

DISSERTATION

EKG-Veränderungen und kardiovaskuläre Anpassungsmechanismen bei jugendlichen Nachwuchsfußballer\*innen im Leistungssport

ECG findings and cardiovascular adaptations in adolescent elite soccer players

zur Erlangung des akademischen Grades  
Doctor medicinae (Dr. med.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät  
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Cyra Crone

Erstbetreuer: Prof. Dr. Bernd Wolfarth

Datum der Promotion: 30.06.2024

## Abstract Deutsch

Die vorliegende Dissertation befasst sich mit den kardiovaskulären Anpassungsmechanismen und Elektrokardiogramm-Veränderungen (EKG-Veränderungen) jugendlicher Fußballspieler\*innen durch das leistungssportliche Training. Es wird der Frage nachgegangen, ob es bei jugendlichen Leistungssportler\*innen zu Veränderungen des EKGs kommt, die mit dem sogenannten *'Athlete's Heart'* erwachsener Athlet\*innen vergleichbar sind.

Die prägnanten Veränderungen jugendlicher Athlet\*innen-EKGs werden zusammengefasst und mit denen nicht leistungssportlich aktiver Erwachsener verglichen. Im Anschluss daran werden die Unterschiede der EKGs leistungssportlich aktiver Jugendlicher zu nicht-leistungssportlich aktiven Jugendlichen herausgearbeitet und diese dann mit dem bei erwachsenen Athlet\*innen untersuchten *'Athlete's Heart'* verglichen.

Anhand einer Stichprobe von 861 jugendlichen Leistungsfußballspieler\*innen im Alter von 8 bis 18 Jahren werden Veränderungen des EKGs untersucht und den bei erwachsenen Athlet\*innen beschriebenen Kategorien *'physiologisch'*, *'borderline'* und *'pathologisch'* zugeordnet. Diese Veränderungen werden mit den Kriterien und Auftretens-Häufigkeiten des sogenannten *'Athlete's Heart'* anhand der in der Literatur gefundenen Veränderungen erwachsener Athlet\*innen verglichen.

Der Einfluss des Alters auf die Häufigkeit des Auftretens der EKG-Veränderungen wird untersucht.

Aktueller Trainingsumfang und Dauer des leistungssportlichen Trainings werden in Zusammenhang mit den Auftretens-Häufigkeiten der EKG-Veränderungen gebracht.

Die vorliegende Untersuchung ergibt, dass die EKG-Veränderungen jugendlicher Athlet\*innen qualitativ in vielen Aspekten denen erwachsener Athlet\*innen gleichen, dass diese jedoch nicht in gleicher Häufigkeit auftreten. Es lassen sich typische wiedererkennbare EKG-Veränderungen, die auf eine Anpassung des Herzens an den Leistungssport zurückzuführen sind, bei den jugendlichen Proband\*innen nachweisen. Das Alter der jugendlichen Athlet\*innen hat nachweisbaren Einfluss auf die Häufigkeit des Auftretens der EKG-Veränderungen. Es lässt sich ein signifikanter Einfluss der Dauer des leistungssportlichen Trainings sowie des aktuellen Trainingsumfangs auf die Auftretens-Häufigkeit der EKG-Veränderungen nachweisen.

## **Abstract English**

This doctoral thesis is about cardiovascular adaptations and ECG findings in adolescent soccer players due to training in competitive sports. The aim is to determine whether ECG findings comparable to the ones described as '*athlete's heart*' for adult athletes can also be found in adolescent athletes.

The ECG findings found in adolescent athletes are specified and compared to the ones found in adult non-athletes. Furthermore, the differences between ECG findings of adolescent athletes compared to adolescent non-athletes are specified and afterwards compared to the ECG findings of adult athletes.

With a sample survey of 861 adolescent athletes enrolled in competitive soccer practice aged between 8 and 18 years ECG findings are examined and afterwards classified as 'physiological findings', 'borderline findings' and 'pathological findings'.

These findings are then compared to the findings and frequencies described for the '*athlete's heart*' in context with adult athletes.

The influence of age and gender on the appearance-frequency of ECG findings are examined. Moreover, a correlation between current level of training as well as the duration of training in competitive sports and the frequency of ECG findings is drawn.

The main findings of this doctoral thesis are that one can detect the same qualitative ECG findings in adolescent athletes described as the '*athlete's heart*' for adult athletes. However, there is a quantitative difference concerning the appearance with which they can be detected. There can be found specific ECG findings in adolescent athletes that can be put down to a cardiac adaptation to intensive physical training.

The age of the adolescent has significant impact on the appearance-frequency of ECG findings. Furthermore, a significant impact of not only the current level of training but also of the duration of training in competitive sports can be shown.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1.</b>	<b>Einleitung</b>	<b>6</b>
1.1	Definitionen	8
1.2	Physiologische Veränderungen des EKGs in der Jugend	9
1.3	EKG-Veränderungen von jugendlichen Leistungssportler*innen im Vergleich zu nichtleistungssportlich-aktiven Jugendlichen	14
1.4	Vergleich der Veränderungen jugendlicher Leistungssportler*innen-EKGs mit dem ‘Athlete’s Heart’ erwachsener Athlet*innen	18
1.5	Einfluss des aktuellen Trainingsumfangs und der Dauer des Leistungssportlichen Trainings auf das Auftreten von EKG-Veränderungen bei jugendlichen Athlet*innen	20
1.6	Einfluss des Alters auf das Auftreten von EKG-Veränderungen bei jugendlichen Athlet*innen	20
1.7	Forschungsfrage und Hypothesen	22
<b>2.</b>	<b>Material und Methoden</b>	<b>24</b>
2.1	Datenerhebung	24
2.2	Stichprobe	25
2.2.1	Gesamtstichprobe	25
2.2.2	Einteilung der Stichprobe in Gruppen	27
2.2.3	Stichprobencharakteristika der einzelnen Versuchspersonengruppen	28
2.3	Datenauswertung	29
2.4	Statistische Analyse	32
<b>3.</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>34</b>
3.1	Häufigkeit des Auftretens der ‘Athlete’s Heart’ typischen EKG Veränderungen bei den jugendlichen Proband*innen	34
3.2	Vergleich der Auftretens-Häufigkeiten der EKG-Veränderungen der jugendlichen Proband*innen mit den in der Literatur gefundenen Werten bei erwachsenen Athlet*innen	43
3.3	Vergleich der Auftretens-Häufigkeiten der EKG-Veränderungen zwischen der Gruppe der 8-12 Jährigen und der Gruppe der 13-18 Jährigen	46
3.4	Zusammenhang zwischen aktuellem Trainingsumfang sowie der Dauer des leistungssportlichen Trainings und dem Auftreten von EKG-Veränderungen bei jugendlichen Athlet*innen	48
<b>4.</b>	<b>Diskussion</b>	<b>50</b>
4.1	Auftreten Athlete’s Heart typischer EKG-Veränderungen bei jugendlichen Athlet*innen	50
4.2	Unterschiede der Auftretens-Häufigkeiten sportinduzierter EKG-Veränderungen zwischen erwachsenen und jugendlichen Athlet*innen	51
4.3	Der Einfluss des Alters jugendlicher Athlet*innen auf das Auftreten sportinduzierter EKG-Veränderungen	53
4.4	Der Einfluss des Alters auf geschlechtsspezifische Häufigkeitsunterschiede beim Auftreten sportinduzierter EKG-Veränderungen	54
4.5	Der Zusammenhang zwischen aktuellem Trainingsumfang und dem Auftreten von sportinduzierten EKG-Veränderungen	55
4.6	Der Zusammenhang zwischen Dauer des leistungssportlichen Trainings und dem Auftreten von sportinduzierten EKG-Veränderungen	56
4.7	Klinischer Bezug	57
4.8	Limitationen	59

<b>5. Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>61</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>62</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>66</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>67</b>
<b>Anhang .....</b>	<b>68</b>

## 1. Einleitung

Als *'Athlete's Heart'* ('Sportlerherz') bezeichnet man die physiologischen Anpassungen des Herzens und des kardiovaskulären Systems auf intensives körperliches Training (vgl. Park und Crawford, 1985 (1)). Diese Bezeichnung wurde 1899 von Salomon Eberhard Henschen eingeführt. Er entdeckte bei Skilangläufer\*innen Veränderungen des Herzens, die sich auf ein vermehrtes Ausdauertraining zurückführen ließen (2). Henschen stellte fest, dass intensives Skilanglauftraining mit einer Vergrößerung des Herzens einhergeht. Außerdem konnte er nachweisen, dass Athlet\*innen mit größerem Herzmuskel körperlich leistungsfähiger waren. Er benannte die physiologische Vergrößerung des Herzmuskels als Anpassung auf körperliches Training als *"Athlete's Heart"* (2).

Seitdem war die Erforschung der Veränderungen und Anpassungsmechanismen des Herzens auf die vermehrte Belastung bei intensivem Ausdauertraining Gegenstand vieler Studien und mehr und mehr wurden für erwachsene Athlet\*innen genau definierte Leitlinien herausgearbeitet, die die EKG-Veränderungen des seither als *'Athlete's heart syndrome'* bekannten Bildes der Herzanpassung aufzeigen. Zu diesen Anpassungen zählen:

“[...] Vergrößerung von Herzvorhöfen u. -kammern sowie Verdickung der Herzwände mit Erhöhung der Leistungsfähigkeit des Herzens (maximale Auswurfleistung des untrainierten Herzens 20 l/min, bei Hochausdauertrainierten über 40 l/min); [...] Abnahme der Herzfrequenz in Ruhe (extreme Ruhebradykardien bis ca. 30/min) u. auf submaximalen Belastungsstufen, Vergrößerung des Schlagvolumens, [und] Verlängerung der Diastolendauer, [...]“ (3).

Diese Anpassungen gehen mit Veränderungen des EKGs einher, die obwohl sie sich von dem EKG eines Nicht-Athleten/einer Nicht-Athletin unterscheiden, zum Teil physiologische Anpassungen an die körperliche Belastung darstellen und keine Gefahr für den/die Sportler\*in mit sich bringen (4). Andererseits kommen aber auch bei Sportler\*innen EKG-Veränderungen vor, die pathologischen Wert haben und weiterer kardiologischer Abklärung bedürfen. An dieser Stelle soll darauf hingewiesen sein, dass derartige Anpassungsmechanismen nicht bei jedem\*r Sportler\*in ausgebildet werden können und der Grad der Anpassung abhängig von der Sportart ist, in der der/die Athlet\*in trainiert. In verschiedenen Studien wurde festgestellt, dass je höher der Anteil des Ausdauertrainings in der jeweiligen Sportart ist, umso wahrscheinlicher die Ausbildung eines *'Athlete's heart'* ist. Besonders häufig sind daher *'Athlete's heart'* typische Herzveränderungen in Sportarten wie Skilanglauf, Rudern, Marathonlauf oder Triathlon zu finden (5-9).

---

Für die Einschätzung von Sportler\*innen-EKGs bedarf es daher spezifischer angepasster Richtlinien und Normwerte. Diese wurden für die erwachsenen Athlet\*innen mit Hilfe zahlreicher Studien fortlaufend weiterentwickelt. 2012 erschienen die *Seattle Criteria* (10) und legten internationale Normwerte für die Auswertung der EKGs von erwachsenen Leistungssportler\*innen fest. Hierbei handelt es sich um das Ergebnis der gemeinsamen Re-Analyse vorliegender EKGs durch eine Gruppe von Kardiolog\*innen und Sportmediziner\*innen der *American Medical Society for Sports Medicine*. Auch die *European Society of Cardiology* veröffentlichte 2010 mit ihren 'Recommendations for interpretation of 12-lead electrocardiogram in the athlete' (11) eigene Auswertungs-Richtlinien. 2018 wurden die Seattle Criteria erneut überarbeitet und von Sharma et al. (12) veröffentlicht. Diese Richtlinien erleichterten vor allem Ärzt\*innen anderer Fachdisziplinen die erste Einschätzung der Sportler\*innen-EKGs. Es konnte nachgewiesen werden, dass durch die Anwendung derartiger standardisierter Kriterien die Genauigkeit, mit der physiologische von pathologischen Veränderungen unterschieden werden, signifikant erhöht wird (13).

Will man eine Einschätzung jugendlicher EKGs vornehmen, kann man bislang noch nicht auf derartige Standards zurückgreifen, da sich die Referenzwerte für Erwachsene nicht einfach auf Jugendliche übertragen lassen. Derzeit ist die Anzahl repräsentativer Studien Jugendlicher noch sehr begrenzt und die Ergebnisse teils widersprüchlich. Gerade für diese Altersgruppe ist eine fundierte Kenntnis von großer Wichtigkeit; die Beurteilung des EKGs und die korrekte Diagnostik liefert die Grundlage für die Sporttauglichkeitseinschätzung des\*r betreuenden Arztes/Ärztin und kann Einfluss auf die weitere Lebens- und Karriereplanung des\*r jugendlichen Sportler\*in haben. Bei jugendlichen Athlet\*innen mangelt es insgesamt an repräsentativen Studien, die ausschließlich die jugendliche Altersspanne untersuchen. Die internationalen Leitlinien wurden für asymptotische Athlet\*innen im Alter von 12-35 Jahren erarbeitet (12). Auch die meisten anderen Studien schließen in ihre Untersuchungen zu jugendlichen Athlet\*innen einen großen Anteil erwachsener Proband\*innen mit ein, der eindeutige Aussagen über den jugendlichen Stichprobenanteil erschwert (14, 15). 2019 veröffentlichten Calò et al. (16) eine erste Studie mit einer ausschließlich jugendlichen Stichprobe (mittleres Alter der Proband\*innen  $12,4 \pm 2,6$  Jahre); die Untersucher\*innen konnten auf die Daten des in Italien seit 1982 obligatorischen Sporttauglichkeitsscreenings zurückgreifen und dadurch die EKG-Daten von 2.261 jugendlichen Athlet\*innen auswerten. Allerdings stand bei ihren Untersuchungen vor allem das Auffinden nicht-trainingsbedingter, pathologischer Herzveränderungen und die Untersuchung des EKGs im Vergleich zur Echokardiographie als Screening-tool im Vordergrund. Sie konnten feststellen, dass mittels EKG alle Athlet\*innen identifiziert werden konnten, denen

---

von der weiteren Ausübung des Leitungssports abgeraten werden musste. Das EKG stellt folglich eine hochspezifische Untersuchungsmethode für das Auffinden von Herzfehlern beim Sporttauglichkeitsscreening jugendlicher Athlet\*innen dar. In einigen Studien konnte nachgewiesen werden, dass durch die eindeutige Zuordnung und Einschätzung der Veränderungen klinische Spätfolgen durch unangemessene Belastung verhindert werden können - unerkannt können sie zu kardialen Ereignissen führen (z.B. Plötzlicher Herztod ‚*sudden cardiac arrest*‘) (17, 18). Dass aber selbst durch ein Sporttauglichkeitsscreening nicht alle Sportler\*innen, die Herzpathologien aufweisen, erkannt werden können, zeigt die Studie von Malhotra et al. aus dem Jahr 2018 (19).

Das Ziel der vorliegenden Untersuchung ist, trainingsbedingte EKG-Veränderungen bei jugendlichen Sportler\*innen genauer zu untersuchen. Hierzu wird zunächst darauf eingegangen, wie sich physiologische EKGs nicht-leistungssportlich-aktiver Jugendlicher von denen nicht-leistungssportlich-aktiver Erwachsener unterscheiden. Diese physiologischen EKGs Jugendlicher werden den EKGs leistungssportlich-aktiver Jugendlicher gegenübergestellt.

Anhand einer Stichprobe von 861 jugendlichen Leistungsfußballspieler\*innen im Alter von 8 bis 18 Jahren werden Veränderungen des EKGs untersucht und den Kategorien ‘physiologisch’, ‘borderline’ und ‘pathologisch’ zugeordnet. Diese Veränderungen werden mit den Kriterien und Auftretens-Häufigkeiten des sogenannten ‘*Athlete’s Heart*’ erwachsener Athlet\*innen verglichen. Der Einfluss des Alters und Geschlechts auf die Häufigkeit des Auftretens der EKG-Veränderungen werden untersucht. Aktueller Trainingsumfang und Dauer des leistungssportlichen Trainings werden in Zusammenhang mit den Auftretens-Häufigkeiten der EKG-Veränderungen gebracht.

## 1.1 Definitionen

Bei der Definition des Begriffs ‘**Adoleszenz**’ soll orientierend das klinische Wörterbuch hinzugezogen werden, welches die Adoleszenz definiert als “[...] zeitlich nicht einheitlich definierter Lebensabschnitt zw. (Beginn od. Ende) der Pubertät u. dem Erwachsenenalter.“ ((20), S. 21) ”Die Pubertät beginnt mit Veränderungen an den Genitalien und mit dem Auftreten sekundärer Geschlechtsmerkmale [...], sie endet mit dem Abschluss des körperlichen Wachstums. Dies ist beim Jungen mit ca. 18 Jahren, beim Mädchen mit ca. 16 Jahren der Fall.“ ((21), S. 40).



Die Definition des Begriffs 'Athlet\*in' soll im Sinne von Maron et al. (2005) übernommen werden: Jemand, der eine Individual- oder Mannschaftssportart ausübt, die regelmäßige Wettkämpfe als zentrale Komponente beinhaltet, einen hohen Wert auf Spitzenleistungen und Erregenschaften legt und systematisches sowie intensives Training erfordert (22). Der Begriff ‚**Leistungssportler\*in**‘ wird in der folgenden Darstellung synonym verwendet.

Der Begriff ‚**Plötzlicher Herztod**‘ wird definiert als plötzlicher, unvorhersehbarer Tod eines bis dato für gesund gehaltenen Individuums, der in Zusammenhang mit Sport während oder kurz nach intensiver körperlicher Aktivität auftreten kann (in diesem Fall kann auch von sportassoziiertem Plötzlichem Herztod gesprochen werden. Die Zeitintervalle variieren hierbei von Beginn bis hin zu 24h nach der körperlichen Belastung) (23).

Bezogen auf diese Untersuchung wird die gesamte Stichprobe als jugendlich bezeichnet. Dieser Begriff wird verstanden als nicht einheitlich definierter Zeitraum zwischen Kindes- und Erwachsenenalter. Dieser Altersabschnitt beinhaltet sowohl Subgruppe 1 (8-12jährige Proband\*innen) als auch Subgruppe 2 (13-18jährige Proband\*innen).

## **1.2 Physiologische Veränderungen des EKGs in der Jugend**

Die Normwerte für die Amplituden und Zeitintervalle des EKGs sind neben dem vegetativen Einfluss abhängig von der Muskelmasse des Organs, der Leitungsgeschwindigkeit und der Organgröße; sie verändern sich deshalb im Verlauf der Entwicklung. Während der Kindheit und Jugend verändert sich das EKG vom rechtsdominanten kindlichen Typ zum typischen erwachsenen Indifferenztyp am Ende der Pubertät (24).

Die Normwerte für Erwachsene sind daher nicht einfach auf die Auswertung jugendlicher EKGs zu übertragen.

Zur Auswertung des EKGs werden die einzelnen Zeitintervalle meist in der Ableitung II (nach Einthoven Ableitung vom rechten Arm zum linken Bein) betrachtet. Im Folgenden wird auf die physiologischen Veränderungen der einzelnen EKG-Zeitintervalle im Jugendalter eingegangen. Da es sich hierbei um das Alter zwischen Kindheit und Erwachsenenalter handelt, werden zur Erleichterung der Einschätzung des jugendlichen EKGs in seinem Entwicklungsspektrum in diesen Ausführungen vergleichend die Werte der erwachsenen- und der kindlichen EKGs angegeben. Außerdem werden an dieser Stelle Hinweise auf wichtige pathologische Veränderungen vermerken, die für die Zielgruppe der folgenden Untersuchung relevant sind.

Die Darstellung bezieht sich auf Lindinger und Paul (25), Dickinson (26) sowie Rijnbeek (27). Die Ergebnisse der Recherche werden in Tabelle 1 zusammengefasst.

**Tabelle 1: Übersicht der in der Literaturrecherche berichteten EKG-Veränderungen**

Die Angaben zu leistungssportlich-aktiven Jugendlichen, nicht-leistungssportlich-aktiven Jugendlichen und leistungssportlich-aktiven Erwachsenen fassen die in Kap. 1.2 dargestellten Daten zusammen. Die Angaben zu nicht-leistungssportlich-aktiven Erwachsenen sind dem Lehrbuch von Klinge und Klinge, 1989 ((28), erste innere Umschlagseite) entnommen.

EKG-Veränderung	Jugendliche*r Nicht-Athlet*in	Jugendliche*r Athlet*in	Erwachsene*r Nicht-Athlet*in	Erwachsene*r Athlet*in
Herzfrequenz (s/min)	66-120		60-100	
P-Welle Amplitude (mV)	0,3		0,1-0,3	
P-Welle Breite (ms)	100		50-100	
PQ-Intervall (ms)	92-175		130-200	
QRS-Komplex (ms)	90-110		110	
QRS-Komplex-Achse	11° bis 133°		-30° bis +105°	
ST-Strecke	frühes Repolarisations-syndrom			
T-Welle	Gelegentlich in V1 negativ			
QTc (ms)	Bis 15 max 440; ab 15 Geschlechtsunterschiede: m. 340-430, w. 340-450		260-400	
PR-Intervall (ms)	180	148		169 ± 28
AV-Block Typ 1 und 2 Typ 1 (%)	0,4 (andere Angaben 10)	2,2 (andere Angaben 20)		35 bzw. 10
Extrasystolen (%)	Bis 40	50		k.A.
Sinusbradykardie <30/min (%)	19,2	37,4		54
Inkompletter Rechtsschenkelblock (%)	7,8	25,8		35-50
Linksherzhypertrophie (%)	24,1	35,2		80
Frühe Repolarisation (%)	29,2	37,1		50-80
Tiefe T-Wellen Inversion (%)	0,3	6,7		

Tabelle 1. (s/min= Schläge pro Minute; QTc= frequenzkorrigierte QT-berechnet nach der Bazett Formel)

### Herzfrequenz

Die Herzfrequenz steigt nach der Geburt zunächst bis zum 1.-3. Lebensmonat an. Sie beträgt im Mittelwert 122/min bei Geburt (Rijnbeek gibt als Mittelwert 160/min an) und steigt dann auf Werte zwischen 120-179/min im Alter von 1-3 Monaten.

Danach sinkt die Herzfrequenz mit zunehmendem Alter, bis sie bei 12- bis 16 Jährigen Normwerte zwischen 66-120/min annimmt. Bei Erwachsenen erwartet man Werte zwischen 60-100/min.

### P-Welle

Die P-Welle zeigt die Erregungsausbreitung über die beiden Vorhöfe. Normwerte für die P-Wellen-Amplitude und -Breite sind altersunabhängig und liegen bei 0,3mV und 100ms in Ableitung II. Rijnbeek beschreibt ebenfalls die Altersunabhängigkeit der P-Welle in II und V1, konnte aber feststellen, dass die Amplitude der P-Welle in V2 mit dem Alter graduell abnimmt (Median im Alter von 0-1 Monat=0,15mV in V2 und im Alter von 12-16 Jahren=0,1mV) (27). Außerdem verändert sich die P-Welle bei Belastung der Vorhöfe, was sich in einer veränderten Amplitude manifestiert.

### PQ-Intervall

Es handelt sich um das Intervall vom Beginn der P-Welle bis zum Beginn des Kammerkomplexes, welches die Erregungsausbreitung der Vorhöfe, des AV-Knotens und des His-Bündels umfasst. Die PQ-Zeit ist altersabhängig und verkürzt sich bei Zunahme der Herzfrequenz in physiologischer Weise. Bei Neugeborenen (<1Tag) liegen die Normwerte bei 79-160ms. Dann sinken die Referenzbereiche mit zunehmender Herzfrequenz bis zum Alter von 3-6 Monaten. Daraufhin nimmt die Herzfrequenz kontinuierlich ab und die PQ-Zeit steigt korrelierend an (1-3 Jahre: 82-148ms und 12-16 Jahre: 92-175ms). Bei Erwachsenen werden Werte zwischen 130 und 210ms als physiologisch erachtet.

Bei der Auswertung des PQ-Intervalls ist besonders das Ausschließen einer ventrikulären Präexzitation von großer Wichtigkeit. Hierbei kommt es zu verkürztem PQ-Intervall mit verbreitertem QRS-Komplex.

### Q-Zacke

Die Q-Zacke spiegelt die initiale Kammererregung wieder und ist am deutlichsten in den Ableitungen mit deutlich positiver R-Zacke zu erkennen (z.B. Ableitung III oder V1). Die Referenzwerte liegen bei 15ms mit einer Amplitude von 0,2-0,3mV – dies gilt auch für Jugendliche. Im Alter von 3-5 Jahren verdoppelt sich meist die Amplitude der Q-Zacke, um danach wieder auf die Referenzwerte kurz nach der Geburt zurückzugehen. Daher fallen Q-Amplituden von 0,6-0,8mV in die physiologischen Referenzwerte von Kindern im Alter zwischen sechs Monaten und drei Jahren (26). Hierbei muss beachtet werden, dass die Q-Zacke in Ableitung III nie

eine Amplitude haben sollte, die höher als  $\frac{1}{4}$  der höchsten R-Zacke in den Extremitäten-Ableitungen beträgt.

### QRS-Komplex

Der QRS-Komplex entspricht der Erregungsausbreitung in den Kammern. Die Breite des QRS-Komplexes ist altersabhängig. "Die maximale normale QRS-Breite im Kindesalter bis zum 16. Lebensjahr beträgt 100 ms" ((25), S.30). Die normalen Werte des QRS-Komplexes liegen bei Neonaten zwischen 70-85ms und in der Jugend bei 90-110ms (27). Die Zunahme der Breite des QRS-Komplexes mit dem Alter hängt ebenfalls mit der physiologisch altersbedingten Abnahme der Herzfrequenz zusammen.

Kurz nach der Geburt ist die QRS-Achse mit 55-168 Grad am steilsten, verursacht durch die relative rechtsventrikuläre Hypertrophie des Neugeborenen (26).

Mit dem Alter nimmt die QRS-Achse an Steilheit eher ab und beträgt in der Jugend bei 8- bis 12 Jährigen zwischen 9-115 Grad und im Alter von 12-16 Jahren 11-133 Grad. Im Erwachsenenalter rechnet man mit Werten von 110ms bei einer Achse zwischen -30 und +105 Grad.

### ST-Strecke

Die ST-Strecke beschreibt das Intervall von J-Punkt (Übergang S-Zacke in die ST-Strecke) bis zum Beginn der T-Welle. Während dieser Phase sind die beiden Kammern vollständig depolarisiert. "Hebungen oder Senkungen von ST bis zu 0,1mV über bzw. unter das Niveau der TP-Strecke können im Kindesalter in allen Ableitungen vorkommen" ((25), S.31).

Als Besonderheit sollte an dieser Stelle das sogenannte 'frühe Repolarisationssyndrom' aufgeführt werden, was in der Jugend auftreten kann. Es zeichnet sich durch eine J-Punkt-Anhebung von 0,1mV bis max. 0,2mV und damit verbundener ST-Hebung in den Ableitungen V3-V4 aus. Meist sind die Veränderungen mit einer hohen T-Welle verbunden und normalisieren sich bei Belastungstests.

### T-Welle

Die T-Welle steht für die Rückbildung der Erregung in den Kammern. Die T-Wellen-Morphologie ändert sich mit dem Lebensalter stark und unterscheidet sich bei Kindern und Erwachsenen sehr: "In der 1. Lebenswoche kann die T-Wellen-Morphologie sehr variabel sein. Danach sollte die T-Welle jedoch in V1 negativ und in (V5-)V6 positiv sein. Bei Säuglingen und Kleinkindern darf die T-Welle noch in V1-V5 negativ sein. Mit zunehmendem Lebensalter verschiebt sich die T-Wellen-Inversion nach rechtspräkordial; bei Jugendlichen ist gelegentlich

noch die T-Welle in V1 negativ. Ansonsten sollten sich die T-Wellen in den Brustwandableitungen konkordant zu den R-Amplituden verhalten.“ ((25), S.32)

Im Erwachsenenalter kann eine T-Wellen-Inversion Hinweis auf eine Ischämie, eine Peri- oder Myokarditis oder eine hypertrophe Kardiomyopathie sein.

Überhöhte T-Wellen kommen bei Volumenhypertrophie oder Bradykardie aber auch bei starkem Vagotonus ('vagotones T') vor.

Außerdem kann eine hohe, spitze T-Welle Hinweis auf einen Infarkt geben (sog. 'Erstickungs T'), kommt aber auch bei Hyperkaliämien  $> 7$  mmol/l vor.

### QT-Intervall

Das QT-Intervall umfasst sowohl Depolarisation als auch Repolarisation der Kammern und wird vom Beginn der Q-Zacke bis zum Ende der T-Welle gemessen. Da höhere Herzfrequenzen zur Verkürzung der QT-Zeit führen, wird heutzutage meist die sogenannte frequenzkorrigierte QT-Zeit (QTc) mit Hilfe der Formel von Bazett berechnet. Allerdings ist sie nur bei Herzfrequenzen zwischen 60-100/min adäquat anzuwenden, bei abweichenden Frequenzen muss man auf andere Formeln zurückgreifen.

Die QTc ist altersabhängig; in der ersten Lebenswoche liegt der mittlere Normwert der QTc bei  $397 \pm 15$  ms. Im zweiten Lebensmonat besteht eine physiologische QT-Zeit-Verlängerung mit Werten um  $409 \pm 15$  ms, die sich dann bis zum sechsten Lebensmonat wieder normalisiert und auf die Werte der ersten Lebenswoche zurückkehrt. In der Jugend liegt der obere Normwert der QTc bis zum 15. Lebensjahr bei 440 ms. Nach dem 15. Lebensjahr finden sich geschlechtsspezifische Unterschiede: für Frauen gilt 340 ms als unterer Normwert und 450 ms als oberer Normwert, für Männer gleicht der untere Normwert dem von Frauen (340 ms), aber der obere Normwert liegt mit 430 ms etwas unter dem für Frauen.

### P-Wellen-Morphologie und PR-Intervall

Das PR-Intervall des EKGs von Kindern variiert je nach Herzfrequenz und ist daher meist bei jüngeren Kindern kürzer. Bei Kindern mit Herzfrequenzen zwischen 100-150/min erwartet man PR-Intervalle zwischen 80-110 ms. Da Jugendliche eine langsamere Herzfrequenz haben, ist hier der obere Referenzwert des PR-Intervalls auf 180 ms festgelegt.

Außerdem können bei ca. 10% der Kinder physiologischer Weise AV-Blocks ersten und zweiten Grades (Typ Wenckebach) vorkommen.

### Extrasystolen

Extrasystolen finden sich ohne Krankheitswert häufig in kindlichen EKGs. Sie kommen bei 20-30% der Kinder und bei männlichen Jugendlichen sogar bei bis zu 40% vor. Dennoch sollten derartige Extrasystolen nicht öfter als 1-5 mal pro Stunde auftreten. Man unterscheidet zwischen supraventrikulären und ventrikulären Extrasystolen. Supraventrikuläre Extrasystolen kommen bei Säuglingen und Neugeborenen häufig vor, ohne Krankheitswert sind sie meist die Folge eines mobilen Vorhofseptums. Sie verschwinden häufig im Verlauf des 1. Lebensjahres spontan. Bei ventrikulären Extrasystolen unterscheidet man zwischen idiopathischen ventrikulären Extrasystolen (isolierte uniforme ventrikuläre Extrasystolen) und multiformen ventrikulären Extrasystolen. Bei der Vielzahl der idiopathischen ventrikulären Extrasystolen kommt es im Jugendalter zum Sistieren der ventrikulären Ektopie; es besteht daher keine Therapieindikation. Multiforme ventrikuläre Extrasystolen dagegen bedürfen weiterer kardiologischer Abklärung. Gleiches trifft bei einer Zunahme der ventrikulären Extrasystolen unter Belastung zu.

**Zusammenfassend** lässt sich feststellen, dass sich in der Altersgruppe der Jugendlichen folgende Besonderheiten feststellen lassen, die sowohl durch das zunehmende körperliche Wachstum als auch durch Veränderungen des Hormonspiegels (Sexualhormonproduktion) während der Pubertät verursacht werden könnten:

Die Herzfrequenz nimmt ab und geht mit einer kontinuierlichen Zunahme der Dauer der P-Welle, des PQ-Intervalls und des QRS-Komplexes einher. Die QRS-Achse nimmt mit zunehmendem Alter an Steilheit ab. Nach der Pubertät kommt es zu Geschlechtsunterschieden bei den Normwerten des QT-Intervalls, die Rijnbeek 2001 neben der Änderung des Hormonhaushaltes auch auf eine Veränderung im Fettanteil des Brustgewebes zurückführt (27)). Außerdem müssen bei der Auswertung der EKGs Jugendlicher und auch teilweise bei denen von Kindern Besonderheiten bei der Beurteilung der T-Wellen-Morphologie und der ST-Strecke beachtet werden.

### **1.3 EKG-Veränderungen von jugendlichen Leistungssportler\*innen im Vergleich zu nicht-leistungssportlich-aktiven Jugendlichen**

Wie oben dargestellt unterscheiden sich die EKGs Jugendlicher von denen Erwachsener in einigen Aspekten. Entsprechend unterscheiden sich auch die EKGs leistungssportlich-aktiver Jugendlicher von denen erwachsener Athlet\*innen.

Im Folgenden soll aus der Literatur herausgearbeitet werden welche EKG-Veränderungen bislang bei jugendlichen Leistungssportler\*innen im Vergleich zu nicht-leistungssportlich-aktiven Jugendlichen beschrieben und in Studien belegt wurden. Die Studienergebnisse und Einschätzungen der Veränderungen und auch die Existenz eines jugendlichen ‘*Athlete’s Heart*’ differieren von Studie zu Studie stark. Hierfür wären folgende Gründe möglich:

Zunächst muss darauf hingewiesen werden, dass mehrere Studien keine signifikanten Ergebnisse erzielen konnten. Das liegt einerseits daran, dass viele Studien entweder sehr kleine Stichproben untersuchen, zum Beispiel arbeiten Rowland et al. 1994 in ihrer Studie ‘*Clinical Manifestations of the ‘Athlete’s Heart’ in Prepubertal Male Runners*’ (29) mit nur zehn Jugendlichen, in einer anderen Studie arbeiten sie mit einer Stichprobe von 37 (30). Zum anderen wurden in Studien die Altersspannen der untersuchten Gruppen sehr groß gewählt, sodass keine zuverlässigen Aussagen über den Anteil der Jugendlichen in der Stichprobe getroffen werden können; so fassen beispielsweise Jordan Huttin et al. 2018 (‘*Electrocardiographic patterns and long-term training-induced time changes in 2484 elite football players*’ (14)) die Veränderungen der EKGs von Athlet\*innen im Alter von 12-35 Jahren zusammen. Die repräsentativen und aussagekräftigen Studien ausschließlich für die jugendliche Zielgruppe sind also von begrenzter Anzahl.

Daher beruft sich die folgende Darstellung vor allem auf die Metaanalyse von McClean et al. 2018 (31). In diese Analyse flossen die Daten von 14.278 Athlet\*innen ein. Es wurden nur Studien in die Metaanalyse aufgenommen, die folgende Kriterien erfüllten:

1. Daten männlicher/weiblicher Athlet\*innen mit oder ohne Vergleichsgruppe
2. Athlet\*innenalter 6-18 Jahre
3. In englischer Sprache publizierte Originalartikel.

Ausschlusskriterien waren:

1. Fehlende eindeutige Altersangaben der Proband\*innen - um auszuschliessen, dass Proband\*innen über 18 in der Studie berücksichtigt wurden
2. Studien ohne explizite Angabe über die EKG-Daten und
3. Studien mit mangelnder oder fehlender Angabe über die Datengenerierung.

Von 1.981 Studien wurden somit 40 für die quantitative Analyse berücksichtigt und 43 für die qualitative Analyse. Des Weiteren wird die Studie von Pentikäinen et al. (32) vergleichend aufgeführt, der 410 Athlet\*innen zwischen 14-16 Jahren untersuchte.

Folgende Unterschiede werden beschrieben:

### Herzfrequenz

Sinusbradykardie  $\geq 30$ /min kommt bei 37,4% der jugendlichen Leistungssportler\*innen vor und ist damit sehr viel häufiger vorzufinden als bei Nicht-Athlet\*innen (19,2%). Bei Pentikäinen et al. kam die Sinusbradykardie mit 52,7% ebenfalls signifikant häufiger bei Athlet\*innen vor als bei Nichtathlet\*innen (28,0%).

### PR-Intervall

Das PR-Intervall ist durch die niedrigere Herzfrequenz bei Athlet\*innen physiologisch länger als das der Nicht-Athlet\*innen und beträgt meist 148ms, wohingegen der Durchschnittswert der Nicht-Athlet\*innen bei 139ms liegt. Pentikäinen et al gibt für junge Athlet\*innen Werte von 150,6ms und für junge Nichtathlet\*innen 146,2ms an.

Außerdem finden sich bei jugendlichen Athlet\*innen häufiger als bei nicht-leistungssportlich-aktiven Jugendlichen Veränderungen des PR-Intervalls. Hier kommen Grad 1 AV-Blocks und Grad 2 AV-Blocks Typ Wenckebach bei bis zu 20% vor (26). In anderen Quellen wurden AV-Blockierungen allerdings nur bei bis zu 2,2% der Athlet\*innen nachgewiesen (31) (in diesen Studien werden auch für die Nicht-Athlet\*innen mit 0,4% deutlich geringere Werte angegeben als in den meisten anderen Untersuchungen).

Durch den verstärkten Vagotonus bei leistungssportlich-aktiven Jugendlichen kann es zu physiologisch auftretenden Ersatzrhythmen kommen. Diese entstehen durch eine Suppression des Sinusknotens, sodass das nächst untergeordnete Reizbildungszentrum einen Ersatzrhythmus vorgibt. Während beim Vorhofersatzrhythmus noch P-Wellen vor den QRS-Komplexen im EKG des\*r Sportler\*in erkennbar sind, ist dies beim junktionalen Ersatzrhythmus nicht der Fall. Bei Vorliegen eines ventrikulären Ersatzrhythmus finden sich ebenfalls keine P-Wellen vor den QRS-Komplexen. Zudem sind hier die QRS-Komplexe verbreitert.

Wandernde Vorhofsrittmacher sowie obere, mittlere und untere AV-Ersatzrhythmen finden sich bei jugendlichen Athlet\*innen physiologischer Weise vor allem im Langzeit-EKG während der Schlafphasen (33).

### Extrasystolen

Bei älteren Jugendlichen, die sportlich sehr aktiv sind, treten Extrasystolen bis zu 50% häufiger auf als bei nicht-leistungssportlich-aktiven (26); in den Studien wird grundsätzlich nicht zwischen ventrikulären und supraventrikulären Extrasystolen unterschieden.



### Inkompletter Rechtsschenkelblock (iRSB)

Bei Athlet\*innen ist vermehrt der sogenannte inkomplette Rechtsschenkelblock vorzufinden. EKG-Kriterien hierfür sind in den EKGs von 25,8% der Athlet\*innen zu finden. In den EKGs der Nicht-Athlet\*innen konnte man die typischen Veränderungen nur bei 7,8% nachweisen.

### Linksherzhypertrophie

Darüber hinaus sind in EKGs von Athlet\*innen vermehrt die Sokolow-Lyon Kriterien für Linksherzhypertrophie vorzufinden (SV1 oder 2+RV5 oder  $6 \geq 3,5\text{mV}$ ). Im Vergleich zu Nicht-Athlet\*innen (24,1%) waren die typischen Kriterien in 35,2% der Athlet\*innen-EKGs feststellbar. Pentikäinen et al. konnte die Kriterien für Linksherzhypertrophie bei 15,4% der jugendlichen Athlet\*innen sowie 8,5% der jugendlichen Nichtathlet\*innen nachweisen.

### Frühe Repolarisation

Auch die frühe Repolarisation (ST-Segment Elevation  $\geq 0,1\text{mV}$  oder J-Punkt Elevation) war deutlich häufiger in Athlet\*innen-EKGs nachzuweisen (37,1%) als bei Nicht-Athlet\*innen (29,2%).

Diese EKG-Veränderungen wurden einheitlich als physiologisch eingeordnet und werden auf die Veränderung des Herzmuskels und die Aktivität des Parasympathikus zurückgeführt. Als Begründung wird hierfür angeführt, dass es sich um Veränderungen handelt, die zwar in den Ruhe-EKGs der Jugendlichen bestehen, jedoch bei Belastung meist verschwinden.

### T-Wellen-Inversion

Bei der T-Wellen-Inversion handelt es sich um eine pathologische Veränderung, die weiterer kardiologischer Abklärung bedarf, da sie ein Anzeichen für hypertrophe Kardiomyopathie darstellen kann (Ausnahme: T-Wellen-Inversion bei Jugendlichen <16 Jahren in V1-3 (siehe Kap. 1.2) sowie bei afrokaribischen Athlet\*innen in V1-V4 (34)). Außerdem geht man davon aus, dass es sich hierbei um einen Hinweis auf eine erblich bedingte Herzmuskelerkrankung handelt (31). Die T-Wellen-Morphologie spielt daher eine wichtige Rolle beim Screening jugendlicher Leistungssportler\*innen im Hinblick auf ihre Sporttauglichkeit.

Bei der Häufigkeit des Vorkommens von T-Wellen-Inversionen war kein signifikanter Unterschied zwischen Athlet\*innen und Nicht-Athlet\*innen nachweisbar. Dennoch wurden tiefe T-Wellen-Inversionen ( $\geq 2\text{mm}$ ) häufiger bei leistungssportlich-aktiven Jugendlichen als bei nicht-

leistungssportlich-aktiven nachgewiesen; bei Athlet\*innen waren sie in 6,7% der EKGs zu finden, bei Nicht-Athlet\*innen in 0,3% der EKGs.

**Zusammenfassend** lässt sich festhalten, dass bei Jugendlichen, die regelmäßig intensiv körperlich trainieren, folgende EKG-Veränderungen im Vergleich zu nicht-leistungssportlich-aktiven Jugendlichen vorkommen, die als physiologisch erachtet werden können und in Abwesenheit weiterer Symptome keiner weiteren Abklärung bedürfen: Tiefe Sinusbradykardien  $>30/\text{min}$  und damit verbundene Verlängerung des PR-Intervalls, Veränderungen des PR-Intervalls (AV Block Grad 1 und Grad 2 Typ Wenckebach) sowie isoliert auftretende Extrasystolen, inkompletter Rechtsschenkelblock und Linksherzhypertrophie. Außerdem findet sich vermehrt eine frühe Repolarisation.

Ebenfalls häufiger tritt bei Athlet\*innen die tiefe T-Wellen-Inversion ( $\geq 2\text{mm}$ ) auf, die als pathologisch gewertet werden kann und weiterer kardiologischer Abklärung bedarf.

#### **1.4 Vergleich der Veränderungen jugendlicher Leistungssportler\*innen-EKGs mit dem ‘Athlete’s Heart’ erwachsener Athlet\*innen**

Im Folgenden werden die oben dargestellten Angaben der EKG-Veränderungen jugendlicher Athlet\*innen mit den in Studien nachgewiesenen Angaben erwachsener Athlet\*innen verglichen. Bei den Angaben über das Vorkommen der EKG-Veränderungen bei erwachsenen Athlet\*innen wird vornehmlich Bezug auf die Metaanalyse von D. Corrado et al. 2009 (35) genommen sowie auf die Studie von Huttin et al. 2018 (14), in der 2.484 Profi-Fußballspieler-EKGs männliche Leistungs-Fußballspieler der französischen professionellen Fußball-Liga ausgewertet wurden. Die Untersuchung beinhaltete neben einer echokardiographischen Untersuchung auch ein 12-Kanal-Ruhe-EKG. Die Probanden waren zum Zeitpunkt der Untersuchung zwischen 16 und 40 Jahre alt.

Von 2010 bis 2012 untersuchten Zaidi et al. (15) 868 Athlet\*innen zwischen 14-35 Jahren. Sie führten eine Echokardiographie und ein 12-Kanal-Ruhe-EKG durch.

1969 untersuchte Kimiaki Nakamoto (36) 25 männliche Marathon-Läufer zwischen 19 und 31 Jahren. Er führte bei allen ein Ruhe-EKG durch sowie ein EKG direkt nach einem 100m Sprint. Folgende Angaben werden gemacht:

### Sinusbradykardie

In den EKGs erwachsener Athlet\*innen kommt die Sinusbradykardie mit 54% (14) beziehungsweise 15-70% (35) deutlich häufiger vor als bei jugendlichen Athlet\*innen. Bedingt durch die physiologische Entwicklung des Herzens während der Jugend haben jüngere Athlet\*innen höhere Ruheherzfrequenzen als ältere Jugendliche beziehungsweise Erwachsene (24).

### AV-Block

Das Vorkommen von AV-Block 1° ergibt bei Huttin et al. (14) eine Häufigkeit von 8% in ihrer Stichprobe. Nakamoto (36) stellte AV-Block 1° bei 10% der Athlet\*innen fest. Auch Corrado et al. (35) geben eine Häufigkeit von 10% an.

### PR-Intervall

Die mittlere Dauer des PR-Intervalls beträgt bei erwachsenen Athlet\*innen  $169 \pm 28$ ms und ist damit im Durchschnitt länger als bei jugendlichen Athlet\*innen. Dies lässt sich wohl darauf zurückführen, dass auch die Herzfrequenzen der erwachsenen Athlet\*innen deutlich langsamer sind als die der Jugendlichen. Der AV-Block Typ 1 wurde in 35% und Typ 2 Wenckebach in 10% der EKGs nachgewiesen. Damit kommt Typ 1 häufiger und Typ 2 Wenckebach seltener vor als bei jugendlichen Athlet\*innen.

### Linksherzhypertrophie

Kriterien für Linksherzhypertrophie (Sokolow-Lyon-Index) konnten Huttin et al. (14) bei 37% der Probanden nachweisen. Zaidi et al. (15) fanden die Veränderung bei 33% ihrer Proband\*innen. Corrado et al. (35) beschreiben Werte bis zu 80%. Damit sind die Kriterien sehr viel häufiger zu finden als bei leistungssportlich-aktiven Jugendlichen.

### Inkompletter Rechtsschenkelblock

Der iRSB konnte bei Huttin et al. (14) bei 3% der Probanden nachgewiesen werden. Zaidi et al. (15) berichten über 4,8%. Nakamoto (36) konnte eine Häufigkeit von 35% nachweisen und auch Corrado et al. (35) geben Werte zwischen 35% und 50% an.

### Frühe Repolarisation

Für das Vorkommen Früher Repolarisation machen nur Corrado et al. (35) eine Angabe. Sie geben Werte zwischen 50% und 80% an. Die frühe Repolarisation findet man damit ebenfalls häufiger als bei jugendlichen Athlet\*innen.

**Zusammenfassend** kann festgehalten werden, dass die bei Erwachsenen als ‘*Athlete’s heart syndrome*’ bezeichneten EKG-Veränderungen auch bei jugendlichen Athlet\*innen nachweisbar sind, bei Jugendlichen aber nicht mit der gleichen Häufigkeit auftreten. Diese Feststellung machte auch Rowland und stellte die Vermutung an, dass diese Tatsache der längeren Dauer seit Beginn des Trainings sowie einem höheren aktuellen Trainingsumfang der erwachsenen Athlet\*innen gegenüber den jugendlichen Athlet\*innen geschuldet sein könnte (37).

### **1.5 Einfluss des aktuellen Trainingsumfangs und der Dauer des Leistungssportlichen Trainings auf das Auftreten von EKG-Veränderungen bei jugendlichen Athlet\*innen**

Der Zusammenhang zwischen dem aktuellen Trainingsumfang und dem Auftreten von EKG-Veränderungen jugendlicher Athlet\*innen wurde bislang nicht untersucht. Bei erwachsenen Athlet\*innen konnte in wenigen Studien ein diesbezüglicher Zusammenhang nachgewiesen werden. Bessem et al. (38) untersuchten im Jahr 2018 1229 Athlet\*innen, die im *Department of Cardiology and Centre for Sports and Exercise Medicine* der Universitätsmedizin Groningen zwischen 2013 und 2014 auf Sporttauglichkeit untersucht worden waren. Es konnte ein signifikanter Zusammenhang zwischen dem aktuellen Trainingsumfang und dem Auftreten von trainingsinduzierten EKG-Veränderungen nachgewiesen werden. Athlet\*innen, die unter drei Stunden pro Woche trainierten, zeigten signifikant seltener EKG-Veränderungen als Athlet\*innen, die drei bis sechs beziehungsweise über 10 Stunden pro Woche trainierten. Ebenfalls konnte ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Dauer des leistungssportlichen Trainings und der Häufigkeit des Auftretens von trainingsinduzierten EKG-Veränderungen nachgewiesen werden: Je länger die Athlet\*innen leistungssportlich aktiv gewesen waren, umso größer war der Anteil an Athlet\*innen mit trainingsinduzierten EKG-Veränderungen.

Auch in der aktuellen Metaanalyse von Conti et al. 2021 (39) konnte ein signifikanter Zusammenhang zwischen dem Auftreten von rechtsventrikulärer Hypertrophie und der Trainingsintensität nachgewiesen werden.

### **1.6 Einfluss des Alters auf das Auftreten von EKG-Veränderungen bei jugendlichen Athlet\*innen**

Die Referenzwerte erwachsener Athlet\*innen-EKGs sind nicht einfach auf die der Jugendlichen übertragbar, da die EKGs Jugendlicher sich von den EKGs Erwachsener unterscheiden (24). Hierfür werden folgende mögliche Gründe genannt:

Die Zeitintervalle und Amplituden des EKGs hängen von der Organgröße, der Muskelmasse und der Leitungsgeschwindigkeit ab. Diese Aspekte verändern sich im Verlauf der Entwicklung und damit auch während des Jugendalters, da sich das Herz wie der gesamte Organismus in der Entwicklung und im Wachstum befindet und sich den sich verändernden Anforderungen des Organismus anpassen muss.

Im Jugendalter nimmt zusätzlich die Veränderung des Hormonhaushaltes Einfluss auf das EKG. Erst mit Beginn der Pubertät werden in großer Menge Sexualhormone gebildet, die für die Entwicklung der Skelett- und auch der Herzmuskulatur mitentscheidend sind.

Obwohl die Kraft des Muskelapparates - und wie man heute vermutet auch die des Herzmuskels auch präpubertär schon zunimmt, finden sich derartige gezielte Anpassungen des Herzmuskels erst in Folge der Zunahme der Geschlechtshormone mit Beginn der Pubertät (vgl. Rowland 1994 (29)). Daher sind bei präpubertären Jugendlichen keine für das erwachsene 'Athlete's Heart' typischen EKG-Veränderungen zu erwarten, da die Testosteronlevel nicht hoch genug sind, um Herz- und Skelettmuskel zu stimulieren (37)). Diese Vermutung wurde in mehreren voneinander unabhängigen Studien bestätigt (29, 37, 40, 41).

Dies lässt die Vermutung zu, dass vor dem Eintritt in die Pubertät keine geschlechtsspezifischen EKG-Unterschiede auftreten und sich erst mit Einsetzen der Pubertät die Referenzwerte in einigen Intervallen zwischen jugendlichen Mädchen und Jungen unterscheiden. Nach Ende der Pubertät weisen weibliche Athletinnen beispielsweise höhere Ruheherzfrequenzen, kleinere Ventrikel und weniger Hypertrophie des Herzens auf als männliche Athleten (24).

Auf die große Bedeutung, die der präzisen Altersbestimmung bei der Bewertung der EKGs jugendlicher Athlet\*innen zukommt, verweist ebenso eine Studie von McClean et al. 2019 (42). Sie untersuchten die T-Wellen-Inversion in V1-V4 bei jugendlichen Athlet\*innen zwischen 11-18 Jahren. Dabei unterteilten sie die Stichprobe anhand des biologischen Alters in <16 und >16 Jahre (das biologische Alter wurde mittels radiologischer Messung des linken Handwurzelknochens bestimmt). McClean et al. konnten nachweisen, dass die Präzision, mit der pathologische Veränderungen eingeschätzt werden konnten, erheblich durch die Bestimmung des biologischen Alters erhöht wurde. Sie kamen zu dem Schluss, dass es sich bei T-Wellen-Inversionen (V1-V3) bei biologisch unter 16jährigen Athlet\*innen um eine juvenile Veränderung handelt die keiner weiteren Abklärung bedarf, während man bei biologisch über 16 Jährigen eine weitere kardiologische Abklärung einleiten sollte.

Auch Bjerring et al. (43) konnten in ihrer Untersuchung von 12- und 15jährigen Skilanglauf-fahrer\*innen 2019 nachweisen, dass bei 15jährigen Athlet\*innen die relative Wanddicke des linken Ventrikels signifikant abgenommen hatte, nicht aber bei den 12jährigen Athlet\*innen.

**Zusammenfassend** legt die bisherige Datenlage den Schluss nahe, dass es auch bei Jugendlichen durch den Leistungssport zu typischen EKG-Veränderungen kommt. Diese Veränderungen scheinen vergleichbar zu denen, die bei Erwachsenen als *'Athlete's Heart'* bezeichnet werden, konnten aber nicht mit der gleichen Häufigkeit nachgewiesen werden.

Um von einem *'jugendlichen Athlete's Heart'* sprechen zu können bedarf es weiterer Studien mit repräsentativen Stichproben genau dieser jugendlichen Zielgruppe.

Die Literaturrecherche ergab nur wenige zuverlässige Studien, die zu aussagekräftigen Ergebnissen kommen konnten. Außerdem divergieren die in den Studien gemachten Aussagen über das *'jugendliche Athlete's Heart'* stark. Einige schließen sich Rowland an und sind der Meinung, dass EKG-Veränderungen, die mit dem *Athlete's Heart* Erwachsener vergleichbar wären, nicht bei jugendlichen Ausdauerathlet\*innen vorzukommen scheinen (37). Andere teilen die Meinung von Sarah Koch et al. und unterstreichen, dass die Prävalenz von EKG-Veränderungen bei jugendlichen Athlet\*innen derer erwachsener Athlet\*innen entspricht (44).

Daher ist es Ziel dieser Dissertation das Vorkommen *'Athlete's Heart'* typischer EKG-Veränderungen bei jugendlichen Athlet\*innen genauer zu untersuchen.

## 1.7 Forschungsfrage und Hypothesen

In der vorliegenden Untersuchung werden trainingsbedingte EKG-Veränderungen bei ausschließlich jugendlichen Leistungssportler\*innen untersucht, die bei erwachsenen Athlet\*innen als *'Athlete's Heart'* definiert sind. Hierbei sollen die im Theorieteil herausgearbeiteten Kritikpunkte berücksichtigt werden. Daher werden in die Stichprobe nur Proband\*innen im Jugendalter (8-18 Jahre) eingeschlossen. In den referierten Studien wurde keine Altersunterteilung der Jugendlichen vorgenommen, dies kann wie in Kap. 1.6 beschrieben die Ergebnisse verfälschen. Daher werden in dieser Untersuchung anhand des Medians zwei Altersgruppen getrennt behandelt und die Gesamtstichprobe in Altersgruppen unterteilt werden (vgl. Kap. 2.2.2).

Im ersten Hypothesenblock wird untersucht, ob und mit welcher Häufigkeit Veränderungen in den EKGs der jugendlichen Athlet\*innen vorkommen, die den von Sharma et al. (12) 2018 beschriebenen *'International recommendations for electrocardiographic interpretation in athletes'* entsprechen. Es wird daher zunächst generell formuliert:

**H1:** Es lassen sich bei jugendlichen Leistungssportler\*innen-EKGs typische wiedererkennbare EKG-Veränderungen nachweisen, die denen von Sharma et al. (12) beschriebenen qualitativ entsprechen und sich in bei erwachsenen Athlet\*innen als physiologisch, borderline und pathologisch definierte Kriterien klassifizieren lassen.

**H1.1:** Die physiologischen Veränderungen kommen in der Stichprobe mit hoher Wahrscheinlichkeit vor.

In bisherigen Studien konnten die EKG-Veränderungen bei Jugendlichen nicht mit der gleichen Häufigkeit nachgewiesen werden wie beim erwachsenen *'Athlete's Heart'* beschrieben. Wie in Kap. 1.3 beschrieben mangelt es an Studien mit repräsentativen Stichproben. Daher soll diese Tatsache erneut überprüft werden:

**H2:** Die EKG-Veränderungen kommen bei jugendlichen Athlet\*innen nicht in derselben quantitativen Häufigkeit vor wie beim *'Athlete's Heart'* Erwachsener in der Literatur beschrieben.

Es finden sich zahlreiche Hinweise darauf, dass das Alter und die damit einhergehenden Veränderungen im Hormonhaushalt (insbesondere Sexualhormone) zu Veränderungen des Herzmuskels und damit des EKGs führen (vgl. Kap 1.6). Verschiedenen Studien weisen darauf hin, dass bei jüngeren jugendlichen Athlet\*innen keine für das *'Athlete's Heart'* typischen Veränderungen im EKG auftreten können, da erst durch die Produktion von Sexualhormonen während der Pubertät in großem Ausmaß die gezielte Anpassung von Skelett- und Herzmuskel an intensives körperliches Training möglich ist. Diese Tatsachen konnten bisher aufgrund von fehlenden repräsentativen Studien für die jugendliche Gruppe nicht ausreichend untersucht werden. Daher soll folgende Hypothese aufgestellt werden:

**H3:** Es besteht ein Zusammenhang zwischen dem Alter und den Veränderungen im EKG bei jugendlichen Athlet\*innen.

**H3.1:** In der Auftretens-Häufigkeit der EKG-Veränderungen bestehen signifikante Unterschiede zwischen den 8-12jährigen Jugendlichen (Subgruppe 1) und den 13-18 Jährigen (Subgruppe 2).

**H3.2:** Erst in der Gruppe der 13-18jährigen Jugendlichen unterscheiden sich die Auftretens-Häufigkeiten der EKG-Veränderungen zwischen männlichen und weiblichen Proband\*innen.

Es konnte bereits nachgewiesen werden, dass sich die EKGs jugendlicher Athlet\*innen von den EKGs nicht-leistungssportlich-aktiver Jugendlicher unterscheiden (vgl. Kap. 1.3)(31, 32). Wie in Kap. 1.5 beschrieben kann ein Zusammenhang zwischen der Häufigkeit der EKG-Veränderungen und der Dauer des leistungssportlichen Trainings beziehungsweise dem aktuellen Trainingsumfang vermutet werden. Dieser Sachverhalt soll untersucht werden:

**H4:** Es besteht ein Zusammenhang zwischen dem Ausüben von Leistungssport und der Häufigkeit des Auftretens der EKG-Veränderungen.

**H4.1:** Es besteht ein Zusammenhang zwischen dem aktuellen Trainingsumfang und der Häufigkeit des Auftretens der EKG-Veränderungen

**H4.2:** Es besteht ein Zusammenhang zwischen der Dauer des leistungssportlichen Trainings und der Häufigkeit des Auftretens der EKG-Veränderungen.

## **2. Material und Methoden**

### **2.1 Datenerhebung**

Für die vorliegende Dissertation wurden die bereits von den Mitarbeiter\*innen des Sportmedizinischen Instituts der Charité Berlin erhobenen Daten retrospektiv ausgewertet.

Die in die vorliegende Untersuchung einfließenden Daten wurden in einer langfristigen, bis heute bestehenden Zusammenarbeit des Sportmedizinischen Instituts der Charité Berlin mit den Förderzentren Berlin/Brandenburg des Deutschen Fußball-Bundes (DFB) sowie der Nachwuchsabteilung des FC Union Berlin erhoben. Im Rahmen eines Screening-Projekts auf Sporttauglichkeit mit dem DFB wurde im Jahr 2015 mit der Datenerhebung begonnen, dieses wird bis heute jährlich durchgeführt. Bei der Untersuchung der Nachwuchsabteilung des FC Union Berlin handelt es sich um eine einmalige Datenerhebung aus dem Sommer 2019.

Alle Proband\*innen stimmten einer Verwendung ihrer Daten zu Studienzwecken zu. Bei den minderjährigen Proband\*innen erfolgte die Zustimmung durch einen gesetzlichen Vormund.



---

Die Studie fand im Rahmen der Studienserie “Wissenschaftliche Aufarbeitung retrospektiver, pseudonymisierter Patientendaten der sportmedizinischen Hochschulambulanz der Humboldt-Universität zu Berlin“ statt (Ethikkommission HU-KSBF-EK\_2018\_0004).

Bei allen Proband\*innen wurde eine umfangreiche Anamnese erhoben sowie eine körperliche Untersuchung durchgeführt. Obligatorisch wurde ein 12-Kanal-Ruhe-EKG erstellt. Fakultativ hatten die Proband\*innen die Möglichkeit eine weiterführende sportmedizinische und kardiologische Untersuchung unter finanzieller Selbstbeteiligung durchführen zu lassen. Diese beinhaltete dann zusätzlich zum Routinescreening ein Belastungs-EKG, einen Belastungstest mit Laktatdiagnostik sowie eine Echokardiographie bei Beschwerden oder Auffälligkeiten im EKG, in der Ergometrie oder der Anamnese. Diese Option wurde von 227 Proband\*innen wahrgenommen.

Alle Untersuchungen wurden von Assistent\*innen unter direkter Aufsicht von Kardiolog\*innen des Instituts für Sportmedizin der Charité Berlin durchgeführt.

Für die vorliegende Untersuchung erfolgte eine Abfrage der Abteilungsdatenbank der Abteilung für Sportmedizin der Charité Universitätsmedizin Berlin. Die exportierten Daten wurden mittels Zahlenkodierung pseudonymisiert. Die statistische Auswertung der Daten erfolgte am pseudonymisierten Datensatz.

Bei den Daten zum ‘aktuellen Trainingsumfang’ sowie der ‘Dauer des leistungssportlichen Trainings’ wurde die Einschätzung der Proband\*innen selber beziehungsweise deren Eltern verwendet. Dabei handelt es sich um uneinheitlich erhobene Daten, die entweder durch einen Fragebogen oder in standardisiertem Anamnesegespräch des\*r untersuchenden Arztes/Ärztin erhoben und in die Datenbank eingegeben wurden.

## **2.2 Stichprobe**

### **2.2.1 Gesamtstichprobe**

Die Gesamtstichprobe umfasst 900 Proband\*innen, davon wurden 39 auf Grund von fehlendem EKG ausgeschlossen.

Für die Untersuchung wurden daher 861 Jugendliche im Alter zwischen 8 und 18 Jahren ( $\bar{x}=11,89$ ;  $SD=2,07$ ) als Versuchspersonen berücksichtigt. Die Charakteristika der Stichprobe sind in Tabelle 2 dargestellt.

**Table 2: Altersverteilung in der Gesamtstichprobe und in den einzelnen Gruppen**

Alter in Jahren	Gesamtstichprobe		Gruppe 1		Gruppe 2	
	Häufigkeit (n)	Prozent	Häufigkeit (n)	Prozent	Häufigkeit (n)	Prozent
8	1	0,1%	1	0,1%	-	-
9	11	1,3%	11	1,6%	-	-
10	124	14,4%	124	18,4%	-	-
11	445	51,7%	445	65,9%	-	-
12	94	10,9%	94	13,9%	-	-
13	26	3,0%	-	-	26	14,0%
14	39	4,5%	-	-	39	21,0%
15	29	3,4%	-	-	29	15,6%
16	36	4,2%	-	-	36	19,4%
17	36	4,2%	-	-	36	19,4%
18	20	2,3%	-	-	20	10,8%
Gesamt (N)	861	100%	675	100%	186	100%
$\bar{x}$	11,89		10,92		15,41	
SD	2,070		0,629		1,596	

Table 2. (n = Anzahl, N = Anzahl der Gesamt Gruppe,  $\bar{x}$  = Mittelwert, SD = Standardabweichung)

Die Stichprobe beinhaltet deutlich mehr männliche Probanden (n=731; 84,9%) als weibliche Probandinnen (n=130; 15,1%).

Die Proband\*innen sind unter Berücksichtigung des Alters meist normalgewichtig mit BMI-Werten zwischen 10,9 und 25,6 ( $\bar{x}$ =17,7; SD=2,43).

Alle Proband\*innen trainierten zum Zeitpunkt der EKG-Erhebung leistungssportlich in der Hauptsportart Fußball. Bei 202 Proband\*innen (23,5%) liegen keine Angaben über Anzahl der Trainingsstunden pro Woche vor (im Folgenden 'aktueller Trainingsumfang'); sie werden daher für den Hypothesenblock 4 ausgeschlossen. Bei den 659 Proband\*innen mit vorliegenden Informationen lag der mittlere Trainingsumfang zum Zeitpunkt der EKG-Erhebung bei 6 Stunden pro Woche ( $\bar{x}$ =6,36; SD=3,4). Zusätzlich kann von durchschnittlich einem Spiel pro Woche ausgegangen werden sowie zusätzlichem Schulsport bei den meisten Proband\*innen.

Bei 270 Proband\*innen (31,4%) liegen keine Angaben zu dem Beginn ihres leistungssportlichen Trainings vor; auch sie werden daher für den Hypothesenblock 4 ausgeschlossen. Bei den 591 Proband\*innen mit vorliegender Information lässt sich feststellen, dass die meisten

Proband\*innen zum Zeitpunkt der EKG-Erhebung bereits seit fünf Jahren leistungssportlich aktiv waren (Trainingsjahre Leistungssport:  $\bar{x}=4,56$ ;  $SD=2,56$ ). Die Stichprobencharakteristika bezogen auf die Trainingsvariablen sind in Tabelle 3 veranschaulicht.

**Tabelle 3:** Verteilung der Variablen BMI, Trainingsjahre im Leistungssport, Trainingsstunden pro Woche und Alter über die Stichprobe und die Gruppen

	Gesamtstichprobe			Gruppe 1			Gruppe 2		
	Gültig	$\bar{x}$	SD	Gültig	$\bar{x}$	SD	Gültig	$\bar{x}$	SD
BMI	861	17,70	2,43	675	16,92	1,77	186	20,54	2,39
Trainingsjahre Leistungssport	591	4,56	2,56	429	4,10	2,2	162	5,77	3,01
Trainingsstunden pro Woche	659	6,36	3,41	485	5,19	1,62	174	9,61	4,72
Geschlecht		M	W		M	W		M	W
Häufigkeit	861	732	130	675	597	78	186	134	52
Prozent		84,9%	15,1%		88,4%	11,6%		72%	28%

*Tabelle 3.* (BMI = Body Mass Index;  $\bar{x}$  = Mittelwert; SD = Standardabweichung; M = männlich ; W= weiblich; Gültig= Anzahl der Proband\*innen, bei den in Bezug auf die untersuchte Variable keine fehlenden Werte vorlagen und die daher in die Berechnung einfließen)

## 2.2.2 Einteilung der Stichprobe in Gruppen

Die Stichprobe wird anhand des Alters mithilfe des Medians in folgende zwei Gruppen unterteilt (8-12jährige Athlet\*innen und 13-18jährige Athlet\*innen) (vgl. Kap 1.7).

An dieser Stelle soll darauf hingewiesen sein, dass es sich bei dieser Einteilung um eine Unterteilung rein nach dem Kriterium ‘Alter’ handelt. Berücksichtigt man, dass anhand verschiedener Kriterien (Menarche, Tanner Stadien sowie anthropometrischen Daten wie Knochenalter, Größe, Gewicht) der durchschnittliche Beginn der Pubertät bei männlichen und weiblichen Proband\*innen im Durchschnitt bei 12 Jahren liegt (45-48) sowie durch die große Fallzahl der vorliegenden Untersuchung (Gruppe 1  $n=675$  und Gruppe 2  $n=186$ ), so kann davon ausgegangen werden, dass in Gruppe 1 vornehmlich präpubertäre Proband\*innen inkludiert sind und dass Gruppe 2 aus vor allem pubertären Proband\*innen besteht. Um Verfälschungen zu vermeiden, wurde vor allem darauf geachtet in der Gruppe 2 nur Proband\*innen einzuschließen, bei denen man davon ausgehen kann, dass sie sich bereits in der Pubertät befinden. Dadurch ist es möglich, dass in der Gruppe 1 (8-12jährige Athlet\*innen) einige bereits frühpubertäre

Proband\*innen eingeschlossen sind. Dieser Anteil ist aber auch durch die große Fallzahl der Subgruppe 1 zu vernachlässigen.

1. Gruppe 1: die Proband\*innen waren zum Zeitpunkt der EKG-Erhebung zwischen 8 und 12 Jahre alt (n=675; 78,4%)
2. Gruppe 2: die Proband\*innen waren zum Zeitpunkt der EKG-Erhebung zwischen 13 und 18 Jahre alt (n=186; 21,6%)

### **2.2.3 Stichprobencharakteristika der einzelnen Versuchspersonengruppen**

#### **Gruppe 1 (8-12 Jährige)**

Das mittlere Alter dieser Gruppe liegt bei 11 Jahren ( $\bar{x}=10,92$ ;  $SD=0,63$ ). Die Gruppe besteht aus 597 männlichen Probanden (88,4%) und 78 weiblichen Probandinnen (11,6%). Der mittlere BMI liegt bei 17 ( $\bar{x}=16,92$ ;  $SD=1,77$ ).

Bei 190 Proband\*innen (28,15%) der Gruppe liegen keine Angaben zum aktuellen Trainingsumfang vor. Die Proband\*innen der Gruppe 1 mit vorliegenden Informationen trainierten zum Zeitpunkt der EKG-Erhebung im Durchschnitt fünf Stunden pro Woche ( $\bar{x}=5,2$ ;  $SD=1,62$ ).

Bei 246 Proband\*innen (36,44%) liegen keine Angaben zum Beginn ihres leistungssportlichen Trainings vor. Die Proband\*innen mit Informationen diesbezüglich waren zum Zeitpunkt der EKG-Erhebung seit vier Jahren leistungssportlich aktiv ( $\bar{x}=4,1$ ;  $SD=2,2$ ).

#### **Gruppe 2 (13-18 Jährige)**

Das mittlere Proband\*innenalter dieser Gruppe liegt bei 15 Jahren ( $\bar{x}=15,41$ ;  $SD=1,6$ ). Die Gruppe besteht aus 134 männlichen Proband\*innen (72%) und 52 weiblichen Proband\*innen (28%). Der mittlere BMI beträgt 21 ( $\bar{x}=20,54$ ;  $SD=2,39$ ).

Bei 12 Proband\*innen (6,5%) liegen keine Angaben zum aktuellen Trainingsumfang vor. Die Proband\*innen mit vorliegenden Informationen trainierten zum Zeitpunkt der EKG-Erhebung im Durchschnitt zehn Stunden pro Woche ( $\bar{x}=9,62$ ;  $SD=4,72$ ).

Bei 24 Proband\*innen (12,9%) liegen keine Angaben zum Beginn ihres leistungssportlichen Trainings vor. Die Proband\*innen mit vorliegenden Informationen waren meist bereits seit sechs Jahren leistungssportlich aktiv ( $\bar{x}=5,77$ ;  $SD=3,0$ ).

## Vergleich der beiden Gruppen

Der T-Test für unverbundene Stichproben ergibt, dass der Unterschied zwischen der Gruppe 1 und 2 hinsichtlich ihrer mittleren BMI-Werte signifikant ist ( $p < 0.0001$ ).

Die mittlere Dauer seit Beginn des Leistungssports zwischen Gruppe 1 und 2 unterscheidet sich ebenfalls signifikant ( $p < 0.0001$  im T-Test bei unabhängigen Stichproben). Ebenso unterscheidet sich der mittlere aktuelle Trainingsumfang der beiden Subgruppen signifikant voneinander ( $p < 0.0001$  im T-Test für unabhängige Stichproben).

Diese Tatsachen sind bei den weiteren Untersuchungen von Bedeutung, da die Unterschiede, die gegebenenfalls beim Auftreten der EKG-Veränderungen in den beiden Subgruppen auftreten, auch durch diesen Sachverhalt verstärkt werden könnten.

## 2.3 Datenauswertung

Die Papierlaufgeschwindigkeit der EKGs betrug 50mm/s bei einer Standardamplitude von 1mV/cm. Bei der Befundung der EKGs wurde einerseits die 'Custo' Intervall-Vermessung zu Hilfe genommen, andererseits wurden die Befunde falls möglich mit einem vorliegenden EKG-Befund des\*r Proband\*in abgeglichen. Die korrigierte QT-Zeit (QTc) wurde mit Hilfe der Bazett Formel ermittelt. Jedes EKG wurde außerdem falls nötig händisch vermessen und der Rhythmusstreifen in jedem Fall nach Auffälligkeiten überprüft. So konnten 821 EKGs befundet werden. Bei den 40 EKGs, bei deren eindeutigem Befund Unsicherheit bestand, wurde Rücksprache mit einem Facharzt/einer Fachärztin für Kardiologie genommen.

Bei der Auswertung der EKGs wurden die Kriterien von Sharma et al. (12) angewendet. Diese wurden 2018 von der *European Society of Cardiology* veröffentlicht und gelten seither als internationaler Standard für die Interpretation der EKGs von vor allem erwachsenen Athlet\*innen. Die Kriterien sind in Tabelle 4 dargestellt. Für die Interpretation wurden die Veränderungen entsprechend dieser Kriterien in folgende Kategorien unterteilt:

3. Physiologische Veränderungen: Veränderungen, die bei Athlet\*innen, die regelmässig Ausdauertraining betreiben (min. 4h pro Woche) physiologisch auftreten. Sie sind auf einen verstärkten Vagotonus sowie eine Vergrößerung der Herzkammern zurückzuführen und bedürfen keiner weiteren kardiologischen Abklärung.
4. Borderline Veränderungen: Diese EKG-Veränderungen scheinen, sofern sie isoliert auftreten, keinen pathologischen Wert bei Athlet\*innen zu haben. Das Auftreten von

zwei oder mehr Borderline Veränderungen bedarf allerdings weiterer ärztlicher Abklärung bis weitere Daten diesbezüglich vorliegen.

5. **Pathologische Veränderungen:** Diese Veränderungen sind nicht als Folge des intensiven Ausdauertrainings zu sehen. Sie bedürfen immer einer weiteren kardiologischen Abklärung um pathologische Herzveränderungen auszuschließen. Bis zum Ausschluss einer Herzerkrankung sollte auf die weitere Ausübung des Leistungssports verzichtet werden.

#### **Table 4: EKG Veränderungen bei Athlet\*innen**

*(modifiziert nach den International consensus standards for electrocardiographic interpretation in athletes: definitions of ECG criteria, Sharma et al. (12))*

##### **Pathologische EKG-Veränderungen bei Athlet\*innen**

EKG-Veränderung	Definition
T-Wellen-Inversion	≥1mm tief in zwei aufeinander folgenden Ableitungen (ausgenommen aVR, III und V1)
- Anterior	V2-V4
- Lateral	I, aVL, V5 und/oder V6
- Inferolateral	II und aVF, V5-V6, I und aVL
- Inferior	II und aVF
ST-Segment-Depression	≥0,5mm tief in zwei oder mehr aufeinanderfolgenden Ableitungen
Pathologische Q-Wellen	Q/R Verhältnis ≥0,25 oder ≥40ms Dauer in zwei oder mehr aufeinander folgenden Ableitungen (ausgenommen III und aVR)
Kompletter Linksschenkelblock	QRS ≥120ms, vornehmlich negative QRS-Komplexe in V1 (QS oder rS)
Unspezifische intraventrikuläre Überleitungsstörungen	QRS-Komplex Dauer ≥140ms
Epsilon Potential	Kleines, niedrigamplitudiges Signal (kleiner positiver Ausschlag) zwischen Ende des QRS-Komplexes und Beginn der T-Welle in Ableitungen V1-V3
Ventrikuläre Präexzitation	PR-Intervall <120ms mit Delta Welle und breitem QRS-Komplex (≥120ms)
Verlängerte QTc-Zeit	≥470ms bei Männern oder ≥480ms bei Frauen

Brugada Typ 1 Veränderung	Zunächst ST-Hebung $\geq 2$ mm mit darauf folgender negativer symmetrischer T-Welle in $\geq 1$ Ableitung zwischen V1-V3
Tiefe Sinusbradykardie <30 Schläge pro Minute	<30 s/min oder Sinus-Pause >3s
Sehr langer AV-Block	PR-Intervall $\geq 400$ ms
AV-Block 3° und AV-Block 2° Typ Mobitz II	Kompletter AV-Block oder intermittierende nicht überleitete P-Wellen mit fixem PR-Intervall
Atriale Tachyarrhythmien	Supraventrikuläre Tachykardie, Vorhofflimmern, Vorhofflattern
Ventrikuläre Arrhythmien	Couplets, Triplets oder nicht persistierende ventrikuläre Tachykardie

### **Borderline EKG-Veränderungen bei Athlet\*innen**

Überdrehter Linkstyp Linksatriale Vergrößerung	-30° bis -90° Verlängerte P-Welle (>120ms) in Ableitungen I oder II mit negativer P-Welle $\geq 1$ mm tief und $\geq 40$ ms lang in Ableitung V1
Überdrehter Rechtstyp	>120°
Rechtsatriale Vergrößerung	P-Welle $\geq 2,5$ mm in II, III oder aVF
Kompletter Rechtsschenkelblock	rSR'-Konfiguration in Ableitung V1 und breitere S-Welle, asl R-Welle in Ableitung V6 mit QRS-Dauer $\geq 120$ ms

### **Physiologische EKG-Veränderungen bei Athlet\*innen**

Sokolow-Lyon-Index >3,5	SV1+RV5,6 >3,5mV
Inkompletter Rechtsschenkelblock (iRSB)	rSR'-Konfiguration in Ableitung V1 und qRS-Konfiguration in Ableitung V6 mit QRS-Dauer <120ms
Frühe Repolarisation	J-Punkt Hebung, ST-Hebung, J-Welle in den inferioren und/oder lateralen Ableitungen
Juvenile T wave pattern	T-Wellen Inversion V1-V3 bei <16jährigen Athlet*innen
Sinusbradykardie $\geq 30$ Schläge pro Minute	$\geq 30$ s/min
Sinusarrhythmie	Herzfrequenzvariation mit Zunahme während der Inspiration und Abnahme während der Expiration
Ektoper Vorhofrhythmus	Untypische P-Wellen Morphologie verglichen mit Sinus P-Wellen

Junktionaler Ersatzrhythmus	QRS-Rate schneller, als die P-Wellen Frequenz in Ruhe und typischerweise <100s/min mit schmalen QRS-Komplexen
AV-Block 1°	PR-Intervall 200-400ms
AV-Block 2° Typ Mobitz I	Kontinuierliche Zunahme des PR-Intervalls, bis zum Aussetzen der Überleitung einer P-Welle, ohne darauf folgenden QRS-Komplex

*Tabelle 4.* (EKG=Elektrokardiogramm; QTc-Zeit= frequenzadaptierte QT-Zeit, mit der Bazett Formel ermittelt; s=Sekunden; AV-Block= Atrioventrikulärer Block)

## 2.4 Statistische Analyse

Kontinuierliche Variablen werden folgendermaßen angegeben: Mittelwert; Standardabweichung. Kategorielle Variablen werden als Auftretens-Häufigkeit und mit Prozentangabe angegeben. Die Angaben des 95%-Konfidenzintervalls (95%-KI) wurden exakt mit Hilfe der Clopper-Pearson Methode ermittelt.

Als statistische Signifikanz werden, sofern nicht anders vermerkt, p-Werte <0,05 erachtet. Für den Hypothesenblock 3 wurde der Vier-Felder Chi-Quadrat-Test angewandt sowie bei der Hypothese 3.2 eine Angleichung des Signifikanzniveaus nach Bonferroni-Holm. Für den Hypothesenblock 4 wurde eine punktbiseriale Korrelation berechnet.

Alle Tests und Ermittlungen wurden mit IBM® SPSS® Statistics Version 25 durchgeführt.

Für den Vergleich des Auftretens von EKG-Veränderungen der jugendlichen Proband\*innen mit den in der Literatur beschriebenen Häufigkeiten bei erwachsenen Athlet\*innen werden, wie in Kap. 1.4 herausgearbeitete, verschiedene Studien für die Referenzwerte bei Erwachsenen zu Hilfe genommen, bei denen es sich unter anderem um Studien handelt, deren Angaben in die Häufigkeitsangaben von Sharma et al. (12) einfließen: Die Metaanalyse von Corrado et al. (35) sowie die Studien von Huttin et al. (14), Zaidi et al. (15) sowie Kimiaki Nakamoto (36).

Da in den Studien erwachsener Athlet\*innen nicht alle bei den jugendlichen Proband\*innen aufgetretenen Veränderungen untersucht wurden, ist es nicht möglich alle der bei den jugendlichen Proband\*innen bestimmten Auftretens-Häufigkeiten zu vergleichen. Es wäre am aussagekräftigsten die Intervallschätzungen zu vergleichen, also das 95%-KI. Allerdings wurde das KI in keiner der Studien erwachsener Athlet\*innen bestimmt beziehungsweise in den Artikeln angegeben. Auch fehlen oft die Angaben der Stichprobengröße wodurch keine nachträgliche Berechnung des 95%-KIs möglich ist. Daher wird an dieser Stelle die relative Häufigkeit des Auftretens bei erwachsenen Athlet\*innen mit den Angaben des 95%-KI der jugendlichen Proband\*innen verglichen.



Es ist davon auszugehen, dass wenn die Angabe der Häufigkeit des Auftretens einer gegebenen Veränderung bei erwachsenen Athlet\*innen nicht im 95%-KI der Proband\*innen der vorliegenden Studie liegt, ein statistischer Unterschied im quantitativen Auftreten der Veränderung besteht.

Zum Vergleich der Auftretens-Häufigkeiten der EKG-Veränderungen zwischen den beiden Subgruppen (8-12jährige Proband\*innen sowie 13-18jährige Proband\*innen) werden zwei verschiedene Ansätze durchgeführt. Zunächst sollen die 95%-Konfidenzintervalle zwischen der Gruppe 1 (8-12 Jährige) und der Gruppe 2 (13-18 Jährige) nach EKG-Veränderungen verglichen werden. Besteht eine Überlappung der Werte kann nicht von einem statistischen Unterschied ausgegangen werden. Bei fehlender Überlappung kann von einem Unterschied ausgegangen werden. Alternativ wird zusätzlich der Vierfelder Chi-Quadrat-Test als Test auf statistische Unabhängigkeit durchgeführt. Es werden die Variable Gruppenzugehörigkeit (Ausprägung: Gruppe 1; Gruppe 2) sowie EKG-Veränderung (Ausprägung: vorhanden; nicht vorhanden) in Bezug zueinander gesetzt. Dieser Test erfordert folgende Voraussetzungen, die bezogen auf die Untersuchung erfüllt werden:

- „1. Die einzelnen Beobachtungen sind voneinander unabhängig
2. Jede untersuchte Versuchsperson kann eindeutig einer Kategorie bzw. Merkmalskombination zugeordnet werden
3. Die erwarteten Häufigkeiten sind in 80% der Zellen des Versuchsplans größer als fünf.“

(Rasch, quantitative Methoden (49), S.198)

Auch für die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen dem Auftreten der EKG-Veränderungen und der Geschlechtszugehörigkeit in den beiden Subgruppen soll ein Vier-Felder Chi-Quadrat-Test durchgeführt werden. Dieser muss für die Gruppe 1 und 2 separat durchgeführt werden. Es werden die Variablen Geschlecht (Ausprägung: männlich; weiblich) und EKG-Veränderung (Ausprägung: vorhanden; nicht vorhanden) zueinander in Bezug gesetzt. Da für die Untersuchung dieser Hypothese zwei Chi-Quadrat-Tests durchzuführen sind, wird eine Angleichung des Signifikanzniveaus nach Bonferroni-Holm vorgenommen. Diese Angleichung ergibt ein Signifikanzniveau von  $p=0,025$  für den kleineren P-Wert und ein Niveau von  $p=0,05$  für den größeren der beiden P-Werte.

Zur Untersuchung des Zusammenhangs zwischen dem Auftreten von EKG-Veränderung und dem aktuellen Trainingsumfang beziehungsweise der Dauer des Leistungssports wird eine punktbiseriale Korrelationen durchgeführt, da es sich bei den Untersuchungen jeweils um eine intervallskalierte und eine dichotome Variable handelt. In dem Datensatz ist das Vorkommen

einer EKG-Veränderung mit 1 und das Fehlen der EKG-Veränderung mit 2 kodiert (da eine Kodierung mit 0 von SPSS fälschlicherweise als fehlender Wert gerechnet werden könnte). Daher ist bei einer erwarteten positiven Korrelation (die EKG-Veränderung tritt bei einer Erhöhung des aktuellen Trainingsumfangs beziehungsweise einer längeren Dauer des Leistungssports häufiger auf) der Korrelationskoeffizient (KK) negativ.

### 3. Ergebnisse

#### 3.1 Häufigkeit des Auftretens der ‘Athlete’s Heart’ typischen EKG Veränderungen bei den jugendlichen Proband\*innen

In der folgenden Darstellung werden die EKG-Veränderungen in den beiden Untergruppen in absoluter Häufigkeit des Auftretens angegeben sowie in Klammer die relative Häufigkeit in Prozent. Die Einteilung entspricht Sharma et al. (12). Die Ergebnisse sind in Tabelle 5 veranschaulicht. Zur Veranschaulichung sind einige EKGs der jugendlichen Proband\*innen mit prägnanten EKG-Veränderungen dargestellt.

**Tabelle 5:** Übersicht über die Häufigkeit des Auftretens der EKG-Veränderungen

Veränderung	Verteilung der EKG-Veränderungen	
	Gruppe 1 (n=675) N (%)	Gruppe 2 (n=186) N (%)
Physiologisch		
Sokolow-Lyon-Index	86 (12,7)	26 (14)
iRSB	120 (17,8)	41 (22)
Frühe Repolarisation	226 (33,5)	53 (28,5)
Juvenile T-wave pattern	202 (29,9)	38 (20,4)
Sinusbradykardie	162 (24,0)	66 (35,5)
Sinusarrhythmie	442 (65,5)	110 (59,1)
Ektoper Vorhofrhythmus	0	0
Junktionaler Ersatzrhythmus	4 (0,6)	0
AV-Block 1°	82 (12,1)	31 (16,7)
AV-Block 2° Mobitz Typ 1	0	0
<b>Borderline</b>		
Überdrehter Linkstyp	0	1 (0,5)
Linksatriale Vergrößerung	0	0
Überdrehter Rechtstyp	1 (0,1)	0
Rechtsatriale Vergrößerung	13 (1,9)	8 (4,3)
Kompletter RSB	0	3 (1,6)

Pathologisch		
T-Wellen-Inversion anterior	6 (0,9)	2 (1,1)
T-Wellen-Inversion lateral	12 (1,8)	0
T-Wellen-Inversion inferior	0	0
T-Wellen-Inversion inferolateral	2 (0,3)	1 (0,5)
ST-Segment Depression	12 (1,8)	3 (1,6)
Pathologische Q-Welle	0	0
Kompletter LSB	0	0
Unspezifische intraventrikuläre Überleitungsstörung	0	0
Epsilon Potential	2 (0,3)	1 (0,5)
Ventrikuläre Präexitation	1 (0,1)	0
Verlängerte QT-Zeit	9 (1,3)	3 (1,6)
Brugada Typ 1 Veränderung	0	0
Tiefe Sinusbradykardie <30bpm	0	0
Sehr langer AV-Block	0	0
AV-Block 2° Mobitz Typ II oder 3°	0	0
Atriale Tachyarrhythmien	2 (0,3)	0
Ventrikuläre Arrhythmien	2 (0,3)	0

*Tabelle 5.* (Die Angaben beziehen sich auf die absolute Häufigkeit; relative Häufigkeit in % in Klammer; Gruppe 1= 8-12jährige Proband\*innen, Gruppe 2 13-18jährige Proband\*innen, iRSB=inkompletter Rechtsschenkelblock; AV-Block= Atrioventrikulärer Block; LSB=Linksschenkelblock; n= Anzahl in der Subgruppe)

## Physiologische EKG-Veränderungen

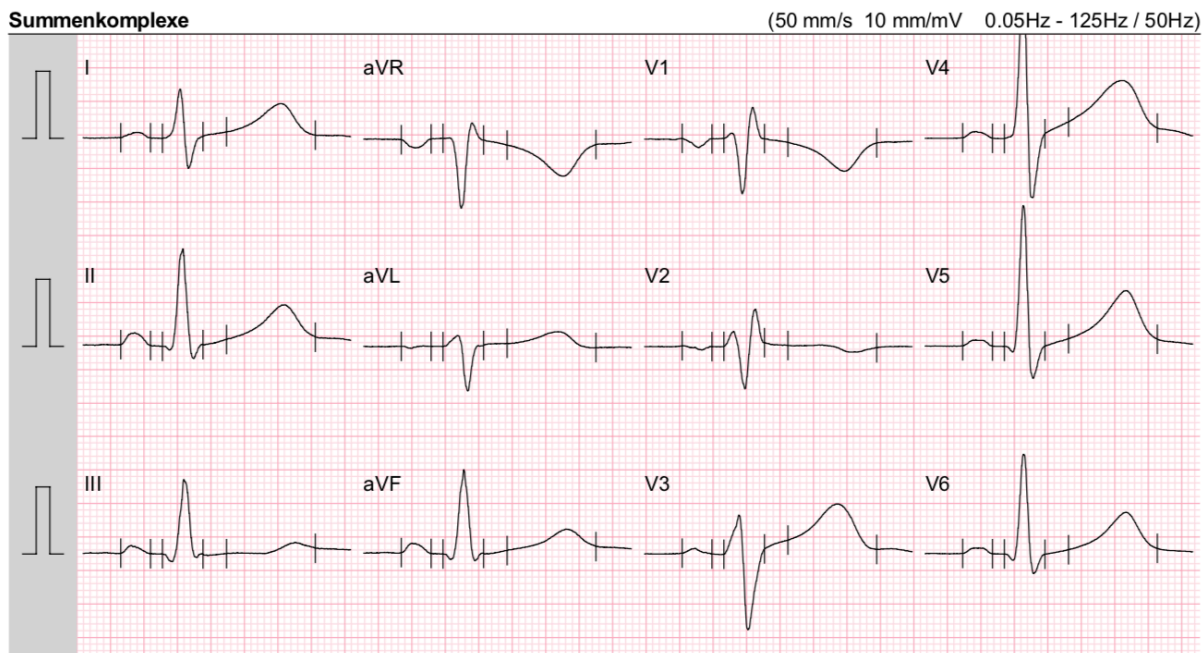
### Sokolow-Lyon-Index >3,5

In der Gruppe 1 war ein Sokolow-Lyon-Index >3,5mV bei 86 der 675 Proband\*innen zu finden (12,7%). In der Gruppe 2 wiesen 26 der 186 Proband\*innen die Veränderung auf (14,0%).

### Inkompletter Rechtsschenkelblock (iRSB)

Der iRSB kam in Gruppe 1 bei 120 der 675 Proband\*innen vor (17,8%). In Gruppe 2 war er bei 41 Proband\*innen zu finden (22,0%).

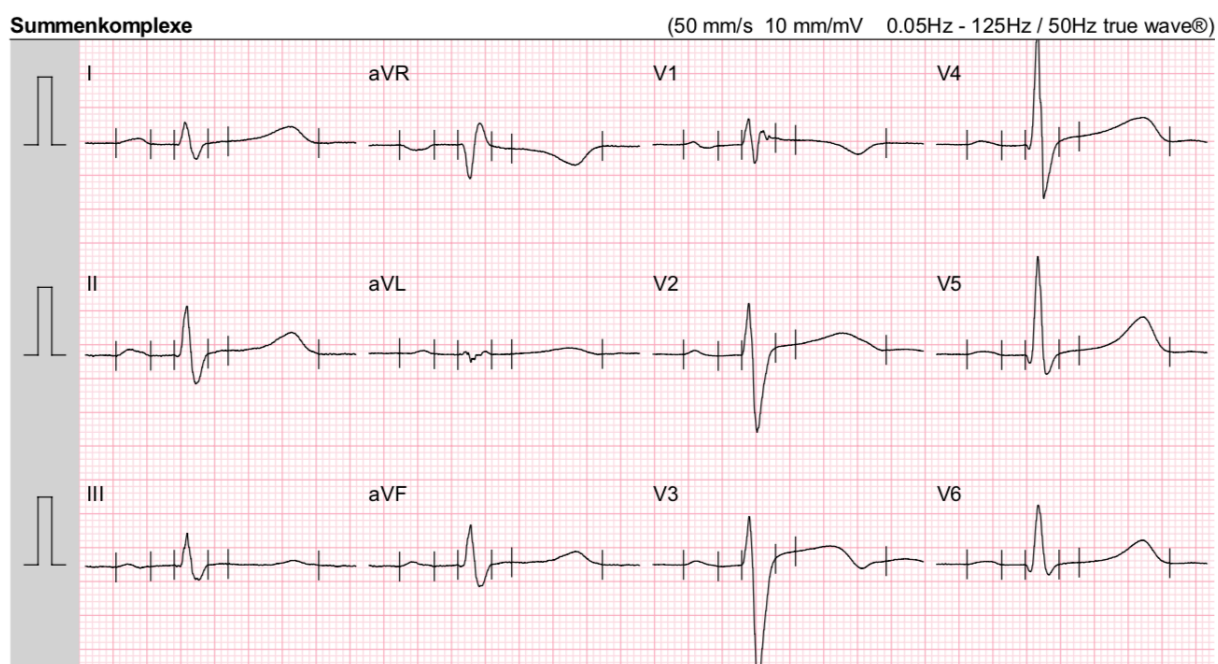
**Abbildung 1:** EKG eines 18jährigen Probanden mit inkomplettem Rechtsschenkelblock (Eigene Darstellung)



### Frühe Repolarisation

Kriterien für frühe Repolarisation waren bei 226 der Proband\*innen der Gruppe 1 nachzuweisen (33,5%). In Gruppe 2 wiesen 53 der Proband\*innen die Veränderung auf (28,5%).

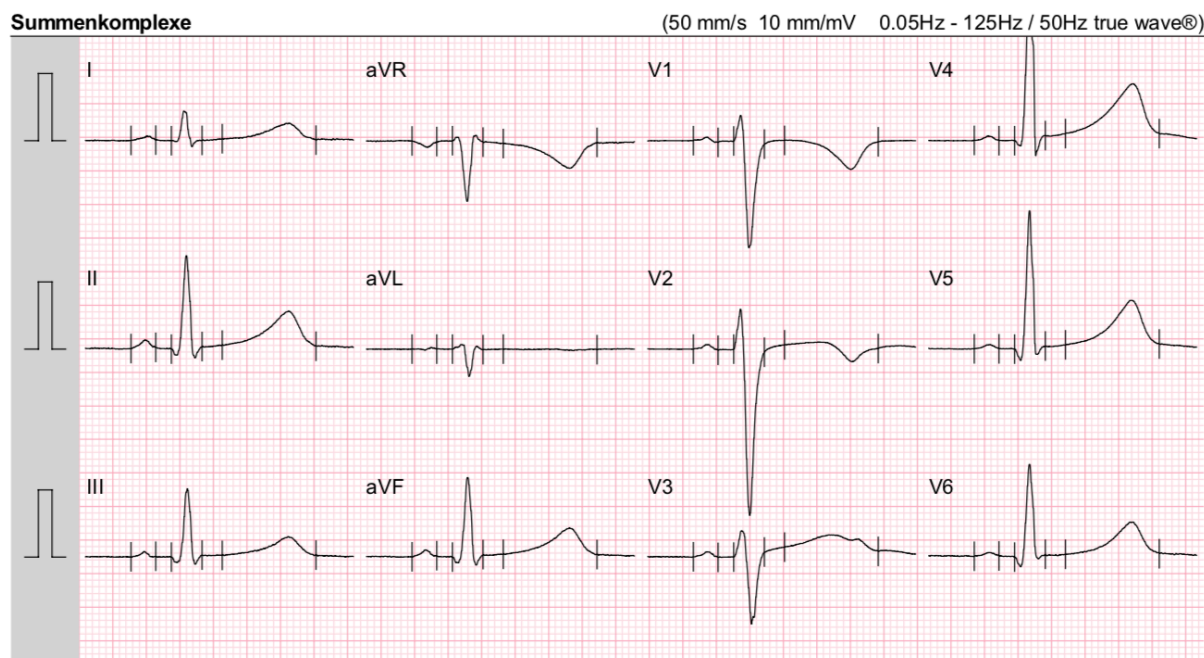
**Abbildung 2:** EKG eines 11jährigen Probanden mit Früher Repolarisation (Eigene Darstellung)



### Juvenile T wave pattern

202 Proband\*innen der Gruppe 1 wiesen Kriterien einer juvenile T wave pattern auf (29,9%). Von den Proband\*innen der Gruppe 2 zeigten 38 diese Veränderung (20,4%).

**Abbildung 3:** EKG eines 12jährigen Probanden mit Juvenile T wave pattern (Eigene Darstellung)



### Sinusbradykardie $\geq 30$ Schläge pro Minute

In der Gruppe 1 zeigten 162 der Proband\*innen die Veränderung (24%). 66 Proband\*innen der Gruppe 1 wiesen eine Sinusbradykardie auf (35,5%).

### Sinusarrhythmie

Hierbei handelt es sich um respiratorische Arrhythmie, die auf dem sogenannten Bainbridge Reflex beruht (physiologische Zunahme der Herzfrequenz bei Inspiration) (50).

In der Gruppe 1 zeigten 442 Proband\*innen diese Veränderung (65,5%). Sinusarrhythmie konnte bei 110 Proband\*innen der Gruppe 2 nachgewiesen werden (59,1%).

### Ektoper Vorhofrhythmus

Ein ektoper Vorhofrhythmus war weder in Gruppe 1 noch 2 nachzuweisen.

### Junktionaler Ersatzrhythmus

Bei vier Proband\*innen der Gruppe 1 war diese Veränderung zu finden (0,6%). In der Gruppe 2 war kein junktionaler Ersatzrhythmus nachweisbar.

### AV-Block 1°

82 der Gruppe 1 Proband\*innen wiesen einen AV-Block Grad 1 auf (12,1%). In Gruppe 2 trat der AV-Block 1° bei 31 Proband\*innen auf (16,7%).

### AV-Block 2° Typ Mobitz

Die Veränderung war weder in Gruppe 1 noch in Gruppe 2 nachzuweisen.

## **Borderline EKG-Veränderungen**

### Überdrehter Linkstyp

Keiner der Proband\*innen Gruppe 1 wies einen überdrehten Linkstyp auf. In Gruppe 2 wies ein\*e Proband\*in Kriterien für einen überdrehten Linkstyp auf (0,5%).

### Linksatriale Vergrößerung

Diese Veränderung war bei keinem der Proband\*innen festzustellen.

### Überdrehter Rechtstyp

Eine\*r der Proband\*innen der Gruppe 1 wies diese Veränderung auf (0,1%). In der Gruppe 2 war der überdrehte Rechtstyp nicht nachzuweisen.

### Rechtsatriale Vergrößerung

Kriterien für rechtsatriale Vergrößerung waren in Gruppe 1 bei 13 Proband\*innen nachweisbar (1,9%).

In Gruppe 2 trat die Veränderung bei acht Proband\*innen auf (4,3%).

### Kompletter Rechtsschenkelblock

In Gruppe 1 trat kein kompletter Rechtsschenkelblock auf. Drei Proband\*innen der Gruppe 2 zeigten einen kompletten Rechtsschenkelblock im EKG (1,6%).

## **Pathologische EKG-Veränderungen**

### T-Wellen-Inversion

Anterior: Sechs Proband\*innen der Gruppe 1 wiesen eine anteriore T-Wellen-Inversion auf (0,9%). In der Gruppe 2 wiesen zwei Proband\*innen die Veränderung auf (1,1%).

Lateral: Die laterale T-Wellen-Inversion trat bei 12 Proband\*innen der Gruppe 1 auf (1,8%). In Gruppe 2 trat die Veränderung nicht auf.

Inferolateral: Zwei Proband\*innen der Gruppe 1 wiesen eine inferolaterale T-Wellen-Inversion auf (0,3%). In Gruppe 2 war die Veränderung bei einem Probanden/einer Probandin nachzuweisen (0,5%).

Inferior: Inferiore T-Wellen-Inversion kam bei keiner\*m der Proband\*innen vor.

### ST-Segment Depression

Eine ST-Segment Depression in zwei aufeinanderfolgenden Ableitungen kam in der Gruppe 1 bei 12 Proband\*innen vor (1,8%).

In Gruppe 2 war die Veränderung bei drei Proband\*innen nachzuweisen (1,6%).

### Pathologische Q-Welle

Pathologische Q-Welle wurden bei keinem der Proband\*innen nachgewiesen.

### Kompletter Linksschenkelblock

Keine\*r der Proband\*innen wies Kriterien eines kompletten Linksschenkelblocks auf.

### Unspezifische intraventrikuläre Überleitungsstörung

Kein\*e Proband\*in erfüllte die Kriterien für eine unspezifische intraventrikuläre Überleitungsstörung.

### Epsilon Potential

In Gruppe 1 kamen zwei Proband\*innen mit Epsilon Potential vor (0,3%). Eine\*r der Proband\*innen der Gruppe 2 wies ein Epsilon Potential auf (0,5%).

### Ventrikuläre Präexzitation

Eine\*r der Proband\*innen der Gruppe 1 wies Kriterien für ventrikuläre Präexzitation auf (0,1%). In Gruppe 2 kam diese Veränderung nicht vor.

### Verlängerte QTc-Zeit

Eine QTc-Zeit über 470ms bei männlichen Probanden beziehungsweise über 480ms bei weiblichen Probandinnen kam bei neun Proband\*innen der Gruppe 1 vor, davon alle männlich (1,3%). Drei der Proband\*innen der Gruppe 2 wiesen eine verlängerte QTc-Zeit auf, auch diese waren alle männlich (1,6%).

### Brugada Typ 1 Veränderung

Keine\*r der Proband\*innen wies Kriterien für eine Brugada Typ 1 Veränderung auf.

### Tiefe Sinusbradykardie <30 Schläge pro Minute

Sinusbradykardien <30 Schläge pro Minute waren bei keinem\*r der Proband\*innen zu finden.

### Sehr langer AV-Block

Keine\*r der Proband\*innen wies PR-Intervalle >400ms und damit die Kriterien für einen sehr langen AV-Block auf.

### AV-Block 3° und AV-Block 2° Typ Mobitz II

Keine\*r der Proband\*innen wies Kriterien für höhergradigen AV-Block auf.

### Atriale Tachyarrhythmien

Zwei der Gruppe 1 Proband\*innen zeigten atriale Tachyarrhythmien (0,3%). In Gruppe 2 trat diese Veränderung nicht auf.

### Ventrikuläre Arrhythmien (Extrasystolen)

Ventrikuläre Arrhythmien kamen bei zwei Proband\*innen der Gruppe 1 vor (0,3%). In Gruppe 2 kam diese Veränderung nicht vor.

Für die Schätzung der Auftretenswahrscheinlichkeit wurde das 95% Konfidenzintervall berechnet. Dies wird exakt nach der Clopper Pearson Methode bestimmt. In der Darstellung wird die Unterteilung in Subgruppen beibehalten.

Im Folgenden sollen nur explizit die Veränderungen genannt sein, die als relevant betrachtet werden können. Angaben aller 95%-Konfidenzintervalle sind der Tabelle 6 zu entnehmen.



**Tabelle 6: Punktschätzung und 95%-Konfidenzintervall Übersicht Gruppe 1(8-12jährige Proband\*innen) und Gruppe 2 (13-18jährige Proband\*innen)**

Parameter	Gruppe 1 (n= 675)			Gruppe 2 (n=186)		
	Punktschätzung	95%-KI obere	95%-KI untere	Punktschätzung	95%-KI obere	95%-KI untere
Überdrehter Rechtstyp	0,001	0,000	0,008	0,000	0,000	0,02
Überdrehter Linkstyp	0,000	0,000	0,005	0,005	0,000	0,03
Pathologische Q-Welle	0,000	0,000	0,005	0,000	0,000	0,02
Sinusbradykardie	0,24	0,208	0,274	0,355	0,286	0,428
Starke Sinusbradykardie	0,000	0,000	0,005	0,000	0,000	0,02
Frühe Repolarisation	0,335	0,299	0,372	0,285	0,221	0,356
Juvenile T-wave-pattern	0,299	0,265	0,335	0,204	0,149	0,269
T-Wellen-Inversion anterior	0,009	0,003	0,019	0,011	0,001	0,038
T-Wellen-Inversion lateral	0,018	0,009	0,031	0,000	0,000	0,002
T-Wellen-Inversion inferolateral	0,003	0,000	0,011	0,005	0,000	0,03
T-Wellen-Inversion inferior	0,000	0,000	0,005	0,000	0,000	0,02
Links atriale Vergrößerung	0,000	0,000	0,005	0,000	0,000	0,02
Rechts atriale Vergrößerung	0,019	0,010	0,033	0,043	0,019	0,083
Unspezifische intraventrikuläre Überleitungsstörung	0,000	0,000	0,005	0,000	0,000	0,02
Kompletter LSB	0,000	0,000	0,005	0,000	0,000	0,02
Kompletter RSB	0,000	0,000	0,005	0,016	0,003	0,046
iRSB	0,178	0,15	0,209	0,22	0,163	0,287
QTc>470ms bei männlichen Probanden	0,013	0,006	0,025	0,016	0,003	0,046
QTc>480ms bei weiblichen Probandinnen	0,000	0,000	0,005	0,000	0,000	0,02
Atriale Tachyarrhythmien	0,003	0,000	0,011	0,000	0,000	0,02
Ventrikuläre Arrhythmien	0,003	0,000	0,011	0,000	0,000	0,02
AV Block I°	0,121	0,098	0,149	0,167	0,116	0,228
Epsilon Potential	0,003	0,000	0,011	0,005	0,000	0,03
Ventrikuläre Präexzitation	0,001	0,000	0,008	0,000	0,000	0,02
Ektoper Vorhofrhythmus	0,000	0,000	0,005	0,000	0,000	0,02
Sinusarrhythmie	0,655	0,618	0,691	0,591	0,517	0,663
Junktionaler Ersatzrhythmus	0,006	0,002	0,015	0,000	0,000	0,02
Sokolow Lyon Index >3,5	0,127	0,103	0,155	0,14	0,093	0,198
ST Depression zwei aufeinanderfolgende Ableitungen $\geq 0,05m$	0,018	0,009	0,031	0,016	0,003	0,046
Brugada 1 pattern	0,000	0,000	0,005	0,000	0,000	0,02

Tabelle 6. Punktschätzung und 95%-Konfidenzintervall Übersicht Gruppe 1(8-12jährige Proband\*innen) und Gruppe 2 (13-18jährige Proband\*innen); (KI= Konfidenzintervall; n=Anzahl; Punktschätzung= relative Auftretens-Häufigkeit in Prozent; obere=obere Grenze des 95%-KI, untere=untere Grenze des 95%-KIs; AV-Block= Atrioventrikulärer Block; RSB/LSB= Rechts-/Linksschenkelblock; iRSB= inkompletter Rechtsschenkelblock)

## **Gruppe 1 (8-12 Jährige)**

### **Physiologische EKG-Veränderungen**

Das Auftreten der Veränderung Sinusbradykardie ist mit einer Auftretens-Häufigkeit von 24% und einem 95%-KI von 20,8%-27,4% nachzuweisen. Die frühe Repolarisation tritt mit 33,5% (KI: 29,9%-37,2%) auf. Auch die juvenile T wave pattern tritt in der Stichprobengruppe relevant auf mit 29,9% (KI: 26,5%-33,5%). Der iRSB tritt auf mit 17,8% (KI: 15,0%-20,9%). Weiterhin treten der AV-Block 1° auf mit 12,1% (KI: 9,8%-14,9%) sowie die respiratorische Sinusarrhythmie mit 65,5% (KI: 61,8%-69,1%). Auch der junktionale Ersatzrhythmus tritt auf mit 0,6% (KI: 0,2%-1,5%). Ein Sokolow-Lyon-Index  $>3,5\text{mV}$  ist in der Gruppe nachzuweisen mit 12,7% (KI: 10,3%-15,5%).

### **Borderline EKG-Veränderungen**

Das Auftreten der rechtsatrialen Vergrößerung ist mit 1,9% (KI: 1,0%-3,3%) nachzuweisen.

### **Pathologische EKG-Veränderungen**

Das Auftreten der T-Wellen-Inversion anterior mit 0,9% (KI: 0,3%-1,9%) sowie der T-Wellen-Inversion lateral mit 1,8% (KI: 0,9%-3,1%) sind nachweisbar. Bei den pathologischen Veränderungen tritt die QTc-Verlängerung  $>470\text{ms}$  bei männlichen Probanden auf mit 1,3% (KI: 0,6%-2,5%). Ebenfalls nachweisbar ist die ST-Segment Depression mit 1,8% und einem KI von 0,9%-3,1%.

## **Gruppe 2 (13-18 Jährige)**

### **Physiologische EKG-Veränderungen**

Die Sinusbradykardie kommt mit einer Auftretens-Häufigkeit von 35,5% und einem KI von 28,6%-42,8% vor. Ebenfalls lässt sich die frühe Repolarisation nachweisen mit 28,5% (KI: 22,1%-35,6%) sowie die juvenile T wave pattern mit 20,4% (KI: 14,9%-26,9%). Nachweisbar kommt auch der iRSB vor mit 22% (KI: 16,3%-28,7%). Der AV-Block 1° mit 16,7% (KI: 11,6%-22,8%) und die respiratorische Sinusarrhythmie mit 59,1% (KI: 51,7%-66,3%) treten nachweisbar auf. Ebenso ist ein Sokolow-Lyon-Index  $>3,5\text{mV}$  nachzuweisen mit 14% (KI: 9,3%-19,8%).

### **Borderline EKG-Veränderungen**

Nachzuweisen ist die rechtsatriale Vergrößerung mit 4,3% (KI: 1,9%-8,3%). Der komplette RSB ist in der Subgruppe nachzuweisen mit 1,6% (KI: 0,3%-4,6%).

### **Pathologische EKG-Veränderungen**

Eine verlängerte QTc bei männlichen Probanden tritt mit einer Auftretens-Häufigkeit von 1,6% und einem KI von 0,3%-4,6% auf. Die ST-Segment-Depression kommt ebenfalls vor mit 1,6% (KI: 0,3%-4,6%). Die anteriore T-Wellen-Inversion kommt vor mit 1,1% (KI: 0,1%-3,8%).

## **3.2 Vergleich der Auftretens-Häufigkeiten der EKG-Veränderungen der jugendlichen Proband\*innen mit den in der Literatur gefundenen Werten bei erwachsenen Athlet\*innen**

### **Physiologische Veränderungen**

Sinusbradykardie <60bpm konnten Huttin et al. (14) bei 54% der Athlet\*innen nachweisen. Corrado et al. (35) beschreiben Werte zwischen 15-70%.

Bei den jugendlichen Proband\*innen kam Sinusbradykardie mit 24,0% (KI: 20,8; 27,4) in der Gruppe 1 und mit 35,5% (KI: 28,6; 42,8) in Gruppe 2 vor. Es besteht also ein Unterschied zwischen dem Vorkommen bei den jugendlichen Athlet\*innen und dem der erwachsenen Athlet\*innen nach Huttin et al. (16). Da die Angabe von Corrado et al. (19) in diesem Fall wie oben erwähnt sehr weit gefasst ist, kann hier nicht von einem Unterschied gesprochen werden.

Das Vorkommen von AV-Block 1° ergibt bei Huttin et al. (14) eine Häufigkeit von 8% in ihrer Stichprobe. Nakamoto (36) stellte AV-Block 1° bei 10% der Athlet\*innen fest. Auch Corrado et al. (35) geben eine Häufigkeit von 10% an.

In der jugendlichen Stichprobe kommt der AV-Block 1° bei den Proband\*innen der Gruppe 1 mit 12,1% vor (KI: 9,8; 14,9) sowie bei den Proband\*innen der Gruppe 2 mit 16,7% (KI: 11,6; 22,8). Bei den Proband\*innen der Gruppe 2 kam diese Veränderung folglich etwas häufiger vor als bei erwachsenen Athlet\*innen beschrieben.

Der iRSB konnte bei Huttin et al. (14) bei 3% der Proband\*innen nachgewiesen werden. Zaidi et al. (15) berichten von 4,8%. Nakamoto (36) konnte eine Häufigkeit von 35% nachweisen und auch Corrado et al. (35) geben Werte zwischen 35% und 50% an.

In der jugendlichen Stichprobe kam der iRSB in der Gruppe 1 mit 17,8% vor (KI: 15,0; 20,9). In der Gruppe 2 beträgt die Häufigkeit 22% (KI: 16,3; 28,7).

Bei den jugendlichen Proband\*innen kommt die Veränderung demnach seltener vor als bei Corrado et al. (19) beschrieben. Der iRSB ist aber deutlich häufiger bei den jugendlichen Proband\*innen nachweisbar als sowohl bei Zaidi et al (26) als auch Huttin et al. (16) beschrieben.

Kriterien für Linksherzhypertrophie (Sokolow-Lyon-Index) konnten Huttin et al. (14) bei 37% der Proband\*innen nachweisen. Zaidi et al. (15) fanden die Veränderung bei 33% ihrer Proband\*innen. Corrado et al. beschreiben Werte bis zu 80%.

In der jugendlichen Stichprobe waren Kriterien für Linksherzhypertrophie bei 12,7% der Gruppe 1 Proband\*innen (KI: 10,3; 15,5) sowie 14% der Gruppe 2 Proband\*innen (KI: 9,3; 19,8) nachzuweisen. Bezogen auf das Vorkommen eines erhöhten Sokolow-Lyon-Index besteht also ein deutlicher quantitativer Unterschied zwischen erwachsenen und jugendlichen Athlet\*innen.

Für das Vorkommen Früher Repolarisation machen nur Corrado et al. (35) eine Angabe. Sie geben Werte zwischen 50% und 80% an. Die Veränderung kommt deutlich seltener in beiden jugendlichen Subgruppen vor: Gruppe 1: 33,5% (KI: 29,9; 37,2); Gruppe 2: 28,5% (KI: 22,1; 35,6). Hier besteht ebenfalls ein quantitativer Unterschied.

### **Borderline Veränderungen**

Huttin et al. (14) beschreiben den kompletten RSB mit einer Vorkommens-Häufigkeit von 0,5%. In der jugendlichen Stichprobe kommt der komplette RSB ausschließlich in der Gruppe 2 mit 1,6% (KI: 0,3; 4,6) vor. Da das 95%-KI die bei Erwachsenen angegebenen Werte einschließt kann hier nicht von einem quantitativen Unterschied gesprochen werden.

Linksatriale Vergrößerung konnten Zaidi et al. (15) bei 2,8% der Proband\*innen feststellen, in der jugendlichen Stichprobe kommt die linksatriale Vergrößerung nicht vor. Auch hier besteht folglich ein quantitativer Unterschied.

Rechtsatriale Vergrößerung untersuchten nur Zaidi et al. (15). Sie beschreiben eine Häufigkeit von 1,1%.

In der Gruppe 1 ist die rechtsatriale Vergrößerung bei 1,9% der Proband\*innen nachweisbar (KI: 1,0; 3,3), in Gruppe 2 bei 4,3% der Proband\*innen (KI: 1,9; 8,3). Es besteht also lediglich ein Unterschied bezogen auf die Gruppe 2.

Überdrehter Rechtstyp wird von Zaidi et al. (15) mit einer Häufigkeit von 1,1% beschrieben.

In der jugendlichen Stichprobe kommt diese Veränderung ausschließlich bei den Gruppe 1 Proband\*innen mit einer Häufigkeit von 0,1% (KI: 0,0-0,8) vor. Daraus ergibt sich ein quantitativer

Unterschied zwischen jugendlichen Athlet\*innen und den bei erwachsenen Athlet\*innen beschriebenen Häufigkeiten.

Überdrehter Linkstyp kam bei den Proband\*innen von Zaidi et al. (15) mit einer Häufigkeit von 2,6% vor. In der jugendlichen Stichprobe war diese Veränderung ausschließlich in Gruppe 2 nachzuweisen; mit einer Häufigkeit von 0,5% (KI: 0-3,0). Da im 95%-KI der bei erwachsenen Athlet\*innen beschriebene Wert enthalten ist, kann nicht von einem Unterschied ausgegangen werden.

### **Pathologische Veränderungen**

Die T-Wellen-Inversion (TWI) wurde nur von Zaidi et al. (15) untersucht. Sie beschreiben anteriore TWI bei 7,3%, inferiore TWI bei 3,5% und laterale TWI bei 0,6% der Athlet\*innen.

In der jugendlichen Stichprobe konnte die anteriore TWI deutlich seltener nachgewiesen werden (Gruppe 1: 0,9%; KI: 0,3; 1,9 und Gruppe 2: 1,1%; KI: 0,1; 3,8). Die laterale TWI kommt häufiger in der jugendlichen Stichprobe vor. Sie kommt ausschließlich in Gruppe 1 mit 1,8% vor (KI: 0,9; 3,1). Die inferiore TWI kommt bei den jugendlichen Proband\*innen nicht vor.

Eine Verlängerung der QTc-Zeit konnten Huttin et al. (14) bei 3% ihrer Proband\*innen nachweisen. Bei der jugendlichen Stichprobe konnte eine verlängerte QTc-Zeit in Gruppe 1 mit einer Häufigkeit von 1,3% festgestellt werden (KI: 0,6-2,5). In der Gruppe 2 betrug die Häufigkeit 1,6% (KI: 0,3-4,6). Es besteht ein Unterschied zwischen der Gruppe 1 und den bei erwachsenen Athlet\*innen beschriebenen Werten. Dieser Unterschied besteht zwischen der Gruppe 2 und den Werten Erwachsener nicht.

Pathologische Q-Wellen wiesen Zaidi et al. (15) bei 0% der Proband\*innen nach. Auch in der jugendlichen Stichprobe zeigte kein\*e Proband\*in diese Veränderung. Zaidi et al. (15) beschreiben ST-Segment Depression bei 0,1% der Fälle. In der jugendlichen Stichprobe wiesen in Gruppe 1 1,8% der Proband\*innen diese Veränderung auf (KI: 0,9-3,1). In Gruppe 2 war ST-Segment Depression bei 1,6% der Proband\*innen nachweisbar (KI: 0,3-4,6). Es besteht ein Unterschied zwischen den Werten Jugendlicher und den Werten, die bei Erwachsenen beschrieben sind.

Epsilon Potentiale traten bei keinem\*r der Proband\*innen von Zaidi et al. (15) auf. In der jugendlichen Stichprobe waren Epsilon Potentiale sowohl in der Gruppe 1 (0,3%; KI: 0-1,1) als auch in Gruppe 2 (0,5%; KI: 0-3,0) nachweisbar. Es besteht kein Unterschied.

### 3.3 Vergleich der Auftretens-Häufigkeiten der EKG-Veränderungen zwischen der Gruppe der 8-12 Jährigen und der Gruppe der 13-18 Jährigen

#### Betrachtung der 95%-Konfidenzintervalle

Vergleicht man die 95%-Konfidenzintervalle so lässt sich feststellen, dass bezogen auf die meisten Veränderungen ein Unterschied in der Auftretens-Häufigkeit zwischen den beiden Altersgruppen besteht. Dieser Unterschied ist aber in den meisten Fällen nicht groß genug um die KIs voneinander zu trennen.

Die Ausnahme bildet die Veränderung Sinusbradykardie. Diese ist mit 35,5% (KI: 28,6-42,8) deutlich häufiger in Gruppe 2 als in Gruppe 1, in der sie mit einer Häufigkeit von 24,0% (KI: 20,8-27,4) vorkommt.

#### Chi-Quadrat-Test

Drei der EKG-Veränderungen unterscheiden sich signifikant:

Es besteht eine signifikante Abhängigkeit zwischen dem Vorkommen von Sinusbradykardie und der Subgruppenzugehörigkeit ( $\chi^2=9,878$ ;  $df=1$   $p=0,002$ ). Der korrigierte Kontingenzkoeffizient ( $K^*=0,15$ ) deutet auf einen schwachen Zusammenhang hin.

Es besteht eine signifikante Abhängigkeit zwischen dem Vorkommen der juvenilen T wave pattern und der Subgruppenzugehörigkeit ( $\chi^2=6,54$ ;  $df=1$ ;  $p=0,011$ ). Der korrigierte Kontingenzkoeffizient ( $K^*=0,12$ ) deutet auf einen schwachen Zusammenhang hin.

Es besteht eine signifikante Abhängigkeit zwischen dem Vorkommen des kompletten RSB und der Subgruppenzugehörigkeit ( $\chi^2=10,925$ ;  $df=1$ ;  $p=0,001$ ). Der korrigierte Kontingenzkoeffizient ( $K^*=0,16$ ) deutet auf einen schwachen Zusammenhang hin.

Außerdem auffallend ist der deutliche Unterschied zwischen den Auftretens-Häufigkeiten der Veränderung überdrehter Linkstyp zwischen Gruppe 1 und Gruppe 2. Bei dem Unterschied ist mit ( $\chi^2=3,633$ ;  $df=1$ ;  $p=0,057$ ) von einer marginalen Signifikanz zu sprechen.

#### **Gruppe 1 (8-12 Jährige)**

In dieser Gruppe besteht eine signifikante Abhängigkeit zwischen dem Auftreten der Sinusbradykardie und der Geschlechtszugehörigkeit ( $\chi^2=6,043$ ;  $df=1$ ;  $p=0,014$ ). Sinusbradykardien

kommen signifikant häufiger bei männlichen Probanden vor. Der korrigierte Kontingenzkoeffizient ( $K^*=0,13$ ) weist auf einen schwachen Zusammenhang hin.

Es besteht eine signifikante Abhängigkeit zwischen dem Vorkommen früher Repolarisation und der Geschlechtszugehörigkeit ( $\chi^2=19,066$ ;  $df=1$ ;  $p<0,001$ ). Auch die frühe Repolarisation kommt signifikant häufiger bei männlichen Probanden vor. Der korrigierte Kontingenzkoeffizient ( $K^*=0,234$ ) weist auf einen schwachen Zusammenhang hin.

### **Gruppe 2 (13-18 Jährige)**

Auch in dieser Gruppe besteht eine signifikante Abhängigkeit zwischen dem Auftreten der Sinusbradykardie und der Geschlechtszugehörigkeit ( $\chi^2=6,474$ ;  $df=1$ ;  $p=0,011$ ). Eine Sinusbradykardie ist signifikant häufiger bei männlichen Probanden zu finden. Der korrigierte Kontingenzkoeffizient ( $K^*=0,26$ ) weist auf einen schwachen Zusammenhang hin. Dieser Zusammenhang ist deutlich stärker als in Gruppe 1.

Es besteht ebenfalls eine signifikante Abhängigkeit zwischen dem Vorkommen der frühen Repolarisation und der Geschlechtszugehörigkeit ( $\chi^2=18,295$ ;  $df=1$ ;  $p<0,001$ ). Männliche Probanden zeigen signifikant häufiger die Veränderung frühe Repolarisation. Der korrigierte Kontingenzkoeffizient ( $K^*=0,423$ ) weist auf einen schwachen Zusammenhang hin.

Außerdem besteht eine signifikante Abhängigkeit zwischen der Vorkommens-Häufigkeit der juvenile T wave pattern und der Geschlechtszugehörigkeit ( $\chi^2=6,676$ ;  $df=1$ ;  $p=0,01$ ). Juvenil T wave patterns lassen sich signifikant häufiger bei weiblichen Probandinnen nachweisen. Der korrigierte Kontingenzkoeffizient ( $K^*=0,263$ ) weist auf einen schwachen Zusammenhang hin.

Es besteht eine signifikante Abhängigkeit zwischen dem Vorkommen von Kriterien für Linksherzhypertrophie (Sokolow-Lyon-Index  $>3,5mV$ ) und der Geschlechtszugehörigkeit ( $\chi^2=11,729$ ;  $df=1$ ;  $p=0,001$ ). Kriterien für Linksherzhypertrophie sind signifikant häufiger bei männlichen Probanden nachzuweisen als bei weiblichen. Der korrigierte Kontingenzkoeffizient ( $K^*=0,345$ ) weist auf einen schwachen Zusammenhang hin.

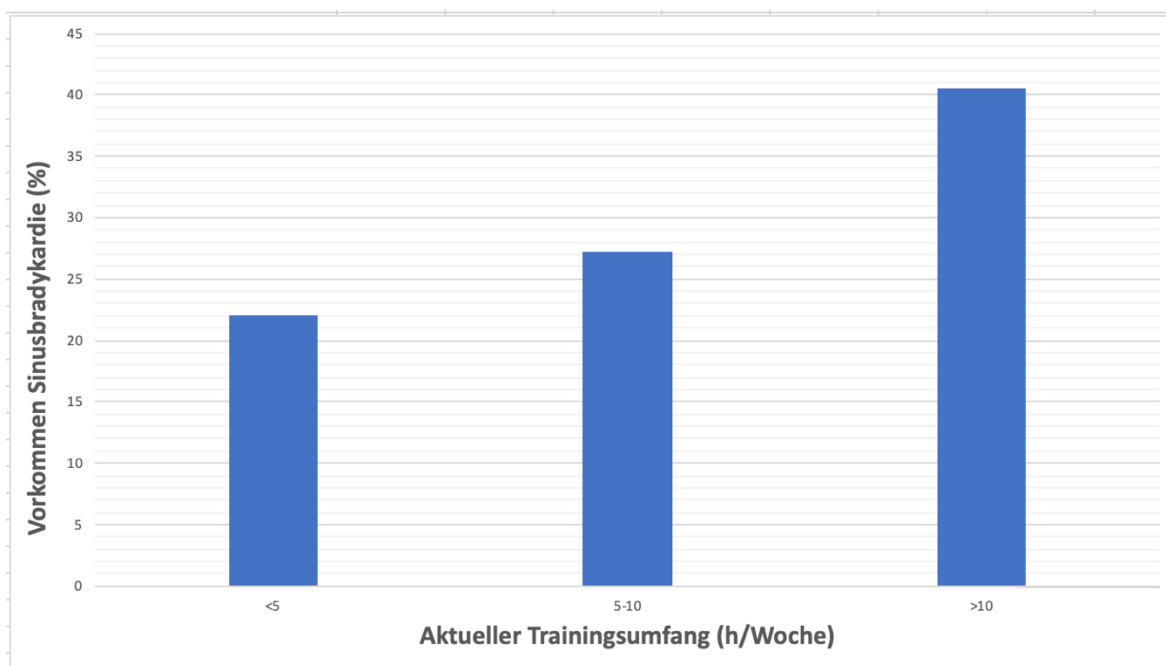
Ein deutlicher Geschlechterunterschied ist auch bezogen auf das Kriterium AV-Block 1° zu erkennen, der marginal signifikant ist ( $\chi^2=3,609$ ;  $df=1$ ;  $p=0,057$ ). Der AV-Block 1° kommt häufiger bei weiblichen Probandinnen vor als bei männlichen Probanden.

### 3.4 Zusammenhang zwischen aktuellem Trainingsumfang sowie der Dauer des leistungssportlichen Trainings und dem Auftreten von EKG-Veränderungen bei jugendlichen Athlet\*innen

Bei Betrachtung der Gesamtstichprobe ist eine Korrelation zwischen dem Vorkommen des überdrehten Linkstyps und dem angegebenen aktuellen Trainingsumfang nachweisbar (Korrelationskoeffizient (KK)= -0,122;  $p=0,002$ ). Je höher der aktuelle Trainingsumfang ist, desto häufiger tritt die Veränderung überdrehter Linkstyp auf.

Eine hochsignifikante Korrelation besteht ebenfalls zwischen dem Vorkommen von Sinusbradykardie und dem angegebenen aktuellen Trainingsumfang (KK=-0,151;  $p<0,001$ ). Berechnet man die Korrelation für die Subgruppen getrennt, so ist festzustellen, dass diese Korrelation ausschließlich in der Gruppe 2 signifikant vorliegt (KK= -0,163;  $p=0,031$ ). Innerhalb der Gruppe 1 besteht keine signifikante Korrelation (KK=-0,066;  $p=0,145$ ). Die Korrelation ist in Abbildung 4 veranschaulicht.

**Abbildung 4:** Korrelation des Auftretens von Sinusbradykardie in Zusammenhang mit dem aktuellen Trainingsumfang



*Abbildung 4.* Die Prozentangabe bezieht sich auf die Anzahl der Proband\*innen mit gleichem angegebenem aktuellem Trainingsumfang. Die Daten beziehen sich auf eine Fallzahl von  $n=659$

Bei der Untersuchung der Korrelation zwischen Auftretens-Häufigkeit der Veränderungen und der angegebenen Dauer des leistungssportlichen Trainings lassen sich zwei signifikante Ergebnisse nachweisen.



Die Veränderung Sokolow-Lyon-index  $>3,5\text{mV}$  und die angegebene Dauer des leistungssportlichen Trainings korrelieren positiv miteinander ( $KK=-0,084$ ;  $p=0,042$ ). Je länger die angegebene Dauer des leistungssportlichen Trainings ist, desto häufiger tritt die Veränderung auf. Berechnet man die Korrelation für die Subgruppen getrennt lässt sich feststellen, dass diese Korrelation ausschließlich in Gruppe 1 signifikant ist ( $KK=-0,1$ ;  $p=0,039$ ). Innerhalb der Gruppe 2 besteht keine signifikante Korrelation ( $KK=-0,078$ ;  $p=0,323$ ). Die Korrelation ist in Abbildung 5 veranschaulicht.

**Abbildung 5:** Korrelation des Auftretens von erhöhtem Sokolow-Lyon-Index und der Dauer des leistungssportlichen Trainings

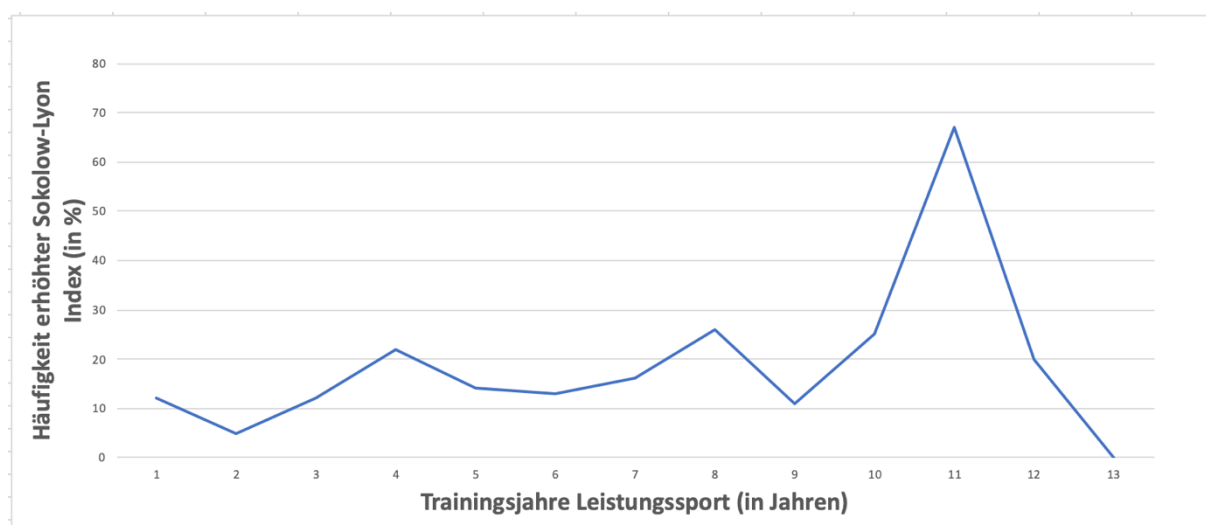


Abbildung 5. Die Prozentangaben beziehen sich auf die Anzahl der Proband\*innen mit identischer Anzahl an Trainingsjahren im Leistungssport. In die Berechnung flossen die Daten von  $n=591$  Proband\*innen ein

Bei Betrachtung der beiden Subgruppen ist eine Korrelation zwischen der EKG-Veränderung Frühe Repolarisation und der angegebenen Dauer des leistungssportlichen Trainings nachweisbar, die ausschließlich in Gruppe 2 signifikant ist ( $KK=-0,18$ ;  $p=0,022$ ).

---

## 4. Diskussion

### 4.1 Auftreten Athlete's Heart typischer EKG-Veränderungen bei jugendlichen Athlet\*innen

Die vorliegende Untersuchung weist an einer rein jugendlichen Stichprobe von 861 jugendlichen Fußballspieler\*innen im Alter von 8-18 Jahren typische trainingsinduzierte EKG-Veränderungen nach. Diese gleichen qualitativ den in den *International Recommendations for Electrocardiographic Interpretation in Athletes* 2018 (12) für erwachsene Athlet\*innen veröffentlichten EKG-Veränderungen. Sie lassen sich entsprechend den für erwachsene Athlet\*innen dort definierten Kriterien in physiologisch, borderline und pathologisch klassifizieren. Die EKG-Veränderungen der jugendlichen Athlet\*innen gleichen den trainingsinduzierten EKG-Veränderungen, die bei erwachsenen Athlet\*innen beschrieben sind und dort als ‚Athlete's Heart‘ bezeichnet werden (4, 10-12). Die vorliegende Untersuchung bestätigt die Erkenntnisse bisheriger Studien, dass EKGs jugendlicher Leistungssportler\*innen sich von denen nicht-leistungssportlich-aktiver Jugendlicher unterscheiden (31, 32). Die vorliegende Studie klassifiziert darüber hinaus die trainingsinduzierten EKG-Veränderungen der jugendlichen Athlet\*innen nach Vorbild der in den *International Recommendations for Electrocardiographic Interpretation in Athletes* 2018 (12) für erwachsene Athlet\*innen beschriebenen Kriterien. Dadurch ist ein Vergleich mit den bei erwachsenen Athlet\*innen veröffentlichten EKG-Veränderungen möglich. Zur genaueren Differenzierung wurden zwei Untersuchungsgruppen gebildet (die 8-12jährigen Athlet\*innen und die 13-18jährigen Athlet\*innen), diese wurden für die Untersuchung getrennt betrachtet. Die vorgefundenen Veränderungen gehören zumeist zu jenen, die bei Erwachsenen als ‚Athlete's Heart‘ beschrieben und dort als physiologisch klassifiziert werden. Es ist bei der Interpretation der physiologischen EKG-Veränderungen davon auszugehen, dass die tatsächliche Häufigkeit des Auftretens der Veränderung Sinusbradykardie in beiden Gruppen wahrscheinlich deutlich höher wäre. Es ist zu berücksichtigen, dass die Proband\*innen durch das Setting der Untersuchung selbst möglicherweise aufgeregt sind und daher höhere Herzfrequenzen aufweisen, als in tatsächlicher Ruhe außerhalb des klinischen Settings. Die borderline- und vor allem die pathologischen EKG-Veränderungen kommen in der vorliegenden Studie sowohl in der Gruppe der jüngeren jugendlichen Athlet\*innen als auch in der Gruppe der älteren jugendlichen Athlet\*innen deutlich seltener oder gar nicht vor. Daher kann man davon ausgehen, dass es sich bei den nachgewiesenen pathologischen Auffälligkeiten um zufällig in der Stichprobe enthaltene Proband\*innen mit pathologischen Herzveränderungen handelt.

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung bestätigen die Ergebnisse der Autor\*innen, die die Meinung vertreten, dass bei jugendlichen Athlet\*innen dieselben trainingsinduzierten EKG-Veränderungen vorkommen wie bei erwachsenen Athlet\*innen beschrieben (32, 40, 41, 44). Die Ergebnisse der vorliegenden Studie widersprechen den Resultaten der Autor\*innen, die bei jugendlichen Athlet\*innen keine trainingsinduzierten EKG-Veränderungen feststellen konnten (29, 30, 37). Hierbei ist zu berücksichtigen, dass bei denjenigen Untersuchungen, die keine typischen trainingsinduzierten EKG-Veränderungen bei jugendlichen Athlet\*innen feststellen konnten, die Anzahl der Proband\*innen in den Stichproben teilweise sehr gering war (29, 30). Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass teilweise ausschließlich eindeutig präpubertäre jugendliche Athlet\*innen (Tanner Stadium 1 und Durchschnittsalter von 11 Jahren) untersucht wurden (37). Die vorliegende Untersuchung weist nach, dass das Alter der jugendlichen Athlet\*innen einen signifikanten Einfluss auf das Auftreten von EKG-Veränderungen hat (siehe 4.4). Außerdem wurden in den berichteten Studien keine Angaben über die Dauer des leistungssportlichen Trainings sowie den aktuellen Trainingsumfang erhoben. Da einige Untersuchungen, darunter auch die vorliegende, einen Zusammenhang zwischen trainingsinduzierten EKG-Veränderungen und dem aktuellen Trainingsumfang beziehungsweise der Dauer des leistungssportlichen Trainings nachweisen konnten (37, 38), ist es denkbar, dass die Athlet\*innen dieser Studien noch nicht lange genug leistungssportlich aktiv waren oder der aktuelle Trainingsumfang zu gering war, um EKG-Veränderungen auszubilden.

Die Hypothese 1 kann folglich als bestätigt angesehen werden: Es lassen sich bei jugendlichen Leistungssportler\*innen-EKGs typische wiedererkennbare EKG-Veränderungen nachweisen, die denen von Sharma et al. (12) beschriebenen qualitativ entsprechen und sich in bei erwachsenen Athlet\*innen als physiologisch, borderline und pathologisch definierte Kriterien klassifizieren lassen. Die physiologischen Veränderungen kommen in der Stichprobe der Jugendlichen mit hoher Wahrscheinlichkeit vor.

#### **4.2 Unterschiede der Auftretens-Häufigkeiten sportinduzierter EKG-Veränderungen zwischen erwachsenen und jugendlichen Athlet\*innen**

Die in der vorliegenden Untersuchung nachgewiesenen trainingsinduzierten EKG-Veränderungen jugendlicher Athlet\*innen treten mit geringerer Häufigkeit auf als in der Literatur bei erwachsenen Athlet\*innen beschrieben. Vor allem die bei erwachsenen Athlet\*innen als

---

physiologisch klassifizierten Veränderungen, bei denen davon auszugehen ist, dass sie Anpassungen an das leistungssportliche Training darstellen, kommen bei erwachsenen Athlet\*innen deutlich häufiger vor. Allerdings ist ein direkter Vergleich der Auftretens-Häufigkeiten der EKG-Veränderungen der jugendlichen Athlet\*innen mit denen erwachsener Athlet\*innen in der vorliegenden Untersuchung nicht möglich, da keine erwachsene Kontrollgruppe untersucht wurde. Der Vergleich mit den in der Literatur beschriebenen Studien ist nur begrenzt möglich, da nur sehr wenige vorliegende Studien genaue Häufigkeitsangaben über das Vorkommen der EKG-Veränderungen bei erwachsenen Athlet\*innen machen. Auch sind die Intervalle und untersuchten Veränderungen sehr uneinheitlich und fast nie an den internationalen Leitlinien orientiert. Es liegt keine Studie mit Angaben über das 95%-KI vor. Dies wäre für den direkten Vergleich der Auftretens-Häufigkeiten sehr viel aussagekräftiger. In zukünftigen Studien wäre eine erwachsene Kontrollgruppe zu empfehlen.

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung bestätigen die Resultate bisheriger Untersuchungen. Es ist davon auszugehen, dass erwachsene Athlet\*innen in berichteten Studien bereits über einen sehr viel längeren Zeitraum und mit höherem Trainingsumfang trainieren und bzgl. des Trainings eine homogenere Gruppe darstellen als die jugendlicher Athlet\*innen. Die Stichprobe der Jugendlichen selbst ist hinsichtlich Dauer und Trainingsumfang sehr viel inhomogener als untersuchte erwachsene Athlet\*innen, da das Alter und damit die Möglichkeit, seit wann der Sport leistungssportlich ausgeübt werden kann, oft nicht berücksichtigt bzw. differenziert wird. Andere Gründe für die Unterschiede zwischen erwachsenen und jugendlichen Leistungssportler\*innen-EKGs könnten sein, dass Kinder und Jugendliche geringere Katecholaminlevel als Erwachsene aufweisen, wodurch eventuell eine veränderte autonome Regulation des Herzens vorliegt.

Erwachsene Stichproben bestehen zudem ausschließlich aus Athlet\*innen, die durch ihren postpubertären hormonellen Status ausreichend hohe Sexualhormonlevel aufweisen um EKG-Veränderungen auszubilden (29, 37, 40, 41). Die jugendlichen Stichproben beinhalten auch jüngere jugendliche Athlet\*innen, bei denen es noch nicht zu hormonellen Veränderungen durch die Pubertät gekommen ist. Diese weisen keine EKG-Veränderungen durch das Training auf (28, 40, 41); daher könnten die Studienergebnisse oft auch durch den Anteil dieser präpubertären Jugendlichen in den Stichproben beeinflusst werden. Es ist demnach sinnvoll eine Unterteilung der jugendlichen Stichproben nach dem Proband\*innenalter vorzunehmen, um den körperlichen/hormonellen Entwicklungszustand der Jugendlichen zu berücksichtigen (siehe 1.6).

### 4.3 Der Einfluss des Alters jugendlicher Athlet\*innen auf das Auftreten sportinduzierter EKG-Veränderungen

Die vorliegende Untersuchung weist nach, dass mit zunehmendem Alter der jugendlichen Athlet\*innen die bei erwachsenen Athlet\*innen physiologischen ‚Athlete’s Heart‘-typischen, EKG-Veränderungen signifikant häufiger vorkommen. Die Auftretens-Häufigkeiten der EKG-Veränderungen zwischen der jüngeren Versuchspersonengruppe (8-12 Jährige) und der älteren Versuchspersonengruppe (13-18 Jährige) unterscheiden sich signifikant. Diese Ergebnisse bestätigen vorliegende Studien, die einen Einfluss des Alters auf die Ausbildung trainingsbedingter EKG-Veränderungen nachweisen (24, 27, 37, 40, 43).

Bei der Interpretation der Ergebnisse der hier vorliegenden Untersuchung in Hinsicht auf die Interpretation der Konfidenzintervalle (KIs) sind die deutlich unterschiedlichen Gruppengrößen der beiden Subgruppen zu berücksichtigen, die sich auf die Breite der Konfidenzintervalle auswirken. Da in die Formel des KI der Stichprobenumfang ( $n$ ) eingeht, wird das KI breiter je kleiner  $n$  ist. In dieser Untersuchung sorgt diese Tatsache dafür, dass die KI-Grenzen der Gruppe 2 (13-18 Jährige) sehr groß sind und damit oft überlappend mit denen der Gruppe 1 (8-12 Jährige), auch wenn die relativen Häufigkeiten weit auseinander liegen. Diese Tatsache könnte eine Erklärung dafür sein, dass sich im Chi-Quadrat-Test zwei weitere EKG-Auffälligkeiten signifikant unterscheiden, dies beim direkten Vergleich der KIs jedoch nicht der Fall ist. Es lässt sich in der vorliegenden Untersuchung eine Anpassung des Herzens an den Leistungssport in beiden Altersgruppen aufzeigen, die allerdings deutlich stärker mit zunehmendem Alter in der Jugend nachzuweisen ist. Dies beweist der signifikant höhere Anteil der Sinusbradykardien bei den 13-18jährigen Proband\*innen. Auch die marginale Signifikanz des überdrehten Linkstyps, der deutlich häufiger bei den 13-18jährigen Athlet\*innen vorkommt, weist darauf hin. Der signifikant höhere Anteil des kompletten RSB (als Zeichen rechtsventrikulärer Hypertrophie) in der älteren Versuchspersonengruppe kann ebenfalls als Bestätigung angesehen werden. Deutliche, wenn auch nicht signifikante Unterschiede sind bezogen auf die meisten physiologischen Veränderungen nachzuweisen. Eine der typischsten EKG-Veränderungen, die eindeutig auf eine Anpassung des Herzens an den Leistungssport zurückzuführen ist, ist die Sinusbradykardie. Bei der Beurteilung der Sinusbradykardie ergeben sowohl die Betrachtung der KIs als auch der Chi-Quadrat-Test signifikante Unterschiede zwischen den beiden Altersgruppen.

Obwohl also nicht bezogen auf alle EKG-Veränderungen signifikante Ergebnisse erzielt werden konnten, kann die Hypothese dennoch als bestätigt angesehen werden: In der Häufung der

---

EKG-Auffälligkeiten bestehen signifikante Unterschiede zwischen der Subgruppe der jüngeren Jugendlichen (8-12 Jährige) und der Subgruppe der älteren Jugendlichen (13-18 Jährige).

#### **4.4 Der Einfluss des Alters auf geschlechtsspezifische Häufigkeitsunterschiede beim Auftreten sportinduzierter EKG-Veränderungen**

Die vorliegende Untersuchung zeigt, dass in der Gruppe der 13-18jährigen Athlet\*innen die bei erwachsenen Athlet\*innen physiologische trainingsinduzierte EKG-Veränderungen signifikant häufiger bei männlichen Probanden nachzuweisen sind als bei weiblichen Probandinnen. Das Ergebnis bestätigt, dass sich erst mit zunehmendem Alter während der Jugend die Häufigkeit des Auftretens von EKG-Veränderungen zwischen weiblichen und männlichen Athlet\*innen unterscheidet. Ebenso wird bestätigt, dass der Einfluss von während der Pubertät gebildeten Sexualhormonen einen Einfluss auf das Auftreten von leistungssportinduzierten EKG-Veränderungen hat (24, 29, 37, 40, 41, 43).

Bisher liegen keine Studien vor, die mithilfe einer Unterteilung der jugendlichen Proband\*innenstichprobe anhand des Alters untersuchen, ob sich bei den älteren Jugendlichen die Auftretens-Häufigkeit der EKG-Veränderungen signifikant zwischen männlichen und weiblichen jugendlichen Proband\*innen unterscheidet. Bei der Beurteilung der Ergebnisse des Chi-Quadrat-Tests muss einschränkend berücksichtigt werden, dass die Anzahl der weiblichen Probandinnen sowohl in der jüngeren Altersgruppe (Anzahl weibliche Probandinnen=78; 11,6%) als auch in der älteren Altersgruppe (Anzahl weibliche Probandinnen=52; 28%) deutlich geringer ist als die männliche Probanden-Anzahl.

Schon bei den 8-12jährigen Proband\*innen sind bezogen auf einige EKG-Veränderungen deutliche Unterschiede in den Vorkommens-Häufigkeiten zwischen männlichen und weiblichen Proband\*innen festzustellen. Es bestehen in dieser Gruppe bereits bezogen auf die beiden Veränderungen Sinusbradykardie und juvenile T wave pattern signifikante Geschlechterunterschiede. Diese Ergebnisse sind nicht erwartungskonform. Bisherige Studien wiesen darauf hin, dass erst durch Eintritt der Pubertät ausreichend Sexualhormone sezerniert werden, um zu trainingsinduzierten EKG-Veränderungen und damit diesbezüglich signifikanten Geschlechterunterschieden bezogen auf die Auftretens-Häufigkeit zu führen (29, 37, 40, 41). Um eine genauere Aussage diesbezüglich treffen zu können, müssten weitere Studien durchgeführt werden. Dennoch sind in der Gruppe der 13-18 Jährigen deutlich mehr Veränderungen signifikant häufiger bei den männlichen Probanden nachzuweisen als bei den weiblichen Probandinnen. Diese

Tatsache bestätigt die Vermutung, dass erst mit zunehmendem Alter und gegebenenfalls durch den Eintritt der Pubertät und den damit verbundenen Veränderungen im Sexualhormonhaushalt eine Anpassung des Herzmuskels an das leistungssportliche Training in großem Maße möglich ist. Dies führt vor allem bei den männlichen Probanden zu einem erhöhten Auftreten von physiologischen EKG-Veränderungen. Bei den weiblichen Probandinnen nimmt die Häufigkeit der Veränderungen zwar ebenfalls mit zunehmendem Alter zu (z.B. Häufigkeit Sinusbradykardie bei weiblichen Probandinnen in Gruppe 1: 14,71% und bei weiblichen Probandinnen der Gruppe 2: 26,83%), dennoch kommen die Veränderungen gerade in der älteren Versuchspersonengruppe signifikant weniger bei weiblichen Probandinnen als bei männlichen Probanden vor. Der Vergleich der korrigierten Kontingenzkoeffizienten ergibt, dass bezogen auf die EKG-Veränderungen die Zusammenhänge in der Gruppe der älteren jugendlichen Athlet\*innen deutlich stärker sind als bei derselben EKG-Veränderung in der Gruppe der jüngeren jugendlichen Athlet\*innen.

Obwohl also auch bei den 8-12jährigen Athlet\*innen bereits signifikante Zusammenhänge bezogen auf einige sportinduzierte EKG-Veränderungen bestehen, kommt es dennoch bei deutlich mehr EKG-Veränderungen erst mit zunehmendem Alter (erst bei den 13-18jährigen Proband\*innen) zu signifikanten Geschlechterunterschieden. Daher kann die Hypothese als bestätigt angesehen werden: Erst bei den 13-18jährigen Proband\*innen unterscheiden sich die Häufigkeiten des Auftretens von EKG-Veränderungen zwischen männlichen und weiblichen Proband\*innen.

#### **4.5 Der Zusammenhang zwischen aktuellem Trainingsumfang und dem Auftreten von sportinduzierten EKG-Veränderungen**

In der vorliegenden Studie konnte ein Zusammenhang zwischen dem aktuellen Trainingsumfang und den physiologischen EKG-Veränderungen bei jugendlichen Athlet\*innen nachgewiesen werden. Dieses Ergebnis steht in Einklang mit den bisherigen Studien erwachsener Athlet\*innen (38, 39). Bisher liegt keine Studie vor, die den Zusammenhang zwischen dem aktuellen Trainingsumfang und dem Auftreten von EKG-Veränderungen jugendlicher Athlet\*innen untersucht. Dies war Gegenstand der vorliegenden Untersuchung.

Die in die vorliegende Studie einfließenden Daten wurden als ‚Trainingsstunden pro Woche insgesamt‘, ‚Trainingsstunden im Verein‘, ‚Schulsport‘ sowie ‚Spielstunden‘ in einem

Fragebogen erhoben. Hierbei handelt es sich um klar definierte und unmissverständliche, aktuelle Einschätzungen. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die Angaben der Proband\*innen exakt sind. Die Tatsache, dass ein signifikanter Zusammenhang zwischen dem Auftreten von Sinusbradykardie und dem aktuellen Trainingsumfang ausschließlich in der Gruppe der 13-18jährigen Jugendlichen nachweisbar ist, unterstreicht erneut den untersuchten Zusammenhang zwischen Alter der jugendlichen Athlet\*innen und der Häufigkeit des Auftretens trainingsinduzierter EKG-Veränderungen. Das Ergebnis lässt darauf schließen, dass erst mit zunehmendem Alter in der Jugend in großem Maße eine Anpassung des Herzmuskels an das leistungssportliche Training stattfindet. Da auch in dieser Hypothese die Veränderung Sinusbradykardie, als sehr spezifische und aussagekräftige EKG-Veränderung induziert durch Leistungssport, zu signifikanten Ergebnissen führt, kann die Hypothese als bestätigt erachtet werden: Es besteht ein Zusammenhang zwischen dem aktuellen Trainingsumfang und der Häufigkeit des Auftretens der EKG-Veränderungen.

#### **4.6 Der Zusammenhang zwischen Dauer des leistungssportlichen Trainings und dem Auftreten von sportinduzierten EKG-Veränderungen**

Die vorliegende Untersuchung konnte einen tendenziellen Zusammenhang der Dauer des leistungssportlichen Trainings und der Auftretens-Häufigkeit von EKG-Veränderungen nachweisen. Es existieren derzeit keine Studien, die einen Zusammenhang zwischen der Häufigkeit des Auftretens von EKG-Veränderungen und der Dauer des leistungssportlichen Trainings bei jugendlichen Athlet\*innen untersuchen. Daher war es das Ziel dieser Untersuchung diesen Zusammenhang, der für erwachsene Athlet\*innen bereits in einigen Studien (38) belegt werden konnte, auch bei einer jugendlicher Stichprobe nachzuweisen.

Die Dauer des leistungssportlichen Trainings wurde in der vorliegenden Untersuchung als ‚Alter bei Trainingsbeginn‘ und ‚Leistungssport (Jahreszahl)‘ in einem Fragebogen erhoben. Hierbei handelt es sich für die Proband\*innen um scheinbar unklar definierte und missverständliche Fragen, die außerdem zeitlich zurückliegende Informationen erfragen. Bei der Auswertung fiel auf, dass die Angaben der verschiedenen Proband\*innen uneinheitlich waren: Einige gaben Jahreszahlen an, andere Jahre und wieder andere ein Alter. Zudem konnten einige Proband\*innen offensichtlich nichts mit dem Begriff ‚Leistungssport‘ anfangen. In den Anamnesegesprächen wurde diese Information nur selten abgefragt. Bei 270 Proband\*innen war daher die Auswertung der Daten nicht möglich, diese wurden für die Untersuchung dieses Zusammenhangs



ausgeschlossen. Bei der Beurteilung und Interpretation der Ergebnisse muss diese Tatsache berücksichtigt werden.

Der nachgewiesene signifikante Zusammenhang zwischen der EKG-Veränderung frühe Repolarisation und der Dauer des leistungssportlichen Trainings ist erwartungskonform mit den Ergebnissen der vorangegangenen Hypothesen und entspricht den Anpassungen des Herzmuskels an das leistungssportliche Training, die bei erwachsenen Athlet\*innen als physiologisch klassifizierbar sind. Das Ergebnis des Zusammenhangs zwischen einem erhöhten Sokolow-Lyon-Index und der Dauer des leistungssportlichen Trainings widerspricht den Erwartungen. Die Ergebnisse zu den vorherigen Hypothesen legen die Vermutung nahe, dass die Korrelation nur bei den älteren Proband\*innen (Gruppe 2) zu erwarten wäre, so wie es bei der Veränderung frühe Repolarisation tatsächlich der Fall ist. In der vorliegenden Untersuchung ist die Korrelation jedoch ausschließlich in der Subgruppen der 8-12jährigen Athlet\*innen (Gruppe 1) signifikant. Dieses nicht erwartungskonforme Ergebnis kann gegebenenfalls mit der uneinheitlichen und scheinbar missverständlichen Datenerhebung erklärt werden. Eine andere mögliche Ursache des nicht signifikanten Ergebnisses in Subgruppe 2 ist die unterschiedliche Gruppengröße der beiden Subgruppen. Da die Gruppe der 13-18jährigen Proband\*innen (n=186) deutlich kleiner ist als die Gruppe der 8-12jährigen Proband\*innen (n=675) bedarf es größerer Effekte um zu signifikanten Ergebnissen zu führen. Es wäre also denkbar, dass bei einer größeren Fallzahl auch in Subgruppe 2 ein signifikanter Effekt nachweisbar wäre.

Die Hypothese ‚Es besteht ein Zusammenhang zwischen der Dauer des leistungssportlichen Trainings und der Häufigkeit des Auftretens der EKG-Auffälligkeiten‘ muss dennoch auf Grund der vorliegenden Ergebnisse in Bezug auf diese verworfen werden. Dieser Zusammenhang sollte allerdings in zukünftigen Studien weitergehend erforscht werden.

#### **4.7 Klinischer Bezug**

Es ist nachgewiesen, dass intensives körperliches Training beim Vorliegen genetisch bedingter Herzerkrankungen mit einem erhöhten Risiko für Herzbeschwerden sowie Herzrhythmusstörungen und einem damit verbundenen Risiko für plötzlichen Herztod einhergeht (43, 51, 52). Daher wird auch in den Leitlinien der *European Heart Rhythm Association* und *European Association of Preventive Cardiology* sowie der *Study Group of Sport Cardiology of the Working Group of Cardiac Rehabilitation and Exercise Physiology and the Working Group of*

---

*Myocardial and Pericardial Diseases of the European Society of Cardiology* die Wichtigkeit eines Sporttauglichkeitsscreenings betont. Dieses sollte anhand standardisierter Guidelines nicht nur diejenigen Athlet\*innen identifizieren, die aufgrund genetischer Prädisposition ein erhöhtes Risiko für das Auftreten von plötzlichem Herztod haben, sondern auch diejenigen Athlet\*innen ohne erhöhtes Risiko sicher erkennen (23, 53).

Nach der Einführung eines obligatorischen Sporttauglichkeitsscreenings im Jahr 1982 in Italien konnte in begleitenden Studien nachgewiesen werden, dass durch das Screening effektiv EKG-Veränderungen frühzeitig erkannt werden können, die die Ursache eines plötzlichen Herztodes darstellen können (54). Die Erweiterung des Sporttauglichkeitsscreenings um eine zusätzliche EKG-Untersuchung neben der Erhebung der (Familien-)Anamnese sowie einer körperlichen Untersuchung konnte die Sensitivität mit der Herzveränderungen erkannt wurden, die zu plötzlichem Herztod führen können, von 25% auf 90% erhöhen; damit gehört das EKG zu den effektivsten Methoden um Athlet\*innen auf kardiovaskuläre Erkrankungen zu screenen (55, 56). Auch wenn einige der Meinung sind, dass ein generelles Sporttauglichkeitsscreening durch falsch positive Ergebnisse zu unnötigem Stress für den/die Athlet\*in führen könne (57), wurde in neueren Studien diesbezüglich nachgewiesen, dass kein signifikant zusätzlicher Stress entsteht und dass dies nicht als Grund genommen werden sollte, auf ein Sporttauglichkeitsscreening zu verzichten, da die Vorteile deutlich überwiegen (58). Diese Erkenntnis ist vor allem für die jugendliche Altersgruppe von großer Wichtigkeit, da in diesem Alter die Entscheidung über das Verfolgen einer leistungssportlichen Karriere getroffen werden muss. Dennoch existieren derzeit in Deutschland keine einheitlichen Richtlinien für ein derartiges Screening. Ebenso fehlten bislang genaue Untersuchungen über ein jugendliches ‚*Athlete's Heart*‘. Auch wurden die Richtlinien für die Interpretation von Sportler-EKGs anhand asymptomatischer, meist erwachsener Athlet\*innen entwickelt, bei denen nicht explizit zwischen Erwachsenen und Jugendlichen differenziert wurde (Einschluss-Alter 12-35 Jahre). Es wäre also wichtig, weitere Studien über die EKG-Veränderungen bei ausschließlich jugendlichen Leistungssportler\*innen durchzuführen. Bei diesen Studien ist eine Alterseinteilung unabdingbar, da, wie die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung zeigen, das Alter der jugendlichen Athlet\*innen einen signifikanten Einfluss auf das Vorkommen von ‚*Athlet's Heart*‘-typischen EKG-Veränderungen bei Jugendlichen hat. Diese Alterseinteilung wäre am präzisesten mittels Radiusmessung möglich. Falls dies ethisch nicht vertretbar ist (wovon in den meisten Fällen auszugehen ist), wäre zumindest eine Einschätzung des pubertären Status anhand der sekundären Geschlechtsmerkmale ratsam. Nur falls auch diese Einteilung durch das klinische Setting nicht durchführbar wäre, hat

sich bei vorwiegend männlichen Stichproben eine Alterseinteilung nach Vorbild dieser Untersuchung als relativ genau erwiesen. Bei der Untersuchung der vorgefundenen EKG-Veränderungen wäre es sinnvoll sich an den Kriterien, die von Sharma et al. (12) bei erwachsenen Athlet\*innen festgelegt wurden, zu orientieren, da durch die Anwendung standardisierter Kriterien die Genauigkeit, mit der physiologische von pathologischen EKG-Veränderungen unterschieden werden, signifikant erhöht wird (13).

Im klinischen Alltag ist bei der Beurteilung jugendlicher Sportler\*innen-EKGs die Berücksichtigung des Alters und darin die annähernde Bestimmung des pubertären Status der Patient\*innen von essentieller Bedeutung. Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung weisen darauf hin, dass der pubertäre Status jugendlicher Sportler\*innen eine signifikante Rolle bei der Ausprägung von leistungssportlich bedingten EKG-Veränderungen spielt. Auch ist die Erfragung des aktuellen Trainingsumfangs sowie die Dauer des leistungssportlichen Trainings zu berücksichtigen. Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung lassen auf einen ernstzunehmenden Einfluss diesbezüglich für das Vorkommen von EKG-Veränderungen schließen. Diese Aspekte sind für die fundierte Beurteilung des jugendlichen Sportler\*innen-EKGs ausschlaggebend und sollten möglichst präzise bestimmt werden. Nur so kann die Beratung des/der jugendlichen Sportler\*in, von der nicht nur dessen/deren sportliche Karriere sondern auch dessen/deren Gesundheit unmittelbar abhängen, so begründet wie möglich stattfinden. Eine gezielte Schulung sowie interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Pädiater\*innen, Sportkardiolog\*innen sowie Kinderkardiolog\*innen und dem Trainer\*innen-Team der jugendlichen Proband\*innen ist hierbei ebenfalls von großer Wichtigkeit (9).

Da es trotz eines Sporttauglichkeitsscreenings nicht möglich sein wird das Auftreten eines sportbedingten plötzlichen Herztodes ganz zu verhindern, sollten auch sekundärpräventive Maßnahmen in Zukunft vermehrt ergriffen werden. Dazu gehört unter anderem die Installation von AEDs (automated external defibrillator) bei größeren Sportveranstaltungen oder am Spielfeldrand (56).

## **4.8 Limitationen**

Die Rohdaten der Untersuchung wurden im Zusammenhang des Screenings auf Sportlichkeit erhoben. Die Daten bezüglich der Dauer des Leistungssports und des aktuellen Trainingsumfangs wurden zum Teil mittels Fragebogen und zum Teil in einem Anamnesegespräch erhoben

---

und dann in die Datenbank eingespeist; es handelt sich hierbei um eine unstandardisierte Datenerhebung. Der Fragebogen wurde teilweise von den jugendlichen Proband\*innen selbst ausgefüllt und teilweise von einer erwachsenen Begleitperson. In beiden Fällen muss davon ausgegangen werden, dass es bei der Angabe der Daten zu Fehlern infolge von Missverständnissen kommen konnte. Bei den Daten, die in Anamnesegesprächen erhoben wurden, ist die Wahrscheinlichkeit von Verständnisproblemen sicher geringer, dennoch ist nicht auszuschließen, dass es bei der digitalen Erfassung zu Fehlern kam.

Die Befundung der EKGs erfolgte durch eine Studentin und keine Fachärztin für Kardiologie. Es ist daher nicht völlig auszuschließen, dass es zu Fehlbefundungen kam, auch wenn vor Beginn der Befundung bezogen auf jede EKG-Veränderung eine Einweisung von einer Fachärztin für Kardiologie erfolgte. Falls vorliegend wurden zum Abgleich die schriftlichen EKG-Befunde hinzugezogen und es wurde bei fragwürdigem Befund erneut Rücksprache mit einem Facharzt für Kardiologie genommen. Eine Aussage über weibliche jugendliche Athletinnen ist zudem nur begrenzt möglich bedingt durch den sehr geringen Anteil weiblicher Probandinnen in der Stichprobe (15.1% der Gesamtstichprobe). Es wäre daher in zukünftigen Studien wünschenswert nochmals die EKG-Veränderungen weiblicher jugendlicher Athlet\*innen genauer zu untersuchen. Es wäre bei der vorliegenden Untersuchung außerdem wünschenswert gewesen das biologische Alter der Proband\*innen mit Hilfe der Radiusdicke zu bestimmen (vgl. McClean et al. 2019 (42)). Dies war aber durch die Strahlenbelastung des Eingriffs nicht vertretbar. In der Literatur werden die Entwicklung der primären und sekundären Geschlechtsmerkmale als wesentlicher Orientierungspunkt für den Eintritt der Pubertät beschrieben (Tanner-Stadien). Auch dies war, da es sich bei der Datenerfassung um eine sportmedizinische Untersuchung in Zusammenhang mit einem Screening auf Sporttauglichkeit handelte, nicht angemessen. Derartige präzisere Altersbestimmungen wären falls möglich bei weiteren Studien wünschenswert. Bei der vorliegenden Untersuchung fehlt ein präzises Kriterium für den pubertären Status, da die Einteilung rein nach dem Kriterium 'Alter' erfolgte und es kann somit ein diesbezüglicher Zusammenhang nur vermutet werden. In der vorliegenden Untersuchung unterscheiden sich des Weiteren die Größen der beiden Subgruppen deutlich. Auch diese Tatsache könnte zu einer Verfälschung der Ergebnisse führen und lässt sich darauf zurückführen, dass die Daten im Zusammenhang mit dem Screening auf Sporttauglichkeit generiert wurden. Da viele der Proband\*innen bereits in sehr jungem Alter mit dem Leistungssport beginnen, fanden sie sich auch im jüngeren Alter zum Sporttauglichkeitsscreening ein.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Die physiologischen EKG-Veränderungen, die bei erwachsenen Sportler\*innen als ‚*Athlete's Heart*‘ zusammengefasst werden, sind auch bei jugendlichen Athlet\*innen nachzuweisen. Allerdings kommen sie quantitativ seltener vor als bei erwachsenen Athlet\*innen beschrieben. Derzeit ist es nicht möglich genaue Vergleichsangaben über die Unterschiede der Auftretens-Häufigkeiten der EKG-Veränderungen zwischen jugendlichen und erwachsenen Athlet\*innen zu treffen. Es fehlen selbst für erwachsene Athlet\*innen repräsentative Studien, die genaue Häufigkeits-Angaben (mit 95%-KI) über das Vorkommen der in den *International Recommendations for Electrocardiographic Interpretation in Athletes* (12) beschriebenen EKG-Veränderungen angeben. Auch existieren keine Studien, die den Zusammenhang zwischen der Dauer und dem aktuellen Umfang des leistungssportlichen Trainings und den Auftretens-Häufigkeiten der EKG-Veränderungen bei jugendlichen Athlet\*innen untersuchen. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sprechen eindeutig für einen bestehenden Zusammenhang bei jugendlichen Athlet\*innen, der aber in weiteren Studien überprüft werden sollte. Außerdem sollte in zukünftigen Studien weiter der Einfluss des Geschlechts sowie des Alters der jugendlichen Athlet\*innen untersucht werden, um eine möglichst individuelle Beratung des Athleten/der Athletin vornehmen zu können und Fehldiagnosen zu vermeiden (9).

Diese Untersuchung führt zu dem Schluss, dass ein ‚*jugendliches Athlete's Heart*‘ existiert, dass dieses aber erst mit zunehmendem Alter entwickelt wird, da vermutlich erst durch die zunehmenden Trainingsumfänge und die Einflüsse der Pubertät eine relevante Anpassung des Herzmuskels an das intensive körperliche Training erfolgt.

### Potentielle Interessenskonflikte

Cyra Crone wurde durch ein Stipendium der Deutschen Gesellschaft für Kardiologie e.V. (DGK) unterstützt.

## Literaturverzeichnis

1. Park RC, Crawford MH. Heart of the athlete. *Curr Probl Cardiol.* 1985;10(5):1-73.
2. Rost R, Hollmann W. Athlete's heart--a review of its historical assessment and new aspects. *Int J Sports Med.* 1983;4(3):147-65.
3. Hildebrandt H. *Pschyrembel Klinisches Wörterbuch.* 258. Berlin: de Gruyter; 1989. p. 1490.
4. Sharma S, Merghani A, Mont L. Exercise and the heart: the good, the bad, and the ugly. *Eur Heart J.* 2015;36(23):1445-53.
5. Pelliccia A, Maron BJ, Spataro A, Proschan MA, Spirito P. The upper limit of physiologic cardiac hypertrophy in highly trained elite athletes. *N Engl J Med.* 1991;324(5):295-301.
6. Pelliccia A, Caselli S, Sharma S, Basso C, Bax JJ, Corrado D, D'Andrea A, D'Ascenzi F, Di Paolo M, Edvardsen T, Gati S, Galderisi M, Heidbuchel H, Nchimi A, Nieman K, Papadakis M, Pisicchio C, Schmied C, Popescu B, Habib G, Grobbee D, Lancellotti P. European Association of Preventive Cardiology (EAPC) and European Association of Cardiovascular Imaging (EACVI) joint position statement: recommendations for the indication and interpretation of cardiovascular imaging in the evaluation of the athlete's heart. *Eur Heart J.* 2018;39(21):1949-69.
7. Wundersitz DWT, Gordon BA, Lavie CJ, Nadurata V, Kingsley MIC. Impact of endurance exercise on the heart of cyclists: A systematic review and meta-analysis. *Prog Cardiovasc Dis.* 2020;63(6):750-61.
8. Utomi V, Oxborough D, Whyte GP, Somauroo J, Sharma S, Shave R, Atkinson G, George K. Systematic review and meta-analysis of training mode, imaging modality and body size influences on the morphology and function of the male athlete's heart. *Heart.* 2013;99(23):1727-33.
9. Pielas GE, Oberhoffer R. The Assessment of the Paediatric Athlete. *J Cardiovasc Transl Res.* 2020;13(3):306-12.
10. Drezner JA, Ackerman MJ, Anderson J, Ashley E, Asplund CA, Baggish AL, Börjesson M, Cannon B, Corrado D, DiFiori J, Fischbach P, Froelicher V, Harmon K, Heidbuchel H, Marek J, Owens D, Paul S, Pelliccia A, Prutkin J, Salerno J, Schmied C, Sharma S, Stein R, Vetter V, Wilson M. Electrocardiographic interpretation in athletes: the 'Seattle criteria'. *Br J Sports Med.* 2013;47(3):122-4.
11. Corrado D, Pelliccia A, Heidbuchel H, Sharma S, Link M, Basso C, Biffi A, Buja G, Delise P, Gussac I, Anastasakis A, Bojesson M, Bjornstad H, Carre F, Deligiannis A, Dugmore D, Fagard R, Hogsteen J, Mellwig K, Panhuyzen-G N, Solberg E, Vanhees L, Drezner J, Estes M, Iliceto S, Maron B, Peidro R, Schwartz P, Stein P, Thiene G, Zeppilli P, McKenna W. Recommendations for interpretation of 12-lead electrocardiogram in the athlete. *Eur Heart J.* 2010;31(2):243-59.
12. Sharma S, Drezner JA, Baggish A, Papadakis M, Wilson MG, Prutkin JM, LaGerche A, Ackerman M, Borjesson M, Salerno J, Asif I, Owens D, Chung E, Emery M, Froelicher V, Heidbuchel H, Adamuz C, Asplund C, Cohen G, Harmon K, Marek J, Molossi S, Niebauer J, Pelto H, Perez M, Riding N, Saarel T, Schmied C, Shipon D, Stein R, Vetter V, Pelliccia A, Corrado D. International recommendations for electrocardiographic interpretation in athletes. *Eur Heart J.* 2018;39(16):1466-80.
13. Drezner JA, Asif IM, Owens DS, Prutkin JM, Salerno JC, Fean R, Rao A, Stout K, Harmon K. Accuracy of ECG interpretation in competitive athletes: the impact of using standised ECG criteria. *Br J Sports Med.* 2012;46(5):335-40.

14. Huttin O, Selton-Suty C, Venner C, Vilain JB, Rochecongar P, Aliot E. Electrocardiographic patterns and long-term training-induced time changes in 2484 elite football players. *Arch Cardiovasc Dis.* 2018;111(5):380-8.
15. Zaidi A, Ghani S, Sheikh N, Gati S, Bastiaenen R, Madden B, Papadakis M, Raju H, Reed M, Sharma R, Behr E, Sharma S. Clinical significance of electrocardiographic right ventricular hypertrophy in athletes: comparison with arrhythmogenic right ventricular cardiomyopathy and pulmonary hypertension. *Eur Heart J.* 2013;34(47):3649-56.
16. Calo L, Martino A, Tranchita E, Sperandii F, Guerra E, Quaranta F, Parisi A, Nigro A, Sciarra L, de Ruvo E, Casasco M, Pigozzi F. Electrocardiographic and echocardiographic evaluation of a large cohort of peri-pubertal soccer players during pre-participation screening. *Eur J Prev Cardiol.* 2019;26(13):1444-55.
17. Prutkin JM, Wilson MG. Electrocardiography in athletes: normal and abnormal findings. *Heart.* 2018;104(23):1902-9.
18. D'Ascenzi F, Valentini F, Pistoresi S, Frascaro F, Piu P, Cavigli L, Valente S, Focardi M, Cameli M, Bonifazi M, Metra M, Mondilo S. Causes of sudden cardiac death in young athletes and non-athletes: systematic review and meta-analysis: Sudden cardiac death in the young. *Trends Cardiovasc Med.* 2022;32(5):299-308.
19. Malhotra A, Dhutia H, Finocchiaro G, Gati S, Beasley I, Clift P, Cowie C, Kenny A, Mayet J, Oxborough D, Patel K, Pieleas G, Rakhit D, Ramsdale D, Shapiro L, Somauroo J, Stuart G, Varnava A, Walsh J, Yousef Z, Tome M, Papadakis M, Sharma S. Outcomes of Cardiac Screening in Adolescent Soccer Players. *N Engl J Med.* 2018;379(6):524-34.
20. Hildebrandt H. *Pschyrembel Klinisches Wörterbuch.* 258. Berlin: de Gruyter; 1989. p. 21.
21. Latal B, Neuhäuser G. Wachstum und Entwicklung. In: Gortner L, Meyer S, Sitzmann FC, editors. *Duale Reihe Pädiatrie.* 4. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2012. p. 40-1.
22. Maron BJ, Zipes DP. Introduction: eligibility recommendations for competitive athletes with cardiovascular abnormalities-general considerations. *J Am Coll Cardiol.* 2005;45(8):1318-21.
23. Mont L, Pelliccia A, Sharma S, Biffi A, Borjesson M, Brugada Terradellas J, Carre F, Guasch E, Heidbuchel H, La Gerche A, Lambert R, McKenna W, Papadakis M, Priori S, Scanavacca M, Thompson P, Sticherling C, Viskin S, Wilson M, Corrado D. Pre-participation cardiovascular evaluation for athletic participants to prevent sudden death: Position paper from the EHRA and the EACPR, branches of the ESC. Endorsed by APHRS, HRS, and SOLAECE. *Eur J Prev Cardiol.* 2017;24(1):41-69.
24. Pieleas GE, Stuart AG. The adolescent athlete's heart; A miniature adult or grown-up child? *Clin Cardiol.* 2020;43(8):852-62.
25. Gass M. Systematik der EKG-Auswertung im Kindesalter - Normwerte. In: Lindinger A, Paul T, editors. *EKG im Kindes- und Jugendalter.* 7. 7 ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG; 2017. p. 29-32.
26. Dickinson DF. The normal ECG in childhood and adolescence. *Heart.* 2005;91(12):1626-30.
27. Rijnbeek PR, Witsenburg M, Schrama E, Hess J, Kors JA. New normal limits for the paediatric electrocardiogram. *Eur Heart J.* 2001;22(8):702-11.
28. Klinge R. *Praxis der EKG-Auswertung : ein Übungsbuch.* 3., überarb. u. erw. Aufl. ed. Klinge S, editor. Stuttgart u.a.: Stuttgart u.a. : Thieme; 1989. 201 S. : Ill., zahlr. graph. Darst.
29. Rowland TW, Unnithan VB, MacFarlane NG, Gibson NG, Paton JY. Clinical manifestations of the 'athlete's heart' in prepubertal male runners. *Int J Sports Med.* 1994;15(8):515-9.

30. Rowland TW, Boyajian A. Aerobic response to endurance exercise training in children. *Pediatrics*. 1995;96(4 Pt 1):654-8.
31. McClean G, Riding NR, Ardern CL, Farooq A, Pieleas GE, Watt V, Adamuz C, George K, Oxborough D, Wilson M. Electrical and structural adaptations of the paediatric athlete's heart: a systematic review with meta-analysis. *Br J Sports Med*. 2018;52(4):230.
32. Pentikainen H, Toivo K, Kokko S, Alanko L, Heinonen OJ, Korpelainen R, Selänne H, Vasankari T, Kujala U, Villberg J, Parkkari J, Savonen K. Resting Electrocardiogram and Blood Pressure in Young Endurance and Nonendurance Athletes and Nonathletes. *J Athl Train*. 2021;56(5):484-90.
33. Paul T. Herzrhythmusstörungen. In: Lindinger A, Paul T, editors. *EKG im Kindes- und Jugendalter*. 7. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG; 2017. p. 178.
34. Papadakis M, Carre F, Kervio G, Rawlins J, Panoulas VF, Chandra N, Basavarajiah S, Carby L, Fonseca T, Sharma S. The prevalence, distribution, and clinical outcomes of electrocardiographic repolarization patterns in male athletes of African/Afro-Caribbean origin. *Eur Heart J*. 2011;32(18):2304-13.
35. Corrado D, Biffi A, Basso C, Pelliccia A, Thiene G. 12-lead ECG in the athlete: physiological versus pathological abnormalities. *Br J Sports Med*. 2009;43(9):669-76.
36. Nakamoto K. Electrocardiograms of 25 marathon runners before and after 100 meter dash. *Jpn Circ J*. 1969;33(2):105-28.
37. Rowland TW, Delaney BC, Siconolfi SF. 'Athlete's heart' in prepubertal children. *Pediatrics*. 1987;79(5):800-4.
38. Bessem B, De Bruijn MC, Nieuwland W, Zwerver J, Van Den Berg M. The electrocardiographic manifestations of athlete's heart and their association with exercise exposure. *Eur J Sport Sci*. 2018;18(4):587-93.
39. Conti V, Migliorini F, Pilone M, Barriopedro MI, Ramos-Alvarez JJ, Montero FJC, Maffulli N. Right heart exercise-training-adaptation and remodelling in endurance athletes. *Sci Rep*. 2021;11(1):22532.
40. Lue HC, Wu MH, Wang JK, Lin MT, Lu CW, Chiu SN, Chen C, Wang C, Fu C, Tseng W, Chang W, Lee M. Study on ECG in the Adolescent. *Pediatr Cardiol*. 2018;39(5):911-23.
41. Sundberg S, Elovainio R. Resting ECG in athletic and non-athletic adolescent boys: correlations with heart volume and cardiorespiratory fitness. *Clin Physiol*. 1982;2(5):419-26.
42. McClean G, Riding NR, Pieleas G, Sharma S, Watt V, Adamuz C, Johnson A, Tramullas A, George K, Oxborough D, Wilson M. Prevalence and significance of T-wave inversion in Arab and Black paediatric athletes: Should anterior T-wave inversion interpretation be governed by biological or chronological age? *Eur J Prev Cardiol*. 2019;26(6):641-52.
43. Bjerring AW, Landgraff HE, Stokke TM, Murbraech K, Leirstein S, Aaeng A, Brun H, Haugaa K, Hallen J, Edvardsen T, Sarvari S. The developing athlete's heart: a cohort study in young athletes transitioning through adolescence. *Eur J Prev Cardiol*. 2019;26(18):2001-8.
44. Koch S, Cassel M, Linne K, Mayer F, Scharhag J. ECG and echocardiographic findings in 10-15-year-old elite athletes. *Eur J Prev Cardiol*. 2014;21(6):774-81.
45. Coleman L, Coleman J. The measurement of puberty: a review. *J Adolesc*. 2002;25(5):535-50.
46. Lohaus A. *Entwicklungspsychologie des Kindes- und Jugendalters für Bachelor*. 3., überarbeitete Auflage. ed. Vierhaus M, editor. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg : Imprint: Springer; 2015. 1 online resource (XII, 328 S.) p.



47. Herman-Giddens ME, Slora EJ, Wasserman RC, Bourdony CJ, Bhapkar MV, Koch GG, Hasemeier C. Secondary sexual characteristics and menses in young girls seen in office practice: a study from the Pediatric Research in Office Settings network. *Pediatrics*. 1997;99(4):505-12.
48. Herman-Giddens ME, Steffes J, Harris D, Slora E, Hussey M, Dowshen SA, Wasserman R, Serwint J, Smitherman L, Reiter E. Secondary sexual characteristics in boys: data from the Pediatric Research in Office Settings Network. *Pediatrics*. 2012;130(5):e1058-68.
49. Quantitative Methoden. 1 / B. Rasch. 2., erw. Aufl. ed2006. 1 Online-Ressource (XV, 245 S.) : ; graph. Darst. p.
50. Herold G. Innere Medizin : eine vorlesungsorientierte Darstellung, unter Berücksichtigung des Gegenstandskataloges für die Ärztliche Prüfung, mit ICD 10-Schlüssel im Text und Stichwortverzeichnis. Köln: Köln : Herold; 2017. 997 Seiten : ; Illustrationen, Diagramme. p.
51. Ector J, Ganame J, van der Merwe N, Adriaenssens B, Pison L, Willems R, Gewillig M, Heidbüchel H. Reduced right ventricular ejection fraction in endurance athletes presenting with ventricular arrhythmias: a quantitative angiographic assessment. *Eur Heart J*. 2007;28(3):345-53.
52. La Gerche A, Claessen G, Dymarkowski S, Voigt JU, De Buck F, Vanhees L, Droogne W, Cleemput J, Claus P, Heidbuchel H. Exercise-induced right ventricular dysfunction is associated with ventricular arrhythmias in endurance athletes. *Eur Heart J*. 2015;36(30):1998-2010.
53. Corrado D, Pelliccia A, Bjornstad HH, Vanhees L, Biffi A, Borjesson M, Panhuyzen-G N, Deligiannis A, Solberg E, Dugmore D, Mellwig K, Assanelli D, Delise P, Van-Buuren F, Anastasakis A, Heidbuchel H, Hoffmann E, Fagard R, Priori S, Basso C, Arbustini E, Blomstrom-L C, McKenna W, Thiene G. Cardiovascular pre-participation screening of young competitive athletes for prevention of sudden death: proposal for a common European protocol. Consensus Statement of the Study Group of Sport Cardiology of the Working Group of Cardiac Rehabilitation and Exercise Physiology and the Working Group of Myocardial and Pericardial Diseases of the European Society of Cardiology. *Eur Heart J*. 2005;26(5):516-24.
54. Corrado D, Basso C, Pavei A, Michieli P, Schiavon M, Thiene G. Trends in sudden cardiovascular death in young competitive athletes after implementation of a preparticipation screening program. *JAMA*. 2006;296(13):1593-601.
55. Harmon KG, Zigman M, Drezner JA. The effectiveness of screening history, physical exam, and ECG to detect potentially lethal cardiac disorders in athletes: a systematic review/meta-analysis. *J Electrocardiol*. 2015;48(3):329-38.
56. Corrado D, Drezner J, Basso C, Pelliccia A, Thiene G. Strategies for the prevention of sudden cardiac death during sports. *Eur J Cardiovasc Prev Rehabil*. 2011;18(2):197-208.
57. Van Brabandt H, Desomer A, Gerkens S, Neyt M. Harms and benefits of screening young people to prevent sudden cardiac death. *BMJ*. 2016;353:i1156.
58. Asif IM, Johnson S, Schmieg J, Smith T, Rao AL, Harmon KG, Salerno J, Drezner J. The psychological impact of cardiovascular screening: the athlete's perspective. *Br J Sports Med*. 2014;48(15):1162-6.

## Abbildungsverzeichnis

<b>Tabelle 1:</b> Übersicht der in der Literaturrecherche berichteten EKG-Veränderungen	S.10
<b>Tabelle 2:</b> Altersverteilung in der Gesamtstichprobe und in den einzelnen Gruppen	S. 26
<b>Tabelle 3:</b> Verteilung der Variablen BMI, Trainingsjahre im Leistungssport, Trainingsstunden pro Woche und Alter über die Stichprobe und die Gruppen	S. 27
<b>Tabelle 4:</b> EKG-Veränderungen bei Athlet*innen	S. 30-32
<b>Tabelle 5:</b> Übersicht über die Häufigkeit des Auftretens der EKG-Veränderungen	S. 34-35
<b>Tabelle 6:</b> Punktschätzung und 95%-Konfidenzintervall Übersicht Gruppe 1 (8-12jährige Proband*innen) und Gruppe 2 (13-18jährige Proband*innen)	S. 41
<b>Abbildung 1:</b> EKG eines 18jährigen Probanden mit inkomplettem Rechtsschenkelblock	S. 36
<b>Abbildung 2:</b> EKG eines 11jährigen Probanden mit Früher Repolarisation	S. 36
<b>Abbildung 3:</b> EKG eines 12jährigen mit Juvenile T wave pattern	S. 37
<b>Abbildung 4:</b> Korrelation des Auftretens von Sinusbradykardie in Zusammenhang mit dem aktuellen Trainingsumfang	S. 48
<b>Abbildung 5:</b> Korrelation des Auftretens von erhöhtem Sokolow-Lyon-Index und der Dauer des leistungssportlichen Trainings	S. 49

### Abkürzungsverzeichnis

EKG	Elektrokardiogramm
l/min	Liter pro Minute
s/min	Schläge pro Minute
mV	Millivolt
ms	Millisekunden
QTc-Zeit	Frequenzadaptierte QT-Zeit errechnet mit der Formel nach Bazett
AV-Block	Atrioventrikulärer Block
iRSB/iLSB	Inkompletter Rechts-/Linksschenkelblock
DFB	Deutscher Fussballbund
$\bar{x}$	Arithmetisches Mittel
SD	Standartabweichung
n	Häufigkeit
N	Anzahl in der Gesamtstichprobe
m	Männliches biologisches Geschlecht
w	Weibliches biologisches Geschlecht
K*	Korrigierter Kontingenzkoeffizient
df	Definierte Freiheitsgrade
$\chi^2$	Chi Quadrat
95%-KI	95%-Konfidenzintervall exakt nach der Clopper Pearson Methode bestimmt
KK	Korrelationskoeffizient
AED	Automated external defibrillator

## Anhang

### Danksagung

An dieser Stelle möchte ich meinen besonderen Dank aussprechen:

- Prof. Dr. Bernd Wolfarth, meinem Dr.-Vater, und Dr. Thomas Thouet, für das Ermöglichen einer Dissertation im Bereich Sportmedizin
- Meiner Mutter, ohne die diese Arbeit in dieser Form nicht möglich gewesen wäre. Sie hat mich durch jede Krise begleitet und meinem Denkprozess die Kreativität gegeben.
- Frau Dr. Beate Wild, ohne deren Hilfe ich wahrscheinlich bis heute nicht wüsste wie man ein EKG auswertet. Sie nahm sich sehr schnell Zeit für mich und machte mir so den Beginn mit der Datenauswertung möglich.
- Herrn Dr. Arno Schroll, der mir zu jeder Zeit (statistische) Unterstützung gab und mir ein sicherer und mutmachender Ansprechpartner war
- Meiner Familie für das Korrekturlesen dieser Arbeit

## Eidesstattliche Versicherung

Ich, Cyra Crone, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema: „EKG-Veränderungen und kardiovaskuläre Anpassungsmechanismen bei jugendlichen Nachwuchsfußballern im Leistungssport“ selbstständig und ohne nicht offengelegte Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder dem Sinne nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren/innen beruhen, sind als solche in korrekter Zitierung kenntlich gemacht. Die Abschnitte zu Methodik (insbesondere praktische Arbeiten, Laborbestimmungen, statistische Aufarbeitung) und Resultaten (insbesondere Abbildungen, Graphiken und Tabellen) werden von mir verantwortet.

[Für den Fall, dass Sie die Forschung für Ihre Promotion ganz oder teilweise in Gruppenarbeit durchgeführt haben:] Ich versichere ferner, dass ich die in Zusammenarbeit mit anderen Personen generierten Daten, Datenauswertungen und Schlussfolgerungen korrekt gekennzeichnet und meinen eigenen Beitrag sowie die Beiträge anderer Personen korrekt kenntlich gemacht habe (siehe Anteilserklärung). Texte oder Textteile, die gemeinsam mit anderen erstellt oder verwendet wurden, habe ich korrekt kenntlich gemacht.

Meine Anteile an etwaigen Publikationen zu dieser Dissertation entsprechen denen, die in der untenstehenden gemeinsamen Erklärung mit dem/der Erstbetreuer/in, angegeben sind. Für sämtliche im Rahmen der Dissertation entstandenen Publikationen wurden die Richtlinien des ICMJE (International Committee of Medical Journal Editors; [www.icmje.org](http://www.icmje.org)) zur Autorenschaft eingehalten. Ich erkläre ferner, dass ich mich zur Einhaltung der

Satzung der Charité – Universitätsmedizin Berlin zur Sicherung Guter Wissenschaftlicher Praxis verpflichte.

Weiterhin versichere ich, dass ich diese Dissertation weder in gleicher noch in ähnlicher Form bereits an einer anderen Fakultät eingereicht habe.

Die Bedeutung dieser eidesstattlichen Versicherung und die strafrechtlichen Folgen einer un-wahren eidesstattlichen Versicherung (§§156, 161 des Strafgesetzbuches) sind mir bekannt und bewusst.“

Datum

Unterschrift

HUMBOLDT-UNIVERSITÄT ZU BERLIN



HU | Kultur-, Sozial- und Bildungswissenschaftliche Fakultät | 10099 Berlin  
Institut für Sportwissenschaft

Medizinische Fakultät Charité –  
Universitätsmedizin Berlin  
Campus Virchow-Klinikum  
Promotionsbüro  
Augustenburger Platz 1  
13353 Berlin

**Kultur-, Sozial- und  
Bildungswissenschaftliche  
Fakultät**

Institut für Sportwissenschaft

Abteilung Trainings- und  
Bewegungswissenschaften

Arno Schroll

**Bescheinigung über Art und Umfang der statistischen Bearbeitung  
nach PO-2017**

für *Cyra Crone*

**Datum:**

21.01.2020

Sehr geehrte Damen und Herren,

im Rahmen der Bearbeitung des Dissertationsthemas

„EKG-Veränderungen und kardiovaskuläre Anpassungsmechanismen bei  
jugendlichen Nachwuchsfußballern im Leistungssport“

habe ich Frau Cyra Crone zur statistischen Methodik der Arbeit beraten  
und bescheinige Ihnen hiermit die statistische Bearbeitung der oben  
genannten Arbeit in Art und Umfang als ausreichend zur Erlangung des  
akademischen Grades Doctor medicinae (Dr. med.).

Mit freundlichen Grüßen

Dipl.-Mathematiker Arno Schroll

**Postanschrift:**

Humboldt-Universität zu Berlin  
Unter den Linden 6  
10099 Berlin  
Telefon: +49 30 2093- 46021

Arno.Schroll@hu-berlin.de  
www.tbw.hu-berlin.de

**Sitz:**

Philippstraße 13, Haus 11  
Raum 1.21  
10115 Berlin