

Aus dem Medizinischen Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde

Geschäftsführender Direktor: Prof. Dr. R. Frankenberger

des Fachbereichs Medizin der Philipps-Universität Marburg

in Zusammenarbeit mit dem Zentrum für Luft- und Raumfahrtmedizin

der Luftwaffe, Standorte Fürstfeldbruck und Köln

- Poliklinik für Zahnerhaltung -

Direktor: Prof. Dr. R. Frankenberger

---

# Craniomandibuläre Dysfunktionen und MRT-Befunde der Kiefergelenke bei Militärluftfahrzeugführern

Inaugural-Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Zahnmedizin

Dem Fachbereich Medizin der Philipps-Universität Marburg

vorgelegt von

Claudia Lorenz

aus Berlin

Marburg, 2023

Originaldokument gespeichert auf dem Publikationsserver der

Philipps-Universität Marburg

<http://archiv.ub.uni-marburg.de>

Dieses Werk bzw. Inhalt steht unter einer

Creative Commons

Namensnennung

Nicht-kommerziell

Weitergabe unter gleichen Bedingungen

4.0 International Lizenz.

Die vollständige Lizenz finden Sie unter:

<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode.de>

Angenommen vom Fachbereich Medizin der Philipps-Universität Marburg am:  
10.07.2023.

Gedruckt mit Genehmigung des Fachbereichs

Dekanin: Frau Prof. Dr. D. Hilfiker-Kleiner  
Referent: Herr Prof. Dr. R. Frankenberger  
1. Korreferent: Herr Prof. Dr. U. Lotzmann

Meiner Familie in Dankbarkeit gewidmet.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>V</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>VII</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>XI</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Zielsetzung</b> .....	<b>2</b>
<b>3 Grundlagen und Stand der Forschung</b> .....	<b>3</b>
3.1 Kiefergelenk (KG).....	3
3.1.1 Anatomie .....	3
3.1.2 Physiologie .....	4
3.1.3 Pathophysiologie .....	5
3.1.4 Diagnostik in der MRT .....	5
3.2 Craniomandibuläre Dysfunktion (CMD).....	6
3.2.1 Klassifizierung.....	6
3.2.2 Epidemiologie.....	7
3.2.3 Ätiologie .....	7
3.2.4 Klinik.....	7
3.2.5 Komorbiditäten.....	8
3.3 Wehrmedizinische Relevanz .....	9
3.3.1 Luftsysteme der Bundeswehr .....	9
3.3.2 Flugphysiologie .....	10
3.3.3 CMD bei Militärluftfahrzeugführern (MLFF).....	12
<b>4 Material und Methode</b> .....	<b>14</b>
4.1 Studiendesign.....	14
4.1.1 Studienpopulation.....	15
4.1.2 Rekrutierungsmethode.....	15

---

4.2	Datenerhebung.....	16
4.3	Querschnittsstudie .....	16
4.3.1	Konzept.....	16
4.3.2	Erhebung der Variablen.....	16
4.4	MRT-Studie .....	17
4.4.1	Einschlusskriterien.....	17
4.4.2	Ausschlusskriterien.....	17
4.4.3	Einschränkungen des Patientenkollektivs .....	17
4.4.4	Konzept.....	18
4.4.5	Technik der MRT .....	18
4.4.6	Erhebung der Variablen.....	18
4.5	Fall-Kontroll-Studie.....	22
4.5.1	Fallkollektiv.....	22
4.5.2	Kontrollkollektiv .....	22
4.5.3	Ausschlusskriterien.....	23
4.5.4	Konzept.....	23
4.5.5	Evaluation der Fall-Kontroll-Studie .....	24
4.5.6	Erhebung der Variablen.....	24
4.6	Fallzahlschätzung .....	27
4.7	Statistische Analyse.....	27
<b>5</b>	<b>Ergebnisse.....</b>	<b>29</b>
5.1	Querschnittsstudie .....	29
5.1.1	Allgemeine Charakteristika des Gesamtkollektivs.....	29
5.1.2	Flughöhe in der Fall- und Kontrollgruppe.....	29
5.1.3	Flugzeugmodell in der Fall- und Kontrollgruppe.....	30
5.2	MRT-Studie .....	32
5.2.1	Allgemeine Charakteristika .....	32
5.2.2	Abnorme MRT-Befunde des KG .....	33

---

5.2.3	Potenzielle Korrelation abnormer MRT-Befunde mit der Anzahl der Flugstunden .....	34
5.3	Fall-Kontroll-Studie.....	36
5.3.1	Allgemeine Charakteristika der untersuchten Stichproben .....	36
5.3.2	CMD vs. Kieferorthopädische Behandlung & Bruxismus .....	38
5.3.3	CMD vs. Zahnhartsubstanz- & Parodontaldefekte.....	39
5.3.4	CMD vs. Prothetik.....	43
5.3.5	CMD-assoziierte Komorbiditäten.....	43
5.3.6	Mediationsanalyse in Abhängigkeit von Fluguntauglichkeit .....	45
<b>6</b>	<b>Diskussion.....</b>	<b>49</b>
6.1.	Material und Methode .....	49
6.1.1.	Allgemeines .....	49
6.1.2.	Querschnittsstudie .....	49
6.1.3.	MRT-Studie .....	50
6.1.4.	Fall-Kontroll-Studie.....	50
6.2.	Ergebnisse der Querschnittsstudie.....	51
6.2.1.	Prävalenz von CMD bei MLFF .....	51
6.2.2.	Einfluss der Flughöhe/des Flugzeugmodells auf die CMD-Häufigkeit .	52
6.3.	Ergebnisse der MRT-Studie .....	56
6.3.1	Allgemeine Charakteristika .....	56
6.3.2	Abnorme MRT-Befunde des KG .....	57
6.3.3	Regressionsanalyse in Abhängigkeit von KG-Arthrose.....	61
6.4.	Ergebnisse der Fall-Kontroll-Studie.....	63
6.4.1.	Allgemeine Charakteristika .....	63
6.4.2.	CMD vs. Kieferorthopädische Behandlung & Bruxismus .....	63
6.4.3.	CMD vs. Zahnhartsubstanz- und Parodontaldefekte.....	64
6.4.4.	CMD vs. Prothetik.....	65
6.4.5.	CMD-assoziierte Komorbiditäten.....	66

---

6.4.6.	Mediationsanalyse in Abhängigkeit von Fluguntauglichkeit .....	78
6.4.7.	Schlussfolgerung für die Praxis und klinische Relevanz.....	79
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>82</b>
7.1	Zusammenfassung (deutsch) .....	82
7.2	Summary.....	84
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>86</b>
<b>9</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>102</b>
<b>10</b>	<b>Lebenslauf .....</b>	<b>131</b>
<b>11</b>	<b>Verzeichnis der akademischen Lehrer .....</b>	<b>132</b>
<b>12</b>	<b>Danksagung.....</b>	<b>133</b>
<b>13</b>	<b>Ehrenwörtliche Erklärung.....</b>	<b>134</b>

## Abkürzungsverzeichnis

ADV	=	Anteriore Diskusverlagerung
BWS	=	Brustwirbelsäule
CMD	=	Craniomandibuläre Dysfunktion
DGFDT	=	Deutsche Gesellschaft für Funktionsdiagnostik und -therapie
HP	=	Hubschrauberpilot
HWS	=	Halswirbelsäule
ISG	=	Iliosakralgelenk
KG	=	Kiefergelenk/ <i>Articulatio temporomandibularis</i>
KI	=	Konfidenzintervall
LWS	=	Lendenwirbelsäule
M.	=	<i>Musculus</i>
MLFF	=	Militärluftfahrzeugführer
MRT	=	Magnetresonanztomografie
OR	=	Odds Ratio
PD	=	Protonendichte
PP	=	Propellerpilot
SP	=	Strahlflugzeugpilot
WFV	=	Wehrfliegerverwendungsfähigkeit
WFV II	=	aktive und ehemalige Militärluftfahrzeugführer
WFV III	=	Luftfahrzeugbesatzungsmitglieder
WML	=	White Matter Lesions

ZentrLuRMedLw = Zentrum für Luft- und Raumfahrtmedizin der  
Luftwaffe

ZNS = Zentralnervensystem

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schematische Übersicht über die Anatomie des Kiefergelenks in sagittaler Ansicht.....	3
Abbildung 2:	Craniomandibuläre Dysfunktion (CMD) – Kurzbefund nach Ahlers und Jakstat.....	8
Abbildung 3:	Luftdruckveränderungen (rote Linie) in der Erdatmosphäre und Einordnung der Luftfahrzeuge in Abhängigkeit ihrer maximalen Flughöhe.....	10
Abbildung 4:	Schema für das Vorgehen bei der Patientenrekrutierung für die Querschnitts-, Magnetresonanztomografie-(MRT)- und Fall-Kontroll-Studie.....	14
Abbildung 5:	Beispiel 1 – Magnetresonanztomografie-(MRT)-Aufnahme des Kiefergelenks (KG) eines Militärluftfahrzeugführers (MLFF) in sagittaler Ansicht (links) und schematische Darstellung des KG (gestrichelte Umrandung; rechts).....	19
Abbildung 6:	Beispiel 2 – Magnetresonanztomografie-(MRT)-Aufnahme des Kiefergelenks (KG) eines Militärluftfahrzeugführers (MLFF) in sagittaler Ansicht (links) und schematische Darstellung des KG (gestrichelte Umrandung; rechts).....	19
Abbildung 7:	Beispiel 3 – Magnetresonanztomografie-(MRT)-Aufnahme des Kiefergelenks (KG) eines Militärluftfahrzeugführers (MLFF) in sagittaler Ansicht (links) und schematische Darstellung des KG (gestrichelte Umrandung; rechts).....	20
Abbildung 8:	Beispiel 4 – Magnetresonanztomografie-(MRT)-Aufnahme des Kiefergelenks (KG) eines Militärluftfahrzeugführers (MLFF) in sagittaler Ansicht (links) und schematische Darstellung des KG (gestrichelte Umrandung; rechts).....	20
Abbildung 9:	Beispiel 5 – Magnetresonanztomografie-(MRT)-Aufnahme des Kiefergelenks (KG) eines Militärluftfahrzeugführers (MLFF) in sagittaler Ansicht (links) und schematische Darstellung des KG (gestrichelte Umrandung; rechts).....	21
Abbildung 10:	Beispiel 6 – Magnetresonanztomografie-(MRT)-Aufnahme des Kiefergelenks (KG) eines Militärluftfahrzeugführers (MLFF), Ansicht	

	von coronal (links) und schematische Darstellung des KG (gestrichelte Umrandung; rechts).....	21
Abbildung 11:	Intraoralscan regio 46–47 (links) und 36–37 (rechts) in okklusaler Ansicht (oben) und Intraoralscan der geschlossenen linken Kieferhälfte in sagittaler Ansicht (unten) eines Strahlflugzeugpiloten (SP) nach 2900 Flugstunden .....	25
Abbildung 12:	Verteilung der Verhältnisse der Flughöhe in der Fall-Kontroll-Gruppe .....	29
Abbildung 13:	Häufigkeit abnormer Magnetresonanztomografie-(MRT)-Befunde der Kiefergelenke (KG) in der MRT-Fallgruppe mit Craniomandibulärer Dysfunktion ( $n = 48$ KG von 24 Militärluftfahrzeugführern (MLFF) <sup>a</sup> ) .....	33
Abbildung 14:	Verteilung der Flugstundenzahl bei den Magnetresonanztomografie- (MRT)-Probanden ( $n = 24$ ) für Fälle ohne (links) und mit (rechts) unilateraler Kiefergelenk-(KG)-Arthrose.....	34
Abbildung 15:	Häufigkeit des Auftretens der Parameter des Screenings auf Craniomandibuläre Dysfunktionen (CMD) in der Fall- und Kontrollgruppe der Fall-Kontroll-Studie .....	37
Abbildung 16:	Altersverteilung in den Subgruppen der Fall- und Kontrollgruppe der Fall-Kontroll-Studie .....	37
Abbildung 17:	Häufigkeitsverteilung kieferorthopädischer Behandlungen bei Bruxismus in den Subgruppen der Fall- und Kontrollgruppe der Fall- Kontroll-Studie.....	39
Abbildung 18:	Häufigkeitsverteilung nicht kariöser Zahnhartsubstanzdefekte und parodontaler Deformitäten – Fallgruppe vs. Kontrollgruppe.....	41
Abbildung 19:	Häufigkeitsverteilung von keilförmigen Defekten mit Kompositfüllungen und Abrasionen in den Subgruppen der Fall- und Kontrollgruppe der Fall-Kontroll-Studie .....	41
Abbildung 20:	Häufigkeitsverteilung der Anzahl von prothetischen Zahnersatz in der Fall- und Kontrollgruppe in der Fall-Kontroll-Studie.....	43
Abbildung 21:	Komorbiditäten im Fall- und Kontrollkollektiv der Fall-Kontroll- Studie.....	44

Abbildung 22:	Häufigkeitsverteilung der Anzahl der mit einer Craniomandibulären Dysfunktion (CMD) assoziierten Komorbiditäten in der Fall- und Kontrollgruppe der Fall-Kontroll-Studie .....	46
Abbildung 23:	Schema der Mediationsanalyse .....	46
Abbildung 24:	Häufigkeitsverteilung der CMD-erkrankten MLFF zur Flughöhe des jeweiligen Flugzeugmodells (blaue Punkte) .....	53
Abbildung 25:	Propellerflugzeug „P-3C Orion“; der Pfeil verweist auf das Infrarotsensorsystem MX-20D.....	54
Abbildung 26:	Odds-Ratio ( <i>OR</i> ) von Craniomandibulärer Dysfunktion in Abhängigkeit der Indienststellung der Flugzeugmodelle des Gesamtkollektivs.....	55
Abbildung 27:	Schematische Darstellung der Zusammenhänge von abnormen Magnetresonanztomografie-(MRT)-Befunden des KG bei Militärluftfahrzeugführern .....	56
Abbildung 28:	Schematische Darstellung der Zusammenhänge von White Matter Lesions (WML) und craniomandibulärer Dysfunktion (CMD) bei Militärluftfahrzeugführern (MLFF) .....	70
Abbildung A29:	Ethik-Votum der Ethik-Kommission .....	102
Abbildung A30:	Q-Q-Plot über die Prüfung auf Normalverteilung der Variable Flughöhe in Meter der Fallgruppe.....	103
Abbildung A31:	Q-Q-Plot über die Prüfung auf Normalverteilung der Variable Flughöhe in Meter der Kontrollgruppe des Querschnitts.....	103
Abbildung A32:	Q-Q-Plot über die Prüfung auf Normalverteilung der Anzahl an Flugstunden (transformiert mittels Exponent 0,4) der MRT-Fallgruppe .....	104
Abbildung A33:	Flugstundenverteilung in den Subgruppen der Fall- und Kontrollgruppe der Fall-Kontroll-Studie .....	111
Abbildung A34:	Q-Q-Plot über die Prüfung auf Normalverteilung der Variable prothetischer Zahnersatz der Fallgruppe.....	113
Abbildung A35:	Q-Q-Plot über die Prüfung auf Normalverteilung der Variable prothetischer Zahnersatz der Kontrollgruppe.....	114
Abbildung A36:	Komorbiditäten in den Subgruppen der Fall-Kontroll-Studie.....	121
Abbildung A37:	Komorbiditäten in den Subgruppen der Fall-Kontroll-Studie.....	121
Abbildung A38:	Komorbiditäten in den Subgruppen der Fall-Kontroll-Studie.....	122

---

Abbildung A39: Verteilung der Verhältnisse der Anzahl von Rücken-, Nacken-, Kreuz- und Schulterschmerzen in der Fall-Kontroll-Gruppe.....	122
Abbildung A40: Q-Q-Plot über die Prüfung auf Normalverteilung der Residuen der Komorbiditäten (transformiert mittels Exponent 0,6) der Fallgruppe .....	128
Abbildung A41: Q-Q-Plot über die Prüfung auf Normalverteilung der Residuen der Komorbiditäten (transformiert mittels Exponent 0,6) der Kontrollgruppe .....	129
Abbildung A42: Q-Q-Plot über die Prüfung auf Normalverteilung der Komorbiditäten der Fallgruppe .....	129
Abbildung A43: Q-Q-Plot über die Prüfung auf Normalverteilung der Komorbiditäten der Kontrollgruppe .....	130

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Militärluftfahrzeugführer (MLFF) der Fall- und Kontrollgruppe nach Flugzeugtyp.....	23
Tabelle 2:	Craniomandibuläre Dysfunktion (CMD) – assoziierte Komorbiditäten [1, 18, 19, 24, 28, 44, 51, 52, 66, 69, 89, 112, 123, 127, 134, 204, 205, 226, 231, 233, 234] .....	26
Tabelle 3:	Verteilung der Flugzeugmodelle in der Kontrollgruppe der gesamten Stichprobe ( $N = 1409$ ) ohne Craniomandibuläre Dysfunktion (CMD) und Fallgruppe (mit CMD) .....	31
Tabelle 4:	Statistische Analyse der Häufigkeit des Auftretens Craniomandibulärer Dysfunktionen (CMD) – Militärluftfahrzeugführer (MLFF) von Flugzeugmodellen mit Odds Ratio ( $OR$ ) $> 2$ (Fallgruppe) vs. Gesamtkontrollgruppe (Gesamt-KGr) .....	32
Tabelle 5:	Binominale logistische Regression des Einflusses der Flugstunden auf das Auftreten einer unilateralen Kiefergelenk-(KG)-Arthrose in der Magnetresonanztomografie-Fallgruppe ( $n = 24$ ) – Modell 1 ohne potenzielle Störvariablen und Modell 2 mit potenziellen Störvariablen .....	35
Tabelle 6:	Charakteristika der Fall- und Kontrollgruppe der Fall-Kontroll-Studie .....	36
Tabelle 7:	Statistische Analyse der Häufigkeit von kieferorthopädischen Behandlungen bei Bruxismus – Fallgruppe vs. Kontrollgruppe (KGr)38	
Tabelle 8:	Statistische Analyse der Häufigkeit von nicht kariösen Zahnhartsubstanzdefekten und parodontalen Deformitäten – Fallgruppe vs. Kontrollgruppe (KGr).....	40
Tabelle 9:	Statistische Analyse der Häufigkeit von keilförmigen Defekten mit zervikalen Kompositfüllungen und Abrasionen bei Hubschrauberpiloten (HP), Propellerpiloten (PP) und Strahlflugzeugpiloten (SP) – Fallgruppe vs. Kontrollgruppe (KGr)...	42
Tabelle 10:	Mediationsanalyse mit der unabhängigen Variablen Craniomandibuläre Dysfunktion (CMD), der abhängigen Variable	

	Fluguntauglichkeit und CMD-assozierte Komorbiditäten als Mediatoren .....	47
Tabelle 11:	Mediationsanalyse mit der unabhängigen Variablen Craniomandibuläre Dysfunktion (CMD), der abhängigen Variable Fluguntauglichkeit und CMD-assozierte Komorbiditäten als Mediatoren – kontrolliert mit ausgewählten Störvariablen.....	48
Tabelle 12:	Craniomandibuläre Dysfunktion-(CMD)-assozierte Komorbiditäten je Fachbereich in der Fallgruppe (CMD ja) und Kontrollgruppe (CMD nein) der Fall-Kontroll-Studie mit signifikanten Ergebnissen .....	66
Tabelle 13:	Nachgewiesene pathologische Zusammenhänge der vorliegenden Arbeit für Militärluftfahrzeugführer (MLFF) mit craniomandibulärer Dysfunktion (CMD) – Gesamtkollektive sowie für die Subgruppen nach Flugzeugtyp .....	80
Tabelle A14:	Charakteristika der Militärluftfahrzeugführer der Magnetresonanztomografie-(MRT)-Fallgruppe mit Craniomandibulärer Dysfunktion (CMD).....	104
Tabelle A15:	Biseriale Korrelationsanalyse zwischen Flugstunden (transformiert mittels Exponent 0,4) und abnormen Magnetresonanztomografie-(MRT)-Befunden der Kiefergelenke (KG) der Fallgruppe mit Craniomandibulärer Dysfunktion (CMD).....	105
Tabelle A16:	Auswahl geeigneter metrischer Kovariaten für Regressionsanalyse abnormer Magnetresonanztomografie-(MRT)-Befunde der Kiefergelenke (KG) der Fallgruppe mit Craniomandibulärer Dysfunktion (CMD) .....	106
Tabelle A17:	Auswahl geeigneter kategorialer Kovariaten für Regressionsanalyse abnormer Magnetresonanztomografie-(MRT)-Befunde der Kiefergelenke (KG) der Fallgruppe mit Craniomandibulärer Dysfunktion (CMD) .....	106
Tabelle A18:	Prüfen der Voraussetzungen für logistische Regressionsanalyse .....	109
Tabelle A19:	Statistische Analyse der Magnetresonanztomografie-(MRT)-Gruppe bezüglich Zusammenhang zwischen Kiefergelenk-(KG)-Position und Anteriorer Diskusverlagerung (ADV) oder Tinnitus .....	109

---

Tabelle A20:	Statistische Analyse der Häufigkeit von kieferorthopädischen Behandlungen bei Bruxismus – Fallgruppe vs. Kontrollgruppe (KGr) in den Subgruppen.....	111
Tabelle A21:	Statistische Analyse der Häufigkeit von Erosionen in einer 1:4 gepaarten Fall-Kontroll-Studie.....	112
Tabelle A22:	Komorbiditäten im Fall- und Kontrollkollektiv der Fall-Kontroll-Studie.....	114
Tabelle A23:	Statistische Analyse der Craniomandibulär Dysfunktion-(CMD)-assoziierten Komorbiditäten im Fall- und Kontrollkollektiv der Fall-Kontroll-Studie.....	116
Tabelle A24:	Statistische Analyse signifikanter Ergebnisse der Craniomandibulär Dysfunktion-(CMD)-assoziierten Komorbiditäten im Fall- und Kontrollkollektiv der Fall-Kontroll-Studie in den Subgruppen .....	123
Tabelle A25:	Statistische Analyse signifikanter Ergebnisse der Craniomandibulär Dysfunktion-(CMD)-assoziierten Komorbiditäten im Fall- und Kontrollkollektiv einer 1:4 gepaarten Fall-Kontroll-Studie.....	124
Tabelle A26:	Prüfen der Voraussetzungen für Mediationsanalyse der Fall-Kontroll-Studie.....	128
Tabelle A27:	Mediationsanalyse von Craniomandibulärer Dysfunktion-(CMD)-Erkrankung auf Fluguntauglichkeit über signifikante Komorbiditäten, kontrolliert mit ausgewählten Variablen.....	130

## 10 Einleitung

Am 3. Juni 2022 hat der Deutsche Bundestag für die Änderung des Artikels 87a des Deutschen Grundgesetzes gestimmt und damit eine verfassungsrechtliche Grundlage für die Einrichtung eines Sondervermögens in Höhe von 100 Milliarden Euro für den Verteidigungsetat geschaffen [57]. Von dieser Summe sind über 33,4 Milliarden Euro für die „Dimension Luft“ der Bundeswehr vorgesehen, um in leistungsstarke, fortschrittliche Luftfahrzeuge wie den US-Tarnkappenjet vom Typ F-35, den Electronic-Combat-Role-(ECR)-Eurofighter und den schweren Transporthubschrauber vom Fabrikat Chinook CH-47 zu investieren. Moderne Kampfflugzeuge mit komplexen Waffensystemen dienen der Landes- und Bündnisverteidigung [57, 140]. Das Luftfahrtpersonal muss nicht nur die Luftfahrzeuge im Luftkampfmanöver sicher steuern, sondern auch die stetig einströmende Informationsflut des technischen Equipments korrekt verarbeiten [74]. Militärluftfahrzeugführer (MLFF) stehen folglich unter enormer physischer und psychischer Belastung [98]. Zur Sicherstellung ihres Auftrags sind konsequenterweise regelmäßige Begutachtungen der Flugtauglichkeit obligatorisch, die am Zentrum für Luft- und Raumfahrtmedizin der Luftwaffe (ZentrLuRMedLw) in Fürstfeldbruck durchgeführt werden [74, 98]. Die gesundheitliche Eignung des fliegenden Personals wird mit aufwendigen diagnostischen Verfahren in allen Fachbereichen der Klinischen Flugmedizin evaluiert [74].

Im Fachbereich der Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde liegt ein Hauptaugenmerk auf dem craniomandibulären System, dessen Funktion im Alltag und im Flugbetrieb zur Kommunikation essenziell ist [118, 125]. Störungen zwischen Schädel und Kiefer können die Gesundheit der MLFF kompromittieren und eine Craniomandibuläre Dysfunktion (CMD) auslösen [3].

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Analyse der Häufigkeit einer CMD mit oder ohne Schmerzsymptomatik bei MLFF und dessen potenzieller Einfluss auf die Flugtauglichkeit.

## 2 Zielsetzung

Das Ziel der vorliegenden Studie ist die Evaluation der Häufigkeit einer CMD bei MLFF. Weiter sollen die Ursachen der CMD sowie deren Begleiterkrankungen in dieser Klientel analysiert werden. Im Rahmen der Studie werden erstmals Magnetresonanztomografien (MRT) der Kiefergelenke (KG) bei MLFF und Echtzeit-MRT-Analysen von Kieferbewegungen beschrieben.

Im Detail sollen folgende Nullhypothesen überprüft werden:

1. Eine zunehmende Flughöhe des Flugzeugmodells hat keinen Einfluss auf die Häufigkeit der CMD bei den MLFF. Die CMD-Prävalenz ist somit unabhängig vom Flugzeugmodell.
2. Es besteht keine Korrelation zwischen der Anzahl absolvierter Flugstunden der MLFF und der Häufigkeit des Auftretens von mit CMD assoziierten Schäden am KG-Apparat.
3. MLFF erleiden weniger CMD nach kieferorthopädischer Behandlung in Anwesenheit von Bruxismus.
4. Zwischen den MLFF bestehen keine Unterschiede hinsichtlich nicht kariöser Zahnhartsubstanzdefekte und parodontaler Deformitäten. Die Notwendigkeit eines Zahnersatzes ist folglich unabhängig von einer CMD.
5. Eine CMD hat bei MLFF indirekt über Komorbiditäten keinen Einfluss auf die Fluguntauglichkeit.

Anhand der Untersuchungsergebnisse zur Manifestation von CMD bei MLFF soll ein etwaiger wehrmedizinischer Handlungsbedarf abgeschätzt werden.

## 3 Grundlagen und Stand der Forschung

### 3.1 Kiefergelenk (KG)

#### 3.1.1 Anatomie

Das KG (*Articulatio temporomandibularis*) ist eine paarig angelegte Einheit aus dem Schläfenbein (*Os temporale*) und dem Unterkiefer (*Os mandibulare*). Ventral des äußeren Gehörgangs (*Meatus acusticus externus*) gelegen, besteht es aus einer beweglichen Verbindung zwischen dem Kondylus des Unterkiefers und der Gelenkpfanne (*Fossa mandibularis*) des Schläfenbeins [5]. Abbildung 1 veranschaulicht schematisch die KG-Anatomie [35, 171, 210].

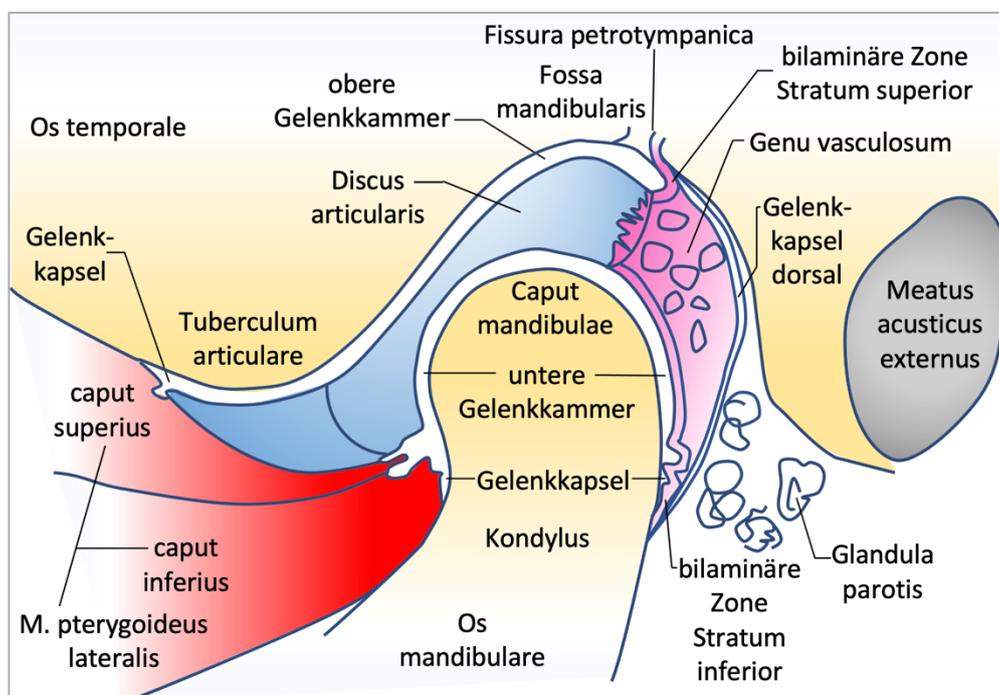


Abbildung 1: Schematische Übersicht über die Anatomie des Kiefergelenks in sagittaler Ansicht

*M.* = *Musculus*

Der KG-Kopf (*Caput mandibulae*) kann physiologische Variationen in Krümmung, Rundung und Asymmetrien der KG aufweisen [11, 239]. Die transversale Ausdehnung des KG-Kopfs [185] und die sagittale Ausdehnung der Gelenkpfanne mit der *Fissura petrotympanica* sind bei Männern durchschnittlich größer als bei Frauen [191].

Das KG ist von einer fibrösen Gelenkkapsel (*Capsula articularis*) umschlossen, die aus einer mit Synovialflüssigkeit gefüllten Synovialmembran besteht und der Gelenkverstärkung dient [11, 32].

Daneben enthält die Gelenkkapsel eine bikonkave intraartikuläre Scheibe. Dieser *Discus articularis* ist anterior mit der Kapsel, mittig mit den medialen und lateralen Anteilen des Kondylus sowie posterior mit dem retrodiskalen Gewebe verbunden. Der Diskus unterteilt das KG in eine obere (diskotemporale) und untere (diskomandibuläre) Gelenkkammer [193]. Er besteht im vorderen (*Pars anterior*) und hinteren (*Pars posterior*) Segment aus Faserknorpel und dazwischen (*Pars intermedia*) aus straffem Bindegewebe [35]. In der habituellen Okklusion liegt der *Pars anterior* am hinteren Abhang des *Tuberculum articulare* [179] und sitzt mit seinem *Pars posterior* dem Apex des KG-Kopfs auf [171]. Der Diskus ermöglicht ein reibungsreduziertes Gleiten sowie eine Verteilung und Dämpfung von starken Belastungen [186].

Dorsal des Diskus erstreckt sich die bilaminäre Zone. Sie enthält das elastische *Stratum superior*, das eine Luxation des KG verhindert und in die *Fissura petrotympanica* mündet sowie das dorsal des Kondylus inserierende *Stratum inferior*, dessen fibröses Gewebe den Diskus bei Hypermobilität stabilisiert [17]. Dazwischen liegt das gefäßreiche *Genu vasculosum*, das der Nutrition des KG dient. Nach dorsal wird die bilaminäre Zone von der Gelenkkapsel begrenzt [35].

Für die Stabilität des KG sind die Kau- sowie die Kopf- und Halsmuskeln verantwortlich [26, 193]. Zu den am Kauvorgang beteiligten Muskeln zählen der *Musculus (M.) temporalis*, *M. pterygoideus medialis*, *M. masseter*, sowie der *M. pterygoideus lateralis*, wobei letzterem ein besonderer Stellenwert zukommt [11]. Die Anzahl der Komponenten des *M. pterygoideus lateralis* und die Lokalisation der Insertion seines oberen Anteils sind unzureichend geklärt [212]. Laut Behr et al. (2019) ist der Muskel meist aus zwei Köpfen aufgebaut [212]: dem *Caput superius*, der in 60 % der Fälle am *Pars anterior* des Diskus ansetzt, sowie dem *Caput inferius*, der an der *Fovea pterygoidea* des Kondylus inseriert [35]. Zusätzlichen Halt erhält das KG durch den Bandapparat [193].

### 3.1.2 Physiologie

Die Mundöffnung wird durch eine Rotationsbewegung in der diskomandibulären Gelenkkammer eingeleitet. Anschließend erfolgt eine Translation innerhalb des diskotemporalen Anteils [77, 79, 177]. Weiter existieren Hinweise, dass beide Bewegungen im Gesamtablauf linear erfolgen [135] und von Kompressionsbewegungen begleitet werden können [108]. Während der gesamten Öffnungsphase wird der Diskus-Kondylus-Komplex entlang des *Tuberculum articulare* nach anterokaudal geführt [179].

Hauptverantwortlicher Muskel für Kieferöffnung, Protrusion und Laterotrusion ist der *M. pterygoideus lateralis*, der insbesondere beim Singen, Sprechen und Pressen beansprucht wird [50, 221].

### 3.1.3 Pathophysiologie

Eine erhöhte Belastung kann zu einer Fehlanpassung des KG führen. Die resultierenden degenerativen Veränderungen des KG [136] können sich klinisch als CMD manifestieren [88]. Das Risiko von pathologischen Umformungen ist am Kondylus des Unterkiefers am größten [75]. Beim *Discus articularis* degeneriert die untere Fläche 3,3-mal häufiger als die obere. Umfangreiche Veränderungen können jedoch auch zu einem vollständigen Verlust der Gelenkscheibe führen [193].

Laut histologischen Untersuchungen kann eine Dislozierung des Diskus der degenerativen Gelenkveränderung vorausgehen [29]. Die Position des Diskus kann nach anterior, medial, lateral oder posterior verschoben sein [34, 47, 216]. Bei CMD-Erkrankten treten Diskusverschiebungen am häufigsten auf, wobei die anteriore Dislozierung dominiert [85, 97, 225]. Bei einer anterioren Diskusverlagerung (ADV) ist das *Stratum inferius* überdehnt [35]. Auch die vordere Gelenkkapsel des unteren Gelenkspalts wird weit über den ventralen Rand des Kondylus hinaus gedehnt [62].

Mit der CMD einhergehende muskuläre Störungen (Myalgien) [193] werden mittels Elektromyografie untersucht. Hinsichtlich der elektrischen Muskelaktivität zeigen CMD-Erkrankte und CMD-Gesunde keine Unterschiede [43, 104, 121].

### 3.1.4 Diagnostik in der MRT

Unter den bildgebenden diagnostischen Methoden (MRT, Arthroskopie, Computertomografie) zur Untersuchung pathologischer Veränderungen des Diskus-Kondylus-Komplex gilt die MRT als Goldstandard [194, 230]. Mittels MRT lassen sich die knöchernen, knorpeligen und muskulären Strukturen hinsichtlich ihrer Morphologie, die Relation des Diskus zum Kondylus und degenerative Veränderungen analysieren [215, 216]. Die Beurteilung der Aufnahmen erfolgt T1-, T2- und Protonendichte-(PD)-gewichtet.

Bei der T1-Wichtung erscheinen Flüssigkeiten und pathologisch verändertes Gewebe dunkel (hypointens) und lipophiles Gewebe hell. Hierdurch lässt sich das Markfett im

Kondylus des Unterkiefers visuell abgrenzen [17]. In der T2-Wichtung stellen sich Flüssigkeiten und pathologisch verändertes Gewebe hell (hyperintens) dar [169]. Somit können nicht nur anatomische Strukturen, sondern auch Entzündungsreaktionen in Form von Ödemen, Tumoren und Ergüssen (z. B. Gelenkergüsse) diagnostiziert werden [230]. Der *Discus articularis* erscheint aufgrund seiner Zusammensetzung in beiden Wichtungen homogen dunkel bzw. signalarm [17]. Die PD-gewichtete Turbospinechosequenz mit Fettunterdrückung bündelt die diagnostischen Informationen der T1- und T2-Wichtung und visualisiert sowohl anatomische Strukturen als auch mit Flüssigkeit gefüllte Strukturen als Anzeichen einer Entzündungsreaktion. Dadurch lassen sich pathologische Veränderungen des muskuloskelettalen Systems darstellen [14].

## 3.2 Craniomandibuläre Dysfunktion (CMD)

### 3.2.1 Klassifizierung

Der Begriff CMD umfasst Funktionsstörungen im Areal des KG [4]. Die klinische Klassifikation (K07.6) der Deutschen Gesellschaft für Funktionsdiagnostik und -therapie (DGFDT) definiert CMD als Sammelbegriff für Funktionseinschränkungen und/oder Schmerzen des Kauorgans. Zu den Funktionsstörungen zählen Limitationen und Asymmetrien der Unterkieferbewegungen sowie Geräusche der KG [3]. Diese Beeinträchtigungen können vorübergehend biologisch toleriert werden (kompensierte CMD) und bei fortwährender Belastung ohne Beseitigung der Ursache zu einer Dekompensation führen [82]. Infolgedessen wirken neurophysiologische Mechanismen sowie mechanische Kräfte als schmerzverursachende und -unterhaltende Faktoren. Beim ersten Aspekt wird die Gleichgewichtsregulation im Kleinhirn gestört und die Pathogenese von Körperfehlhaltungen ausgelöst. Beim zweiten Aspekt sind Parafunktionen durch z. B. überstehende Füllungsrän der Ursachen für Muskel- und Gelenkschmerzen [236]. Dolenzen können nicht nur in der Kaumuskulatur, präaurikulär und im Bereich der KG auftreten, sondern auch in Form von Kopfschmerzen [3]. Nach der neueren Klassifikation von Hugger et al. (2016) werden Okklusopathien (Vorkontakte und Gleithindernisse) ebenfalls zu den CMD gezählt. Die CMD ist von der Myoarthropathie des Kausystems abzugrenzen, die im englischsprachigen Raum als Temporomandibular Disorder (TMD) oder Temporomandibular Joint Disorder (TMJ) bezeichnet wird [82]. Letztlich konnte sich weder national noch international eine einheitliche CMD-Klassifikation durchsetzen [220].

### 3.2.2 Epidemiologie

Mit einer Prävalenz von 16–31 % weltweit [6, 225] und 8–16 % innerhalb Deutschlands – Tendenz steigend – nimmt die CMD einen hohen Stellenwert in der Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde ein [13]. Frauen erkranken 2,3-fach häufiger als Männer [83]. Die CMD tritt auch im hohen Alter in Form von Gesichtsschmerzen oder KG-Geräuschen auf [166]. Aktuell gelten Okklusionsschienen als Standardtherapie bei CMD [15]. Diese Therapie verursacht gegenwärtig in Deutschland Behandlungskosten von über 88 Millionen Euro pro Quartal [36]. Menschen mit CMD sind 2- bis 3-mal häufiger auf Sozialleistungen angewiesen als die Allgemeinbevölkerung [182]. Ließe sich die Erkrankung durch eine allgemeine Prävention eindämmen oder durch prophylaktische Maßnahmen verhindern, könnten diese Kosten und krankheitsbedingte Folgekosten für die Gesellschaft nachhaltig reduziert werden.

### 3.2.3 Ätiologie

Zur Ätiologie der CMD ist nur wenig bekannt. Nach derzeitigem Kenntnisstand sind degenerative Veränderungen des KG die Folge einer verminderten Anpassungsfähigkeit sowie einer ausgeprägten und anhaltenden Belastung artikulierender Strukturen [143]. Risikofaktoren für eine CMD sind somatische Symptome und eine Verschlechterung der Schlafqualität. Auch Genmutationen, konkret die Catechol-O-Methyltransferase und 6 Einzelnukleotid-Polymorphismen, sind mit CMD und Schmerzen assoziiert [60, 203]. Malokklusion wird als Kofaktor für die Entstehung von vorwiegend schwerer CMD betrachtet [103]. Einen höheren Stellenwert für die Pathogenese nehmen psychosoziale Störungen, Parafunktionen und das weibliche Geschlecht ein [95, 103, 176].

Aktuell wird kontrovers diskutiert, ob eine kieferorthopädische Behandlung bei Bruxismus zu einer CMD führt [124, 181]. In der vorliegenden Studie soll diese Fragestellung für MLFF geklärt werden.

### 3.2.4 Klinik

Für die Diagnosestellung CMD werden die Kriterien nach Ahlers und Jakstat (2015) verwendet (siehe Abbildung 2), welcher Bestandteil der zahnärztlichen Untersuchung der Bundeswehr ist [99]. Treffen mindestens zwei Kriterien zu, ist eine CMD wahrscheinlich [2].

<b>CMD-Kurzbefund</b> <small>dentaConcept®</small>	
Mundöffnung asymmetrisch	<input type="checkbox"/>
Mundöffnung eingeschränkt	<input type="checkbox"/>
Gelenkgeräusche	<input type="checkbox"/>
Okklusale Geräusche	<input type="checkbox"/>
Muskelpalpation schmerzhaft	<input type="checkbox"/>
Exzentrik traumatisch	<input type="checkbox"/>
<b>CMD</b>	<input type="radio"/> unwahrscheinlich ( $\leq 1$ ) <input type="radio"/> wahrscheinlich ( $\geq 2$ )

Abbildung 2: Craniomandibuläre Dysfunktion (CMD) – Kurzbefund nach Ahlers und Jakstat (2015, dentaConcept Verlag, Hamburg) [2]

Zunächst wird die Mundöffnung auf Asymmetrien und Seitenabweichungen überprüft, wobei die Deviation eine Rückkehr zur Mittellinie im Gegensatz zur Deflexion darstellt. Eine eingeschränkte Mundöffnung liegt bei einer Schneidekantendistanz von maximal 38 Millimetern vor. KG-Geräusche, wie Reiben oder Knacken, werden ebenfalls erfasst. Dann wird die Okklusion in Schlussbisslage begutachtet und bei mehrzeitigen Kontaktgeräuschen positiv beurteilt. Bei der Untersuchung der Kaumuskulatur werden der *M. masseter*, *M. temporalis* und *M. digastricus venter posterior* bimanuell auf Palpationsempfindlichkeit überprüft, wobei Verhärtungen, Missempfindungen und Schmerzen positiv gewertet werden. Schließlich erfolgt die Bewertung von traumatischer Exzentrik (Abrasionen, Attritionen), die mit übermäßigem Zahnschmelzverlust einhergeht [2].

### 3.2.5 Komorbiditäten

Einen hohen Stellenwert für den klinischen Verlauf einer CMD haben (nicht) schmerzhafte Komorbiditäten [96]. Prospektive Kohortenstudien fanden verschiedene komorbide Zustände; eine systematische Untersuchung fehlt aber bislang. CMD-Begleiterkrankungen sind verschiedenen medizinischen Fachbereichen zuzuordnen. Zu ihnen zählen eine schiefe Bisslage [66, 89], Kopfschmerzen [44, 69, 134], Aufmerksamkeitsdefizit- und Hyperaktivitätsstörung [209], Depressionen und Angststörungen [18, 53, 204] sowie Schlafstörungen [231]. Im Bereich der Oto-Rhino-Laryngologie ist die CMD mit Schnarchen [28, 120, 231], Tinnitus, schwindelähnlichen Beschwerden (Dizziness) [24, 205, 234], Hörschwierigkeiten, Asthma und Rhinitis assoziiert [205]. Ophthalmologisch treten Einschränkungen im visuellen Wahrnehmungsspektrum [19, 226] sowie Xerophthalmie auf [205]. Das

Reizdarmsyndrom [1] und Schilddrüsenfunktionsstörungen sind komorbide Erkrankungen aus dem Bereich der Inneren Medizin [205]; ein stressbedingt negativer Effekt auf das kardiovaskuläre System ist anzunehmen [123, 127]. Orthopädisch gibt es Assoziationen zu Körperfehlhaltungen sowie zu einem Gelenkverschleiß mit resultierenden Muskel- und Gelenkschmerzen [51, 112, 205, 233].

In der Gesamtschau tangiert eine CMD-Diagnose die Fachbereiche der Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde, Neurologie, Psychiatrie, Hals-Nasen-Ohrenheilkunde, Augenheilkunde, Innere Medizin und Orthopädie. Als komplexes Krankheitsbild mit einer starken Einschränkung der gesundheitsbezogenen Lebensqualität der Betroffenen erfordert eine CMD mit ihren Begleiterkrankungen eine interdisziplinäre Zusammenarbeit der Fachärzte.

### **3.3 Wehrmedizinische Relevanz**

#### **3.3.1 Luftsysteme der Bundeswehr**

Zu den Luftsystemen der Bundeswehr zählen drei militärische Luftfahrzeugklassen [39]. Antriebsabhängig werden die in Abbildung 3 dargestellten Hubschrauber, Propeller- und Strahlflugzeuge unterschieden [31]. Sie werden als Kampf-, Transport- oder Verbindungsflugzeuge eingesetzt [86]. Da die Führer unbemannter Luftfahrzeuge (Drohnen als Bestandteil der Propellerflugzeuge) keiner Flugdynamik ausgesetzt sind, werden diese in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt.

Hubschrauber (Helikopter) werden durch die Rotation ihrer Rotorblätter angetrieben; der Auftrieb resultiert aus der Flügelform [93]. Militärhubschrauber erreichen Maximalgeschwindigkeiten von 400 Kilometer pro Stunde bei bis zu 6,100 Kilometern Flughöhe [39]. Der Auftrieb von Propeller- und Strahlflugzeugen entsteht ebenfalls durch den Luftstrom unterhalb der Tragflächen; die Luftsysteme unterscheiden sich aber im Antrieb [31]. Flugzeuge mit Propellerantrieb nutzen hierfür wellenförmigen Flügel und beschleunigen auf bis zu 750 Kilometer pro Stunde [31, 39]. Die maximale Flughöhe von 10,670 Kilometern liegt noch innerhalb der untersten Schicht der Erdatmosphäre (Troposphäre) [39, 190]. Im Gegensatz dazu nutzen Strahlflugzeuge (Jets) für den Antrieb eingebaute Düsentriebwerke. Zweistrahlige Kampffjets wie der Eurofighter erzielen Höchstgeschwindigkeiten von 2,35 Mach (2495 Kilometer pro Stunde bei einer Flughöhe von 11,000 Kilometern) [31, 39, 119]. Mit bis zu 18,287 Kilometern Flughöhe überwinden diese Hochleistungsflugzeuge bei etwa 11,000 Kilometern die Tropopause

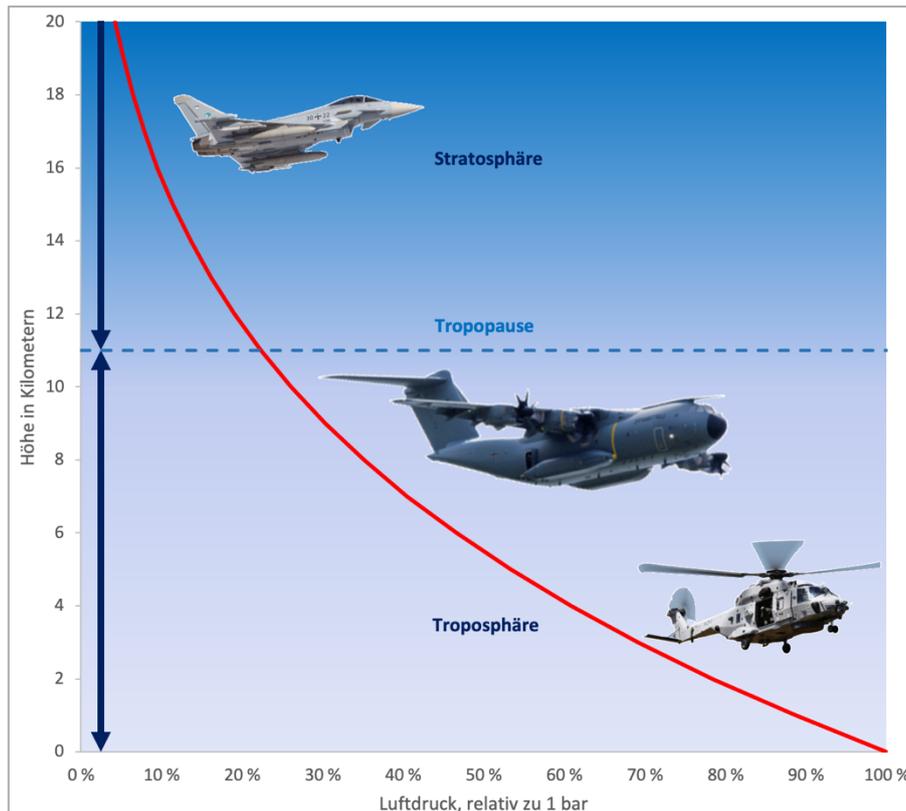


Abbildung 3: Luftdruckveränderungen (rote Linie) in der Erdatmosphäre und Einordnung der Luftfahrzeuge in Abhängigkeit ihrer maximalen Flughöhe

(Flugzeugmodelle und deren Bildrechte von links nach rechts (Hintergründe modifiziert): Strahlflugzeug „Eurofighter EF 2000“ © 2022 von Bundeswehr/Christian Timmig, Propellerflugzeug „Airbus A400M“ © 2017 von Bundeswehr/Markus Dittrich, Hubschrauber „NH-90 NTH Sea Lion“ © 2020 von Bundeswehr/Kim Brakensiek)

und dringen in die Stratosphäre ein [86, 190]. Abbildung 3 ordnet die Luftfahrzeuge ihren maximalen Flughöhen zu. Aus militärischen Sicherheitserwägungen werden die Luftfahrzeuge nur eingeschränkt beschrieben.

### 3.3.2 Flugphysiologie

Die flugphysiologischen Anforderungen und das Belastungspotenzial für die Besatzung sind in der Militärfliegerei im Vergleich zur zivilen Luftfahrt deutlich höher. Die vorliegende Arbeit richtet den Fokus auf die Höhenphysiologie, Beschleunigungsphysiologie und das Tragen der Flugausrüstung [33].

Mit zunehmender Höhe nimmt der Luftdruck exponentiell ab (siehe Abbildung 3, rote Linie) [65, 119]. Piloten sind daher einer eingeschränkten Atemkapazität ausgesetzt [41]. Die Hypoxie-provozierte Dekompressionskrankheit wird überwiegend bei Flughöhen von über 6,098 Kilometern (20 000 Fuß) beschrieben und in zahlreichen Fallberichten mit CMD in Verbindung gebracht [70, 180, 244]. Experimentelle Studien beschränken

sich auf Flughöhen bis 7,620 Kilometern (25 000 Fuß) [10, 229]. In der vorliegenden Arbeit soll deshalb in einer Querschnittsstudie die mögliche Assoziation des Auftretens von CMD mit der Flughöhe (jenseits von 25 000 Fuß) bzw. mit Flugzeugmustern analysiert werden.

Die Beschleunigungskräfte betreffen vorwiegend Hubschrauberpiloten (HP) und SP, weniger Propellerpiloten (PP). Konkret sind HP ständigen Vibrationen ausgesetzt, da sich die durch die Rotorblätter induzierten Schwingungen auf die Insassen übertragen [59, 90]. Im Jet entstehen für SP insbesondere bei Luftkampf-Manövern beschleunigungsbedingte Belastungsspitzen der 5- bis 9-fachen der Erdbeschleunigung [115, 116]. Zur Aufrechterhaltung der Blutversorgung des Körpers und vor allem des Gehirns und zur Kompensation einer drohenden Bewusstlosigkeit werden spezielle Techniken und Hilfsmittel eingesetzt [237]. SP nutzen dafür eine dezidierte Atemtechnik (Pressatmung), die aufgrund maximaler Interkuspitation Bruxismus provoziert [4, 118]. Langzeitbruxismus kompromittiert wiederum die biomechanischen Eigenschaften des *Discus articularis* [101].

Weiter wird die Hals- und Nackenmuskulatur der HP und SP durch das Tragen des Helms inklusive Nachtsichtgerät mit einem Gewicht von über zwei Kilogramm beansprucht [156, 167, 227, 233]. Psychisch geht der chronische Stress, dem MLFF ausgesetzt sind, mit Bruxismus, Okklusions- und Unterkieferdysfunktionen einher [89, 113, 123].

Die Beschleunigungs- und Lastkräfte in Kombination mit der psychischen Belastung begünstigen Rupturen und im weiteren die Zerstörung des *Discus articularis* sowie der bilaminären Zone, was eine Arthrose des KG zur Folge haben kann. Einige Autoren vermuten einen Zusammenhang zwischen Beschleunigungskräften und dem Auftreten von KG-Schäden [214]. In einer Studie zeigten MRT- und Computertomografie-Daten, dass sich hohe Beschleunigungen negativ auf die Spannungsverteilung im *Discus articularis* auswirken und zu KG-Schäden führen können [122]. Dabei verursachen Querbeschleunigungen eine asymmetrische Belastungsverteilung der KG [122]. Mit der vorliegenden Arbeit soll anhand von MRT-Aufnahmen der KG von MLFF mit CMD untersucht werden, ob sich diese Befunde bestätigen lassen und die Militärfliegerei sich ungünstig auf den KG-Apparat auswirkt.

### 3.3.3 CMD bei Militärluftfahrzeugführern (MLFF)

#### 3.3.3.1 CMD-Screening

Im Rahmen der Begutachtung der Wehrfliegerverwendungsfähigkeit (WFV) werden auch die KG sowie die Kaufunktion der MLFF beurteilt [98]. Das CMD-Screening erfolgt dabei nach dem Schema von Ahlers und Jakstat (2015) (siehe Kapitel 3.2.4) anhand von sechs Kriterien [2, 99]. Repräsentative Daten zum Anteil der CMD-erkrankten MLFF in der Bundeswehr liegen nicht vor und sollen mit dieser Arbeit geklärt werden.

#### 3.3.3.2 Begleitsymptomatik

CMD präsentieren sich klinisch mit multiplexer Symptomatik [129] und werden regelmäßig von Parafunktionen wie Bruxismus begleitet [18], was die Schlafqualität beeinträchtigt [52, 120, 231]. Betroffene MLFF konsumieren kontinuierlich koffeinhaltige Getränke (z. B. Energy Drinks), um ihren Dienst verrichten zu können [183]. Das klinische Erscheinungsbild von MLFF mit CMD ist somit nicht nur von Abrasionen, keilförmigen Defekten und Rezessionen geprägt [89, 154]. Vielmehr ist anzunehmen, dass der fortdauernde Konsum säurehaltiger Lebensmittel die Zahnhartsubstanz negativ beeinflusst, was zu Erosionen führt. Weiter sind MLFF je nach Aufgabenfeld unterschiedlichen Stressniveaus ausgesetzt [123], die sich in verschiedenen stark ausgeprägten Abrasionen widerspiegeln. In der vorliegenden Arbeit soll untersucht werden, ob sich das zahnklinische Schadensbild bei MLFF mit CMD je nach Flugzeugtyp unterscheidet und ob diese Schadensbilder häufiger einen Zahnersatz notwendig machen.

#### 3.3.3.3 Wehrfliegerverwendungsfähigkeit (WFV)

Zum Lizenzerhalt des Pilotenscheins müssen MLFF pro Jahr mindestens 100 Flugstunden absolvieren. Ein durchschnittlicher Flug dauert eine Stunde und kostet beim Modell Eurofighter dem Bund über 67 000 Euro [55]. Der Ausfall eines MLFF aufgrund von gesundheitlichen Einschränkungen gilt es – auch vor dem Hintergrund der langen Ausbildung und der Sicherstellung der Einsatzbereitschaft der Bundeswehr – zu vermeiden. Durch komplexe Untersuchungen am ZentrLuRMedLw werden fliegerische Beeinträchtigungen und potenzielle Risiken bei einem MLFF identifiziert. Bei relevanten Befunden kann die WFV vorübergehend oder fortwährend ausgeschlossen werden. Dagegen gelten MLFF bei gesundheitlicher Eignung als flugtauglich und erhalten im

Ergebnis das Urteil der WFV. Hierbei wird unterschieden zwischen Bewerbern für die Pilotenlaufbahn und vor Beginn der Flugausbildung (WFV I), aktiven und ehemaligen MLFF (WFV II) sowie Luftfahrzeugbesatzungsmitgliedern (WFV III) [98].

Die WFV wird entzogen bei: „craniomandibuläre[n] Dysfunktionen oder Neuralgien bzw. neuralgiforme Beschwerden, die mit einer Beeinträchtigung der Flugfähigkeit in Verbindung stehen können (z. B. durch Schwindel oder Dauer-/ Spannungskopfschmerz oder durch die Notwendigkeit einer Dauermedikation entsprechender Symptomatika)“ [98]. Inwieweit CMD die Flugtauglichkeit tangiert, ist bislang nicht erforscht. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Analyse einer möglichen Kompromittierung der WFV durch CMD und/oder CMD assoziierte Erkrankungen.

## 4 Material und Methode

### 4.1 Studiendesign

Vom 27. September 2018 bis 27. März 2020 wurden 1418 männliche und 10 weibliche MLFF sowie 509 Luftfahrzeugbesatzungsmitglieder auf ihre WFV untersucht.

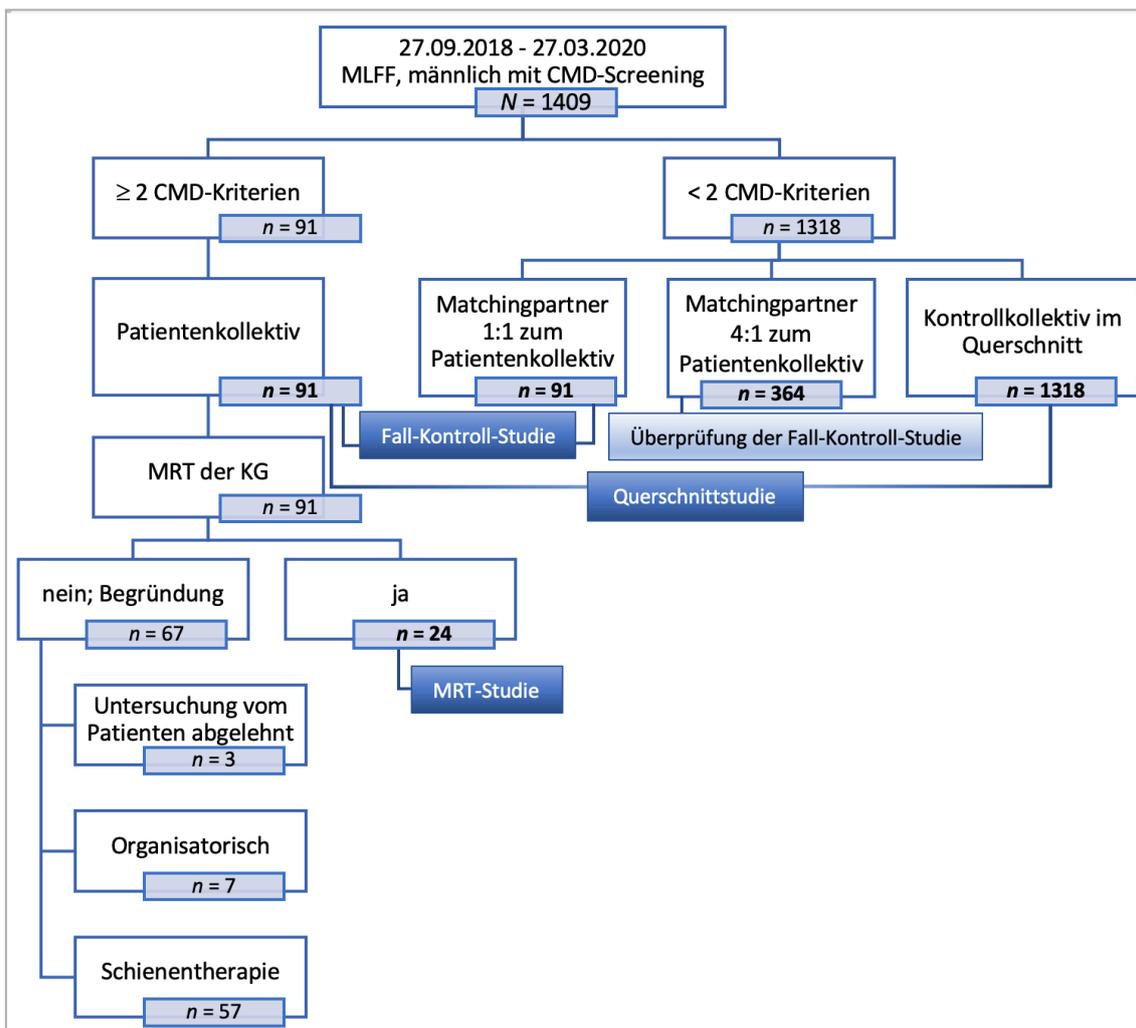


Abbildung 4: Schema für das Vorgehen bei der Patientenrekrutierung für die Querschnitts-, Magnetresonanztomografie-(MRT)- und Fall-Kontroll-Studie

Hervorhebung der Subgruppenbesetzungen in Fettschrift; Evaluierung (annähernd) statistisch signifikanter Ergebnisse der 1:1 gepaarten Fall-Kontroll-Studie in einem 1:4-Matching; CMD = Craniomandibuläre Dysfunktion, KG = Kiefergelenke, MLFF = Militärluftfahrzeugführer

Die vorliegende Arbeit beinhaltet eine Querschnittsstudie von männlichen MLFF mit CMD, eine explorative MRT-Studie von MLFF mit CMD sowie eine 1:1 und in Teilen 1:4 gepaarte Fall-Kontroll-Studie von MLFF mit CMD und ohne CMD. Alle MLFF, die im relevanten Zeitraum am ZentrLuRMedLw begutachtet wurden und die

Aufnahmekriterien erfüllten, wurden in die Studie aufgenommen. Der Selektionsprozess für die drei Studien ist in Abbildung 4 dargestellt.

Die nach den Richtlinien der Deklaration von Helsinki (2004) durchgeführte Studie erhielt im September 2019 ein positives Votum der Ethik-Kommission der Bayerischen Landesärztekammer (Nummer 19007, siehe Abbildung A29 im Anhang).

#### 4.1.1 Studienpopulation

Für die vorliegende Studie wurden von 1938 auf WFV II und WFV III untersuchte Soldaten der Bundeswehr nach einem stringenten Selektionsverfahren 1409 männliche MLFF eingeschlossen. In dem relevanten Zeitraum wurden alle MLFF der Bundeswehr ab 40 Jahren untersucht. Zusätzlich wurde ein nicht bezifferbarer Anteil der unter 40-Jährigen aufgrund des Vorliegens einer Sondergenehmigung ebenfalls jährlich begutachtet. Aufgrund der geringen Fallzahl wurden weibliche MLFF ( $n = 10$ ) und bodengebundene MLFF für Drohnen ( $n = 10$ ,  $n = 9$  männlich,  $n = 1$  weiblich) in der Studie nicht berücksichtigt. Ebenso wurden 509 Luftfahrzeugbesatzungsmitglieder wegen anderer Berufszugehörigkeit ausgeschlossen.

#### 4.1.2 Rekrutierungsmethode

Die zahnmedizinische Untersuchung der MLFF im Rahmen der Überprüfung der WFV durch das Dezernat der Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde am ZentrLuRMedLw beinhaltete ein CMD-Screening mit sechs Parametern (siehe Kapitel 3.2.4). Bei Vorliegen von mindestens zwei von sechs Parametern des Screenings wurde die Diagnose CMD gestellt:

- Mundöffnung asymmetrisch,
- Mundöffnung eingeschränkt,
- Kiefergelenkgeräusche,
- Okklusale Geräusche,
- Schmerzen, Verhärtung oder Missempfinden der Muskelpalpation und
- Exzentrik traumatisch (Abrasionen, Attritionen).

## 4.2 Datenerhebung

Die Daten wurden in der Begutachtungssoftware Datenbank in der Luftfahrt am ZentrLuRMedLw in Fürstfeldbruck dokumentiert. Diese Software wurde im Oktober 2020 durch sOne von der Software für Arbeitsmedizin und Arbeitssicherheit GmbH ersetzt. Daher stand die Datenauswertung erst im Juli 2022 zur Verfügung.

Alle Daten wurden im Untersuchungszeitraum einmal erhoben. Wiederholte Messungen wurden aufgrund marginaler Fallzahlen ( $n = 10$ , 3 Fälle, 7 Kontrollen) nicht in die Studie aufgenommen.

Die CMD-Diagnose (kategoriale Variable) wurde durch die Dezernatsleiterin der Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde am ZentrLuRMedLw in Fürstfeldbruck gestellt. Durch Flugmedizinische Sachverständige des zertifizierten Flugmedizinischen Zentrums wurden folgende Variablen verblindet erhoben: Alter zum Untersuchungszeitpunkt in Jahren (metrisch), Flugzeugmodell (kategorial), Anzahl absolvierter Flugstunden (metrisch) und Urteil auf Flugunfähigkeit (kategorial). Die Variable Flugzeugmodell wurde dem Flugzeugführertyp (HP, PP, SP) zugeordnet.

## 4.3 Querschnittsstudie

### 4.3.1 Konzept

In einer retrospektiven monozentrischen Querschnittsstudie wurden 91 MLFF mit CMD-Diagnose (Fallgruppe) 1318 craniomandibulär-gesunden MLFF (Kontrollgruppe) gegenübergestellt (siehe Kapitel 4.1.2) Folgende Merkmale stimmten in den Gruppen überein:

- männliches Geschlecht und
- WFV II.

### 4.3.2 Erhebung der Variablen

Im Rahmen der Querschnittsstudie wurde die Flughöhe in Kilometern zwischen den Fällen der Fall- und Kontrollgruppe verglichen. Diese Variable wurde den Daten der Flugzeugmodelle entnommen [39]. Jedem Flugzeugmodell wurde unter Berücksichtigung der Dienstgipfelhöhe (unter Normalbedingungen Anstieg von 100 Fuß pro Minute bei maximalem Fluggewicht) die Flughöhe zugeordnet. [105]

## 4.4 MRT-Studie

### 4.4.1 Einschlusskriterien

Folgende Kriterien mussten die Probanden für den Einschluss in die MRT-Studie erfüllen:

- gesunde männliche Probanden,
- CMD-Screening in mindestens zwei Parametern positiv (siehe Kapitel 4.1.2),
- WFV II,
- Flugerfahrung im Militärdienst und
- vorliegende unterschriebene Einverständniserklärung zu Beginn der Untersuchung.

### 4.4.2 Ausschlusskriterien

Folgende Kriterien führten zum Ausschluss der Probanden:

- 17 Jahre alt und jünger,
- zivile Erstbewerber,
- stattgefundenen Operation am Kiefergelenk,
- Eingliederung eines Aufbissbehelfs mit adjustierter Oberfläche in den vergangenen drei Jahren,
- Metallimplantate, Stents, Clips, Metallsplitter falls nicht nachweislich MRT-tauglich,
- Herzschrittmacher, Insulinpumpe, Neurostimulator, Cochlea-Implantat und
- Klaustrophobie.

### 4.4.3 Einschränkungen des Patientenkollektivs

Aufgrund der niedrigen Fallzahl ( $n = 13$  männlich,  $n = 9$  weiblich) sowie der fehlenden Vergleichbarkeit mit der Berufsgruppe der MLFF wurden Luftfahrzeugbesatzungsmitglieder ausgeschlossen. Bei den Männern lehnten drei MLFF die Teilnahme an der MRT-Studie ab, sieben MLFF wurden aufgrund der Einschränkungen durch die Corona-Pandemie ausgeschlossen. Außerdem wurden 57

Fälle mit Eingliederung eines Aufbissbehelfs ausgeschlossen, da die therapeutische Maßnahme möglicherweise die Ergebnisse beeinflusst hätte.

Aufgrund von Verzögerungen bei der Beantragung des Ethik-Votums und der Einstellung nicht zwingend erforderlicher medizinischer Untersuchungen im Rahmen der Corona-Pandemie wurde kein Kontrollkollektiv generiert.

#### 4.4.4 Konzept

Das Konzept dieser explorativen Untersuchung basierte auf der bildgebenden Diagnostik der KG. Die Fälle ( $n = 24$  männliche MLFF) stammten aus dem Fallkollektiv der Fall-Kontroll-Studie (siehe Kapitel 4.5.1). Dies ergab ein Patientenkollektiv von  $n = 24$  männlichen MLFF mit  $n = 48$  KG. Weiter erhielten alle Patienten der MRT-Studie einen Fragebogen für die Anamneseabfrage. Dieser blieb im Nachgang irrelevant, weil die Daten bereits von anderen Abteilungen am ZentrLuRMedLw verblindet erhoben worden waren.

#### 4.4.5 Technik der MRT

Bei rechtfertigender Indikation wurden sagittale, transversale und koronale MRT-Aufnahmen der KG mit Hilfe des 3 Tesla-Geräts „Magnetom Prisma“ der Firma Siemens in statischer Konstellation bei geschlossenem Mund (habituelle Okklusion), bei geöffnetem Mund mit einem Mirahold®-Block in Größe L und als dynamische Gleit-Öffnungs-Bewegung (geschlossener bis maximal geöffneter Mund) angefertigt. Transversale Aufnahmen erfolgten T2-Turbospinechosequenz-gewichtet, koronale T2-Short-Tau-Inversion-Recovery-gewichtet und sagittale PD-Turbospinechosequenz-gewichtet mit Fettunterdrückung. Zur Erfassung der dynamischen Mundöffnung wurden T2-fl2d-Aufnahmen verwendet. Diese Technik kam aus organisatorischen Gründen nur bei 21 von 24 Patienten zur Anwendung.

#### 4.4.6 Erhebung der Variablen

Abnorme MRT-Befunde der KG (Deformation, Arthrose, Gelenkerguss, Position KG-Kopf in Ruheschwebelage dorsocranial/dorsal, Ausdünnung/Signalsteigerung des Diskus, partielle/totale ADV, Diskusverlagerung mit/ohne Reposition, Entzündung/Perforation der bilaminären Zone, auffällige statische/dynamische Mundöffnung, Diskusadhäsion, gereizte Kaumuskulatur (*M. pterygoideus lateralis*),

prominente Schleimhautschwellung in der Kieferhöhle) wurden uni- und bilateral erfasst. Die folgenden sechs MRT-Aufnahmen mit den schematischen Skizzen (Abbildung 5–Abbildung 10) demonstrieren die Bandbreite abnormer Befunde der KG bei MLFF.

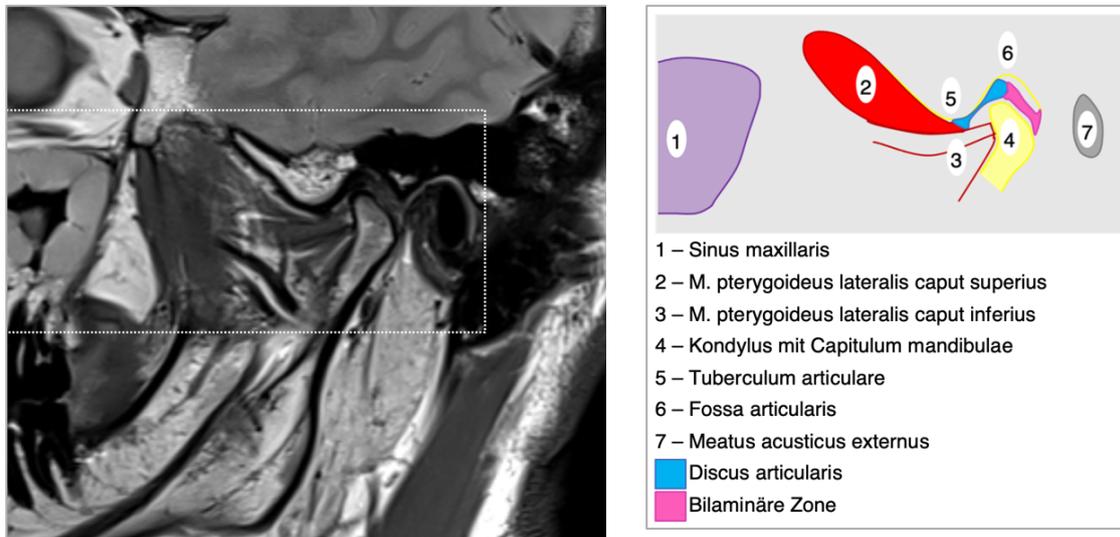


Abbildung 5: Beispiel 1 – Magnetresonanztomografie-(MRT)-Aufnahme des Kiefergelenks (KG) eines Militärluftfahrzeugführers (MLFF) in sagittaler Ansicht (links) und schematische Darstellung des KG (gestrichelte Umrandung; rechts)

Befund: Position des KG-Kopfs in Ruheschwebelage dorsocranial, prominente Schleimhautschwellung in der angeschnittenen Kieferhöhle. M. = *Musculus*

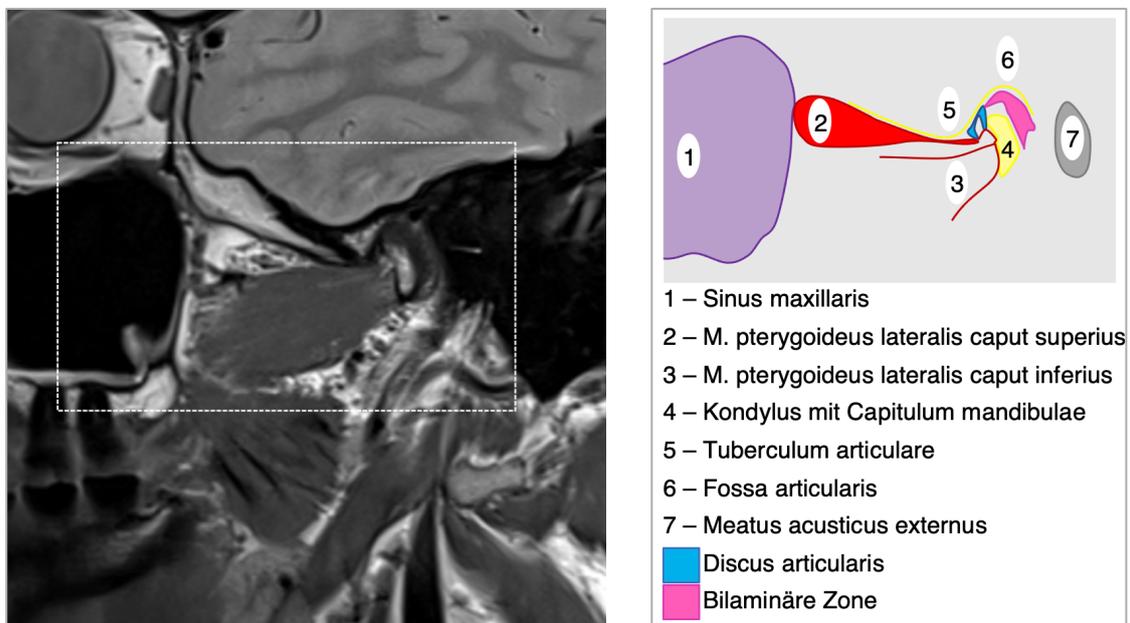


Abbildung 6: Beispiel 2 – Magnetresonanztomografie-(MRT)-Aufnahme des Kiefergelenks (KG) eines Militärluftfahrzeugführers (MLFF) in sagittaler Ansicht (links) und schematische Darstellung des KG (gestrichelte Umrandung; rechts)

Befund: Degenerierter *Caput superius* des *Musculus (M.) pterygoideus lateralis*, partielle anteriore Diskusverlagerung (ADV) bei gefaltetem *Discus articularis*.

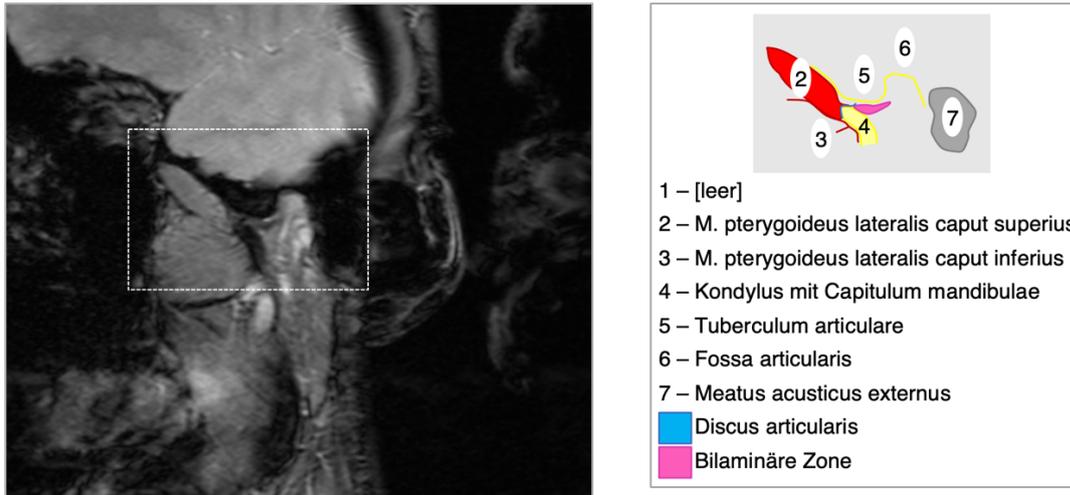


Abbildung 7: Beispiel 3 – Magnetresonanztomografie-(MRT)-Aufnahme des Kiefergelenks (KG) eines Militärluftfahrzeugführers (MLFF) in sagittaler Ansicht (links) und schematische Darstellung des KG (gestrichelte Umrandung; rechts)

Befund: Bei dynamischer Mundöffnung beidseits überschießender Gleitvorgang des KG-Kopfs weit über den Zenit des *Tuberculum articulare* hinaus mit Reposition. Dagegen zeigte die statische Mundöffnung einen beidseits regulären Translationsvorgang des discoartikulären Komplexes. Die *Sinus maxillaris* und *Discus articularis* sind in diesem Bildausschnitt und der Wichtung nicht eindeutig darstellbar.  
*M.* = *Musculus*

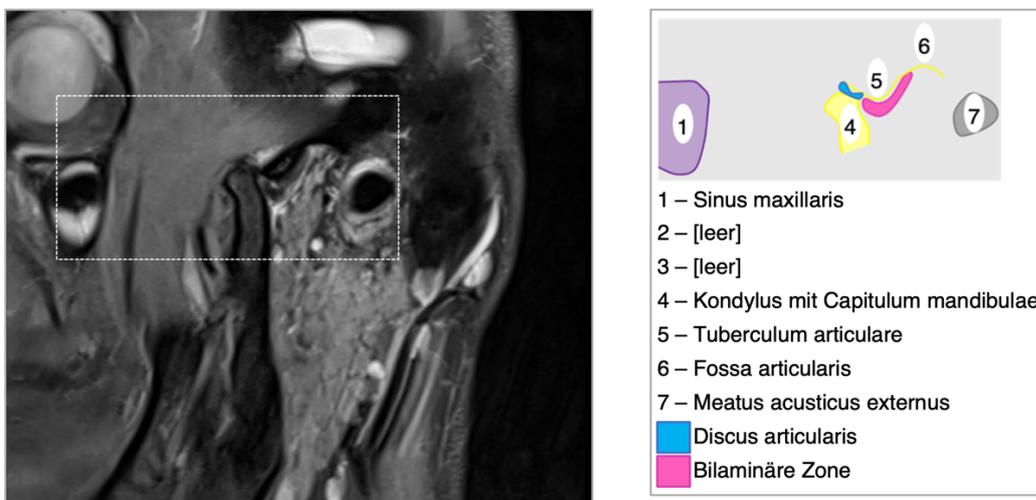


Abbildung 8: Beispiel 4 – Magnetresonanztomografie-(MRT)-Aufnahme des Kiefergelenks (KG) eines Militärluftfahrzeugführers (MLFF) in sagittaler Ansicht (links) und schematische Darstellung des KG (gestrichelte Umrandung; rechts)

Befund: Bei statischer Mundöffnung überschießender Gleitvorgang des KG-Kopfs weit über den Zenit des *Tuberculum articulare* hinaus mit Reposition. Weiter zeigten sich Entzündungszeichen der bilaminären Zone sowie eine Spiegelbildung der Kieferhöhle. Der *Musculus (M.) pterygoideus lateralis* ist in diesem Bildausschnitt nicht eindeutig darstellbar.

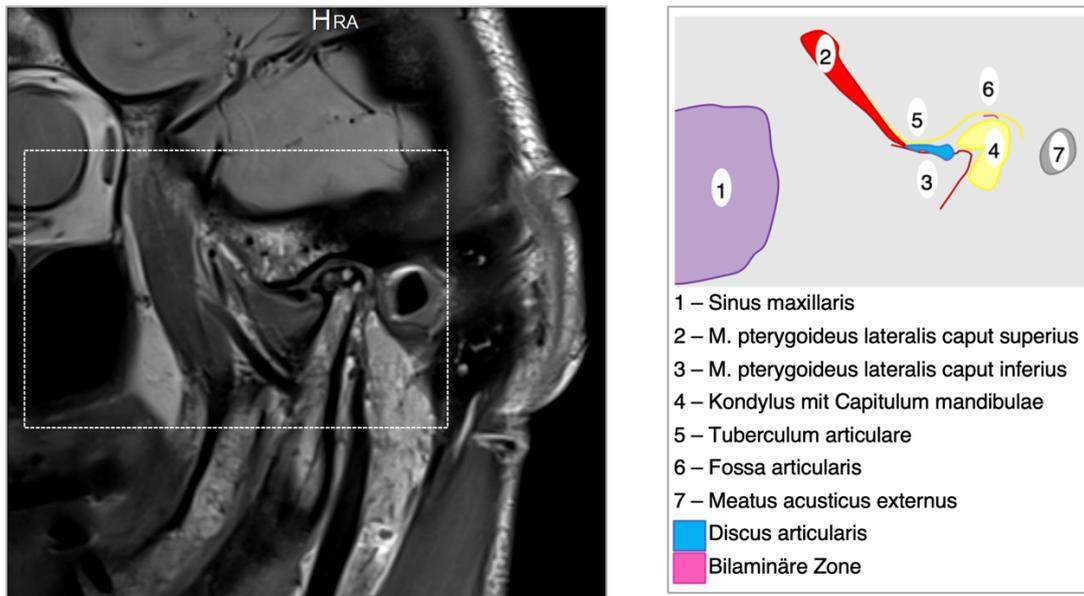


Abbildung 9: Beispiel 5 – Magnetresonanztomografie-(MRT)-Aufnahme des Kiefergelenks (KG) eines Militärluftfahrzeugführers (MLFF) in sagittaler Ansicht (links) und schematische Darstellung des KG (gestrichelte Umrandung; rechts)

Befund: Multiple Geröllzysten im KG, die einer KG-Arthrose entsprechen, sowie eine totale anteriore Diskusverlagerung (ADV), Deformation des KG und Zerstörung der bilaminären Zone. *M.* = *Musculus*

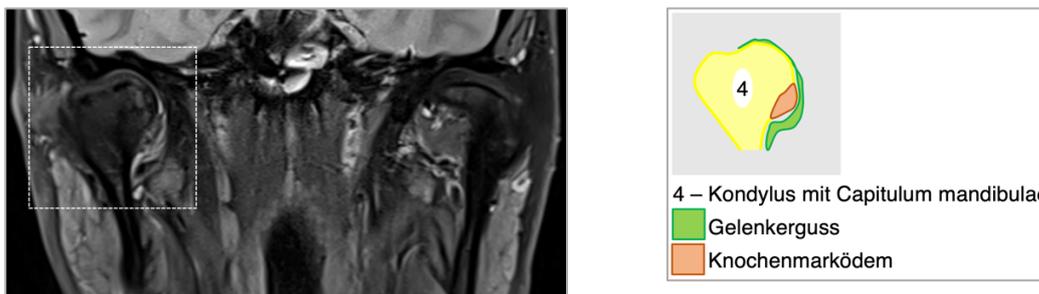


Abbildung 10: Beispiel 6 – Magnetresonanztomografie-(MRT)-Aufnahme des Kiefergelenks (KG) eines Militärluftfahrzeugführers (MLFF), Ansicht von coronal (links) und schematische Darstellung des KG (gestrichelte Umrandung; rechts)

Befund: Flaues Knochenmarködem rechts, das einer KG-Arthrose entspricht, sowie ein Gelenkerguss und eine KG-Deformation ipsilateral.

Ausgewertet wurden die Häufigkeit der einzelnen CMD-Schäden pro KG und die Summe der Schäden für jeden MLFF in Abhängigkeit der absolvierten Flugstunden (metrisch). Für die Erhebung, Dokumentation und Auswertung der MRT-Daten war das Dezernat Radiologie des Zentrums verantwortlich.

Im Fachbereich der Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde erfolgte eine Bestimmung der Anzahl positiver Parameter des CMD-Screenings, eine qualitative Analyse dieser positiven Parameter, eine Bestimmung des Stresslevels auf einer Skala von 0–10 (10 entspricht dem höchsten Wert) sowie eine Dokumentation durchgeführter kieferorthopädischer Behandlungen, der Verzahnung Angle-Klasse II, III oder beide sowie des Vorliegens von prothetischem Zahnersatz. Weitere Variablen waren die Waist-to-hip-Ratio (InBody-Körperanalyse) und das Vorkommen von Unfällen (kategoriale Variable). Beide wurden durch das Dezernat Orthopädie am Zentrum verblindet erhoben. Der Nikotinkonsum und ein Tinnitus aurium (kategoriale Variable) wurden durch den Fachbereich Hals-, Nasen-, Ohrenheilkunde verblindet bestimmt. Weiterhin wurden die Variablen Alter in Jahren (metrisch) und Flugunfähigkeit (kategorial) verwendet.

## **4.5 Fall-Kontroll-Studie**

### **4.5.1 Fallkollektiv**

Probanden mit folgenden Kriterien wurden in die Fallgruppe der Fall-Kontroll-Studie eingeschlossen:

- gesunde männliche Probanden,
- CMD-Screening in mindestens zwei Parametern positiv (siehe Kapitel 4.1.2),
- WFV II und
- Flugerfahrung im Militärdienst.

### **4.5.2 Kontrollkollektiv**

Probanden mit folgenden Kriterien wurden in die Kontrollgruppe der Fall-Kontroll-Studie eingeschlossen:

- gesunde männliche Probanden,
- CMD-Screening in weniger als zwei Parametern positiv (siehe Kapitel 4.1.2),
- WFV II und
- Flugerfahrung im Militärdienst.

### 4.5.3 Ausschlusskriterien

Probanden mit folgenden Kriterien wurden aus der Fall-Kontroll-Studie ausgeschlossen:

- 17 Jahre alt und jünger,
- zivile Erstbewerber und
- stattgehabte Operation am Kiefergelenk.

### 4.5.4 Konzept

Bei der Untersuchung handelte es sich um eine retrospektive monozentrische 1:1 gepaarte Fall-Kontroll-Studie. Den 91 MLFF mit CMD-Diagnose (Fallgruppe) wurden 91 craniomandibulär-gesunden MLFF (Kontrollgruppe) gegenübergestellt. Die Kontrollen wurden verblindet in die Studie aufgenommen. Für alle Fachbereiche – mit Ausnahme der Zahn-, Mund und Kieferheilkunde – war das Studienkonzept doppelt verblindet. In den Gruppen stimmten folgende Merkmale überein:

- männliches Geschlecht,
- Alter,
- WFV II,
- Flugzeugtyp mit genauem Flugzeugmodell und
- Anzahl Flugstunden.

Durch dieses Vorgehen sollte sichergestellt werden, dass auftretende Unterschiede zwischen beiden Gruppen auf die Existenz von CMD zurückführbar waren. Entsprechend dem Flugzeugtyp wurden in der Fall- und Kontrollgruppe Subgruppen (HP, PP und SP) gebildet (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Militärluftfahrzeugführer (MLFF) der Fall- und Kontrollgruppe nach Flugzeugtyp

Flugzeugtyp der MLFF	HP		PP		SP		Gesamt <i>N</i>
	Abkürzung	<i>n</i>	Abkürzung	<i>n</i>	Abkürzung	<i>n</i>	
Fallgruppe	HP_1	41	PP_1	26	SP_1	24	91
Kontrollgruppe	HP_0	41	PP_0	26	SP_0	24	91
Gesamt	HP_N	82	PP_N	52	SP_N	48	182

Anmerkung: HP = Hubschrauberpilot, PP = Propellerpilot, SP = Strahlflugzeugpilot

#### 4.5.5 Evaluation der Fall-Kontroll-Studie

In einer 1:4 gematchten Fall-Kontroll-Studie wurde die Kontrollgruppe (siehe Kapitel 4.5.2) um 273 Kontrollpartner erweitert und die 1:1-Paarung bei (annähernd) statistisch signifikanten Ergebnissen überprüft. Den 91 MLFF mit CMD-Diagnose (Fallgruppe) wurden 364 craniomandibulär-gesunden MLFF (große Kontrollgruppe) gegenübergestellt. In den Gruppen stimmten folgende Merkmale überein:

- männliches Geschlecht,
- WFV II und
- Flugzeugtyp.

Weiter stimmten folgende Merkmale weitestgehend überein:

- Alter,
- Flugzeugmodell und
- Anzahl Flugstunden.

#### 4.5.6 Erhebung der Variablen

Im Rahmen der Fall-Kontrollstudie wurden mögliche Korrelationen des Auftretens einer CMD bzw. CMD-assoziierter Komorbiditäten mit verschiedenen Variablen untersucht.

**CMD vs. Kieferorthopädische Behandlung & Bruxismus:** Die kategoriale Variable „kieferorthopädische Behandlung bei Bruxismus“ wurde verblindet durch den Fachbereich der Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde erhoben. Die kieferorthopädische Behandlung umfasste dabei abgeschlossene Therapiemaßnahmen von festen oder losen Zahnspangen.

**CMD vs. Zahnhartsubstanz- & Parodontaldefekte:** Die kategorialen Variablen Abrasion, Rezession, Erosion, Haarrisse sowie keilförmige Defekte mit Zahnfleischfüllungen insgesamt wurden verblindet durch den Fachbereich der Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde erhoben. Die folgende Abbildung 11 zeigt beispielhaft die zahnklinische Diagnostik mittels 3Shape TRIOS® Intraoralscanner bei einem MLFF.

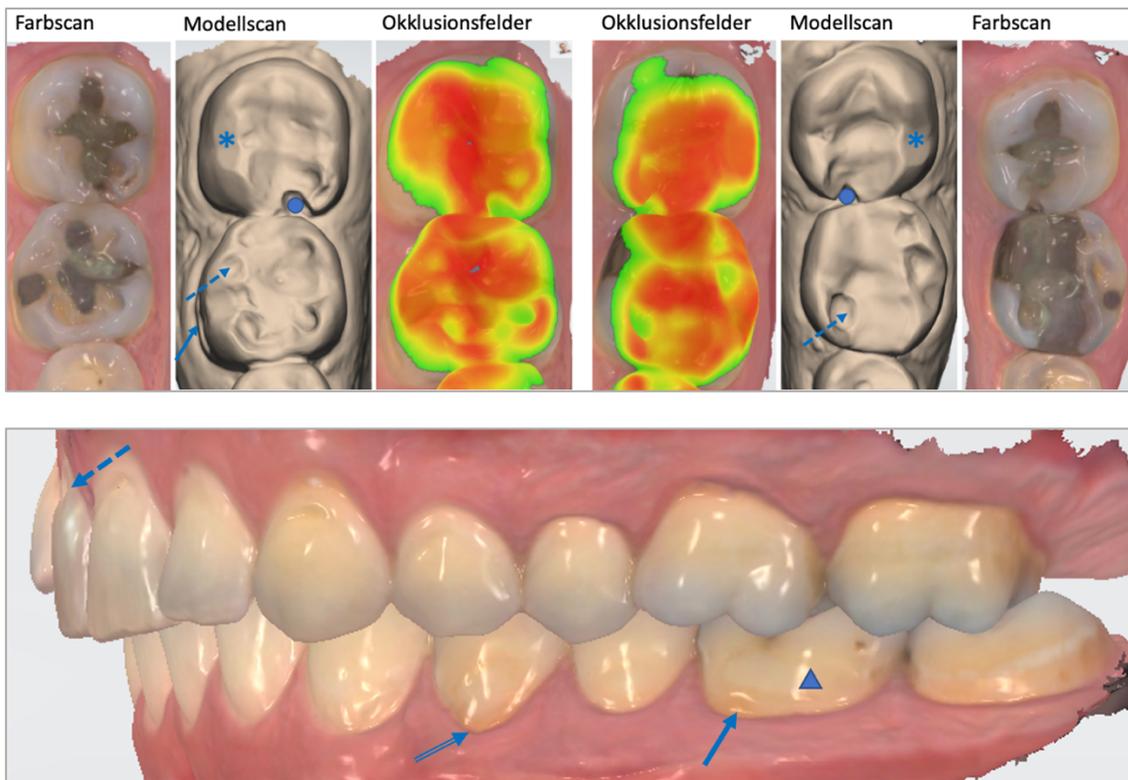


Abbildung 11: Intraoralscan regio 46–47 (links) und 36–37 (rechts) in okklusaler Ansicht (oben) und Intraoralscan der geschlossenen linken Kieferhälfte in sagittaler Ansicht (unten) eines Strahlflugzeupiloten (SP) nach 2900 Flugstunden

Oben: durchgezogene Pfeile = keilförmige Defekte, gestrichelte Pfeile = Erosionen, Sternchen = Abrasionen; Kreis = Schmelz-Dentin-Frakturen  
 Unten: durchgezogener Pfeil = keilförmiger Defekt, gestrichelter Pfeil = Erosion, Dreieck = Kompositfüllung am Zahnhals, Pfeil mit Doppelstrich = Rezession.

**CMD vs. Prothetik:** Die metrische Variable Anzahl an prothetischem Zahnersatz wurde verblindet durch den Fachbereich der Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde erfasst. Dazu zählten Einlagefüllungen, Einzelzahnkronen, Konuskronen, Suprakonstruktionen, Brückenpfeiler, Zwischenglieder und Anhänger einer Brücke.

**CMD-assozierte Komorbiditäten vs. Flugunfähigkeit:** Die Variablen Flugunfähigkeit und CMD-assozierte Komorbiditäten wurden durch den jeweiligen Fachbereich verblindet erhoben (siehe Tabelle 2). Die medizinischen Diagnosen waren allesamt kategorial mit Ausnahme der metrischen Variable Rückenschmerzen. Für die Mediationsanalyse wurde die Variable anschließend dichotomisiert.

Tabelle 2: Craniomandibuläre Dysfunktion (CMD) – assoziierte Komorbiditäten [1, 18, 19, 24, 28, 44, 51, 52, 66, 69, 89, 112, 123, 127, 134, 204, 205, 226, 231, 233, 234]

Fachbereich	ICD-Code	Medizinische Diagnose
Neurologie/Psychiatrie, neurologisch	G43, G44, G50, G53, R51	Kopfschmerzsyndrome
	R90.8	Sonstige abnorme Befunde bei der bildgebenden Diagnostik des Zentralnervensystems (ZNS)
Neurologie/Psychiatrie, psychiatrisch	F32	Depressionen
	F41	Angststörungen
	F51	Nichtorganische Schlafstörungen
	G47	Schlafstörungen
	Z72.0	Probleme mit Bezug auf: Konsum von Alkohol, Tabak, Arzneimitteln oder Drogen
Hals-, Nasen-, Ohrenheilkunde	H81.1	Benigner paroxysmaler Schwindel
	H93.1	Tinnitus aurium
	H91.9	Hörschwierigkeiten
	J31	Chronische Rhinitis
	J45.9	Asthma
	R06.5	Schnarchen
Innere Medizin	R94.3	Abnorme Ergebnisse von kardiovaskulären Funktionsprüfungen
	K58	Reizdarmsyndrom
	E00–E07	Schilddrüsenfunktionsstörung
Augenheilkunde	H50	Sonstiger Strabismus
	H51	Sonstige Störungen der Blickbewegungen
	H53	Sehstörungen
	E50.1, E50.6	Xerophthalmie
Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde	-	Fehlende erste und zweite Molaren
Orthopädie	M41.9	Skoliose
	M42.1	Osteochondrose der Wirbelsäule
	M15–M19	Osteoarthritis
	M47	Spondylose
	M51.2	Sonstige näher bezeichnete Bandscheibenverlagerung
	M54.0–M54.9	Rückenschmerzen
	-	Schulterschiefstand
	-	Beckenschiefstand
	-	Wirbelsäule seitlich nicht regelrecht
	-	Halswirbelsäule (HWS) funktional nicht regelrecht
	-	Brustwirbelsäule (BWS) funktional nicht regelrecht
	-	Lendenwirbelsäule (LWS) funktional nicht regelrecht
	-	Iliosakralgelenk (ISG) nicht reizlos
-	Gelenkschmerzen	

## 4.6 Fallzahlschätzung

Die Fallzahlen für die MRT-Studie betrug gemäß Ethik-Antrag  $n = 50$  inklusive Kontrolluntersuchungen. Für die Fall-Kontroll-Studie wurde mithilfe des Programms G\*Power 3.1.9.6 a priori die Mindestgröße der benötigten Studienpopulation berechnet [71]. Bei einem zweiseitigen  $t$ -Test mit verbundenen Stichproben mit einer Effektgröße von  $d_z = 0,5$ , einem Signifikanzniveau von 5 % ( $\alpha = 0,05$ ) und einer Power von 80 % ( $1 - \beta = 0,8$ ) betrug die Mindestgröße  $n = 34$ . Bei einer Power von 95 % ( $1 - \beta = 0,95$ ) lag die Mindestgröße des Stichprobenumfangs bei  $n = 54$ .

## 4.7 Statistische Analyse

Die Messwerte wurden mit dem Add-on von Excel, XLSTAT®, Version 2022.3.1 (Addinsoft, New York, USA) ausgewertet. Grafische Darstellungen wurden mittels Excel® erstellt.

Für quantitative, normalverteilte Größen wurden der Mittelwert und die Standardabweichung ( $M \pm SD$ ) berechnet, für nicht normalverteilte Größen der Median. Für kategoriale Größen wurden absolute und relative Häufigkeiten beschrieben. Für relevante Größen wurden außerdem 95 %-Konfidenzintervalle (KI) berechnet. Vor der statistischen Analyse wurden die anonymisierten Daten auf Vollständigkeit und Plausibilität überprüft.

Die Normalverteilung quantitativer Variablen wurde mittels Q-Q-Diagramm geprüft. Bei Vorliegen einer Normalverteilung wurde der Zwei-Stichproben- $t$ -Test für verbundene Stichproben verwendet, bei nicht-normalverteilten, verbundenen, metrischen Daten der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test und bei nicht-parametrischen, unverbundenen Stichproben der Mann-Whitney-U-Test. Die Effektstärke für den Zusammenhang zwischen zwei parametrischen Variablen wurde über den Korrelationskoeffizienten nach Pearson berechnet. Der Korrelationskoeffizient  $r$  wurde nach Cohen (1988) interpretiert: Ein  $r \geq 0,10$  entspricht einer geringen, ein  $r \geq 0,30$  einer mittleren und ein  $r \geq 0,50$  einer starken Korrelation. [49].

Zum Vergleich kategorialer Variablen wurde der McNemar-Test für verbundene Stichproben durchgeführt. Anschließend wurde die Effektstärke über den Cohen's  $g$  (1988), die Odds Ratio ( $OR$ ) sowie die Statistische Power mit Hilfe von G\*Power bestimmt. Der Effekt wurde bei einem Cohen's  $g$  zwischen 0,05 und  $< 0,15$  als klein,

zwischen 0,15 und  $< 0,25$  als mittel und ab 0,25 als groß interpretiert [49]. Die Teststärke wurde mit einer Untergrenze von 0,8 festgelegt. Zum Vergleich kategorialer Variablen wurden in Vierfeldertafeln für unverbundene Stichproben der Exakte Fisher-Test genutzt und die *OR* und Statistische Power berechnet. Bei (annähernd) statistisch signifikanten Ergebnissen der 1:1-Paarung von kategorialen Variablen verbundener Stichproben wurde der Cochran-Q-Test im 1:4-Matching durchgeführt.

Bei den eingesetzten linearen und logistischen Regressionsanalysen wurden die Voraussetzungen vorab überprüft. Zur Bestimmung des Prädiktoreffekts auf eine dichotome abhängige Variable diente eine binäre logistische Regression. Zur Steigerung der Aussagekraft der Regressionsanalyse wurden zusätzlich Korrelationen zwischen der kategorialen Zielvariable und möglichen Kovariaten ermittelt. Bei metrischen Kovariaten wurde die punktbiseriale Korrelation und bei kategorialen Kovariaten der exakte Test nach Fisher verwendet. Bei annähernder Signifikanz ( $p < 0,1$ ) wurden diese als Kontrollvariablen definiert. Die Ergebnisse des die Kontrollvariablen enthaltenden finalen logistischen Regressionsmodells wurden mit den Ergebnissen des ersten Modells verglichen.

Weiter wurde eine Mediationsanalyse zur Ermittlung des indirekten Effekts einer unabhängigen, kategorialen Variablen (CMD) auf eine kategoriale, abhängige Variable (WFV) über einen metrischen Mediator (Anzahl der CMD-Komorbiditäten) durchgeführt. Dazu kamen verschiedene Analysetechniken zum Einsatz: eine lineare Regressionsanalyse zwischen unabhängiger Variable und Mediator und binäre logistische Regressionsanalysen zwischen unabhängiger und abhängiger Variable sowie zwischen unabhängiger Variable mit Mediator und abhängiger Variable. Die Ergebnisse des die Kontrollvariablen enthaltenden finalen logistischen Regressionsmodells wurden mit den Ergebnissen des Modells zwischen unabhängiger Variable mit Mediator und abhängiger Variable verglichen. Der indirekte Effekt selbst wurde bei Vorliegen einer Normalverteilung durch den Sobel-Test auf Signifikanz getestet.

Das Signifikanzniveau wurde in allen Analysen bei 5 % ( $\alpha = 0,05$ ) festgesetzt.

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Querschnittsstudie

#### 5.1.1 Allgemeine Charakteristika des Gesamtkollektivs

Vom 27. September 2018 bis 27. März 2020 wurden über 69,1 % aller MLFF der Bundeswehr in der Abteilung Klinische Flugmedizin des ZentrLuRMedLw auf WFV II untersucht. Davon waren 1409 für die vorliegende Querschnittsstudie relevant, darunter 45 % ( $n = 640$ ) HP, 21 % ( $n = 299$ ) PP und 33 % ( $n = 470$ ) SP. Die CMD-Gesamtprävalenz betrug 6,5 % ( $n = 91$ ). Die CMD-Prävalenz bei den HP betrug 6,41 % ( $n = 41$ ), bei PP 8,69 % ( $n = 26$ ) und bei SP 5,11 % ( $n = 24$ ).

#### 5.1.2 Flughöhe in der Fall- und Kontrollgruppe

Bei der Analyse möglicher Unterschiede der Flughöhen bei MLFF mit und ohne CMD wurden alle männlichen MLFF ( $N = 1409$ ) berücksichtigt. Abbildung 12 zeigt die Verteilung der Flughöhe in beiden Gruppen.

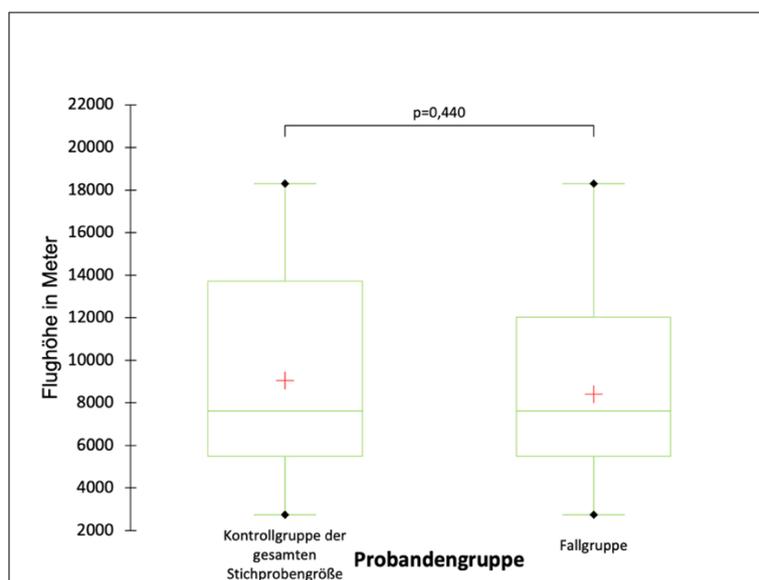


Abbildung 12: Verteilung der Verhältnisse der Flughöhe in der Fall-Kontroll-Gruppe

Die minimale Flughöhe betrug in beiden Gruppen 2,750 Kilometer (siehe Tabelle 3, Flugzeugmodell CH 53 G); die maximale Flughöhe lag bei 18,287 Kilometer (Eurofighter EF 2000). Laut Q-Q-Plots (Abbildung A30 und Abbildung A31 im Anhang) waren die

Daten in den Studiengruppen nicht normalverteilt. Da eine Transformation der Variablen keine Normalverteilung ergab, wurde zur Analyse eines potenziellen Unterschieds der Flughöhen bei MLFF mit und ohne CMD ein nicht-parametrischer Test (Mann-Whitney-U-Test) verwendet. Dabei war kein signifikanter Unterschied nachweisbar ( $Mdn = 7620$ ,  $U = 62863$ ,  $Z = 0,773$ ,  $p = 0,440$ ). Die CMD-assoziierte Dekompressionskrankheit nahm mit zunehmender Höhe nicht signifikant zu.

### 5.1.3 Flugzeugmodell in der Fall- und Kontrollgruppe

Weiter wurden mögliche Unterschiede der Nutzung verschiedener Flugzeugmodelle bei MLFF mit und ohne CMD analysiert (siehe Tabelle 3). HP, die einen „Sea Lynx MK88A“ (Flughöhe von 3,660 Kilometer) bzw. „Bell 206 B JetRanger“ (6,000 Kilometer) flogen, PP, die in einer „P-3C Orion“ (8,600 Kilometer) eingesetzt waren, sowie SP mit dem Modell „A 319 CJ“ (12,134 Kilometer) zeigten eine mehr als doppelt so hohe Wahrscheinlichkeit ( $OR > 2$ ) für ein CMD. Um zu überprüfen, ob bei Piloten dieser Flugzeugmodelle signifikant häufiger CMD auftraten als im Gesamtkollektiv wurde der Exakte Fisher-Test durchgeführt (siehe Tabelle 4).

Die HP des „Sea Lynx MK88A“ unterschieden sich signifikant hinsichtlich des Auftretens von CMD ( $\chi^2(1) = 4,907$ ,  $p = 0,045$ ,  $OR = 2,89$ ,  $1 - \beta = 0,999$ ) von der Gesamtkontrollgruppe. Gleiches galt für die PP des Modells „P-3C Orion“ ( $\chi^2(1) = 11,791$ ,  $p = 0,003$ ,  $OR = 5,40$ ,  $1 - \beta = 1,0$ ). Dagegen war bei den HP des „Bell 206 B JetRanger“ und den SP des „A 319 CJ“ kein signifikanter Unterschied hinsichtlich des Auftretens von CMD im Vergleich zur Gesamtkontrollgruppe nachweisbar.

Tabelle 3: Verteilung der Flugzeugmodelle in der Kontrollgruppe der gesamten Stichprobe ( $N = 1409$ ) ohne Craniomandibuläre Dysfunktion (CMD) und Fallgruppe (mit CMD)

MLFF	Flugzeugmodell	Flug- höhe in km	N	%	CMD				OR
					Fallgruppe		Kontrollgruppe		
					n	%	n	%	
HP	CH 53 G	2,750	110	7,8	3	3,3	107	8,1	0,39
	Cougar AS 532	2,895	13	0,9	1	1,1	12	0,9	1,21
	Sea King Mk 41	3,048	26	1,8	2	2,2	24	1,8	1,21
	<b>Sea Lynx MK88A</b>	<b>3,600</b>	<b>31</b>	<b>2,2</b>	<b>5</b>	<b>5,5</b>	<b>26</b>	<b>2,0</b>	<b>2,89</b>
	UH Tiger	4,000	77	5,5	6	6,6	71	5,4	1,24
	Bell UH 1D	4,145	68	4,8	4	4,4	64	4,9	0,90
	BO 105	5,181	11	0,8	1	1,1	10	0,8	1,45
	UH 72	5,240	5	0,4	0	0,0	5	0,4	0
	<b>Bell 206 B JetRanger</b>	<b>6,000</b>	<b>15</b>	<b>1,1</b>	<b>2</b>	<b>2,2</b>	<b>13</b>	<b>1,0</b>	<b>2,26</b>
	NH-90	6,005	91	6,5	3	3,3	88	6,7	0,48
	H145M	6,060	32	2,3	1	1,1	31	2,4	0,46
	EC 135	6,095	156	11,1	13	14,3	143	10,8	1,37
	EC 145 T2	6,100	5	0,4	0	0,0	5	0,4	0
	PP	Bonanza BE 33	5,486	22	1,6	2	2,2	20	1,5
Grob G-120 A		7,620	63	4,5	5	5,5	58	4,4	1,26
Transall C-160		8,230	67	4,8	7	7,7	60	4,6	1,75
DO 228		8,534	16	1,1	1	1,1	15	1,1	0,97
<b>P-3 C Orion</b>		<b>8,600</b>	<b>23</b>	<b>1,6</b>	<b>6</b>	<b>6,6</b>	<b>17</b>	<b>1,3</b>	<b>5,40</b>
Breguet Atlantic		9,145	3	0,2	0	0,0	3	0,2	0
A 400 M		9,440	101	7,2	5	5,5	96	7,3	0,74
PA 42		10,060	2	0,1	0	0,0	2	0,2	0
T 6A	10,670	2	0,1	0	0,0	2	0,2	0	
SP	E 3 A	9,150	13	0,9	0	0,0	13	1,0	0
	T 45 C	9,150	2	0,1	0	0,0	2	0,2	0
	A 320/340	11,900	18	1,3	1	1,1	17	1,3	0,85
	<b>A 319 CJ</b>	<b>12,134</b>	<b>6</b>	<b>0,4</b>	<b>1</b>	<b>1,1</b>	<b>5</b>	<b>0,4</b>	<b>2,92</b>
	A 319/320/340	12,134	1	0,1	0	0,0	1	0,1	0
	A 319/340	12,134	6	0,4	0	0,0	6	0,5	0
	A 310	12,500	42	3,0	4	4,4	38	2,9	1,55
	A 340	12,600	2	0,1	0	0,0	2	0,2	0
	T 37	13,700	1	0,1	0	0,0	1	0,1	0
	Cessna C 525	13,716	51	3,6	3	3,3	48	3,6	0,90
	Alpha Jet	14,630	1	0,1	0	0,0	1	0,1	0
	MRCA Tornado/ PA 200	15,240	153	10,9	12	13,2	141	10,7	1,27
	T 38	15,240	16	1,1	0	0,0	16	1,2	0
	F 16	15,250	1	0,1	0	0,0	1	0,1	0
	Falcon 900	15,500	2	0,1	0	0,0	2	0,2	0
	Global 5000	15,545	21	1,5	0	0,0	21	1,6	0
Phantom F4 F	18,182	11	0,8	0	0,0	11	0,8	0	
Eurofighter 2000	18,287	123	8,7	3	3,3	120	9,1	0,34	
gesamt			1409	100	91	100	1318	100	

Anmerkung: Fett hinterlegte Flugzeugmodelle mit  $OR > 2$ . HP = Hubschrauberpilot, km = Kilometer, MLFF = Militärluftfahrzeugführer, OR = Odds Ratio, PP = Propellerpilot, SP = Strahlflugzeugpilot.

Tabelle 4: Statistische Analyse der Häufigkeit des Auftretens Craniomandibulärer Dysfunktionen (CMD) – Militärluftfahrzeugführer (MLFF) von Flugzeugmodellen mit Odds Ratio (OR) > 2 (Fallgruppe) vs. Gesamtkontrollgruppe (Gesamt-KGr)

Variable	Kontingenztabelle für den Exakten Fisher-Test mit absoluten und relativen Zahlen					$\chi^2$	$p$	OR	Power (1 - $\beta$ )	
Sea Lynx MK88A	$N = 1409$		Fallgruppe				4,907	0,045*	2,9	0,999
			ja		nein					
	Häufigkeit		$n$	%	$n$	%				
	Gesamt-KGr	ja	5	16,1	26	83,9				
		nein	86	6,2	1292	93,8				
Bell 206 B Jet- Ranger	$N = 1409$		Fallgruppe				1,186	0,252	2,3	0,999
			ja		nein					
	Häufigkeit		$n$	%	$n$	%				
	Gesamt-KGr	ja	2	16,7	13	83,3				
		nein	89	6,4	1305	93,6				
P-3C Orion	$N = 1409$		Fallgruppe				11,791	0,003**	5,4	1,0
			ja		nein					
	Häufigkeit		$n$	%	$n$	%				
	Gesamt-KGr	ja	6	26,1	17	73,9				
		nein	85	6,1	1301	93,9				
A 319 CJ	$N = 1409$		Fallgruppe				0,035	0,331	2,9	0,999
			ja		nein					
	Häufigkeit		$n$	%	$n$	%				
	Gesamt-KGr	ja	1	16,7	5	83,3				
		nein	90	6,4	1313	93,6				

Anmerkung: \*  $p < 0,05$ , \*\*  $p < 0,01$ .

## 5.2 MRT-Studie

### 5.2.1 Allgemeine Charakteristika

Vom 27. September 2018 bis 27. März 2020 wurden 48 KG von 24 MLFF in einer MRT-Studie in der Abteilung Klinische Flugmedizin des ZentrLuRMedLw untersucht. Die Charakteristika der 24 MLFF (HP:  $n = 9$ , PP:  $n = 10$ , SP:  $n = 5$ ) der MRT-Fallgruppe sind in Tabelle A14 im Anhang zusammengefasst. Im Mittel zeigten die MLFF 4,0 Parameter, die für einen CMD-Befund sprachen, und ein Stresslevel von 6,6. Die Anzahl der absolvierten Flugstunden betrug im Mittel 2058,6 Flugstunden (20–7371 Flugstunden).

### 5.2.2 Abnorme MRT-Befunde des KG

Im Mittel betrug die Anzahl abnormer MRT-Befunde pro MLFF  $6,6 \pm 1,8$ . Die diagnostizierten abnormen MRT-Befunde des KG-Apparats sind in Abbildung 13 grafisch dargestellt. Uni- und bilateral traten in der Fallgruppe die partielle oder totale ADV mit 70,8 % am häufigsten auf, davon 97,1 % mit Reposition und 58,3 % mit KG-Deformation. Im Unterschied zur statischen Aufnahme (unauffällig) zeigte ein MLFF in der dynamischen Aufnahme der Mundöffnung ein weit über das *Tuberculum articulare* schießendes KG (hypermobiles Gelenk) bei generell geringerer Bildqualität.

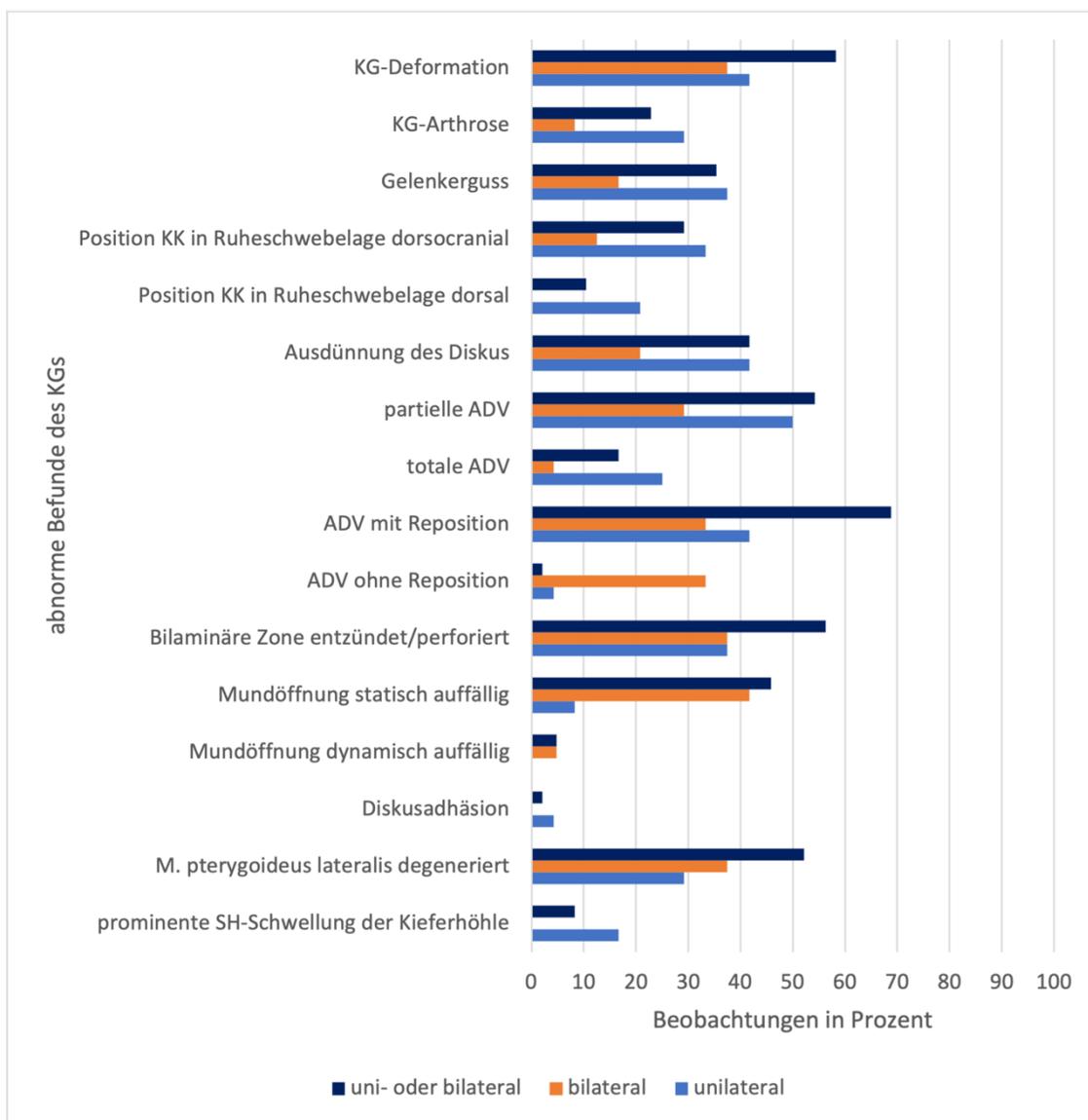


Abbildung 13: Häufigkeit abnormer Magnetresonanztomografie-(MRT)-Befunde der Kiefergelenke (KG) in der MRT-Fallgruppe mit Craniomandibulärer Dysfunktion ( $n = 48$  KG von 24 Militärluftfahrzeugführern (MLFF)<sup>a</sup>)

Anmerkung: ADV = Anteriore Diskusverlagerung, KK = Kiefergelenkkopf, M. = Musculus, SH-Schwellung = Schleimhautschwellung. <sup>a</sup> Messung „Mundöffnung dynamisch“ von 21 MLFF ( $n = 42$  KG)

### 5.2.3 Potenzielle Korrelation abnormer MRT-Befunde mit der Anzahl der Flugstunden

Zur Analyse potenzieller Korrelationen zwischen der Anzahl an Flugstunden und den abnormen MRT-Befunden wurde die Variable Flugstunde mit einem Exponent 0,4 versehen. Diese Transformation führte gemäß Q-Q-Plot (siehe Abbildung A32 im Anhang) zu einer Normalverteilung. Laut Korrelationsanalyse nach Pearson korrelierte das Auftreten abnormer MRT-Befunde insgesamt nicht mit der Anzahl der Flugstunden ( $r = 0,218$ ,  $p = 0,306$ ). Die mögliche Korrelation zwischen den verschiedenen diagnostizierten CMD-Schäden und der Anzahl der Flugstunde wurde mit Hilfe der punktbiserialen Korrelation getestet (siehe Tabelle A15 im Anhang). Nur das Auftreten einer unilateralen KG-Arthrose zeigte eine signifikante Assoziation mit der Anzahl der Flugstunden (positive Korrelation mittlerer Effektstärke  $r = 0,492$ ,  $p = 0,013$ ). Abbildung 14 verdeutlicht die Unterschiede der Anzahl an absolvierten Flugstunden bei den MRT-Probanden mit und ohne unilaterale KG-Arthrose.

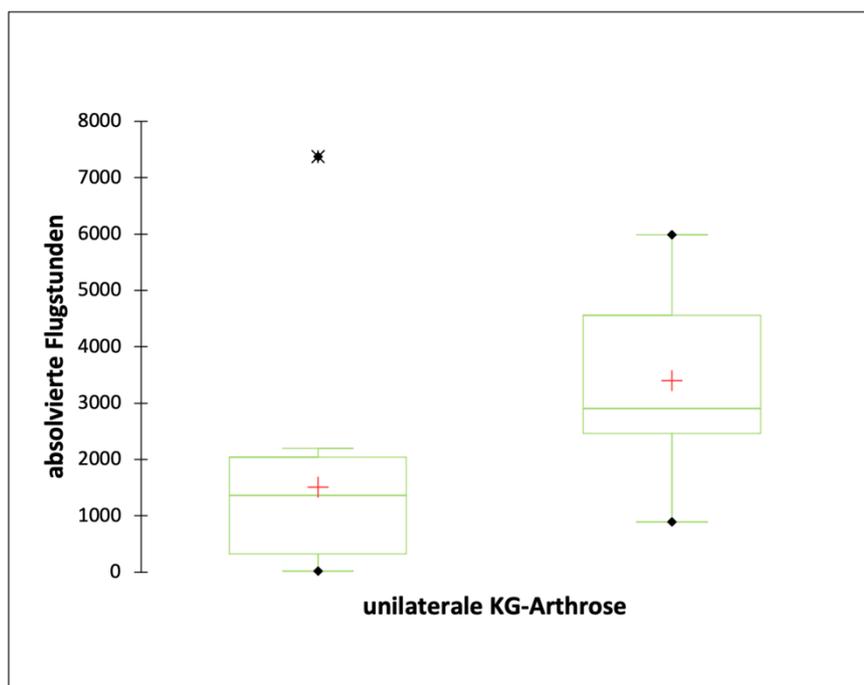


Abbildung 14: Verteilung der Flugstundenzahl bei den Magnetresonanztomografie-(MRT)-Probanden ( $n = 24$ ) für Fälle ohne (links) und mit (rechts) unilateraler Kiefergelenk-(KG)-Arthrose

Weiter wurde die biserial Korrelation zwischen den diagnostizierten CMD-Schäden und der Anzahl der Flugstunde in den Subgruppen (HP, PP, SP) berechnet. Bei den HP bestand eine signifikante Korrelation mit starkem Effekt bei ausreichender Teststärke

( $r = 0,755$ ,  $p = 0,009$ ,  $1 - \beta = 0,84$ ). Dagegen verfehlte die Korrelation bei den PP die Signifikanz knapp bei unzureichender Teststärke ( $r = 0,625$ ,  $p = 0,055$ ,  $1 - \beta = 0,60$ ). Bei den SP bestand keine Signifikanz bei unzureichender Teststärke ( $r = 0,498$ ,  $p = 0,386$ ,  $1 - \beta = 0,15$ ).

Um den Beitrag des Prädiktors Flugstunden an der Entstehung einer unilateralen KG-Arthrose bei CMD-Betroffenen zu ermitteln, wurde eine binäre logistische Regression mit unilateraler KG-Arthrose als abhängige Variable durchgeführt (Voraussetzungen siehe Tabelle A18 im Anhang).

Tabelle 5: Binominale logistische Regression des Einflusses der Flugstunden auf das Auftreten einer unilateralen Kiefergelenk-(KG)-Arthrose in der Magnetresonanztomografie-Fallgruppe ( $n = 24$ ) – Modell 1 ohne potenzielle Störvariablen und Modell 2 mit potenziellen Störvariablen

Variable	<i>B</i>	<i>SEM</i>	Wald	<i>p</i>	<i>OR</i>	95 %-KI für <i>OR</i>	
						Untere Grenze	Obere Grenze
Modell 1							
Achsenabschnitt	-4,699	2,025	5,385	0,020*	-	-	-
Flugstunden <sup>a</sup>	0,184	0,089	4,252	0,039*	1,202	1,009	1,431
Modell 2							
Achsenabschnitt	-5,196	5,612	0,857	0,355	-	-	-
Flugstunden <sup>a</sup>	0,490	0,227	4,652	0,031*	1,632	1,046	2,548
Alter	-0,132	0,121	1,183	0,277	0,876	0,691	1,112
Angle Kl. II/III	-4,393	2,551	2,966	0,085	0,012	0,000	1,834
Deformation KG bilateral	3,549	2,112	2,824	0,093	34,778	0,554	2182,422

Anmerkung: Freiheitsgrade (*df*) für alle Wald-Statistiken von Modell 1  $df = 1$ , für Modell 2  $df = 4$ . *B* = Regressionskoeffizient, KI = Konfidenzintervall, Kl. = Klasse, *OR* = Odds Ratio, *SEM* = Standardfehler des Mittelwerts. <sup>a</sup> Transformiert mittels Exponenten 0,4. \*  $p < 0,05$ .

Wie aus Modell 1 der Tabelle 5 hervorgeht, war das Regressionsmodell statistisch signifikant,  $\chi^2(1) = 4,252$ ,  $p = 0,039$ , mit einer Varianzaufklärung von Nagelkerke  $R^2 = 0,337$  und einem *OR* von 1,202. In Modell 2 wurden Kontroll- und Störvariablen berücksichtigt (Identifikation siehe Tabelle A16 sowie Tabelle A17 im Anhang). Das finale Modell kontrolliert auf Alter in Jahren, Angle Klasse II oder III und bilaterale KG-Deformation konnte 71,7 % der Varianz des Einflusses des Prädiktors Flugstunden auf die unilaterale KG-Arthrose erklären ( $R^2(\text{Nagelkerke}) = 0,717$ ), was laut Backhaus et al.

(2006) einer sehr guten Varianzaufklärung entspricht [16]. Der Prädiktor Flugstunden zeigte in diesem Modell einen signifikanten Effekt ( $p = 0,031$ ,  $OR = 1,632$ ), während die Kontrollvariablen Alter, Angle Klasse II oder III und bilaterale KG-Deformation der KG keinen signifikanten Einfluss hatten. Zur Risikoberechnung wurde die Variable Flugstunden retransformiert. Das Risiko für MLFF mit CMD an einer unilateralen KG-Arthrose zu erkranken lag nach 100 Flugstunden um den Faktor 1,135 und nach 1000 Flugstunden um den Faktor 3,556 höher als bei MLFF ohne Flugerfahrung.

## 5.3 Fall-Kontroll-Studie

### 5.3.1 Allgemeine Charakteristika der untersuchten Stichproben

Vom 27. September 2018 bis 27. März 2020 wurden 91 CMD-erkrankte und 91 CMD-gesunde MLFF im Rahmen einer 1:1 gepaarten Fall-Kontroll-Studie in der Abteilung Klinische Flugmedizin des ZentrLuRMedLw untersucht. In der Fallgruppe waren beim CMD-Screening im Mittel 3,1 Parameter (2–5 Parameter) und in der Kontrollgruppe 0,4 Parameter (0–1 Parameter, siehe Tabelle 6) positiv.

Tabelle 6: Charakteristika der Fall- und Kontrollgruppe der Fall-Kontroll-Studie

Variable	Fallgruppe $n = 91$			Kontrollgruppe $n = 91$		
	$M$	$SD$	95 %-KI	$M$	$SD$	95 %-KI
Positive Ergebnisse im CMD-Screening	3,1	1,0	[2,9; 3,3]	0,4	0,5	[0,3; 0,5]
Alter in Jahren	40,5	9,8	[38,4; 42,5]	40,4	9,6	[38,4; 42,4]
Anzahl Flugstunden	2542,1	2024,2	[2118,2; 2966,0]	2655,4	2147,0	[2205,7; 3105,0]

*Anmerkung:* CMD = Craniomandibuläre Dysfunktion,  $M$  = Mittelwert,  $SD$  = Standardabweichung, KI = Konfidenzintervall

Abbildung 15 stellt die Ergebnisse des CMD-Screenings in der Fall- und Kontrollgruppe gegenüber. Das Merkmal „Exzentrik traumatisch“ trat mit 88,0 % in der Fallgruppe am häufigsten auf, das Merkmal „eingeschränkte Mundöffnung“ mit 16,5 % am seltensten. In der Kontrollgruppe waren KG-Geräusche mit 13,2 % am häufigsten und eine eingeschränkte Mundöffnung mit 0,0 % gar nicht vertreten.

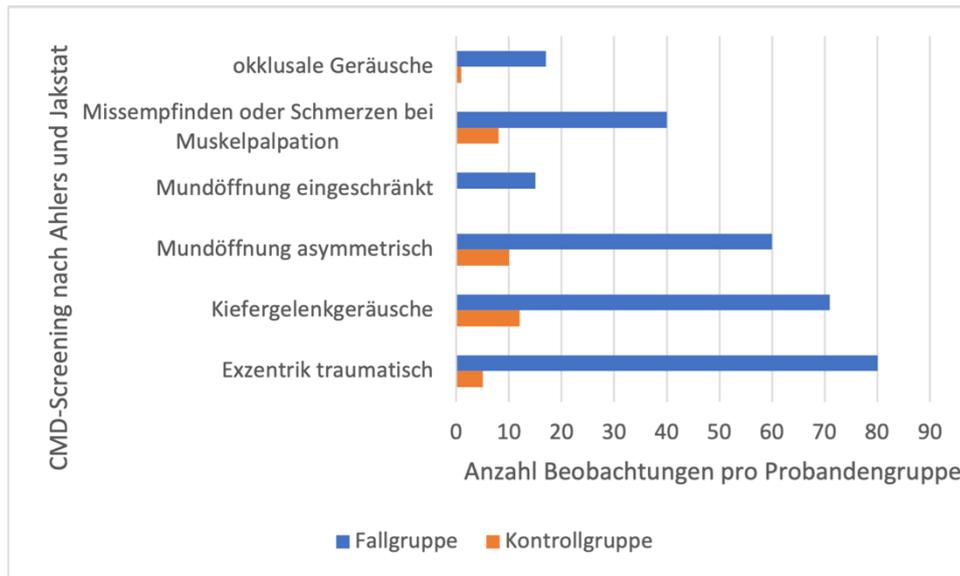


Abbildung 15: Häufigkeit des Auftretens der Parameter des Screenings auf Craniomandibuläre Dysfunktionen (CMD) in der Fall- und Kontrollgruppe der Fall-Kontroll-Studie

Das Alter der Teilnehmer betrug durchschnittlich 40,4 Jahre (20–60 Jahre). Die Altersverteilung war in der Fall- und Kontrollgruppe vergleichbar (siehe Tabelle 6). HP und SP waren durchschnittlich 41,2 Jahre und die PP 38,4 Jahre alt. Abbildung 16 verdeutlicht die parametrische Verteilung der Altersdaten in den Subgruppen.

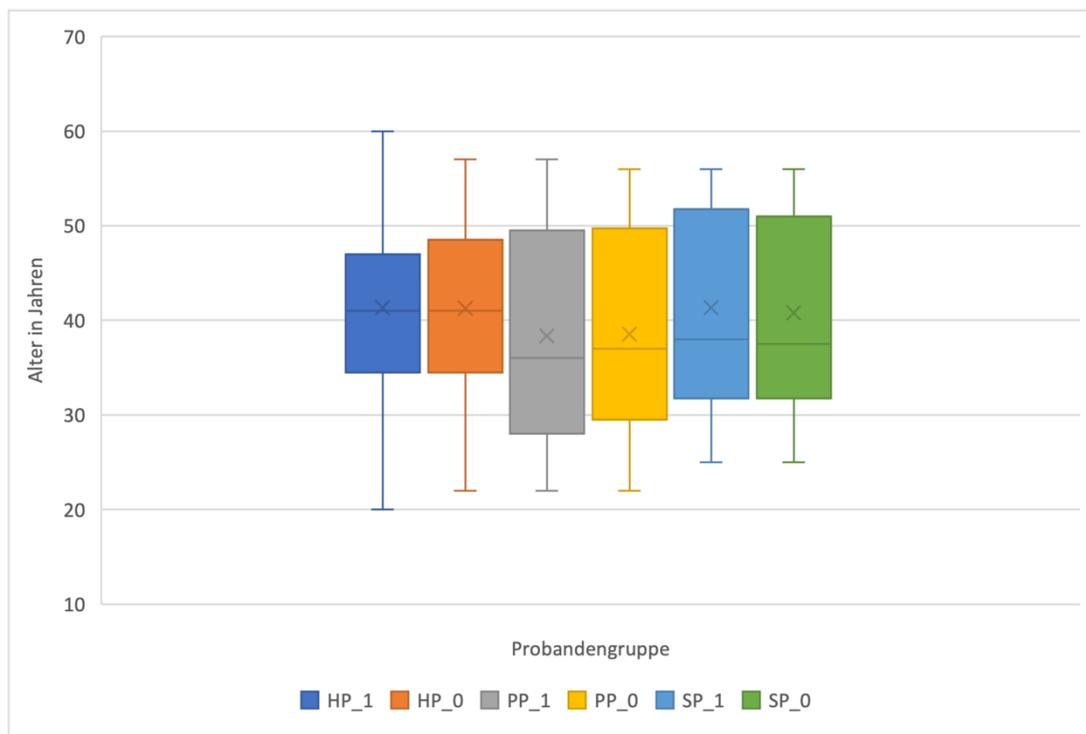


Abbildung 16: Altersverteilung in den Subgruppen der Fall- und Kontrollgruppe der Fall-Kontroll-Studie

HP = Hubschrauberpilot, PP = Propellerpilot, SP = Strahlflugzeugpilot; \_1 = Fallgruppe, \_0 = Kontrollgruppe

Die in die Analyse eingeschlossenen MLFF hatten im Mittel 2598,7 Flugstunden (20–10 870 Flugstunden) absolviert (siehe Tabelle 6). In den Subgruppen mit Ausnahme der PP der Fallgruppe traten diverse Ausreißer bezüglich der Anzahl geleisteter Flugstunden auf (siehe Abbildung A33 im Anhang). Im Median hatten die PP mit 1755 Stunden die geringste Flugstundenzahl absolviert, gefolgt von den HP mit 2175 Stunden und den SP mit 2200 Flugstunden.

### 5.3.2 CMD vs. Kieferorthopädische Behandlung & Bruxismus

Die Überprüfung potenzieller Unterschiede zwischen der Fall- und Kontrollgruppe hinsichtlich der Häufigkeit kieferorthopädischer Behandlungen bei Anwesenheit von Bruxismus erfolgte mit dem McNemar-Test für verbundene Stichproben (siehe Tabelle 7). Danach waren MLFF der Fallgruppe signifikant häufiger bei Bruxismus kieferorthopädisch behandelt worden als MLFF der Kontrollgruppe (ausreichende Teststärke, starker Effekt,  $\chi^2(1) = 15$ ,  $p < 0,001$ ,  $g = 0,5$ ,  $1 - \beta = 1$ ,  $OR > 15$ , KI nicht berechenbar).

Tabelle 7: Statistische Analyse der Häufigkeit von kieferorthopädischen Behandlungen bei Bruxismus – Fallgruppe vs. Kontrollgruppe (KGr)

Variable	Kontingenztabelle für McNemar-Test mit absoluten und relativen Zahlen				$\chi^2$	$p$	$g$	Power (1 – $\beta$ )	
	$N = 91$	Fallgruppe							
		ja		nein					
	Häufigkeit	$n$	%	$n$	%				
Kieferorthopädische Behandlung bei Bruxismus						15	< 0,001***	0,500	1,0
	KGr	ja	0	0,0	0	0,0			
		nein	15	16,5	76	83,5			

Anmerkung: \*\*\*  $p < 0,001$ .

Bei der Analyse der Subgruppen mit dem McNemar-Test (Tabelle A20 im Anhang) zeigten HP der Fallgruppe signifikant häufiger eine kieferorthopädische Behandlung bei Bruxismus als HP der Kontrollgruppe (starker Effekt, ausreichende Teststärke,  $\chi^2(1) = 7$ ,  $p = 0,016$ ,  $g = 0,5$ ,  $1 - \beta = 1$ ,  $OR > 7$ , KI nicht berechenbar). Dagegen waren die Unterschiede bei den PP ( $\chi^2(1) = 3$ ,  $p = 0,250$ ,  $g = 0,5$ ,  $1 - \beta = 1$ ,  $OR > 3$ ) und SP

( $\chi^2(1) = 5, p = 0,063, g = 0,5, 1 - \beta = 1, OR > 5$ ) nicht signifikant. In der Kontrollgruppe gab es keine Fälle mit einer kieferorthopädischen Behandlung bei Bruxismus (siehe Abbildung 17).

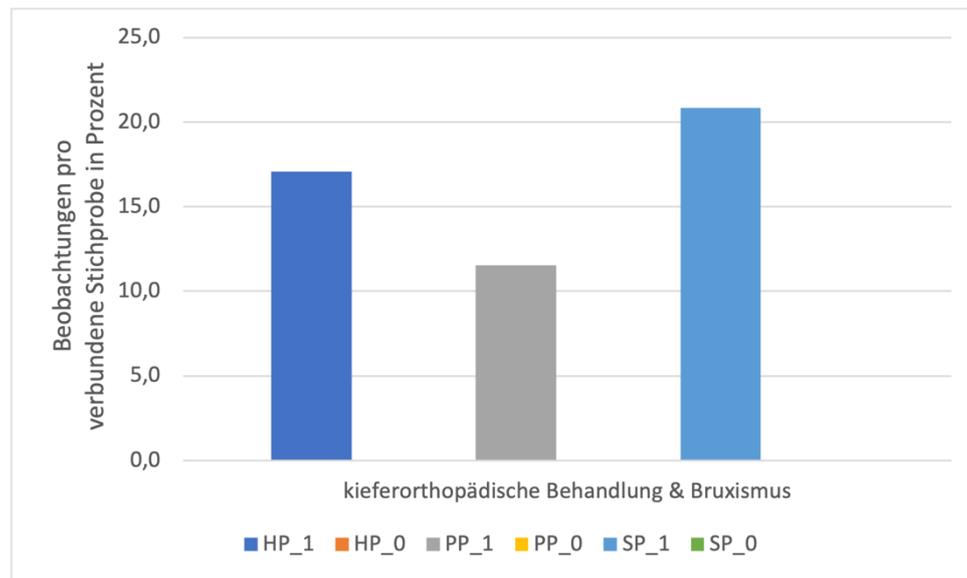


Abbildung 17: Häufigkeitsverteilung kieferorthopädischer Behandlungen bei Bruxismus in den Subgruppen der Fall- und Kontrollgruppe der Fall-Kontroll-Studie

HP = Hubschrauberpilot, PP = Propellerpilot, SP = Strahlflugzeugpilot; \_1 = Fallgruppe, \_0 = Kontrollgruppe

### 5.3.3 CMD vs. Zahnhartsubstanz- & Parodontaldefekte

Eine grafische Übersicht (siehe Abbildung 18) und die Ergebnisse der Überprüfung potenzieller Unterschiede zwischen der Fall- und Kontrollgruppe bezüglich nicht kariöser Zahnhartsubstanzdefekte und parodontaler Deformitäten mit dem McNemar-Test sind in Tabelle 8 zusammengefasst.

Signifikante Unterschiede im Sinne einer Erhöhung der Häufigkeit in der Fallgruppe mit CMD bestanden für keilförmiger Defekte bei zervikalen Kompositfüllungen (mittlerer Effekt, ausreichende Teststärke,  $\chi^2(1) = 4,840, p = 0,043, g = 0,220, 1 - \beta = 0,997, OR = 2,57, KI [1,07-6,16]$ ) und Abrasionen (starker Effekt, ausreichende Teststärke,  $\chi^2(1) = 19,314, p < 0,0001, g = 0,386, 1 - \beta = 1,000, OR = 7,75, KI [2,74-21,96]$ ). Der Unterschied zwischen der Fall- und Kontrollgruppe bei den Erosionen verfehlte die Signifikanz nur knapp. Weiter waren die Häufigkeiten von Rezessionen und Haarrisse in den Gruppen nicht signifikant verschieden (Abbildung 18 und Tabelle 8).

Tabelle 8: Statistische Analyse der Häufigkeit von nicht kariösen Zahnhartsubstanzendefekten und parodontalen Deformitäten – Fallgruppe vs. Kontrollgruppe (KGr)

Variable	Kontingenztabelle für McNemar-Test mit absoluten und relativen Zahlen				$\chi^2$	$p$	$g$	Power (1 – $\beta$ )		
Keilförmige Defekte & zervikale Kompositfüllungen	$N = 91$		Fallgruppe		4,840	0,043*	0,220	0,989		
			ja	nein						
	Häufigkeit	$n$	%	$n$					%	
	KGr	ja	2	2,2					7	7,7
		nein	18	19,8					64	70,3
Erosionen	$N = 91$		Fallgruppe		4,571	0,057	0,286	0,999		
			ja	nein						
	Häufigkeit	$n$	%	$n$					%	
	KGr	ja	0	0,0					3	3,3
		nein	11	12,1					77	84,6
Abrasionen	$N = 91$		Fallgruppe		19,314	<0,0001***	0,386	1,000		
			ja	nein						
	Häufigkeit	$n$	%	$n$					%	
	KGr	ja	26	28,6					4	4,4
		nein	31	34,1					30	33,0
Rezessionen	$N = 91$		Fallgruppe		0,273	0,728	0,045	0,108 <sup>a</sup>		
			ja	nein						
	Häufigkeit	$n$	%	$n$					%	
	KGr	ja	7	7,7					15	16,5
		nein	18	19,8					51	56,0
Haarrisse	$N = 91$		Fallgruppe		0,111	1,000	0,056	0,151 <sup>a</sup>		
			ja	nein						
	Häufigkeit	$n$	%	$n$					%	
	KGr	ja	1	1,1					5	5,5
		nein	4	4,4					81	89,0

Anmerkung: <sup>a</sup> Unzureichende Teststärke. \*  $p < 0,05$ , \*\*\*  $p < 0,001$ .

Mögliche Unterschiede bei keilförmigen Defekten bei zervikalen Kompositfüllungen und bei Abrasionen wurden für die Subgruppen (HP, PP, SP) mittels McNemar-Tests kalkuliert.

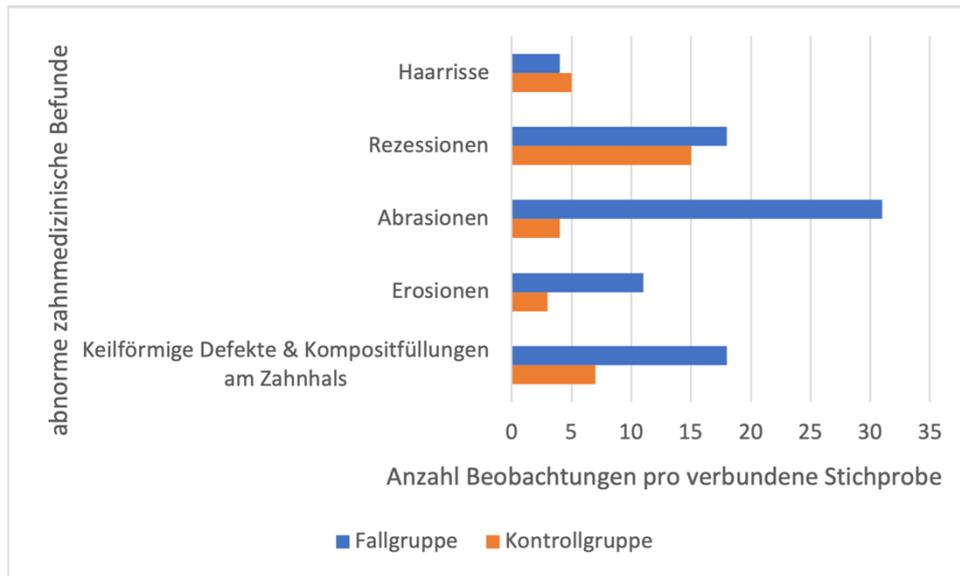


Abbildung 18: Häufigkeitsverteilung nicht kariöser Zahnhartsubstanzdefekte und parodontaler Deformitäten – Fallgruppe vs. Kontrollgruppe

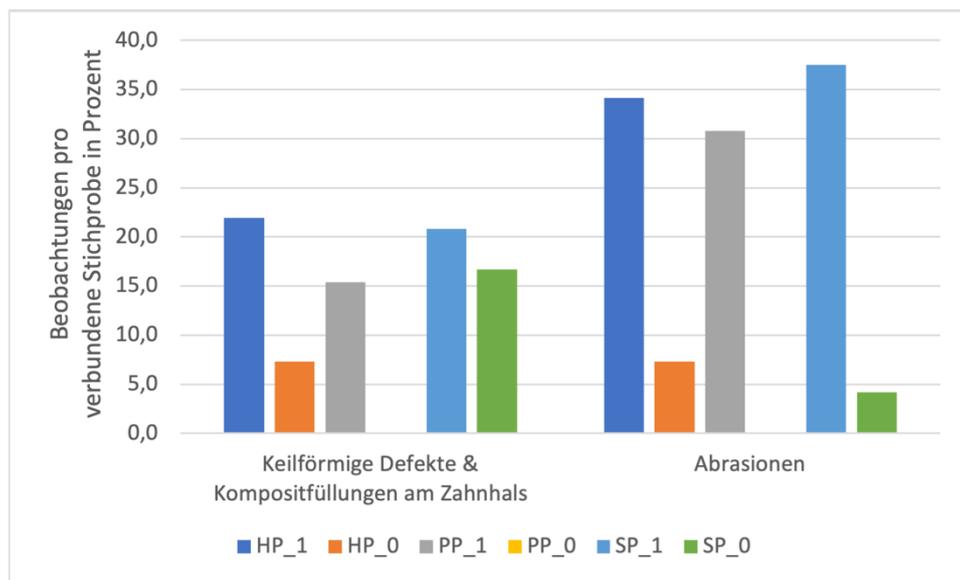


Abbildung 19: Häufigkeitsverteilung von keilförmigen Defekten mit Kompositfüllungen und Abrasionen in den Subgruppen der Fall- und Kontrollgruppe der Fall-Kontroll-Studie

HP = Hubschrauberpilot, PP = Propellerpilot, SP = Strahlflugzeugpilot; \_1 = Fallgruppe, \_0 = Kontrollgruppe

In den Subgruppen war die Häufigkeit keilförmiger Defekte bei zervikalen Kompositfüllungen beim Vorhandensein oder Fehlen einer CMD nicht signifikant verschieden (siehe Tabelle 9). Die Zugehörigkeit zur Fallgruppe führte dagegen in allen Subgruppen zu einem signifikant vermehrten Auftreten von Abrasionen (starker Effekt, siehe Abbildung 19), wobei der größte Effekt bei den SP festzustellen war (HP:  $\chi^2(1) = 7,118$ ,  $p = 0,013$ ,  $g = 0,324$ ,  $1 - \beta = 0,992$ ,  $OR = 4,67$ ,  $KI [1,34-16,24]$ ;

PP:  $\chi^2(1) = 6125$ ,  $p = 0,013$ ,  $g = 0,5$ ,  $1 - \beta = 1,000$ ,  $OR > 8,00$ , KI nicht berechenbar;

SP:  $\chi^2(1) = 6,400$ ,  $p = 0,021$ ,  $g = 0,400$ ,  $1 - \beta = 0,993$ ,  $OR = 9,00$ , KI [1,14–71,04]).

Tabelle 9: Statistische Analyse der Häufigkeit von keilförmigen Defekten mit zervikalen Kompositfüllungen und Abrasionen bei Hubschrauberpiloten (HP), Propellerpiloten (PP) und Strahlflugzeugpiloten (SP) – Fallgruppe vs. Kontrollgruppe (KGr)

Variable	Kontingenztabelle für McNemar-Test mit absoluten und relativen Zahlen				$\chi^2$	$p$	$g$	Power (1 – $\beta$ )										
Keilförmige Defekte & zervikale Kompositfüllungen	HP_N		Fallgruppe				3,000	0,146	0,250	0,878								
	$n = 41$		ja		nein													
	Häufigkeit		$n$	%	$n$	%												
	KGr	ja	1	2,4	3	7,3												
		nein	9	22,0	28	68,3												
	PP_N		Fallgruppe								4,000	0,125	0,500	1,000				
	$n = 26$		ja		nein													
	Häufigkeit		$n$	%	$n$	%												
	KGr	ja	0	0,0	0	0,0												
		nein	4	15,4	22	84,6												
	SP_N		Fallgruppe												0,111	1,000	0,056	0,043 <sup>a</sup>
	$n = 24$		ja		nein													
Häufigkeit		$n$	%	$n$	%													
KGr	ja	1	4,2	4	16,7													
	nein	5	20,8	14	58,3													
Abrasionen	HP_N		Fallgruppe				7,118	0,013*	0,324	0,992								
	$n = 41$		ja		nein													
	Häufigkeit		$n$	%	$n$	%												
	KGr	ja	8	19,5	3	7,4												
		nein	14	34,1	16	39,0												
	PP_N		Fallgruppe								6,125	0,013*	0,500	1,000				
	$n = 26$		ja		nein													
	Häufigkeit		$n$	%	$n$	%												
	KGr	ja	12	13,2	0	0,0												
		nein	8	8,8	6	6,6												
	SP_N		Fallgruppe												6,400	0,021*	0,400	0,993
	$n = 24$		ja		nein													
Häufigkeit		$n$	%	$n$	%													
KGr	ja	6	25,0	1	4,2													
	nein	9	37,5	8	33,3													

Anmerkung: <sup>a</sup> Unzureichende Teststärke. \*  $p < 0,05$ .

### 5.3.4 CMD vs. Prothetik

Die ermittelten Häufigkeiten beim prothetischen Zahnersatz in der Fall- und Kontrollgruppe sind in Abbildung 20 dargestellt. Das Minimum in beiden Gruppen betrug 0; das Maximum lag in der Fallgruppe bei 19 und in der Kontrollgruppe bei 16. Für beide Probandengruppen traten Ausreißer nach oben auf. Eine Normalverteilung war laut den Q-Q-Plots (Abbildung A34 und Abbildung A35 im Anhang) nicht gegeben. Da auch über eine Transformation der Variablen keine Normalverteilung erreichbar war, wurden nicht parametrische Tests für verbundene Stichproben genutzt. Laut Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test unterschied sich die Anzahl von prothetischem Zahnersatz bei den MLFF der Fall- und Kontrollgruppe nicht signifikant ( $Mdn = 1$ ,  $z = 0,709$ ,  $p = 0,479$ ). Auch zwischen den Subgruppen (HP, PP, SP) waren keine signifikanten Unterschiede bei MLFF mit und ohne CMD festzustellen (HP:  $Mdn = 2$ ,  $z = 0,662$ ,  $p = 0,508$ ; PP:  $Mdn = 0$ ,  $z = 0,267$ ,  $p = 0,789$ ; SP:  $Mdn = 1$ ,  $z = 0,210$ ,  $p = 0,833$ ).

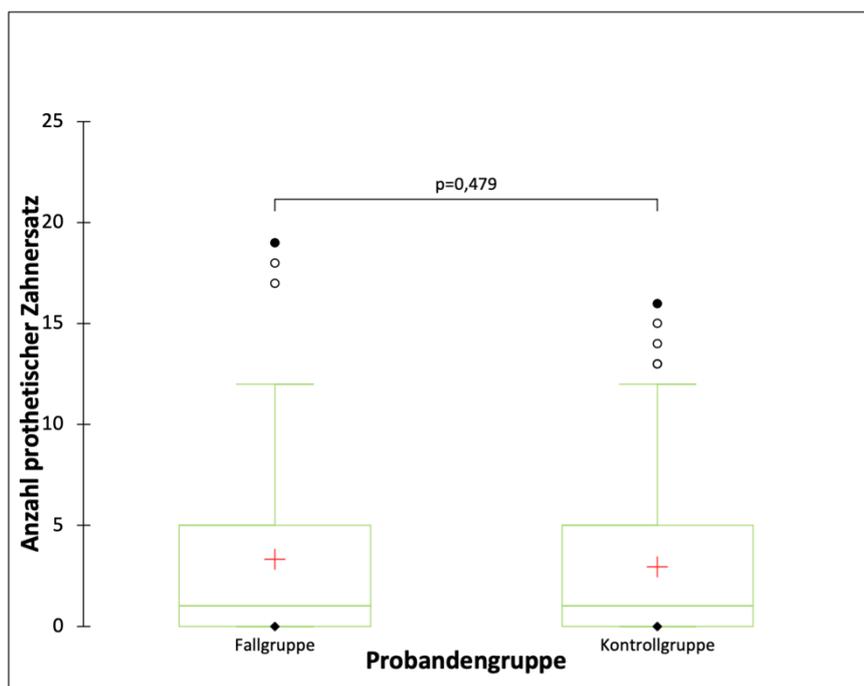


Abbildung 20: Häufigkeitsverteilung der Anzahl von prothetischen Zahnersatz in der Fall- und Kontrollgruppe in der Fall-Kontroll-Studie

Ausreißer in den Boxplots sind als Punkte dargestellt.

### 5.3.5 CMD-assozierte Komorbiditäten

Für die Mediationsanalyse des Einflusses der CMD auf die Fluguntauglichkeit über CMD-assozierte Komorbiditäten wurden zunächst die Komorbiditäten in den

verschiedenen Fachdisziplinen bestimmt. Details zur Diagnose und Häufigkeit der Komorbiditäten sind in Tabelle A22 und Tabelle A23 im Anhang wiedergegeben. Abbildung 21 stellt die Ergebnisse in der Fall- und Kontrollgruppe gegenüber. Die Ergebnisse der Subgruppen (HP, PP, SP) sind in Abbildung A36–Abbildung A38 im Anhang dargestellt.

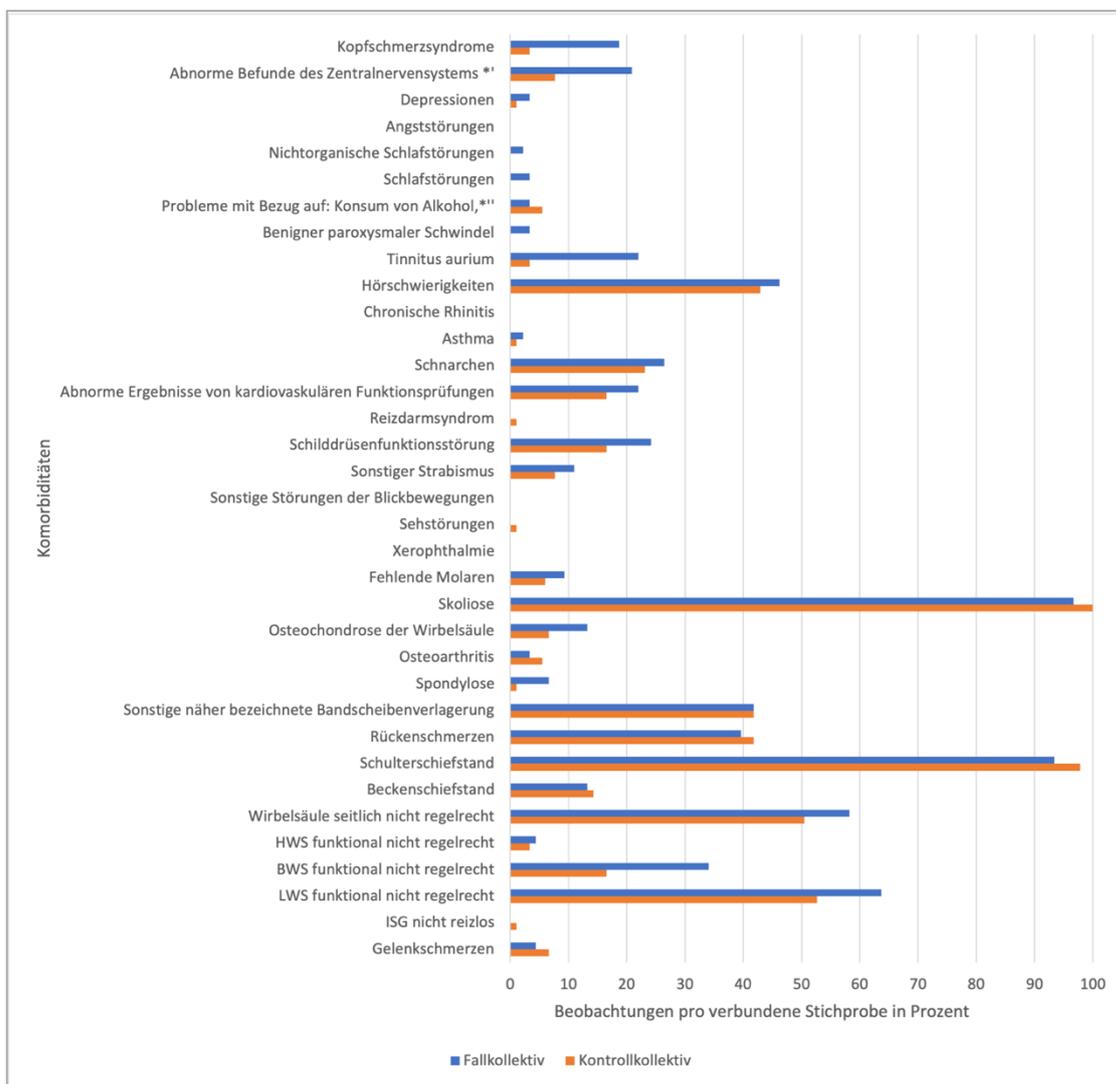


Abbildung 21: Komorbiditäten im Fall- und Kontrollkollektiv der Fall-Kontroll-Studie

\*\* Sonstige abnorme Befunde der bildgebenden Diagnostik des Zentralnervensystems;  
 \*\*\* Probleme mit Bezug auf: Konsum von Alkohol, Tabak, Arzneimitteln oder Drogen.  
 BWS = Brustwirbelsäule, HWS = Halswirbelsäule, ISG = Iliosakralgelenk,  
 LWS = Lendenwirbelsäule

Eine  $OR > 3$  für die Fall- im Vergleich zur Kontrollgruppe war bei den folgenden Diagnosen nachweisbar: Tinnitus aurium, Kopfschmerzsyndrome, Spondylose, sonstige abnorme Befunde bei der bildgebenden Diagnostik des ZNS, Depressionen und Osteochondrose der Wirbelsäule; eine  $OR > 2$  bei BWS funktional nicht regelrecht und Asthma. Die Diagnosen Angststörungen, chronische Rhinitis, Xerophthalmie und

Störungen der Blickbewegung traten in den Probandengruppen nicht auf. Bei der metrischen, nicht-normalverteilten Variable Rückenschmerzen verfehlte der Unterschied zwischen Fall- und Kontrollgruppe laut Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test die Signifikanz nur knapp ( $Mdn = 0$ ,  $z = 1,909$ ,  $p = 0,056$ ,  $1 - \beta = 1,0$ ; Abbildung A39 im Anhang). Für die Mediationsanalyse wurde die Variable anschließend dichotomisiert.

Die Ergebnisse des McNemar-Tests bezüglich möglicher Unterschiede bei den CMD-assozierten Komorbiditäten zwischen der Fall- und Kontrollgruppe sind im Anhang in Tabelle A23 zusammengefasst. Signifikante Unterschiede zeigten die Variablen Tinnitus ( $\chi^2(1) = 13,762$ ,  $p = 0,001$ ,  $g = 0,405$ ,  $1 - \beta = 1,0$ ,  $OR = 9,50$ , KI [2,21–40,79]), Kopfschmerzsyndrome ( $\chi^2(1) = 9,800$ ,  $p = 0,003$ ,  $g = 0,350$ ,  $1 - \beta = 1,0$ ,  $OR = 5,67$ , KI [1,67–19,34]), sonstige abnorme Befunde bei der bildgebenden Diagnostik des ZNS ( $\chi^2(1) = 7,200$ ,  $p = 0,012$ ,  $g = 0,300$ ,  $1 - \beta = 0,999$ ,  $OR = 4,00$ , KI [1,34–11,96]; eine Spezifizierung des Befundes kann nur White Matter Lesions (WML) betreffen) [58] und BWS funktional nicht regelrecht ( $\chi^2(1) = 7,111$ ,  $p = 0,011$ ,  $g = 0,222$ ,  $1 - \beta = 0,990$ ,  $OR = 2,60$ , KI [1,25–5,39]). Die Subgruppenanalyse (Tabelle A24 im Anhang) ergab für HP einen signifikanten Unterschied zwischen der Fall- und Kontrollgruppe bezüglich der Komorbidität Kopfschmerzsyndrome ( $\chi^2(1) = 10,286$ ,  $p = 0,002$ ,  $g = 0,429$ ,  $1 - \beta = 0,999$ ,  $OR = 13,00$ , KI [1,70–99,38]) und bei den SP für einen Tinnitus ( $\chi^2(1) = 9,0$ ,  $p = 0,004$ ,  $g = 0,500$ ,  $1 - \beta = 1,0$ ,  $OR > 9,00$ , KI nicht berechenbar).

Unzureichende Teststärken wiesen Analysen mit folgenden Parametern auf: Probleme mit Bezug auf Konsum von Alkohol, Tabak, Arzneimitteln oder Drogen; Hörschwierigkeiten, Schnarchen, abnorme Ergebnisse von kardiovaskulären Funktionsprüfungen, sonstiger Strabismus, sonstige näher bezeichnete Bandscheibenverlagerung, Rückenschmerzen (kategorial), Beckenschiefstand, Wirbelsäule seitlich nicht regelrecht, HWS funktional nicht regelrecht, LWS funktional nicht regelrecht und Gelenkschmerzen. Die Parameter Angststörungen, Chronische Rhinitis, sonstige Störungen der Blickbewegungen und Xerophthalmie waren weder im Fall- noch im Kontrollkollektiv vorhanden.

### 5.3.6 Mediationsanalyse in Abhängigkeit von Fluguntauglichkeit

Um einen möglichen indirekten Effekt CMD auf die Fluguntauglichkeit über CMD-assozierte Komorbiditäten zu ermitteln, wurden jedem Probanden die Anzahl an CMD-assozierten Komorbiditäten (Tabelle A22 im Anhang) zugeordnet. Im Mittel betrug die

Häufigkeit von CMD-assoziierten Komorbiditäten pro MLFF in der Fallgruppe  $7,1 \pm 2,7$  (Minimum 1, Maximum 14; 95 %-KI [6,586–7,700]). In der Kontrollgruppe lagen die Werte aufgrund fehlender KI-Überschneidung zur Fallgruppe signifikant niedriger (Minimum 2, Maximum 14;  $5,8 \pm 2,2$ ; 95 %-KI [5,392–6,300]). Abbildung 22 fasst die Daten bezogen auf die Probandengruppen zusammen.

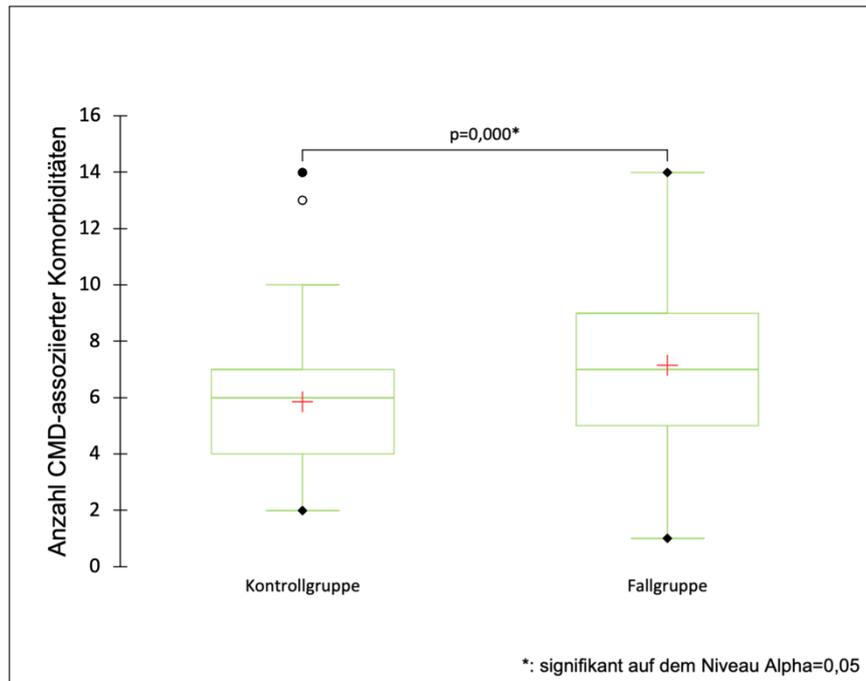


Abbildung 22: Häufigkeitsverteilung der Anzahl der mit einer Craniomandibulären Dysfunktion (CMD) assoziierten Komorbiditäten in der Fall- und Kontrollgruppe der Fall-Kontroll-Studie

Ausreißer in den Boxplots sind als Punkte dargestellt.

Mit Hilfe einer Mediationsanalyse wurde der indirekte Effekt einer CMD auf die Fluguntauglichkeit über CMD-assoziierte Komorbiditäten untersucht. Abbildung 23 stellt die Analyse schematisch dar. Die im Vorfeld geprüften Voraussetzungen sind Tabelle A26 im Anhang zu entnehmen.

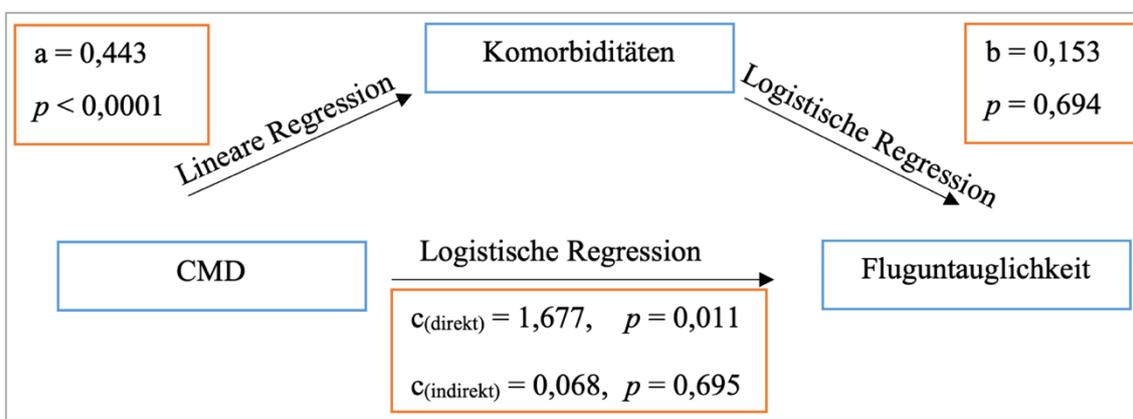


Abbildung 23: Schema der Mediationsanalyse

CMD = Craniomandibuläre Dysfunktion

Bei der Analyse diente das Vorhandensein einer CMD als dichotome, unabhängige Variable, die Fluguntauglichkeit als dichotome, abhängige Variable und die Anzahl der Komorbiditäten als metrischer Mediator. Der Regressionskoeffizient zwischen der CMD und dem Mediator betrug  $r = 0,331$  und zwischen dem Mediator und der Fluguntauglichkeit  $r = 0,098$ . Zwischen den kategorialen Variablen CMD und Fluguntauglichkeit lag Phi bei 0,195.

Für eine Normalverteilung der Residuen wurde die Variable Komorbiditäten zunächst mittels eines Exponenten von 0,6 transformiert. In Modell 1 wurde eine lineare Regressionsanalyse zwischen dem Auftreten einer CMD und von Komorbiditäten durchgeführt. Modell 2 wurde unter Berücksichtigung einer binären logistischen Regression zwischen dem Auftreten einer CMD und der Fluguntauglichkeit berechnet. Für Modell 3 erfolgte eine binäre logistische Regression zwischen dem Auftreten einer CMD und Komorbiditäten auf Fluguntauglichkeit (siehe Tabelle 10).

Tabelle 10: Mediationsanalyse mit der unabhängigen Variablen Craniomandibuläre Dysfunktion (CMD), der abhängigen Variable Fluguntauglichkeit und CMD-assozierte Komorbiditäten als Mediatoren

Variable	Modell 1			Modell 2			Modell 3		
	Abhängige Variable Komorbiditäten			Abhängige Variable Fluguntauglichkeit			Abhängige Variable Fluguntauglichkeit		
	<i>B</i>	<i>SEM</i>	<i>p</i>	<i>B</i>	<i>SEM</i>	<i>p</i>	<i>B</i>	<i>SEM</i>	<i>p</i>
Konstante	2,795	0,061	< 0,0001 ***	- 3,356	0,587	< 0,0001 ***	- 3,787	1,253	0,002**
Komorbiditäten	-	-	-	-	-	-	0,153	0,389	0,694
CMD	0,443	0,096	< 0,0001 ***	1,677	0,656	0,011*	1,609	0,679	0,018*
	$R^2 = 0,104$			$R^2 = 0,099$			$R^2 = 0,100$		
	$F(1, 177) = 79,829,$ $p < 0,0001$ ***			$F(1, 177) = 6,547,$ $p = 0,011$ *			$F(1, 177) = 5,624,$ $p = 0,018$ *		

Anmerkung: *B* = Regressionskoeffizient, *SEM* = Standardfehler des Mittelwerts. \*  $p < 0,05$ , \*\*  $p < 0,01$ , \*\*\*  $p < 0,001$ .

Es bestand kein signifikanter indirekter Effekt einer CMD auf die Fluguntauglichkeit über CMD-assozierte Komorbiditäten ( $c_{\text{indirekt}} = 0,068$ ,  $p = 0,695$ ). Dagegen war ein direkter Effekt von CMD auf die Fluguntauglichkeit nachweisbar ( $c_{\text{direkt}} = 1,677$ , KI [1,48–19,34]).

Anschließend wurde Modell 3 erneut analysiert, indem dem Mediator die Kontrollvariablen Alter in Jahren sowie die Flugzeugtypen (Hubschrauber, Propeller- und Strahlflugzeug) hinzugefügt wurden (siehe Tabelle 11).

Tabelle 11: Mediationsanalyse mit der unabhängigen Variablen Craniomandibuläre Dysfunktion (CMD), der abhängigen Variable Fluguntauglichkeit und CMD-assoziierte Komorbiditäten als Mediatoren – kontrolliert mit ausgewählten Störvariablen

Variable	Modell 3 kontrolliert						
	Abhängige Variable Fluguntauglichkeit				95 %-KI für OR		
	<i>B</i>	<i>SEM</i>	<i>Wald</i>	<i>p</i>	<i>OR</i>	Untere Grenze	Obere Grenze
Achsenabschnitt	-4,526	1,334	11,508	0,001**	-	-	-
Komorbiditäten	-0,267	0,464	0,331	0,565	0,766	0,309	1,900
CMD	1,824	0,697	6,845	0,009*	6,197	1,580	24,299
Alter	0,054	0,033	2,658	0,103	1,055	0,989	1,126
HP	0,561	0,487	1,328	0,249	1,753	0,675	4,555
PP	0,724	0,491	2,172	0,141	2,063	0,788	5,403
SP	-0,524	0,477	1,206	0,272	0,592	0,232	1,509

$R^2 = 0,154, F(6, 172) = 6,845, p = 0,009^*$

Anmerkung: *B* = Regressionskoeffizient, HP = Hubschrauberpilot, KI = Konfidenzintervall, OR = Odds Ratio, PP = Propellerpilot, SEM = Standardfehler des Mittelwerts, SP = Strahlflugzeugpilot. \*  $p < 0,05$ , \*\*  $p < 0,01$ .

Nach Kontrolle der Variablen wurde der indirekte Effekt deutlicher, war aber weiterhin nicht signifikant ( $c_{\text{indirekt}} = -0,118, p = 0,568$ ). Lediglich der Prädiktor CMD beeinflusste die abhängige Variable Fluguntauglichkeit direkt (positiver Effekt,  $OR = 6,197, p = 0,009$ ). Ein Teil der Varianz (5,4 %), die CMD und den Mediator Komorbiditäten aufklärten, wurde in den Kontrollvariablen (Alter, HP, PP und SP) erklärt. Das binomial logistische Regressionsmodell war statistisch signifikant ( $\chi^2(6) = 6,845, p = 0,009$ ) mit einer ausreichenden Teststärke und unzureichenden Varianzaufklärung von Nagelkerkes  $R^2 = 0,154$ , in Übereinstimmung mit den Empfehlungen von Backhaus et al. (2006) [16]. Letztlich konnten die CMD-assoziierten Komorbiditäten von CMD auf Fluguntauglichkeit nicht als Mediator nachgewiesen werden.

## 6 Diskussion

### 6.1. Material und Methode

#### 6.1.1. Allgemeines

Bei der Prüfung auf Normalverteilung der Daten wird in Arbeiten oft der Kolmogorov-Smirnow-Test mit einer hohen Empfindlichkeit gegenüber Extremwerten genutzt. Die Lilliefors-Korrektur führt zu einem weniger konservativen Ergebnis; aufgrund seiner geringen Teststärke sollte der Test aber generell nicht verwendet werden [168]. Daher wurde die parametrische Verteilung in der vorliegenden Arbeit bei allen Analysen mittels Q-Q-Plot geprüft.

#### 6.1.2. Querschnittsstudie

Die Vergleichbarkeit der vorliegenden Querschnittsstudie mit anderen Arbeiten ist aufgrund uneinheitlicher CMD-Klassifikationen sowie unterschiedlicher Ein- und Ausschlusskriterien eingeschränkt. Entgegen der Anwendung von Muskelpalpationen in der vorliegenden Arbeit sind nach Bumann und Lotzmann (2000) bei der Untersuchung der Kaumuskulatur isometrische Anspannungen vorzuziehen [35]. Weiter sind subjektive Schmerzangaben nach Palpation kritisch zu hinterfragen aufgrund der Sorge der MLFF vor einer eingeschränkten WFV. Die Diagnosekriterien nach Schiffman et al. (2014) haben sich inzwischen zwar bewährt [187], waren jedoch zum Erhebungszeitraum nicht Bestandteil der truppenzahnärztlichen Untersuchungen [99]. Diese Varianzen beeinflussen auch die ermittelten Prävalenzen [220]. In der vorliegenden Studie wurden ausschließlich männliche MLFF (HP, PP, SP) eingeschlossen. Diese Einschränkung galt auch für die MRT- und Fall-Kontroll-Studie. Frauen wurden aufgrund der geringen Fallzahl ( $n = 10$ , davon  $n = 2$  mit CMD) und der fehlenden Kontrollpartner bei der Fall-Kontroll-Studie (siehe Kapitel 4.5.4). ausgeschlossen. Zur Vermeidung von Confounder-Effekten wurden wegen fehlender flugdynamischer Einflüsse MLFF für Drohnen ebenfalls ausgeschlossen.

In anderen Studien wurde teilweise eine differente, auf funktionellen Kriterien basierende Flugzeugklassifikation genutzt und Kampf-, Transport- und Verbindungsflugzeuge sowie Kampf- und Transporthubschrauber unterschieden. Dagegen wurde in der vorliegenden Arbeit nach Antriebsart differenziert. Diese differente Unterscheidung beeinflusst auch die Prävalenzangaben in den Subgruppen.

Die größte Stärke der vorliegenden Querschnittsstudie ist die Stichprobengröße. Mit mehr als 69,1 % aller MLFF ist von einer guten Repräsentativität auszugehen. Darüber hinaus handelt es sich um die erste Studie über CMD bei MLFF der Bundeswehr.

### **6.1.3. MRT-Studie**

Die größten Einschränkungen der präsentierten MRT-Studie sind der kleine Stichprobenumfang, der keinen Vergleich von Untergruppen zuließ, und das Fehlen von Kontrollpatienten oder Messwiederholungen. Die ursprünglich geplante Fallzahl von 50 Individuen wurde nur zur Hälfte erreicht. Anfänglich war die Studie als prospektive Kohortenstudie konzipiert, wobei bis zum positiven Ethikvotum ausschließlich Analysen bei rechtfertigender Indikation und damit in der Fallgruppe erfolgten. Die zeitlichen, personellen und materiellen Möglichkeiten waren durch die Restriktionen während der Corona-Pandemie stark eingeschränkt. Das resultierende Aussetzen aller nicht zwingend erforderlichen Untersuchungen führte zum vorzeitigen Ende der Studie. Daher wurden keine Kontrollpatienten untersucht, was die Aussagekraft der Befunde einschränkt. Der fehlende Vergleich von MRT der KG vor Beginn der fliegerischen Tätigkeit schließt außerdem nicht aus, dass pathologische Befunde schon vorher vorgelegen haben.

Dennoch handelt es sich bei der vorliegenden Arbeit um die weltweit erste MRT-Studie der KG von Piloten, die zusätzlich auch dynamische Mundöffnungs- und Schließbewegungen untersuchte.

### **6.1.4. Fall-Kontroll-Studie**

Eine Schwäche der vorgestellten Fall-Kontroll-Studie ist die 1:1-Paarung. Zur Erhöhung der Genauigkeit wurde bei (annähernd) statistisch signifikanten Ergebnissen ein 1:4-Matching durchgeführt. Mit der retrospektiven Datenerhebung ließen sich zudem keine kausalen Zusammenhänge, sondern lediglich Korrelationen nachweisen. Von 182 Studienteilnehmern wurden zehn im Untersuchungszeitraum erneut untersucht ( $n = 3$  Fallgruppe,  $n = 7$  Kontrollgruppe). Diese MLFF waren zu beiden Messzeitpunkten wehrfliegerverwendungsfähig. Die auswertbare Datenbasis war jedoch für eine Längsschnittstudie zu gering.

Durch ein potenziell uneinheitliches Anwenden der CMD-Klassifikation können systematische Fehler nicht sicher ausgeschlossen werden. Ein Selektions-Bias war dagegen nicht möglich, weil die Auswahl der Probanden zufällig und stringent nach den

in Kapitel 4 dargestellten Kriterien erfolgte. Alle Fall- und Kontrollprobanden waren MLFF der Bundeswehr und stammten somit aus derselben Population. Weiter wurden potenzielle Confounder (z. B. Alter) in den Regressionsanalysen berücksichtigt. Verzerrungen beim vorliegenden Matching lassen sich nahezu ausschließen, da sich die Kollektive in zahlreichen Merkmalen glichen.

Eine weitere Stärke der Arbeit ist die doppelt verblindete Erhebung sämtlicher Daten aus den nicht-zahnmedizinischen Fachgebieten. Zudem wurde mit der CMD eine seltene Erkrankung in der Population der MLFF analysiert, die für Fall-Kontroll-Studien geeignet ist. Die deutliche Erfüllung der Fallzahlschätzung spricht für die Aussagekraft der Ergebnisse. Schlussendlich dokumentiert die Arbeit erstmals ein umfassendes Bild der an CMD erkrankten MLFF in der Bundeswehr.

## 6.2. Ergebnisse der Querschnittsstudie

### 6.2.1. Prävalenz von CMD bei MLFF

In der vorliegenden Studie wurden erstmals Daten zur Häufigkeit von CMD bei deutschen Militärpiloten erhoben. Im Gesamtkollektiv ( $N = 1409$  männliche MLFF) lag die CMD-Prävalenz bei 6,5 %. Laut einer neueren Studie von Peroz et al. (2020) zur Wichtung der Parameter des CMD-Screenings erfordert ein alleiniges Auftreten von Gelenkgeräuschen ohne Schmerzen oder Funktionseinschränkungen in der Regel keine weitere Diagnostik [153]. Diese Ergebnisse decken sich mit denen der Kontrollgruppe, die am ehesten Gelenkgeräusche aufwies. Gleichwohl können Krepitationen als Anzeichen einer ADV ohne Reposition weitere Behandlungsmaßnahmen begründen [213]. Als zusätzliches Kriterium wird laut Leitlinie der DGFDT das Auftreten von Schmerzen bei prä- oder intraaurikulärer Palpation des KG geprüft; hingegen berücksichtigen die Autoren nicht mehr den *M. digastricus venter posterior* [150], welcher beim Untersuchen häufig mit dem *M. stylohyoideus* verwechselt wird [128]. Zum Zeitpunkt der Datenerhebung hatte diese Richtlinienanpassung noch nicht stattgefunden. Daneben berichtete keiner der MLFF bei einer Palpation der Muskulatur oder Gelenke über Schmerzen. Das neue Kriterium wurde somit ebenfalls überprüft, wenn auch nicht dokumentiert.

In anderen Arbeiten lag die CMD-Prävalenz mit Werten zwischen 8–31 % deutlich höher [6, 13, 225]. In einer chinesischen Studie mit 600 männlichen Zivilpiloten betrug der Anteil mit CMD 33,3 % [240]. Diese Varianzen lassen sich durch die variable CMD-Definition und durch unterschiedliche Ein- und Ausschlusskriterien der Studien erklären

[220]. Die vorliegende Arbeit, die fast 70 % aller MLFF der Bundeswehr umfasste, ist aufgrund ihres repräsentativen Stichprobenumfangs sehr aussagestark. Ein möglicher Grund für die im Vergleich zur zivilen Bevölkerung geringere CMD-Prävalenz waren die ausschließlich männlichen Studienteilnehmer. Generell sind Frauen nachweislich häufiger von einer CMD betroffen [83, 199]. Eine weitere mögliche Ursache für die geringe Prävalenz ist die strenge Selektion anhand medizinischer Kriterien bei MLFF – auch im Vergleich zur zivilen Luftfahrt. Dies lässt zudem die Vermutung zu, dass gesunde Individuen seltener an CMD erkranken.

Eine Querschnittsstudie stellt anders als eine Longitudinalstudie nur eine Momentaufnahme dar. Laut Längsschnittstudien sind nach 5 Jahren 49 % [147] der Fälle und nach 8 Jahren 28 % der Fälle bei schmerzassoziierter CMD von einem Rückfall betroffen [96]. Unter der Annahme, dass sich auch die vorliegende Kohorte ähnlich entwickelt, ist davon auszugehen, dass trotz aktuell fehlender Behandlungsbedürftigkeit ein relevanter Anteil der MLFF chronisch krank war.

### **6.2.2. Einfluss der Flughöhe/des Flugzeugmodells auf die CMD-Häufigkeit**

Die für die Querschnittsstudie zu überprüfende Hypothese lautete: „Eine zunehmende Flughöhe des Flugzeugmodells hat keinen Einfluss auf die Häufigkeit der CMD bei den MLFF. Die CMD-Prävalenz ist somit unabhängig vom Flugzeugmodell.“ Diese Nullhypothese ließ sich in der vorliegenden Studie nur eingeschränkt zurückweisen.

Die CMD-assoziierte Dekompressionskrankheit wies mit zunehmender Höhe keinen signifikanten Unterschied zwischen Fall- und Kontrollgruppe auf. Das Auftreten von hypoxischen Symptomen zwischen 3,048 Kilometern (10 000 Fuß) und 4,572 Kilometern (15 000 Fuß) ist bekannt [195]. Ab 3,657 Kilometern (12 000 Fuß) wird die Sauerstoffzufuhr automatisch mittels Atemmaske allmählich bis auf 100 % beim Eintritt in die Stratosphäre [190] ab 11,582 Kilometern (38 000 Fuß) gesteigert, um einen Sauerstoffmangel zu vermeiden [12, 94]. Zudem ist bei Höhen von 13,106 Kilometern (43 000 Fuß) auch bei 100%iger Sauerstoffatmung zum Schutz vor einer hypobaren Hypoxie ein konstanter Überdruck notwendig, der aus Sicherheitsgründen bereits ab 8,229 Kilometern (27 000 Fuß) zugeführt wird [94]. In der vorliegenden Studie traten 40,7 % aller CMD-Fälle (2,6 % des Gesamtkollektivs) bei Flugzeugtypen auf, deren maximale Flughöhe der Ebene der beginnenden Hypoxie ohne Druckausgleich entsprach (Ebene 1–2 in Abbildung 24), wobei das größte Risiko an der Schwelle zum Beginn des

Druckausgleichs bestand (Ebene 2–3 in Abbildung 24). Dieser Befund lässt die Vermutung zu, dass nicht nur die Hypoxie, sondern vor allem die Hypobarie eine Dekompressionskrankheit provoziert, die CMD auslösen kann [70, 180, 244].

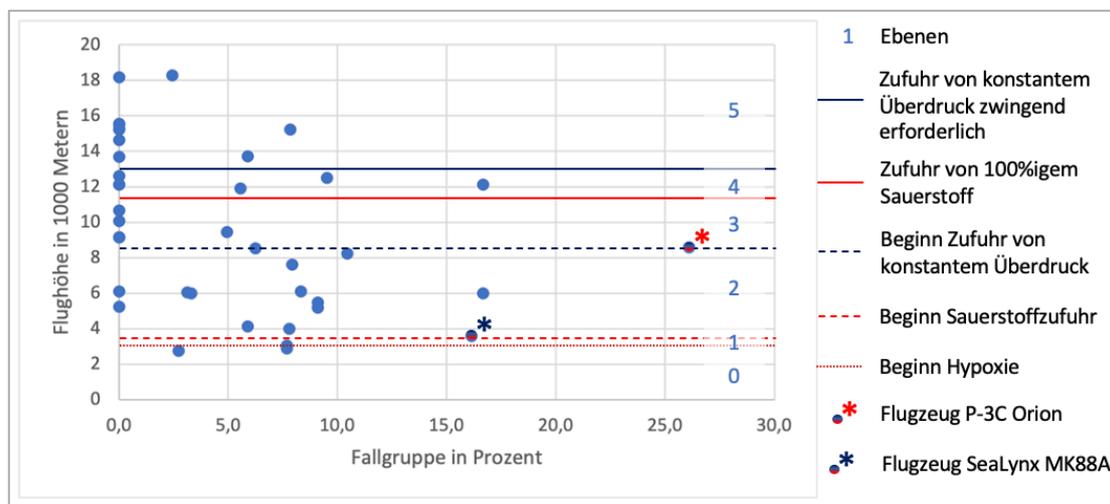


Abbildung 24: Häufigkeitsverteilung der CMD-erkrankten MLFF zur Flughöhe des jeweiligen Flugzeugmodells (blaue Punkte)

Bezogen auf das Gesamtkollektiv war die Chance, unter HP des Flugzeugmodells „Sea Lynx MK88A“ einen CMD erkrankten anzutreffen, mit 16,1 % 2,9-fach so hoch wie unter CMD gesunden. Die vorliegende Arbeit weist damit erstmals einen Zusammenhang zwischen dem Modell „Sea Lynx MK88A“ und CMD nach. Dieser Kampfhubschrauber ist – ausgestattet mit Torpedos, Sonarsystemen und Infrarotsensoren – für die U-Boot-Jagd ausgelegt [39]. Seit 1981 im Einsatz, soll das Modell 2025 vom multirollenfähigen Fregattenhubschrauber „NH-90 Sea Tiger“ abgelöst werden [189]. Eine mögliche Erklärung für das häufigere Auftreten einer CMD bei MLFF dieses Hubschraubertyps sind die Flüge über Wasser. Dadurch sind die MLFF meteorologischen Veränderungen (Luftdruckschwankungen) ausgesetzt [106], deren Zusammenhang mit CMD-assoziierten Schmerzen in mehreren Studien aufgezeigt wurde [48, 67, 223]. Außerdem liegt die maximale Flughöhe mit 3,600 Kilometern an der Schwelle der einsetzenden Sauerstoffzufuhr (blauer Stern in Abbildung 24) [12]. Demnach kann das vermehrte Auftreten der CMD durch eine Hypoxie-bedingte Dekompressionskrankheit begründet sein [70, 244, 180]. Weiter hält dieses Modell mit 400 Kilometer pro Stunde zurzeit den Weltgeschwindigkeitsrekord für Hubschrauber [87]. Möglicherweise stellen die geschwindigkeitsabhängigen Vibrationen eine weitere kompromittierende Komponente dar [90].

Die CMD-Prävalenz war für PP mit 8,7 % verglichen mit HP bzw. SP am größten. MLFF des Flugzeugmodells „P-3C Orion“ waren in 26,1 % der Fälle von einer CMD betroffen. Bezogen auf das Gesamtkollektiv war damit die Chance, in diesem Modell einen PP mit CMD anzutreffen, 5,4-fach so hoch wie unter CMD gesunden. In der vorliegenden Arbeit wurde damit erstmals ein Zusammenhang zwischen dem Seefernaufklärer „P-3C Orion“ und der CMD nachgewiesen. Dieses Kampfflugzeug ist wie der „Sea Lynx MK88A“ für die U-Boot-Jagd konzipiert und dient über weite Distanzen zur Aufklärung über Seegebieten [39]. Die Einsatzbedingungen sind denen des „Sea Lynx MK88A“ ähnlich. Dieses Ergebnis verstärkt somit den Verdacht, dass die Wettereinflüsse über dem Meer einen Risikofaktor für CMD darstellen [48, 67].



Abbildung 25: Propellerflugzeug „P-3C Orion“; der Pfeil verweist auf das Infrarotsensorsystem MX-20D

(Bildrecht „P-3C Orion“ © 2019 von Bundeswehr/Tobias-Maverick Neumann)

Weiter beruht die höhere CMD-Prävalenz möglicherweise auf den Langstreckenflügen des Modells und die maximale Flughöhe von 8,600 Kilometern, die eine kritische Schwelle beim atmosphärischen Sauerstoffdruck (Hypobarie) darstellt (siehe Abbildung 24, roter Stern) [94]. Aufgrund der kontinuierlichen Exposition erleiden PP dieses Modells eher eine CMD-bedingte Dekompressionskrankheit, die hier erstmals jenseits von 7,620 Kilometern (25 000 Fuß) beschrieben wurde [10, 229]. Eine weitere Erklärung ist die analoge technische Ausstattung der beiden Luftfahrzeuge mit Sonarsystemen sowie Infrarotsensoren mit passiver Schwingungsisolierung (siehe Abbildung 25, blauer Pfeil). Die passive Isolierung schützt erschütterungsempfindliche Maschinen vor außen einwirkende Schwingungen [218]. Potenziell führt die Schwingungsisolierung der technischen Geräte zu stärkeren Vibrationen im restlichen Gehäuse des Luftfahrzeugs und damit zu einer stärkeren Ganzkörpervibrationsbelastung der Besatzung. Laut einer umfangreichen Studie sind Vibrationsbelastungen bei Bauarbeitern durch Hantieren mit Maschinen mit CMD-Schmerzen assoziiert (80 % der Fälle) [20].

Vermutlich sind die übermäßigen Schwingungen bei diesen gebrauchten Flugzeugmodellen (1982–1984) bekannt, die sich laut Bundesrechnungshof (2014) „von Anfang an in einem schlechten Zustand befunden [hätten]“ [38]. Das Alter der Luftfahrzeuge scheint eine weitere kompromittierende Komponente darzustellen. Abbildung 26 zeigt die *OR* von CMD in Abhängigkeit von der Indienststellung [37]. Die hohen *Ors* vor allem bei Maschinen aus den 1980er Jahren belegen den Forschungsbedarf zur Aufklärung der CMD-Ursachen. Immerhin zeichnet sich bei neueren Flugzeugmodellen ein leicht positiver Trend ab.

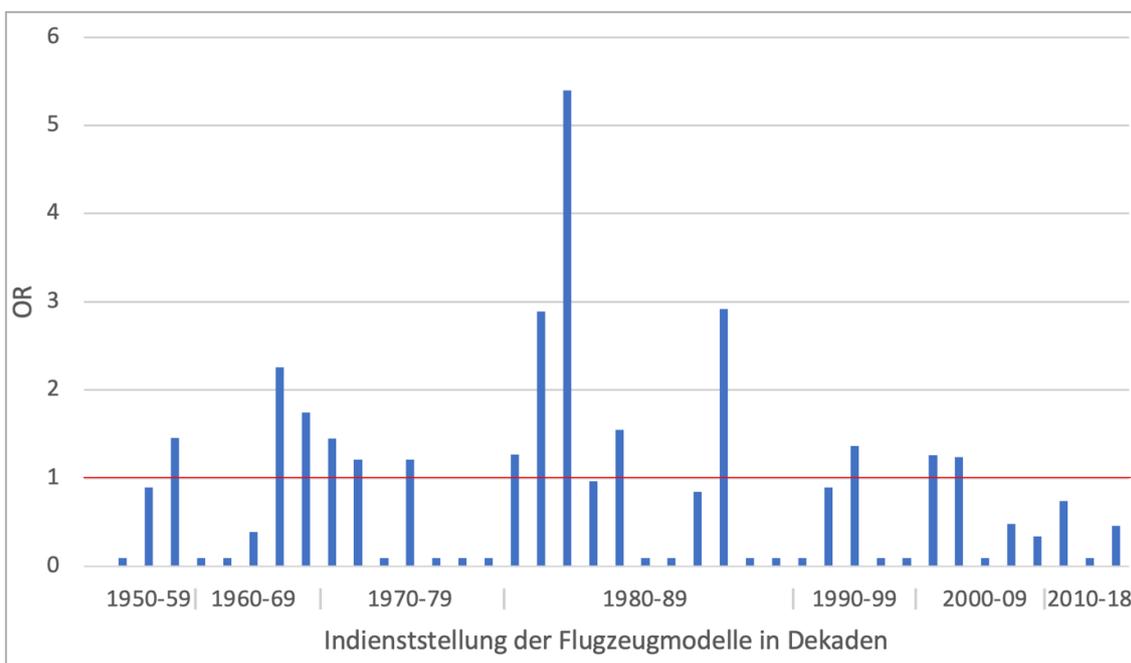


Abbildung 26: Odds-Ratio (*OR*) von Craniomandibulärer Dysfunktion in Abhängigkeit der Indienststellung der Flugzeugmodelle des Gesamtkollektivs

Auch aufgrund der Notwendigkeit kostenintensiver Instandsetzungsmaßnahmen wurde entschieden, die P-3C-Orion-Flugzeuge zehn Jahre früher außer Dienst zu stellen. Der Bedarf soll mit dem Modell „P-8 Poseidon“ als Interimslösung ab 2025 sichergestellt werden, das ab 2035 vom Nachfolger Maritime Airborne Weapons System abgelöst werden soll [56, 219].

Die beiden in der vorliegenden Studie als mit CMD assoziiert identifizierten Flugzeugmodelle zeichnen sich durch eine maximale Flughöhe an hypoxischen und hypobaren Schwellenwerten bei ähnlicher Einsatzlage und technischer Ausstattung aus. Zudem handelt es sich um 40 Jahre alte Fabrikate, die weniger Equipment für MLFF im Vergleich zu heutigen technischen, vibrationsärmeren Standards bieten. Diese möglichen

Risikofaktoren sollten zur Validierung der Befunde in zukünftigen Studien und insbesondere in Langzeitstudien gründlich untersucht werden.

### 6.3. Ergebnisse der MRT-Studie

#### 6.3.1 Allgemeine Charakteristika

Nachfolgend werden die Ergebnisse der primär deskriptiven MRT-Studie im Kontext bestehender wissenschaftlicher Erkenntnisse im Hinblick auf Schmerzaufkommen und der Prävalenz abnormer Befunde diskutiert. Abbildung 27 stellt schematisch erwiesene und vermutete Zusammenhänge von abnormen MRT-Befunden des KG unter Berücksichtigung der Schmerzassoziation dar.

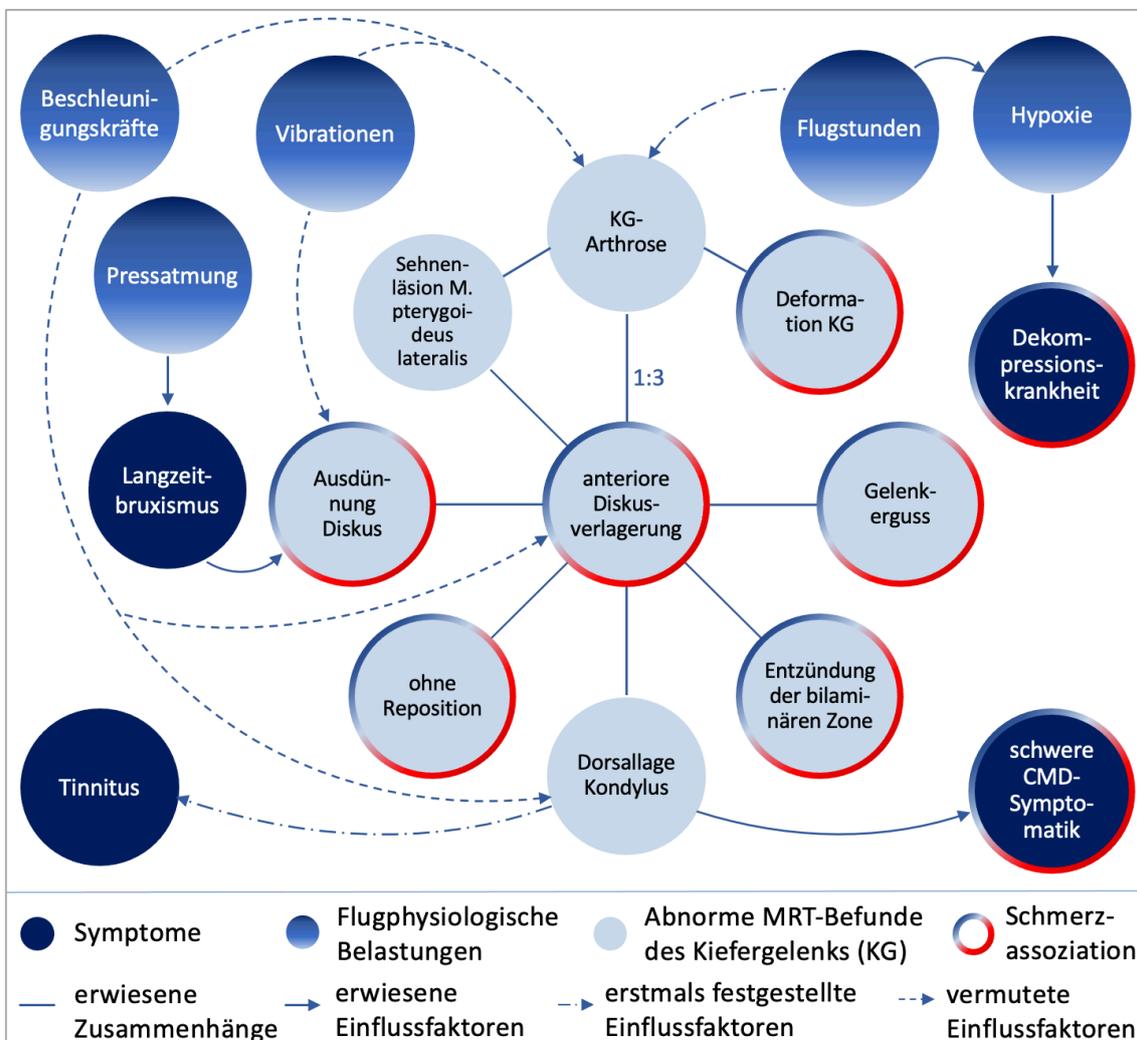


Abbildung 27: Schematische Darstellung der Zusammenhänge von abnormen Magnetresonanztomografie-(MRT)-Befunden des KG bei Militärluftfahrzeugführern

CMD = Craniomandibuläre Dysfunktion, *M.* = *Musculus*

75,0 % der MLFF mit CMD der MRT-Studie wiesen eine palpationsempfindliche Kaumuskelatur in Form eines Missempfindens und im Mittel eine hohe Anzahl positiver Parameter beim CMD-Screening auf. Dennoch berichtete trotz mittleren Stresswerts keiner der MLFF von Dolenzen im Bereich des KG-Apparats [170], was bei den genannten schmerzbezogenen Expositionen und der multiplen Schmerzkausalitäten kaum vorstellbar war. In einer brasilianischen Populationsstudie lag die Schmerzprävalenz in der Altersklasse von 20–49 Jahren mit 36 % deutlich höher [164]. Jedoch bestand das Kollektiv zu zwei Drittel aus Frauen [164], die eher Dolenzen wahrnehmen [192]. In einer groß angelegten prospektiven Studie von Slade et al. (2013) war die CMD in 23,3 % der Fälle mit Kopfschmerzen assoziiert [201]. In der vorliegenden Arbeit war dieser Anteil mit 20,8 % vergleichbar.

Mögliche Erklärungen für diese Befunde sind, dass MLFF entweder tatsächlich keinerlei Schmerzsymptomatik im KG empfanden, etwaige Dolenzen unterschätzten oder das Auftreten von Cephalgien nicht mit CMD in Verbindung brachten. Es lässt sich daher nicht ausschließen, dass einige MLFF mit Dolenzen diese nicht berichteten.

### 6.3.2 Abnorme MRT-Befunde des KG

Die Prävalenz von KG-Deformationen betrug bei den MLFF mit CMD 58,3 % ( $n = 48$  KG von 24 MLFF). Zudem bestand ein signifikanter Zusammenhang zwischen einer unilateralen KG-Arthrose und einer bilateralen Deformation ( $OR = 11,7$ ). Laut einem systematischen Review ist eine ausgeprägte KG-Deformation bei einer rheumatoiden Arthritis mit Schmerzen assoziiert [42]. Somit handelt es sich bei den vorliegenden Fällen möglicherweise ebenfalls um Erkrankungen des rheumatischen Formenkreises, die zum Ausschluss der WFV führen können [98]. Diese Vermutung sollte in weiteren Untersuchungen überprüft werden.

Im Vergleich zu einem systematischen Review lag die KG-Arthrose-Prävalenz in der vorliegenden Arbeit (22,9 % vs. 15,9 %) etwas höher [225]. Männer zeigen eher eine moderate, Frauen dagegen eher eine schwere Kondylendegeneration [25]. Laut histologischer Untersuchungen kann den degenerativen Gelenkveränderungen eine Dislokation des Diskus vorausgehen [29], was sich in späteren Analysen zunächst nicht bestätigte [107]. Dagegen belegen aktuellere histologische Studien eine Koexistenz von KG-Arthrosen und ipsilateralen Diskusverlagerungen im Verhältnis von 1:3 [61]. Laut einem systematischen Review weisen bei CMD-Erkrankten mit Diskusverlagerung 35 %

der Fälle eine degenerative KG-Erkrankung auf, wobei diejenige ohne Reposition dominiert [199]. In der vorliegenden Arbeit war der Anteil der Fälle mit ADV bei einer KG-Arthrose mit 36 % vergleichbar (9 von 25 KG, vergleiche Tabelle A19). Überdies deuteten die zum Teil schwerwiegenden Formen von KG-Arthrosen (z. B. multiplen Geröllzysten) darauf hin, dass die MLFF – bedingt durch den Flugbetrieb – schwere Krankheitsverläufe aufwiesen.

Die Prävalenz von Gelenkergüssen betrug bei den MLFF mit CMD 35,4 %. Laut einer umfangreichen Kohortenstudie besteht ein Zusammenhang zwischen dem Auftreten eines Gelenkergusses und einer Diskusverlagerung [100]. Der Erguss nimmt proportional zur Schwere der Schmerzen und Diskusverschiebung zu [25, 80]. Bei Individuen mit Gelenkerguss wird am häufigsten ein gefalteter Diskustyp beobachtet [25]. Die fehlende Assoziation zwischen einem Erguss und einer Diskusdislozierung (siehe Tabelle A19) in der vorliegenden Studie war möglicherweise der geringen Stichprobengröße geschuldet. Die Form des Diskus wurde nur hinsichtlich einer möglichen Ausdünnung beurteilt. Keiner der betroffenen männlichen Probanden in der vorliegenden Arbeit berichtete über Schmerzen. Die aufgeführte Vergleichsstudie beinhaltete dagegen zum größten Teil Frauen, die eine höhere Schmerzwahrnehmung besitzen [192].

Auffällig war in der vorliegenden MRT-Studie bei MLFF mit CMD die mit 39,6 % hohe Prävalenz von dorsalen oder dorsocranialen KG in Ruhelage, wobei die dorsocraniale Position dominierte. Beschleunigungskräfte bewirken laut einer Studie von Luo et al. (2022) nicht nur asymmetrische Belastungsverteilungen, sondern scheinen eine Dorsalverschiebung des Kondylus zu erzeugen [122]. Das Risiko für einen Tinnitus erhöhte sich bei dorso- oder dorsocranialer Position des Kondylus um den Faktor 11. Dieser Zusammenhang blieb auch in Bootstrapping-Verfahren auffällig (Tabelle A19, KI [2,40–50,49], KI (Bootstrap<sub>1000</sub>) [2,06-11,97]). Laut einer umfangreichen Studie von Kijak et al. (2020) wird ein Zusammenhang zwischen einerseits der Lokalisation sowie dem Typ der *Fissura petrotympanica* und einer dorso- oder dorsocranialen Kondylusverschiebung und andererseits dem Auftreten von Tinnitus bei CMD-Erkrankten angenommen [102]. Die Bedeutung der Petrotympanalfissur war zum Zeitpunkt der MRT-Studie nicht publiziert und wurde daher nicht berücksichtigt. Der statistisch auffällige Zusammenhang zwischen einer posterioren Kondylusdislozierung und dem Auftreten von Tinnitus bei MLFF mit CMD sollte in größeren Studien weiter untersucht werden [163]. Studien mit vornehmlich weiblichen CMD-Patienten beschrieben in 53 % der Fälle eine dorsale Kondylenposition [197], die im Vergleich zu

anderen Kondylenpositionen mit schweren CMD-Symptomen assoziiert war [152]. Eine Korrelation der Dorsallage mit einer ADV wurde mehrfach beschrieben [78, 84, 151]. Der fehlende Zusammenhang zwischen einer posterioren Kondylenposition und ADV in der vorliegenden Arbeit (Tabelle A19) beruht vermutlich auf dem kleinen Stichprobenumfang und den fehlenden Kontrollen.

Die Prävalenz von pathologischen Diskusveränderungen (Ausdünnung oder Signalsteigerung des Diskus) betrug bei den MLFF mit CMD 41,7 %. MLFF leiden gehäuft unter Bruxismus [7], wobei Langzeitbruxismus eine Schädigung des *Discus articularis* begünstigt [101]. Die Daten einer Pilotstudie, wonach der Diskus bei CMD-Fällen dicker ist als bei Gesunden, besaßen aufgrund einer kleinen Stichprobe wenig Aussagekraft [228]. Vergleichende Prävalenzangaben existieren bis dato nicht. Andererseits passen die Befunde zu Forschungsergebnissen, wonach die Anzahl der Belastungszyklen die maximale Energieverteilungskapazität der Bandscheibe entscheidend beeinflusst und die Versteifung des Diskus, vor allem im *Pars intermedia*, fördert [101]. Ferner sind Distorsionen des Diskus mit Schmerzen assoziiert [25]. Die Pressatmung im Flugbetrieb der SP könnte ein weiterer prädisponierender Faktor für pathologische Diskusveränderungen sein, was anhand der vorliegenden Daten (Tabelle A19) nicht bestätigt werden konnte. Dagegen schienen sich – wenn auch aufgrund der kleinen Stichprobe nicht signifikant – die Vibrationen im Hubschrauber stärker auf den Diskus auszuwirken. In der Gesamtschau schien die hohe Prävalenz ausgedünnter Disken weniger durch die Atemtechnik, sondern eher durch Langzeitbruxismus und Schwingungen hervorgerufen worden zu sein, die eine Diskusversteifung zur Folge hatten. Weitere Untersuchungen zu dieser Thematik sind erforderlich.

Als häufigsten MRT-Befund zeigten 70,8 % der MLFF mit CMD eine Diskusverlagerung, wobei die partielle ADV dominierte. Auch in systematischen Reviews trat dieser Befund am häufigsten auf, jedoch mit einer deutlich geringeren Prävalenz von 37,1 % (25,5–50,4 %) [225]. Bei den SP wiesen alle Probanden ( $n = 5$ , davon  $n = 1$  unilateral,  $n = 4$  bilateral) eine partielle ADV auf. Diese Daten zur ADV stützen die Annahme, wonach Beschleunigungskräfte einen kompromittierenden Einfluss auf den *Discus articularis* ausüben [122]. Weiter scheint die mechanische Belastung des Diskus im Flugbetrieb die Diskusverlagerung zu fördern [25]. In einer Studie vergleichbarer Größe mit überwiegend weiblichen Probanden bestand ein knapp signifikanter Zusammenhang zwischen einer ADV und einem Tinnitus [114]; eine weitere Studie mit doppelt so großer Stichprobe zeigte eine Korrelation zwischen einer

Diskusverlagerung und einem Tinnitus [172]. In der vorliegenden Studie mit ausschließlich männlichen Probanden war dagegen keine Assoziation zwischen einer Diskusverlagerung mit Reposition und dem Auftreten von Tinnitus erkennbar (Tabelle A19). Am seltensten traten in der vorliegenden Studie (2,9 %) wie auch in einem systematischen Review Diskusverlagerungen ohne Reposition auf [225]. Eine Diskusverlagerung ohne Reposition ist mit Schmerzen assoziiert und kommt häufiger bei Frauen vor [25]. Die geringe Prävalenz in der vorliegenden Arbeit lässt sich durch die ausschließlich männlichen Probanden erklären.

Die Prävalenz von Entzündungen der bilaminären Zone betrug bei den MLFF mit CMD 56,3 %, wobei in fünf von 27 Gelenken (18,5 %) die Zone perforiert oder zerstört war. Laut Xiong et al. (2021) besteht ein Zusammenhang zwischen der Art erworbener Diskusverlagerungen und dem retrodiskalen Entzündungsgrad [238]. Außerdem sind Entzündungen und eine erhöhte Vaskularität im retrodiskalen Gewebe für KG-Schmerzen verantwortlich. Interessant war der – trotz kleiner Stichprobe – annähernd signifikante Zusammenhang zwischen der ADV und einer Entzündung der bilaminären Zone (Tabelle A19), was den Verdacht erhärtete, dass es sich bei den meisten Diskusverlagerungen um pathologische Veränderungen handelte.

Anders als bei den Aufnahmen der statischen Mundöffnung zeigte in der dynamischen Aufnahmetechnik ein Proband von 21 MLFF mit CMD ein hypermobiles Gelenk. Mit Hilfe der Echtzeit-MRT von Mundöffnungs- und Schließbewegungen können folglich zusätzliche Informationen gewonnen werden [40]. Die vorliegende Arbeit präsentiert erstmals statische und dynamische MRT-Aufnahmen von Piloten. Die Videosequenzen waren jedoch von geringer Bildqualität und konnten aus organisatorischen Gründen nicht an allen Teilnehmern der MRT-Studie durchgeführt werden.

In der vorliegenden MRT-Studie wurde bei einem von 48 KG (2,1 %) eine Diskusadhäsion nachgewiesen. Diese war von einer partiellen Diskusverlagerung begleitet und ging beim Öffnungsvorgang mit einer eingeschränkten, im Seitenvergleich asymmetrischen Translation einher. Dieser Befund war sowohl in der statischen als auch dynamischen Mundöffnung nachweisbar. Laut Berichten wird eine Diskusadhäsion in der statischen Aufnahme häufig fehldiagnostiziert und erst in der dynamischen Technik erkannt [21, 178].

Die Prävalenz von degeneriertem *M. pterygoideus lateralis* betrug 52,1 % auf 48 KG, wobei in 96,0 % (24 von 25 Fällen) der *Caput superius* betroffen war. Dieser Befund

passt zu einer kleinen Militärpilotenstudie, die eine erhöhte Bruxismus-bedingte Kaumuskelaktivität nachwies, die sich durch Aufbissschienen verbessern ließ [18]. Ferner besteht – laut einer Studie mit einer mehr als doppelt so großer Stichprobe – eine Korrelation zwischen Sehnenläsionen des Muskels und einer KG-Arthrose oder ADV [211]. Der fehlende Zusammenhang zwischen diesen Variablen in der vorliegenden Studie (Tabelle A19) beruhte vermutlich auf der kleinen Stichprobe. Laut Stimmer et al. (2020) ist die Läsion des Kaumuskels nicht die Ursache, sondern die Folge einer KG-Arthrose oder ADV [211]. In einer großen Kohortenstudie von Slade et al. (2013) rief der laterale Pterygoidmuskel im Vergleich zur restlichen Kaumuskulatur die geringsten Palpationsschmerzen hervor [201], wobei die klinische Untersuchung von Muskelpalpationen ungenaue Reproduzierbarkeiten aufweist [35].

Die Prävalenz einer prominenten Schleimhautschwellung in der Kieferhöhle betrug im vorliegenden MRT-Kollektiv 8,3 %. Dieser Befund war mit den Ergebnissen einer Großstudie von Jeon et al. (2005) vergleichbar, in der die Häufigkeit einer Sinusitis oder Rhinitis maxillaris bei CMD-Patienten 7,0 % betrug und mit einer eingeschränkten Mundöffnung assoziiert war [91]. Darüber hinaus besitzen laut einer Großstudie von Song et al. (2018) mit mehr als 17 000 Teilnehmern Menschen mit chronischer Rhinosinusitis ein höheres Risiko für eine CMD ( $OR = 1,44$ ) [205]. Diese Befunde unterstreichen die Relevanz von Nebenbefunden (z. B. Sinusitis der *Sinus maxillaris*) in der CMD-Diagnostik.

### 6.3.3 Regressionsanalyse in Abhängigkeit von KG-Arthrose

Die für die MRT-Studie zu überprüfende Hypothese lautete: „Es besteht keine Korrelation zwischen der Anzahl absolvierter Flugstunden der MLFF und der Häufigkeit des Auftretens von mit CMD assoziierten Schäden am KG-Apparat.“ Diese Nullhypothese konnte für den abnormen MRT-Befund der unilateralen KG-Arthrose zurückgewiesen werden.

Die unilaterale KG-Arthrose korrelierte statistisch signifikant mit der Anzahl an absolvierten Flugstunden (mittlerer positiver Effekt, sehr gute Varianzaufklärung). MLFF mit CMD-Diagnose besaßen nach 1000 Flugstunden ein 3,6-fach höheres Risiko für eine unilaterale KG-Arthrose als CMD-erkrankte MLFF ohne Flugerfahrung. Anzumerken ist, dass militärische Flugstunden auch Flugübungen im Simulator ohne flugphysiologische Einflüsse beinhalten. Dies lässt die Vermutung zu, dass das Risiko für

eine unilaterale KG-Arthrose nach 1000 realen Flugstunden noch höher liegt. Laut einem systematischen Review schränken Arthrosen bei CMD die Lebensqualität der Betroffenen ein [155]. Die Aussagekraft der vorliegenden Analysen ließe sich durch größere Stichproben vermutlich noch erhöhen, dennoch ist das Ergebnis aufgrund der hohen Varianzaufklärung bei ausreichender Teststärke und engem KI aussagekräftig [163]. In der Regressionsanalyse zeigten die analysierten Kontrollvariablen keinen signifikanten Effekt. Eine Scheinkausalität wurde jedoch durch den Durbin-Watson-Test widerlegt (Tabelle A18). Gründe für das Auftreten einer KG-Arthrose werden im folgenden Abschnitt diskutiert.

An der Entwicklung einer KG-Arthrose sind multiplexe Faktoren beteiligt. Wie bereits beschrieben, betrug das Verhältnis des Auftretens von KG-Arthrosen und anterioren Diskusverlagerungen 1:3 (siehe Abbildung 27). Beide Pathologien traten aufgrund der erhöhten Anzahl absolvierter Flugstunden im Vergleich zu Literaturdaten häufiger auf. Beschleunigungskräfte fördern die Dislozierung des Diskus und begünstigen so – unabhängig vom Alter – eine Arthrose [122]. Der Einfluss der Anzahl der Flugstunden auf das Auftreten bilateraler KG-Deformationen erreichte bei einer großen  $OR = 34$  keine statistische Signifikanz. Bei den SP und HP waren mit 30,0 % und 27,8 % nahezu gleich viele Gelenke von einer KG-Arthrose betroffen; bei den PP zeigten dagegen nur 15 % eine KG-Arthrose. Bei HP hatte die Anzahl der Flugstunden den stärksten Effekt. Eine Regressionsanalyse bei HP war aufgrund der kleinen Stichprobe nicht umsetzbar. Die Ergebnisse stützen aber die Vermutung, dass die hohen g-Kräfte und die Schwingungen der Rotorblätter eine KG-Arthrose fördern. Zur Validierung der Befunde sind weitere Untersuchungen erforderlich.

Zusammenfassend belegt die vorliegende MRT-Studie, dass MLFF mit CMD erhöhte Prävalenzen für Diskusverlagerungen und -ausdünnungen, KG-Arthrosen, posteriore Kondylusdislozierungen im Zusammenhang mit Tinnitus und Entzündungen der bilaminären Zone aufweisen. Zur Beurteilung des Zusammenhangs von flugphysiologischen Belastungen und CMD sind weiterführende Untersuchungen, vorzugsweise in Form von Langzeitstudien mit größerem Stichprobenumfang und Kontrollgruppen erforderlich.

## 6.4. Ergebnisse der Fall-Kontroll-Studie

### 6.4.1. Allgemeine Charakteristika

Im Vergleich zu den Probanden der MRT-Studie zeigten die Probanden des Fallkollektivs der Fall-Kontroll-Studie einen geringeren Punktwert in der CMD-Screening-Untersuchung. Dieser Unterschied ließ sich durch den mit 62,6 % hohen Anteil der Probanden mit Schienentherapien in der Fall-Kontroll-Studie erklären, die gewisse Symptome abmildern [15]. Laut Riley et al. (2020) und Zhang et al. (2021) gibt es aber weder bei CMD-assoziierten Schmerzen noch Bruxismus ausreichend Evidenz für den Therapieerfolg von Okklusionsschienen [175, 242].

Das Durchschnittsalter der MLFF betrug 40 Jahre; wobei PP mit 38 Jahren geringfügig jünger waren als HP und SP mit 41 Jahren. Laut umfangreichen Studien steigt die CMD-Inzidenz pro Lebensjahr um 4 % [202] und erreicht mit 40 Jahren die höchste Prävalenz [126]. Das geringere Alter der PP erklärt auch die um 400 geringere Anzahl der absolvierten Flugstunden in dieser Subgruppe.

### 6.4.2. CMD vs. Kieferorthopädische Behandlung & Bruxismus

Die für die Fall-Kontroll-Studie zu überprüfende Hypothese lautete: „MLFF erleiden weniger CMD nach kieferorthopädischer Behandlung in Anwesenheit von Bruxismus.“ Die Ergebnisse dieser Arbeit konnten die Nullhypothese statistisch signifikant alleinig für HP mit einem starken Effekt zurückweisen. Die Chance, unter CMD erkrankten HP eine kieferorthopädische Behandlung zusammen mit Bruxismus vorzufinden, war mehr als 7-mal so hoch wie unter CMD gesunden (Fallkollektiv 16,5 % betroffen vs. Kontrollkollektiv 0,0 %). Dieser Befund widerlegt Studien, wonach eine kieferorthopädische Behandlung keinen Einfluss auf CMD besitzt [124]. Auch eine aktuellere Studie fand in der Zivilbevölkerung ein Zusammenhang zwischen CMD-Symptomen und einer kieferorthopädischen Therapie [181]. Das ausschließliche Auftreten signifikanter Unterschiede in der Subgruppe der HP in der vorliegenden Arbeit lässt die Vermutung zu, dass eine Zahnspannenbehandlung eine kompromittierende Wirkung auf die KG ausübt, die durch schwingungsinduzierte Vibrationen im Flugverkehr und Bruxismus zunehmen.

### 6.4.3. CMD vs. Zahnhartsubstanz- und Parodontaldefekte

Die für die Fall-Kontroll-Studie zu überprüfende Hypothese lautete: „Zwischen den MLFF bestehen keine Unterschiede hinsichtlich nicht kariöser Zahnhartsubstanzdefekte und parodontaler Deformitäten. Die Notwendigkeit eines Zahnersatzes ist folglich unabhängig von einer CMD.“ Die Ergebnisse dieser Arbeit konnten den ersten Part der Nullhypothese ausschließlich in einem Parameter zurückweisen, konkret zeigten MLFF mit CMD gehäuft Abrasionen, wobei SP am stärksten betroffen waren.

MLFF mit CMD wiesen im Vergleich zu MLFF ohne CMD 2,6-mal häufiger (19,8 % vs. 7,7 %,  $p = 0,043$ ) keilförmige Defekte in Anwesenheit von zervikalen Kompositfüllungen auf. Dieser signifikante Unterschied war in den Subgruppen nicht nachweisbar. Laut einer deutschen Militärstudie provoziert ein mit posttraumatischen Stressbelastungen einhergehender Bruxismus keilförmige Defekte [232]. Der mit CMD assoziierte Bruxismus kann somit die keilförmigen Defekte und die Behandlung mittels zervikalen Kompositfüllungen erklären. Da dieser Effekt keinem Flugzeugtyp zugeordnet werden konnte, scheint diese Beobachtung unabhängig davon zu sein.

MLFF mit CMD zeigten im Vergleich zu MLFF ohne CMD 7,8-mal häufiger Abrasionen (34,1 % vs. 4,4 %,  $p < 0,0001$ ). Auch in den Subgruppen kamen Abrasionen in der Fallgruppe häufiger vor als in der Kontrollgruppe (HP:  $OR = 4,7$ ; PP:  $OR \geq 8,0$ ; SP:  $OR = 9$ ). Trotz ausreichender Teststärke deutet das breite KI auf die Notwendigkeit einer größeren Subgruppenbesetzung zur Validierung der Befunde hin [71, 163]. Auch in früheren Studien traten Bruxismus-assozierte Abrasionen bei MLFF von Militärjets im Vergleich zu nichtfliegenden Offizieren deutlich häufiger (69 % vs. 27 %) auf [123]. Weiter war die okklusale Stabilität bei diesen Flugzeugführern durch Bruxismus reduziert [146]. Bruxismus und damit verbundene Abrasionen treten vor allem bei SP auf [89, 123]. Die zur Kompensation der hohen g-Kräfte eingesetzte Pressatmung bei SP sowie die höheren Beschleunigungskräfte bei SP und PP erklären die geringere Ausprägung bei HP [113, 237].

Erosionen kamen im Fallkollektiv (12,1 %) ebenfalls häufiger vor als im Kontrollkollektiv (3,3 %); der Unterschied verfehlte nur knapp die Signifikanz in der 1:1 gepaarten Fall-Kontroll-Studie. In der 1:4 gepaarten Kontrolle zeigten sowohl das gesamte Fallkollektiv als auch die Untergruppen nach Flugzeugtyp signifikant höhere Anteile (vergleiche Tabelle A21,  $p = 0,023$ ). In der vorliegenden Arbeit wurde erstmals ein Zusammenhang zwischen Erosionen und CMD bei PP nachgewiesen. PP mit CMD zeigten viermal häufiger Erosionen als PP ohne CMD ( $p = 0,040$ , KI im Cochran-Q-Test

nicht berechenbar). Laut Sammito et al. (2022) konsumieren MLFF der Bundeswehr regelmäßig koffeinhaltige Getränke wie Energydrinks [183], die erosiv auf den Zahnschmelz wirken [198]. Aufgrund der flugphysiologischen Belastungen ist das Trinken für SP und HP generell erschwert. Dagegen erfahren PP flugphysiologisch entspanntere Bedingungen und können bei Langstreckenflügen säurehaltige Koffeingetränke konsumieren. In einer Militärstudie wurde ein Zusammenhang zwischen der Art des Trinkens von Erfrischungsgetränken und dem Auftreten von Erosionen identifiziert [92]. Das vermehrte Auftreten von Erosionen bei PP mit CMD beruht möglicherweise darauf, dass PP wegen CMD-bedingter Schlafstörungen unter Tagesmüdigkeit leiden und daher vermehrt Energydrinks trinken.

Wie schon in einer anderen Studie konnte in der vorliegenden Untersuchung kein signifikanter Unterschied beim Auftreten von Rezessionen im Fall- und Kontrollkollektiv (19,8 % vs. 16,5 %, unzureichende Teststärke) festgestellt werden [63]. Diese Argumentation überzeugt nur teilweise, denn neueste Erkenntnisse zeigen ein erhöhtes Vorkommen von Gingivarezessionen bei CMD [46].

Auch Haarrisse traten im Fall- und Kontrollkollektiv (4,4 % vs. 5,5 %, unzureichende Teststärke) nicht signifikant unterschiedlich häufig auf. Laut einer Studie mit geringer Stichprobengröße handelt es sich bei Frakturlinien im Zahn weniger um einen CMD-assoziierten, sondern vielmehr um einen altersabhängigen Befund [111].

Die Bedeutung der Zahnbeweglichkeit als weiterer möglicher Parodontaldefekt war zum Zeitpunkt der Fall-Kontroll-Studie nicht publiziert und wurde daher nicht berücksichtigt [46].

#### **6.4.4. CMD vs. Prothetik**

Die in der Fall-Kontroll-Studie zu überprüfende Nullhypothese, wonach die Notwendigkeit eines Zahnersatzes unabhängig von CMD bei MLFF sei, konnte nicht abgelehnt werden.

Im Mittel verfügten die MLFF über einen prothetisch behandelten Zahn. Während HP im Mittel zwei prothetisch versorgte Zähne besaßen, betrug dieser Wert bei SP eins und bei PP null; diese Unterschiede waren jedoch nicht signifikant. Die Literatur zu den Auswirkungen der Prothetik auf die Okklusion und CMD ist lückenhaft. Laut einer Studie an Kleinkindern wurde nach dem Einsetzen von acht Metallkronen die okklusale Reäquilibration nach einem Monat erreicht, ohne Anzeichen einer CMD [196]. Auch ist

bekannt, dass ein Bruxismus mit Abrasionen und damit Zahnhartsubstanzverlust einhergeht [63, 123]. Okklusale Veränderungen weisen laut einer Studie 22,9 % der CMD-Erkrankten auf; diese Ergebnisse waren jedoch nicht signifikant unterschiedlich zur Kontrollgruppe [46]. Möglicherweise war in der vorliegenden Studie aufgrund eines zu geringen Zahnhartsubstanzverlustes die Indikation einer Dentalprothetik nicht gegeben. Damit war auch keine Korrelation zwischen dem Zahnersatz und CMD erkennbar. Die vermutlich flugdynamisch bedingte (Vibrationen) höhere Anzahl prothetisch versorgter Zähne bei HP könnte Anlass für weitere Untersuchungen sein.

#### 6.4.5. CMD-assozierte Komorbiditäten

Nachfolgend werden die Ergebnisse möglicher CMD-assoziierter Komorbiditäten aller medizinischen Fachbereiche präsentiert (siehe Tabelle 12) und in den Kontext bestehender wissenschaftlicher Erkenntnisse eingeordnet.

Tabelle 12: Craniomandibuläre Dysfunktion-(CMD)-assozierte Komorbiditäten je Fachbereich in der Fallgruppe (CMD ja) und Kontrollgruppe (CMD nein) der Fall-Kontroll-Studie mit signifikanten Ergebnissen

Fachbereich	Medizinische Diagnose	CMD		Signifikante Ergebnisse		
		ja %	nein %	<i>p</i>	<i>OR</i>	95 %-KI
Neurologie	Kopfschmerzsyndrome	18,7	3,3	0,003	5,67	[1,67–19,34]
	Sonstige abnorme Befunde bei der bildgebenden Diagnostik des ZNS: WML	20,9	7,7	0,012	4,00	[1,34–11,96]
	Depressionen	3,3	1,1	_b	_b	_b
	Angststörungen	0,0	0,0	_b	_b	_b
	Nichtorganische Schlafstörungen	2,2	0,0	_b	_b	_b
	Schlafstörungen	3,3	0,0	_b	_b	_b
	Probleme mit Bezug auf: Konsum von Alkohol, Tabak, Arzneimitteln oder Drogen	3,3	5,5	_b	_b	_b
Hals-, Nasen-, Ohrenheilkunde	Benigner paroxysmaler Schwindel	3,3	0,0	_b	_b	_b
	Tinnitus aurium	22,0	3,3	0,001	9,50	[2,21–40,79]
	Hörschwierigkeiten	46,2	42,9	_b	_b	_b
	Chronische Rhinitis	0,0	0,0	_b	_b	_b
	Asthma	2,2	1,1	_b	_b	_b
	Schnarchen	26,4	23,1	_b	_b	_b
Innere Medizin	Abnorme Ergebnisse von kardiovaskulären Funktionsprüfungen	22,0	16,5	_b	_b	_b
	Reizdarmsyndrom	0,0	0,0	_b	_b	_b

Fachbereich	Medizinische Diagnose	CMD		Signifikante Ergebnisse		
		ja %	nein %	<i>p</i>	<i>OR</i>	95 %-KI
	Schilddrüsenfunktionsstörung	24,2	16,5	<sub>b</sub>	<sub>b</sub>	<sub>b</sub>
Augen- heil- kunde	Sonstiger Strabismus	11,0	7,7	<sub>b</sub>	<sub>b</sub>	<sub>b</sub>
	Sonstige Störungen der Blickbewegungen	0,0	0,0	<sub>b</sub>	<sub>b</sub>	<sub>b</sub>
	Sehstörungen	0,0	1,1	<sub>b</sub>	<sub>b</sub>	<sub>b</sub>
	Xerophthalmie	0,0	0,0	<sub>b</sub>	<sub>b</sub>	<sub>b</sub>
ZMK	Fehlende erste und zweite Molaren	9,3	6,0	<sub>b</sub>	<sub>b</sub>	<sub>b</sub>
Ortho- pädie	Skoliose	96,7	100	<sub>b</sub>	<sub>b</sub>	<sub>b</sub>
	Osteochondrose der Wirbelsäule	13,2	6,6	<sub>b</sub>	<sub>b</sub>	<sub>b</sub>
	Osteoarthritis	3,3	5,5	<sub>b</sub>	<sub>b</sub>	<sub>b</sub>
	Spondylose	6,6	1,1	<sub>b</sub>	<sub>b</sub>	<sub>b</sub>
	Sonstige näher bezeichnete Bandscheibenverlagerung	41,8	41,8	<sub>b</sub>	<sub>b</sub>	<sub>b</sub>
	Rückenschmerzen	39,6	41,8	<sub>b</sub>	<sub>b</sub>	<sub>b</sub>
	Schulterschiefstand	93,4	97,8	<sub>b</sub>	<sub>b</sub>	<sub>b</sub>
	Beckenschiefstand	13,2	14,3	<sub>b</sub>	<sub>b</sub>	<sub>b</sub>
	Wirbelsäule seitlich nicht regelrecht	58,2	50,5	<sub>b</sub>	<sub>b</sub>	<sub>b</sub>
	HWS funktional nicht regelrecht	4,4	3,3	<sub>b</sub>	<sub>b</sub>	<sub>b</sub>
	BWS funktional nicht regelrecht	34,1	16,5	<sub>a</sub>	<sub>a</sub>	<sub>a</sub>
	LWS funktional nicht regelrecht	63,7	52,7	<sub>b</sub>	<sub>b</sub>	<sub>b</sub>
	ISG nicht reizlos	0,0	1,1	<sub>b</sub>	<sub>b</sub>	<sub>b</sub>
	Gelenkschmerzen	4,4	6,6	<sub>b</sub>	<sub>b</sub>	<sub>b</sub>

*Anmerkung:* BWS = Brustwirbelsäule, HWS = Halswirbelsäule, ISG = Iliosakralgelenk, KI = Konfidenzintervall, LWS = Lendenwirbelsäule, *OR* = Odds Ratio, WML = White Matter Lesions, ZMK = Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde, ZNS = Zentralnervensystem <sup>a</sup> Signifikanz zunächst ermittelt, 1:4 kontrolliert nicht verifiziert. <sup>b</sup> Kein signifikanter Unterschied.

## Neurologie

MLFF der Fallgruppe zeigten 5,7-mal häufiger Kopfschmerzsyndrome als MLFF der Kontrollgruppe (18,7 % vs. 3,3 %, Tabelle 12). Dieses Ergebnis ist vergleichbar mit den Befunden einer ausländischen Fragebogenstudie mit Militärpersonal mit größerem Stichprobenumfang [217]. Weiter betrogen in einem systematischen Review mit Meta-Analyse (sieben Reviews erwachsener Probanden, geringe bis sehr geringe Evidenz) betrogen die *Ors* für schmerzhafte CMD und Spannungskopfschmerz 1,94–7,61 und für

Migräne 4,14–5,44. Die höchsten *Ors* zeigten mit 40,40–95,93 chronische Kopfschmerzen [173].

HP mit CMD zeigten vermutlich aufgrund der Nutzung von Helmen während des Flugbetriebs ein deutlich höheres Risiko ( $OR = 13$ ) für Kopfschmerzsyndrome als HP ohne CMD; dieser Unterschied war zudem deutlich größer als für Spannungskopfschmerzen [173]. Trotz ausreichender Teststärke des Ergebnisses deutet das breite KI die Notwendigkeit eines größeren Stichprobenumfangs für HP an [71, 163]. Eine Militärstudie mit ähnlicher Stichprobengröße fand zudem einen Zusammenhang zwischen der Helmnutzung und äußeren Kompressionskopfschmerzen bei Soldaten [165]. Auch das Tragen eines Nachtsichtgeräts (NVG bzw. Night Vision Goggles) führt bei HP und SP zu einer Verlagerung des Kopfschwerpunkts [157]. In diesem Kontext wurde bisher in kleinen Militärstudien bei HP eine Assoziation zwischen Kopfschmerzen und dem Tragen der Brille [208] und bei SP ein Zusammenhang zwischen dem Einsatz von Nachtsichtgeräten und einer erhöhten Aktivität der vorderen Halsmuskulatur [162] nachgewiesen. Dennoch scheinen weder der Helm noch das Nachtsichtgerät eine entscheidende Rolle für Cephalgien zu spielen, da bei den SP im Fall-Kontroll-Kollektiv kaum Personen betroffen waren. Vielmehr deuten die Ergebnisse an, dass Cephalgien mit CMD-Begleitsymptomen assoziiert sind. Der Zusammenhang zwischen Parafunktionen, (z. B. Bruxismus) wurde bereits nachgewiesen [222] und in der vorliegenden Untersuchung für HP bestätigt (siehe Kapitel 6.4.2). Die Befunde unterstreichen die multifaktorielle Verkettung von CMD, Bruxismus und Kopfschmerzen.

Bemerkenswert ist auch das statistisch auffällige Ergebnis zwischen Kopfschmerzsyndromen mit abnormen Befunden bei der bildgebenden Diagnostik des ZNS und CMD der HP (1:4 kontrolliert,  $p = 0,027$ , Tabelle A25) [163]. Dieser Befund lässt vermuten, dass die flugphysiologischen Schwingungen im Hubschrauber die KG erheblich beeinflussen, sich in Form von Vibrationen auf die Kopfgelenke übertragen [233] und so Kopfschmerzen und abnorme Befunde im ZNS auslösen. Letztere können aber auch durch Luftdruckveränderungen bedingt sein [109]. Zur Validierung der Befunde sind weitere Studien erforderlich, auch weil Migräne eine WFV ausschließt und 29,4 % des an Kopfschmerzsyndrom erkrankten Fallkollektivs davon betroffen war [98].

MLFF mit CMD zeigten 4-mal häufiger einen abnormen Befund bei der bildgebenden ZNS-Diagnostik (ICD-Code R90.8; entspricht WML) als MLFF ohne CMD (20,9 % vs. 7,7 %, Tabelle 12, sehr gute Teststärke). Von den PP des Modells „P-3C Orion“ wiesen

im Fallkollektiv 66,6 % WML auf, während im Kontrollkollektiv keiner betroffen war; beim „Sea Lynx MK88A“ betrug das Verhältnis 20,0 % zu 0,0 %. Bezogen auf das Gesamtkollektiv lag die Prävalenz von WML bei 9,7 %, was sich mit dem Ergebnis einer deutschen Militärstudie zur Prävalenz bei über 3300 Erstbewerbern für die Pilotenlaufbahn von 9,8 % deckt [207]. In der Arbeit wurde damit erstmals ein Zusammenhang zwischen CMD und WML (ICD-Code R80.92) nachgewiesen [58]. In einer großen Querschnittsstudie des ZentrLuRMedLw traten bei Schädel-MRTs von über 2700 Piloten und Pilotenbewerbern mit 14,4 % am häufigsten WML bzw. Hyperintensitäten der weißen Substanz im Gehirn auf [110]. Diese Prävalenz entspricht fast genau der Prävalenz von WML der vorliegenden Arbeit (14,3 %). Somit zeigen aktive Piloten aufgrund flugdynamischer Einflüsse generell eine höhere Prävalenz dieser abnormen Befunde im Vergleich zu Bewerbern ohne Flugerfahrung, die sich durch das Vorliegen einer CMD weiter erhöht. Die Assoziation von CMD mit WML blieb für HP in der 1:4 gepaarten Fall-Kontroll-Studie signifikant (Tabelle A25,  $p = 0,026$ ,  $OR = 1,75$ , KI im Cochran-Q-Test nicht berechenbar), was die Limitation der 1:1 kontrollierten Studie mit nicht signifikantem Ergebnis aufdeckt ( $p = 0,289$ ). Verschiedene Studien empfehlen bei der klinischen Untersuchung von Patienten mit CMD nozizeptive Mechanismen des ZNS einzubeziehen [145] und Top-down-Interventions-Behandlung vorzunehmen [73]. Dabei wurde bislang der selbstberichtete Fragebogen (Central Sensitization Inventory) von Neblett et al. (2013) genutzt [144]. Die Identifikation des Zusammenhangs CMD mit ICD-Code R80.9-Befunden war in der vorliegenden Erhebung möglich, da MRT-Analysen des Schädels und der Wirbelsäule am ZentrLuRMedLw routinemäßig bei Erstbewerbern und aktiven Soldaten im Rahmen der Untersuchung auf WFV erfolgen. Auffälligkeiten führen je nach Schwere zum Ausschluss der WFV oder zu Nachuntersuchungen mittels bildgebender Diagnostik, üblicherweise nach 1000 Flugstunden oder vor Beginn der fliegerischen Ausbildung [98]. Eine regelmäßige Abklärung des ZNS von gesunden Individuen ist im Zivilbereich ohne rechtfertigende Indikation ethisch nicht umsetzbar. Mit der älteren Generation von 1-Tesla-MRT-Geräten wurden zudem seltener abnorme Befunde identifiziert als mit der hochauflösenden 3-Tesla-MRT-Technologie [207]. Daher blieb die Assoziation zwischen CMD und tomografischen Abweichungen im ZNS (z. B. WML) lange Zeit unentdeckt. Die Ergebnisse von Fernández-de-Las-Peñas et al. (2020) lassen vermuten, dass sich abnorme Befunde im ZNS als prognostisches Instrument für CMD eignen [73]. In einer experimentellen Studie am ZentrLuRMedLw mit zwei gesunden Soldaten

nahmen in einer Druckkammer (Flughöhe über 4,500 Höhenkilometern – entspricht der HP-Flughöhe) die WML bei Hypoxie zu [109] (siehe Abbildung 28).

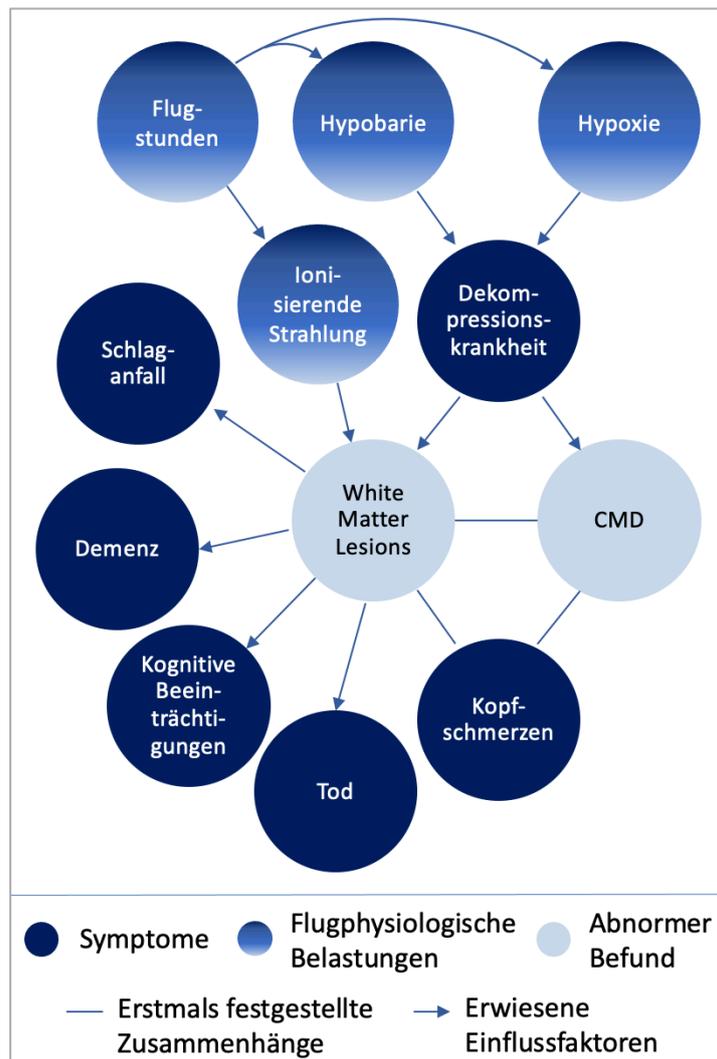


Abbildung 28: Schematische Darstellung der Zusammenhänge von White Matter Lesions (WML) und craniomandibulärer Dysfunktion (CMD) bei Militärluftfahrzeugführern (MLFF)

In einer weiteren experimentellen Studie mit zehn Soldaten waren sie nach Beendigung der Hypoxie-Exposition nach 3,5 Monaten auf ihren Ausgangswert zurückgekehrt [206]. Diese Argumentation überzeugt nur teilweise, denn bei regelmäßigem Flugbetrieb ist ein solcher WML-Rückgang laut McGuire et al. (2019) nicht zu erwarten [130], zudem wurden nur kleine Stichproben untersucht. In zwei größeren Fall-Kontroll-Studien von McGuire et al. (2014, 2019) mit über 100 Piloten und teilweise Messwiederholungen nahmen bei nicht-hypoxischer Hypobarie mit einem Kabinendruck von 9,000 Kilometern und 100%iger Sauerstoffversorgung sowohl die Anzahl (um 295 %) als auch die Volumina der WML (um 394 %) zu [131]; diese Änderungen hielten 72 Stunden an [130]. Die Bedingungen bei den Untersuchungen ähneln den flugphysiologischen Bedingungen der PP für „P-3C Orion“. Die Befunde erklären die hohe gemeinsame Prävalenz von

CMD und WML. Hyperintensitäten der weißen Substanz schädigen nachweislich die Hirnsubstanz. Debette et al. (2010) warnen vor schweren klinischen Manifestationen, wie ein erhöhtes Schlaganfallrisiko, kognitiver Verfall, Demenz und Tod [54]. Laut einem systematischen Review kann die niedrige bis mäßige ionisierende Strahlung bei der Flughöhe von HP zu Erkrankungen des ZNS führen [117]. Dieser Effekt scheint gegenüber dem in den experimentellen Studien (ohne Strahlung) beschriebenen Effekt der Hypoxie oder Hypobarie geringer zu sein .

Insgesamt suggerieren die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit, dass CMD erkrankte MLFF in Kombination mit Hypoxie und insbesondere Hypobarie bei bis zu 9,000 Höhenkilometern einerseits Kopfschmerzen und andererseits WML aufweisen, die scheinbar den Alterungsprozess des Gehirns beschleunigen [188]. Künftige Studien sollten die vorliegenden Ergebnisse validieren, da die WFV bei jedem Hinweis auf eine Erkrankung des ZNS ausgeschlossen wird [98] und Lücken bei luftfahrtmedizinischen Zertifizierungen die Mortalität erhöhen [137].

Der Unterschied bei der Häufigkeit des Auftretens von Depressionen im Fall- und Kontrollkollektiv (3,3 % vs. 1,1 %) war nicht signifikant. In einer anderen Studie lag die Prävalenz von Depressionen beim Auftreten einer CMD mit 30,4 % deutlich höher [23]. Der Unterschied ist nachvollziehbar, da mit 88,3 % vorwiegend Frauen von Depressionen bei CMD betroffen sind, die in der vorliegenden Arbeit ausgeschlossen wurden. Auch führen schwere rezidivierende psychische Störungen im Bewerberverfahren für die Pilotenlaufbahn zum Ausschluss der WFV [98]. Das Fall-Kontroll-Kollektiv der vorliegenden Arbeit beinhaltete folglich vornehmlich gesunde Soldaten.

In der vorliegenden Studie traten Angststörungen weder in der Fall- noch in der Kontrollgruppe auf. Die Prävalenz von Angststörungen bei CMD in der zivilen Bevölkerung beträgt dagegen 28,9 % [23]. Mögliche Gründe für die differenten Befunde sind auch hier die Dominanz des weiblichen Geschlechts bei Angststörungen bei CMD und der Ausschluss von Bewerbern mit schweren rezidivierenden psychischen Störungen bereits im Bewerberverfahren für die Pilotenlaufbahn [98].

Die Unterschiede bei der Häufigkeit des Auftretens von nichtorganischen Schlafstörungen (2,2 % vs. 0 %) bzw. Schlafstörungen (3,3 % vs. 0 %) im Fall- und Kontrollkollektiv waren nicht signifikant. Eine Zivilstudie mit kleinerem Stichprobenumfang ergab eine CMD-Symptom-Prävalenz von 51 % bei obstruktiver Schlafapnoe [9]. Weiter wurde in einer umfangreichen Populationsstudie Schlafapnoe als

Risikofaktor für CMD identifiziert [235]. Die geringe Prävalenz in der vorliegenden Arbeit erklärt sich dadurch, dass mit Schlafstörungen einhergehende Hypersomnien bereits im Bewerberverfahren für die Pilotenlaufbahn zum Ausschluss der WFV führen [98]. Zudem wurden drei von fünf MLFF mit organischen oder nicht-organischen Schlafstörungen die WFV entzogen.

Der Unterschiede bei der Häufigkeit des Auftretens von „Problemen mit Bezug auf: Konsum von Alkohol, Tabak, Arzneimitteln oder Drogen“ im Fall- und Kontrollkollektiv (3,3 % vs. 5,5 %) war bei unzureichender Teststärke nicht signifikant. Eine Studie mit einer größeren Stichprobe fand keinen Zusammenhang zwischen CMD-assoziierten Kopfschmerzen und dem Konsum von Alkohol oder Tabak [22]. Dagegen betonten Melo et al. (2019) die Assoziation zwischen CMD-assoziiertem Bruxismus und dem Konsum von Alkohol, Tabak, Arzneimitteln oder Drogen [133]. Die geringe Prävalenz in der vorliegenden Arbeit beruht vermutlich darauf, dass der schädliche Gebrauch oder die Abhängigkeit von Drogen, Arzneimitteln oder Alkohol bereits im Bewerberverfahren für die Pilotenlaufbahn zum Ausschluss der WFV führt [98]. Von den acht betroffenen MLFF wurde nur in einem Fall die WFV entzogen. Der schädliche Gebrauch solcher Substanzen scheint bei vornehmlich gesunden MLFF keinen hohen Stellenwert zu besitzen.

### **Hals-, Nasen-, Ohrenheilkunde**

Ein benigner paroxysmaler Schwindel trat in der vorliegenden Studie insgesamt selten und in der Fall- (3,3 %) und Kontrollgruppe (0,0 %) nicht signifikant verschieden häufig auf. In einem systematischen Review betrug die Prävalenz von benignem paroxysmalem Schwindel bei CMD dagegen 40,8 % [160]. Auch hier beruht die geringe Prävalenz in der vorliegenden Studie auf einer Nichtaufnahme der Bewerber mit derartigen Erkrankungen für die Pilotenlaufbahn [98]. Zwei der drei MLFF mit benignem paroxysmalem Schwindel wurde die WFV entzogen.

MLFF mit CMD zeigten eine um einen Faktor 9,5 und damit signifikant höhere Wahrscheinlichkeit einen Tinnitus zu entwickeln als MLFF ohne CMD (22,0 % vs. 3,3 %, Tabelle 12). Diese Begleiterkrankung trat somit am häufigsten auf. In einem systematischen Review lag die Tinnitus-Prävalenz bei einer CMD bei 3,7–70 % und bei CMD-Gesunden bei 1,7–26 % [200]. In den Studien einer Meta-Analyse von Omidvar et al. (2019) betragen die *OR* für das gemeinsame Auftreten von Tinnitus und CMD 1,78–7,79 [149]; bei Mottaghi et al. (2019) lag die *OR* bei 4,45 [141]. Einige wenige

Militärstudien untersuchten Ohrgeräusche; Analysen zum gemeinsamen Auftreten von CMD und Tinnitus fehlten dagegen. Eine ausländische Studie zu Militärpiloten mit kleiner Stichprobe bezifferte die Prävalenz für Tinnitus mit 18,4 % [8]. Dieser Wert deckt sich mit dem Ergebnis des gemeinsamen Kollektivs der vorliegenden Fall-Kontroll-Studie. Laut einer Studie ist die Mehrzahl der an Tinnitus leidenden Männer Lärm ausgesetzt [132]. Die Lärmbelastung im Flugbetrieb für Militärpiloten überschreitet die EU-Risikogrenzen; SP sind davon am stärksten betroffen [142]. Das vorliegende differente Ergebnis des Auftretens von Tinnitus bei MLFF mit und ohne CMD ( $OR = 9,5$ ) verdeutlicht jedoch, dass die Lärmbelastung nicht der einzige Risikofaktor für Tinnitus bei MLFF ist. Auch die 1:4 gepaarte Fall-Kontroll-Studie (Tabelle A25) ergab einen signifikanten Unterschied für SP ( $p = 0,0001$ , KI im Cochran-Q-Test nicht berechenbar). Die vorliegende Arbeit konnte somit für SP erstmals einen Zusammenhang zwischen Tinnitus und CMD nachweisen. Die Ergebnisse suggerieren, dass flugphysiologische Dynamiken und die Pressatmung bei SP CMD begünstigt [122], indem beschleunigungsbedingt der Kondylus nach posterior verschoben wird, wodurch Tinnitus induziert wird [102]. Zusammenfassend wäre eine Überprüfung des Zusammenhangs zwischen CMD und Tinnitus bei MLFF und insbesondere SP mit größeren Stichproben sinnvoll.

Die Häufigkeit des Auftretens von Hörschwierigkeiten war im Fall- und Kontrollkollektiv (46,2 % vs. 42,9 %, unzureichende Teststärke) nicht signifikant verschieden. Die Ergebnisse mit einem leicht erhöhten Risiko für CMD-Erkrankte ähneln den Daten von Song et al. (2018) [205]. Eine Überprüfung der Befunde mit größeren Stichproben wäre sinnvoll.

Keiner der Probanden der Fall- und Kontrollgruppe war von einer chronischen Rhinitis betroffen. Dagegen wiesen 8,3 % der Probanden der MRT-Studie (siehe Kapitel 5.2.2) eine Sinusitis auf, die bei der Untersuchung im Fachbereich der Hals-, Nasen-, Ohrenheilkunde nicht berücksichtigt wurde. Auch in der zivilen Bevölkerung zeigen CMD-Erkrankte häufiger eine chronische Rhinitis [205]. Das Fehlen einer chronischen Rhinitis im Fall-Kontroll-Kollektiv lässt sich dadurch erklären, dass derartige Störungen im Bewerberverfahren für die Pilotenlaufbahn zum Ausschluss der WFV führen [98].

Die Häufigkeit von Asthma war im Fall- und Kontrollkollektiv (2,2 % vs. 1,1 %) nicht signifikant verschieden. Das leicht erhöhte Risiko für Asthma bei einer CMD entspricht den Beobachtungen einer Großstudie von Song et al. (2018) [205]. Aufgrund der geringen

Häufigkeit und der eingeschränkten Stichprobengröße sollten die Daten jedoch mit Vorsicht interpretiert werden.

Schnarchen trat im Fall- und im Kontrollkollektiv nicht signifikant unterschiedlich häufig auf (26,4 % vs. 23,1 %, unzureichende Teststärke). Auch in einer Fragebogenstudie bestand zwischen primärem Schnarchen und CMD kein Zusammenhang [81].

### **Innere Medizin**

Die Häufigkeit des Auftretens abnormer Ergebnisse bei kardiovaskulären Funktionsprüfungen war im Fall- und Kontrollkollektiv nicht signifikant verschieden (22,0 % vs. 16,5 %, unzureichende Teststärke). CMD schienen somit die kardiovaskuläre Funktion nicht zu beeinträchtigen. Bekannt ist, dass Piloten im Vergleich zu Nicht-Piloten vermehrt unter Stress und Bruxismus leiden, was das erhöhte Risiko von kardiovaskulären Störungen insbesondere auch bei einer CMD in dieser Berufsgruppe erklärt [7]. Der mögliche Einfluss von CMD auf die kardiovaskuläre Funktion bei MLFF sollte in größeren Kohorten überprüft werden.

Die Häufigkeit des Auftretens von Schilddrüsenfunktionsstörungen war im Fall- und Kontrollkollektiv nicht signifikant verschieden (24,2 % bzw. 16,5 %). Das leicht erhöhte Risiko bei einer CMD entspricht den Beobachtungen einer Großstudie von Song et al. (2018) [205].

Von einem Reizdarmsyndrom war nur ein MLFF im Fallkollektiv (1,1 %) betroffen. Der Unterschied zwischen der Fall- und Kontrollgruppe war nicht signifikant. Bislang existierende Studien mit kleiner Fallzahl geben die Häufigkeit des Reizdarmsyndroms bei CMD-Erkrankten mit 46,8 % an [1, 138]. Aufgrund der geringen Häufigkeit und der Studienmethodik (Fragebögen, ausschließlich Frauen) der Erkrankung, die zum Ausschluss der WFV führt, sollten die Daten vorsichtig interpretiert werden [98].

### **Augenheilkunde**

Sonstiger Strabismus trat im Fallkollektiv nicht signifikant häufiger auf als im Kontrollkollektiv (11,0 % vs. 7,7 %, unzureichende Teststärke). Diese Ergebnisse entsprechen dennoch den Befunden einer kleinen Studie, die einen Zusammenhang zwischen CMD-Patienten und Augenkonvergenzdefekten beschreibt [139]. Eine Überprüfung der Befunde an größeren Stichproben wäre sinnvoll.

Probanden der Fall- noch Kontrollgruppe waren nicht von sonstigen Störungen der Blickbewegungen betroffen. Dagegen schien in einer Studie mit geringem

Stichprobenumfang CMD okulomotorische Störungen zu begünstigen [226]. Das Fehlen derartiger Fälle im vorliegenden Kollektiv lässt sich durch den Ausschluss von Bewerbern mit visuellen Dysfunktionen für die Pilotenlaufbahn erklären [98].

Eine Xerophthalmie kam weder in der Fall- noch Kontrollgruppe vor. Dagegen erhöhte eine CMD in der zivilen Bevölkerung das Risiko für eine Xerophthalmie [205]. Das Fehlen derartiger Fälle im vorliegenden Kollektiv lässt sich durch den Ausschluss von Bewerbern mit Xerophthalmie für die Pilotenlaufbahn erklären [98].

### **Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde**

Die Häufigkeit von fehlenden ersten und zweiten Molaren war im Fall- und Kontrollkollektiv nicht signifikant verschieden (9,3 % vs. 6,0 %). Eine Großstudie deutet dagegen einen Zusammenhang zwischen CMD und Zahnverlust in den Stützonen an [66]. Bei der Interpretation der vorliegenden Befunde sollte berücksichtigt werden, dass laut Bereichsrichtlinie fliegendes Personal der Bundeswehr bei Zahnverlust nach Möglichkeit mit festsitzendem Zahnersatz zu versorgen ist [241].

### **Orthopädie**

Eine Skoliose trat im Fall- und Kontrollkollektiv vergleichbar häufig auf (96,7 % bzw. 100 %). Laut einer Studie mit kleinem Stichprobenumfang scheint eine idiopathische Skoliose häufiger CMD-Symptome hervorzurufen [224]. Diese Daten konnten nicht bestätigt werden. Die hohen Skoliose-Prävalenzen resultieren aus den extremen flugdynamischen Belastungen.

Osteochondrosen der Wirbelsäule traten im Fallkollektiv mit 13,2 % mehr als doppelt so häufig auf wie im Kontrollkollektiv (6,6 %), dennoch war dieser Unterschied nicht signifikant. Die Prävalenz der Erkrankung liegt zwischen 0,4–10 % [184]. In einer Dekaden-Studie wird das Auftreten einer Osteochondrose des KG bei CMD als selten bezeichnet [72]; Studien zu CMD bei Osteochondrose der Wirbelsäule fehlen. Die erhöhte Krankheitshäufigkeit im Fallkollektiv lässt sich durch den Einfluss der Flugphysiologie in Anwesenheit von Stress-bedingtem Bruxismus erklären [7]. Eine Überprüfung der Befunde mit einer größeren Stichprobe wäre sinnvoll.

Auch Osteoarthritis kamen im Fall- und Kontrollkollektiv vergleichbar häufig vor (3,3 % vs. 5,5 %). Dieser Befund steht im Widerspruch zu den Ergebnissen einer Großstudie ( $OR = 1,51$ ) [205]. Aufgrund des wesentlich kleineren Stichprobenumfangs sind die Ergebnisse der vorliegenden Studie weniger aussagekräftig.

MLFF mit CMD litten 6-mal häufiger als MLFF ohne CMD (6,6 % vs. 1,1 %) an einer Spondylose, dennoch war dieser Unterschied nicht signifikant. Diese degenerative Veränderung der Wirbelsäule wird durch die ungünstige Sitzposition der SP und HP begünstigt, wobei letztere durch Ganzkörpervibrationen zusätzlich belastet werden [157]. In einer älteren Untersuchung definierte Franks 1968 die Spondylose im Bereich der HWS als Symptom bei CMD [76]. In der vorliegenden Arbeit blieb unklar, welche Abschnitte der Wirbelsäule betroffen waren. Weitere Untersuchungen sollten die Lokalisierung der Spondylose berücksichtigen.

Sonstige näher bezeichnete Bandscheibenverlagerungen waren in der Fall- und Kontrollgruppe mit 41,8 % gleich häufig (unzureichende Teststärke). In einer Studie mit MLFF der Bundeswehr wiesen HP im Vergleich zu Piloten anderer Flugzeugtypen aufgrund der ungünstigen Körperhaltung und Ganzkörpervibrationsbelastung am häufigsten bandscheibenbedingte Beschwerden der HWS und LWS auf [158]. Dieser Befund erklärt die CMD-unabhängige hohe Prävalenz im vorliegenden Fall-Kontroll-Kollektiv.

Auch Rückenschmerzen traten im Fall- und Kontrollkollektiv vergleichbar häufig auf (39,6 % vs. 41,8 %, unzureichende Teststärke). Als metrischer Parameter waren Rückenschmerzen in der Fallgruppe deutlich seltener vertreten, der Unterschied verfehlte die Signifikanz nur knapp ( $Mdn = 0$  Schmerzregionen im Rückenbereich,  $p = 0,056$ ). Eine Überprüfung mit einem 1:4-Fall-Kontroll-Kollektiv ergab keinen signifikanten Zusammenhang zwischen CMD und Rückenschmerzen. Rückenschmerzen traten unabhängig von einer CMD in beiden Gruppen häufig auf und wurden in der Literatur vor allem bei HP und SP beschrieben [161, 174]. Auch eine größere Studie fand keinen Zusammenhang zwischen chronischen Schmerz assoziierten CMD und Rückenschmerzen [30].

Ein Schulterschiefstand kam im vorliegenden Fall- und Kontrollkollektiv vergleichbar häufig vor (93,4 % vs. 97,8 %). Dieser Befund widerspricht den Ergebnissen von Chaves et al. (2014), wonach kraniozervikale Halterungsveränderungen stark durch myogene CMD und mäßig durch arthrogene CMD beeinflusst werden [45]. Im vorliegenden Fall-Kontroll-Kollektiv resultierten die hohen Prävalenzen aus den flugdynamischen Belastungen.

Auch ein Beckenschiefstand wurde im Fall- und Kontrollkollektiv vergleichbar häufig diagnostiziert (13,2 % vs. 14,3 %, unzureichende Teststärke). Der Unterschied war bei

SP mit 25,0 % vs. 4,2 % am größten. Bei den PP wiesen dagegen Probanden ohne CMD höhere Prävalenzen auf (7,7 % vs. 26,9 %). In einer Studie mit kleiner Stichprobe wiesen mit 86,7 % deutlich mehr CMD-Patienten eine Beckenneigung auf [68]. In Zukunft sollte eine Überprüfung der Befunde an größeren Stichproben erfolgen.

Der Befund einer seitlich nicht regelrechten Wirbelsäule wurde im Fallkollektiv bei 58,2 % und im Kontrollkollektiv bei 50,5 % der Probanden gestellt; dieser Unterschied war bei unzureichender Teststärke nicht signifikant. Die höhere Prävalenz im Fallkollektiv deutet jedoch an, dass funktionelle Verkettungen zwischen Kopf- und Wirbelkörpergelenken pathologische Veränderungen in entfernteren Körperregionen hervorrufen können [159]. Eine Überprüfung der Befunde an einer größeren Stichprobe ist anzustreben.

Der Befund einer funktionell nicht regelrechten HWS wurde im Fall- bzw. Kontrollkollektiv bei 4,4 % bzw. 3,3 % der Probanden gestellt; dieser Unterschied war bei unzureichender Teststärke nicht signifikant. Verschiedene Studien berichten über Beschwerden in der HWS bei MLFF [158]. Die fehlenden Unterschiede zwischen der Fall- und Kontrollgruppe und die Befunde eines systematischen Reviews deuten auf ein CMD-unabhängiges Geschehen hin [148].

Bei MLFF mit CMD wurde der Befund einer funktionell nicht regelrechten BWS 2,6-mal häufiger und signifikant öfter gestellt als bei MLFF ohne CMD (34,1 % vs. 16,5 %,  $p = 0,011$ ). HP zeigten die größte Differenz. Stellungsfehler der BWS in der CMD-Gruppe bestätigen Studien, wonach funktionelle Verkettungen zwischen Kopf- und Wirbelkörpergelenken pathologische Veränderungen an entfernteren Körperregionen hervorrufen können [159]. Die Aussagekraft der 1:1-gepaarten Fall-Kontroll-Studie ist jedoch limitiert, da die Signifikanz der Unterschiede bei einem 1:4-Vergleich nicht bestehen blieb (siehe Tabelle A25). Folglich handelte es sich bei dem vermehrten Auftreten einer funktionell nicht regelrechten BWS bei MLFF mit CMD eher um eine zufällige Häufung [64].

Die Häufigkeit des Befundes einer funktionell nicht regelrechte LWS war im Fall- und Kontrollkollektiv nicht signifikant verschieden (63,7 % vs. 52,7 %, unzureichende Teststärke). Auch in der Literatur wurde bereits über Beschwerden an der LWS bei MLFF berichtet [158]. Die höhere Prävalenz im Fallkollektiv belegt, dass funktionelle Verkettungen zwischen Kopf- und Wirbelkörpergelenken pathologische Veränderungen

an entfernteren Körperregionen hervorrufen können [159]. In Zukunft sollte eine Überprüfung der Befunde an größeren Stichproben erfolgen.

Schmerzen im ISG kamen im Fall- und Kontrollkollektiv vergleichbar selten vor (0,0 % vs. 1,1 %). Der in einer Studie identifizierte, funktionell ungeklärte Zusammenhang zwischen ISG-Schmerzen und CMD [27] ließ sich anhand der vorliegenden Ergebnisse weder bestätigen noch widerlegen.

Auch der Unterschied bezüglich des Auftretens von Gelenkschmerzen zwischen dem Fall- und Kontrollkollektiv (4,4 % vs. 6,6 %, unzureichende Teststärke) war nicht signifikant. Dagegen bezifferten Progiante et al. (2015) die Prävalenz von CMD-Schmerzen im Fallkollektiv ihrer Großstudie mit 36,2 % [164]. Die deutlich niedrige Schmerzpräsenz in der vorliegenden Arbeit beruht möglicherweise darauf, dass Betroffene ihre Beschwerden aus Sorge, von der WFV ausgeschlossen zu werden, verschwiegen haben.

In der Gesamtschau scheinen CMD-assoziierte Komorbiditäten derzeit noch nicht vollständig erfasst zu sein. Eine Studie beschreibt weitere ophthalmologische Störungen im Zusammenhang mit CMD, ohne genaue Krankheitsbilder zu benennen [226]. Eine andere Arbeit berichtet über das vermehrte Auftreten von Fibromyalgien bei CMD [1]. Diese Erkrankung trat möglicherweise aufgrund der kleinen Fallzahl im vorliegenden Fall- und Kontrollkollektiv nicht auf. Die Existenz weiterer, derzeit noch nicht untersuchter Begleiterkrankungen bei CMD ist nicht auszuschließen.

#### **6.4.6. Mediationsanalyse in Abhängigkeit von Fluguntauglichkeit**

Die für die Fall-Kontroll-Studie zu überprüfende Hypothese lautete: „Eine CMD hat bei MLFF indirekt über Komorbiditäten keinen Einfluss auf die Fluguntauglichkeit.“ Die Ergebnisse dieser Arbeit konnten die Nullhypothese nicht zurückweisen.

Laut den Daten der vorliegenden Arbeit bestand ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Anzahl der mit CMD assoziierten Komorbiditäten und der CMD-Erkrankung (mäßiger Effekt). Außerdem war das Risiko von der WFV ausgeschlossen zu werden, bei MLFF mit CMD im Vergleich zu MLFF ohne CMD 6,2-mal so hoch. In keiner der Subgruppen bestand eine signifikante Assoziation zwischen CMD mit Fluguntauglichkeit, die SP schienen jedoch am unwahrscheinlichsten betroffen. Die Begleiterkrankungen übten bei unzureichender Varianzaufklärung weder direkt als unabhängige Variable noch indirekt als Mediator einen signifikanten Effekt auf die WFV

aus. Auch die logistische Regressionsanalyse mit ausschließlich laut Signifikanzprüfung CMD-assoziierten Komorbiditäten ergab keinen signifikanten indirekten Effekt bei unzureichender Varianzaufklärung (siehe Tabelle A27). Laut älterer Verfahren der Mediationsanalyse sollten bei nicht signifikanten Ergebnissen – wie in der vorliegenden Studie bei der logistischen Regression zwischen Mediator und abhängiger Variable – keine weiteren Berechnungen erfolgen. Jüngere Veröffentlichungen halten dagegen die Interpretation des (fehlenden) indirekten Effekts für wichtig [243]. In der vorliegenden Studie könnte der fehlende Effekt der Komorbiditäten auf der Qualität und nicht auf der Quantität der flugmedizinisch relevanten Befunde beruhen. Ferner erklärt dies die zum Teil geringen Prävalenzen in einigen CMD assoziierten Komorbiditäten, die einen Ausschluss der WFV nach sich ziehen oder eine Aufnahme in die Pilotenlaufbahn verwehren. Weitere Untersuchungen sind erforderlich, um die Einflussfaktoren, die zum Einbüßen der WFV führen, eindeutig zu identifizieren.

#### **6.4.7. Schlussfolgerung für die Praxis und klinische Relevanz**

Insgesamt lässt sich festhalten, dass 6,5 % der untersuchten MLFF der Bundeswehr von einer CMD betroffen waren. Nach eigenen Aussagen nahmen betroffene MLFF keine Dolenzen wahr. Die Risikofaktoranalyse ergab, dass diese Erkrankung mit steigender Flugstundenfrequenz die Entstehung einer unilateralen KG-Arthrose begünstigt. Auch traten CMD vermehrt bei der U-Boot-Jagd dienenden Flugzeugmodellen (Sea Lynx MK88A, P-3C Orion) auf. MLFF mit CMD zeigten gehäuft Abrasionen, wobei SP am stärksten betroffen waren. PP wiesen insgesamt häufiger Erosionen auf. Weiter kamen bei HP mit CMD häufiger kieferorthopädische Behandlung bei Bruxismus, Kopfschmerzsyndrome sowie WML vor. SP mit CMD waren vermehrt von einem Tinnitus bzw. einer posterioren Kondylusdislozierung mit Tinnitus betroffen. Bezüglich der WFV zeichnete sich ein unzureichend geklärter erkrankungsbedingter Ausschluss bei CMD-Fällen ab, wobei die mit CMD assoziierten Komorbiditäten nicht als Mediator fungierten. Der Vergleich MLFF mit und ohne CMD ergab für die Parameter Flughöhe, Rezession und Zahnersatz keine signifikanten Unterschiede. Die erhobenen Effekte der CMD bei den MLFF sind nach Flugzeugmodellen in Tabelle 13 zusammengefasst.

Tabelle 13: Nachgewiesene pathologische Zusammenhänge der vorliegenden Arbeit für Militärluftfahrzeugführer (MLFF) mit craniomandibulärer Dysfunktion (CMD) – Gesamtkollektive sowie für die Subgruppen nach Flugzeugtyp

Assoziation mit CMD			
Flugzeugtyp	Hubschrauber	Propellerflugzeug	Strahlflugzeug
Gesamtkollektiv	45,4 % (N = 640)	21,2 % (N = 299)	33,4 % (N = 470)
Fallkollektiv	6,4 % (n = 41)	8,7 % (n = 26)	5,1 % (n = 24)
Querschnittsstudie	“Sea Lynx MK88A” (OR 2,89; KI [1,12–7,42])	“P-3C Orion” (OR 5,40; KI [2,14–13,64])	- <sup>c</sup>
MRT-Studie	Unilaterale KG-Arthrose: OR 3,56 nach 1000 Flugstunden (R <sup>2</sup> = 0,717; KI [1,05–2,55]).		
	Kondylusdislozierung nach dorso-(cranial) im Zusammenhang mit Tinnitus (OR 11,00; KI [2,40–50,49])		
Fall-Kontroll-Studie	Kieferorthopädische Behandlung in Anwesenheit von Bruxismus (OR > 15,00; p < 0,001 <sup>a</sup> )		
	(OR > 7,00; p = 0,016 <sup>a</sup> )	- <sup>c</sup>	- <sup>c</sup>
	Abrasionen (OR 7,75; KI [2,74–21,96])		
	(OR 4,67; KI [1,34–16,24])	(OR > 8,00; p = 0,013 <sup>b</sup> )	(OR 9,00; KI [1,14–71,04])
	Erosionen (OR 3,38; p = 0,023 <sup>b</sup> )		
	- <sup>c</sup>	(OR 4,00; p = 0,040 <sup>a</sup> )	- <sup>c</sup>
	Kopfschmerzsyndrom (OR 5,67, KI [1,67–19,34])		
	(OR 13,00; KI [1,70–99,38])	- <sup>c</sup>	- <sup>c</sup>
	White Matter Lesions (OR 4,00, KI [1,34–11,96])		
	(OR 1,75; p = 0,026 <sup>b</sup> )	- <sup>c</sup>	- <sup>c</sup>
Tinnitus (OR 9,50, KI [2,21–40,79])			
- <sup>c</sup>	- <sup>c</sup>	(OR > 9,00; p = 0,004 <sup>a</sup> )	
Ausschluss der WFV: OR 6,20 (R <sup>2</sup> = 0,154; c <sup>(direkt)</sup> = 1,824; KI [1,58–24,29])			

Anmerkung: KG = Kiefergelenk, KI = Konfidenzintervall, MRT = Magnetresonanztomografie, OR = Odds Ratio (MLFF mit CMD vs. MLFF ohne CMD), WFV = Wehrfliegerverwendungsfähigkeit <sup>a</sup> KI konnte aufgrund zu kleiner Fallzahl in den Zellen b und c nicht ermittelt werden. <sup>b</sup> KI konnte aufgrund Cochran-Q-Test nicht ermittelt werden. <sup>c</sup> Kein signifikanter Unterschied.

Die Befunde belegen die wehrmedizinische Bedeutung der CMD für die Einbuße der WFV bei MLFF. Die dringend benötigte Aufklärung zur Erkrankung CMD, zu deren Zusammenhang mit Kopfschmerzen, WML und Tinnitus sowie zum Einfluss von säurehaltigen Getränken sollte in das flugmedizinische Training implementiert werden. Kontrollen der KG sollten standardmäßig in die MRT-Eingangs- und Nachuntersuchungen von MLFF aufgenommen werden, um pathologische Veränderungen rechtzeitig zu diagnostizieren bzw. therapieren und somit die WFV zu sichern. Derzeit wird bei WFV-Nachuntersuchungen von MLFF alle 1000 Flugstunden oder alle 10 Jahre mittels MRT-Kontrollen lediglich die Wirbelsäule beurteilt [98]. Die Flughöhe der mit CMD assoziierten Flugzeugmodelle liegt an hypoxischen und hypobaren kritischen Schwellenwerten. Weiter sind MLFF in diesen Modellen deutlichen Vibrationen ausgesetzt. Eine Verringerung der Flughöhe beider Modelle um 10 % oder ein früherer Einsatz von Sauerstoff bzw. Überdruck sind mögliche Ansatzpunkte zur Vermeidung einer mit CMD verbundenen Dekompressionskrankheit. Die Nachfolge für beide Modelle ist bereits beschlossen, jedoch müssen Longitudinalstudien zeigen, ob bei den künftigen Modellen die Vibrationsbelastungen persistieren und weiter die Entwicklung von CMD begünstigen. In diesem Fall wäre die Flugzeugindustrie gefordert, vibrationsärmere Fluggeräte zur Gesunderhaltung der MLFF und der Besatzungsmitglieder herzustellen.

Ferner ermöglicht das Wissen um die erstmals festgestellte Assoziation zwischen CMD und WML bei MLFF neue Ansätze für die Diagnose und Therapie dieser Pathologien. Eine engmaschige Kontrolle könnte betroffene MLFF (insbesondere HP und PP) identifizieren, bei denen ein kontrolliertes Aussetzen der WFV zum Schutz vor ernsthaften gesundheitlichen Folgen zu erwägen ist, um frühzeitig der gefährdeten Gehirnschubstanz Erholungsphasen zu ermöglichen. Abschließend sind weitere Forschungsarbeiten hinsichtlich der flugphysiologischen Kieferbelastungen erforderlich.

## 7 Zusammenfassung

### 7.1 Zusammenfassung (deutsch)

#### Hintergrund und Ziele der Studie

Craniomandibuläre Dysfunktionen (CMD) des Kiefergelenks (KG) zeigen eine multiplexe Symptomatik. CMD können Militärluftfahrzeugführer (MLFF) im Flugbetrieb einschränken und somit die militärische Auftragserfüllung gefährden. Ziel dieser Studie war die Analyse des Auftretens von CMD bei MLFF der Bundeswehr. Im Detail sollte untersucht werden, ob die CMD-Prävalenz mit dem Flugzeugtyp assoziiert ist, welche Begleiterkrankungen mit einer CMD einhergehen und ob die CMD die Wehrfliegerverwendungsfähigkeit (WFV) der MLFF kompromittiert.

#### Material und Methode

Die Querschnittsstudie umfasste 1409 männliche MLFF (46 % Hubschrauberpiloten (HP), 21 % Propellerflugzeugpiloten (PP) und 33 % Strahlflugzeugpiloten (SP)), die zwischen September 2018 bis März 2020 untersucht wurden. Zusätzlich erfolgten erstmals eine Magnetresonanztomografie-(MRT)-Studie mit 48 KG von 24 MLFF mit CMD sowie eine Fall-Kontroll-Studie mit 182 MLFF. Die erhobenen Daten wurden retrospektiv ausgewertet. Dabei wurden die CMD-Prävalenz und abnorme MRT-Befunde der KG ermittelt sowie MLFF mit und ohne CMD hinsichtlich Flughöhe, Flugzeugmodell, kieferorthopädische Behandlung bei Bruxismus, Zahnhartsubstanz- und Parodontaldefekte, Zahnersatz, Komorbiditäten und dem Urteil der WFV verglichen. Die statistischen Analysen (Mann-Whitney-U-Test, Fisher-Test, biseriale Korrelation, McNemar-Test, Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test und Cochran-Q-Test) erfolgten mit einem Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$ . Zudem wurden binäre logistische Regressions- und Mediationsanalysen unter Einbeziehung von Kontrollvariablen durchgeführt.

#### Ergebnisse

Die CMD-Gesamtprävalenz ( $N = 1409$ ) betrug 6,5 % (91 Fälle, mittleres Alter  $40,5 \pm 9,8$  Jahre; Flugstunden im Mittel 2598,7 h). Die CMD-Prävalenzen in den Flugzeugtyp-Subgruppen lagen bei 6,4 % für HP, 8,7 % für PP und 5,1 % für SP. CMD traten vermehrt bei PP im Flugzeugmodell „P-3C Orion“ (Odds Ratio (OR) = 5,40; 95 %-Konfidenzintervall (KI) [2,14–13,64]) und bei HP im „Sea Lynx MK88A“ auf. Zwischen Abrasionen und CMD bestand für alle MLFF eine signifikante Korrelation; das galt

insbesondere für SP mit der größten *OR*. PP mit CMD wiesen dagegen häufiger Erosionen auf ( $OR = 4,00$ ;  $p = 0,040$ ). Bei HP waren kieferorthopädische Behandlungen bei Bruxismus, Kopfschmerzsyndrome sowie – erstmals festgestellt – White Matter Lesions ( $OR = 1,75$ ;  $p = 0,026$ ) signifikant mit einer CMD assoziiert. Weiter bestanden bei SP ein signifikanter Zusammenhang zwischen CMD und Tinnitus ( $OR > 9,00$ ;  $p = 0,004$ ) und eine auffällige Assoziation zwischen CMD und einer posterioren Kondylusdislozierung mit Tinnitus ( $OR = 11,0$ ; KI [2,40–50,49]). Nach 1000 Flugstunden erhöhte sich für MLFF mit CMD das Risiko für eine unilaterale KG-Arthrose um den Faktor 3,6 im Vergleich zu MLFF mit geringerer bis gar keiner Flugerfahrung. Ferner wurden MLFF mit CMD 6,2-mal so häufig von der WFV ausgeschlossen wie MLFF ohne CMD, wobei die mit CMD assoziierten Komorbiditäten nicht als Mediator fungierten. MLFF mit und ohne CMD unterschieden sich dagegen nicht bezüglich der Parameter Flughöhe, Rezession und Zahnersatz.

### **Schlussfolgerung**

Innerhalb der Grenzen der vorliegenden Studie deuten die Ergebnisse darauf hin, dass flugphysiologische Belastungen in Kombination mit CMD zu zahlreichen und teilweise schwerwiegenden Symptomen bei MLFF führen, die das Risiko der Flugunfähigkeit mit steigender Flugstundenzahl signifikant erhöhen. Das Wissen um die Erkrankung CMD und deren Komorbiditäten sollte daher Bestandteil des flugmedizinischen Trainings werden. Zur Sicherung der WFV sollten überdies Kontrollen der KG in das Standardverfahren der MRT-Eingangs- und Nachuntersuchungen von MLFF aufgenommen werden, um pathologische Veränderungen rechtzeitig diagnostizieren und therapieren zu können. Die Integration der Untersuchung der KG in das MRT-Standardverfahren ist eine medizinisch gebotene, organisatorisch und wirtschaftlich sinnvolle Maßnahme, die einen Beitrag zur Sicherung der strategischen Aufgabenerfüllung der Bundeswehr leisten kann.

Ein möglicher kausaler Zusammenhang zwischen vibrationsstarken Flugzeugmodellen und CMD sollte in Folgeuntersuchungen geklärt werden. Das Gleiche gilt für eine potenzielle Induktion einer Dislozierung des Diskus-Kondylus-Komplexes und nachfolgende Provokation eines Tinnitus durch Beschleunigungskräfte. Ferner sollten weitere Studien zur erstmals nachgewiesenen Assoziation zwischen White Matter Lesions und CMD erfolgen. Bei betroffenen MLFF ist zudem ein kontrolliertes Aussetzen der WFV zum Schutz vor schweren klinischen Manifestationen zu erwägen.

## 7.2 Summary

### Background and aims

Temporomandibular dysfunction (TMD) of the temporomandibular joint (TJ) shows a multiplex symptomatology. TMD can restrict military pilots (MP) in flight operations and thus endanger the fulfillment of military missions. The aim of this study was to analyze the occurrence of TMD in MP of the German Armed Forces. In detail, it should be investigated whether TMD prevalence is associated with the aircraft type, which comorbidities are associated with TMD, and whether TMD compromises the military fitness to flying (MFF) of the MP.

### Material and methods

The present cross-sectional study included 1,409 male MP (46% helicopter pilots (HP), 21% propeller pilots (PP) and 33% jet pilots (JP)) having been evaluated between September 2018 and March 2020. In addition, magnetic resonance imaging (MRI) with 48 TJ of 24 MP with TMD and a case-control study with 182 MP were carried out for the first time. Collected data were evaluated retrospectively. TMD prevalence and abnormal MRI findings of the TJ were determined and MP with and without TMD were compared with regard to flight altitude, aircraft model, orthodontic treatment for bruxism, hard tooth tissue and periodontal defects, dentures, comorbidities, and judgment of MFF. The statistical analyzes (Mann-Whitney U test, Fisher test, biserial correlation, McNemar test, Wilcoxon signed rank test and Cochran Q test) were performed with a significance level of  $\alpha=0.05$ . In addition, binary logistic regression and mediation analyzes were performed using control variables.

### Results

The overall prevalence of TMD (N=1,409) was 6.5% (91 cases, mean age  $40.5 \pm 9.8$  years; mean flight hours 2598.7 h). TMD prevalences in the aircraft type subgroups were 6.4% for HP, 8.7% for PP and 5.1% for SP. TMD occurred more frequently in PP in the aircraft model “P-3C Orion” (odds ratio (OR)=5.40; 95% confidence interval (CI): 2.14–13.64) and in HP in the “Sea Lynx MK88A”. There was a significant correlation between abrasions and TMD for all MP; with the largest OR for SP. In contrast, PP with TMD showed more frequent erosions (OR=4.00;  $p=.040$ ). In HP, tooth wear for bruxism, headache syndromes, and – detected for the first time – white matter lesions (OR=1.75;  $p=.026$ ) were significantly associated with TMD. Furthermore, in SP there was a

significant association between TMD and tinnitus ( $OR > 9.00$ ;  $p = .004$ ) and a striking association between TMD and posterior condyle dislocation with tinnitus ( $OR = 11.0$ ;  $CI: 2.40-50.49$ ). After 1,000 hours of flight, MP with TMD had a 3.6-fold increased risk of unilateral TJ-osteoarthritis compared to MP with little or no flight experience. Furthermore, MP with TMD were excluded from MFF 6.2 times more often than MP without TMD, with the comorbidities associated with TMD not acting as a mediator. In contrast, MP with and without TMD did not differ with regard to the parameters flight altitude, recession and dentures.

### **Conclusion**

Within the limitations of the present study, results suggest that flight physiologic stress in combination with TMD leads to numerous and sometimes severe symptoms in MP that significantly increase the risk of incapacity to fly with increasing number of flight hours. Knowledge of TMD and its comorbidities should therefore become part of flight medical training. To secure MFF, controls of TJ should also be included in the standard procedure of the initial and follow-up MRI examinations of MP in order to be able to diagnose and treat pathological changes in good time. The integration of the examination of the TJ into the MRI standard procedure is a medically necessary, organizationally and economically sensible measure that can contribute to ensuring the strategic fulfillment of the Bundeswehr's tasks.

A possible causal relationship between high-vibration aircraft models and TMD should be clarified in follow-up studies. The same applies to potential induction of dislocation of the disc-condyle complex and subsequent provocation of tinnitus by acceleration forces. Furthermore, further studies should be carried out on the association between white matter lesions and TMD, which has been demonstrated for the first time. In affected MP, controlled exposure of MFF should also be considered to protect against severe clinical manifestations.

## 8 Literaturverzeichnis

- [1] Aaron LA, Burke MM, Buchwald D. Overlapping conditions among patients with chronic fatigue syndrome, fibromyalgia, and temporomandibular disorder. *Arch Intern Med* 2000;160:221-227
- [2] Ahlers MO, Jakstat HA. CMD-Screening mit dem CMD-Kurzbefund. *Quintessenz* 2015;66:1399-1409
- [3] Ahlers MO, Lange M. 43<sup>rd</sup> Annual Meeting of the German Society of Function Diagnostics and Therapy. *J Craniomandib Funct* 2011;3:63-72
- [4] Ahlers MO, Freesmeyer WB, Fussnegger M, Göz G, Jakstat HA, Koeck B, Neff A, Ottl P, Reiber T. Zur Therapie der funktionellen Erkrankungen des kranio-mandibulären Systems – Gemeinsame Stellungnahme mehrerer Fachgesellschaften. *Dtsch Zahnärztl Z* 2005;60:539-542
- [5] Al-Ani ZM, Gray RJM (Hrsg): Temporomandibular Disorders: A Problem-Based Approach. Wiley-Blackwell, Ames, IA 2021
- [6] Al-Jundi MA, John MT, Setz JM, Szentpétery A, Kuss O. Meta-analysis of treatment need for temporomandibular disorders in adult nonpatients. *J Orofac Pain* 2008;22:97-107
- [7] Al-Khalifa KS. Prevalence of Bruxism and Associated Occupational Stress in Saudi Arabian Fighter Pilots. *Oman Med J* 2022;37:e351
- [8] Al-Omari AS, Al-Khalaf HM, Hussien NFM. Association of Flying Time with Hearing Loss in Military Pilots. *Saudi J Med Med Sci* 2018;6:155-159
- [9] Alessandri-Bonetti A, Scarano E, Fiorita A, Cordaro M, Gallenzi P. Prevalence of signs and symptoms of temporo-mandibular disorder in patients with sleep apnea. *Sleep Breath* 2021;25:2001-2006
- [10] Allan GM, Kenny D. High-altitude decompression illness: case report and discussion. *CMAJ* 2003;169:803-807
- [11] Alomar X, Medrano J, Cabratosa J, Clavero JA, Lorente M, Serra I, Monill JM, Salvador A. Anatomy of the temporomandibular joint. *Semin Ultrasound CT MR* 2007;28:170-183
- [12] Amendt R, Dörfler G: Atmung und Blutkreislauf. In: Pongratz H (Hrsg): *Kompendium der Flugmedizin*. ZLR, Fürstfeldbruck 2006, 2.37-2.44
- [13] Anastassaki Köhler A, Hugoson A, Magnusson T. Prevalence of symptoms indicative of temporomandibular disorders in adults: cross-sectional epidemiological investigations covering two decades. *Acta Odontol Scand* 2012;70:213-223
- [14] Arleth J. MRT in der Traumadiagnostik. *Trauma Berufskrankh* 2004;6:173-177
- [15] Ash MM, Schmideseder J (Hrsg): *Schientherapie*. Urban & Fischer, München 1999
- [16] Backhaus K, Erichson B, Plinke W, Weiber R (Hrsg): *Multivariate Analysemethoden: Eine anwendungsorientierte Einführung*. Springer, Berlin 2006

- [17] Bag AK, Gaddikeri S, Singhal A, Hardin S, Tran BD, Medina JA, Curé JK. Imaging of the temporomandibular joint: An update. *World J Radiol* 2014;6:567-582
- [18] Baldini A, Nota A, Cioffi C, Ballanti F, Cozza P. Infrared thermographic analysis of craniofacial muscles in military pilots affected by bruxism. *Aerosp Med Hum Perform* 2015;86:374-378
- [19] Baldini A, Nota A, Cravino G, Cioffi C, Rinaldi A, Cozza P. Influence of vision and dental occlusion on body posture in pilots. *Aviat Space Environ Med* 2013;84:823-827
- [20] Baratto SSP, Meger MN, Camargo V, Nolasco GMC, Mattos NHR, Roskamp L, Stechman-Neto J, Madalena IR, Kuchler EC, Baratto-Filho F. Temporomandibular disorder in construction workers associated with ANKK1 and DRD2 genes. *Braz Dent J* 2022;33:12-20
- [21] Behr M, Held P, Leibrock A, Fellner C, Handel G. Diagnostic potential of pseudo-dynamic MRI (CINE mode) for evaluation of internal derangement of the TMJ. *Eur J Radiol* 1996;23:212-215
- [22] Bernhardt O, Gesch D, Schwahn C, Mack F, Meyer G, John U, Kocher T. Risk factors for headache, including TMD signs and symptoms, and their impact on quality of life. Results of the Study of Health in Pomerania (SHIP). *Quintessence Int* 2005;36:55-64
- [23] Bertoli E, de Leeuw R. Prevalence of Suicidal Ideation, Depression, and Anxiety in Chronic Temporomandibular Disorder Patients. *J Oral Facial Pain Headache* 2016;30:296-301
- [24] Biesinger E, Reißhauer A, Mazurek B. Die Rolle der Halswirbelsäule und des Kiefergelenks bei Tinnitus – Der somatosensorische Tinnitus. *HNO* 2008;56:673-677
- [25] Bilgir E, Gümrukçü Z, Koca CG. Does clinical findings correlate with magnetic resonance imaging (MRI) findings in patients with temporomandibular joint (TMJ) pain? A cross sectional study. *Med Oral Patol Oral Cir Bucal* 2020;25:e495-e501
- [26] Boering G. Anatomical and physiological considerations regarding the temporomandibular joint. *Int Dent J* 1979;29:245-251
- [27] Boluk Senlikci H, Ozen S. Sacroiliac Joint Dysfunction Treated Using Neural Therapy to the Temporomandibular Joint: A Case Report. *Behandlung der Dysfunktion des Iliosakralgelenks durch Neuraltherapie des Temporomandibulargelenks: Ein Fallbericht. Complement Med Res* 2021;28:379-381
- [28] Bondemark L, Lindman R. Craniomandibular status and function in patients with habitual snoring and obstructive sleep apnoea after nocturnal treatment with a mandibular advancement splint: a 2-year follow-up. *Eur J Orthod* 2000;22:53-60
- [29] de Bont LG, Boering G, Liem RS, Eulderink F, Westesson PL. Osteoarthritis and internal derangement of the temporomandibular joint: a light microscopic study. *J Oral Maxillofac Surg* 1986;44:634-643
- [30] Botros J, Gornitsky M, Samim F, der Khatchadourian Z, Velly AM. Back and neck pain: A comparison between acute and chronic pain-related Temporomandibular Disorders. *Can J Pain* 2022;6:112-120
- [31] Bräunling WJG (Hrsg): *Flugzeugtriebwerke – Grundlagen, Aero-Thermodynamik, Ideale und reale Kreisprozesse, Thermische Turbomaschinen,*

- Komponenten, Emissionen und Systeme. Springer & Vieweg, Heidelberg 2015, 3-56
- [32] Bravetti P, Membre H, El Haddioui A, Gérard H, Fyard JP, Mahler P, Gaudy JF. Histological study of the human temporo-mandibular joint and its surrounding muscles. *Surg Radiol Anat* 2004;26:371-378
- [33] Brix B. Flugphysiologische Ausbildung, Forschung und Erprobung – ein wichtiger Baustein der Flugsicherheit. *Wehrmed Wehrpharm* 2011;4:5-6
- [34] Brooks SL, Westesson PL. Temporomandibular joint: value of coronal MR images. *Radiology* 1993;188:317-321
- [35] Bumann A, Lotzmann U (Hrsg): Funktionsdiagnostik und Therapieprinzipien: Anatomie des Kausystems. *Farbatlanten der Zahnmedizin*. Thieme, Stuttgart 2000, 22-46
- [36] Bundesgesundheitsministerium (Hrsg): Einnahmen und Ausgaben 1. Quartal 2022. Gesetzliche Krankenversicherung – Vorläufige Rechnungsergebnisse 1. Quartal 2022. *DESTATIS*, Berlin 2022, 1-48
- [37] Bundesministerium der Verteidigung (Hrsg): Luftwaffe. Waffensysteme und Großgerät der Bundeswehr. *Zarbock*, Berlin 2021, 72-118
- [38] Bundesrechnungshof. Ausgaben von 11,2 Mio. Euro für unnötigen Triebwerkteststand vermeiden. In: *Deutscher Bundestag*, 18. Wahlperiode (Hrsg): Drucksache 18/3300, Bemerkungen 2014 zur Haushalts- und Wirtschaftsführung des Bundes. *Deutscher Bundestag*, Berlin 2014, 40-41
- [39] Bundeswehr. Luftsysteme der Bundeswehr. Bundeswehr, 2022. [Online]. Available: <https://www.bundeswehr.de/de/ausruestung-technik-bundeswehr/luftsysteme-bundeswehr> [Accessed 10 Aug 2022]
- [40] Bürgers R, Krohn S, Gerdorff N, Frahm J. Visualisation of TMJ function using real-time MRI. *Dtsch Zahnärztl Z* 2016;71:292-296
- [41] Bustamante-Sánchez Á, Clemente-Suárez VJ. Psychophysiological response in night and instrument helicopter flights. *Ergonomics* 2020;63:399-406
- [42] Campos DES, de Araújo Ferreira Muniz I, de Souza Villarim NL, Ribeiro ILA, Batista AUD, Bonan PRF, de Sales MAO. Is there an association between rheumatoid arthritis and bone changes in the temporomandibular joint diagnosed by cone-beam computed tomography? A systematic review and meta-analysis. *Clin Oral Investig* 2021;25:2449-2459
- [43] Carlson CR, Okeson JP, Falace DA, Nitz AJ, Curran SL, Anderson D. Comparison of psychologic and physiologic functioning between patients with masticatory muscle pain and matched controls. *J Orofac Pain* 1993;7:15-22
- [44] Chan TLH, Kim DD, Becker WJ. Cluster Headache with Temporomandibular Joint Pain. *Can J Neurol Sci* 2020;47:719-720
- [45] Chaves TC, Turci AM, Pinheiro CF, Sousa LM, Grossi DB. Static body postural misalignment in individuals with temporomandibular disorders: a systematic review. *Braz J Phys Ther* 2014;18:481-501
- [46] Checherita LE, Antohe ME, Costin LI, Văscu MB, Stamatina O, Croitoru I, Solomon SM, Teslaru S, Gradinaru I, Toma V, Bogdan BP, Cioloca DP, Aungurencei OD, Balcoş CAM, Fătu AM. Research Regarding Dental Mobility Phenomena in the Clinical Recognition Diagnosis of Temporomandibular Disorders. *Diagnostics* 2023;13:598
- [47] Chossegros C, Cheynet F, Guyot L, Bellot-Samson V, Blanc JL. Posterior disk displacement of the TMJ: MRI evidence in two cases. *Cranio* 2001;19:289-293

- [48] Cioffi I, Farella M, Chiodini P, Ammendola L, Capuozzo R, Klain C, Vollaro S, Michelotti A. Effect of weather on temporal pain patterns in patients with temporomandibular disorders and migraine. *Oral Rehabil* 2017;44:333-339
- [49] Cohen J (Hrsg): *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. Taylor & Francis Ltd, New York, NY 1988
- [50] Coskun Akar G, Govsa F, Ozgur Z. Examination of the heads of the lateral pterygoid muscle on the temporomandibular joint. *J Craniofac Surg* 2009;20:219-223
- [51] Costa YM, Conti PC, de Faria FA, Bonjardim LR. Temporomandibular disorders and painful comorbidities: clinical association and underlying mechanisms. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol* 2017;123:288-297
- [52] De Luca Canto G, Singh V, Bigal ME, Major PW, Flores-Mir C. Association between tension-type headache and migraine with sleep bruxism: a systematic review. *Headache* 2014;54:1460-1469
- [53] Medeiros RA, Vieira DL, Silva EVFD, Rezende LVML, Santos RWD, Tabata LF. Prevalence of symptoms of temporomandibular disorders, oral behaviors, anxiety, and depression in Dentistry students during the period of social isolation due to COVID-19. *J Appl Oral Sci* 2020;28:e20200445
- [54] Debette S, Markus HS. The clinical importance of white matter hyperintensities on brain magnetic resonance imaging: systematic review and meta-analysis. *BMJ* 2010;341:c3666
- [55] Deutscher Bundestag 18. Wahlperiode. Taktisches Luftwaffengeschwader 74 – Kosten, Nutzen und Klimabilanz von Flugshows und Flughafenfesten der Bundeswehr. In: Wagenknecht S, Bartsch D (Hrsg): Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Eva Bulling-Schröter, Caren Lay, Christine Buchholz, weiterer Abgeordneter und der Fraktion DIE LINKE. Drucksache 18/9376, Berlin 2016, 1-4
- [56] Deutscher Bundestag 19. Wahlperiode. Nachfolge Waffensystem P-3C Orion. In: Bundesregierung (Hrsg): Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Christian Sauter, Alexander Graf Lambsdorff, Grigorios Aggelidis, weiterer Abgeordneter und der Fraktion der FDP. Drucksache 19/28697, Berlin 2021, 1-9
- [57] Deutscher Bundestag 20. Wahlperiode. Beschlussempfehlung und Bericht des Haushaltsausschusses (8. Ausschuss) zu dem Gesetzentwurf der Bundesregierung – Drucksache 20/1409 -. In: Schwarz A, Gädechens I, Schäfer S, Klein K, Espendiller M, Perli V (Hrsg): Entwurf eines Gesetzes zur Errichtung eines Sondervermögens Bundeswehr (Bundeswehrsondervermögensgesetz – BwSVermG). Drucksache 20/2090, Berlin 2022, 1-15
- [58] Deutsches Institut für Medizinische Dokumentation und Information (DIMDI) im Auftrag des Bundesministeriums für Gesundheit (BMG) unter Beteiligung der Arbeitsgruppe ICD des Kuratoriums für Fragen der Klassifikation im Gesundheitswesen (KKG), ICD-10-GM Version 2020, Systematisches Verzeichnis, Internationale statistische Klassifikation der Krankheiten und verwandter Gesundheitsprobleme, 10. Revision, Stand: 20. September 2019. Köln 2019
- [59] Deutsches Institut für Normung e. V. Schwingungseinwirkung auf den Menschen – Messeinrichtung – Teil 1: Schwingungsmesser für allgemeine Anwendungen. Deutsche Fassung EN ISO 8041-1:2017, Berlin 2017

- [60] Diatchenko L, Slade GD, Nackley AG, Bhalang K, Sigurdsson A, Belfer I, Goldman D, Xu K, Shabalina SA, Shagin D, Max MB, Makarov SS, Maixner W. Genetic basis for individual variations in pain perception and the development of a chronic pain condition. *Hum Mol Genet* 2005;14:135-43
- [61] Dimitroulis G. The prevalence of osteoarthritis in cases of advanced internal derangement of the temporomandibular joint: a clinical, surgical and histological study. *Int J Oral Maxillofac Surg* 2005;34:345-349
- [62] Dolwick MF, Lipton JS, Warner MR, Williams VF. Sagittal anatomy of the human temporomandibular joint spaces: normal and abnormal findings. *J Oral Maxillofac Surg* 1983;41:86-88
- [63] Dominiak M, Kalecińska E, Krzysztoń E, Dominiak P, Mierzwa-Dudek D, Sulka A. Correlation between temporomandibular dysfunction, disturbances of occlusion and gingival recession in a group of youth students. *Bull Group Int Rech Sci Stomatol Odontol* 2006;47:40-46
- [64] Dreier M, Kramer S, Stark K. Epidemiologische Methoden zur Gewinnung verlässlicher Daten. *Public Health* 2012;409-449
- [65] Duenbostl T, Oudin T, Baschy L (Hrsg): Barometrische Höhenformel. BASIC-Physikprogramme 2, MikroComputer-Praxis. Vieweg & Teubner, Wiesbaden 1984, 41-45
- [66] Dulčić N, Pandurić J, Kraljević S, Badel T, Celić R. Incidence of temporomandibular disorders at tooth loss in the supporting zones. *Coll Antropol* 2003;27:61-67
- [67] Edefonti V, Bravi F, Cioffi I, Capuozzo R, Ammendola L, Abate G, Decarli A, Ferraroni M, Farella M, Michelotti A. Chronic pain and weather conditions in patients suffering from temporomandibular disorders: a pilot study. *Community Dent Oral Epidemiol* 2012;40:56-64
- [68] Espinosa de Santillana IA, García-Juárez A, Rebollo-Vázquez J, Ustarán-Aquino AK. Alteraciones posturales frecuentes en pacientes con diferentes tipos de trastornos temporomandibulares [Frequent postural alterations in patients with different types of temporomandibular disorders]. *Rev Salud Publica (Bogota)* 2018;20:384-389
- [69] Exposto FG, Renner N, Bendixen KH, Svensson P. Pain in the temple? Headache, muscle pain or both: A retrospective analysis. *Cephalalgia* 2021;41:1486-1491
- [70] Fabian BG. Case report: inflight decompression sickness affecting the temporomandibular joint. *Aviat Space Environ Med* 1998;69:517-518
- [71] Faul F, Erdfelder E, Buchner A, Lang G. Statistical power analyses using G\*Power 3.1: Tests for correlation and regression analyses. *Behav Res Methods* 2009;41:1149-60
- [72] Fava C, Boccardi A. Loose bodies of the temporomandibular joint: A rare pathology. *Radiol Med* 1994;88:553-558
- [73] Fernández-de-Las-Peñas C, Von Piekartz H. Clinical Reasoning for the Examination and Physical Therapy Treatment of Temporomandibular Disorders (TMD): A Narrative Literature Review. *J Clin Med* 2020;9:3686
- [74] Flugmedizinisches Institut der Luftwaffe (Hrsg): Jahresbericht 2008. Forschungsberichte. ZLR, Fürstfeldbruck 2009;1:8,84-86

- [75] Flygare L, Rohlin M, Akerman S. Microscopy and tomography of erosive changes in the temporomandibular joint. An autopsy study. *Acta Odontol Scand* 1995;53:297-303
- [76] Frank AS. Cervical spondylosis presenting as the facial pain of temporomandibular joint disorder. *Rheumatology* 1968;9:193-196
- [77] Gallo LM, Airoidi GB, Airoidi RL, Palla S. Description of mandibular finite helical axis pathways in asymptomatic subjects. *J Dent Res* 1997;76:704-713
- [78] Gateno J, Anderson PB, Xia JJ, Horng JC, Teichgraeber JF, Liebschner MA. A comparative assessment of mandibular condylar position in patients with anterior disc displacement of the temporomandibular joint. *J Oral Maxillofac Surg* 2004;62:39-43
- [79] Helland MM. Anatomy and function of the temporomandibular joint. *J Orthop Sports Phys Ther* 1980;1:145-152
- [80] Hosgor H. The relationship between temporomandibular joint effusion and pain in patients with internal derangement. *J Craniomaxillofac Surg* 2019;47:940-944
- [81] Huang Z, Aarab G, Chattratrain T, Su N, Volgenant CMC, Hilgevoord AAJ, de Vries N, Lobbezoo F. Associated factors of primary snoring and obstructive sleep apnoea in patients with sleep bruxism: A questionnaire study. *J Oral Rehabil* 2022;49:970-979
- [82] Hugger A, Lange M, Schindler HJ, Türp JC. Begriffsbestimmungen: Funktionsstörung, Dysfunktion, craniomandibuläre Dysfunktion (CMD), Myoarthropathie des Kausystems (MAP). *Dtsch Zahnärztl Z* 2016;71:165-166
- [83] Imhoff B: Retrospektive Studie zur Prävalenz und Therapie von CMD-Beschwerden in niedergelassenen Zahnarztpraxen (STING) – Ergebnisse einer Vorstudie. *Z Kraniaomand Funkt* 2015;7:337–353
- [84] Incesu L, Taşkaya-Yilmaz N, Oğütçen-Toller M, Uzun E. Relationship of condylar position to disc position and morphology. *Eur J Radiol* 2004;51:269-273
- [85] Ingawalé S, Goswami T. Temporomandibular joint: disorders, treatments, and biomechanics. *Ann Biomed Eng* 2009;37:976-996
- [86] Innecken KJ. Die wichtigsten Flugzeugmuster der Bundeswehr. In: Brandenstein J (Hrsg): *Kompendium der Flugmedizin*. ZLR, Fürstenfeldbruck 2017, 267-285
- [87] Innecken KJ, John B, Feck N, Bodenstein S, Herla, Wansner, A. Die wichtigsten Flugzeugmuster der Bundeswehr. In: Brandenstein J (Hrsg): *Kompendium der Flugmedizin*. ZLR, Fürstenfeldbruck 2017, 306-330
- [88] Ivkovic N, Racic M. Structural and Functional Disorders of the Temporomandibular Joint (Internal Disorders). In: Almasari MA, Kummoona R (Hrsg): *Maxillofacial Surgery and Craniofacial Deformity – Practices and Updates*. IntechOpen, London 2018
- [89] Jacobus BB. Flying personnel and occlusal/mandibular dysfunction. *Aviat Space Environ Med* 1984;55:141-142
- [90] Janser F, Krapf KG, Hoeveler B. Vibration in helicopters – Effects by the exposure potentials for pilots and patients in case of emergency flight. *Dtsch Luft Raumfahrt*, Aachen 2013, 1-6
- [91] Jeon YD, Lee JI, Cho BO, Rotaru H, Kim JC, Kim SG. Statistical correlation between pharyngitis and temporomandibular joint disease. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2005;99:677-681

- [92] Johansson AK. On dental erosion and associated factors. *Swed Dent J Supp* 2002;156:1-77
- [93] Just W. Hubschrauberrotoren und ihre Antriebe. In: Eberherad A, Kollman K, Bartel A, Dittrich O, Bartwell FT, Cole JA, Pohl F (Hrsg): *Getriebe Kupplungen Antriebselemente*. Vieweg & Teubner, Wiesbaden 1956, 192-217
- [94] Kacirek J, Dörfler D, Ring T, Vitz H. Sauerstoffmangel (Hypoxie). In: Brandenstein J (Hrsg): *Kompodium der Flugmedizin*. ZLR, Fürstfeldbruck 2017, 53-67
- [95] Kandasamy S, Greene CS, Rinchuse DJ, Stockstill JW (Hrsg): *TMD and orthodontics: A Clinical Guide for the Orthodontist*. Springer International Publishing, Cham 2015
- [96] Kapos FP, Look JO, Zhang L, Hodges JS, Schiffman EL. Predictors of Long-Term Temporomandibular Disorder Pain Intensity: An 8-Year Cohort Study. *J Oral Facial Pain Headache* 2018;32:113-122
- [97] Kaya K, Dulgeroglu D, Unsal-Delialioglu S, Babadag M, Tacal T, Barlak A, Ozel S. Diagnostic value of ultrasonography in the evaluation of the temporomandibular joint anterior disc displacement. *J Craniomaxillofac Surg* 2010;38:391-395
- [98] Kdo SanDstBw II (Hrsg): A1-831/0-4008 Wehrfliegerverwendungsfähigkeit. Zentralvorschrift. Koblenz 2018
- [99] Kdo SanDstBw II (Hrsg): Anlg. 5.3 Zahnärztlicher Untersuchungsbogen – Ausfertigung Zahnärztliche Behandlungskarte. C1-869/0-4018 Zahnärztliche Begutachtungen. Koblenz 2018
- [100] Khawaja SN, Crow H, Mahmoud RF, Kartha K, Gonzalez Y. Is There an Association Between Temporomandibular Joint Effusion and Arthralgia?. *J Oral Maxillofac Surg* 2017;75:268-275
- [101] Kijak E, Margielewicz J, Pihut M. Identification of Biomechanical Properties of Temporomandibular Discs. *Pain Res Manag* 2020;2020:6032832
- [102] Kijak E, Szczepek AJ, Margielewicz J. Association between Anatomical Features of Petrotympanic Fissure and Tinnitus in Patients with Temporomandibular Joint Disorder Using CBCT Imaging: An Exploratory Study. *Pain Res Manag* 2020;2020:1202751
- [103] Kirschneck C. Dysgnathie, Kieferorthopädie und kranio-mandibuläre Dysfunktion – gibt es Zusammenhänge? *Quintessence J* 2017;11:1253-1260
- [104] Klasser GD, Okeson JP. The clinical usefulness of surface electromyography in the diagnosis and treatment of temporomandibular disorders. *J Am Dent Assoc* 2006;137:763-771
- [105] Klußmann N, Malik A (Hrsg): *Lexikon der Luftfahrt*. Springer, Berlin 2018, 131
- [106] Köhler H, Vitz H. Physik der Atmosphäre – Barometrischer Druck In: Brandenstein J (Hrsg): *Kompodium der Flugmedizin*. ZLR, Fürstfeldbruck 2017, 22
- [107] Kondoh T, Westesson PL, Takahashi T, Seto K. Prevalence of morphological changes in the surfaces of the temporomandibular joint disc associated with internal derangement. *J Oral Maxillofac Surg* 1998;56:339-344
- [108] Kraus SL (Hrsg): *Temporomandibular Disorders. Evaluation, Treatment and Prevention of Musculoskeletal Disorders*. Duane Saunders, Philadelphia, PA 2004, 173-210

- [109] Kühn S, Gerlach D, Noblé HJ, Weber F, Rittweger J, Jordan J, Limper U. An Observational Cerebral Magnetic Resonance Imaging Study Following 7 Days at 4554 m. *High Alt Med Biol* 2019;20:407-416
- [110] Kühn S, Sönksen SE, Noble HJ, Knopf H, Frischmuth J, Waldeck S, Müller-Forell W, Weber F, Bressemer L. Incidental Findings in Head and Brain MRI of Military Pilots and Applicants: Consequences for Medical Flight Fitness. *Aerosp Med Hum Perform* 2022;93:450-457
- [111] Lamster IB, Asadourian L, Del Carmen T, Friedman PK. The aging mouth: differentiating normal aging from disease. *Periodontol 2000* 2016;72:96-107
- [112] Langella F, Fusini F, Rossi G, Villafañe JH, Migliaccio N, Donzelli S, Berjano P. Spinal deformity and malocclusion association is not supported by high-quality studies: results from a systematic review of the literature. *Eur Spine J* 2019;28:1638-1651
- [113] Lauritzsen LP, Pfitzner J. Pressure breathing in fighter aircraft for G accelerations and loss of cabin pressurization at altitude – a brief review. *Can J Anaesth* 2003;50:415-419
- [114] Lavinsky D, Lavinsky J, Setogutti ET, Rehm DDS, Lavinsky L. The Role of Magnetic Resonance Imaging of the Temporomandibular Joint to Investigate Tinnitus in Adults with Temporomandibular Joint Disorder: A Comparative Study. *Int Arch Otorhinolaryngol* 2020;24:e68-e72
- [115] Ledderhos C, Nehring M, Weber F, Gens A. Anti-G-Schutz mit Druckbeatmung – ist dies der Weisheit letzter Schluss?. *Wehrmed Monatsschr* 2022;5:177-179
- [116] Lingscheid R, Goell F, Nuesse R, Abracht K, Braunstein B. Beanspruchung der Halswirbelsäule bei Eurofighter-Piloten unter „high-Gz“ im Realflug. *Wehrmed Monatsschr* 2022;5:180-182
- [117] Lopes J, Leuraud K, Klokov D, Durand C, Bernier MO, Baudin C. Risk of Developing Non-Cancerous Central Nervous System Diseases Due to Ionizing Radiation Exposure during Adulthood: Systematic Review and Meta-Analyses. *Brain Sci* 2022;12:984
- [118] Lorenz C. Juvenile Knochenzyste in der Mandibula bei einem Jetpiloten-Anwärter – Fallbericht. *Wehrmed Monatsschr* 2019;63:425-427
- [119] Lorenz V. Numerische Lösung und Analyse der Oswatitsch'schen Gleichungen für Hyperschallströmungen. Dissertation, Luft- und Raumfahrttechnik, München 2015
- [120] Losert-Bruggner B, Dudek B, Hülse M. Die kranio-mandibuläre Dysfunktion (CMD). Eine mögliche Ursache für chronische Schmerzen und einen nicht erholsamen Schlaf. *Man Medizin* 2010;48:343-352
- [121] Lund JP, Widmer CG. Evaluation of the use of surface electromyography in the diagnosis, documentation, and treatment of dental patients. *J Craniomandib Disord* 1989;3:125-137
- [122] Luo H, Shu J, Liu Z. Biomechanical effects of high acceleration on the temporomandibular joint. *Comput Methods Biomech Biomed Engin* 2022;25:333-341
- [123] Lurie O, Zadik Y, Einy S, Tarrasch R, Raviv G, Goldstein L. Bruxism in military pilots and non-pilots: tooth wear and psychological stress. *Aviat Space Environ Med* 2007;78:137-139
- [124] Machado NAG, Costa YM, Quevedo HM, Stuginski-Barbosa J, Valle CM, Bonjardim LR, Garib DG, Conti PCR. The association of self-reported awake

- bruxism with anxiety, depression, pain threshold at pressure, pain vigilance, and quality of life in patients undergoing orthodontic treatment. *J Appl Oral Sci* 2020;28:e20190407
- [125] Maini K, Dua A. Temporomandibular Syndrome. StatPearls, 2022.
- [126] Maixner W, Diatchenko L, Dubner R, Fillingim RB, Greenspan JD, Knott C, Ohrbach R, Weir B, Slade GD. Orofacial pain prospective evaluation and risk assessment study—the OPPERA study. *J Pain* 2011;12:T4-11.e112
- [127] Maixner W, Fillingim R, Kincaid S, Sigurdsson A, Harris MB. Relationship between pain sensitivity and resting arterial blood pressure in patients with painful temporomandibular disorders. *Psychosom Med* 1997;59:503-511
- [128] Małgorzata P, Małgorzata KM, Karolina C, Gala A. Diagnostic of Temporomandibular Disorders and Other Facial Pain Conditions-Narrative Review and Personal Experience. *Medicina* 2020;56:472
- [129] Marx-Janson L. Craniomandibular Dysfunction, Cross-sectional study of prevalence in catchment area of Tübingen (a retrospective data collection). Dissertation, Zahnmedizin, Tübingen 2011
- [130] McGuire SA, Ryan MC, Sherman PM, Sladky JH, Rowland LM, Wijtenburg SA, Hong LE, Kochunov PV. White matter and hypoxic hypobarica in humans. *Hum Brain Mapp* 2019;40:3165-3173
- [131] McGuire SA, Sherman PM, Wijtenburg SA, Rowland LM, Grogan PM, Sladky JH, Robinson AY, Kochunov PV. White matter hyperintensities and hypobaric exposure. *Ann Neurol* 2014;76:719-726
- [132] Meikle MB, Griest SE. Gender-based differences in characteristics of tinnitus. *The Hearing Journal* 1989;42:68-76
- [133] Melo G, Duarte J, Pauletto P, Porporatti AL, Stuginski-Barbosa J, Winocur E, Flores-Mir C, De Luca Canto G. Bruxism: An umbrella review of systematic reviews. *J Oral Rehabil* 2019;46:666-690
- [134] Memmedova F, Emre U, Yalın OÖ, Doğan OC. Evaluation of temporomandibular joint disorder in headache patients. *Neurol Sci* 2021;42:4503-4509
- [135] Merlini L, Palla S. The relationship between condylar rotation and anterior translation in healthy and clicking temporomandibular joints. *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 1988;98:1191-1199
- [136] Milam SB. Pathophysiology of Articular Disk Displacement of the Temporomandibular Joint. *Oral Maxillofac Surg* 2000;4:46-72
- [137] Mills WD, Greenhaw RM. Association of Medical Certification Factors with All-Cause Mortality in U.S. Aviators. *Aerosp Med Hum Perform* 2019;90:938-944
- [138] Mobilio N, Iovino P, Bruno V, Catapano S. Severity of irritable bowel syndrome in patients with temporomandibular disorders: A case-control study. *J Clin Exp Dent* 2019;11:e802-e806
- [139] Monaco A, Streni O, Marci MC, Sabetti L, Giannoni M. Convergence defects in patients with temporomandibular disorders. *Cranio* 2003;21:190-195
- [140] Moritz C, Kather T. Bundesministerium der Verteidigung, Verteidigungshaushalt. Ministerin: „Wir sorgen für eine voll einsatzbereite Bundeswehr“. Bundesministerium der Verteidigung, 03 Juni 2022. [Online]. Available: <https://www.bmvg.de/de/aktuelles/ministerin-wir-sorgen-fuer-voll-einsatzbereite-bundeswehr-5438596> [Accessed 07 Juni 2022]

- [141] Mottaghi A, Menéndez-Díaz I, Cobo JL, González-Serrano J, Cobo T. Is there a higher prevalence of tinnitus in patients with temporomandibular disorders? A systematic review and meta-analysis. *J Oral Rehabil* 2019;46:76-86
- [142] Muhr P, Johnson AC, Selander J, Svensson E, Rosenhall U. Noise Exposure and Hearing Impairment in Air Force Pilots. *Aerosp Med Hum Perform* 2019;90:757-763
- [143] Murphy MK, MacBarb RF, Wong ME, Athanasiou KA. Temporomandibular disorders: a review of etiology, clinical management, and tissue engineering strategies. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2013;28:e393-e414
- [144] Neblett R, Cohen H, Choi Y, Hartzell MM, Williams M, Mayer TG, Gatchel RJ. The Central Sensitization Inventory (CSI): establishing clinically significant values for identifying central sensitivity syndromes in an outpatient chronic pain sample. *J Pain* 2013;14:438-445
- [145] Neblett R, Hartzell MM, Cohen H, Mayer TG, Williams M, Choi Y, Gatchel RJ. Ability of the central sensitization inventory to identify central sensitivity syndromes in an outpatient chronic pain sample. *Clin J Pain* 2015;31:323-32
- [146] Nota A, Tecco S, Cioffi C, Beraldi A, Padulo J, Baldini A. Occlusion time analysis in military pilots affected by bruxism. *Sci Rep* 2019;9:1408
- [147] Ohrbach R, Dworkin SF. Five-year outcomes in TMD: relationship of changes in pain to changes in physical and psychological variables. *Pain* 1998;74:315-326
- [148] de Oliveira-Souza AIS, de O Ferro JK, Barros MMB, Oliveira DA. Cervical musculoskeletal disorders in patients with temporomandibular dysfunction: A systematic review and meta-analysis. *J Bodyw Mov Ther* 2020;24:84-101
- [149] Omidvar S, Jafari Z. Association Between Tinnitus and Temporomandibular Disorders: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Ann Otol Rhinol Laryngol* 2019;128:662-675
- [150] Ottl P, Peroz I, Lange M, Mentler C, Wolowski A, Ahlers MO. CMD-Screening (CMD-Basisdiagnostik) der Deutsche Gesellschaft für Funktionsdiagnostik und -therapie (DGFDT). 30.07.2020. [Online]. Available: [https://www.dgfdt.de/richtlinien\\_formulare](https://www.dgfdt.de/richtlinien_formulare) [Accessed 15.09.2022]
- [151] Ozawa S, Boering G, Kawata T, Tanimoto K, Tanne K. Reconsideration of the TMJ condylar position during internal derangement: comparison between condylar position on tomogram and degree of disk displacement on MRI. *Cranio* 1999;17:93-100
- [152] Paknahad M, Shahidi S. Association between mandibular condylar position and clinical dysfunction index. *J Craniomaxillofac Surg* 2015;43:432-436
- [153] Peroz I, Ahlers MO, Hugger A, Imhoff B, Lange M, Mentler C, Ottl P, Wolowski A. Screening for craniomandibular dysfunctions is important. *Schmerz* 2020;34:436-437
- [154] Peroz I, Bernhardt O, Kares J, Korn HJ, Kropp P, Lange M, Müller A, Nilges P, Ommerborn MA, Steffen A, Tholen R, Türp JC, Wolowski A. Diagnostik und Behandlung von Bruxismus, AWMF-Registernummer 083-027. In: Deutsche Gesellschaft für Funktionsdiagnostik und -therapie in der Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde (DGFDT) (Hrsg): S3-Leitlinie. AWMF Arbeitsgemeinschaft medizinisch wissenschaftlicher Fachgesellschaften 2019
- [155] Pigozzi LB, Pereira DD, Pattussi MP, Moret-Tatay C, Irigaray TQ, Weber JBB, Grossi PK, Grossi ML. Quality of life in young and middle age adult

- temporomandibular disorders patients and asymptomatic subjects: a systematic review and meta-analysis. *Health Qual Life Outcomes* 2021;19:83
- [156] Pippig T. Orthopädie. In: Pongratz H (Hrsg): *Kompendium der Flugmedizin*. ZLR, Fürstfeldbruck 2006, 23.328-23.336
- [157] Pippig T. Orthopädie. In: Brandenstein J (Hrsg): *Kompendium der Flugmedizin*. ZLR, Fürstfeldbruck 2017, 383-396
- [158] Pippig T, Kriebel J. Prevalence of cervical and lumbar disc disorders in pilots of the German armed forces. *Eur J Med Res* 2000;5:5-8
- [159] Plato G, Kopp S. The jaw and chronic pain syndromes. *Man Medizin* 1999;37:143-151
- [160] Porto De Toledo I, Stefani FM, Porporatti AL, Mezzomo LA, Peres MA, Flores-Mir C, De Luca Canto G. Prevalence of otologic signs and symptoms in adult patients with temporomandibular disorders: a systematic review and meta-analysis. *Clin Oral Investig* 2017;21:597-605
- [161] Posch M, Schranz A, Lener M, Senn W, Äng BO, Burtscher M, Ruedl G. Prevalence and potential risk factors of flight-related neck, shoulder and low back pain among helicopter pilots and crewmembers: a questionnaire-based study. *BMC Musculoskelet Disord* 2019;20:44
- [162] Pousette MW, Lo Martire R, Linder J, Kristoffersson M, Äng BO. Neck Muscle Strain in Air Force Pilots Wearing Night Vision Goggles. *Aerosp Med Hum Perform* 2016;87:928-932
- [163] du Prel JB, Hommel G, Röhrig B, Blettner M. Confidence interval or p-value?: part 4 of a series on evaluation of scientific publications. *Dtsch Arztebl Int* 2009;106:335-339
- [164] Progiante PS, Pattussi MP, Lawrence HP, Goya S, Grossi PK, Grossi ML. Prevalence of Temporomandibular Disorders in an Adult Brazilian Community Population Using the Research Diagnostic Criteria (Axes I and II) for Temporomandibular Disorders (The Maringá Study). *Int J Prosthodont* 2015;28:600-609
- [165] Rahmani Z, Kochanek A, Astrup JJ, Poulsen JN, Gazerani P. Helmet-induced headache among Danish military personnel. *Scand J Public Health* 2017;45:818-823
- [166] Rauch A, Angrik C, Zenthöfer A, Weber S, Hahnel S, Nitschke I, Schierz O. Prevalence of temporomandibular disorders in seniors-Symptom-related analyses in younger and older seniors. *Z Gerontol Geriatr* 2022;55:482-488
- [167] Rausch MWF, Gens A, Zinner C, Sperrlich B, Ledderhos C. Muskuläre Beanspruchung der Hals-, Nacken- und Schultermuskulatur unter Beschleunigungskräften in der Humanzentrifuge. *Wehrmed Monatsschr* 2018;62:15-16
- [168] Razali NM, Wah YB. Power Comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling-Tests. *J Stat Modeling Anal* 2011;2:21-33
- [169] Reich RH. Erkrankungen und Operationen der Kiefergelenke. In: Kruse Gujer A, Jacobson C, Grätz K (Hrsg): *Facharztwissen Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie*. Springer, Berlin 2013, 217-225
- [170] Reis D, Lehr D, Heber E, Ebert DD. The German Version of the Perceived Stress Scale (PSS-10): Evaluation of Dimensionality, Validity, and Measurement

- Invariance With Exploratory and Confirmatory Bifactor Modeling. *Assessment* 2019;26:1246-1259
- [171] Reitemeier B, Schwenzer N, Ehrenfeld M (Hrsg): Einführung in die Zahnmedizin. Thieme, Stuttgart 2006
- [172] Ren YF, Isberg A. Tinnitus in patients with temporomandibular joint internal derangement. *Cranio* 1995;13:75-80
- [173] Réus JC, Polmann H, Souza BDM, Flores-Mir C, Gonçalves DAG, de Queiroz LP, Okeson J, De Luca Canto G. Association between primary headaches and temporomandibular disorders: A systematic review and meta-analysis. *J Am Dent Assoc* 2022;153:120-131
- [174] Riches A, Spratford W, Witchalls J, Newman P. A Systematic Review and Meta-Analysis About the Prevalence of Neck Pain in Fast Jet Pilots. *Aerosp Med Hum Perform* 2019;90:882-890
- [175] Riley P, Glenny AM, Worthington HV, Jacobsen E, Robertson C, Durham J, Davies S, Petersen H, Boyers D. Oral splints for temporomandibular disorder or bruxism: a systematic review. *Br Dent J* 2020;228:191-197
- [176] Rinchuse DJ, Kandasamy S. Myths of orthodontic gnathology. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2009;136:322-330
- [177] Rocabado M. Arthrokinematics of the temporomandibular joint. *Dent Clin North Am* 1983;27:573-594
- [178] Rohner D, Jaquiéry C, Geissmann A, Kunz C, Hammer B, Prein J. MRI-Kiefergelenkdiagnostik – Die dynamische MR-Untersuchung des Kiefergelenkes bei Discopathien – eine retrospektive Analyse. *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 2002;112:39-44
- [179] Roldán-Majewski C, Schuknecht B, Gallo LM. Diskuslagen. In: Ettlín D, Gallo LM (Hrsg): *Das Kiefergelenk in Funktion und Dysfunktion*. Thieme, Stuttgart 2019, 89-91
- [180] Rudge FW. A case of decompression sickness at 2,437 meters (8,000 feet). *Aviat Space Environ Med* 1990;61:1026-1027
- [181] Saccomanno S, Laganà D, Mastrapasqua R, Giancaspro S, Manenti RJ, Saran S. The relationship between TMJ symptoms and orthodontic treatments: a survey on 236 orthodontic patients. *J Biol Regul Homeost Agents* 2021;35:197-204
- [182] Salinas Fredricson A, Krüger Weiner C, Adami J, Rosén A, Lund B, Hedenberg-Magnusson B, Fredriksson L, Svedberg P, Naimi-Akbar A. Sick leave and disability pension in a cohort of TMD-patients – The Swedish National Registry Studies for Surgically Treated TMD (SWEREG-TMD). *BMC Public Health*. 2022;9:916
- [183] Sammito S, Erley OM, Rose DM, Güttler N. The Prevalence of Dietary Supplement Usage in Military Aviators. *Int J Environ Res Public Health* 2022;19:5017
- [184] Sardar ZM, Ames RJ, Lenke L. Scheuermann's Kyphosis: Diagnosis, Management, and Selecting Fusion Levels. *J Am Acad Orthop Surg* 2019;27:e462-e472
- [185] Scapino RP. Morphology and mechanism of the jaw joint. In: McNeill C (Hrsg): *Science and Practice of Occlusion*. Quintessence, Chicago 1997, 23-40
- [186] Scapino RP, Canham PB, Finlay HM, Mills DK. The behaviour of collagen fibres in stress relaxation and stress distribution in the jaw-joint disc of rabbits. *Arch Oral Biol* 1996;41:1039-1052

- [187] Schiffman E, Ohrbach R, Truelove E, Look J, Anderson G, Goulet JP, List T, Svensson P, Gonzalez Y, Lobbezoo F, Michelotti A, Brooks SL, Ceusters W, Drangsholt M, Ettlin D, Gaul C, Goldberg LJ, Haythornthwaite JA, Hollender L, Jensen R, John MT, De Laat A, de Leeuw R, Maixner W, van der Meulen M, Murray GM, Nixdorf DR, Palla S, Petersson A, Pionchon P, Smith B, Visscher CM, Zakrzewska J, Dworkin SF; International RDC/TMD Consortium Network, International association for Dental Research; Orofacial Pain Special Interest Group, International Association for the Study of Pain. Diagnostic Criteria for Temporomandibular Disorders (DC/TMD) for Clinical and Research Applications: recommendations of the International RDC/TMD Consortium Network and Orofacial Pain Special Interest Group. *J Oral Facial Pain Headache* 2014;28:6-27
- [188] Schmidt R, Ropele S, Enzinger C, Petrovic K, Smith S, Schmidt H, Matthews PM, Fazekas F. White matter lesion progression, brain atrophy, and cognitive decline: the Austrian stroke prevention study. *Ann Neurol* 2005;58:610-616
- [189] Schröder A. Deutsche Marine bekommt neue Bordhubschrauber. Bundesministerium der Verteidigung, 20 Nov 2020. [Online]. Available: <https://www.bmvg.de/de/aktuelles/deutsche-marine-neue-bordhubschrauber-4473464> [Accessed 17 Sep 2022]
- [190] Schultz J (Hrsg): *The Ecozones of the World: The Ecological Divisions of the Geosphere*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York 2005
- [191] Serindere M, Serindere G, Gunduz K, Kopuz C. Evaluation of morphological variations of petrotympanic fissure using computed tomography imaging of the temporal bone. *J Stomatol Oral Maxillofac Surg* 2022;123:e643-e649
- [192] Shaefer JR, Khawaja SN, Bavia PF. Sex, Gender, and Orofacial Pain. *Dent Clin North Am* 2018;62:665-682
- [193] Shaffer SM, Brismée JM, Sizer PS, Courtney CA. Temporomandibular disorders. Part 1: anatomy and examination/diagnosis. *J Man Manip Ther* 2014;22:2-12
- [194] Shahidi S, Salehi P, Abedi P, Dehbozorgi M, Hamedani S, Berahman N. Comparison of the Bony Changes of TMJ in Patients With and Without TMD Complaints Using CBCT. *J Dent (Shiraz)* 2018;19:142-149
- [195] Shaw DM, Cabre G, Gant N. Hypoxic Hypoxia and Brain Function in Military Aviation: Basic Physiology and Applied Perspectives. *Front Physiol* 2021;12:665821
- [196] Shih YC, Yang R, Zou J. Assessment of occlusion and temporomandibular joint after placing preformed metal crowns on all primary molars in children. *Int J Paediatr Dent* 2022;32:915-924
- [197] Shokri A, Zarch HH, Hafezmaleki F, Khamechi R, Amini P, Ramezani L. Comparative assessment of condylar position in patients with temporomandibular disorder (TMD) and asymptomatic patients using cone-beam computed tomography. *Dent Med Probl* 2019;56:81-87
- [198] Silva JG, Martins JP, de Sousa EB, Fernandes NL, Meira IA, Sampaio FC, de Oliveira AF, Pereira AM. Influence of energy drinks on enamel erosion: In vitro study using different assessment techniques. *J Clin Exp Dent* 2021;13:e1076-e1082
- [199] Silva MAG, Pantoja LLQ, Dutra-Horstmann KL, Valladares-Neto J, Wolff FL, Porporatti AL, Guerra ENS, De Luca Canto G. Prevalence of degenerative

- disease in temporomandibular disorder patients with disc displacement: A systematic review and meta-analysis. *J Craniomaxillofac Surg* 2020;48:942-955
- [200] Skog C, Fjellner J, Ekberg E, Häggman-Henrikson B. Tinnitus as a comorbidity to temporomandibular disorders-A systematic review. *J Oral Rehabil* 2019;46:87-99
- [201] Slade GD, Bair E, Greenspan JD, Dubner R, Fillingim RB, Diatchenko L, Maixner W, Knott C, Ohrbach R. Signs and symptoms of first-onset TMD and sociodemographic predictors of its development: the OPPERA prospective cohort study. *J Pain* 2013;14:T20-32
- [202] Slade GD, Fillingim RB, Sanders AE, Bair E, Greenspan JD, Ohrbach R, Dubner R, Diatchenko L, Smith SB, Knott C, Maixner W. Summary of findings from the OPPERA prospective cohort study of incidence of first-onset temporomandibular disorder: implications and future directions. *J Pain* 2013;14:T116-T124
- [203] Slade GD, Ohrbach R, Greenspan JD, Fillingim RB, Bair E, Sanders AE, Dubner R, Diatchenko L, Meloto CB, Smith S, Maixner W. Painful Temporomandibular Disorder: Decade of Discovery from OPPERA Studies. *J Dent Res* 2016;95:1084-1092
- [204] Sójka A, Stelcer B, Roy M, Mojs E, Pryliński M. Is there a relationship between psychological factors and TMD?. *Brain Behav* 2019;9:e01360
- [205] Song HS, Shin JS, Lee J, Lee YJ, Kim MR, Cho JH, Kim KW, Park Y, Song HJ, Park SY, Kim S, Kim M, Ha IH. Association between temporomandibular disorders, chronic diseases, and ophthalmologic and otolaryngologic disorders in Korean adults: A cross-sectional study. *PloS One* 2018;13:e0191336
- [206] Sönksen SE, Kühn S, Basner M, Gerlach D, Hoffmann F, Mühl C, Tank J, Noblé HJ, Akgün K, Ziemssen T, Jordan J, Limper U. Brain structure and neurocognitive function in two professional mountaineers during 35 days of severe normobaric hypoxia. *Eur J Neurol* 2022;29:3112-3116
- [207] Sönksen SE, Kühn SR, Noblé HJ, Knopf H, Ehling J, Jakobs FM, Frischmuth J, Weber F. Incidental Finding Prevalences in 3-Tesla Brain and Spine MRI of Military Pilot Applicants. *Aerosp Med Hum Perform* 2021;92:146-152
- [208] Stasiak K, Zyskowska M, Głowinkowska I, Kowalczyk K, Lewkowicz R. Influence of night vision goggles with white and green phosphor screens on selected parameters of the eye and fatigue. *Ergonomics* 2022;65:999-1014
- [209] Stelcer B, Sójka-Makowska A, Trzeszczyńska N, Samborska J, Teusz G, Pryliński M, Łukomska-Szymańska M, Mojs E. Relationship between attention deficit hyperactivity disorder and temporomandibular disorders in adults: a questionnaire-based report. *Eur Rev Med Pharmacol Sci* 2022;26:3858-3871
- [210] Stelzenmüller W, Wiesner J (Hrsg): Therapie von Kiefergelenkschmerzen – Ein Behandlungskonzept für Zahnärzte, Kieferorthopäden und Physiotherapeuten. Kiefergelenke. Thieme, Stuttgart 2010, 3-5
- [211] Stimmer H, Grill F, Goetz C, Nieberler M, Ott A, Wirth M, Rummeny EJ, Wolff KD, Kolk A. Lesions of the lateral pterygoid muscle-an overestimated reason for temporomandibular dysfunction: a 3T magnetic resonance imaging study. *Int J Oral Maxillofac Surg* 2020;49:1611-1617
- [212] Stöckle M, Fanghänel J, Knüttel H, Alamanos C, Behr M. The morphological variations of the lateral pterygoid muscle: A systematic review. *Ann Anat* 2019;222:79-87

- [213] Strub JR, Kern M, Türp JC, Witkowski S, Heydecke G, Wolfart S (Hrsg): Curriculum Prothetik Band 1, Geschichte, Grundlagen Behandlungskonzept, Vorbehandlung. Quintessenz, Berlin 2011, 241
- [214] Sun ZY, Hu M, Yin Y. Analysis of the changes of temporomandibular joint under repeated +Gz stress. *Space Med Med Eng (Beijing)* 2001;14:456-459
- [215] Talmaceanu D, Lenghel LM, Bolog N, Hedesi M, Buduru S, Rotar H, Baciut M, Baciut G. Imaging modalities for temporomandibular joint disorders: an update. *Clujul Med* 2018;91:280-287
- [216] Tasaki MM, Westesson PL. Temporomandibular joint: diagnostic accuracy with sagittal and coronal MR imaging. *Radiology* 1993;186:723-729
- [217] Tay KJ, Yap AU, Wong JCM, Tan KBC, Allen PF. Associations between symptoms of temporomandibular disorders, quality of life and psychological states in Asian Military Personnel. *J Oral Rehabil* 2019;46:330-339
- [218] Telemeter Electronic GmbH. TE – Telemeter Electronic. 01 Mar 2014. [Online]. Available: <https://telemeter.info/de/wescam-mx-20> [Accessed 03 09 2022]
- [219] Thiele M. P-3C „Orion“: Warum wird eine Fähigkeit aufgegeben? Über den Umgang mit Mensch und Material als „Top-Down-Prozess“. *Dtsch BundeswVerb* 2021;02
- [220] Thieme V (Hrsg): Klassifikation klinischer Formen der CMD aus kieferchirurgischer Sicht. *Craniomandibuläre Dysfunktion: Interdisziplinäre Diagnostik und Therapie*. Quintessenz, Berlin 2009, 87-95
- [221] Tillmann B (Hrsg): *Bewegungsapparat*. Thieme, Stuttgart 2003
- [222] Troeltzsch M, Troeltzsch M, Cronin RJ, Brodine AH, Frankenberger R, Messlinger K. Prevalence and association of headaches, temporomandibular joint disorders, and occlusal interferences. *J Prosthet Dent* 2011;105:410-417
- [223] Tsur N, Arbel Y, Abuhasira S, Permut Y, Lvovsky A, Protter N. A retrospective study of oral pathoses in Israeli military divers and non-divers: 2011-2020. *Dent Traumatol* 2022;38:48-52
- [224] Uçar İ, Batın S, Arık M, Payas A, Kurtoğlu E, Karartı C, Seber T, Çöbden SB, Taşdemir H, Unur E. Is scoliosis related to mastication muscle asymmetry and temporomandibular disorders? A cross-sectional study. *Musculoskelet Sci Pract* 2022;58:102533
- [225] Valesan LF, Da-Cas CD, Réus JC, Denardin ACS, Garanhani RR, Bonotto D, Januzzi E, de Souza BDM. Prevalence of temporomandibular joint disorders: a systematic review and meta-analysis. *Clin Oral Investig* 2021;25:441-453
- [226] Vompi C, Serritella E, Galluccio G, Pistella S, Segnalini A, Giannelli L, Di Paolo C. Evaluation of Vision in Gnathological and Orthodontic Patients with Temporomandibular Disorders: A Prospective Experimental Observational Cohort Study. *J Int Soc Prev Community Dent* 2020;10:481-490
- [227] Wallace JB, Newman PM, McGarvey A, Osmotherly PG, Spratford W, Gabbett TJ. Factors associated with neck pain in fighter aircrew: a systematic review and meta-analysis. *Occup Environ Med* 2021;78:900-912
- [228] Wang M, Cao H, Ge Y, Widmalm SE. Magnetic resonance imaging on TMJ disc thickness in TMD patients: a pilot study. *J Prosthet Dent* 2009;102:89-93
- [229] Webb JT, Pilmanis AA, O'Connor RB. An abrupt zero-preoxygenation altitude threshold for decompression sickness symptoms. *Aviat Space Environ Med* 1998;69:335-340

- [230] Westesson PL. Reliability and validity of imaging diagnosis of temporomandibular joint disorder. *Adv Dent Res* 1993;7:137-151
- [231] Wolford L. MRI Evaluation for Patients with TMJ Disorders and Obstructive Sleep Apnea. In: Kim KB, Movahed R, Malhotra RK, Stanley JJ (Hrsg): *Management of Obstructive Sleep Apnea*. Springer, Cham 2021, 361-379
- [232] Wörner F, Eger T, Simon U, Wolowski A. Periodontal Disease and Tooth Wear in a Sample of German Soldiers with Posttraumatic Stress Disorder. *Oral Health Prev Dent* 2021;19:449-456
- [233] Wright Beatty HE, Law AJ, Thomas JR, Wickramasinghe V. Amplified Pilot Head Vibration and the Effects of Vibration Mitigation on Neck Muscle Strain. *Aerosp Med Hum Perform* 2018;89:510-519
- [234] Wright EF, Syms CA 3<sup>rd</sup>, Bifano SL. Tinnitus, dizziness, and nonotologic otalgia improvement through temporomandibular disorder therapy. *Mil Med* 2000;165:733-736
- [235] Wu JH, Lee KT, Kuo CY, Cheng CH, Chiu JY, Hung JY, Hsu CY, Tsai MJ. The Association between Temporomandibular Disorder and Sleep Apnea-A Nationwide Population-Based Cohort Study. *Int J Environ Res Public Health* 2020;17:6311
- [236] Wühr E. Schmerzverursachende Belastungen des Kausystems. *DO* 2011;9:15-16
- [237] Wurster W. Beschleunigungen und ihre Wirkungen. In: Pongratz H (Hrsg): *Kompendium der Flugmedizin*. ZLR, Fürstenfeldbruck 2006, 6.101-6.104
- [238] Xiong X, Ye Z, Tang H, Wei Y, Nie L, Wei X, Liu Y, Song B. MRI of Temporomandibular Joint Disorders: Recent Advances and Future Directions. *J Magn Reson Imaging* 2021;54:1039-1052
- [239] Yale SH, Allison BD, Hauptfuehrer JD. An epidemiological assessment of mandibular condyle morphology. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1966;21:169-177
- [240] Yu Q, Liu Y, Chen X, Chen D, Xie L, Hong X, Wang X, Huang H, Yu H. Prevalence and associated factors for temporomandibular disorders in Chinese civilian pilots. *Int Arch Occup Environ Health* 2015;88:905-911
- [241] Zentrum für Luft- und Raumfahrtmedizin der Luftwaffe (Hrsg): *Die zahnärztliche Versorgung des fliegenden Personals. C2-800/0-2000-3 Fliegerärztlicher Dienst in der Bundeswehr*. Fürstenfeldbruck, 2017
- [242] Zhang L, Xu L, Wu D, Yu C, Fan S, Cai B. Effectiveness of exercise therapy versus occlusal splint therapy for the treatment of painful temporomandibular disorders: a systematic review and meta-analysis. *Ann Palliat Med* 2021;10:6122-6132
- [243] Zhao X, Lynch JGJ, Chen Q. Reconsidering Baron and Kenny: Myths and truths about mediation analysis. *J Consum Res* 2010;37:197-206
- [244] Ånell R, Grönkvist M, Gennser M, Eiken O. Hyperoxic Effects on Decompression Strain During Alternating High and Moderate Altitude Exposures. *Aerosp Med Hum Perform* 2021;92:223-230

## 9 Anhang

	<b>Ethik-Kommission der Bayerischen Landesärztekammer</b>	Telefon: 089 4147-335 Fax: 089 4147-334 E-Mail: ethikkommission@blaek.de
Ethik-Kommission der BLÄK Mühlbauerstraße 16 81677 München <b>Zentrum für Luft- und Raumfahrtmedizin der Luftwaffe Frau Claudia Lorenz Straße der Luftwaffe 322 82256 Fürstenfeldbruck</b>		Unser Zeichen: 19007 fmlal Ihre Zeichen: Ihr Schreiben vom: 20.08.2019
		25.09.2019
<b>Antrag auf Beratung durch die Ethik-Kommission gemäß § 15 der Berufsordnung für die Ärzte Bayerns.</b>		
<b>"Craniomandibuläre Dysfunktionen bei fliegendem Personal"</b>		
Ethik-Kommission Nr. 19007 (bei Rückfragen angeben)		
Sehr geehrte Frau Lorenz,		
besten Dank für die Übermittlung Ihres Schreibens vom 20.08.2019 mit den beigefügten Unterlagen (überarbeiteter Antrag).		
Die Hinweise der Ethik-Kommission vom 15.03.2019 wurden berücksich- tigt.		
Wir empfehlen den Aufbau der Probandeninformation so zu ändern, dass zuerst die Studie vorgestellt wird und danach die datenschutzrechtlichen Aspekte angesprochen werden.		
Datenschutzrechtliche Aspekte von Forschungsvorhaben werden durch die Ethikkommission grundsätzlich nur cursorisch geprüft. Dieses Votum / diese Bewertung ersetzt mithin nicht die Konsultation des zuständigen Datenschutzbeauftragten.		
Somit bestehen keine Bedenken gegen die Durchführung des o. g. Vorhabens.		
Mit freundlichen Grüßen	Für die Richtigkeit:	Die Ethik-Kommission ist bei der BLÄK eingerichtet, § 13a Satzung der Bayeri- schen Landesärztekammer und Art. 29a GDVG.
gez. Prof. Dr. med. Joerg Hasford Vorsitzender der Ethik-Kommission	 Sanja Fricke-Mathias Apothekerin in der Geschäftsführung der EK	Bayerische Landesärztekammer Körperschaft des öffentlichen Rechts Mühlbauerstraße 16 81677 München Telefon 089 4147-0 www.blaek.de
		Am besten erreichen Sie die BLÄK telefonisch montags bis donnerstags von 9.00 bis 15.30 Uhr und freitags von 9.00 bis 12.00 Uhr
		Bayerische Landesbank München IBAN DE 19 7005 0000 0000 0248 01 BIC : BYLADEMM

Abbildung A29: Ethik-Votum der Ethik-Kommission

## 9.1 CMD vs. Flughöhe

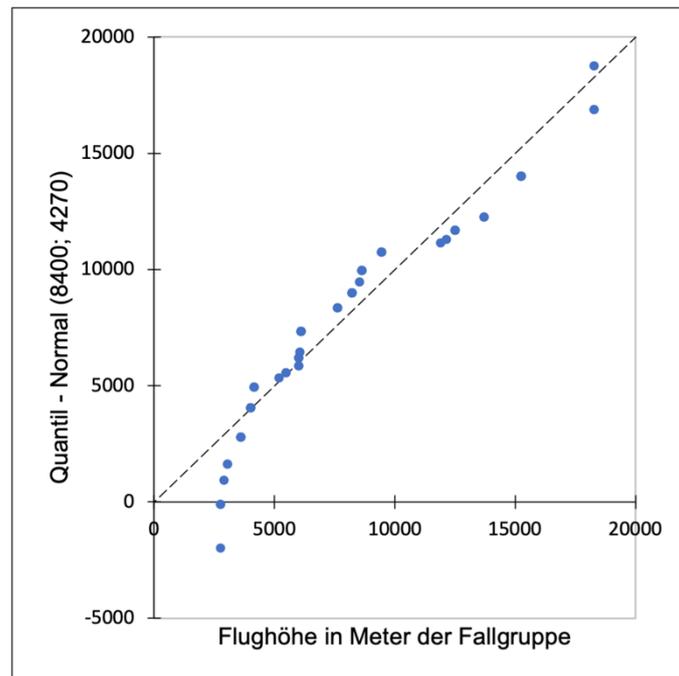


Abbildung A30: Q-Q-Plot über die Prüfung auf Normalverteilung der Variable Flughöhe in Meter der Fallgruppe

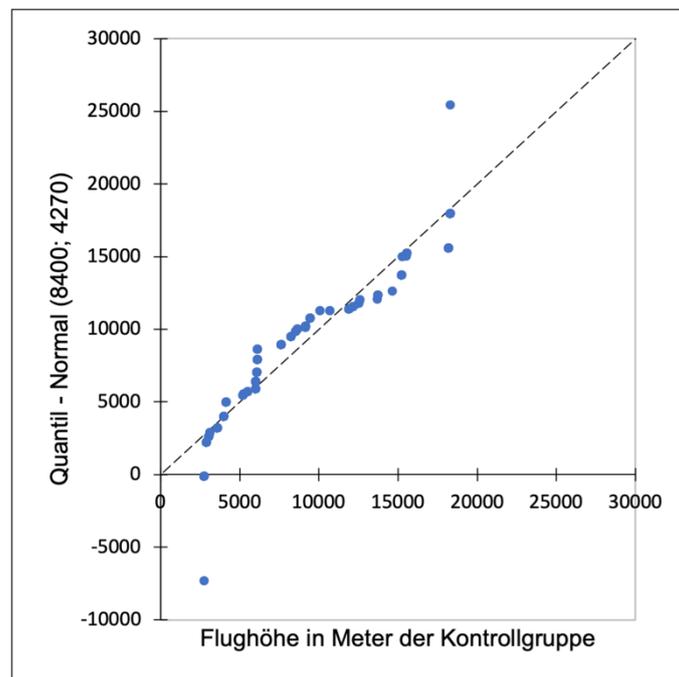


Abbildung A31: Q-Q-Plot über die Prüfung auf Normalverteilung der Variable Flughöhe in Meter der Kontrollgruppe des Querschnitts

## 9.2 Abnorme MRT-Befunde des KG

Tabelle A14: Charakteristika der Militärluftfahrzeugführer der Magnetresonanztomografie-(MRT)-Fallgruppe mit Craniomandibulärer Dysfunktion (CMD)

Variable	MRT-Fallgruppe $n = 24$				
	$M$	$SD$	95 %-KI	Minimum	Maximum
Anzahl Auffälligkeiten im CMD-Screening	4,0	0,8	[3,6; 4,4]	2	5
Alter in Jahren	42,4	12,1	[37,2; 37,6]	22	60
Anzahl Flugstunden	2058,6	1858,0	[1257,2; 2860,0]	20	7371
Anzahl abnormer MRT-Befunde der KG	6,6	1,8	[5,8; 7,4]	3	10
Stresslevel	6,6	1,6	[5,9; 7,3]	3	10

Anmerkung: CMD = Craniomandibuläre Dysfunktion,  $M$  = Mittelwert,  $SD$  = Standardabweichung, KG = Kiefergelenk, KI = Konfidenzintervall

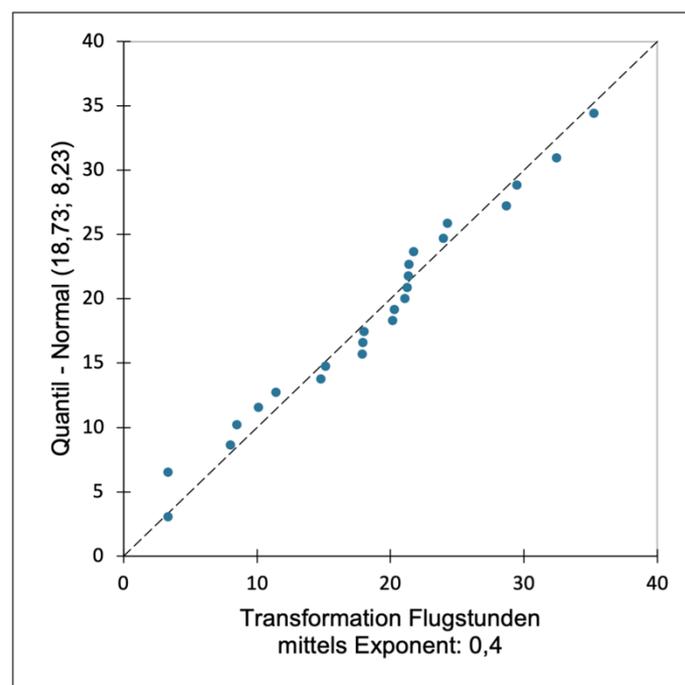


Abbildung A32: Q-Q-Plot über die Prüfung auf Normalverteilung der Anzahl an Flugstunden (transformiert mittels Exponent 0,4) der MRT-Fallgruppe

### 9.3 Potenzielle Korrelation abnormer MRT-Befunde mit der Anzahl der Flugstunden

Tabelle A15: Biseriale Korrelationsanalyse zwischen Flugstunden (transformiert mittels Exponent 0,4) und abnormen Magnetresonanztomografie-(MRT)-Befunden der Kiefergelenke (KG) der Fallgruppe mit Craniomandibulärer Dysfunktion (CMD)

Variable	ein- oder beidseitig	<i>r</i>	<i>p</i>
KG-Arthrose	unilateral	0,492	0,013*
	bilateral	0	0,953
Deformation KG	unilateral	-0,143	0,497
	bilateral	0,390	0,063
partielle ADV	unilateral	0,034	0,866
	bilateral	0,060	0,781
totale ADV	unilateral	-0,200	0,348
	bilateral	-0,100	0,567
Position KG-Kopf in Ruheschwebelage nach dorsal	unilateral	0,325	0,119
	bilateral	_ <sup>a</sup>	_ <sup>a</sup>
Position KG-Kopf in Ruheschwebelage nach dorsocranial	unilateral	-0,018	0,917
	bilateral	0,014	0,923
Schaden innerhalb der bilaminären Zone entzündet/perforiert/zerstört	unilateral	0,131	0,545
	bilateral	-0,039	0,832
Gelenkerguss	unilateral	0	0,991
	bilateral	0,014	0,967
Signalsteigerung Diskus	unilateral	0,068	0,598
	bilateral	0,125	0,526
Ausdünnung Diskus	unilateral	-0,092	0,659
	bilateral	0,273	0,203
statische oder dynamische Mundöffnung auffällig	unilateral	0,148	0,492
	bilateral	-0,251	0,228
Diskusverlagerung statisch ohne Reposition	unilateral	0,068	0,592
	bilateral	0,036	0,903
Diskusadhäsion	unilateral	-0,272	0,169

Variable	ein- oder beidseitig	<i>r</i>	<i>p</i>
	bilateral	-0,100	0,557
Gereizte Kaumuskulatur	unilateral	-0,285	0,178
	bilateral	-0,120	0,568
kräftige Schleimhautschwellung in der Kieferhöhle und/oder Stirnhöhle	unilateral	-0,012	0,931
	bilateral	0,228	0,336

Anmerkung: ADV = Anteriore Diskusverlagerung. <sup>a</sup> Die Variable wurde nicht festgestellt und war folglich nicht berechenbar. \*  $p < 0,05$ .

#### 9.4 Regressionsanalyse in Abhängigkeit von Kiefergelenkarthrose

Tabelle A16: Auswahl geeigneter metrischer Kovariaten für Regressionsanalyse abnormer Magnetresonanztomografie-(MRT)-Befunde der Kiefergelenke (KG) der Fallgruppe mit Craniomandibulärer Dysfunktion (CMD)

Variable	<i>r</i>	<i>p</i>
CMD-Screening	-0,337	0,050 <sup>a</sup>
Alter in Jahren	0,231	0,274 <sup>b</sup>
Stresslevel 0 – 10	0,080	0,752
WHR Inbody Körperanalyse	-0,031	0,914

Anmerkung: WHR = Waist-to-hip-Ratio. Signifikanz wurde mittels punktbiserialer Korrelation zwischen einer metrischen Variablen und der dichotomen Zielvariable (unilaterale KG-Arthrose) eruiert. Bei  $p < 0,1$  wurde die Variable als annähernd signifikant eingestuft und mit \* markiert. <sup>a</sup> Die Variable wurde aus dem finalen Modell entfernt, da beim Einführen alle unabhängigen Variablen an Signifikanz verloren. <sup>b</sup> Die Variable wurde trotz fehlender Signifikanz inhaltlich in das finale Modell mit aufgenommen.

Tabelle A17: Auswahl geeigneter kategorialer Kovariaten für Regressionsanalyse abnormer Magnetresonanztomografie-(MRT)-Befunde der Kiefergelenke (KG) der Fallgruppe mit Craniomandibulärer Dysfunktion (CMD)

Variable	Kreuztabelle mit relativen und absoluten Zahlen				<i>p</i>		
	MRT-Fälle <i>n</i> = 24		Fallgruppe				
Kieferorthopädische Behandlung	Häufigkeit		ja	nein	1,000		
	Kontroll- gruppe	ja	3	12,5		8	33,3
		nein	4	16,7		9	37,5
	CMD Kurzbefund Exzentrik traumatisch	MRT-Fälle <i>n</i> = 24		Fallgruppe		0,065 <sup>a</sup>	
Häufigkeit		ja	nein				
		<i>n</i>	%	<i>n</i>	%		

Variable	Kreuztabelle mit relativen und absoluten Zahlen						<i>p</i>
	Kontroll- gruppe	ja	7	29,2	10	41,7	
		nein	0	0,0	7	29,2	
ADV partiell	MRT-Fälle		Fallgruppe				1,000
	<i>n</i> = 24		ja		nein		
	Häufigkeit		<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	
	Kontroll- gruppe	ja	4	16,7	8	33,3	
		nein	3	12,5	9	37,5	
	Angle Klasse III	MRT-Fälle		Fallgruppe			
<i>n</i> = 24		ja		nein			
Häufigkeit		<i>n</i>	%	<i>n</i>	%		
Kontroll- gruppe		ja	0	0,0	4	16,7	
		nein	7	29,2	13	54,2	
Angle Klasse II oder III		MRT-Fälle		Fallgruppe			
	<i>n</i> = 24		ja		nein		
	Häufigkeit		<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	
	Kontroll- gruppe	ja	2	8,3	12	50,0	
		nein	5	20,8	5	20,8	
	Angle Klasse II	MRT-Fälle		Fallgruppe			
<i>n</i> = 24		ja		nein			
Häufigkeit		<i>n</i>	%	<i>n</i>	%		
Kontroll- gruppe		ja	2	8,3	9	37,5	
		nein	5	20,8	8	33,3	
Tinnitus aurium		MRT-Fälle		Fallgruppe			
	<i>n</i> = 24		ja		nein		
	Häufigkeit		<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	
	Kontroll- gruppe	ja	5	20,8	7	29,2	
		nein	2	8,3	10	41,7	
	Frühere Unfälle	MRT-Fälle		Fallgruppe			
<i>n</i> = 24		ja		nein			
Häufigkeit		<i>n</i>	%	<i>n</i>	%		
Kontroll- gruppe		ja	1	4,2	6	25,0	
		nein	6	25,0	11	45,8	
Fluguntauglichkeit		MRT-Fälle		Fallgruppe			
	<i>n</i> = 24		ja		nein		
	Häufigkeit		<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	
	Kontroll- gruppe	ja	0	0,0	7	29,2	
		nein	7	29,2	10	41,7	
	Deformation KG bilateral	MRT-Fälle		Fallgruppe			

Variable	Kreuztabelle mit relativen und absoluten Zahlen						<i>p</i>
	<i>n</i> = 24		ja		nein		
	Häufigkeit		<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	
Kontroll- gruppe	ja	5	20,8	3	12,5		
	nein	2	8,3	14	58,3		
HP_N	MRT-Fälle		Fallgruppe				1,000
	<i>n</i> = 24		ja		nein		
	Häufigkeit		<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	
Kontroll- gruppe	ja	3	12,5	6	25,0		
	nein	4	16,7	11	45,8		
PP_N	MRT-Fälle		Fallgruppe				1,000
	<i>n</i> = 24		ja		nein		
	Häufigkeit		<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	
Kontroll- gruppe	ja	3	12,5	7	29,2		
	nein	4	16,7	10	41,7		
SP_N	MRT-Fälle		Fallgruppe				1,000
	<i>n</i> = 24		ja		nein		
	Häufigkeit		<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	
Kontroll- gruppe	ja	1	4,2	4	16,7		
	nein	6	25,0	13	54,2		
Prothetischer Zahnersatz vorhanden	MRT-Fälle		Fallgruppe				0,023 <sup>a</sup>
	<i>n</i> = 24		ja		nein		
	Häufigkeit		<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	
Kontroll- gruppe	ja	6	25,0	5	20,8		
	nein	1	4,2	12	50,0		
Nikotinkonsum	MRT-Fälle		Fallgruppe				- <sup>b</sup>
	<i>n</i> = 24		ja		nein		
	Häufigkeit		<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	
Kontroll- gruppe	ja	0	0,0	0	0,0		
	nein	0	0,0	24	100		

Anmerkung: ADV = Anteriore Diskusverlagerung, HP = Hubschrauberpilot, PP = Propellerpilot, SP = Strahlflugzeugpilot. Signifikanz wurde mittels Exaktem Test nach Fisher zwischen kategorialen Variablen und dichotomer Zielvariable (unilaterale KG-Arthrose) ermittelt. Bei  $p < 0,1$  wurde die Variable als annähernd signifikant eingestuft und mit \* markiert. <sup>a</sup> Die Variable wurde im Regressionsmodell als Suppressor erkannt, bedingt durch sehr großen Standardfehler des Mittelwerts (*SEM*) bei großem  $R^2$ , und daher nicht ins finale Modell aufgenommen. <sup>b</sup> Die Variable konnte nicht berechnet werden, da keiner die Exposition aufwies.

Tabelle A18: Prüfen der Voraussetzungen für logistische Regressionsanalyse

Regression	Voraussetzung	gegeben durch
Logistische Regression	Unabhängigkeit der Residuen	Durbin-Watson-Test = 2,758
	Keine Ausreißer in den Residuen	Zwei Ausreißer entfernt
	Loglinearität metrischer Prädiktor mit der abhängigen Variablen	$p = 0,062$
	Keine Multikollinearität bei mehreren metrischen Prädiktoren	Korrelationsmatrix Werte < 0,8

Tabelle A19: Statistische Analyse der Magnetresonanztomografie-(MRT)-Gruppe bezüglich Zusammenhang zwischen Kiefergelenk-(KG)-Position und Anteriorer Diskusverlagerung (ADV) oder Tinnitus

Variable	Kontingenztabelle für den Exakten Fisher-Test mit absoluten und relativen Zahlen				$\chi^2$	$p$	OR	
KG-Arthrose	KG	ADV				0,833	0,361	2,2
	$n = 48$	ja		nein				
	Häufigkeit	$n$	%	$n$	%			
	ja	9	18,8	2	4,2			
	nein	25	52,1	12	25,0			
ADV	KG	Ruhelage dorsal oder dorsocranial				2,548	0,110	0,4
	$n = 48$	ja		nein				
	Häufigkeit	$n$	%	$n$	%			
	ja	11	22,9	23	47,9			
	nein	8	16,7	6	12,5			
Tinnitus aurium	KG	Ruhelage dorsal oder dorsocranial				10,084	0,003**	11,0
	$n = 48$	ja		nein				
	Häufigkeit	$n$	%	$n$	%			
	ja	12	25,0	12	25,0			
	nein	2	4,2	22	45,8			
Tinnitus aurium	KG	ADV				1,613	0,204	0,4
	$n = 48$	ja		nein				
	Häufigkeit	$n$	%	$n$	%			
	ja	15	31,3	9	18,8			
	nein	19	39,6	5	10,4			
ADV	KG	Gelenkerguss				0,478	0,489	0,6
	$n = 48$	ja		nein				
	Häufigkeit	$n$	%	$n$	%			
	ja	11	22,9	23	47,9			

Variable	Kontingenztabelle für den Exakten Fisher-Test mit absoluten und relativen Zahlen					$\chi^2$	$p$	OR
	nein	6	12,5	8	16,7			
	KG	SP						
	$n = 48$	ja		nein				
Ausdünnung Diskus	Häufigkeit	$n$	%	$n$	%	0,014	1,000	0,9
	ja	4	8,3	16	33,3			
	nein	6	12,5	22	45,8			
	KG	HP						
	$n = 48$	ja		nein				
Ausdünnung Diskus	Häufigkeit	$n$	%	$n$	%	0,823	0,385	1,7
	ja	9	18,8	11	22,9			
	nein	9	18,8	19	39,6			
	KG	Entzündung der bilaminären Zone						
	$n = 48$	ja		nein				
ADV	Häufigkeit	$n$	%	$n$	%	3,387	0,109	3,3
	ja	22	45,8	12	25,0			
	nein	5	10,4	9	18,8			
	KG	<i>M. pterygoideus lateralis</i> degeneriert						
	$n = 48$	ja		nein				
KG-Arthrose	Häufigkeit	$n$	%	$n$	%	1,413	0,311	0,4
	ja	4	8,3	7	14,6			
	nein	21	43,8	16	33,3			
	KG	<i>M. pterygoideus lateralis</i> degeneriert						
	$n = 48$	ja		nein				
ADV	Häufigkeit	$n$	%	$n$	%	0,203	0,756	0,8
	ja	17	35,4	17	35,4			
	nein	8	16,7	6	12,5			

Anmerkung: HP = Hubschrauberpilot, *M.* = *Musculus*, OR = Odds Ratio, PP = Propellerpilot, SP = Strahlflugzeugpilot. \*\*  $p < 0,01$ .

9.5 Allgemeine Charakteristika des Stichprobenumfangs der Fall-Kontroll-Studie

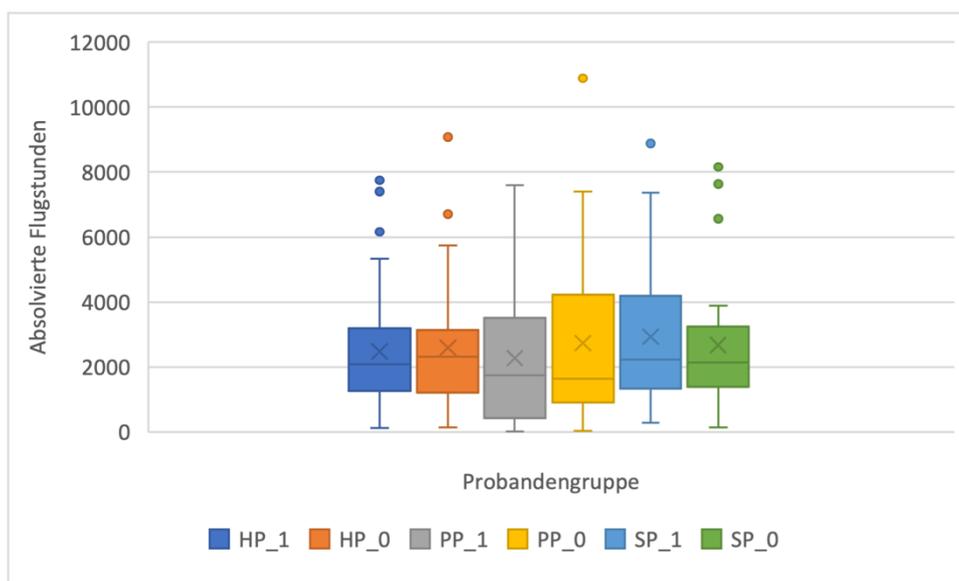


Abbildung A33: Flugstundenverteilung in den Subgruppen der Fall- und Kontrollgruppe der Fall-Kontroll-Studie

HP = Hubschrauberpilot, PP = Propellerpilot, SP = Strahlflugzeugpilot; \_1 = Fallgruppe, \_0 = Kontrollgruppe

9.6 CMD vs. Kieferorthopädische Behandlung & Bruxismus

Tabelle A20: Statistische Analyse der Häufigkeit von kieferorthopädischen Behandlungen bei Bruxismus – Fallgruppe vs. Kontrollgruppe (KGr) in den Subgruppen

Variable	Kontingenztabelle für McNemar-Test mit absoluten & relativen Zahlen				$\chi^2$	$p$	$g$	Power (1 - $\beta$ )						
Kieferorthopädische Behandlung & Bruxismus	HP_N		Fallgruppe		7	0,016*	0,500	1,000						
	$n = 41$		ja	nein										
	Häufigkeit	$n$	%	$n$					%					
	KGr	ja	0	0,0					0	0,0				
		nein	7	17,1					34	82,9				
	PP_N		Fallgruppe						3	0,250	0,500	1,000		
	$n = 26$		ja	nein										
	Häufigkeit	$n$	%	$n$									%	
	KGr	ja	0	0,0									0	0,0
		nein	3	11,5									23	88,5
SP_N		Fallgruppe		5	0,063	0,500	1,000							
$n = 24$		ja	nein											
Häufigkeit	$n$	%	$n$					%						
KGr	ja	0	0,0					0					0,0	
	nein	5	20,8					19					79,2	

Anmerkung: HP = Hubschrauberpilot, OR = Odds Ratio, PP = Propellerpilot, SP = Strahlflugzeugpilot.

\*  $p < 0,05$ .

## 9.7 CMD vs. Zahnhartsubstanz- &amp; Parodontaldefekte

Tabelle A21: Statistische Analyse der Häufigkeit von Erosionen in einer 1:4 gepaarten Fall-Kontroll-Studie

Variable	Kontingenztabelle für Cochran-Q-Test mit absoluten & relativen Zahlen				$\chi^2$	p	df				
	Gruppe	Kategorie	n	%							
Erosionen N = 455	Fallgruppe	ja	11	12,1	11,545	0,023*	4				
		nein	80	87,9							
	Kontrollgruppe 1	ja	2	2,2							
		nein	89	97,8							
	Kontrollgruppe 2	ja	4	4,4							
		nein	87	95,6							
	Kontrollgruppe 3	ja	4	4,4							
		nein	87	95,6							
	Kontrollgruppe 4	ja	3	3,3							
		nein	88	96,7							
	Erosionen HP_N n = 205	Fallgruppe	ja	5				12,2	7,000	0,175	4
			nein	36				87,8			
Kontrollgruppe 1		ja	1	2,4							
		nein	40	97,6							
Kontrollgruppe 2		ja	2	4,9							
		nein	39	95,1							
Kontrollgruppe 3		ja	2	4,9							
		nein	39	95,1							
Kontrollgruppe 4		ja	0	0,0							
		nein	41	100,0							
Erosionen PP_N n = 130		Fallgruppe	ja	4	15,4	10,154	0,040*	4			
			nein	22	84,6						
	Kontrollgruppe 1	ja	0	0,0							
		nein	26	100							
	Kontrollgruppe 2	ja	0	0,0							
		nein	26	100							
	Kontrollgruppe 3	ja	1	96,2							
		nein	25	3,8							

Variable	Kontingenztabelle für Cochran-Q-Test mit absoluten & relativen Zahlen				$\chi^2$	$p$	$df$
	Gruppe	Kategorie	$n$	%			
Erosionen SP_N $n = 120$	Kontrollgruppe 4	ja	3	11,5	2,545	0,866	4
		nein	23	88,5			
	Fallgruppe	ja	2	8,3			
		nein	22	91,7			
	Kontrollgruppe 1	ja	1	4,2			
		nein	23	95,8			
	Kontrollgruppe 2	ja	2	8,3			
		nein	22	91,7			
	Kontrollgruppe 3	ja	1	4,2			
		nein	23	95,8			
	Kontrollgruppe 4	ja	0	0,0			
		nein	24	100			

Anmerkung:  $df$  = Freiheitsgrad, HP = Hubschrauberpilot, PP = Propellerpilot, SP = Strahlflugzeugpilot.  
\*  $p < 0,05$ .

## 9.8 CMD vs. Prothetik

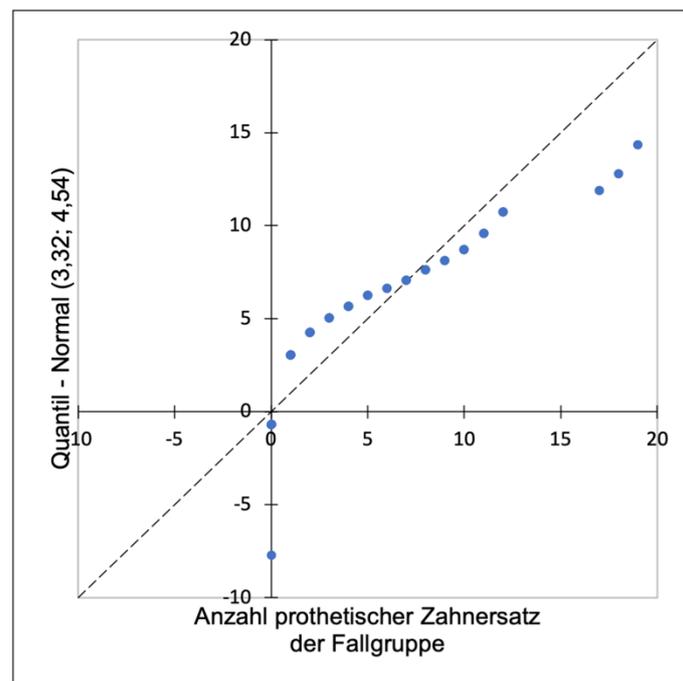


Abbildung A34: Q-Q-Plot über die Prüfung auf Normalverteilung der Variable prothetischer Zahnersatz der Fallgruppe

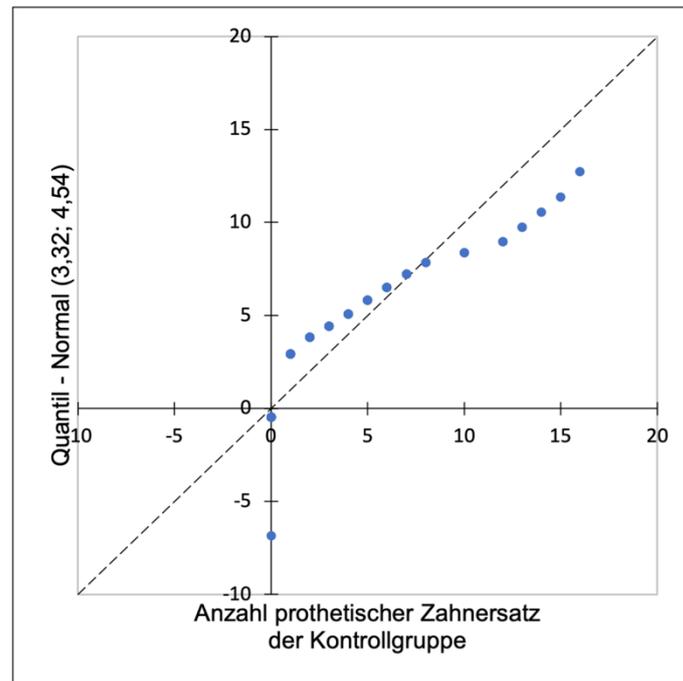


Abbildung A35: Q-Q-Plot über die Prüfung auf Normalverteilung der Variable prothetischer Zahnersatz der Kontrollgruppe

## 9.9 CMD-assozierte Komorbiditäten

Tabelle A22: Komorbiditäten im Fall- und Kontrollkollektiv der Fall-Kontroll-Studie

Fachbereich	Medizinische Diagnose	N	%	CMD				OR
				ja		nein		
				n	%	n	%	
Neurologie/ Psychiatrie, neurologisch	Kopfschmerzsyndrome	20	11,0	17	18,7	3	3,3	5,67**
	Sonstige abnorme Befunde bei der bildgebenden Diagnostik des ZNS	26	14,3	19	20,9	7	7,7	4,00*
Neurologie/ Psychiatrie, psychiatrisch	Depressionen	4	2,2	3	3,3	1	1,1	3,00
	Angststörungen	0	0,0	0	0,0	0	0,0	- <sup>a</sup>
	Nichtorganische Schlafstörungen	2	1,1	2	2,2	0	0,0	- <sup>a</sup>
	Schlafstörungen	3	1,6	3	3,3	0	0,0	- <sup>a</sup>
	Probleme mit Bezug auf: Konsum von Alkohol, Tabak, Arzneimitteln oder Drogen	8	4,4	3	3,3	5	5,5	0,60 <sup>b</sup>
Hals-, Nasen-, Ohrenheil- kunde	Benigner paroxysmaler Schwindel	3	1,6	3	3,3	0	0,0	- <sup>a</sup>
	Tinnitus aurium	23	12,6	20	22,0	3	3,3	9,50**
	Hörschwierigkeiten	91	50,0	42	46,2	39	42,9	1,20 <sup>b</sup>
	Chronische Rhinitis	0	0,0	0	0,0	0	0,0	- <sup>a</sup>

Fachbereich	Medizinische Diagnose	N	%	CMD				OR
				ja		nein		
				n	%	n	%	
	Asthma	3	1,6	2	2,2	1	1,1	2,00
	Schnarchen	45	24,7	24	26,4	21	23,1	1,20 <sup>b</sup>
Innere Medizin	Abnorme Ergebnisse von kardiovaskulären Funktionsprüfungen	35	19,2	20	22,0	15	16,5	1,36 <sup>b</sup>
	Reizdarmsyndrom	1	1	1,1	0,0	0	0,0	- <sup>a</sup>
	Schilddrüsenfunktionsstörung	37	20,3	22	24,2	15	16,5	1,78
Augenheilkunde	Sonstiger Strabismus	17	9,3	10	11,0	7	7,7	1,50 <sup>b</sup>
	Sonstige Störungen der Blickbewegungen	0	0,0	0	0,0	0	0,0	- <sup>a</sup>
	Sehstörungen	1	0,5	0	0,0	1	1,1	0,0
	Xerophthalmie	0	0,0	0	0,0	0	0,0	- <sup>a</sup>
Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde	Fehlende erste und zweite Molaren	28	15,4	17	9,3	11	6,0	1,75 <sup>b</sup>
Orthopädie	Skoliose	179	98,4	88	96,7	91	100	- <sup>a</sup>
	Osteochondrose der Wirbelsäule	18	9,9	12	13,2	6	6,6	4,00
	Osteoarthritis	8	4,4	3	3,3	5	5,5	0,50
	Spondylose	7	3,8	6	6,6	1	1,1	6,00
	Sonstige näher bezeichnete Bandscheiben-verlagerung	76	41,8	38	41,8	38	41,8	1,00 <sup>b</sup>
	Rückenschmerzen	74	40,7	36	39,6	38	41,8	0,90
	Schulterschiefstand	174	95,6	85	93,4	89	97,8	0,33
	Beckenschiefstand	25	13,7	12	13,2	13	14,3	0,90
	Wirbelsäule seitlich nicht regelrecht	99	54,4	53	58,2	46	50,5	1,33
	HWS funktional nicht regelrecht	7	3,8	4	4,4	3	3,3	1,33
	BWS funktional nicht regelrecht	46	25,3	31	34,1	15	16,5	2,60*
	LWS funktional nicht regelrecht	106	58,2	58	63,7	48	52,7	1,71
	ISG nicht reizlos	1	0,5	0	0,0	1	1,1	0,0
Gelenkschmerzen	10	5,5	4	4,4	6	6,6	0,67	

Anmerkung: CMD = Craniomandibuläre Dysfunktion, BWS = Brustwirbelsäule, HWS = Halswirbelsäule, ISG = Iliosakralgelenk, LWS = Lendenwirbelsäule, OR = Odds Ratio, ZNS = Zentrales Nervensystem. <sup>a</sup> OR war nicht berechenbar bei 0-Werten im Nenner. <sup>b</sup> Unzureichende Teststärke gemäß Powerberechnung in Tabelle A23. \*  $p < 0,05$ , \*\*  $p < 0,01$  gemäß McNemar-Test in Tabelle A23.

Tabelle A23: Statistische Analyse der Craniomandibulär Dysfunktion-(CMD)-assoziierten Komorbiditäten im Fall- und Kontrollkollektiv der Fall-Kontroll-Studie

Variable	Kontingenztabelle für McNemar-Test mit absoluten & relativen Zahlen					$\chi^2$	$p$	$g$	Power (1 - $\beta$ )	
Kopfschmerz-syndrome	$N = 91$	Fallgruppe				9,800	0,003**	0,350	1,0	
		ja		nein						
	Häufigkeit	$n$	%	$n$	%					
	KGr	ja	0	0,0	3					3,3
		nein	17	18,7	71					78
Sonstige abnorme Befunde bei der bildgebenden Diagnostik des Zentralnervensystems	$N = 91$	Fallgruppe				7,200	0,012*	0,300	0,999	
		ja		nein						
	Häufigkeit	$n$	%	$n$	%					
	KGr	ja	3	3,3	4					4,4
		nein	16	17,6	68					74,7
Depressionen	$N = 91$	Fallgruppe				1,000	0,625	0,250	0,998	
		ja		nein						
	Häufigkeit	$n$	%	$n$	%					
	KGr	ja	0	0,0	1					1,1
		nein	3	3,3	87					95,6
Angststörungen	$N = 91$	Fallgruppe				-	-	-	- <sup>a</sup>	
		ja		nein						
	Häufigkeit	$n$	%	$n$	%					
	KGr	ja	0	0,0	0					0,0
		nein	0	0,0	0					0,0
Nichtorganische Schlafstörungen	$N = 91$	Fallgruppe				2,000	0,500	0,500	1,0	
		ja		nein						
	Häufigkeit	$n$	%	$n$	%					
	KGr	ja	0	0,0	0					0,0
		nein	2	2,2	89					97,8
Schlafstörungen	$N = 91$	Fallgruppe				3,000	0,250	0,500	1,0	
		ja		nein						
	Häufigkeit	$n$	%	$n$	%					
	KGr	ja	0	0,0	0					0,0
		nein	3	3,3	88					96,7
Probleme mit Bezug auf: Konsum von Alkohol, Tabak, Arzneimitteln oder Drogen	$N = 91$	Fallgruppe				0,500	0,727	0,125	0,620 <sup>b</sup>	
		ja		nein						
	Häufigkeit	$n$	%	$n$	%					
	KGr	ja	0	0,0	5					5,5
		nein	3	3,3	83					91,2
	$N = 91$	Fallgruppe				3,000	0,250	0,500	1,0	

Variable	Kontingenztabelle für McNemar-Test mit absoluten & relativen Zahlen					$\chi^2$	<i>p</i>	<i>g</i>	Power (1 - $\beta$ )
	ja		nein						
Benigner paroxysmaler Schwindel	Häufigkeit	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%				
	KGr	ja	0	0,0	0	0,0			
		nein	3	3,3	88	96,7			
Tinnitus aurium	Fallgruppe					13,762	0,001**	0,405	1,0
	<i>N</i> = 91	ja		nein					
	Häufigkeit	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%				
KGr	ja	1	1,1	2	2,2				
	nein	19	20,9	69	75,8				
Hörschwierigkeiten	Fallgruppe					0,273	0,728	0,045	0,206 <sup>b</sup>
	<i>N</i> = 91	ja		nein					
	Häufigkeit	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%				
KGr	ja	24	26,4	15	16,5				
	nein	18	19,8	34	37,4				
Chronische Rhinitis	Fallgruppe					-	-	-	- <sup>a</sup>
	<i>N</i> = 91	ja		nein					
	Häufigkeit	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%				
KGr	ja	0	0,0	0	0,0				
	nein	0	0,0	0	0,0				
Asthma	Fallgruppe					0,333	1,000	0,167	0,943
	<i>N</i> = 91	ja		nein					
	Häufigkeit	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%				
KGr	ja	0	0,0	1	1,1				
	nein	2	2,2	88	96,7				
Schnarchen	Fallgruppe					0,273	0,728	0,045	0,109 <sup>b</sup>
	<i>N</i> = 91	ja		nein					
	Häufigkeit	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%				
KGr	ja	6	6,6	15	16,5				
	nein	18	19,8	52	57,1				
Abnorme Ergebnisse von kardiovaskulären Funktionsprüfungen	Fallgruppe					0,758	0,487	0,076	0,256 <sup>b</sup>
	<i>N</i> = 91	ja		nein					
	Häufigkeit	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%				
KGr	ja	1	1,1	14	15,4				
	nein	19	20,9	57	62,6				
Reizdarmsyndrom	Fallgruppe					1,000	1,000	0,500	1,0
	<i>N</i> = 91	ja		nein					
	Häufigkeit	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%				
KGr	ja	1	1,1	0	0,0				

Variable	Kontingenztabelle für McNemar-Test mit absoluten & relativen Zahlen					$\chi^2$	<i>p</i>	<i>g</i>	Power (1 - $\beta$ )	
	nein	90	89,9	0	0,0					
Schilddrüsen-funktions-störungen	Fallgruppe					1,960	0,230	0,140	0,849	
	<i>N</i> = 91	ja		nein						
	Häufigkeit	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%					
	KGr	ja	6	6,6	9					9,9
		nein	16	17,6	60					65,9
Sonstiger Strabismus	Fallgruppe					0,600	0,607	0,100	0,426 <sup>b</sup>	
	<i>N</i> = 91	ja		nein						
	Häufigkeit	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%					
	KGr	ja	1	1,1	6					6,6
		nein	9	9,9	75					82,4
Sonstige Störungen der Blickbewegungen	Fallgruppe					-	-	-	- <sup>a</sup>	
	<i>N</i> = 91	ja		nein						
	Häufigkeit	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%					
	KGr	ja	0	0,0	0					0,0
		nein	0	0,0	0					0,0
Sehstörungen	Fallgruppe					1,000	1,000	0,500	1,0	
	<i>N</i> = 91	ja		nein						
	Häufigkeit	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%					
	KGr	ja	0	0,0	1					1,1
		nein	0	0,0	90					89,9
Xerophthalmie	Fallgruppe					-	-	-	- <sup>a</sup>	
	<i>N</i> = 91	ja		nein						
	Häufigkeit	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%					
	KGr	ja	0	0,0	0					0,0
		nein	0	0,0	0					0,0
Fehlende erste und zweite Molaren	Fallgruppe					1,636	0,286	0,136	0,832	
	<i>N</i> = 91	ja		nein						
	Häufigkeit	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%					
	KGr	ja	3	3,3	8					8,8
		nein	14	15,4	66					72,5
Skoliose	Fallgruppe					2,000	0,500	0,500	1,0	
	<i>N</i> = 91	ja		nein						
	Häufigkeit	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%					
	KGr	ja	88	96,7	3					3,3
		nein	0	0,0	0					0,0
Osteochondrose der Wirbelsäule	Fallgruppe					3,600	0,109	0,300	0,999	
	<i>N</i> = 91	ja		nein						

Variable	Kontingenztabelle für McNemar-Test mit absoluten & relativen Zahlen				$\chi^2$	$p$	$g$	Power (1 - $\beta$ )	
	Häufigkeit	$n$	%	$n$	%				
	KGr	ja	4	4,4	2	2,2			
		nein	8	8,8	77	84,6			
	$N = 91$	Fallgruppe							
		ja		nein					
Osteoarthritis	Häufigkeit	$n$	%	$n$	%	0,667	0,688	0,167	0,943
	KGr	ja	1	1,1	4	4,4			
		nein	2	2,2	84	92,3			
	$N = 91$	Fallgruppe							
		ja		nein					
Spondylose	Häufigkeit	$n$	%	$n$	%	3,571	0,125	0,357	1,0
	KGr	ja	0	0,0	1	1,1			
		nein	6	6,6	84	92,3			
	$N = 91$	Fallgruppe							
		ja		nein					
Sonstige näher bezeichnete Bandscheibenverlagerung	Häufigkeit	$n$	%	$n$	%	0	1,000	0	0,035 <sup>b</sup>
	KGr	ja	16	17,6	22	24,2			
		nein	22	24,2	31	34,1			
	$N = 91$	Fallgruppe							
		ja		nein					
Rückenschmerzen	Häufigkeit	$n$	%	$n$	%	0,105	0,871	0,026	0,059 <sup>b</sup>
	KGr	ja	18	19,8	20	22			
		nein	18	19,8	35	38,4			
	$N = 91$	Fallgruppe							
		ja		nein					
Schulterschiefstand	Häufigkeit	$n$	%	$n$	%	2,000	0,289	0,250	0,998
	KGr	ja	83	91,2	6	6,6			
		nein	2	2,2	0	0,0			
	$N = 91$	Fallgruppe							
		ja		nein					
Beckenschiefstand	Häufigkeit	$n$	%	$n$	%	0,053	1,000	0,026	0,059 <sup>b</sup>
	KGr	ja	3	3,3	10	11			
		nein	9	9,9	69	75,8			
	$N = 91$	Fallgruppe							
		ja		nein					
Wirbelsäule seitlich nicht regelrecht	Häufigkeit	$n$	%	$n$	%	1,000	0,392	0,071	0,230 <sup>b</sup>
	KGr	ja	25	27,4	21	23,1			
		nein	28	30,8	17	18,7			

Variable	Kontingenztabelle für McNemar-Test mit absoluten & relativen Zahlen				$\chi^2$	$p$	$g$	Power (1 - $\beta$ )		
HWS funktional nicht regelrecht	Fallgruppe				0,143	1,000	0,071	0,230 <sup>b</sup>		
	N = 91	ja		nein						
	Häufigkeit	<i>n</i>	%	<i>n</i>					%	
	KGr	ja	0	0,0					3	3,3
	nein	4	4,4	84					92,3	
BWS funktional nicht regelrecht	Fallgruppe				7,111	0,011*	0,222	0,990		
	N = 91	ja		nein						
	Häufigkeit	<i>n</i>	%	<i>n</i>					%	
	KGr	ja	5	5,5					10	11
	nein	26	28,6	50					54,9	
LWS funktional nicht regelrecht	Fallgruppe				2,632	0,143	0,132	0,669 <sup>b</sup>		
	N = 91	ja		nein						
	Häufigkeit	<i>n</i>	%	<i>n</i>					%	
	KGr	ja	34	37,3					14	25,4
	nein	24	26,4	19					20,9	
ISG nicht reizlos	Fallgruppe				1,000	1,000	0,500	1,0		
	N = 91	ja		nein						
	Häufigkeit	<i>n</i>	%	<i>n</i>					%	
	KGr	ja	0	0,0					1	1,1
	nein	0	0,0	90					98,9	
Gelenkschmer- zen	Fallgruppe				0,400	0,754	0,100	0,426 <sup>b</sup>		
	N = 91	ja		nein						
	Häufigkeit	<i>n</i>	%	<i>n</i>					%	
	KGr	ja	0	0,0					6	6,6
	nein	4	4,4	81					89	

Anmerkung: BWS = Brustwirbelsäule, HWS = Halswirbelsäule, ISG = Iliosakralgelenk, LWS = Lendenwirbelsäule, KGr = Kontrollgruppe. <sup>a</sup> Die Variable wurde nicht festgestellt und war folglich nicht berechenbar. <sup>b</sup> Unzureichende Teststärke. \*  $p < 0,05$ , \*\*  $p < 0,01$ , \*\*\*  $p < 0,001$ .

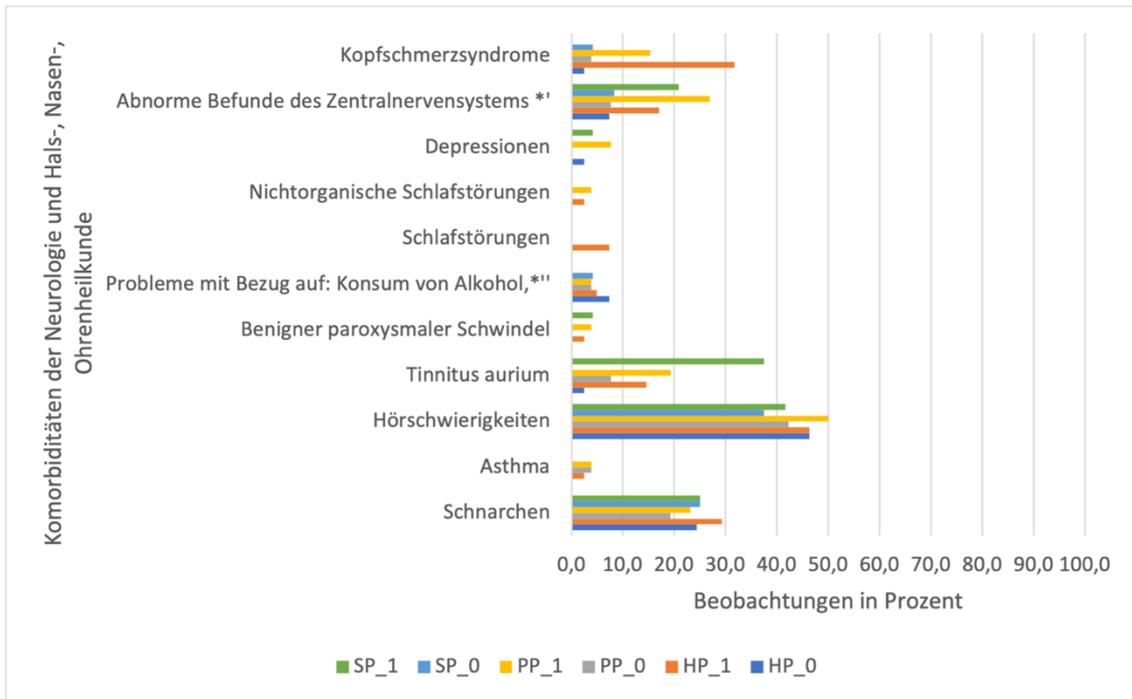


Abbildung A36: Komorbiditäten in den Subgruppen der Fall-Kontroll-Studie

\*' Sonstige abnorme Befunde der bildgebenden Diagnostik des Zentralnervensystems;  
 \*\* Probleme mit Bezug auf: Konsum von Alkohol, Tabak, Arzneimitteln oder Drogen.  
 HP = Hubschrauberpilot, PP = Propellerpilot, SP = Strahlflugzeugpilot; \_1 = Fallgruppe, \_0 = Kontrollgruppe

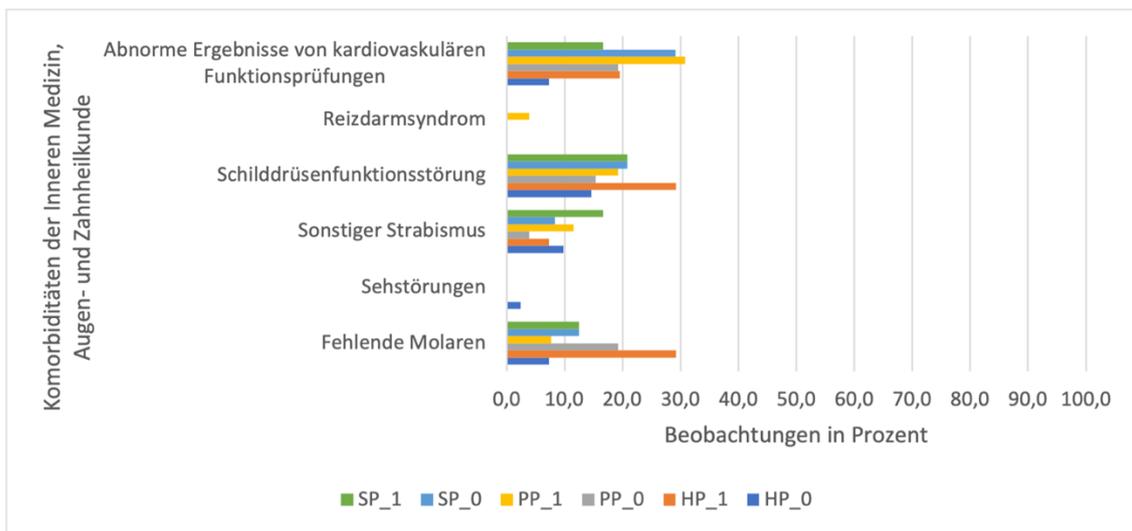


Abbildung A37: Komorbiditäten in den Subgruppen der Fall-Kontroll-Studie

HP = Hubschrauberpilot, PP = Propellerpilot, SP = Strahlflugzeugpilot; \_1 = Fallgruppe, \_0 = Kontrollgruppe

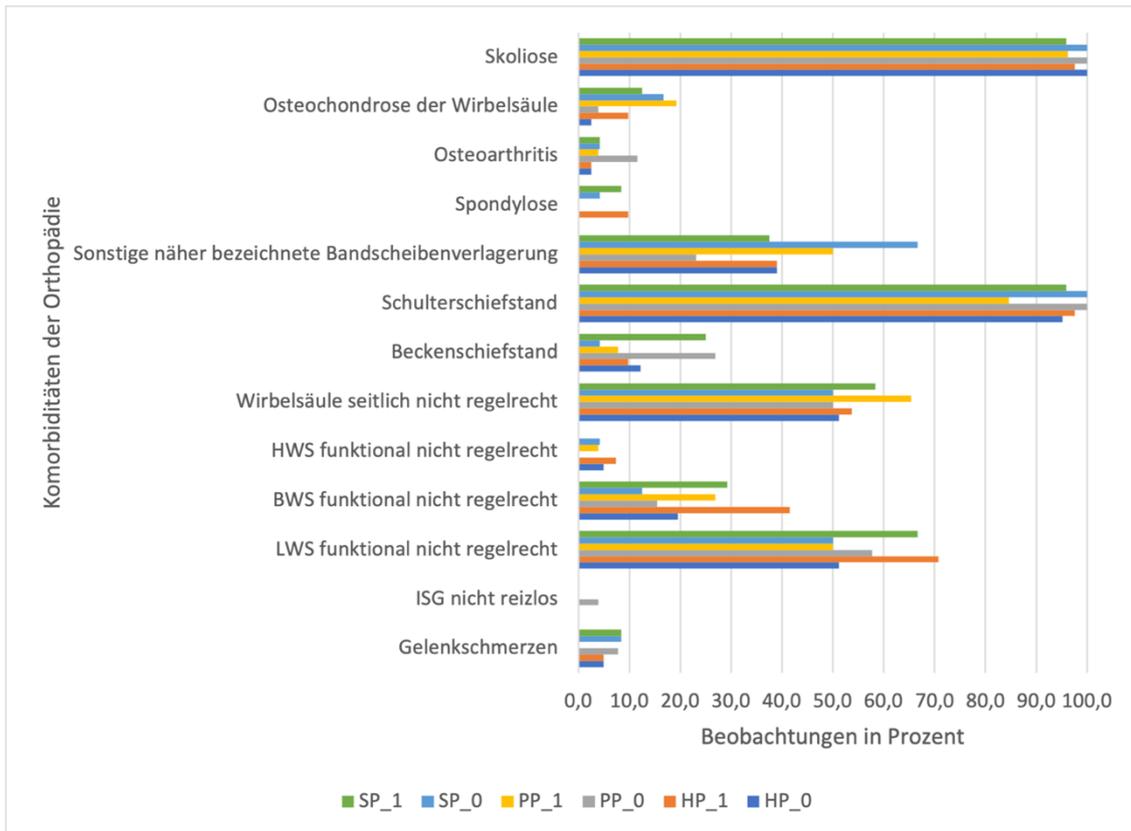


Abbildung A38: Komorbiditäten in den Subgruppen der Fall-Kontroll-Studie

BWS = Brustwirbelsäule, HP = Hubschrauberpilot, HWS = Halswirbelsäule,  
 ISG = Iliosakralgelenk, LWS = Lendenwirbelsäule, PP = Propellerpilot,  
 SP = Strahlflugzeugpilot; \_1 = Fallgruppe, \_0 = Kontrollgruppe

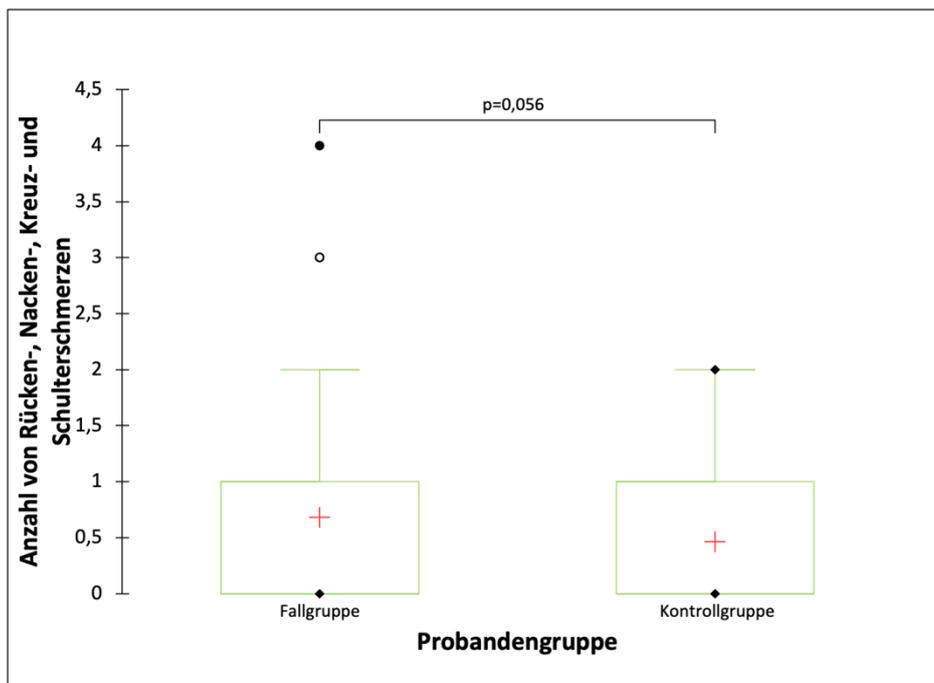


Abbildung A39: Verteilung der Verhältnisse der Anzahl von Rücken-, Nacken-, Kreuz- und Schulterschmerzen in der Fall-Kontroll-Gruppe

Tabelle A24: Statistische Analyse signifikanter Ergebnisse der Craniomandibulär Dysfunktion-(CMD)-assoziierten Komorbiditäten im Fall- und Kontrollkollektiv der Fall-Kontroll-Studie in den Subgruppen

Variable	Kontingenztabelle für McNemar-Test mit absoluten & relativen Zahlen				$\chi^2$	$p$	$g$	Power (1 - $\beta$ )									
Kopfschmerz-symptome	HP_N	Fallgruppe				10,286	0,002*	0,429	0,999								
	$n = 41$	ja		nein													
	Häufigkeit	$n$	%	$n$	%												
	KGr	ja	0	0,0	1					2,4							
		nein	13	31,7	27					65,9							
	PP_N	Fallgruppe								1,800	0,375	0,300	0,869				
	$n = 26$	ja		nein													
	Häufigkeit	$n$	%	$n$	%												
	KGr	ja	0	0,0	1									3,8			
		nein	4	15,4	21									80,8			
	SP_N	Fallgruppe												1,000	1,000	0,500	1,0
	$n = 24$	ja		nein													
Häufigkeit	$n$	%	$n$	%													
KGr	ja	0	0,0	1	4,2												
	nein	0	0,0	23	95,8												
Sonstige abnorme Befunde bei der bildgebenden Diagnostik des Zentralnervensystems	HP_N	Fallgruppe				1,125	0,289	0,250	0,878								
	$n = 41$	ja		nein													
	Häufigkeit	$n$	%	$n$	%												
	KGr	ja	1	2,4	2					4,9							
		nein	6	14,6	32					78,0							
	PP_N	Fallgruppe								1,778	0,182	0,278	0,797				
	$n = 26$	ja		nein													
	Häufigkeit	$n$	%	$n$	%												
	KGr	ja	0	0,0	2									7,7			
		nein	7	26,9	17									65,4			
	SP_N	Fallgruppe												1,800	0,375	0,300	0,811
	$n = 24$	ja		nein													
Häufigkeit	$n$	%	$n$	%													
KGr	ja	1	4,2	1	4,2												
	nein	4	16,7	18	75,0												
Tinnitus aurium	HP_N	Fallgruppe				3,571	0,125	0,357	0,999								
	$n = 41$	ja		nein													
	Häufigkeit	$n$	%	$n$	%												
	KGr	ja	0	0,0	1					2,4							
		nein	6	14,6	34					82,9							

Variable	Kontingenztabelle für McNemar-Test mit absoluten & relativen Zahlen				$\chi^2$	$p$	$g$	Power (1 - $\beta$ )					
BWS funktional nicht regelrecht	PP_N	Fallgruppe				1,800	0,375	0,300	0,869				
	$n = 26$	ja		nein									
	Häufigkeit	$n$	%	$n$	%								
	KGr	ja	1	3,8	1					3,8			
		nein	4	15,4	20					76,9			
	SP_N	Fallgruppe											
	$n = 24$	ja		nein									
	Häufigkeit	$n$	%	$n$	%								
	KGr	ja	0	0,0	0					0,0			
		nein	9	37,5	15					62,5			
	HP_N	Fallgruppe								4,263	0,064	0,237	0,833
	$n = 41$	ja		nein									
Häufigkeit	$n$	%	$n$	%									
KGr	ja	3	7,3	5	12,2								
	nein	14	34,1	19	46,3								
PP_N	Fallgruppe				1,000	0,508	0,167	0,325 <sup>a</sup>					
$n = 26$	ja		nein										
Häufigkeit	$n$	%	$n$	%									
KGr	ja	1	3,8	3					11,5				
	nein	6	23,1	16					61,5				
SP_N	Fallgruppe												
$n = 24$	ja		nein										
Häufigkeit	$n$	%	$n$	%									
KGr	ja	1	4,2	2					8,3				
	nein	6	25,0	15					62,5				

Anmerkung: BWS = Brustwirbelsäule, HP = Hubschrauberpilot, KGr = Kontrollgruppe, PP = Propellerpilot, SP = Strahlflugzeugpilot. <sup>a</sup> Unzureichende Teststärke. \*  $p < 0,05$ .

Tabelle A25: Statistische Analyse signifikanter Ergebnisse der Craniomandibulär Dysfunktion-(CMD)-assoziierten Komorbiditäten im Fall- und Kontrollkollektiv einer 1:4 gepaarten Fall-Kontroll-Studie

Variable	Kontingenztabelle für Cochran-Q-Test mit absoluten & relativen Zahlen				$\chi^2$	$p$	$df$
	Gruppe	Kategorie	$n$	%			
Kopfschmerz- syndrom $N = 455$	Fallgruppe	ja	17	18,7	26,414	< 0,0001***	4
		nein	74	81,3			
	Kontroll- gruppe 1	ja	6	6,6			
		nein	85	93,4			

Variable	Kontingenztabelle für Cochran-Q-Test mit absoluten & relativen Zahlen				$\chi^2$	<i>p</i>	<i>df</i>				
	Gruppe	Kategorie	<i>n</i>	%							
Kopfschmerz- syndrom HP_N <i>n</i> = 205	Kontroll- gruppe 2	ja	2	2,2	25,579	< 0,0001***	4				
		nein	89	97,8							
	Kontroll- gruppe 3	ja	5	5,5							
		nein	86	94,5							
	Kontroll- gruppe 4	ja	2	2,2							
		nein	89	97,8							
	Fallgruppe	ja	13	31,7							
		nein	28	68,3							
	Kontroll- gruppe 1	ja	4	9,8							
		nein	37	90,2							
	Kontroll- gruppe 2	ja	1	2,4							
		nein	40	97,6							
Kontroll- gruppe 3	ja	2	4,9								
	nein	39	95,1								
Kontroll- gruppe 4	ja	2	4,9								
	nein	39	95,1								
Sonstige abnorme Befunde bei der bildgebenden Diagnostik des ZNS <i>N</i> = 455	Fallgruppe	ja	19	20,9	10,780	0,030*	4				
		nein	72	79,1							
	Kontroll- gruppe 1	ja	8	8,8							
		nein	83	91,2							
	Kontroll- gruppe 2	ja	10	11,0							
		nein	81	89,0							
	Kontroll- gruppe 3	ja	6	6,6							
		nein	85	93,4							
	Kontroll- gruppe 4	ja	13	14,3							
		nein	78	85,7							
	Sonstige abnorme Befunde bei der bildgebenden Diagnostik des ZNS HP_N <i>n</i> = 205	Fallgruppe	ja	7				17,1	11,135	0,026*	4
			nein	34				82,9			
Kontroll- gruppe 1		ja	2	4,9							
		nein	39	95,1							
Kontroll- gruppe 2		ja	2	4,9							
		nein	39	95,1							
Kontroll- gruppe 3		ja	3	7,3							
		nein	38	92,7							
Kontroll- gruppe 4		ja	9	22,0							
		nein	32	78,0							
Fallgruppe		ja	7	26,9	5,697	0,263	4				

Variable	Kontingenztabelle für Cochran-Q-Test mit absoluten & relativen Zahlen				$\chi^2$	<i>p</i>	<i>df</i>
	Gruppe	Kategorie	<i>n</i>	%			
Sonstige abnorme Befunde bei der bildgebenden Diagnostik des ZNS PP_N <i>n</i> = 130	Kontroll- gruppe 1	nein	19	73,1	3,385	0,551	4
		ja	3	11,5			
	Kontroll- gruppe 2	nein	23	88,5			
		ja	5	19,2			
	Kontroll- gruppe 3	nein	21	80,8			
		ja	2	7,7			
	Kontroll- gruppe 4	nein	24	92,3			
		ja	2	7,7			
Sonstige abnorme Befunde bei der bildgebenden Diagnostik des ZNS SP_N <i>n</i> = 120	Fallgruppe	ja	5	20,8	3,385	0,551	4
		nein	19	79,2			
	Kontroll- gruppe 1	ja	3	12,5			
		nein	21	87,5			
	Kontroll- gruppe 2	ja	3	12,5			
		nein	21	87,5			
	Kontroll- gruppe 3	ja	1	4,2			
		nein	23	95,8			
Kontroll- gruppe 4	ja	2	8,3				
	nein	22	91,7				
Kopfschmerz- syndrom und Sonstige abnorme Befunde bei der bildgebenden Diagnostik des ZNS HP_N <i>n</i> = 205	Fallgruppe	ja	4	9,8	10,667	0,027*	4
		nein	37	90,2			
	Kontroll- gruppe 1	ja	0	0,0			
		nein	41	100			
	Kontroll- gruppe 2	ja	0	0,0			
		nein	41	100			
	Kontroll- gruppe 3	ja	0	0,0			
		nein	41	100			
Kontroll- gruppe 4	ja	2	4,9				
	nein	39	95,1				
Tinnitus aurium <i>N</i> = 455	Fallgruppe	ja	20	22,0	13,978	0,007*	4
		nein	71	78,0			
	Kontroll- gruppe 1	ja	11	12,1			
		nein	80	87,9			
	Kontroll- gruppe 2	ja	7	7,7			
		nein	84	92,3			
	Kontroll- gruppe 3	ja	7	7,7			
		nein	84	92,3			

Variable	Kontingenztabelle für Cochran-Q-Test mit absoluten & relativen Zahlen				$\chi^2$	$p$	$df$
	Gruppe	Kategorie	$n$	%			
Tinnitus aurium SP_N $n = 120$	Kontroll- gruppe 4	ja	7	7,7	22,880	0,0001***	4
		nein	84	92,3			
	Fallgruppe	ja	9	37,5			
		nein	15	62,5			
	Kontroll- gruppe 1	ja	3	12,5			
		nein	21	87,5			
	Kontroll- gruppe 2	ja	1	4,2			
		nein	23	95,8			
	Kontroll- gruppe 3	ja	0	0,0			
		nein	24	100			
	Kontroll- gruppe 4	ja	0	0,0			
		nein	24	100			
BWS funktionell nicht regelrecht $N = 455$	Fallgruppe	ja	31	34,1	8,852	0,066	4
		nein	60	65,9			
	Kontroll- gruppe 1	ja	19	20,9			
		nein	72	79,1			
	Kontroll- gruppe 2	ja	18	19,8			
		nein	73	80,2			
	Kontroll- gruppe 3	ja	18	19,8			
		nein	73	80,2			
	Kontroll- gruppe 4	ja	17	18,7			
		nein	74	81,3			

Anmerkung: BWS = Brustwirbelsäule,  $df$  = Freiheitsgrad, HP = Hubschrauberpilot, PP = Propellerpilot, SP = Strahlflugzeugpilot, ZNS = Zentralnervensystem. \*  $p < 0,05$ , \*\*  $p < 0,01$ , \*\*\*  $p < 0,001$ .

## 9.10 Mediationsanalyse in Abhängigkeit von Fluguntauglichkeit

Tabelle A26: Prüfen der Voraussetzungen für Mediationsanalyse der Fall-Kontroll-Studie

Regression	Voraussetzung	gegeben durch
Lineare Regression	Normalverteilung der Residuen	Q-Q-Diagramm: Abbildung A40, Abbildung A41
	Homoskedazität der Residuen	Levene-Test $p = 0,069$
	Unabhängigkeit der Residuen	Durbin-Watson-Test = 1,656
	Keine Ausreißer in den Residuen	Vier Ausreißer entfernt
Logistische Regression	Unabhängigkeit der Residuen	Durbin-Watson-Test = 2,040
	Keine Ausreißer in den Residuen	Werte zwischen -2,710 und 2,577
	Loglinearität metrischer Prädiktor mit der abhängigen Variablen	$p = 0,903$
Sobel-Test	Normalverteilung	Q-Q-Diagramm: Abbildung A42, Abbildung A43

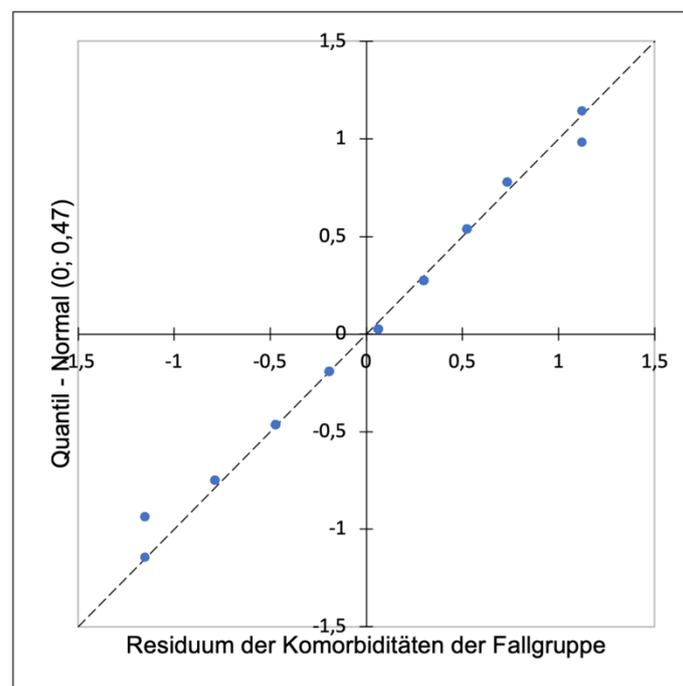


Abbildung A40: Q-Q-Plot über die Prüfung auf Normalverteilung der Residuen der Komorbiditäten (transformiert mittels Exponent 0,6) der Fallgruppe

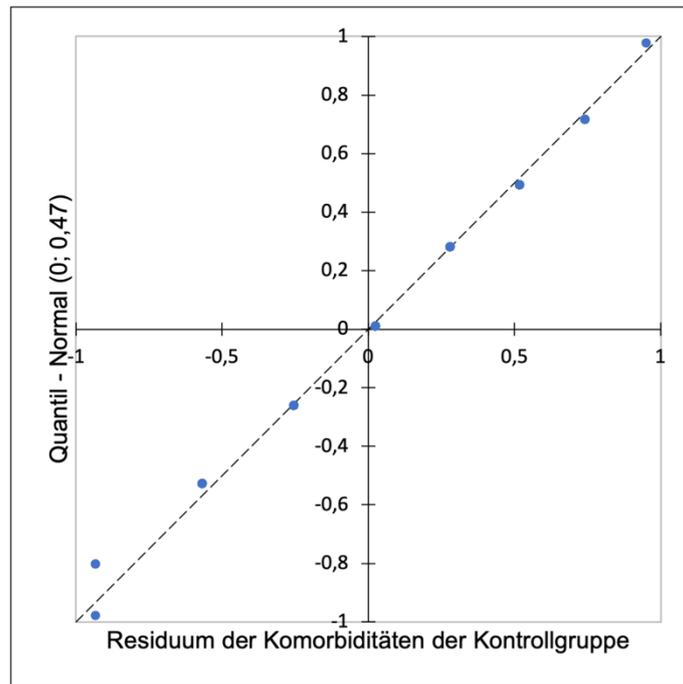


Abbildung A41: Q-Q-Plot über die Prüfung auf Normalverteilung der Residuen der Komorbiditäten (transformiert mittels Exponent 0,6) der Kontrollgruppe

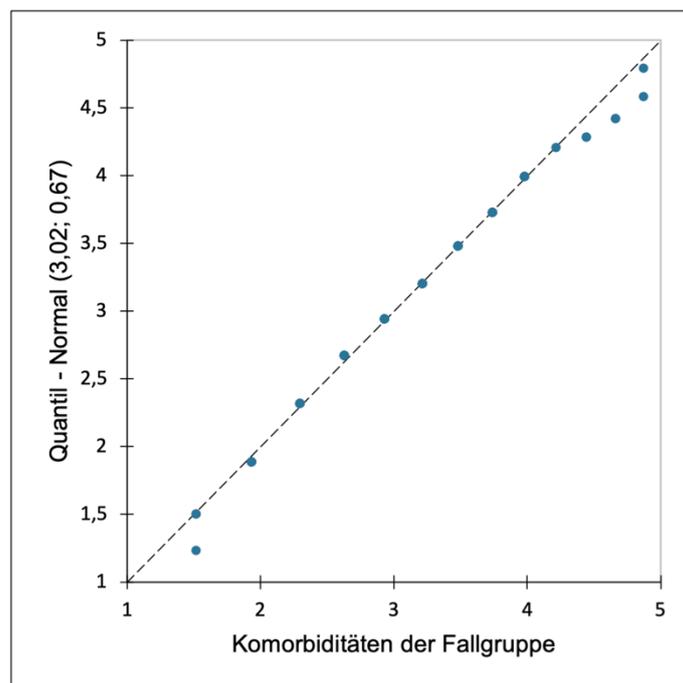


Abbildung A42: Q-Q-Plot über die Prüfung auf Normalverteilung der Komorbiditäten der Fallgruppe

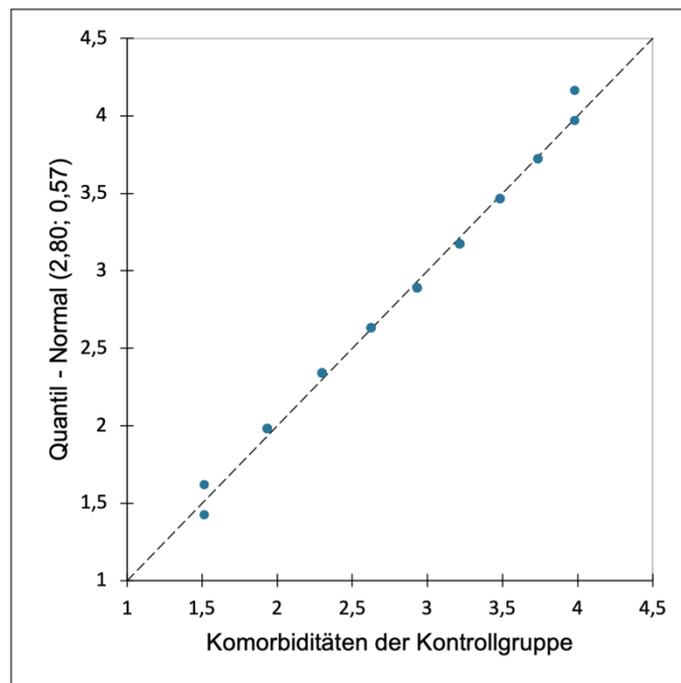


Abbildung A43: Q-Q-Plot über die Prüfung auf Normalverteilung der Komorbiditäten der Kontrollgruppe

Tabelle A27: Mediationsanalyse von Craniomandibulärer Dysfunktion-(CMD)-Erkrankung auf Fluguntauglichkeit über signifikante Komorbiditäten, kontrolliert mit ausgewählten Variablen

Variable	Modell 3 kontrolliert						
	Abhängige Variable Fluguntauglichkeit				95 %-KI für OR		
	<i>B</i>	<i>SEM</i>	<i>Wald</i>	<i>p</i>	<i>OR</i>	Untere Grenze	Obere Grenze
Achsenabschnitt	-4,285	1,566	12,693	0,000***	-	-	-
Komorbiditäten	0,092	0,462	0,040	0,842	1,097	0,443	2,714
CMD	1,579	0,702	5,054	0,025*	4,848	0,052	0,817
Alter	0,048	0,029	2,635	0,105	1,049	0,990	1,111
HP	0,152	0,461	0,109	0,741	1,165	0,348	2,118
PP	-0,158	0,463	0,117	0,732	1,172	0,473	2,903
SP	-0,540	0,455	1,410	0,235	0,583	0,704	4,186

$$R^2 = 0,131, F(6, 172) = 5,054, p = 0,025^*$$

Indirekter Effekt (Sobel-Test):  $c_{(\text{indirekt})} = 0,041, p = 0,843$

Anmerkung: *B* = Regressionskoeffizient, KI = Konfidenzintervall, *OR* = Odds Ratio, *SEM* = Standardfehler des Mittelwerts. \*  $p < 0,05$ , \*\*\*  $p < 0,001$ .

## **10 Lebenslauf**

Der Lebenslauf ist nicht Bestandteil der Veröffentlichung.

## 11 Verzeichnis der akademischen Lehrer

Mein akademischer Lehrer an der Philipps-Universität Marburg war Herr Prof. Dr. Frankenberger.

Meine akademischen Lehrer an der Universität Regensburg waren die Herren und Damen Bräuer, Brühl, Dammer, Gosau, Hahnel, Handel, Hofstädter, Hohenleutner, Ittner, Kurtz, Lang, Legal, Meier, Moralis, Müller, Niller, Proff, Reichert, Schächinger, Schmalz, Tamm, Tschochner, Vollkommer, Waiss, Witzgall und Wolfbeis.

Meine akademischen Lehrer und Kooperationspartner am Zentrum für Luft- und Raumfahrtmedizin der Luftwaffe in Fürstenfeldbruck und Köln waren die Herren Bressemer, Erley, Frischmuth, Groß, Höpner, Jakobs, Noblé, Schick, Sammito und Weber.

## 12 Danksagung

Zuerst gilt mein besonderer Dank meinem Doktorvater, Professor Dr. Roland Frankenberger, zum einen für die Überlassung des Dissertationsthemas und zum anderen für die hervorragende, stets hilfreiche und freundliche Betreuung.

Weiterhin danke ich den Mitarbeitern am Zentrum für Luft- und Raumfahrtmedizin der Luftwaffe; speziell dem Kollegium der IT-Abteilung für die Datenübermittlung, insbesondere Nicki und Timo. Und natürlich danke ich der Forschungsabteilung für den konstruktiven Austausch, ganz besonders Sammy und Frau Geraldine Müller. Zusätzlich möchte ich Frank herzlich dafür danken, dass ich grundsätzliche Fragen schnell und einfach klären konnte.

Mein ganz persönlicher Dank gilt meiner Familie, dafür, dass sie mich in allen Belangen stets unterstützt haben; insbesondere meiner Mutter, die ich jederzeit kontaktieren durfte, um dann im Dialog die Gedankengänge voranzutreiben; meinem Bruder Volkmar, der durch seinen Dokortitel auf dem Gebiet der Luft- und Raumfahrttechnik ein besonderes Verständnis für diese Dissertation hatte und mich stets motivierte, sie zu finalisieren; meinem Bruder Robert, der zu Beginn der Statistikauswertung mir hierfür wichtige Fragestellungen auf den Weg mitgab. Und innigst danke ich meinem Partner Johannes für seine Geduld und Unterstützung in dieser Zeit, die er verstärkt unserem Sohn so liebevoll widmete.

## **13 Ehrenwörtliche Erklärung**

Die ehrenwörtliche Erklärung ist nicht Bestandteil der Veröffentlichung.