	0,70	1,75	0	16.33	29.84	1.83	0.00
7 bis 9	0,44	0,73	1,66	0	12.34	33.64	2.73	0.00
10 bis 12	0,80	1,75	2,19	0	2.88	4.55	1.58	0.00
13 bis 15	0,00	0,00	0,00	0	0.04	0.13	3.25	0.00
16 bis 19	0,00	0,00	0,00	0	0.33	1.06	3.21	0.00
20 bis 25	0,00	0,00	0,00	0	0	0	0	0
26 bis 30	0,00	0,00	0,00	0	0.36	1.14	3.17	0.00
31 bis 40	0,00	0,00	0,00	0	0	0	0	0
41 bis 50	0,00	0,00	0,00	0	0	0	0	0
51 bis 60	0,00	0,00	0,00	0	0	0	0	0
61 bis 70	0,00	0,00	0,00	0	0.62	0.78	1.26	0.00

**Tabelle 10 :** Mittelwert, Standardabweichung, Variationskoeffizient und Medianwert der verschiedenen Altersstufen bezogen auf die Values der Übung BCT (eigene Darstellung)

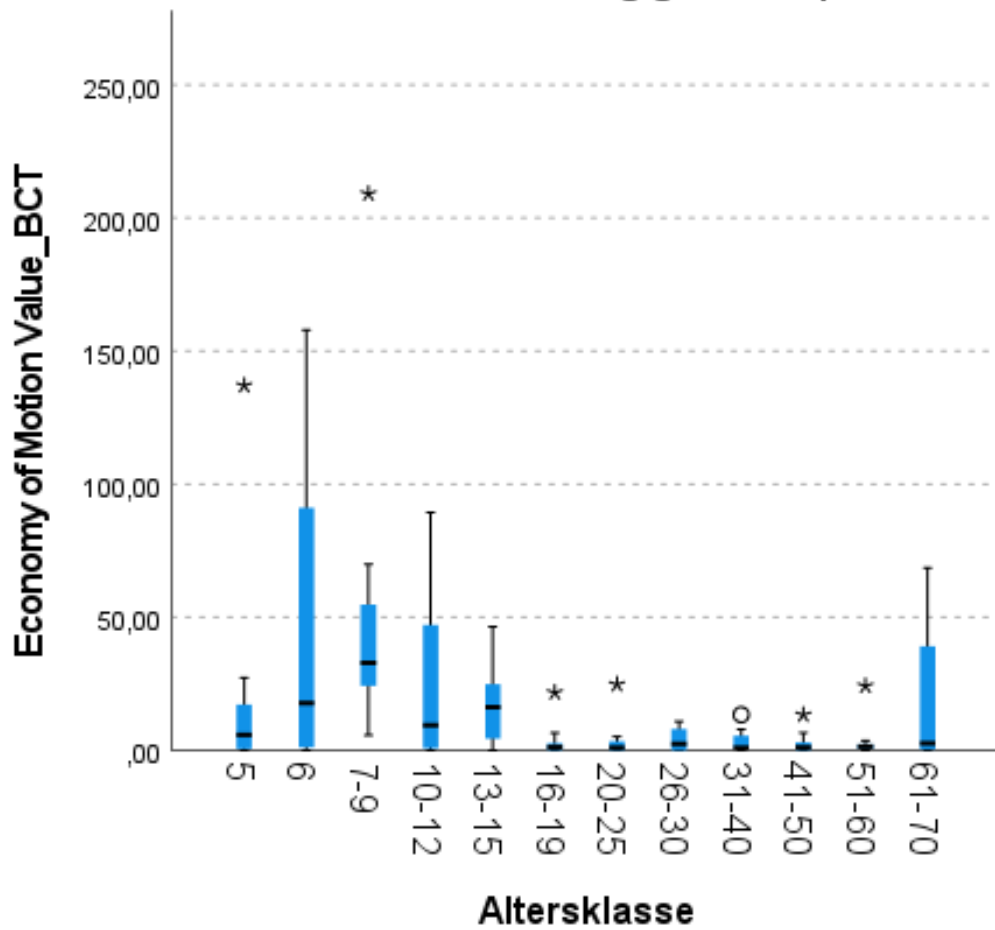
Altersstufen	MWSR				TTCE			
	Mittelwert	SA	VK	Median	Mittelwert	SA	VK	Median
5	8.83	2.71	0.31	8.17	140.5	80.48	0.57	112.07
6	12.59	3.99	0.32	11.98	131.4	77.41	0.59	117.82
7 bis 9	10.96	5.93	0.54	8.61	56.13	27.56	0.49	72.19
10 bis 12	8.96	2.17	0.24	8.58	64.81	29.37	0.45	54.46
13 bis 15	7.68	1.55	0.20	7.76	26.04	6.54	0.25	23.57
16 bis 19	7.07	1.49	0.21	7.14	25.62	9.09	0.35	25.4
20 bis 25	7.23	1.07	0.15	7.27	29.03	18.19	0.63	22.36
26 bis 30	6.61	1.43	0.22	6.51	24.62	13.83	0.56	24.4
31 bis 40	7.07	1.07	0.15	7.12	30.37	15.28	0.50	28.48
41 bis 50	7.25	1.01	0.14	7.43	33.52	12.5	0.37	30.67
51 bis 60	6.86	1.2	0.17	6.18	41.91	31.59	0.75	28.15
61 bis 70	6	0.98	0.16	5.78	36.55	22.01	0.60	31.87

---

### **Economy of motion:**

Die besten Ergebnisse erzielte die Altersgruppe der 41- bis 50-Jährigen mit einem Mittelwert von 2,71 cm. Die schlechtesten Ergebnisse wurden von der Altersgruppe der Sieben- bis Neunjährigen mit einem Mittelwert von 53,65 cm erreicht. Bezogen auf den Medianwert, der robuster gegen Ausreißer ist, erzielten die 20- bis 25-Jährigen die besten Ergebnisse, die Sieben- bis Neunjährigen schnitten am schlechtesten ab. In Abbildung 24 zeigt der Kruskal-Wallis-Test folgende Tendenzen: Annähernd gleich gute Ergebnisse erzielten die Probanden im Alter von 16 bis 60 Jahren. Etwas schlechtere Ergebnisse erreichten die Altersgruppen der 61- bis 70-Jährigen, der Fünfjährigen und der Zehn- bis Zwölfjährigen. Im Anschluss folgten die Altersgruppen der 13- bis 15-Jährigen und der Sechsjährigen. Die Gruppe der Sieben- bis Neunjährigen schnitt leistungsmäßig am schlechtesten ab. Beim paarweisen Vergleich der Altersgruppen untereinander zeigt sich, dass die Probanden zwischen dem 16. und dem 60. Lebensjahr (ausgenommen der 26-30-Jährigen) den Sieben- und Neunjährigen signifikant überlegen waren.

## Kruskal-Wallis-Test bei unabhängigen Stichproben



**Abbildung 24** : Kruskal-Wallis-Test BCT\_EOM. niedriger Wert bedeutet bessere Performance (eigene Darstellung)

**Tabelle 11** : signifikante Unterschiede beim paarweisen Vergleich der Altersstufen untereinander, inklusive Effektstärke BCT\_EOM (eigene Darstellung)

Economy of Motion		
Altersgruppen	P-Wert	Effektstärke
20-25/7-9	0.013	0.85
41-50/7-9	0.011	0.84
16-19/7-9	0.021	0.83
51-60/7-9	0.027	0.79
31-40/7-9	0.045	0.78



---

**Excessive Instrument Force:**

Alle Altersstufen erzielten dieselben Ergebnisse. Somit ergaben sich keine signifikanten Leistungsunterschiede.

**Instrument Collision:**

Alle Probanden im Alter zwischen 13 und 70 Jahren wiesen keinerlei Instrumentenkollisionen auf. Bei Kindern zwischen dem fünften und dem zwölften Lebensjahr waren häufigere Kollisionen zu verzeichnen. Diese Tendenzen sind anhand des Kruskal-Wallis- Tests in Abbildung 25 graphisch veranschaulicht. Beim paarweisen Vergleich der einzelnen Altersstufen untereinander lassen sich keine signifikanten Leistungsunterschiede feststellen.

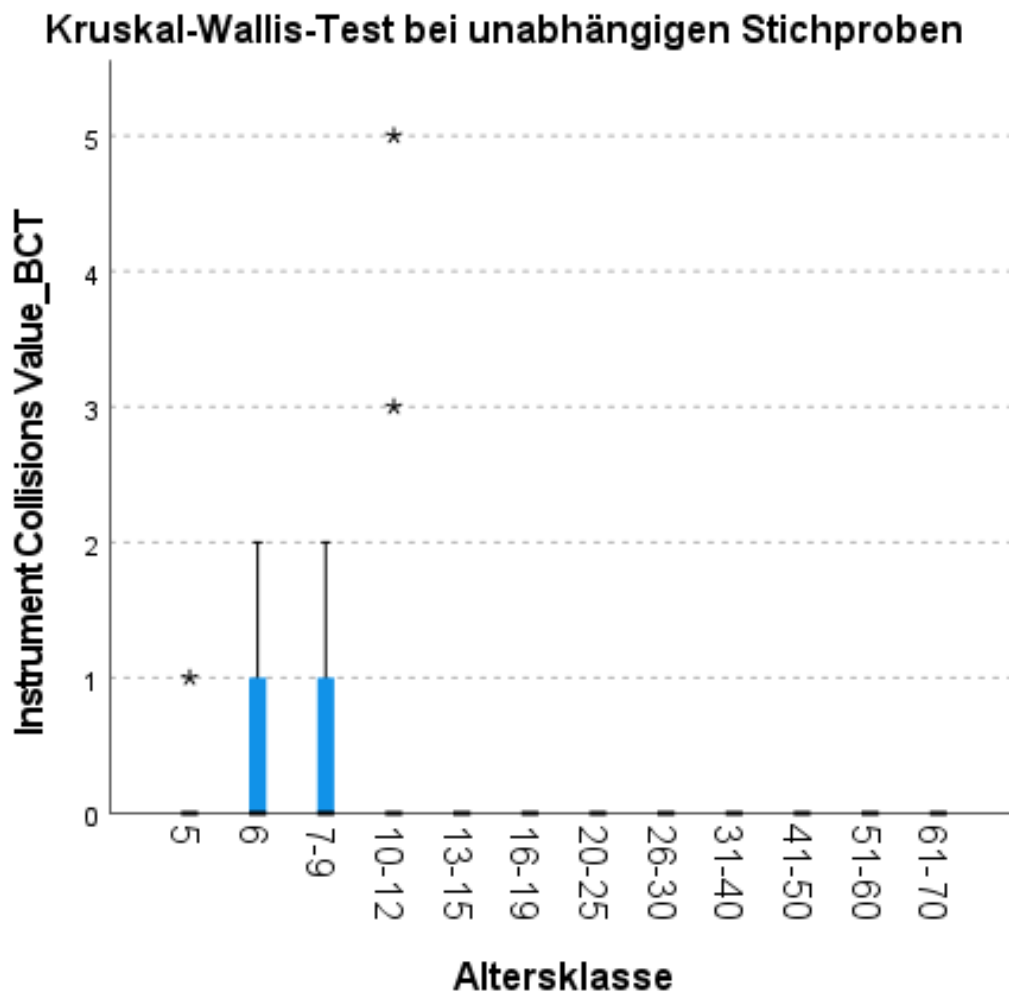
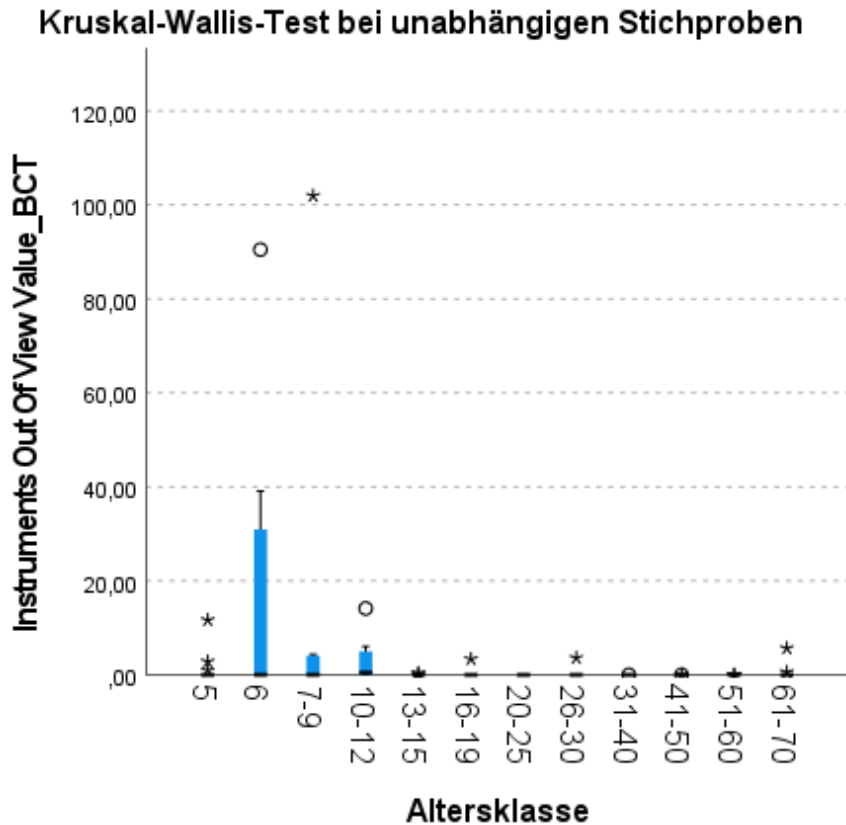


Abbildung 25: Kruskal-Wallis-Test BCT\_IC, niedriger Wert bedeutet bessere Performance (eigene Darstellung)

#### Instruments out of view:

Die besten Ergebnisse erzielten bezogen auf den Mittelwert die Probanden zwischen dem 20. und dem 60. Lebensjahr. Diese Altersstufen hatten die Instrumente während der gesamten Übung stets innerhalb des Gesichtsfeldes. Die Gruppe der Sechsjährigen schnitt mit einem Mittelwert von 16,33-mal am schlechtesten ab. Der Kruskal-Wallis-Test zeigte in der Erwachsenengruppe ein sehr homogenes Ergebnis. Bei den Fünf- bis Zwölfjährigen waren deutlich häufiger Ausreißer zu verzeichnen als bei den älteren Probanden. Beim paarweisen Vergleich der Altersstufen untereinander ergaben sich keine signifikanten Unterschiede.



**Abbildung 26** : Kruskal-Wallis-Test BCT\_IOV, niedriger Wert bedeutet bessere Performance (eigene Darstellung)

### Master Workspace Range:

Die besten Ergebnisse mit einem Mittelwert von 6,0 cm erzielten die 61- bis 70-Jährigen. Die Sechsjährigen schnitten mit einem Mittelwert von 12,59 cm am schlechtesten ab. Der Medianwert zeigte gleiche Tendenzen. Beim Kruskal-Wallis-Test erzielten die 61- bis 70-Jährigen die besten Ergebnisse. Die Probanden im Alter zwischen 16 und 60 Jahren erreichten ähnlich gute Ergebnisse. Etwas schlechtere Ergebnisse erzielte die Altersgruppe der 13- bis 15-Jährigen, gefolgt von den jüngeren Altersstufen. Beim paarweisen Vergleich zeigten alle Probanden im Alter von 16 bis 70 Jahre signifikant bessere Ergebnisse als die Sechsjährigen. Weiterhin war die Altersstufe der 61- bis 70-Jährigen den Probanden im Alter von fünf bis 12 Jahren leistungsmäßig signifikant überlegen.

## Kruskal-Wallis-Test bei unabhängigen Stichproben

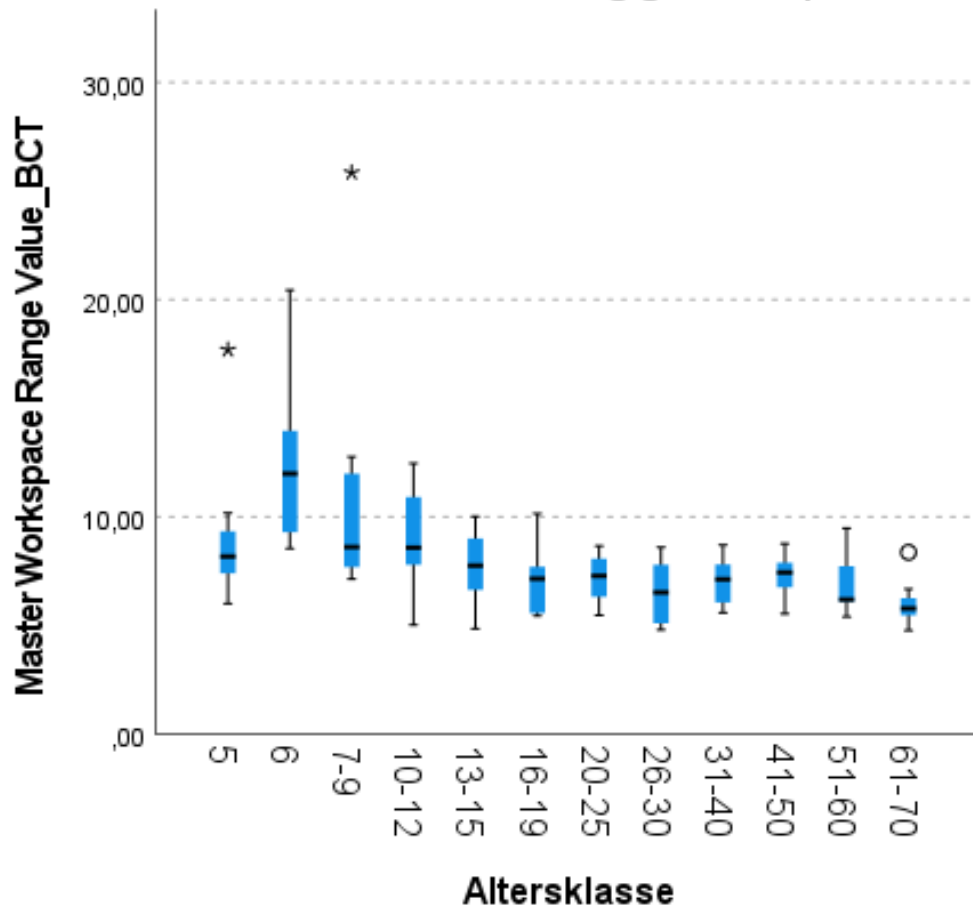


Abbildung 27 : Kruskal-Wallis-Test BCT\_MWSR, niedriger Wert bedeutet bessere Performance (eigene Darstellung)

**Tabelle 12** : signifikante Unterschiede beim paarweisen Vergleich der Altersstufen untereinander, inklusive Effektstärke BCT\_MWSR (eigene Darstellung)

Master Workspace Range		
Altersgruppe	P-Wert	Effektstärke
26-30/6	0.001	0.97
61-70/5	0.012	0.75
61-70/10-12	0.019	0.81
61-70/7-9	0.007	0.89
61-70/6	0	1.19
51-60/6	0.002	0.92
16-19/6	0	0.86
31-40/6	0.012	0.84
41-50/6	0.023	0.78
20-25/6	0.033	0.78

### Time to complete exercise:

Die Übung wurde von der Altersgruppe der 26- bis 30-Jährigen mit einem Mittelwert von 24,6 Sekunden am besten absolviert. Die Fünfjährigen brauchten mit 140,5 Sekunden am längsten. Bezogen auf den Medianwert zeigte die Gruppe der 20- bis 25-Jährigen die besten, die Altersgruppe der Sechsjährigen die schlechtesten Ergebnisse. Der Kruskal-Wallis-Test stellte folgende Tendenzen fest: Die Probanden im Alter zwischen 13 und 70 Jahren erzielten ähnlich gute Ergebnisse. Bei den Fünf- bis Zwölfjährigen fiel auf, dass je jünger die Probanden waren, desto mehr Zeit wurde für die Übung benötigt. Beim paarweisen Vergleich waren alle Probanden im Alter von 13 bis 70 Jahren den Fünfjährigen signifikant überlegen. Weiterhin zeigten Probanden im Alter von 13 bis 40 Jahren signifikant bessere Leistungen als die Sechsjährigen.

## Kruskal-Wallis-Test bei unabhängigen Stichproben

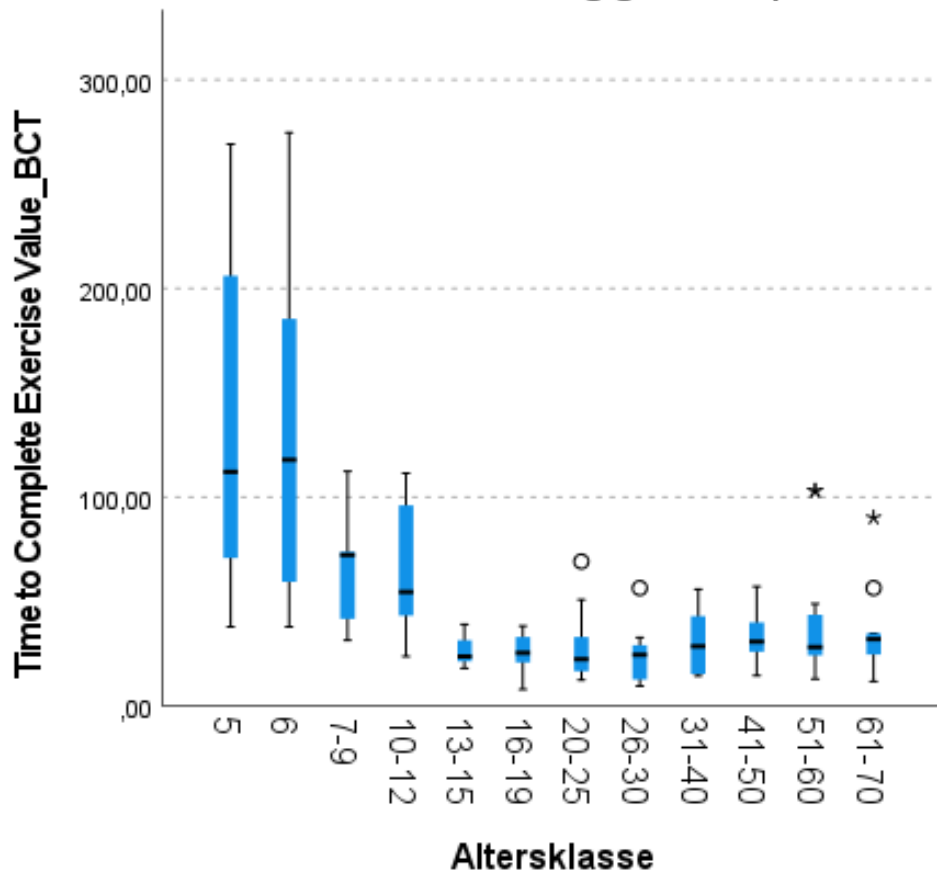


Abbildung 28 : Kruskal-Wallis-Test BCT\_TTCE, niedriger Wert bedeutet bessere Performance (eigene Darstellung)

**Tabelle 13** : signifikante Unterschiede beim paarweisen Vergleich der Altersstufen untereinander, inklusive Effektstärke BCT\_TTCE (eigene Darstellung)

Time to complete exercise		
Altersgruppen	P-Wert	Effektstärke
13-15/6	0.02	0.94
13-15/5	0	0.95
26-30/6	0.001	0.99
26-30/5	0	0.99
16-19/6	0.003	0.91
16-19/5	0	0.92
20-25/6	0.003	0.91
20-25/5	0	0.92
31-40/6	0.012	0.84
31-40/5	0.001	0.85
41-50/5	0.013	0.73
61-70/5	0.025	0.7
51-60/5	0.017	0.73

### 4.2.3 Thread The Rings

Diese Übung, die die letzte Übung innerhalb des Curriculums darstellte, wurde von allen Fünf- und Sechsjährigen aufgrund von Konzentrationsschwierigkeiten vorzeitig abgebrochen. Somit sind lediglich die Ergebnisse der älteren Probanden verwertbar und im Folgenden aufgeführt.

**Tabelle 14 :** Mittelwert, Standardabweichung, Variationskoeffizient und Medianwert der verschiedenen Altersstufen bezogen auf die Values der Übung TTR (eigene Darstellung)

Altersstufen	Drops				EOM			
	Mittelwert	SA	VK	Median	Mittelwert	SA	VK	Median
5								
6								
7 bis 9	7.89	4.4	0.56	7.00	909.3	286.17	0.31	787.40
10 bis 12	9.3	6.09	0.65	7.50	1045.41	427.72	0.41	882.62
13 bis 15	2.5	2.27	0.91	2.00	498.09	249.56	0.50	447.11
16 bis 19	2.7	2.36	0.87	2.50	578.01	195.32	0.34	596.35
20 bis 25	0.8	1.14	1.43	0.00	489.53	157.58	0.32	463.14
26 bis 30	0.8	0.92	1.15	1.00	387.77	60.05	0.15	378.80
31 bis 40	1.1	1.1	1.00	1.00	666.99	327.67	0.49	573.28
41 bis 50	2.64	2.42	0.92	2.00	696.72	297.7	0.43	725.99
51 bis 60	4.18	5.83	1.39	2.00	836.4	341.09	0.41	850.31
61 bis 70	3	3.13	1.04	2.00	772.1	404.11	0.52	650.90

**Tabelle 15 :** Mittelwert, Standardabweichung, Variationskoeffizient und Medianwert der verschiedenen Altersstufen bezogen auf die Values der Übung TTR (eigene Darstellung)

Altersstufen	EIF				IC			
	Mittelwert	SA	VK	Median	Mittelwert	SA	VK	Median
5								
6								
7 bis 9	35.94	25.63	0.71	26.34	17	15.48	0.91	11.00
10 bis 12	130.95	230	1.76	21.70	34.3	20.69	0.60	40.50
13 bis 15	62.94	175.87	2.79	3.54	15.9	30.3	1.91	5.50
16 bis 19	23.81	36.96	1.55	6.44	9.9	12.12	1.22	6.50
20 bis 25	41.42	108.61	2.62	6.46	11.7	9.62	0.82	9.50
26 bis 30	2.78	2.15	0.77	2.32	7	3.89	0.56	5.50
31 bis 40	32.98	37.51	1.14	29.96	12.6	11.5	0.91	14.00
41 bis 50	60	114.58	1.91	21.65	21.64	23.4	1.08	12.00
51 bis 60	29.18	31.01	1.06	19.93	29.27	13.56	0.46	21.00
61 bis 70	29.86	24.18	0.81	21.85	18.5	14.49	0.78	14.00



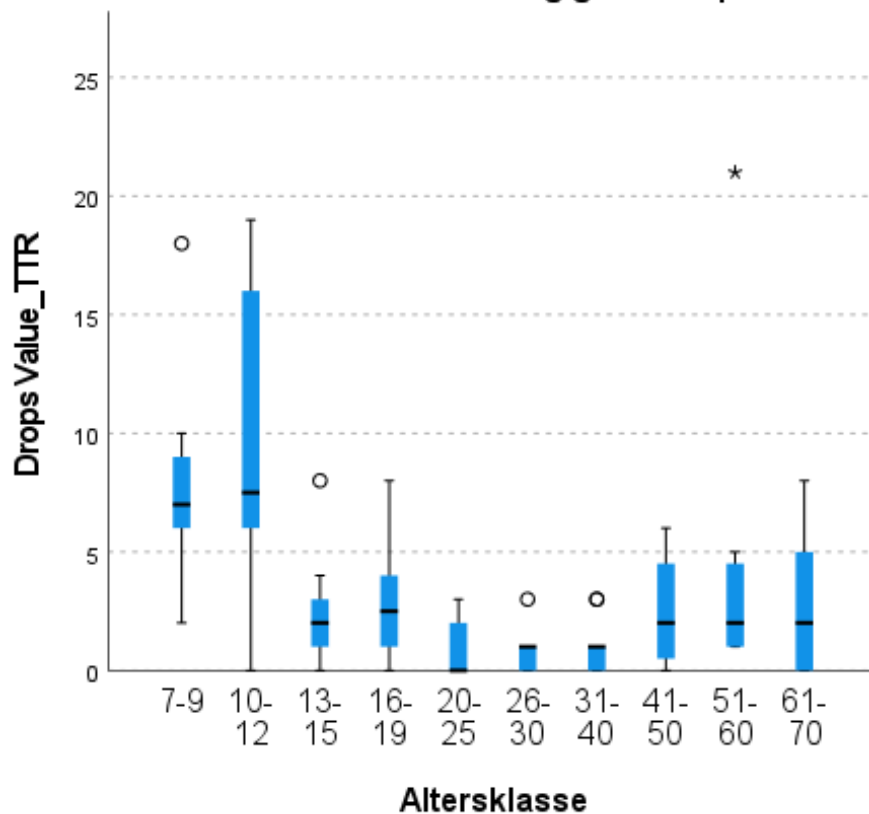
**Tabelle 16 :** Mittelwert, Standardabweichung, Variationskoeffizient und Medianwert der verschiedenen Altersstufen bezogen auf die Values der Übung TTR (eigene Darstellung)

Altersstufen	IOV				MWSR				TTCE			
	Mittelwert	SA	VK	Median	Mittelwert	SA	VK	Median	Mittelwert	SA	VK	Median
5												
6												
7 bis 9	45.08	30.87	0.68	55.04	12.96	2.28	0.18	12.36	495.61	112.76	0.23	484.00
10 bis 12	73.18	67.27	0.92	46.89	11.59	2.05	0.18	10.89	677.54	321.16	0.47	549.96
13 bis 15	14.43	10.28	0.71	12.59	10.53	1.14	0.11	11.10	327.35	288.96	0.88	250.92
16 bis 19	18.24	22.11	1.21	10.48	10.35	1.5	0.14	10.07	382.5	129.85	0.34	394.22
20 bis 25	17.53	17.72	1.01	13.08	9.55	1.3	0.14	9.23	339.96	129.34	0.38	292.32
26 bis 30	7.42	6.68	0.90	5.30	9.52	1.08	0.11	9.44	251.85	97.5	0.39	228.94
31 bis 40	19.86	25.05	1.26	11.13	10.46	1.44	0.14	10.10	477.72	251.3	0.53	441.93
41 bis 50	32.53	61.02	1.88	12.63	10.46	2.04	0.20	10.16	509.41	221.5	0.43	456.19
51 bis 60	51.98	52.56	1.01	52.90	11.07	1.28	0.12	11.18	629.35	246.87	0.39	627.47
61 bis 70	73.44	134.81	1.84	36.30	11.26	2.49	0.22	10.93	537.97	199.04	0.37	534.44

## Drops

Probanden zwischen 20 und 30 Jahren ließen die Nadel am wenigsten oft fallen. Die Altersstufe der Zehn- bis Zwölfjährigen erzielte die schlechtesten Ergebnisse. Die Tendenzen beim Kruskal-Wallis Test sind in Abbildung 29 graphisch verdeutlicht: Bei den Teilnehmern im Alter zwischen 20 und 40 Jahren ergaben sich ähnlich gute Ergebnisse. Etwas schlechtere Ergebnisse erzielten die Probanden im Alter zwischen 13 und 19 Jahren sowie die Probanden im Alter zwischen 41 und 70. Das Schlusslicht bildeten die jüngsten Probanden zwischen 7 und 12 Jahren. Beim paarweisen Vergleich waren die Probanden zwischen 20 und 40 Jahren den Sieben- bis Neunjährigen sowie den Zehn- bis Zwölfjährigen leistungsmäßig signifikant überlegen

### Kruskal-Wallis-Test bei unabhängigen Stichproben



**Abbildung 29** : Kruskal-Wallis-Test TTR\_Drops, niedriger Wert bedeutet bessere Performance (eigene Darstellung)

**Tabelle 17** : signifikante Unterschiede beim paarweisen Vergleich der Altersstufen untereinander, inklusive Effektstärke TTR\_Drops (eigene Darstellung)

Drops		
Altersgruppen	P-Wert	Effektstärke
20-25/10-12	0.002	0.94
20-25/7-9	0.001	0.99
26-30/10-12	0.003	0.92
26-30/7-9	0.002	0.97
31-40/10-12	0.014	0.83
31-40/7-9	0.008	0.88

## Economy of motion

Die besten Ergebnisse bezogen auf den Mittelwert und den Medianwert erzielten die 26- bis 30-Jährigen. Die Zehn- bis Zwölfjährigen schnitten am schlechtesten ab. Der Kruskal-Wallis Test zeigte folgende Tendenzen: Die 26- bis 30-Jährigen erzielten die besten Ergebnisse, gefolgt von den 13- bis 15-Jährigen und den 20- bis 25-Jährigen, die ähnlich gute Ergebnisse zeigten. Etwas schlechtere Ergebnisse erreichten die 16- bis 19-Jährigen, die 31- bis 40-Jährigen, sowie die 61- bis 70-Jährigen. Deutlich schlechtere Ergebnisse erzielten die 41- bis 50-Jährigen, gefolgt von den Sieben- bis Neunjährigen und den 51- bis 60-Jährigen. Das Schlusslicht bildeten die Zehn- bis Zwölfjährigen. Beim paarweisen Vergleich waren die 13- bis 15-Jährigen und alle Probanden zwischen 20 und 30 Jahren den Zehn- bis Zwölfjährigen signifikant überlegen. Weiterhin erzielten die 26- bis 30-Jährigen signifikant bessere Ergebnisse als die Sieben- bis Neunjährigen und die 51- bis 60-Jährigen.

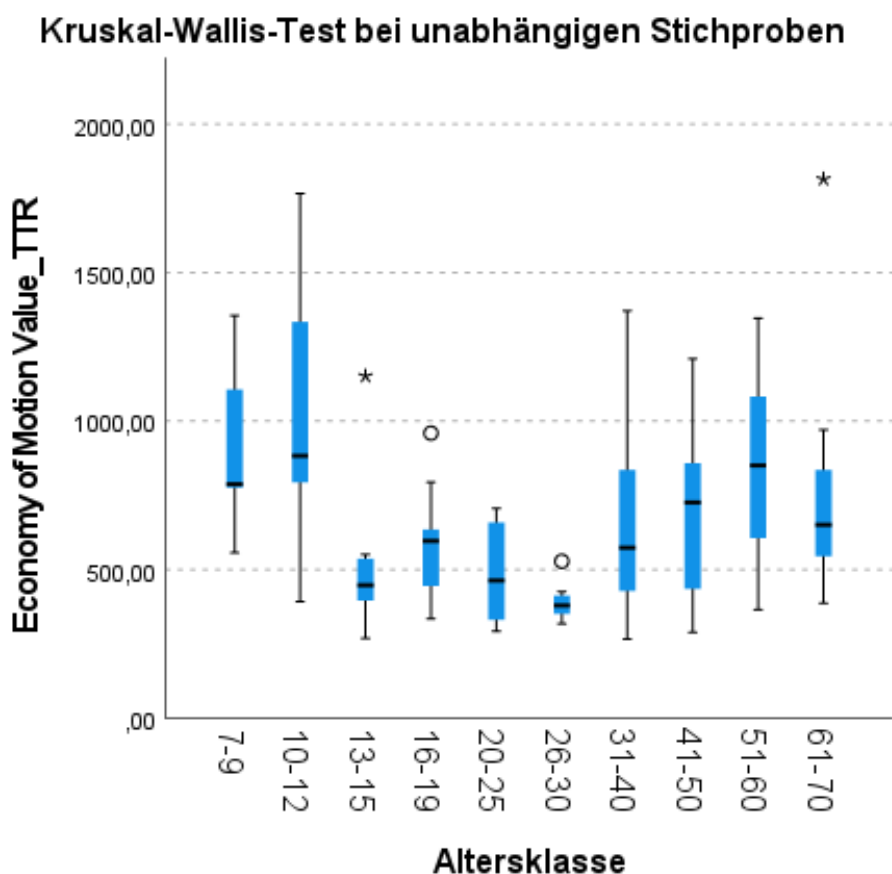


Abbildung 30 : Kruskal-Wallis-Test TTR\_EOM, niedriger Wert bedeutet bessere Performance (eigene Darstellung)

**Tabelle 18** : signifikante Unterschiede beim paarweisen Vergleich der Altersstufen untereinander, inklusive Effektstärke TTR\_EOM (eigene Darstellung)

Economy of Motion		
Altersgruppen	P-Wert	Effektstärke
26-30/51-60	0.021	0.78
26-30/7-9	0.004	0.92
26-30/10-12	0.001	0.99
13-15/10-12	0.045	0.76
20-25/10-12	0.048	0.76

### **Excessive Instrument Force**

Die besten Ergebnisse zeigte die Altersstufe der 26- bis 30-Jährigen. Am schlechtesten schnitten die Zehn- bis Zwölfjährigen ab. Bezogen auf den Medianwert erzielten die Sieben- bis Neunjährigen die schlechtesten Ergebnisse. Beim Kruskal-Wallis-Test ließen sich folgende Tendenzen darstellen: Die Probanden im Alter zwischen 13 und 30 Jahren erzielten ähnlich gute Ergebnisse. Zwischen dem 31. und 70. Lebensjahr, sowie zwischen dem siebten und zwölften Lebensjahr waren etwas schlechtere Ergebnisse erreicht worden. Die 26- bis 30-Jährigen zeigten signifikant bessere Ergebnisse als Probanden im Alter von sieben bis zwölf Jahren.

### Kruskal-Wallis-Test bei unabhängigen Stichproben

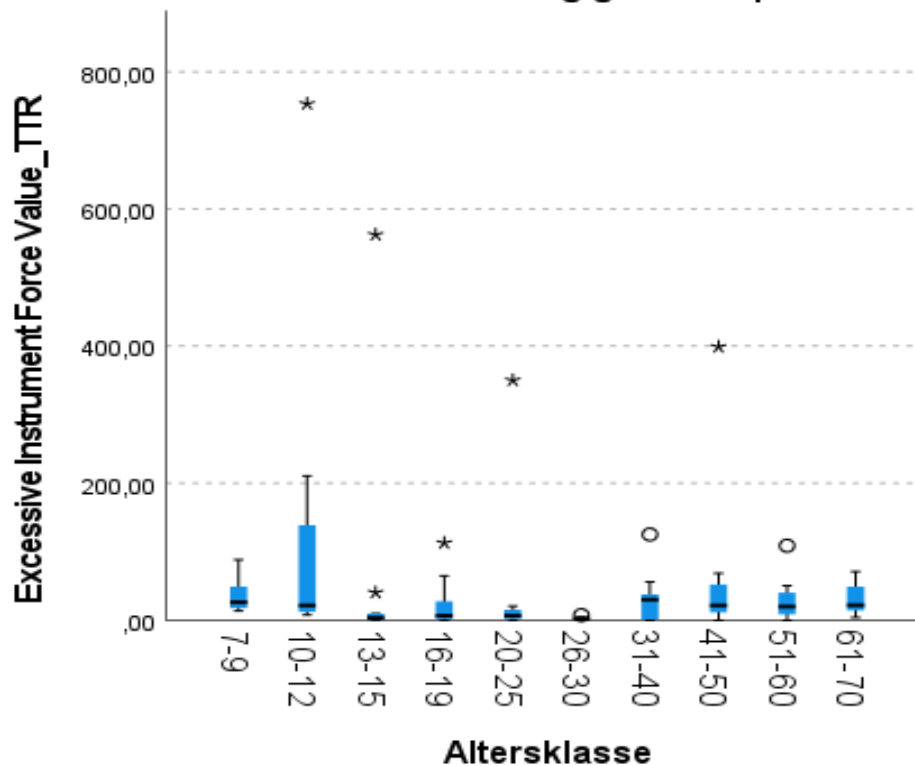


Abbildung 31 : Kruskal-Wallis-Test TTR EIF, niedriger Wert bedeutet bessere Performance (eigene Darstellung)

Tabelle 19 : signifikante Unterschiede beim paarweisen Vergleich der Altersstufen untereinander, inklusive Effektstärke TTR EIF (eigene Darstellung)

Excessive Instrument Force Value		
Altersgruppen	P-Wert	Effektstärke
26-30/7-9	0.017	0.84
26-30/10-12	0.015	0.83

### Instrument Collision

Die besten Ergebnisse erzielten die 26- bis 30-Jährigen. Die Zehn- bis Zwölfjährigen schnitten am schlechtesten ab. Bezogen auf den Kruskal-Wallis-Test ließen sich folgende Tendenzen darstellen: Die Probanden im Alter von 13 bis 30 Jahren erzielten ähnlich gute Ergebnisse. Etwas schlechtere Ergebnisse erreichten die Sieben- bis Neunjährigen sowie die 31- bis 70-Jährigen, gefolgt von den Zehn- bis Zwölfjährigen.

Beim paarweisen Vergleich aller Altersstufen untereinander zeigten sich keine signifikanten Leistungsunterschiede.

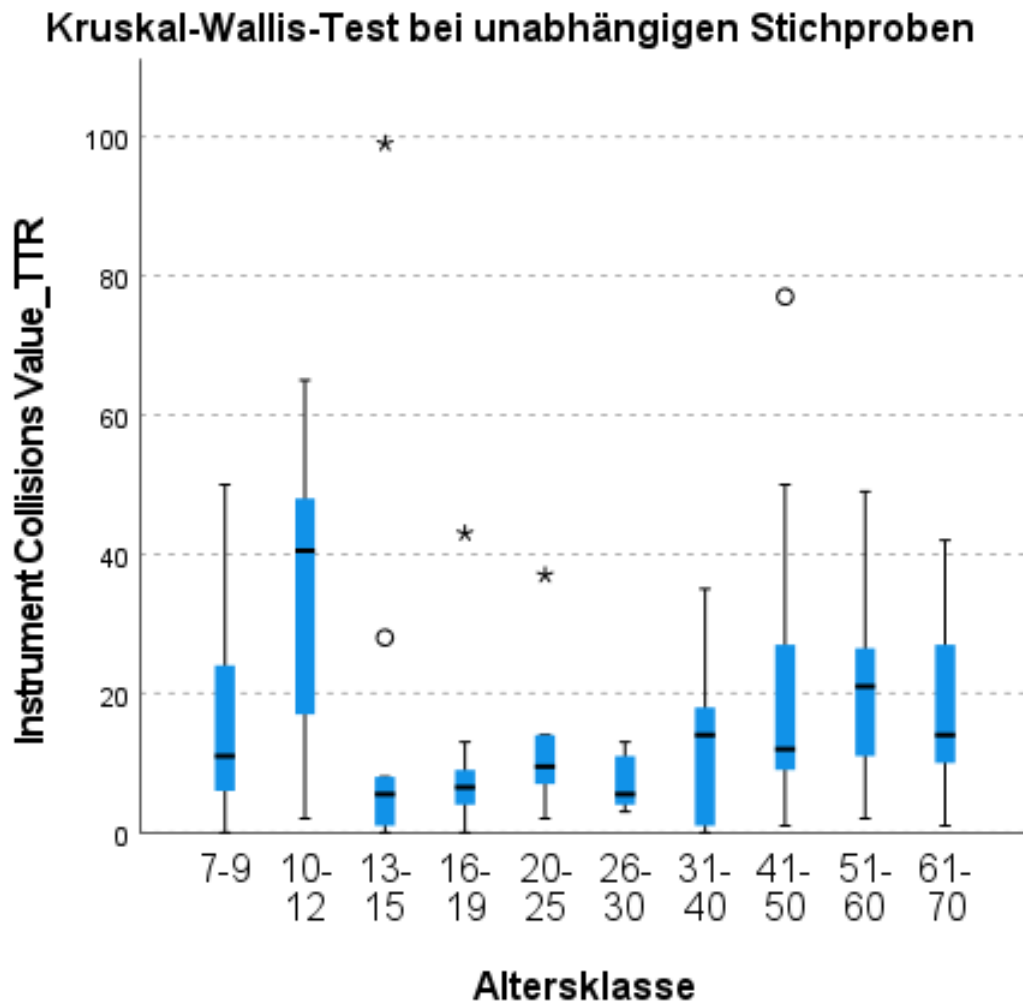
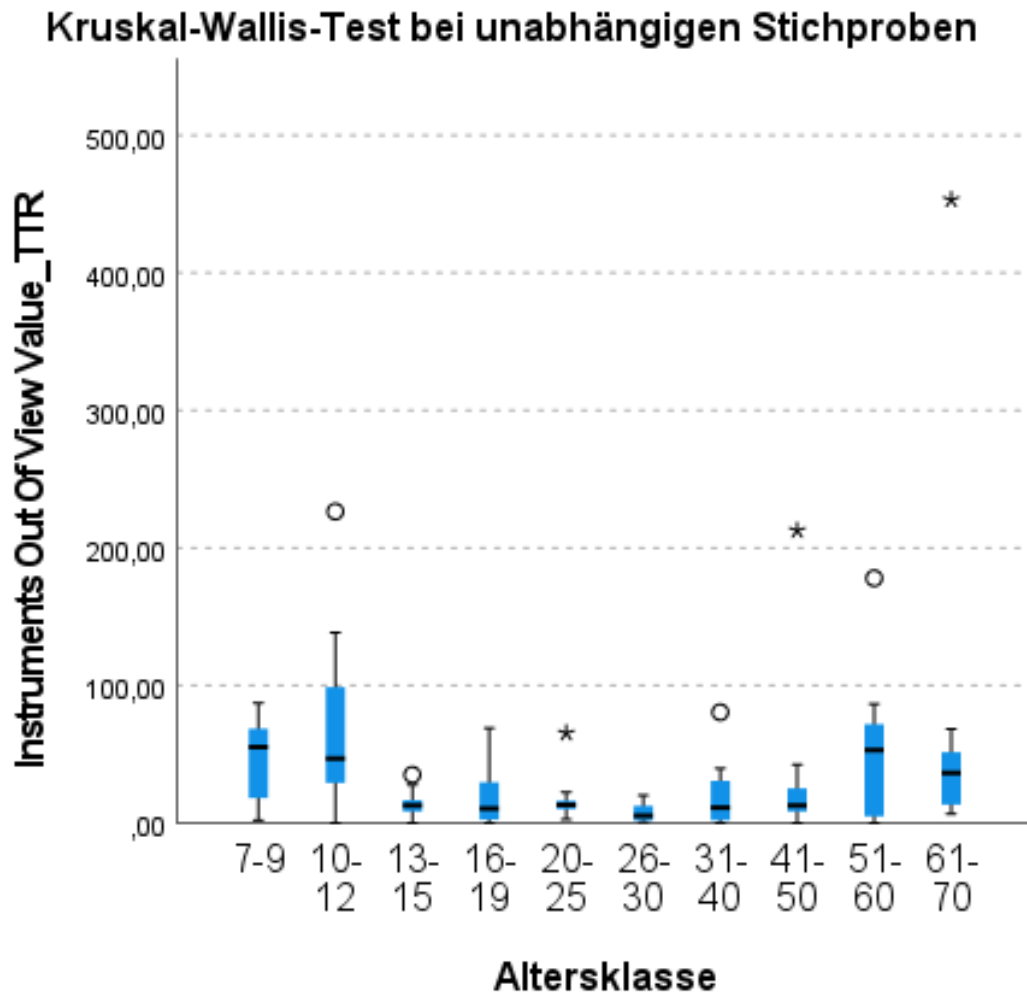


Abbildung 32 : Kruskal-Wallis-Test TTR\_IC, niedriger Wert bedeutet bessere Performance (eigene Darstellung)

### Instruments out of view

Die besten Ergebnisse erzielten die 26- bis 30-Jährigen. Bei den jüngsten Probanden im Alter von sieben bis zwölf Jahren sowie bei den ältesten Probanden zwischen dem 51.- 70. Lebensjahr waren die schlechtesten Ergebnisse zu verzeichnen. Aufgrund einiger Ausreißer bestanden leichte Diskrepanzen zwischen dem Mittel- und dem Medianwert, was in Tabelle 16 aufgezeigt wird. Der Kruskal-Wallis-Test zeigte folgende Tendenz: Die Probanden zwischen 13 und 50 Jahren zeigten ähnlich gute

Ergebnisse. Im Alter zwischen 7 und 12 Jahren und 51 und 70 Jahren waren schlechtere Ergebnisse zu verzeichnen. Die 26- bis 30-Jährigen erreichten signifikant bessere Ergebnisse als die Zehn- bis Zwölfjährigen.



**Abbildung 33** : Kruskal-Wallis-Test TTR\_IOV, niedriger Wert bedeutet bessere Performance (eigene Darstellung)

**Tabelle 20** : signifikante Unterschiede beim paarweisen Vergleich der Altersstufen untereinander, inklusive Effektstärke TTR\_IOV (eigene Darstellung)

Instruments Out of View Value		
Altersgruppen	P-Wert	Effektstärke
26-30/10-12	0.03	0.78

## Master Workspace Range

Die besten Ergebnisse erzielten die 26-bis 30-Jährigen, dicht gefolgt von den 20- bis 25-Jährigen. Die Gruppe der Sieben- bis Neunjährigen schnitten am schlechtesten ab. Bezogen auf den Kruskal-Wallis-Test lassen sich folgende Tendenzen darstellen: Die Probanden im Alter von 20 bis 30 Jahren zeigten die besten Ergebnisse. Die Altersgruppe der 16- bis 19-Jährigen, sowie die Probanden im Alter zwischen 31 und 50 Jahren zeigten ähnlich gute Ergebnisse. Studienteilnehmer zwischen zehn bis 15 Jahren und 51 bis 70 Jahren erreichten etwas schlechtere Ergebnisse, gefolgt von den Sieben- bis Neunjährigen. Der paarweise Vergleich zeigte signifikant bessere Leistungen bei den Probanden zwischen 20 und 30 Jahren verglichen mit den Sieben- bis Neunjährigen.

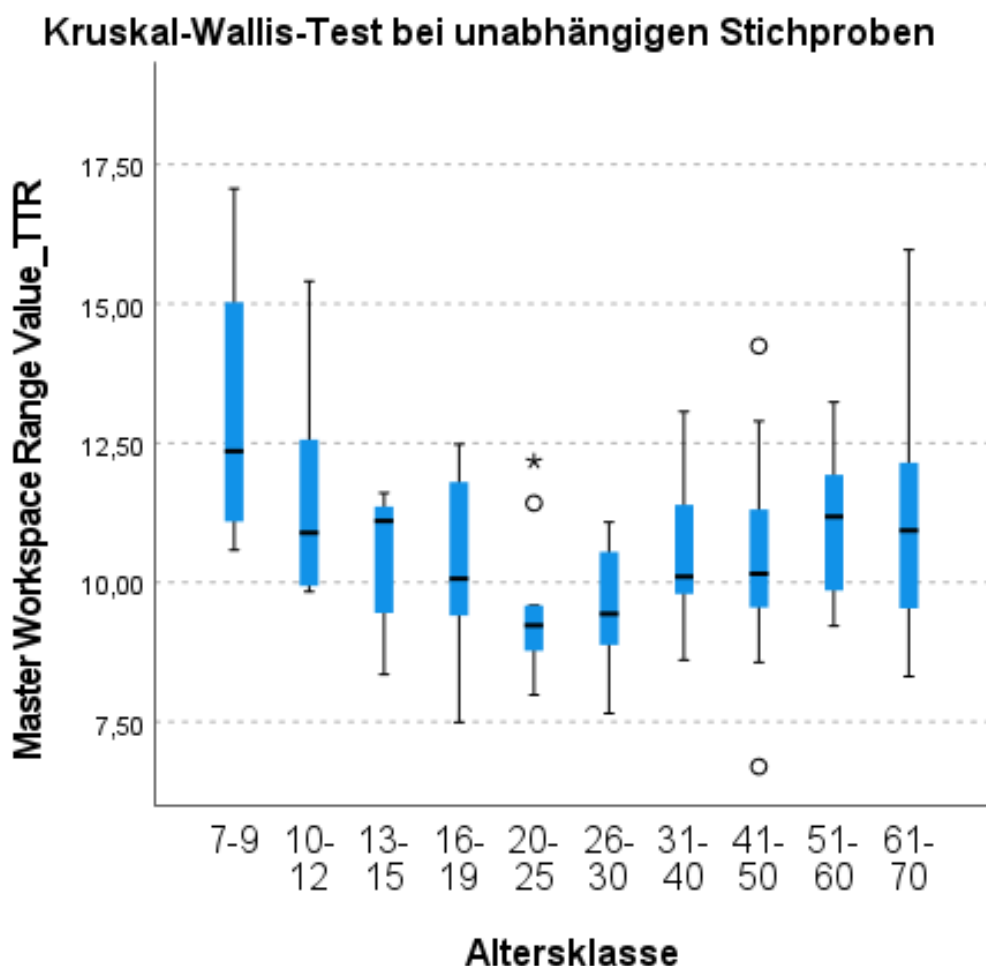


Abbildung 34 : Kruskal-Wallis-Test TTR\_MWSR, niedriger Wert bedeutet bessere Performance (eigene Darstellung)

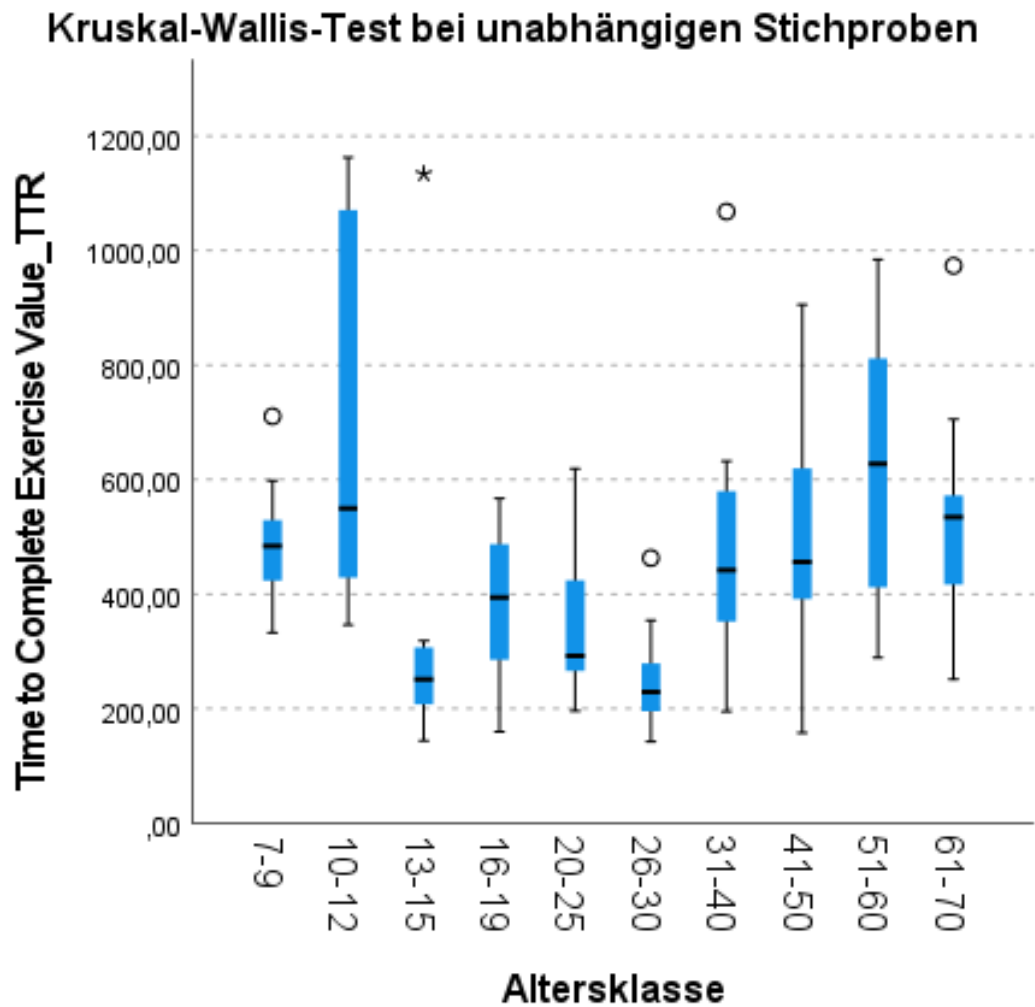


**Tabelle 21** : signifikante Unterschiede beim paarweisen Vergleich der Altersstufen untereinander, inklusive Effektstärke TTR\_MWSR (eigene Darstellung)

Master Workspace Range Value		
Altersgruppen	P-Wert	Effektstärke
20-25/7-9	0.012	0.86
26-30/7-9	0.01	0.87

### Time to complete exercise

Die besten Ergebnisse erzielte die Gruppe der 26- bis 30-Jährigen. Das Schlusslicht bildeten die Zehn- bis Zwölfjährigen sowie die 51- bis 60-Jährigen. Bezogen auf den Kruskal-Wallis-Test konnten folgenden Tendenzen festgestellt werden: Die 26- bis 30-Jährigen und die 13-bis 15-Jährigen erzielten ähnlich gute Ergebnisse. Etwas schlechtere Ergebnisse erzielten die 20- bis 25-Jährigen, gefolgt von folgenden Altersgruppen: der 16- bis 19-Jährigen, der Probanden im Alter von 31 bis 50 Jahren sowie den Sieben- bis Neunjährigen. Die 61- bis 70-Jährigen und die Zehn- bis Zwölfjährigen erzielten etwas schlechtere Ergebnisse. Am schlechtesten schnitt die Altersgruppe der 51- bis 60-Jährigen ab. Sowohl die Gruppe der 13- bis 15-Jährigen als auch die der 26- bis 30-Jährigen zeigten signifikant bessere Ergebnisse verglichen mit den Zehn- bis Zwölfjährigen und den 51- bis 60-Jährigen. Der paarweise Vergleich aller anderen Altersstufen untereinander zeigte keine weiteren signifikanten Leistungsunterschiede.



**Abbildung 35** : Kruskal-Wallis-Test TTR\_TTCE, niedriger Wert bedeutet bessere Performance (eigene Darstellung)

**Tabelle 22** : signifikante Unterschiede beim paarweisen Vergleich der Altersstufen untereinander, inklusive Effektstärke TTR\_TTCE (eigene Darstellung)

Time to complete exercise		
Altersgruppen	P-Wert	Effektstärke
13-15/51-60	0.026	0.77
13-15/10-12	0.025	0.8
26-30/51-60	0.004	0.88
26-30/10-12	0.004	0.9

---

## 5 Diskussion

Die vorliegende Arbeit ist die erste Studie, die die Performance von roboterchirurgischen Skills außerhalb von Lernprozessen und bezogen auf verschiedene Altersstufen in einer großen Stichprobe evaluiert.

### 5.1 Interpretation der Ergebnisse und Vergleich mit bestehender Literatur

Die aktuelle Literatur beschäftigt sich aufgrund des ständig wachsenden Einflusses der Digitalisierung mit der Thematik eines standardisierten Ausbildungsprogramms innerhalb des Studiums für Humanmedizin, welches angehende Chirurgen adäquat auf ihre zukünftige Tätigkeit vorbereiten könnte. Da zum Tätigkeitsgebiet der Chirurgen zunehmend nicht nur die offene Chirurgie, sondern ebenfalls die minimalinvasive Chirurgie und robotergestützte Chirurgie gehört, ist es umso wichtiger die künftigen Chirurgen mit Hilfe von validierten Simulationsrobotern auf diese Aufgaben vorzubereiten, um die Patientensicherheit zu gewährleisten. Allerdings basieren die meisten Studien auf dem Prinzip von Lernkurven. Die rein natürliche operative Performance bleibt dabei unberücksichtigt. Die Fragestellung nach dem Einfluss des Alters auf die natürliche operative Performance sowie die Frage nach dem idealen Zeitpunkt für den Beginn eines solchen Curriculums und der rechtzeitigen Förderung der angehenden Chirurgen aufgrund der bereits vorhandenen natürlichen Performance ist bis dato noch nicht Teil der Forschung gewesen. Somit soll diese Forschungslücke im Rahmen der vorliegenden Dissertation geschlossen werden.

In der vorliegenden Arbeit wurden die Probanden anhand des Mimic dV-Trainers® getestet. Dieser wurde in einer Studie von Kenney et al (12) als geeignetes Instrument bezüglich Inhalts-, Konstruktions- und Oberflächengültigkeit eingestuft. Somit stellt er ein nützliches Mittel für das Training und die Bewertung in der Roboterchirurgie dar. Die in Abschnitt 2.1 beschriebene Studie von Kuhn et al bestätigt die hohe Akzeptanz der Medizinstudenten bezüglich der Einführung eines solchen standardisierten Ausbildungsprogramms bereits innerhalb des Studiums.

Zur Beantwortung der in Abschnitt 1.2 aufgeführten Fragestellung stellten die Probanden in der vorliegenden Dissertationsarbeit einen Bevölkerungsquerschnitt unter Berücksichtigung verschiedener Einflusskriterien dar, wobei neben dem Alter und Geschlecht die Unerfahrenheit in der Nutzung des Trainingssystems als wichtiges Kriterium galt. Im Vergleich dazu beschäftigten sich Moglia et al. im Jahre 2014 mit

---

der Thematik, ob die angeborenen Eigenschaften wie manipulative und psychomotorische Fähigkeiten, die essenziell für das erfolgreiche Ausüben des Berufes eines Chirurgen sind, in der Population der Medizinstudenten normal verteilt sind. Dazu wurden Studenten mit einem Durchschnittsalter von 23 Jahren als Probanden aufgestellt, die mehrere Übungen am Da-Vinci-Skills-Simulator absolvierten. Die Probanden durften, wie in der vorliegenden Dissertationsarbeit, im Vorfeld keinerlei Vorerfahrung mit Simulationsrobotern haben, um die angeborenen Fähigkeiten testen zu können. Im Gegensatz zur vorliegenden Studie wurde daher auf das Abspielen des Demovideos vor jeder Übung verzichtet und lediglich mündliche Erklärungen gegeben. Weiterhin wurden in dieser Studie sechs von 26 Übungen ausgesucht, die laut chirurgischen Experten besonders geeignet sind, die angeborene Geschicklichkeit, die manipulativen und psychomotorischen Fähigkeiten zu bewerten. Zwei dieser Übungen waren mit den Übungen der vorliegenden Studienarbeit identisch (BCT und TTR). Die Autoren konnten zwar 3 Gruppen von Studenten identifizieren, die entweder eine durchschnittliche, eine überdurchschnittliche oder eine unterdurchschnittliche Begabung für chirurgische und handwerkliche Fähigkeiten hatten, jedoch wurde nicht berücksichtigt in welchem Alter diese Fähigkeiten bereits so ausgeprägt sind, dass sie sinnvoll durch ein Simulationstraining gefördert werden könnten. Weiterhin wurden keine Altersstufen untersucht, sondern bei den Probanden handelte es sich um eine sehr homogene Gruppe von Medizinstudenten mit oben genanntem Durchschnittsalter.

Eine weitere Studie von Mogli et al. aus dem Jahr 2018 bearbeitete die Fragestellung, ob man mit einem Test an Simulationsrobotern in der Lage ist die angeborenen psychomotorischen und manipulativen Fähigkeiten, bei Medizinstudenten zu identifizieren, um diejenigen Studenten herauszufinden, die besonders gut in der Lage sind, chirurgische Fertigkeiten effizient und schnell zu erlernen. Dies könnte dazu dienen geeignete Auswahlkriterien zu entwickeln, um begabte beziehungsweise unbegabte Studenten schon während des Studiums identifizieren zu können. Es wurden ebenfalls Medizinstudenten mit einem Durchschnittsalter von 23,4 Jahren ausgewählt, die noch keinen Kontakt mit robotergestützter Chirurgie hatten und 5 Übungen am Mimic dV-Trainer® durchführten. Wie auch in der vorliegenden Dissertationsarbeit wurden den Probanden zu Beginn jeder Übung das Demovideo gezeigt, allerdings wurden sie zusätzlich auf vermeidbare Fehler hingewiesen. Weiterhin mussten die Probanden 2-mal erfolgreich jede Übung absolvieren, bevor zur nächsten Übung überge-

---

gangen werden konnte. Somit kann man davon ausgehen, dass bereits ein Lerneffekt und eine gewisse Lernkurve geschaffen wurde. Um jedoch das Ausgangsniveau zu erfassen, wurden jeweils die ersten Versuche jeder Übung im Nachhinein ausgewertet, wobei man feststellte, dass die besonders begabten Studenten in 4 von 5 Übungen signifikant bessere Ergebnisse zeigten als der Rest. Diese Studie befasste sich zwar mit der natürlichen Performance und den angeborenen Fähigkeiten der Probanden, allerdings lag das Durchschnittsalter der homogenen Probandengruppe, nur bestehend aus Medizinstudenten, bei 23,4 Jahren und somit wurde auch hier die Fragestellung in welchem Alter die beste natürliche Performance vorliegt und dementsprechend durch regelmäßiges Training gefördert werden kann, nicht bearbeitet.

Die vorliegende Dissertationsarbeit untersucht die rein natürliche operative Performance der Probanden außerhalb von Lernprozessen. Im Vergleich dazu befasst sich die in Abschnitt 2.1 vorgestellte Studie von Meier et al. jedoch mit der Fragestellung, ob die Lernkurve des Simulatortrainings von Faktoren wie dem Alter oder der Vorerfahrung abhängt. Es wurde herausgefunden, dass die Leistung von jungen Novizen, laparoskopisch erfahrene Chirurgen und da Vinci Tischassistenten schlechter war als die der Expertengruppe, jedoch erzielten sie bei allen Übungen bessere Ergebnisse als beispielsweise die älteren Novizen. Vergleicht man die Leistung von älteren und jüngeren Novizen, so erkannte man zum einen, dass alle jungen Novizen das Expertenniveau erreichten, wohingegen dies nicht bei allen älteren Novizen der Fall war. Zweitens stellte man fest, dass sowohl die jungen als auch die älteren Novizen bei der Analyse der Durchschnittswerte mit relativ niedriger Punktzahl starteten und sich mit zunehmender Übung verbesserten. Es zeigte sich eine Tendenz, dass diese Verbesserung bei den jungen Novizen steiler ausfiel als bei den älteren, jedoch ohne statistische Signifikanz (15). Somit ist davon auszugehen, dass die Leistung und die Lernfähigkeit im Alter abzunehmen scheinen. Diese Tatsache kann durch die motorische Onkogenese gestützt werden. Ist ab dem 50. Lebensjahr der Neuerwerb psychomotorischer Fähigkeiten im Berufsleben notwendig, so treten bei Menschen in diesem Lebensabschnitt verstärkte Schwierigkeiten auf. Die motorische Lernfähigkeit ist im Vergleich zu jüngeren Menschen deutlich reduziert ist (9). Dementsprechend erscheint es sinnvoll ein effektives Simulationstraining bereits im jüngeren Alter anzubieten, da hier die Lernfähigkeit für den Neuerwerb spezifischer Techniken deutlich effizienter ist. Zusammenfassend kamen die Autoren zu dem Ergebnis, dass die Leistung zwar vom Alter und der Vorerfahrung abhängig ist, jedoch wird die Lernkur-

---

ve durch diese Faktoren nicht signifikant beeinflusst. Somit stellt das Simulationstraining für alle, die robotergestützte Eingriffe erlernen wollen ein nützliches Übungsinstrument dar (15). Die Fragestellung der vorliegenden Dissertationsarbeit, ob das Alter eines Probanden einen Einfluss auf die natürliche operative Performance hat, konnte somit nach Meier et al. nicht beantwortet werden, da sich die Studie auf den Lerneffekt und die Lernkurve konzentrierte.

Bei der Ergebnisbetrachtung dieser Studienarbeit fällt auf, dass bei der Übung Thread the Rings (TTR) in allen Values die Probanden im Alter von 20 bis 30 Jahren die besten Ergebnisse erzielten. Bei dem Value Instrument Collision erreichen neben den 26- bis 30-Jährigen ebenso die 13- bis 15-Jährigen die besten Ergebnisse. In der in Abschnitt 2.2 beschriebenen motorischen Ontogenese des Menschen wird der Zeitraum des frühen Erwachsenenalters (20.- 30. Lebensjahr) als die Phase der vollständigen Ausprägung der Motorik bezeichnet. Zweckmäßigkeit und Ökonomie sowie Präzision und Fein- und Grobmotorik zeigen hier die höchste Ausprägung.(9) Im Bereich der Kognition stellte man fest, dass die Verarbeitungsgeschwindigkeit und die Gedächtnisleistung ebenfalls zwischen dem 20. und dem 30. Lebensjahr deutlich zunimmt und ab dem 35. Lebensjahr bereits wieder leicht absinkt.(28). In Zusammenschau der aufgeführten Literatur und den Ergebnissen der vorliegenden Dissertationsarbeit kann davon ausgegangen werden, dass die natürliche Performance im Alter zwischen 20 und 30 Jahren am besten ausgereift ist und hier der Zeitpunkt für eine optimale Förderung nicht überschritten werden sollte. Demnach ist ein entsprechendes chirurgisches Curriculum, welches die robotergestützte Chirurgie beinhaltet, dringend in den chirurgischen Lehrplan des Humanmedizinstudiums zu integrieren.

Bei allen Values der Übung Thread the Rings, ausgenommen Time to complete Exercise schnitten die Probanden im Alter von sieben bis zwölf Jahren tendenziell am schlechtesten ab. Wie in Abschnitt 2.2 aufgeführt, ist in dieser Altersspanne sowohl die motorische als auch die koordinative Lernfähigkeit noch im Prozess (20). Im kognitiven Bereich bildet sich in dieser Altersspanne eine bewusste Bewegungsregulation durch das Zusammenspiel von Bewegungserfahrung, Bewegungswahrnehmung und dem motorischen Gedächtnis noch aus (9). Beim Value Time to complete Exercise erzielten die Probanden im Alter von 51 bis 60 Jahren die schlechtesten Ergebnisse. Generell kommt die vorliegende Studie zu dem Ergebnis, dass in allen drei Übungen (PP, BCT, TTR) die älteren Probanden tendenziell mehr Zeit (Time to complete Exercise) benötigen, um die jeweilige Übung zu beenden als jüngere Pro-

---

banden. Dies könnte damit in Zusammenhang stehen, dass, wie in der Literaturdiskussion beschrieben, in der Altersspanne des späten Erwachsenenalters der Neuerwerb motorischer Fertigkeiten schon deutlich erschwert und die Lernfähigkeit im Vergleich zu jüngeren Probanden erheblich reduziert ist (9). Das Erlernen neuer Sachverhalte ist im Alter nicht unmöglich, jedoch wird mehr Zeit benötigt (31). Ebenso nimmt die Schnelligkeit und die Präzision in der Feinmotorik bereits ab dem 45. Lebensjahr deutlich ab und auch der Rückgang der Genauigkeit ist im Alter zu verzeichnen (21). Bezüglich der Values Economy of Motion und Master Workspace Range, die die Qualität und die Effizienz einer Übung bewerten, zeigen sich bei der Übung Pick and Place bei Economy of Motion, bei der Übung Basic Camera Targeting bei Economy of Motion und bei der Übung Thread the Rings bei Economy of Motion sowie bei Master Workspace Range tendenziell schlechtere Ergebnisse im Alter verglichen mit der Altersstufe der 20- bis 30-Jährigen, jedoch ohne signifikante Leistungsunterschiede.

Ein weiterer Punkt für die Leistungsminderung im Alter könnte, durch die in Abschnitt 2.3 beschriebene Studie von Compton begründet sein. Dieser stellte fest, dass die Auffassungsgeschwindigkeit, die schnelle mentale Zu- und Einordnung von Informationen und die daraus folgende Entscheidungsfindung bei älteren Menschen deutlich verlangsamt sind (29). All diese Faktoren könnten mit der Leistungsminderung im Alter, die in den meisten Values zu beobachten ist, zusammenhängen.

Bei der Übung Thread the Rings sollte darüber hinaus darauf hingewiesen werden, dass es die letzte und auch schwierigste Übung des Curriculums war. Alle Probanden im Alter von fünf und sechs Jahren konnten aufgrund von Konzentrationsschwierigkeiten die Übung gar nicht erst beginnen oder brachen sie nach kurzer Zeit ab. Hier ist zu diskutieren, ob die Übung, wenn sie an erster Stelle des Curriculums gesetzt worden wäre, auch von den Fünf- und Sechsjährigen hätte erfolgreich absolviert werden können.

Bei Pick and Place ist bei Time to complete Exercise, Master Workspace Range, Drops und Instrument Collision eine ähnliche Tendenz wie bei Thread the Rings zu verzeichnen: Die Altersgruppe der 20- bis 30-Jährigen erzielte auch in diesen Values die besten Ergebnisse. Bei Excessive Instrument Force und Instruments out of View schnitten die Altersklassen der Fünf- und Sechsjährigen am schlechtesten ab, alle anderen Altersstufen erreichten annähernd ähnlich gute Ergebnisse. Bei Excessive

---

Instrument Force und Instrument Collision sind beim paarweisen Vergleich der Altersstufen untereinander zwar keine signifikanten Leistungsunterschiede festzustellen, jedoch ist die Tendenz einer schlechteren natürlichen Performance bei Kindern deutlich zu erkennen. Auch in den restlichen Values (Drops, Economy of Motion, Instrument out of View, Master Workspace Range und Time to complete Exercise) erzielten die Kinder im Alter von fünf bis neun Jahren die schlechtesten Ergebnisse. Dies könnte daran liegen, dass sich erst ab dem vierten Lebensjahr die Feinmotorik der Finger entwickelt (59). Des Weiteren sind die körperbaulichen Voraussetzungen für die Bedienung des Mimic dV-Trainers® im Alter der Fünf- und Sechsjährigen in der Regel noch nicht optimal, sodass es beispielsweise aufgrund der geringen Körpergröße höhere Anstrengung erforderte, die Fußpedale zu bedienen, wodurch mehr Zeit benötigt wurde, die Aufgaben zu lösen, was sich sowohl bei der Übung Pick and Place als auch bei der Übung Basic Camera Targeting im Value Time to Complete Exercise widerspiegelt. Hier benötigten Fünfjährige beziehungsweise Sechsjährige die meiste Zeit. Bezogen auf den paarweisen Vergleich aller Altersstufen untereinander an, fällt auf, dass bei einigen Values (Excessive Instrument Force, Instrument Collision, Master Workspace Range) keine signifikanten Leistungsunterschiede vorherrschen. Bei den Values Economy of Motion, Instrument out of View, Time to complete Exercise sind signifikante Leistungsunterschiede nur zwischen den Fünfjährigen bzw. Sechsjährigen und den älteren Altersstufen, ausgenommen der 61- bis 70-Jährigen zu verzeichnen. Dies könnte darauf hinweisen, dass das Schwierigkeitsniveau der ausgewählten Übung zu niedrig war.

Bei Basic Camera Targeting zeigen sich bei Economy of Motion und Time to complete Exercise erneut ähnliche Tendenzen wie bei Pick and Place und bei Thread the Rings. Hier erzielt die Altersgruppe der 20- bis 25-Jährigen die besten Ergebnisse. Bei dem Value Excessive Instrument Force sind sogar alle Probanden leistungsmäßig auf demselben Niveau. Bei Instrument Collision und Instrument out of View erzielen die Probanden zwischen 13 und 70 Jahren gleich gute Ergebnisse. Die jüngsten Probanden zwischen fünf und zwölf Jahren erzielen in allen Values, ausgenommen Excessive Instrument Force, die schlechtesten Ergebnisse. Eine Ausnahme bildet das Value Master Workspace Range. Hierbei erzielen zwar die Gruppe der Sechsjährigen die schlechtesten Ergebnisse, allerdings fällt auf, dass die ältesten Probanden (61 bis 70 Jahre) die beste Leistung erbringen. Da die Metrik Master Workspace Range auf Qualität und Effizienz abzielt, könnte man annehmen, dass sich diese



---

Qualitäten im Laufe des Lebens steigern, allerdings stellen bei Thread the Rings und Pick and Place bezogen auf Master Workspace Range erneut die 20- bis 25-Jährigen die Probanden mit den besten Ergebnissen diesbezüglich dar. Ein wichtiger Punkt dahingehend könnte sein, dass es innerhalb des Alterungsprozesses starke individuelle Unterschiede gibt, die auch mit der individuellen Lebensweise des einzelnen Probanden zusammenhängen könnte. So kann nach Hertzog et al. ein kognitiv angereicherter sowie ein körperlich aktiver Lebensstil die intellektuelle Entwicklung beeinflussen und den kognitiven Abbau im späten Erwachsenenalter und im hohen Alter abschwächen (48). Auf diese Frage nach dem bislang geführten Lebensstil sind wir im Rahmen dieser Studie nicht näher eingegangen.

Bei Basic Camera Targeting sind in einigen Werten (Excessive Instrument Force, Instrument Collision und Instrument out of View) keine signifikanten Leistungsunterschiede beim paarweisen Vergleich der Altersstufen untereinander nachweisbar. Bei Master Workspace Range und Time to complete Exercise sind erneut signifikante Leistungsunterschiede zwischen den Fünf- und Sechsjährigen und den älteren Altersklassen zu verzeichnen. Bei Economy of Motion erkennt man eine ähnliche Tendenz. Dies könnte ebenfalls damit zusammenhängen, dass das Schwierigkeitsniveau dieser Übung zu gering ist, um innerhalb der Erwachsenengruppe signifikante Leistungsunterschiede festzustellen.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass das Alter einen Einfluss auf die natürliche Performance am Mimic dV-Trainer® zu haben scheint. Die Altersgruppen mit den durchschnittlich besten Ergebnissen bei allen Übungen stellten die Probanden im Alter zwischen 20 und 30 Jahren dar. Somit kann durch die Ergebnisse der vorliegenden Studie darauf hingewiesen werden, dass der Beginn und die Implementierung eines entsprechenden Trainings bezüglich „chirurgisch“ vermittelter digitaler Kompetenzen in den Lehrplan des Humanmedizinstudiums dringend notwendig ist, um chirurgisch interessierte Studenten so frühzeitig wie möglich zu fördern und auf ihr späteres Berufsleben vorzubereiten. Es erscheint somit nicht sinnvoll, roboterassistierte chirurgische Übungen erst in einer späteren Zeit der Weiterbildung zu vermitteln, sondern bereits im Medizinstudium und in der frühen Weiterbildungsphase. Die Altersspanne zwischen dem 20. und 30. Lebensjahr stellt sowohl motorisch als auch kognitiv die Zeit mit den besten Voraussetzungen zum Erlernen neuer Sachverhalte dar. Im Anschluss kommt es, bezogen auf die fluid mechanische Komponente der Intelligenz, die vor allem die Verarbeitungsgeschwindigkeit beinhaltet als

---

auch bezogen auf die Psychomotorik zu einem Abfall der Leistungsfähigkeit. (21) Wird ein solches Training nicht bereits innerhalb des Studiums angeboten, sondern kommen die jungen Ärzte erst während ihrer Facharztausbildung in Kontakt mit robotergestützter Chirurgie, so könnte der ideale Zeitpunkt zur Förderung der chirurgischen Kompetenzen bereits überschritten sein. Auch die enorme Geschwindigkeit des digitalen Veränderungsprozesses legt nahe, Studenten so früh wie möglich innerhalb des Studiums dahingehend zu fördern und digitale Kompetenzen im Bereich der Robotik regelhaft in einem entsprechenden Curriculum zu vermitteln.

In der oben beschriebenen Studie von Cuschieri et al (7) wurde herausgefunden, dass die angeborene Geschicklichkeit, die unter anderem durch räumliche Wahrnehmung, die Hand-Augen-Koordination, das Zielen sowie die Koordination mehrerer Gliedmaßen beeinflusst wird, die wichtigste Eigenschaft für das effiziente Erlernen einer chirurgischen Tätigkeit ist.

Nach Umfrageergebnissen verfügen jedoch lediglich 35 % der befragten chirurgischen Kliniken (zumeist Universitätskliniken und Lehrkrankenhäuser) über ein Simulatorsystem zur VR-Simulation. Weiterhin ist ein regelhaftes Simulationstraining bei der Mehrheit der Befragten nicht Bestandteil der chirurgischen Facharztweiterbildung ist. Ebenso stellen standardisierte Schulungen und strukturierte Trainingszeiten eine Ausnahme sowohl im Studium als auch in der ärztlichen Weiterbildung dar. (60) Gründe hierfür sind unter anderem die hohen Anschaffungs- und Instandhaltungskosten der VR-Simulatoren sowie die hohen Personalkosten zur Ausbildung und fachlichen Begleitung angehender Chirurgen (61) (60). Um ein einheitliches und bundesweites Curriculum in den Lehrplan des Studiums der Humanmedizin einzuführen, wäre demnach zuerst die Finanzierungsfrage und die Aufrüstung der Universitäten mit VR-Simulatoren zu klären.

Der Beruf des Arztes gehört nach S.Veen (21), wie in der Literaturdiskussion beschrieben zum altersbeförderten Berufstyp, dessen wichtigste Eigenschaft das Humankapital sowie die Lebens- und Arbeitserfahrung darstellt. Dieser Berufstyp erfährt seine maximale Leistungsfähigkeit zwischen dem 45. und 70. Lebensjahr (21). Dies bedeutet, dass trotz nachlassender physischer Leistungsfähigkeit viel mit Routine und Erfahrung ausgeglichen werden kann. Allerdings ist zu beachten, dass der Beruf des Chirurgen weitestgehend auch handwerkliche Fähigkeiten erfordert. Diese handwerklichen Berufe, die zu den altersproblematischen Berufen gehören, erfordern

---

in hohem Maße feinmotorische und physische Fähigkeiten sowie die Belastung unter Zeitdruck. Sie haben ihren Leistungshöhepunkt jedoch bereits im Alter von 25 – 35 Jahren. Danach erfolgt ein allmählicher Rückgang der Leistungsfähigkeit (21). In diesem Zusammenhang lassen die Ergebnisse der vorliegenden Studienarbeit schlussfolgernd erkennen, dass die natürliche Performance am Mimic dV-Trainer® bereits ab dem 20. bis zum 30. Lebensjahr am ausgeprägtesten ist. Durch ein frühzeitigeres, gezieltes chirurgisches Training z.B. am Roboter könnte letztendlich das Erreichen einer hohen Produktivität eines Arztes früher erzielt werden. Der typische Medizinstudent in Deutschland ist zum Studienabschluss (Beginn der chirurgischen Ausbildung) im Mittel etwa 26 Lebensjahre alt, danach folgt die Facharztausbildung, d.h. für den Chirurgen die chirurgische Ausbildung. Mit Hilfe dieser Dissertation soll auf die Notwendigkeit der Implementierung eines solchen chirurgischen Trainings an Simulationsrobotern in Form eines standardisierten Curriculums innerhalb des Medizinstudiums hingewiesen werden. Auch im Sinne der Patientensicherheit sollten angehende Chirurgen bestmöglich auf ihre zukünftige Tätigkeit vorbereitet werden. Dabei ist die Geschwindigkeit von Digitalisierungsprozessen stets zu beachten und ein entsprechendes Training regelmäßig daran anzupassen.

## **5.2 Limitierungen und Ausblick**

Die Studienergebnisse haben gezeigt, dass in den meisten Übungen die Probanden im Alter zwischen 20 und 30 Jahren die besten Ergebnisse erzielten. Nichtsdestotrotz besteht eine gewisse Limitierung in der Aussagekraft dieser Ergebnisse. Innerhalb dieser Altersstufe wurden zum Großteil aus praktisch und organisatorischen Gründen Kommilitonen, die ebenfalls Medizin studieren, ausgewählt. Dies könnte zu einer Verzerrung der Ergebnisse geführt haben, da es sich nicht wie in den anderen Altersstufen um einen Querschnitt aus der Bevölkerung mit unterschiedlichen schulischen Abschlüssen, Berufen und Interessen handelte.

Weiterhin sind die Auswahl und die Reihenfolge der Übungen zu überdenken. Es fiel auf, dass bei der Übung Thread the Rings, welche die letzte und anspruchsvollste Übung innerhalb des Curriculums darstellte, die Probanden im Alter von fünf und sechs Jahren vermutlich aufgrund von Konzentrationsschwierigkeiten diese vorzeitig abbrechen oder gar nicht erst begannen. Wäre eine andere Reihenfolge gewählt

---

worden, wäre es möglich gewesen, dass auch diese Altersstufen die Übung hätten absolvieren können.

Die Ergebnisse dieser Arbeit sind größtenteils anhand objektiver und validierter Auswertungsparameter in Form des Auswertungssystems des Mimic dV-Trainers® generiert worden. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass die initiale mündliche Einführung in die Funktionsweise des Mimic dV-Trainers® bei jedem Probanden zu 100 % identisch war. Somit könnten für einzelnen Probanden Vor- beziehungsweise Nachteile entstanden sein, die eventuell Auswirkungen auf deren Leistung gehabt haben.

Die Fragestellung nach einer Altersgrenze für chirurgisches Arbeiten kann anhand unserer Studie nicht eindeutig beantwortet werden. Wie bereits in der Literaturdiskussion erwähnt, ist der Alterungsprozess auf kognitiver und motorischer Ebene sehr individuell. Aus diesem Grund erscheint es sinnvoll, die chirurgische Leistung nicht anhand des chronologischen Alters, sondern anhand des funktionellen Alters zu bestimmen. Dazu sind objektive Bewertungsstrategien erforderlich. Auch sollte der Zeitpunkt regelmäßiger Leistungsüberprüfungen älterer Chirurgen überdacht werden. Des Weiteren ist die Leistung im Alter stets verbunden mit der über das gesamte Berufsleben gesammelten Erfahrung. Da sich die vorliegende Arbeit lediglich mit der natürlichen Performance der Probanden beschäftigt und als Voraussetzung gestellt wurde, dass keinerlei Erfahrung mit robotergestützter Chirurgie im Vorfeld erlaubt war, macht es wenig Sinn, die Leistung der älteren Probanden zu bewerten und anhand dessen eine Aussage über den geeigneten Zeitpunkt einer Ausscheidung aus dem Berufsleben zu treffen. Die Arbeit könnte jedoch Anlass zur Durchführung einer neuen Studie geben, die sich mit der Leistung Roboterchirurgie-erfahrener Ärzte befasst. So könnte ein genauerer Einblick in die Leistungsfähigkeit im höheren Alter gewonnen werden.

Im Verlauf könnte die Arbeit ausschließlich auf Medizinstudenten und Ärzte erweitert werden, um den Einfluss des Alterns mit dem Hintergrund eines Medizinberufes, mit entsprechend berufsbedingten Einflüssen auf die natürliche operative Performance, gegenüber der Normalbevölkerung genauer zu untersuchen. Gleichfalls könnte der Einfluss der primären Fachrichtung unter Ärzten allgemein im Verlauf erhoben werden.

---

Weiterhin könnte anhand des initial ausgefüllten Fragebogens bezüglich Freizeitaktivitäten wie Computerspielen oder dem Spielen eines Musikinstrumentes herausgearbeitet werden, ob diese Tätigkeiten Einfluss auf die natürliche Performance haben. Dies hätte den Umfang dieser Arbeit überschritten.

---

## 6 Zusammenfassung

Ziel dieser Studienarbeit war es, die Fragestellung zu klären, welchen Einfluss das Probandenalter auf die natürliche operative Performance am Mimic dV-Trainer® hat. Ebenfalls sollte herausgefunden werden, in welchem Alter die größtmögliche Leistung an dem Robotersimulator erbracht werden kann und inwiefern das Altern die natürliche operative Performance beeinflussen kann. Die wissenschaftliche Hypothese lautete: Das Alter eines Probanden hat einen Einfluss auf die natürliche operative Performance.

Zur Beantwortung dieser Fragestellung führten 126 Probanden in fest definierten Altersstufen drei verschiedene Übungen am Mimic dV-Trainer® durch. Bereits vorhandene Erfahrung mit robotergestützter Chirurgie führte zum Ausschluss an der Studie. Mit Hilfe des automatischen Scoring-Systems des Mimic dV-Trainers® wurde die Leistung jedes einzelnen Probanden bewertet und anschließend mit den anderen Probanden verglichen.

Das Kernergebnis der vorliegenden Studienarbeit zeigt, dass das Alter einen Einfluss auf die natürliche operative Performance am Mimic dV-Trainer® hat. Die höchste natürliche Performance besteht im Allgemeinen bei Probanden in der Altersspanne zwischen dem 20. und 30. Lebensjahr. Mit diesen Studienergebnissen wird die Notwendigkeit verdeutlicht spezifische chirurgische Trainingsprogramme bereits frühzeitig und bundeseinheitlich in den Lehrplan des Humanmedizinstudiums zu integrieren. Somit würden angehende Chirurgen zu einem optimalen Zeitpunkt effizienter auf ihre zukünftige Tätigkeit im Rahmen der deutlich zunehmenden Anzahl der robotergestützten Chirurgie vorbereitet werden können.

---

## 7 Literaturverzeichnis

1. Arden, C. J.-D. (2018) Aktuelles aus Klinik und Praxis der Urologie. Heidelberg: Springer.
2. Feussner H., Wilhelm D. (März 2016). Minimally invasive surgery and robotic surgery: surgery 4.0?. Der Chirurg: 189-194.
3. Bendel, P. D. (2018) Gabler Wirtschaftslexikon - Operationsroboter [E-Book]. Wiesbaden: Springer Gabler. DOI:<https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/operationsroboter-100561/version-346084>
4. Moglia A, Morelli L, Ferrari V, Ferrari M, Mosca F, Cuschieri A. Distribution of innate psychomotor skills recognized as important for surgical specialization in unconditioned medical undergraduates. Surgical endoscopy. 2018;32(10):4087-95.
5. Mimic Technologies, Inc. (2018). Mimic. [Internet]. 2018 [zitiert am 08.06.2020] URL: <https://mimicsimulation.com/dv-trainer/>
6. Gallagher AG, Leonard G, Traynor OJ. Role and feasibility of psychomotor and dexterity testing in selection for surgical training. ANZ journal of surgery. 2009;79(3):108-13.
7. Cuschieri A, Francis N, Crosby J, Hanna GB. What do master surgeons think of surgical competence and revalidation? American journal of surgery. 2001;182(2):110-6.
8. Thomas WE. Teaching and assessing surgical competence. Annals of the Royal College of Surgeons of England. 2006;88(5):429-32.
9. Meinel K, Schnabel G. Bewegungslehre - Sportmotorik : Abriss einer Theorie der sportlichen Motorik unter pädagogischem Aspekt. 12., erg. Aufl. ed. Aachen u.a.2015.
10. Kuhn S, Huettl F, Deutsch K, Kirchgässner E, Huber T, Kneist W. [Surgical Education in the Digital Age - Virtual Reality, Augmented Reality and Robotics in the Medical School]. Zentralblatt für Chirurgie. 2021;146(1):37-43.

- 
11. Bhakhri K, Harrison-Phipps K, Harling L, Routledge T. Should Robotic Surgery Simulation Be Introduced in the Core Surgical Training Curriculum? *Frontiers in Surgery*. 2021;8(42).
  12. Kenney PA, Wszolek MF, Gould JJ, Libertino JA, Moinzadeh A. Face, content, and construct validity of dV-trainer, a novel virtual reality simulator for robotic surgery. *Urology*. 2009;73(6):1288-92.
  13. Kyaw BM, Saxena N, Posadzki P, Vseteckova J, Nikolaou CK, George PP, et al. Virtual reality for health professions education: systematic review and meta-analysis by the digital health education collaboration. *Journal of medical Internet research*. 2019;21(1):e12959.
  14. Satava RM, Stefanidis D, Levy JS, Smith R, Martin JR, Monfared S, et al. Proving the effectiveness of the fundamentals of robotic surgery (FRS) skills curriculum: a single-blinded, multispecialty, multi-institutional randomized control trial. *Annals of surgery*. 2020;272(2):384-92.
  15. Meier M, Horton K, John H. Da Vinci© Skills Simulator™: is an early selection of talented console surgeons possible? *J Robot Surg*. 2016;10(4):289-96.
  16. Moglia A, Ferrari V, Morelli L, Melfi F, Ferrari M, Mosca F, et al. Distribution of innate ability for surgery amongst medical students assessed by an advanced virtual reality surgical simulator. *Surgical endoscopy*. 2014;28(6):1830-7.
  17. Maan ZN, Maan IN, Darzi AW, Aggarwal R. Systematic review of predictors of surgical performance. *The British journal of surgery*. 2012;99(12):1610-21.
  18. Geraedts P. *Motorische Entwicklung*. Berlin: Springer Verlag; 2020.
  19. Fuchs J, Busch MA, Gößwald A, Hölling H, Kuhnert R, Scheidt-Nave C. [Physical and cognitive capabilities among persons aged 65-79 years in Germany: results of the German Health Interview and Examination Survey for Adults (DEGS1)]. *Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforschung Gesundheitsschutz*. 2013;56(5-6):723-32.



- 
20. Handbuch Motorische Entwicklung. In: Baur J, editor. Beiträge zur Lehre und Forschung im Sport. 2., komplett überarb. Aufl. ed. Schorndorf 2009.
  21. Veen S. Demographischer Wandel, alternde Belegschaften und Betriebsproduktivität. Beiträge zur Personal- und Organisationsökonomik. 1. Auflage ed. Mering 2009.
  22. Margrain TH, Boulton M, Boulton M. Sensory impairment 2005.
  23. Lindberg S, Hasselhorn M. Kognitive Entwicklung. In: Lohaus A, editor. Entwicklungspsychologie des Jugendalters. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2018. p. 51-73.
  24. Baddeley A. Working memory and language: an overview. Journal of communication disorders. 2003;36(3):189-208.
  25. Heckhausen J. Psychological approaches to human development 2005.
  26. Cattell RB. Intelligence: Its Structure, Growth and Action: Elsevier Science; 1987.
  27. Rabbit P. Cognitive changes across the lifespan. Kirjassa Johnson, ML, Bengtson, VL, Coleman, PG & Kirkwood, TBL (toim.): Handbook of age and aging. Cambridge: Cambridge University Press; 2005.
  28. Daveri F, Maliranta M. Age, seniority and labour costs: lessons from the Finnish IT revolution. Economic Policy. 2014;22(49):118-75.
  29. Compton DM, Avet-Compton TL, Bachman LD, Brand D. Working Memory and Perceptual Speed Mediation of Age-Associated Changes in Cognition Within a Sample of Highly-Educated Adults. North American Journal of Psychology. 2003;5(3):451-77.
  30. Li SC, Lindenberger U, Hommel B, Aschersleben G, Prinz W, Baltes PB. Transformations in the couplings among intellectual abilities and constituent cognitive processes across the life span. Psychological science. 2004;15(3):155-63.

- 
31. Baltes PB, Mayer KU, Wissenschaften B-BAd. The Berlin Aging Study: Aging from 70 to 100: Cambridge University Press; 2001.
  32. Baltes PB, Freund AM, Li S-C. The psychological science of human ageing: Cambridge University Press; 2005.
  33. Borjas GJ, Van Ours JC. Labor economics: McGraw-Hill/Irwin Boston; 2010.
  34. Lindenberger U, Baltes PB. [Cognitive capacity in advanced age: initial results of the Berlin Aging Study]. Zeitschrift für Psychologie mit Zeitschrift für angewandte Psychologie. 1995;203(4):283-317.
  35. Brandstädter J, Lindenberger U. Entwicklungspsychologie der Lebensspanne: Ein Lehrbuch: Kohlhammer Verlag; 2007.
  36. Rindermann H. Intelligenzwachstum in Kindheit und Jugend. Psychologie in Erziehung und Unterricht. 2011(3):210-24.
  37. Paus T. Mapping brain maturation and cognitive development during adolescence. Trends in cognitive sciences. 2005;9(2):60-8.
  38. Gathercole SE, Pickering SJ, Ambridge B, Wearing H. The structure of working memory from 4 to 15 years of age. Developmental psychology. 2004;40(2):177-90.
  39. Alloway TP, Gathercole SE, Pickering SJ. Verbal and visuospatial short-term and working memory in children: are they separable? Child development. 2006;77(6):1698-716.
  40. Kunert H, Derichs G, Irle E. Entwicklung von Aufmerksamkeitsfunktionen im Kindesalter: Ergebnisse einer vorläufigen Normierung der computergestützten Testbatterie zur Aufmerksamkeitsprüfung (TAP) an 9-bis 12jährigen Kindern. Zeitschrift für Neuropsychologie. 1996;7(2):92-113.
  41. Mills KL, Dumontheil I, Speekenbrink M, Blakemore SJ. Multitasking during social interactions in adolescence and early adulthood. Royal Society open science. 2015;2(11):150117.

- 
42. Bhatt NR, Morris M, O'Neil A, Gillis A, Ridgway PF. When should surgeons retire? *The British journal of surgery*. 2016;103(1):35-42.
  43. Waljee JF, Greenfield LJ. Aging and surgeon performance. *Advances in surgery*. 2007;41:189-98.
  44. Sawaki L, Yaseen Z, Kopylev L, Cohen LG. Age-dependent changes in the ability to encode a novel elementary motor memory. *Annals of neurology*. 2003;53(4):521-4.
  45. Voelcker-Rehage C, Stronge AJ, Alberts JL. Age-related differences in working memory and force control under dual-task conditions. *Neuropsychology, development, and cognition Section B, Aging, neuropsychology and cognition*. 2006;13(3-4):366-84.
  46. Hackel ME, Wolfe GA, Bang SM, Canfield JS. Changes in hand function in the aging adult as determined by the Jebsen Test of Hand Function. *Physical therapy*. 1992;72(5):373-7.
  47. Bieliauskas LA, Langenecker S, Graver C, Lee HJ, O'Neill J, Greenfield LJ. Cognitive changes and retirement among senior surgeons (CCRASS): results from the CCRASS Study. *Journal of the American College of Surgeons*. 2008;207(1):69-78; discussion -9.
  48. Hertzog C, Kramer AF, Wilson RS, Lindenberger U. Enrichment Effects on Adult Cognitive Development: Can the Functional Capacity of Older Adults Be Preserved and Enhanced? *Psychological science in the public interest : a journal of the American Psychological Society*. 2008;9(1):1-65.
  49. Neumayer LA, Gawande AA, Wang J, Giobbie-Hurder A, Itani KM, Fitzgibbons RJ, Jr., et al. Proficiency of surgeons in inguinal hernia repair: effect of experience and age. *Annals of surgery*. 2005;242(3):344-8; discussion 8-52.
  50. Satkunasivam R, Klaassen Z, Ravi B, Fok KH, Menser T, Kash B, et al. Relation between surgeon age and postoperative outcomes: a population-based cohort study. *CMAJ : Canadian Medical Association journal = journal*

- 
- de l'Association médicale canadienne. 2020;192(15):E385-e92.
51. Prystowsky JB. Are young surgeons competent to perform alimentary tract surgery? Archives of surgery (Chicago, Ill : 1960). 2005;140(5):495-500; discussion -2.
  52. Waljee JF, Greenfield LJ, Dimick JB, Birkmeyer JD. Surgeon age and operative mortality in the United States. Annals of surgery. 2006;244(3):353-62.
  53. Frazer A, Tanzer M. Hanging up the surgical cap: Assessing the competence of aging surgeons. World journal of orthopedics. 2021;12(4):234-45.
  54. Bjoern Walther. Kruskal-Wallis-Test in SPSS rechnen 2022 [20.10.2021]. Available from: <https://bjoernwalther.com/kruskal-wallis-test-in-spss-rechnen/>.
  55. Perrenot C, Perez M, Tran N, Jehl JP, Felblinger J, Bresler L, et al. The virtual reality simulator dV-Trainer(®) is a valid assessment tool for robotic surgical skills. Surgical endoscopy. 2012;26(9):2587-93.
  56. Abboudi H, Khan MS, Aboumarzouk O, Guru KA, Challacombe B, Dasgupta P, et al. Current status of validation for robotic surgery simulators - a systematic review. BJU international. 2013;111(2):194-205.
  57. Mimic Technologies. (2018). dV Trainer by mimic User Guide Msim Rev 3.6. Mimic Technologies, Inc.: Seattle, Washington, Vereinigte Staaten.
  58. Mimic Technologies. (2016). Exercise Instructions. Mimic Technologies, Inc.: Seattle, Washington, Vereinigte Staaten.
  59. Hagen ME, Wagner OJ, Inan I, Morel P. Impact of IQ, computer-gaming skills, general dexterity, and laparoscopic experience on performance with the da Vinci surgical system. The international journal of medical robotics + computer assisted surgery : MRCAS. 2009;5(3):327-31.
  60. Brunner S, Kröplin J, Meyer H-J, Schmitz-Rixen T, Fritz T. Einsatz chirurgischer Simulatoren in der Weiterbildung – eine deutschlandweite Analyse. Der Chirurg. 2021;92(11):1040-9.

- 
61. Huber T, Kirschniak A, Johannink J. [Survey of Training in Laparoscopic Skills in Germany]. Zentralblatt für Chirurgie. 2017;142(1):67-71.