

Aus der Klinik für Orthopädie und Orthopädische Chirurgie,  
Universitätsklinikum des Saarlandes, Homburg/Saar (Direktor: Prof. Dr. Landgraeber)  
der Medizinischen Fakultät  
der Universität des Saarlandes, Homburg/Saar

**Kernspintomographische Morphologie des kindlichen vorderen und hinteren  
Kreuzbandes in verschiedenen Altersgruppen**

Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin

der Medizinischen Fakultät

der UNIVERSITÄT DES SAARLANDES

2022

vorgelegt von: Swen Friedrich Norrick

geb. am: 17.11.1993 in Dekalb, Illinois, USA

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>4</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>6</b>
<b>Einleitung</b> .....	<b>8</b>
<i>Zielsetzung</i> .....	9
<i>Anatomische und biomechanische Grundlagen</i> .....	10
Anatomie .....	10
Ossäre Anatomie .....	10
Ligamentäre Anatomie .....	11
Anatomie der Kreuzbänder, der Fossa interkondylaris und der Area interkondylaris .....	11
Anatomie des Kapsel-Band-Apparats .....	13
Biomechanik .....	15
Biomechanik der Kreuzbänder .....	17
Biomechanik der Kollateralbänder und der jeweiligen posterioren Gelenkecke .....	17
<i>Grundlegendes zur Magnetresonanztomografie (MRT)</i> .....	17
Die Geschichte der MRT.....	17
Grundlegende Technik der MRT .....	19
Wichtungen und Kontrastmittel .....	21
Darstellung der Kreuzbänder in der MRT .....	21
<b>Methodik</b> .....	<b>23</b>
<i>Studiendesign</i> .....	23
<i>Messungen</i> .....	26
VKB in der Sagittalebene (VKBLängeSag, VKBapBreite).....	26
VKB in der Transversalebene (VKBmlBreite).....	27
Anstiegswinkel des VKBs (VKBSagAnstiegswinkel) .....	29
Anstiegswinkel der interkondylären Notch (NotchAnstiegswinkel) .....	32
Coronarer Anstiegswinkel des VKBs (VKBCorAnstiegswinkel) .....	34
Bikondyläre Breite, Breite der interkondylären Notch und Breite des VKBs sowie HKBs in der Coronarebene (BikondyläreBreite, NotchBreite, VKBBreite, HKBBreite) .....	36
HKB-Länge und laterale Femurkondylenbreite in der Sagittalebene (HKBLSag, LatFemkondylenbreite) ...	38
<i>Berechnung relevanter Indices, Flächen und Volumina aus Messwerten</i> .....	42
Index aus lateraler Femurkondylenbreite und sagittaler HKB-Länge .....	42
VKB-Fläche .....	42
VKB-Volumen .....	42
Notch-Width-Index .....	42
VKB/Notch-, HKB/Notch-, VKB/Bikondyläre Breite- und HKB/Bikondyläre Breite-Index .....	42
<b>Statistische Analyse</b> .....	<b>43</b>
Retest-Reliabilität, Intra-Untersucher-Reliabilität .....	43
Inter-Untersucher-Reliabilität.....	44
<i>Deskriptive Statistik</i> .....	45
<i>Korrelation</i> .....	45
<i>Vergleich von Mittelwerten</i> .....	45

<b>Ergebnisse .....</b>	<b>47</b>
<i>Analyse der Körpermaße der Probanden .....</i>	<i>47</i>
<i>VKB-Länge in der Sagittalebene (VKBLängeSag).....</i>	<i>48</i>
<i>VKB-Breite in der Sagittalebene (VKBapBreite).....</i>	<i>53</i>
<i>VKB in der Transversalebene (VKBmlBreite).....</i>	<i>56</i>
<i>Anstiegswinkel des VKBs in der Sagittalebene (VKBSagAnstiegswinkel).....</i>	<i>59</i>
<i>Anstiegswinkel der interkondylären Notch in der Sagittalebene (NotchAnstiegswinkel) .....</i>	<i>63</i>
<i>Anstiegswinkel des VKBs in der Coronarebene (VKBCorAnstiegswinkel) .....</i>	<i>65</i>
<i>Bikondyläre Breite in der Coronarebene (BikondyläreBreite).....</i>	<i>68</i>
<i>Breite der interkondylären Notch in der Coronarebene (NotchBreite).....</i>	<i>72</i>
<i>VKB-Breite in der Coronarebene (VKBBreite) .....</i>	<i>76</i>
<i>HKB-Breite in der Coronarebene (HKBBreite).....</i>	<i>80</i>
<i>HKB in der Sagittalebene (HKBLängeSag) .....</i>	<i>84</i>
<i>Femurkondylenbreite in der Sagittalebene (LatFemurkondylenbreite).....</i>	<i>88</i>
<i>Index aus lateraler Femurkondylenbreite und HKB-Länge in der Sagittalebene (LatFemkoHKBLSag).....</i>	<i>92</i>
<i>VKB-Fläche (VKBFläche) .....</i>	<i>95</i>
<i>VKB-Volumen (VKBVolumen) .....</i>	<i>99</i>
<i>Notch-Width-Index (NWI).....</i>	<i>103</i>
<i>VKB-Notch-Index (VKBNotch).....</i>	<i>106</i>
<i>HKB-Notch-Index (HKBNotch).....</i>	<i>108</i>
<i>VKB-Femur-Index (VKBFemur).....</i>	<i>110</i>
<i>HKB-Femur-Index (HKBFemur) .....</i>	<i>112</i>
<i>Normwerttabelle .....</i>	<i>114</i>
<b>Diskussion .....</b>	<b>115</b>
<i>VKB in der Sagittal- und Transversalebene .....</i>	<i>115</i>
<i>Anstiegswinkel des VKBs und der interkondylären Notch .....</i>	<i>118</i>
<i>VKB-Anstiegswinkel in der Sagittalen .....</i>	<i>118</i>
<i>Anstiegswinkel der interkondylären Notch .....</i>	<i>118</i>
<i>Anstiegswinkel des VKBs in der Coronarebene .....</i>	<i>119</i>
<i>Bikondyläre Breite, Notchbreite und Breite von VKB und HKB in der Coronarebene .....</i>	<i>120</i>
<i>Bikondyläre Breite.....</i>	<i>120</i>
<i>Notchbreite .....</i>	<i>121</i>
<i>VKB-Breite in der Coronarebene.....</i>	<i>122</i>
<i>HKB-Breite in der Coronarebene .....</i>	<i>123</i>
<i>HKB in der Sagittalebene und die laterale Femurkondylenbreite sowie der hieraus gebildete Index .....</i>	<i>124</i>
<i>HKB in der Sagittalebene .....</i>	<i>124</i>
<i>Laterale Femurkondylenbreite .....</i>	<i>126</i>
<i>Index aus lateraler Femurkondylenbreite und HKB-Länge in der Sagittalebene .....</i>	<i>126</i>
<i>Fläche und Volumen des VKBs.....</i>	<i>127</i>
<i>VKB-Fläche .....</i>	<i>127</i>

VKB-Volumen .....	128
<i>Notch-Width-Index und weitere Quotienten</i> .....	130
Notch-Width-Index .....	130
VKB-Notch-Index.....	131
HKB-Notch-Index.....	132
VKB-Femurkondylenbreite.....	132
HKB-Femurkondylenbreite .....	133
<i>Limitationen</i> .....	133
<i>Fazit</i> .....	135
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>138</b>
<i>Publikation</i> .....	145
<b>Danksagung</b> .....	<b>146</b>
<b>Lebenslauf</b> .....	<b>147</b>

## Zusammenfassung

Die Inzidenz von Kreuzbandverletzungen pädiatrischer Patient\*innen nimmt in den letzten Jahren deutlich zu. Um eine optimale operative Versorgung von kindlichen Kreuzbandverletzungen zu gewährleisten, ist eine genaue Kenntnis der Morphologie des vorderen und hinteren Kreuzbandes (VKB, HKB) in den verschiedenen Altersstufen unabdingbar. Diese retrospektive Studie analysiert kernspintomographische Untersuchungen kindlicher Kniegelenke, um so die Kenntnis der Anatomie und Morphologie der kindlichen Kreuzbänder zu verbessern, relevante Messgrößen in verschiedenen Altersgruppen zu ermitteln und die Entwicklung der Kreuzbänder über verschiedene Altersgruppen hinweg zu untersuchen. Außerdem sollen Erkenntnisse bezüglich des Wachstumsmusters der Kreuzbänder und möglicher geschlechtsspezifische Unterschiede gewonnen werden.

Die Daten wurden aus einer Stichprobe von 127 Proband\*innen (67 weibliche, 60 männliche) im Alter von 0 bis 18 Jahren erhoben. Hierbei wurde eine Einteilung in sechs Untergruppen mit jeweils drei Jahrgängen durchgeführt, wobei jeder Altersgruppe mindestens acht Proband\*innen zugeordnet wurden. Für den Einschluss in die Studie war ein Einverständnis des Probanden/der Probandin bzw. des/der Erziehungsberechtigten, das Vorliegen einer MRT-Diagnostik, welche standardisiert nach dem klinikinternen Untersuchungsprotokoll mit adäquater Bildqualität ohne Artefakte durchgeführt wurde, sowie das Vorhandensein eines vollständigen Bilddatensatzes mit Bildern in allen Schnittebenen, Voraussetzung. Ausgeschlossen wurden Untersuchungen von Proband\*innen mit Vorliegen intraartikulärer Pathologien bzw. kniegelenksnaher Prozesse (Fraktur, Infekt, Tumor, Dysplasie/Aplasie der Kreuzbänder, Verletzungen oder Voroperationen der Kreuzbänder).

Die MRT-Bildgebung wurde anhand einer festgelegten Messmethodik analysiert. Die VKB- und HKB-Länge, die VKB- und HKB-Breite, die Breite der Kondylen und der Notch sowie die Anstiegswinkel des VKBs wurden in definierten Schnittebenen bestimmt. Aus den erhobenen Messwerten wurden die VKB-Fläche und das VKB-Volumen berechnet. Zudem wurden Messwertpaare in Relation zueinander gesetzt und Quotienten, wie unter anderem der Notch-Width-Index, berechnet und ausgewertet. Die Messungen wurden durch zwei voneinander unabhängige Untersucher zu zwei verschiedenen Zeitpunkten durchgeführt, um die Inter- und Intra-Untersucher-Reliabilität der Messungen zu überprüfen.

In den durchgeführten Messungen wurden für die VKB-Länge in den entsprechenden Altersgruppen von 0 bis 18 Jahren Werte von 18 bis 37 mm (bei einem Durchschnittswert von 28 mm) erhoben, die VKB-Breite konnte – je nach Schnittebene – in den entsprechenden Altersgruppen mit 4 bis 5,8 mm (bei einem Durchschnittswert von 5,1 mm) bestimmt werden.

Für die Länge des HKBs wurden bei den Proband\*innen zwischen 0 und 18 Jahren Werte zwischen 27,2 und 43,6 mm (bei einem Durchschnittswert von 36,6 mm) bestimmt. Die Breite des HKBs betrug 7,2 mm bis 9,1 mm (bei einem Durchschnittswert von 8,3 mm).

Die durchschnittliche Zunahme der gemessenen Länge der Kreuzbänder und angrenzenden ossären Strukturen zeigte sich insbesondere bei Kindern im Alter von 4 bis 9 Jahren am ausgeprägtesten, wobei das Wachstum ab einem Alter von 16 bis 18 Jahren abgeschlossen war. Die Messwerte korrelierten mittelstark bis stark positiv mit Probandengröße bzw. -gewicht, eher schwach mit dem Body-Mass-Index (BMI). Die Werte der Probandinnen waren im Alter von 0 bis 6 Jahren im Durchschnitt höher als die der Probanden; wohingegen die Probanden höhere Werte ab einem Alter von 7 bis 9 Jahren vorwiesen, welche ab einem Alter von 16 bis 18 Jahren signifikant höher waren.

Die erhobenen Ergebnisse wurden mit bestehenden Erkenntnissen aus vorhandener Literatur verglichen und diskutiert. Sie sollen der Kenntnis der Morphologie intraartikulärer Strukturen dienen und somit die Basis für eine altersgerechte, individualisierte Versorgung von Verletzungen der Kreuzbänder festigen.

# Abstract

## **Size and morphology of the pediatric ACL and PCL in magnetic resonance imaging throughout different age groups**

The incidence of injuries to the cruciate ligaments of the knee has become significantly more common in recent years. To guarantee optimal surgical treatment of such injuries it is obligatory to have sufficient knowledge of the morphology of the anterior and posterior cruciate ligament (ACL, PCL) across various age groups. The aim of this retrospective study was to analyse MRI-examinations that had been taken of paediatric knee joints to gain information on anatomical features and morphology of the paediatric ACL and PCL. Another goal was to establish measurements and values of intra-articular structures and to evaluate growth patterns while focusing on sex-based differences.

A group of 127 subjects (67 female and 60 male) between the ages of 0 and 18 years was examined. The group was split into six subgroups for every three years, so that each group involved at least eight subjects. Written consent of the patients or legal guardians was given before inclusion in the study. The MRI-examinations were taken according to in-house standards, sufficient image quality was obligatory. Patients with a history of intra-articular pathologies (such as fractures, infectious or cancerogenic lesions, dysplasia or aplasia of the ACL/PCL, previous operations on the ACL/PCL) were not included.

Analysis of the MRI-examinations was performed according to previously established methods. The ACL- and PCL length and width, the width of the distal femur and the intraarticular notch were measured. Inclination angles of the ACL were examined in defined slices. ACL area and volume were calculated using values of said measurements. The values of the measurements were used to establish indexes such as the notch width index among others. Measurements were taken by two orthopaedic surgeons blinded to the others' results on separate occasions to ensure intra-rater and inter-rater reliability.

In the established measurements, ACL length was found to be between 18 and 37 mm (averaging value of 28 mm) between the ages of 0 and 18. ACL width was found to be between 4 and 5.8 mm (averaging value of 5,1 mm) depending on view and slice. PCL length ranged between 27.2 and 43.6 mm (averaging value of 36.6 mm) between the ages of 0 and 18, while PCL width ranged between 7.2 and 9.1 mm (averaging value of 8.3 mm).

Measurements of the cruciate ligaments and the surrounding osseous tissue was found to be most pronounced between the ages of 4 and 9 years. After the ages of 16 to 18 years growth stagnated and was generally complete. Correlations with size and weight were strong, while

BMI correlated slightly with the measurements. Measurements on female subjects were slightly larger on average than male counterparts between the ages of 0 and 6 years, while male subjects tended to have larger values starting from ages 7 to 9. These values were significantly larger in male subjects from the ages of 16 to 18.

The results were contextualized and compared with current literature. The clinical aim of this study is to provide sufficient data on the morphology of paediatric anatomical features in the knee as a basis for age appropriate and individualised surgical care of ACL and PCL injuries in children and adolescents.

## Einleitung

Bandverletzungen des Kniegelenks gehören zu den häufigsten Verletzungen am muskuloskelettalen Bewegungsapparat mit einer bereits hohen Inzidenz in der Allgemeinbevölkerung und einer noch größeren in der sportlich aktiven Bevölkerung [90]. Von den betroffenen Bandstrukturen nehmen das vordere Kreuzband und das mediale Kollateralband mit einem 90-prozentigen Anteil die Vorreiterstellung ein [58]. Sportliche Aktivitäten werden zunehmend bereits in jüngerem Lebensalter leistungsorientiert betrieben und das Interesse, jüngere Athleten auszubilden wächst infolgedessen zunehmend [51]. Analog hierzu steigt die globale Prävalenz für Verletzungen am Kniegelenk von Patient\*innen im Alter zwischen 13 und 19 Jahren an und konnte in Meta-Studien auf Werte zwischen 10% und 25% abgeschätzt werden [52]. Insbesondere konnte festgestellt werden, dass ein Anstieg der Hospitalisierungen aufgrund von Verletzungen des vorderen Kreuzbandes im Alter von 5 bis 14 Jahren über einen Zeitraum von zehn Jahren (2005-2015) um 147,8% angestiegen ist. Der Großteil dieser Verletzungen betrifft die Altersgruppe von 10 bis 14 Jahren. Die Verletzungsursache ist in mehr als 50% der Fälle durch sportliche Aktivitäten zu begründen [79]. Wichtig erscheint, dass es sich hierbei meist nicht um Extrem- oder Randsportarten, sondern um die beliebtesten Jugendsportarten wie Fußball, Basketball, Volleyball und American Football handelt [40]. Auch Verletzungen des hinteren Kreuzbandes treten im Rahmen von sportlichen Aktivitäten auf. Diese können sich hinsichtlich der Symptomatik deutlich voneinander unterscheiden mit asymptomatischen Verläufen bis hin zu Verläufen mit starker Einschränkung des Alltags [87]. Hinzu kommen auf der anderen Seite steigende Unfallzahlen in Kraftfahrzeugen, welche respektive zu einer steigenden Inzidenz von Kreuzbandverletzungen auch in der pädiatrischen Bevölkerung führen [20]. Insbesondere solche Unfälle gehen häufiger mit Verletzungen des hinteren Kreuzbandes einher [87].

Als therapeutische Konsequenz wird die operative Versorgung der genannten Verletzungen ebenfalls häufiger. Insbesondere die arthroskopische Kniechirurgie hat sich in den letzten Jahren im Hinblick auf die Versorgung von Verletzungen des vorderen und hinteren Kreuzbandes sowohl im Kindes- als auch im Erwachsenenalter weiterentwickelt und zeigt steigende Operationszahlen [20, 83].

Um für die pädiatrischen Patient\*innen eine optimale operative Versorgung in der Kreuzbandchirurgie zu gewährleisten, ist eine genaue Kenntnis der Morphologie des vorderen und hinteren Kreuzbandes in den verschiedenen Altersstufen unabdingbar.

Bisherige Studien lieferten Erkenntnisse im Hinblick auf die Ausdehnung und das Volumen des vorderen Kreuzbandes in Korrelation zu Patientengröße und -gewicht [51]. Hierfür hat die

radiologische Analyse mittels MRT-Untersuchung gedient. Jedoch erscheint die Datenlage gerade im Hinblick auf die Morphologie des hinteren Kreuzbandes limitiert. Dies liegt am ehesten an der wesentlich höheren Inzidenz traumatischer Rupturen des vorderen Kreuzbandes im Vergleich zur hinteren Kreuzbandruptur [54, 69]. Es wird jedoch angenommen, dass die Inzidenz der Ruptur des hinteren Kreuzbandes eine höhere Dunkelziffer aufweist.

## Zielsetzung

Das Ziel dieser Studie ist es, die kernspintomographische Morphologie des kindlichen vorderen und hinteren Kreuzbandes in verschiedenen Altersstufen zu untersuchen. Hierbei sollen repräsentative Daten erhoben werden, um ein tiefergehendes Verständnis für die kernspintomographische Morphologie sowie Anatomie zu gewinnen. Gängige kernspintomographische Messmethoden zur Erfassung der Morphologie der Kreuzbänder in Erwachsenen werden hier auf eine pädiatrische Population angepasst. In dieser Studie werden sowohl das vordere als auch das hintere Kreuzband untersucht und in Bezug zueinander gesetzt. Hierbei wird eine Korrelation zwischen dem Patient\*innenalter, dem Geschlecht und der Morphologie der Kreuzbänder untersucht. Des Weiteren werden die gemessenen Daten mit Größe und Gewicht der entsprechenden Probanden korreliert und untersucht, inwieweit Längenwachstum und Gewicht einen Einfluss auf die Morphologie der Kreuzbänder besitzen. Außerdem wird anhand der durchgeführten Messungen analysiert, inwieweit sich die Morphologie der Kreuzbänder während des Wachstums verändert. Insbesondere werden die Veränderungen der Kreuzbänder in Wachstumsphasen begutachtet, in denen die Patienten\*innen Entwicklungsstadien durchlaufen, welche mit sensomotorischen und körperlichen Veränderungen einhergehen. Konkret fallen hierunter einerseits das Laufenlernen und die somit veränderte Belastung des Kniegelenkes im Kleinkindalter, andererseits das körperliche Wachstum in der Präpubertät beziehungsweise in der Pubertät und die damit einhergehende strukturelle Veränderung des Bewegungsapparates.

Hypothesen:

1. Die durchgeführten Messungen zeigen repräsentative und reproduzierbare Werte für die entsprechenden Altersgruppen.
2. Die Kreuzbänder zeigen kein kontinuierliches Wachstum, sondern in verschiedenen Altersgruppen ein unterschiedliches Wachstumsverhalten. In den oben genannten Wachstumsphasen werden kernspintomographische Veränderungen in der Morphologie des vorderen und hinteren Kreuzbandes festzustellen sein.

3. Das Wachstum der Kreuzbänder korreliert signifikant zum Längenwachstum und Gewicht eines jeweiligen Menschen.
4. Es gibt geschlechterspezifische Unterschiede im Wachstumsverhalten sowie Größe der Kreuzbänder.

Die Daten erscheinen als sinnvoll und erforderlich für eine individualisierte und altersangepasste Kreuzbandchirurgie im Kindes- und Jugendalter.

## Anatomische und biomechanische Grundlagen

### *Anatomie*

Das Kniegelenk (*Articulatio genus*), das größte Gelenk des menschlichen Körpers, verbindet die längsten Hebelarme des menschlichen Körpers (das Femur und die Tibia) und wird funktionell in zwei separate Teilgelenke unterteilt, und zwar in das tibiofemorale und das patellofemorale Teilgelenk [57]. Seine Hauptfunktionen beinhalten den primär dynamischen Bewegungswechsel zwischen Beuge-, Streck- und Drehbewegungen bei geringer Muskelarbeit und die Gewährleistung der Stabilität unter unterschiedlichen Bedingungen [44,57].

### *Ossäre Anatomie*

Die knöchernen Anatomie des Kniegelenks wird durch das distale Femur, insbesondere den Femurkondylen, die proximale Tibia und die Patella, dem größten Sesambein des menschlichen Körpers, gebildet. Die Femurkondylen sind unterschiedlich erhaben, wobei die mediale Femurkondyle eine größere elongiertere Fläche bildet als die kleinere laterale Femurkondyle. Die beiden Kondylen werden durch die Fossa intercondylaris voneinander getrennt und besitzen eine komplexe Geometrie. Die Form der Femurkondylen lässt sich in der Flexion und Extension im Kniegelenk begründen. Die Drehachse entspricht, je nach Stellung des Gelenks, der Geraden durch den jeweiligen Schnittpunkt der Kreuz- mit den Seitenbändern. Diese durch den Drehpunkt verlaufende Transversalachse „[...] wandert [...] auf einer Kurve (Evolute) bogenförmig nach hinten oben.“ [44]. Diese Kurve bildet mit der Gelenkoberfläche unterschiedliche Distanzen oder Krümmungsradien, die die Konfiguration der Kondylen ergeben. Somit werden die verschiedenen Bewegungen des Kniegelenks ermöglicht.

Die gegenüberliegenden Tibiaplateauflächen zeigen ebenfalls Unterschiede von medial nach lateral und sind durch die sog. Eminentia oder Area intercondylaris voneinander getrennt. Das mediale Tibiaplateau ist in der Sagittalebene konkav gekrümmt, während die laterale Seite

eine Konvexität aufweist [27]. Von anterior nach posterior neigt sich das gesamte Tibiaplateau um 4-5° verglichen mit der Waagerechten (sog. Posteriorer Slope) [44].

Das patellofemorale Teilgelenk wird häufig als Extensormechanismus bezeichnet [57]. Es besteht aus der Patella, welche in die Retinakulaschicht des Extensormechanismus eingebettet ist und über die Patellarsehne distal und über die Quadrizepssehne proximal fixiert ist [27]. Die Patella weist an ihrer gelenkzugewandten Seite eine breitere laterale und schmalere mediale Facette auf, die durch eine vertikal verlaufende zentrale Erhöhung voneinander abgegrenzt sind. Die Patella artikuliert mit der sog. Femurrinne (Trochlea femoris) im anterioren Bereich des distalen Femurs, der die Verschmelzung der beiden Femurkondylen im Zentrum darstellt. Analog zur Konfiguration der Patella weist die Femurrinne eine höhere laterale als mediale Kante auf, welche zur Stabilität der Patella während ihrer Gleitbewegung beiträgt [27].

#### *Ligamentäre Anatomie*

Ligamente bzw. Bandstrukturen bestehen histologisch überwiegend aus dicht gepackten Bündeln, die zahlreiche Kollagenfasern enthalten und zellulär vorrangig von einigen wenigen Fibroblasten durchsetzt sind. Die parallelfaserige Ausrichtung des Gewebes etabliert eine hohe Stabilität und ermöglicht die Erfüllung der wichtigen Funktion in der Stabilisierung der Gelenke des menschlichen Körpers [90]. Sie unterliegen einer Struktur, welche sich von der Faser über die Fibrillen, Sub- und Mikrofibrillen erstreckt. Sie können direkt oder indirekt in die knöchernen Angrenzungen inserieren: Die direkte Insertion erfolgt über vier Zonen in den Knochen (ligamentär, fibrocartilaginär, mineralisiert fibrocartilaginär und knöchern). Indirekt inserieren Bänder oberflächlich über eine periostale Verbindung, während die tiefen Fasern direkt in den Knochen inserieren [90].

#### *Anatomie der Kreuzbänder, der Fossa interkondylaris und der Area interkondylaris*

Die Kreuzbänder (Ligamenti cruciata genus) werden als intraartikuläre aber extrasynoviale Strukturen charakterisiert. Sie bilden „[...] die sogenannten Zentralpfeiler des Kniegelenks.“ [44] und liegen in der Fossa interkondylaris. Diese stellt eine Vertiefung zwischen den Femurkondylen dar, hat eine bogenförmige Konfiguration und fungiert als Ursprung des vorderen und hinteren Kreuzbandes. Sie konvergiert von posterior nach anterior und wird im Folgenden als (interkondyläre) Notch bezeichnet [93]. In der seitlichen konventionellen Röntgenaufnahme bildet die Projektion der kranialen knöchernen Begrenzung der Notch die sog. Blumensaat-Linie [44]. Der Anstiegswinkel des Dachs der Notch wurde in Studien auf Mittelwerte von 36,3° bei erwachsenen Probanden festgelegt [71]. Andere Studien, welche die Kniegelenke von Kindern und jungen Erwachsenen betrachtet haben, ermittelten größere

Winkel mit Werten von mindestens  $43,2^\circ$  [41,51]. Die Kreuzbänder kreuzen einander diagonal in der Frontalebene [90].

Das vordere Kreuzband (VKB) entspringt von der Innenfläche der lateralen Femurkondyle [54]. Im anterioren Bereich des VKB-Ursprungs verläuft die Notch weitestgehend eben, während der posteriore Bereich eine Konvexität aufweist [93]. Der VKB-Ursprung stellt sich oval oder halbmondförmig dar und besitzt bei Erwachsenen durchschnittliche Längs- bzw. Querdurchmesser von 18 mm bzw. 11 mm [44]. Die Zugrichtung des VKBs verläuft nach disto-antero-medial in Richtung seines Ansatzes, welcher sich zentral auf dem Tibiaplateau, der Area intercondylaris, im ventromedialen Bereich zwischen medialem und lateralem Schienbeingelenkhöcker befindet [93]. Der Ansatz oder „Footprint“ besitzt häufig eine ovale bzw. dreieckige Konfiguration und misst im Durchschnitt bei Erwachsenen 11 mm in der Breite und 17 mm in der Tiefe [41,50]. Die Form des VKB-Ansatzes wird auch als „Entenfuß“ oder „duck's foot“ bezeichnet [20]. Das Kreuzband besteht aus einer Vielzahl von Faserbündeln. Diese Faserzüge spannen sich je nach Kniestellung auf. Rein funktionell lässt sich aufgrund dessen das vordere Kreuzband in ein anteromediales und posterolaterales Bündel unterteilen [57,67]. Das anteromediale Faserbündel ist in zunehmender Flexion und in voller Extension gespannt, während es in leichter Flexion weniger Spannung aufweist. So fungiert das anteriomediale Bündel am ehesten in der Hemmung der anteroposterioren Translation des Kniegelenks [90]. Das posterolaterale Bündel ist in Flexion nicht unter Spannung, in Extension spannt es sich auf. Es fungiert hauptsächlich in der Inhibition von Rotationskräften [9,44,90]. Die Hauptfunktion des VKBs liegt also insbesondere in der Stabilisierung des Kniegelenks in der anteroposterioren Bewegungsrichtung und in Innenrotation [44].

Die Länge des VKBs bei erwachsenen Probanden variiert in der Literatur, kann aber auf Mittelwerte zwischen 31 mm und 38 mm festgelegt werden [30,54,93]. Die Breite des VKBs beträgt zwischen 7 mm und 12 mm [93]. An der Stelle des schmalsten Durchmessers beträgt seine Fläche  $36 \text{ mm}^2$  in weiblichen bzw.  $44 \text{ mm}^2$  in männlichen erwachsenen Probanden, wobei Ursprung und Ansatz fächerartig ausgeweitet sind und sich die oben genannten Werte ergeben [93].

Das hintere Kreuzband ist das größte der intraartikulär verlaufenden Bänder [3]. Es liegt zu einem überwiegenden Teil extrasynovial [9]. Es entspringt von einem breiten, semizirkulären Bereich der medialen Femurkondyle in der Notch, welcher sich großflächig entlang der Knorpel-Knochen-Grenze von medial nach posterior ausbreitet [44]. Seine Zugrichtung verläuft nach disto-posterior zum Ansatzbereich im posterioren Anteil der Area intercondylaris. Diese sog. „PCL fossa“ stellt eine Vertiefung oder Sulkus im Bereich posterior zum Ansatz des vorderen Kreuzbandes dar [9,25]. Diese PCL fossa besitzt eine trapezoid-artige

Konfiguration und divergiert nach inferior [3]. Durchschnittliche Werte bei Erwachsenen betragen 10 mm im Längsdurchmesser und 13 mm im Querdurchmesser [44]. Auch für das hintere Kreuzband erfolgt eine Unterteilung in zwei Faserbündel, dem anterolateralen und posteromedialen Bündel [3]. Funktionell spannt sich das anterolaterale Bündel in der Knieflexion an, während sich das posteromediale Bündel in Extension anspannt [44]. Anhand von anatomischen Studien an Humanpräparaten von Erwachsenen beträgt die Länge des hinteren Kreuzbandes im Durchschnitt 38 mm [3,30]. Die durchschnittliche Breite beträgt 13 mm und seine Fläche nimmt von 32 mm am femoralen Ursprung zu 13,4 mm am tibialen Ansatz hin ab [30].

Die Funktion des hinteren Kreuzbandes besteht in der Stabilisierung des Kniegelenks in der anteroposterioren und mediolateralen Bewegungsrichtung. So werden eine Subluxation der Tibia nach posterior und die Varus- und Valgusaufklappbarkeit verhindert [44].

Zwei weitere Bänder sind in direkter Nachbarschaft zum hinteren Kreuzband lokalisiert. Das Ligamentum meniscomemorale anterius oder Humphrey-Ligament, sowie das Ligamentum meniscomemorale posterius oder Wrisberg-Ligament. Sie unterstützen die Funktion des hinteren Kreuzbandes und strahlen von dem posterioren Anteil des lateralen Meniskus aus und inserieren anterior bzw. posterior des Ansatzes des hinteren Kreuzbandes an der medialen Femurkondyle [9,25].

#### *Anatomie des Kapsel-Band-Apparats*

Eine Einteilung des Kapsel-Band-Apparats des Kniegelenks erfolgt nach der Lokalisation der jeweiligen Strukturen in den medialen, lateralen und posterioren Bandapparat.

Der mediale Bandapparat besteht aus den sog. anteromedialen Bändern: dem Retinaculum patellae longitudinale mediale, welches sich vom M. vastus medialis zum medialen Tibiakondylus erstreckt; dem Retinaculum patellae transversale mediale oder Ligamentum patellofemorale mediale (MPFL), welches zwischen dem medialen Epikondylus und dem oberen Drittel des medialen Patellarands liegt; dem Ligamentum meniscopatellare mediale, das von der mediale Patellakante in die Tiefe nach posterior zieht und am medialen Meniskus ansetzt und einen weiteren variablen Ansatz zur Basis des Condylus medialis oder zur Tibia besitzt. Weiterhin stellt das mediale Seitenband oder Ligamentum collaterale tibiale einen Großteil des medialen Bandapparates dar. Es erstreckt sich zwischen Epicondylus medialis des Femurs und breitflächig zur Facies medialis der Tibia etwa 7-8 cm distal des Tibiaplateaus. Hier befindet es sich nah am Pes anserinus superficialis, in dem ein gemeinsamer Ansatz der Muskeln M. semitendinosus, M. gracilis und M. sartorius mündet. Das mediale Seitenband lässt sich in zwei Anteile unterscheiden, den anterioren Teil und den posterioren Teil, welcher mit dem medialen Meniskus verbunden ist. Der anteriore Teil spannt

sich in Extension und Außenrotation, während der posteriore Anteil bei Flexion und Innenrotation gespannt ist. Funktionell wirkt dieser Anteil des Kapsel-Band-Apparats als Stabilisator der posteromedialen Ecke des Kniegelenks [44].

Der laterale Bandapparat lässt sich analog zum medialen Bandapparat ebenfalls in anterolaterale Bänder und das laterale Seitenband einteilen. Die anterolateralen Bänder umfassen folgende Strukturen: das Retinaculum patellae longitudinale laterale, welches vom M. vastus lateralis zur lateralen Tibiakondyle zieht; das Retinaculum patellae transversale laterale oder Ligamentum patellofemorale laterale, welches eine Fortsetzung des Tractus iliotibialis darstellt und an den lateralen Patellarand zieht und über das Septum intermusculare laterale indirekt in Verbindung mit dem Femur steht. Hiermit erlangt der Tractus iliotibialis eine wichtige Rolle in der Stabilisation des anterolateralen Kniegelenks. Das Ligamentum meniscopatellare laterale, welches vom Außenmeniskus zum lateralen Patellarand zieht und variable zusätzliche Ansätze am Epicondylus femoris lateralis und an der Tibia haben kann, dient primär der Propriozeption [44].

Das laterale Seitenband oder Ligamentum collaterale fibulare erstreckt sich zwischen lateralem Epikondylus des Femurs und der Seiten- und Vorderfläche des Caput fibulae. Der femorale Ursprung befindet sich superior und posterior zum geometrischen Zentrum der lateralen Femurkondyle [9]. Es besitzt einen rundlichen Querschnitt und ist durch eine bindegewebige Schicht, manchmal auch durch eine Bursa, von der Gelenkkapsel getrennt. Funktionell unterstützt das laterale Seitenband das hintere Kreuzband, indem es die laterale Seite des Kniegelenks stabilisiert und Varuskraften entgegenwirkt [44].

Der posteriore Kapsel-Bandapparat wird durch Muskelansätze und -ursprungssehnen sowie durch verschiedene Ligamente gebildet. Der M. popliteus entspringt am Rand der lateralen Femurkondyle und teilweise am Hinterhorn des Außenmeniskus, um nach distal medial an der posterioren Tibiafläche anzusetzen. Das popliteofibulare Ligament erstreckt sich zwischen Fibulakopf und M. popliteus am Muskel-Sehnen-Übergang [46]. Das Ligamentum popliteum obliquum bildet eine Verlängerung der Sehne des M. semimembranosus und spannt sich nach lateral superior in die posterolaterale Gelenkkapsel auf und besitzt Verbindungen zum M. popliteus [37]. Das Ligamentum popliteum arcuatum stellt eine Verbindung von der Ursprungssehne des M. popliteus zur Gelenkkapsel dar, welche als Y-förmige Struktur bis zum Fibulakopf zieht [65]. Variabel existiert in 10-30% der Population ein Sesambein, die Fabella, welche im lateralen Kopf des M. gastrocnemius eingebettet sein kann [12]. Von hier ausgehend kann ein Ligamentum fabellofibulare vorliegen, welches nach distal an den Fibulakopf zieht [44].

## *Biomechanik*

Das Kniegelenk besitzt sechs Freiheitsgrade: drei Rotationsbewegungen und drei Translationsbewegungen, die sich entlang dreier Achsen bewegen: der Tibiaachse, der transepikondylären Femurachse und der anteroposterioren Achse, welche im rechten Winkel zu den anderen beiden Achsen im Raum steht. Die Translationen entlang dieser Achsen werden entsprechend als proximal-distal, medial-lateral und anterior-posterior bezeichnet. Die Rotationsbewegungen um diese Achsen sind die Innen- und Außenrotation, die Flexion und Extension, sowie die Varus-Valgus-Rotation (Adduktion/Abduktion) [89]. Daher wird das Knie auch als ein zusammengesetztes Drehscharniergelenk oder Trochoginglymus bezeichnet. Die primäre Bewegung des Kniegelenks ist die Flexion bzw. Extension, welche durch die aktive Anspannung der ischiokruralen Muskulatur bzw. des M. quadriceps femoris erreicht wird [57]. Nach der Neutral-Null-Methode werden durchschnittliche Werte für die Flexion/Extension mit 130/0/0° bei aktiver Streckung angegeben, wobei die passive Beweglichkeit auf bis zu 160° Flexion ausgeweitet werden kann [57]. Manche Individuen erreichen eine Hyperextension von 5-10° [57].

In voller Extension liegen Tibia- und Femurschaft in der Regel auf einer Geraden in der Sagittalebene, welche die Kraftübertragung des Körpergewichts von vertikal möglichst ohne Energieverbrauch ermöglicht. Je mehr Beugung in der Sagittalebene stattfindet, desto weiter rückt der Schwerpunkt des Körpers und damit die Gewichtskraft hinter das Rotationszentrum des Kniegelenks und „[...]wirkt als flektierende Kraft.“ [44]. Dies wird durch Mehrarbeit der Oberschenkelextensoren kompensiert, was jedoch mit einem hohen Energieverbrauch einhergeht. Die Hyperextension verursacht analog dazu eine Verschiebung der Gewichtskraft vor das Drehzentrum, was allerdings durch die straffe hintere Gelenkkapsel kompensiert wird.

Die häufigste Kniebewegung tritt beim normalen Gang des Menschen auf [44,57]. Hierbei wird während der Schwungphase das Spielbein mit einer Flexion von durchschnittlich 67° am Standbein vorbei geschwungen, sodass der Fuß desselben Beines nicht auf dem Boden schleift. Nachdem das Spielbein das Standbein passiert hat, erfolgt unmittelbar vor dem Fersenkontakt mit dem Boden eine Knieextension durch die Muskulatur des Quadrizeps, welche jedoch nicht anhält, sondern von einer weiteren erneuten Flexion von etwa 15° abgelöst wird. Dies verhindert, dass das Körpergewicht durch das gestreckte Bein nach oben verlagert werden muss und verringert die auf das Knie einwirkenden Kräfte bei Bodenkontakt und wirkt somit energetisch günstig und schonender auf die Gelenkstrukturen [44,57].

Es erfolgt außerdem während des Gangs eine weitere Kniebewegung im Sinne einer Innen- bzw. Außenrotation des Unterschenkels. Der sog. „screw-home mechanism“ oder Schlussmechanismus erfolgt, während das Knie von ca. 20-30° Beugung zur vollen Extension

gestreckt wird und nimmt vermutlich eine Stabilisationsfunktion ein, indem der Kapsel-Band-Apparat vor dem Bodenkontakt gespannt wird, bevor die Gewichtskraft das nun die Standphase erreichende Bein belastet [44,57]. Die Schlussrotation im Knie ist kombiniert mit Rotationsbewegungen in Fuß- und Hüftgelenk. Das Hüftgelenk rotiert während der Schwungphase nach außen. Zeitgleich rotiert die Tibia nach außen und der Fuß macht eine Inversion im Subtalargelenk. Dies stabilisiert die Fußgelenke. Nach Fersenauftritt erfolgt die Innenrotation der Tibia, die dem Fuß eine Eversion erlaubt und die Fußgelenke entriegelt, sodass sich dieser verformen und Energie vom Boden absorbieren kann. Hiermit kann der Körper seine Energie äußerst effizient nutzen, um sich vom Boden vorwärts zu stoßen [44].

Weitere alltägliche Bewegungsabläufe des Kniegelenks sind der Auf- und Abstieg von Treppen, das Hinsetzen und Aufstehen aus dem Sitzen sowie schnellere Bewegungen wie Laufen [95].

Betrachtet man nun isoliert das Kniegelenk, lässt sich bei der Flexion feststellen, dass die Femurkondylen mehr als nur eine Rollbewegung auf dem Tibiaplateau vollbringen. Wäre dies der Fall, würde das Femur aufgrund der größeren Länge der Femurkondylenkontur über die Hinterkante des Tibiaplateaus hinausrollen. Dies wird verhindert, da das Femur während der Rollbewegung gleichzeitig eine Gleitbewegung nach anterior durchführt und durch die Spannung des VKBs in Flexion gebremst wird. Die Verhinderung dieser als „femur-roll-back“ bezeichneten Bewegung stellt eine der Hauptfunktionen des VKBs dar [44]. Ein weiteres Korrelat der Rollbewegung des Femurs während der Flexion wird durch die Kontaktflächen des Femurs mit dem Tibiaplateau bzw. der diesem aufliegenden Menisken deutlich. In endgradiger Kniegelenksstreckung drücken die Gelenkflächen des Femurs auf die Vorderhörner der Menisken, mit konsekutiver Gleitbewegung des Femurs nach dorsal. Durch eine Anspannung des VKBs und Entspannung des HKBs wird dieser Bewegung entgegengewirkt. In Beugung verliert das Femur den Kontakt zu den Vorderhörnern der Menisken und kommt in zunehmender Flexion vermehrt in Kontakt mit den Hinterhörnern der Menisken auf dem posterioren Tibiaplateau [44]. Der oben beschriebene Ablauf liegt in dieser Position vor.

Die Kräfte, die auf das Kniegelenk wirken, werden in innere und äußere Kräfte eingeteilt, wobei die inneren Kräfte durch aktive Anspannung von Muskulatur und passive Verformung des Kapsel-Band-Apparates infolge äußeren Drucks entstehen, die äußeren Kräfte hingegen größtenteils aus der Gewichtsbelastung resultieren [44].

### *Biomechanik der Kreuzbänder*

Das vordere Kreuzband stabilisiert das Kniegelenk primär in Bezug auf die anteriore tibiale Translation, wobei dieser Effekt in 30° Beugung am größten ist [44]. Außerdem verhindert das VKB die Hyperextension des Kniegelenks und wirkt sekundär stabilisierend bei Unterschenkelinnenrotation sowie Valgusstress in Extensionsstellung. Des Weiteren nimmt es eine Kontrollfunktion während der Schlussrotation (screw-home-mechanism) ein [44,57].

Das hintere Kreuzband wirkt primär stabilisierend in Bezug auf die posteriore tibiale Translation. Diese Wirkung ist bei einer Flexion von 90° am größten. Nahe der Extension erschlafft das HKB und die Strukturen des posterolateralen Kniegelenks übernehmen die Rolle der primären Stabilisation [44].

Gemeinsam wirken die Kreuzbänder an der oben genannten Kinematik des Tibiofemoralgelenks im Rahmen der Knieflexion und -extension mit [57].

### *Biomechanik der Kollateralbänder und der jeweiligen posterioren Gelenkecke*

Das mediale Kollateralband bietet die Hauptstabilisationsfunktion bei Abduktion (Valgusstress) und stabilisiert die Innenrotation der Tibia [33]. Gemeinsam mit dem vorderen Kreuzband stabilisiert es bei einer außenrotierten Tibia die vordere Schublade. Weiterhin stabilisiert es maßgeblich die Außenrotation der Tibia [44]. Die posteromediale Gelenkecke wirkt synergistisch mit dem medialen Seitenband stabilisierend auf die Abduktion in Knieextension und stabilisiert die Innenrotation bei einer Knieflexion von 0-30°. Außerdem arbeitet sie mit der posterolateralen Gelenkecke bei einer Knieflexion von 0-40° gegen ein Auftreten der hinteren Schublade.

Das laterale Kollateralband stabilisiert das Knie primär in Adduktion (Varusstress) [32]. Des Weiteren unterstützt es als sekundärer Stabilisator die vordere und hintere Schublade in Strecknähe des Knies. Die posterolaterale Gelenkecke und das laterale Kollateralband stellen die primären Stabilisatoren für die Außenrotation dar [15].

## Grundlegendes zur Magnetresonanztomografie (MRT)

### *Die Geschichte der MRT*

Die MRT ist eine noch relativ junge radiologische Untersuchungsmethode, die uns heutzutage im klinischen Alltag häufig begegnet. Die mathematischen Grundlagen, welche zum Verständnis und Anwendung der MRT elementar sind, wurden durch Jean Baptiste Joseph Fourier bei der Aufstellung seiner sog. Fourier-Transformation erstmals beschrieben [23]. Diese ermöglicht es, ein Signal in einer, zwei oder drei Dimensionen in eine Summe von Sinuskurven unterschiedlicher Frequenz, Phase und Amplitude umzuschreiben.

Die grundlegenden Experimente bezüglich magnetischer Resonanz begannen mit Wolfgang Pauli, der 1924 erkannte, dass Elektronen zusätzlich zu den ersten drei Quantenzahlen eine sog. Spinquantenzahl vorweisen und dass zwei identische Teilchen (Fermionen) nicht in demselben Quantenstadium existieren können [23]. Dies verleitete George Uhlbeck dazu anzunehmen, dass die Elektronen einen vierten Freiheitsgrad haben müssten und daher eine Rotationsbewegung ausführten [23]. 1938 demonstrierte Isidor Isaac Rabi, dass Moleküle sich in einem magnetischen Feld beeinflussen ließen und eine Form von radiomagnetischer Energie bei Exposition von gewissen Frequenzen ausstrahlten [75]. Im Jahre 1944 erhielt I.I. Rabi hierfür den Nobelpreis der Physik. Seine Arbeit wurde durch Felix Bloch und Edward Mills Purcell weitergeführt, die das sog. Phänomen der magnetischen Resonanz entdeckten [4,69]. Sie weiteten die Experimente von Rabi auf feste und flüssige Materie aus und erhielten dafür 1952 gemeinsam den Nobelpreis der Physik [75]. Erste Gewebe wurden durch Bratton et al. [47] anhand von quantitativen Messungen an Froschmuskeln 1965 untersucht. 1967 untersuchte T.R. Ligon Wasser und Fett in den Armen lebender menschlicher Probanden [47]. 1971 postulierte Raymond Damadian, dass die Relaxationszeiten von Teilchen in der MR dazu genutzt werden könnten, um gesundes Gewebe von Tumorgewebe zu unterscheiden. Hierzu wurden im Tierexperiment Messungen der T1- und T2-Relaxationszeiten in sechs verschiedenen gesunden Geweben der Ratte durchgeführt (Muskel-, Nieren-, Magen-, Darm-, Gehirn- und Lebergewebe) und mit denen in den beiden soliden Tumoren, dem Walker-Sarkom und dem Novikoff-Hepatom, verglichen. Hierbei wurde festgestellt, dass sich die Relaxationszeiten im Tumorgewebe erheblich von denen im Normalgewebe unterschieden [13]. Er etablierte ebenfalls, dass ein Objekt, welches exakt im Zentrum des Tomographen platziert wurde, ein gutes Signal erzeugte, das Herausrücken aus dem Zentrum das Signal verschwinden ließ. Basierend hierauf entwickelte er einen Tomographen, der ein sattelförmiges Magnetfeld erzeugte, später bekannt als „Field Focusing Nuclear Magnetic Resonance“ oder FONAR [14]. Die nächsten Schritte wurden durch Paul Lauterbur 1973 gemacht, der zeigte, dass es mithilfe von magnetischer Resonanz gelingen konnte ein Bild zu erzeugen, wofür er mit Sir Peter Mansfield 2003 den Nobelpreis der Physiologie und Medizin erhielt [48]. Lauterbur erkannte, dass mithilfe von zwei magnetischen Feldern, von denen eines stärker war als das andere, eine räumliche Unterscheidung von in einer Ebene befindlichen Objekten möglich war und weitete so die eindimensionale MR Spektroskopie zur zweidimensionalen MRT aus: Er definierte diesen Prozess als Zeugmatographie [48]. Sir Peter Mansfield und die Nottingham Group steuerten etliche wichtige Erkenntnisse zum Fundament der modernen MRT bei. Hierunter fielen die sog. „Slice selection“ und die Nutzung von starken Magnetfeldgradienten sowie der Entwicklung der sogenannten Echo-planar-Imaging Technik, die die Grundlage heutiger funktioneller MRTs (fMRTs) bildete. Er war auch der erste, der einen Querschnitt durch einen menschlichen Finger in vivo mit einem MRT

durchführte [56]. Es dauerte noch vier Jahre bis die ersten MRT-Bilder eines Menschen publiziert wurden [75]. Der sog. Aberdeen-Prototyp wurde in Oxford unter der Leitung von John Mallard und James Hutchison erbaut, deren Arbeitsgruppe die Spin-warp-Methode entwickelte, welche heute universell bei der MRT genutzt wird. Sie waren hochinteressiert an der T1-Relaxationszeit und untersuchten etliche Gewebe in normalen oder malignen Proben von Menschen und Tieren [55]. In den frühen 1980iger Jahren konnten durch große technische Fortschritte, an denen Firmen wie Philips, Siemens und General Electric maßgeblich beteiligt waren, und weitläufige klinische Forschung schließlich erste Publikationen zur Untersuchung von diversen Körperregionen gemacht werden [45,75]. In den folgenden Jahren erfuhr die Magnetresonanztomografie eine exponentielle Zunahme an Beliebtheit in der klinischen Diagnostik, sodass heutzutage schätzungsweise mehr als 50.000 MRT-Geräte in Benutzung stehen [96].

Die MRT des Kniegelenks wurde durch enge Zusammenarbeit von Orthopäden und Radiologen optimiert, sodass der Stellenwert in der klinischen Anwendung seit den 80iger Jahren deutlich anstieg. So erlaubt heute eine MRT die detaillierte Darstellung von sowohl knöchernen als auch weichteiligen Geweben, mit dem großen Vorteil eines hohen Weichteilkontrasts und der freien Auswahlmöglichkeit der Schnittebenen [44].

### *Grundlegende Technik der MRT*

Im Nucleus eines beliebigen Atoms befinden sich eine bestimmte Anzahl von Protonen und Neutronen, die einen intrinsischen Drehimpuls besitzen. Dieser wird als intrinsischer Spin bezeichnet. Des Weiteren besitzen Protonen und Neutronen ein magnetisches Dipolmoment, welches proportional zu ihrem intrinsischen Spin ist. Sie ähneln hiermit einem winzigen Magneten [23]. Bei Elementen mit geraden Koordinationszahlen wie beispielsweise Kohlenstoff ( $^{12}\text{C}$ ) oder Sauerstoff ( $^{16}\text{O}$ ) ist das magnetische Moment ausgeglichen. Wenn ein Element eine ungerade Zahl an Protonen oder Neutronen besitzt, wie dies bei Wasserstoff ( $^1\text{H}$ ) oder Helium ( $^3\text{He}$ ) der Fall ist, so hat der Nucleus des Elements ein magnetisches Dipolmoment.

In der MRT spielt der sog. gyromagnetische Quotient eine wichtige Rolle. Dieser gibt das Verhältnis von magnetischem Dipolmoment zum Spin an. Da im menschlichen Körper ein sehr hoher Gehalt an Wasser- und Fettmolekülen vorliegt, welche auch einen hohen gyromagnetischen Quotienten vorweisen, stellen diese Moleküle den Hauptanteil der Teilchen dar, die in klinischen MRT-Untersuchungen signalgebend sind [23].

Wenn ein schwaches magnetisches Wechselfeld im Radiofrequenzbereich eine Veränderung der relativen Ausrichtung dieser Teilchen im Vergleich zu einem starken statischen

Magnetfeld bewirkt, wird elektromagnetische Energie in den Teilchen aufgenommen und nach Abschalten des magnetischen Wechselfeldes wieder abgegeben. Die Frequenz, mit der dieses Phänomen erfolgt, ist abhängig von dem Produkt aus Magnetfeldstärke des applizierten statischen Magnetfelds und dem magnetischen Dipolmoment des Nucleus. Da Nuclei unterschiedlicher Elemente und Isotope desselben Elements sehr unterschiedliche magnetische Dipolmomente vorweisen, können deren Signale bei verschiedenen Frequenzen problemlos lokalisiert werden. Werden die Unterschiede im magnetischen Dipolmoment durch Elektronen in den Molekülen erzeugt, wird Information bezüglich der molekularen Struktur gewonnen. Dies beschreibt das Prinzip der Kernspinresonanzspektroskopie (englisch: Nuclear magnetic resonance auch NMR-Spectroscopy). Werden sie jedoch durch einen sog. Gradienten (die Rate der Veränderung in einem Magnetfeld) im applizierten Magnetfeld erzeugt, geben sie Auskunft über die räumliche Lokalisation dieser Nuclei. Dies beschreibt das Phänomen der NMR Zeugmatographie [47].

Konkret bedeutet dies, dass in der MRT durch die Einstrahlung eines Hochfrequenzimpulses Wasserstoffprotonen ein höheres Energieniveau erlangen, um nach Abschaltung des Hochfrequenzimpulses in ihre Ausgangslage zurückzukehren. Dieser Vorgang wird als Relaxation bezeichnet [44]. Die hierbei entstehenden Signale werden mittels verschiedener Methoden in Spektren und/oder Bilder konvertiert. Dieses dynamische Verhalten lässt sich provozieren und messen und wird durch sog. Relaxationszeiten charakterisiert [47]. Man unterscheidet zwei Formen der Relaxation:

- Die T1-Relaxationszeit oder Spin-Gitter-Relaxation (auch Longitudinal-Relaxation), welche die Zeit beschreibt, bis die aufgenommene Energie nach Ausrichtung in dem Hochfrequenzmagnetfeld wieder abgeklungen ist und die Protonen in ihre Ausgangslage zurückgekehrt sind.
- Die T2-Relaxationszeit, auch Transversal-Relaxation oder Spin-Spin-Relaxation, die die Zeit beschreibt, in der sich die sog. Transversalmagnetisierung ändert. Diese entsteht dadurch, dass die Protonen durch den Hochfrequenzimpuls, zusätzlich zum Erlangen des höheren Energieniveaus, synchronisiert werden und in Phase laufen. Dadurch entsteht eine transversale Magnetisierung zwischen den Protonen. Fällt der Hochfrequenzimpuls weg, dephasieren die Protonen und die transversale Magnetisierung nimmt ab. Das Abklingen der transversalen Magnetisierung wird durch die T2-Relaxationszeit angegeben [44]. Abhängig von der Lokalisation und Umgebung des Protons ändern sich diese Zeiten auch im selben Molekül. So kann ein Wasserstoffteilchen in Gewebeflüssigkeit unterschiedliche Relaxationszeiten in unterschiedlichen Geweben vorweisen [47]. Mit dieser Methode lassen sich Strukturen, Organe und Läsionen mit einer Auflösung von wenigen Millimetern differenzieren.

### *Wichtungen und Kontrastmittel*

T1-Wichtung: In dieser Wichtung werden Einflüsse der T2-Relaxation minimiert, während auf die T1-Relaxation ein besonderes Augenmerk gerichtet ist. So zeigen sich Gewebe, die eine kurze T1-Relaxationszeit besitzen, hell, solche mit einer längeren T1-Relaxationszeit relativ dunkel. Man kontrolliert die T1-Wichtung mittels der Repetitionszeit (TR) und der Echozeit (TE). Eine kurze TR und kurze TE werden für die T1-Wichtung benötigt [23]. Die TR bezeichnet die Zeit, welche zwischen zwei Anregungsimpulsen vergeht. Die TE bezeichnet das Zeitintervall zwischen Anregung und Messung des MR-Signals.

T2-Wichtung: Analog dazu stellt sich die T2-Wichtung dar, indem die Einflüsse von der T1-Relaxation minimiert und die von T2-Relaxation betont werden. Gewebe mit einer kurzen T2-Relaxationszeit erscheinen dunkel, während Gewebe mit einer langen T2-Relaxationszeit heller erscheinen. In der T2-Wichtung wird eine lange TE und eine lange TR benutzt [23].

Fettsupprimierte Wichtung: STIR (short-tau-inversion-recovery) basiert auf dem Prinzip, dass die longitudinale Ausrichtung von Molekülen im beliebigen Gewebe zwangsläufig durch einen Nullpunkt läuft, während sie von negativer zu positiver Magnetisierung wechselt. Wird das Signal ausgelesen, während die Magnetisierung nahe des Nullpunktes ist, soll wenig bis kein Signal produziert werden. So kann von einem bestimmten Gewebe abhängig von seiner T1-Relaxationszeit ein Signal supprimiert werden. Fettsupprimierte Wichtungen sind besonders geeignet, um Läsionen deutlich im Fettgewebe darzustellen [23].

Darstellung von Gewebe im MRT: T1-gewichtete Bilder zeigen fetthaltige Gewebe hell, Flüssigkeit mit hohem Wassergehalt dagegen sehr dunkel. Ein hoher Proteingehalt in Flüssigkeiten zeigt sich heller. T2-gewichtete Bilder zeigen fetthaltige Gewebe eher dunkler, während Flüssigkeiten hell erscheinen. Knorpel- und Muskelgewebe sowie Bandstrukturen zeigen sich in beiden Wichtungen dunkel [23].

Kontrastmitteleinsatz: Für gewöhnlich werden gadoliniumhaltige Kontrastmittel in der MRT eingesetzt. Dieser paramagnetische Stoff führt zu Signalintensitätserhöhung durch Veränderung der T1-Relaxationszeit. Diese können intravenös verabreicht werden und auch in speziellen Fällen zur intraartikulären Injektion genutzt werden. Hiermit können deutlich bessere Bilder insbesondere in Bezug auf Vaskularisation bzw. intraartikuläre Strukturen gewonnen werden [23,44].

### *Darstellung der Kreuzbänder in der MRT*

Die MRT eignet sich sehr gut zur Diagnostik intraartikulärer Strukturen, insbesondere des VKBs. Sie kann mit hoher Sensitivität und Spezifität repräsentative Aussagen zur Morphologie und Anatomie dessen machen [43]. Klassischerweise stellt sich das VKB in T1- und T2-

gewichteten Spinechosequenzen in zufriedenstellender Qualität dar, welche gelegentlich durch fettsupprimierende Sequenzen oder STIR-Sequenzen ergänzt werden können [43]. Hierbei zeigt sich das VKB gut abgrenzbar zu den angrenzenden Strukturen als dunkle, hypointense Struktur, die sich zwischen Tibia und Dach der Fossa intercondylaris aufspannt und an seinem Ursprung und Ansatz durch höhere Signalintensität imponiert, was am ehesten auf die Einlagerung von Fett- und Synovialgewebe zurückzuführen ist. Die Dicke wird mit 3-4 mm abgeschätzt [43].

Das gesunde hintere Kreuzband stellt sich in der MRT deutlich hypointens dar. Die homogene Struktur ist in der Regel in seiner Gänze in einer oder zwei Sektionen zu erkennen [34]. Die Sagittalebene zeigt das HKB in seinem Verlauf „[...] bogenförmig dorsal-konvex [...]“ [44].

Im Gegensatz dazu stellen sich subkutanen Fettgewebe sowie Knochenmark als relativ hyperintense Strukturen in der MRT dar. Geringer hyperintens, jedoch deutlich abgrenzbar vom hypointens dargestellten kortikalen Knochen und den angrenzenden Menisken, ist der Gelenkknorpel zu erkennen. Die epiphysäre Wachstumsfuge lässt sich ebenfalls, auch in erwachsenen Probanden, in der MRT darstellen [72].

# Methodik

## Studiendesign

Diese retrospektive Studie untersuchte die kernspintomographische Morphologie des kindlichen vorderen und hinteren Kreuzbandes in verschiedenen Altersstufen. Anhand von Messungen an MRT-Aufnahmen des Kniegelenks wurden folgende Parameter bestimmt, die die Morphologie des vorderen und hinteren Kreuzbandes definieren:

- die Länge und Breite des vorderen Kreuzbandes in sagittaler Schnittebene und die mediolaterale Breite des vorderen Kreuzbandes in der Coronarebene
  - o die hiermit errechnete Fläche und eine Berechnung des Volumens des vorderen Kreuzbandes
- der Anstiegswinkel des vorderen Kreuzbandes im Vergleich zum Tibiaplateau in der coronaren und sagittalen Schnittebene
- die Inklination der Tangente zur Femurachse an das Dach der interkondylären Notch
- die Breite der Femurkondylen sowie der Fossa interkondylaris und des vorderen und hinteren Kreuzbandes im Coronarschnitt
- daraus errechnete Quotienten:
  - o das Verhältnis von Breite der Fossa interkondylaris zur Breite der Femurkondylen (Notch-Width-Index = NWI)
  - o das Verhältnis von der Breite des vorderen Kreuzbands zur Breite der Notch
  - o das Verhältnis von der Breite des vorderen Kreuzbands zur bikondylären Femurbreite
  - o das Verhältnis der Breite des hinteren Kreuzbandes zur Breite der Notch und zur bikondylären Femurbreite
- die Länge des hinteren Kreuzbandes in sagittaler Schnittebene
- die Länge der lateralen Femurkondyle an ihrem breitesten Durchmesser
  - o Quotient: Laterale Femurkondylenbreite zu sagittaler HKB-Länge

Vor Studienbeginn wurde das Studienprotokoll der Ethikkommission der Ärztekammer des Saarlandes vorgelegt und durch die Ethikkommission wurden keine Bedenken bezüglich der Studiendurchführung geäußert. Das schriftliche Einverständnis der Proband\*innen bzw. der sorgebevollmächtigten Personen wurde eingeholt.

Die genutzten Datensätze für die Messungen entstammen den der Universitätsklinik des Saarlandes vorliegenden MRT-Bildgebungen kindlicher Kniegelenke aus den Jahren 2011 bis

2020, welche im Rahmen der klinischen Routine von den Ärzten der Klinik für Orthopädie und Orthopädischer Chirurgie indiziert worden sind.

In Zusammenarbeit mit der Klinik für Diagnostische und Interventionelle Radiologie des Universitätsklinikums des Saarlandes erfolgte die Planung und Durchführung der Studie sowie die Auswahl der oben aufgeführten Parameter.

Da es sich hier um kernspintomographische Messungen der Anatomie des kindlichen, heranwachsenden Bewegungsapparates handelt, wurde eine Unterteilung der Kohorte in verschiedene Altersgruppen durchgeführt. Hierbei wurde die Mindestanzahl der Untersuchten pro Altersgruppe auf 8 festgelegt. Folgende Einteilung wurde vorgenommen:

- Gruppe 1: 0-3 Jahre
- Gruppe 2: 4-6 Jahre
- Gruppe 3: 7-9 Jahre
- Gruppe 4: 10-12 Jahre
- Gruppe 5: 13-15 Jahre
- Gruppe 6: 16-18 Jahre

Folgende Einschlusskriterien wurden festgelegt:

- Schriftliches Einverständnis der Patient\*innen bzw. seines/ihrer Erziehungsberechtigten zur Inklusion in der Studie
- Patient\*innenalter zum Zeitpunkt der Untersuchung zwischen 0 und 18 Jahren
- Standardisierte MRT-Untersuchung aus den Jahren 2011 bis 2020 gemäß Untersuchungsprotokoll der Klinik für Diagnostische und Interventionelle Radiologie des Universitätsklinikums des Saarlandes mit adäquater Darstellung und korrekter Position der Extremität während der Durchführung
- Keine Bewegungsartefakte während der Durchführung der MRT bzw. durch einliegende Implantate
- Vorliegen von MRT-Bildern in der Sagittal-, Transversal- und Coronarebene in entsprechenden Sequenzen
- Nur ein MRT pro Patient\*in und pro Altersgruppe, mit der Ausnahme von beidseitiger Aufnahme bzw. Aufnahme von kontralateralem Kniegelenk in demselben Altersbereich

Folgende Ausschlusskriterien wurden festgelegt:

- Vorliegen von intraartikulären Pathologien aufgrund angeborener Fehlbildungen (Dysplasie/Aplasie der Kreuzbänder) oder neoplastischer Prozesse (Tumor)

- Vorliegen eines Verdachts auf ein intraartikuläres Infektgeschehen
- Zustand nach Kniegelenkstraumata mit Verletzung des VKBs bzw. HKBs sowie Voroperationen des untersuchten Kniegelenks
- Kniegelenksnahe Frakturen des distalen Femurs oder der proximalen Tibia

Unter Beachten unserer Auswahlkriterien wurden insgesamt 127 MRT-Untersuchungen in die Studie mit einbezogen. Von den 127 Probanden\*innen waren 67 weiblich und 60 männlich. Die demografischen Daten bezüglich Patienten\*innenalter, -größe und -gewicht wurden aus der klinischen Dokumentation in der Patientenakte gewonnen.

Alle MRT-Untersuchungen wurden von der Klinik für Diagnostische und Interventionelle Radiologie des Universitätsklinikum des Saarlandes in Homburg mit einem drei Tesla Siemens Magnetom Vida Gerät durchgeführt. Dieses weist ein 55 x 55 x 50 cm<sup>3</sup> großes Sichtfeld auf und besitzt eine 70 cm große Öffnung. Es arbeitet mit 60/200 Gradienten bei 2.7 MW. Für die Untersuchungen wurde der Tx/Rx Knee 18 A3 T Tim Coil genutzt. In den Fällen, in denen beide Kniegelenke zugleich untersucht wurden, ist eine Body 18 long A3 T Tim Coil verwendet worden [97]. Dies war bei den Patienten\*innen, die der jüngsten Altersgruppe angehörten, notwendig, da in diesen Fällen die standardmäßig verwendete Kniespule deutlich zu groß gewesen wäre. Für die MRT-Untersuchung wurde das Knie in strecknaher Position bei etwa 5° innenrotiertem Bein gelagert. Hierbei wurde auf die Zentrierung der Patella geachtet. Das Bein wurde mithilfe von Sandsäcken und einer für die Patienten\*innen angenehmen Polsterung so gelagert, dass eine hohe Bildqualität unter Vermeidung von Bewegungsartefakten, erreicht werden konnte. Eine Sedierung war bei den jüngsten Patienten\*innen unter anästhesiologischer Aufsicht im Sinne einer sog. „Conscious Sedation“ notwendig. Soweit realisierbar wurden zur Beurteilung des VKBs Sequenzen parallel hierzu verwendet.

Die Bestimmung der unten aufgeführten Messparameter wurde unabhängig voneinander von zwei Untersuchern zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten durchgeführt. Die Wiederholungsmessungen sind in einem Abstand von drei Wochen erfolgt. Jede der unten beschriebenen Messungen wurden dreimal durchgeführt und der Mittelwert der drei gemessenen Werte als definitives Messergebnis festgehalten.

Für die Durchführung der Messungen wurde das PACS Viewer Programm genutzt. Hierzu wurden die MRT-Untersuchungen im PACS-Viewer betrachtet und mit den durch die Software verfügbaren Messinstrumenten vermessen. Zur Anfertigung von bestimmten Messungen wurden die Microsoft Apps „Microsoft Fotos ©2019“ sowie „Ausschneiden und skizzieren © 2018“ Version 10 genutzt. So konnten mehrere Bildausschnitte und Ebenen in Relation

zueinander gesetzt werden und auch außerhalb des PACS Viewer Hilfslinien eingezeichnet und Winkel gemessen werden.

## Messungen

Für die jeweiligen Parameter wurde festgelegt, in welchen Schnittebenen und in welchen Sequenzen die entsprechenden Messungen standardisiert durchzuführen sind. Die Schichtdicke der analysierten MRTs betrug zwischen 2,5 und 4 mm. Die in der Sagittalebene gemessenen Parameter wurden in den T1-TSE und STIR-Sequenzen betrachtet. In der Transversalebene wurden die Messungen in der T1-TSE oder T2-TSE Sequenz durchgeführt. Die Messungen in der Coronelebene wurden in der T1-TSE Sequenz beurteilt.

### *VKB in der Sagittalebene (VKBLängeSag, VKBapBreite)*

Um das VKB in der Sagittalebene zu messen, wurde die Schnittebene festgelegt, auf der zugleich der anteriore Fußpunkt des VKBs im Bereich der Area interkondylaris der Tibia und der am weitesten posterosuperior abgebildete Punkt des VKBs im Bereich der Fossa interkondylaris zu erkennen war (s. Abb. 1). Die Länge des VKBs wurde zwischen diesen zwei Punkten vermessen. Die Messung erfolgte nach der Methode von Lima et al., die in einer Untersuchung zum VKB an einer pädiatrischen Population bereits etabliert wurde [51].



*Abbildung 1: Messung der VKB Länge in der Sagittalebene: Festlegung der Ebene im Sagittalschnitt, welche eine optimale Abbildung des VKBs zeigt. Messen der Strecke (grün) zwischen dem am weitesten anterior gelegenen Punkt und des am weitesten posterosuperior gelegenen Punktes (weiße Punkte).*

In dieser festgelegten Ebene wurde eine weitere Strecke vom Fußpunkt bis zum Mittelpunkt der zuvor gemessenen Länge des VKBs eingezeichnet. An dieser Stelle wurde orthogonal zur Längsmessung des VKBs die Ausdehnung des VKBs in der Breite bestimmt, indem von dem am weitesten anterior zu dem am weitesten posterior abgrenzbaren Punkt gemessen wurde [51] (s. Abb. 2).



*Abbildung 2: Messung der VKB Breite in der Sagittalebene: Markieren des Punktes an der Hälfte der zuvor gemessenen VKB-Länge. Hierzu orthogonal Abmessen der Breite des VKBs von dem Mittelpunkt der VKB-Länge von anterior nach posterior.*

### *VKB in der Transversalebene (VKBmlBreite)*

Zu diesen oben beschriebenen Messungen wurde in einem weiteren Fenster der korrespondierende Transversalschnitt des MRT mit Hilfe der Fadenkreuz-Funktion aufgerufen. So kann die gewünschte Position, welche den Mittelpunkt der VKB-Länge in der Sagittalebene entspricht, festgestellt werden und durch Ausrichten des Fadenkreuzes an dieser Stelle, ebenfalls im Transversalschnitt eingeblendet werden. In dieser Ebene wurde ausgehend vom Fadenkreuz die sog. mediolaterale Breite des VKBs gemessen [51] (s. Abb. 3 und 4).



**Abbildung 3:** Messung der mediolateralen Breite des VKBs in der Transversalebene: Simultane Darstellung des Sagittalschnittes (links) und des senkrecht dazu ausgerichteten Transversalschnittes (rechts). Markieren des Mittelpunktes der VKB-Länge (Sagittal), Einblenden der Fadenkreuz-Einstellung (gelbes Kreuz) und Ausrichten desselben an den Mittelpunkt des VKBs im Sagittalschnitt. Die Darstellung der korrespondierenden Stelle im Transversalschnitt erfolgt automatisch.



**Abbildung 4:** Messung der mediolateralen Breite des VKBs in der Transversalebene: Vom Zentrum des Fadenkreuzes je nach Ausdehnung des VKBs nach medial und lateral.

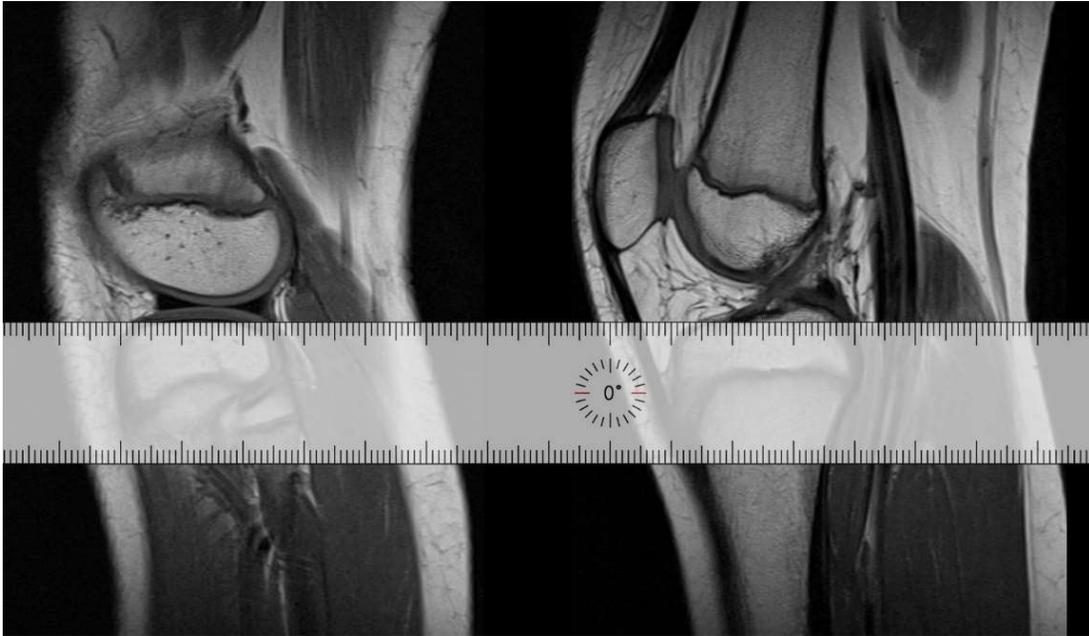
### *Anstiegswinkel des VKBs (VKBSagAnstiegswinkel)*

Die Messung des Anstiegswinkels des VKBs in der Sagittalebene wurde in Bezug auf eine Gerade, welche parallel zum lateralen Tibiaplateau verläuft, durchgeführt. Hierfür wurde von der Schnittebene, in der das Fibulaköpfchen und gleichzeitig eine annähernd waagerechte Abbildung des Tibiaplateaus zu sehen ist, eine Bildschirmaufnahme gemacht. Im nächsten Schritt wurde erneut die sagittale Schnittebene zur Darstellung des VKBs, wie oben beschrieben, aufgesucht.

Hier erfolgte ebenfalls eine Bildschirmaufnahme. Diese beiden Aufnahmen wurden nun im Bildbearbeitungsprogramm so ausgerichtet, dass eine Projektion der ersten auf die zweite Schnittebene etabliert werden konnte (s. Abb. 5 und 6).

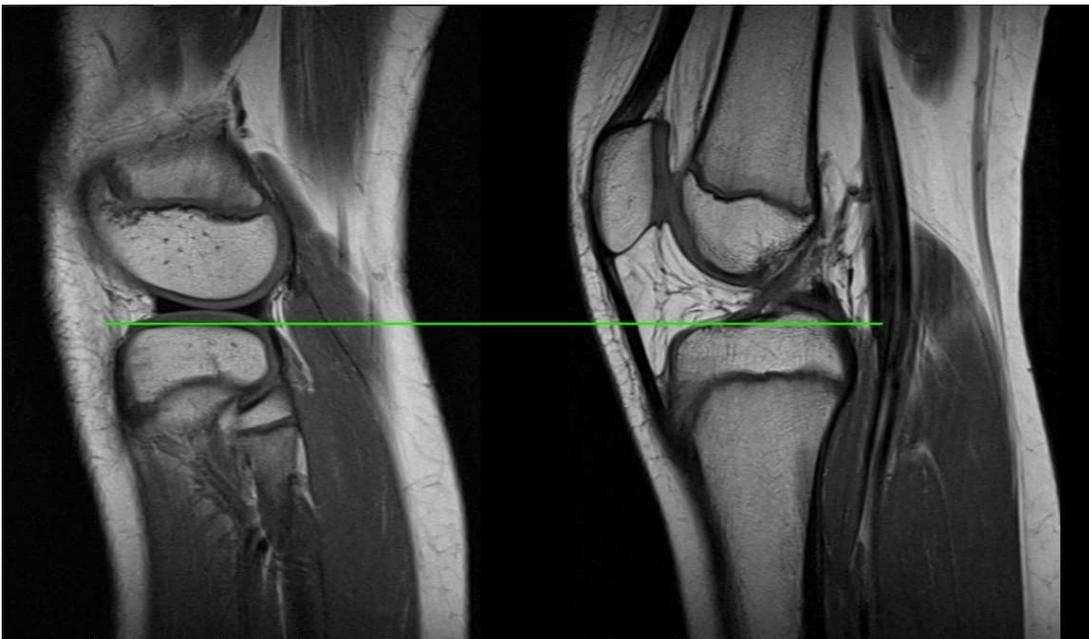


*Abbildung 5: Sagittalschnitt mit Darstellung des lateralen Tibiaplateaus und dem Fibulaköpfchen (links); Sagittalschnitt mit optimaler Darstellung des VKBs. Ausrichten der Aufnahmen auf derselben Höhe (rechts).*

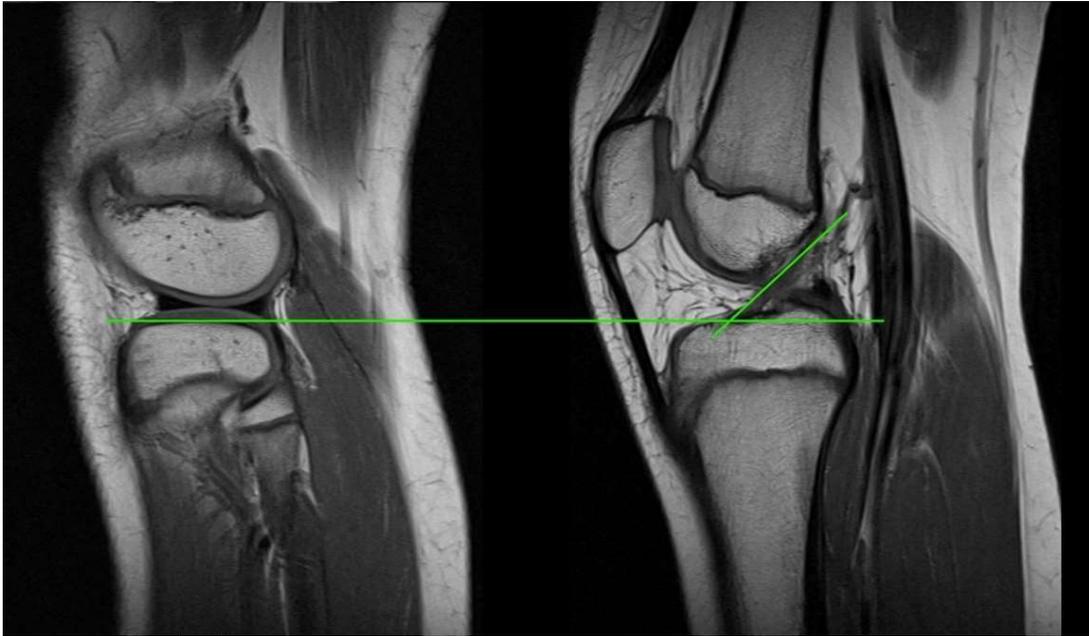


*Abbildung 6: Einblenden des Lineals zum Einzeichnen der entsprechenden Tangente*

Die Gerade tangiert den Knochen des Tibiaplateaus subchondral. Diese Gerade entspricht dem unteren Schenkel des Anstiegswinkels des VKBs. Der obere Schenkel dieses Winkels entspricht der Tangente, welche an das anteriore Segment des VKBs angelegt wurde (s. Abb. 7 und 8).

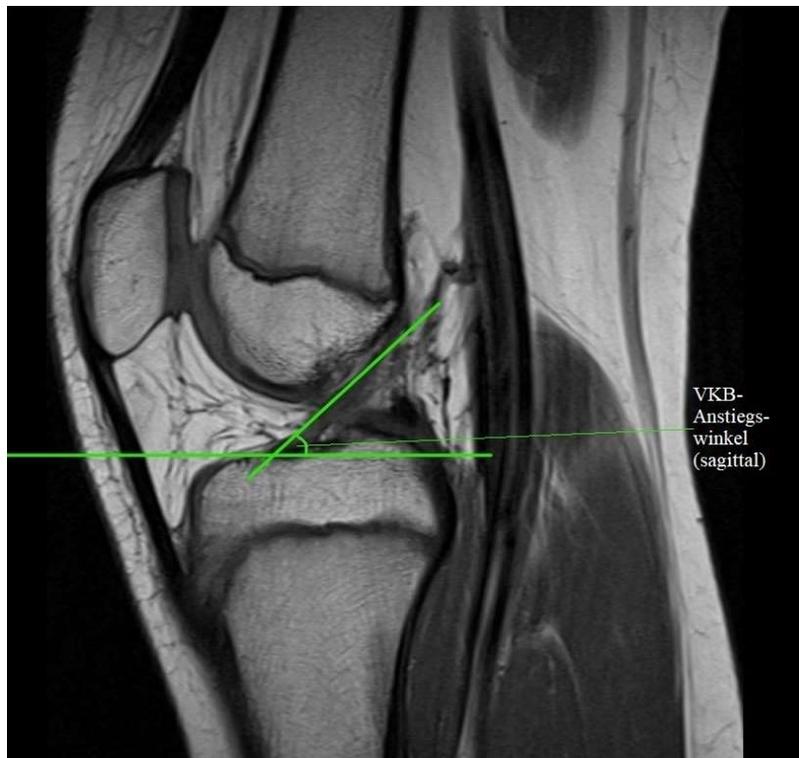


*Abbildung 7: Bestimmung der Tangente an das laterale Tibiaplateau*



*Abbildung 8: Anlegen einer Tangente an das anteriore Segment des VKBs als oberen Schenkel des Anstiegswinkels*

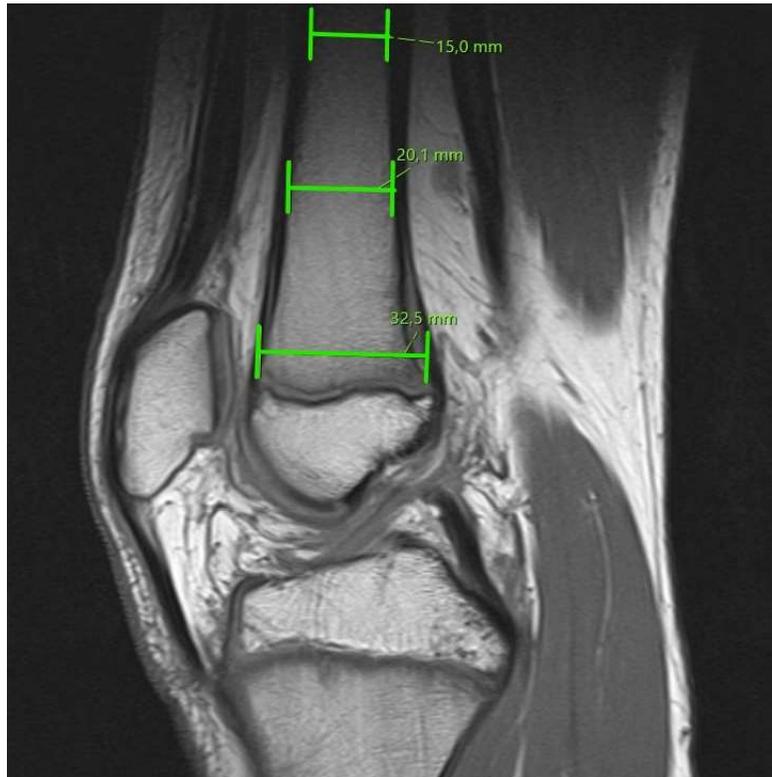
Der dazwischen liegende Winkel entspricht dem Anstiegswinkel des VKBs in der Sagittalebene [VKBSagAnstiegswinkel, (s. Abb. 9)].



*Abbildung 9: Bestimmung des Anstiegswinkels des VKBs*

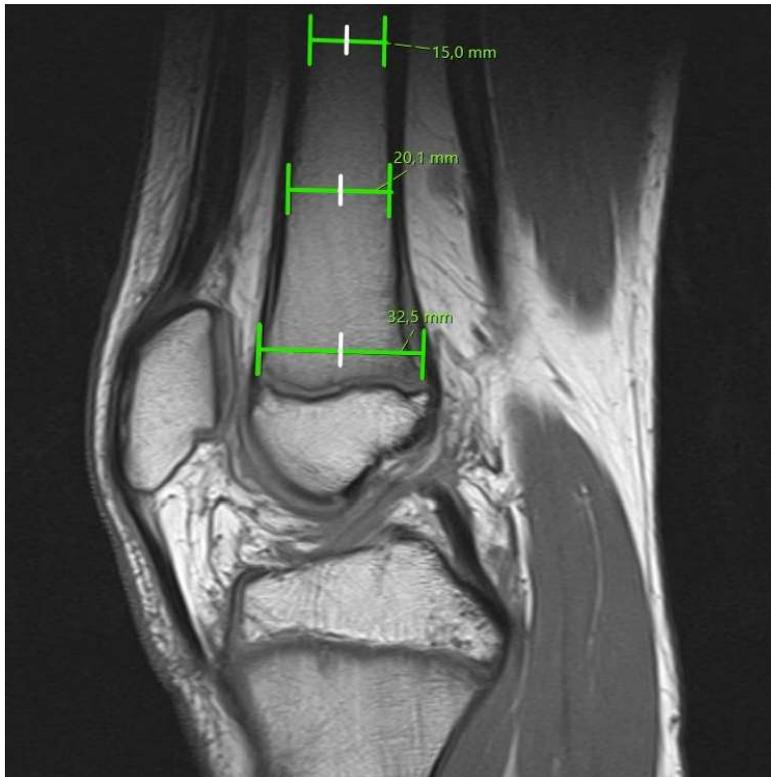
### *Anstiegswinkel der interkondylären Notch (NotchAnstiegswinkel)*

Zur Bestimmung des Anstiegswinkels der interkondylären Notch wurde die Schnittebene aufgesucht, in der die Notch in ihrer vollen Länge dargestellt ist. Im zweiten Schritt wurde als Hilfslinie die longitudinal verlaufende Femurachse bestimmt. Dafür wurde das Femur auf drei unterschiedlichen Höhen im Bereich des Schaftes proximal der Kondylen in der Breite gemessen (s. Abb. 10).

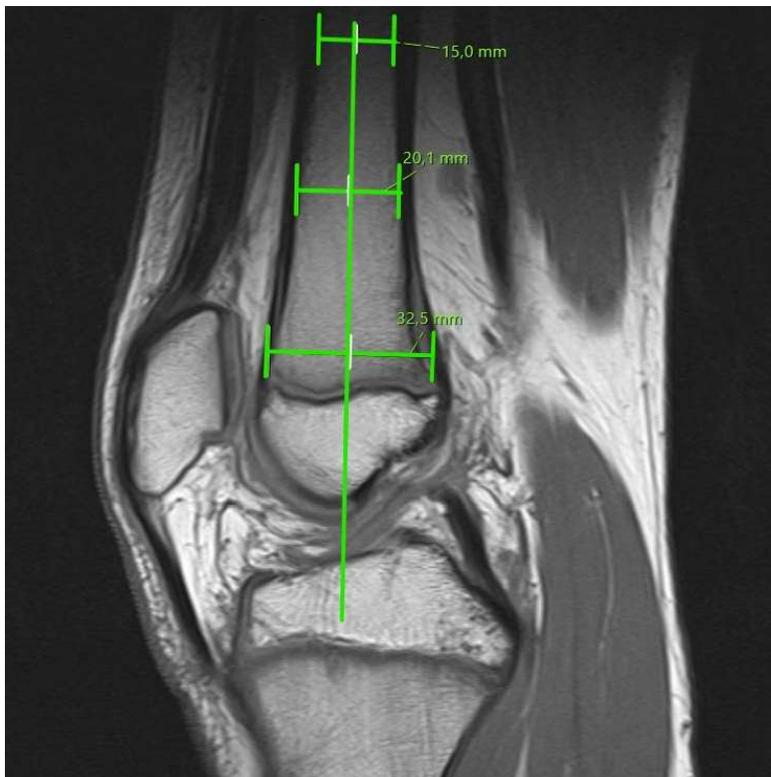


*Abbildung 10: Bestimmung der Ebene mit optimaler Darstellung der Notch. Abmessung der Femurbreite auf drei Höhen zur Bestimmung der Femurachse.*

Diese Strecken wurden jeweils halbiert und eine Gerade durch die drei entstandenen Mittelpunkte gelegt, welche annäherungsweise der Femurachse entspricht (s. Abb. 11 und 12).

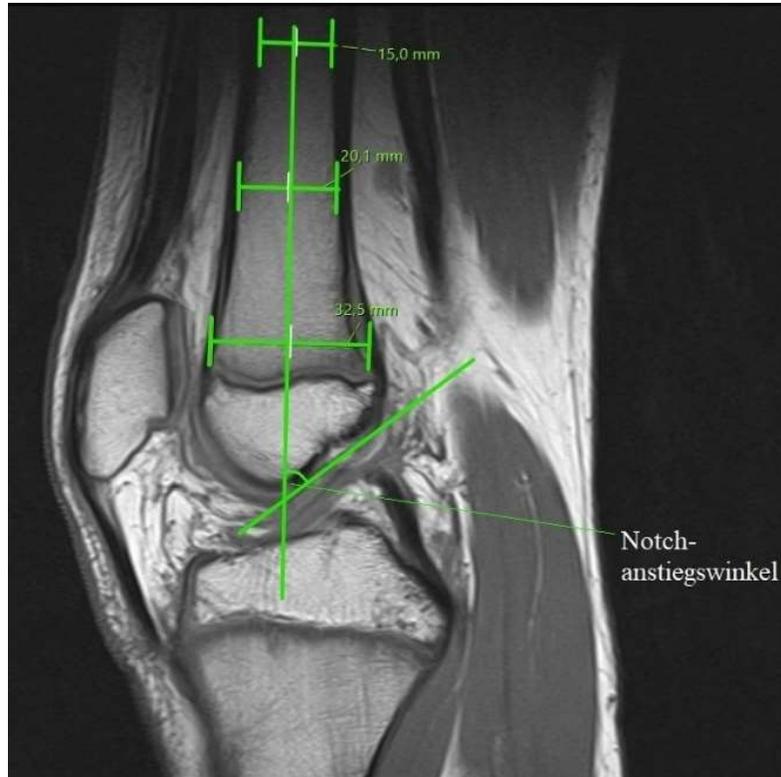


**Abbildung 11:** Markierung der Mittelpunkte dieser Strecken, sodass die Femurachse näherungsweise als Gerade durch diese Punkte hindurch bestimmt werden kann.



**Abbildung 12:** Einzeichnen dieser Geraden durch die markierten Mittelpunkte hindurch.

Diese Gerade stellte den ersten Schenkel des zu bestimmenden Winkels dar. Der zweite Schenkel des Winkels wurde in derselben Schnittebene durch die Tangente an das Dach der interkondylären Notch definiert [51]. Der dadurch entstandene Winkel entspricht dem Anstiegswinkel der interkondylären Notch in der Sagittalebene [NotchAnstiegswinkel (s. Abb. 13)].



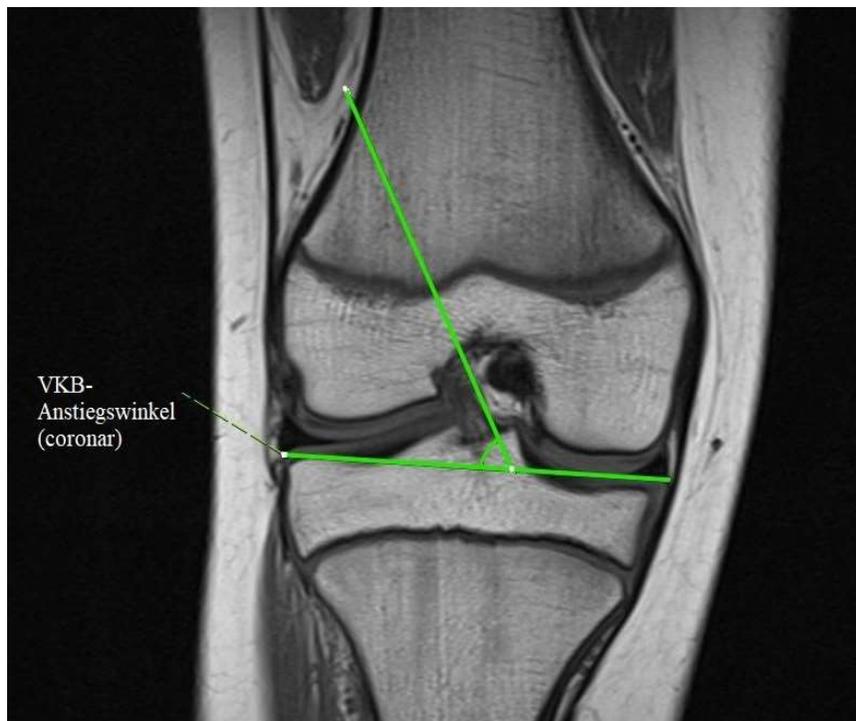
**Abbildung 13:** Messung des Anstiegswinkels der interkondylären Notch durch Einzeichnen des ersten Schenkels auf der zuvor bestimmten Geraden und Anlegen der Tangente an das Dach der interkondylären Notch als zweiten Schenkel.

#### **Coronarer Anstiegswinkel des VKBs (VKBCorAnstiegswinkel)**

Der coronare Anstiegswinkel des VKBs wurde in der transversalen Schnittebene gemessen, in der der tibiale Ansatz des VKBs am genauesten zur Darstellung kommt. Als Hilfslinie diente in dieser Schnittebene die Verbindungslinie zwischen den beiden äußersten Punkten des Tibiaplateaus am Übergang von Gelenkknorpelschicht und tibialseitigem Meniskusabschnitt. Diese Linie entspricht der Projektion des Tibiaplateaus auf die ausgewählte Schnittebene und diente als ein Schenkel des coronaren Anstiegswinkels, während der zweite Schenkel von medial an das VKB angetragen wurde [51]. Der hieraus entstehende Winkel entspricht dem sog. coronaren Anstiegswinkel des VKBs [VKBCorAnstiegswinkel (s. Abb. 14 und 15)].



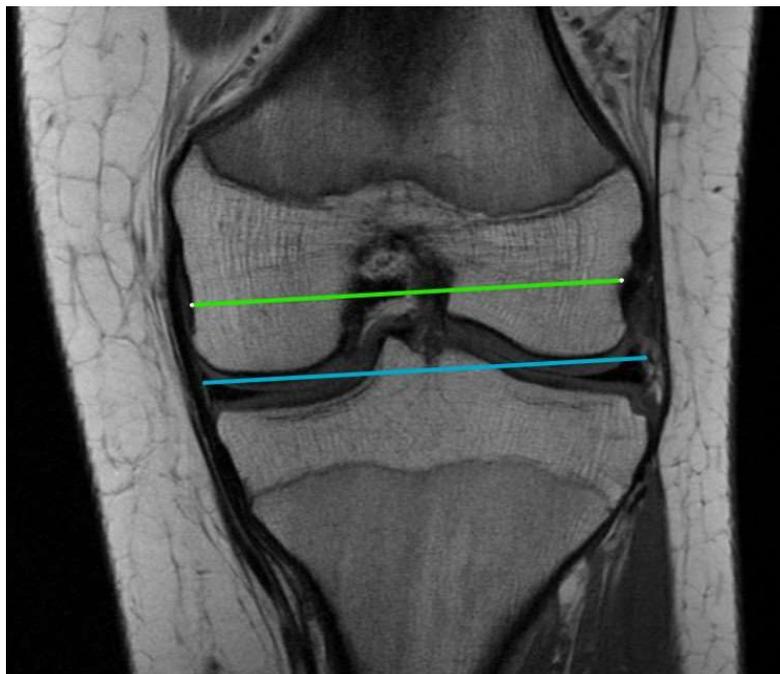
**Abbildung 14:** Bestimmung der Schnittebene mit optimaler Darstellung des tibialen VKB-Ansatzes. Aufsuchen der äußersten Punkte des Tibiaplateaus und Einzeichnen einer Strecke zwischen diesen Punkten als Hilfslinie.



**Abbildung 15:** Messung des coronaren Anstiegswinkel des VKBs: Winkel zwischen Hilfslinie und medialseitiger Begrenzung des VKBs

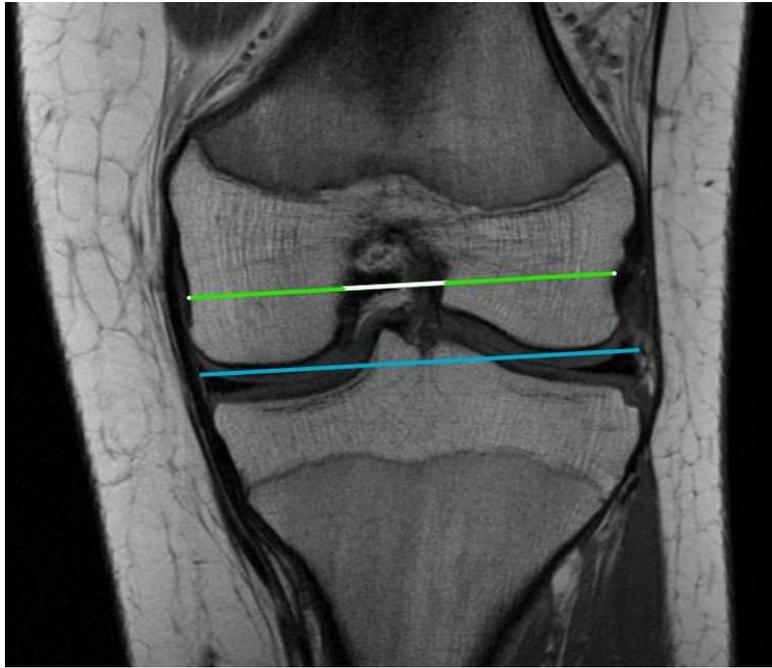
*Bikondyläre Breite, Breite der interkondylären Notch und Breite des VKBs sowie HKBs in der Coronarebene (BikondyläreBreite, NotchBreite, VKBBreite, HKBBreite)*

Die folgenden Messungen wurden, in Anlehnung an die von Domzalski et al. beschriebenen Messmethoden, in dem Transversalschnitt durchgeführt, auf dem der proximale Ursprung der Poplitealsehne im Bereich der lateralen Femurkondyle zu sehen ist [20]. Diese sog. Poplitealrinne stellt den ersten Messpunkt der bikondylären Breite dar. Von hier aus wurde eine Strecke parallel zur Gelenklinie, die durch die distalen Femurkondylen gebildet wird, auf die gegenüberliegende mediale Femurkondyle gezogen. Hierbei wird eine Hilfslinie eingezeichnet, welche die Femurkondylen nach distal tangiert. Die Länge dieser Strecke entspricht der bikondylären Breite (s. Abb. 16).

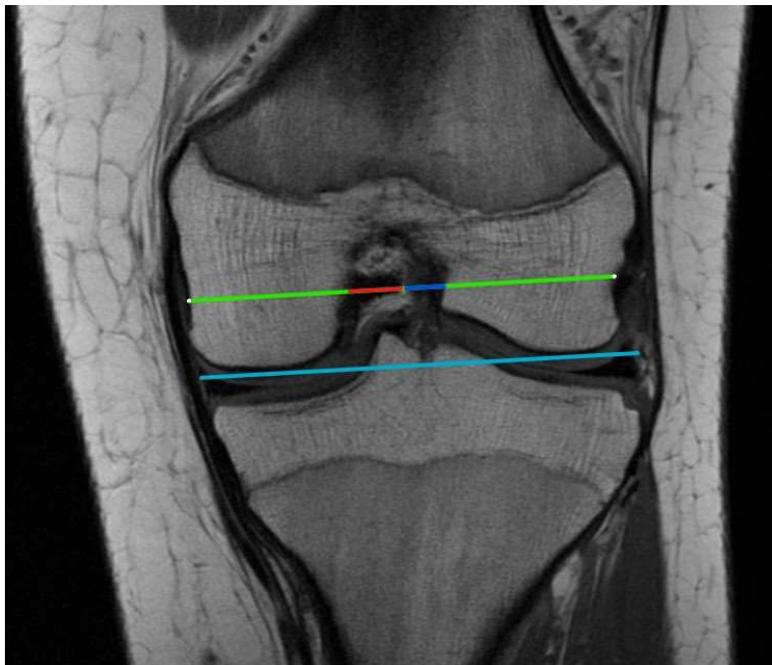


**Abbildung 16:** Messung der bikondylären Breite: Bestimmung des Transversalschnittes mit Darstellung des Poplitealsehnenursprunges, der interkondylären Notch sowie der Kreuzbänder. Einzeichnen einer Hilfslinie (blau) entlang der Gelenklinie gebildet durch die distalen Femurkondylen. Parallelverschieben entsprechender Linie (grün) auf Höhe der Poplitealsehne und interkondylären Notch und Abmessen der Distanz zwischen medialseitigem und lateralseitigem Femurkondylus auf Höhe der Poplitealrinne.

Auf derselben Linie wurden die innere Begrenzung der medialen und lateralen Femurkondylen als Seitenwände der interkondylären Notch festgelegt. Die auf dieser Linie gemessene Distanz der zwei Seitenwände entspricht der Breite der interkondylären Notch (s. Abb. 17). In einer weiteren Messung wurde auf der zuvor bestimmten Strecke die jeweilige Breite des VKBs und des HKBs bestimmt [20] (s. Abb. 18).



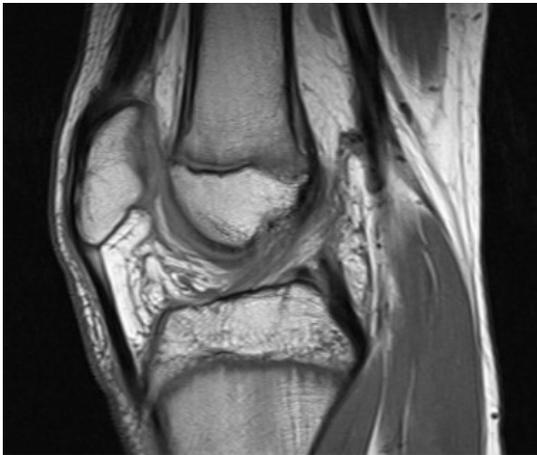
**Abbildung 17:** Messung der Breite der interkondylären Notch: Auf der eingezeichneten Strecke (grün, bikondyläre Breite) wird eine weitere Strecke (weiß) zwischen der medialen und lateralen Begrenzung der interkondylären Notch eingezeichnet. Die Länge dieser Strecke (weiße Linie) entspricht der Breite der interkondylären Notch.



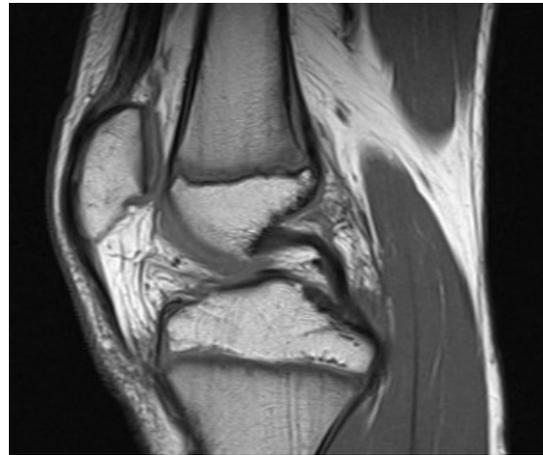
**Abbildung 18:** Messung der Breite des VKBs und HKBs in der Coronarebene: Nutzen der eingezeichneten Strecke (grün) als Hilfslinie. Betrachten des VKBs (blau) und HKBs (rot) in dieser Schnittebene und Bestimmung der Breite.

*HKB-Länge und laterale Femurkondylenbreite in der Sagittalebene (HKBL<sub>Sag</sub>, LatFemkondylenbreite)*

In Anlehnung an die von Orakzai et al. [62] beschriebene Messmethode ist eine Beurteilung des HKBs in der Sagittalebene durchgeführt worden. Hierfür wurde die Schnittebene ausgewählt, welche den größten Teil des HKBs abbildet. Da das HKB keinen uniplanaren Verlauf vom Ursprung zum Ansatz hat, wurden die Messungen in mehreren Schnittebenen durchgeführt. Die Form des HKBs in der Magnetresonanztomografie im sagittalen Schnitt kann in drei grundlegende Formen unterteilt werden: in die gekrümmte oder bogenförmige Form, die U-Form und die geknickte Form [62]. Um eine möglichst genaue Messung des HKBs zu erzielen, ist die Bestimmung der Gesamtlänge in bis zu drei Teilstücke aufgeteilt worden (s. Abb. 19 und 20).

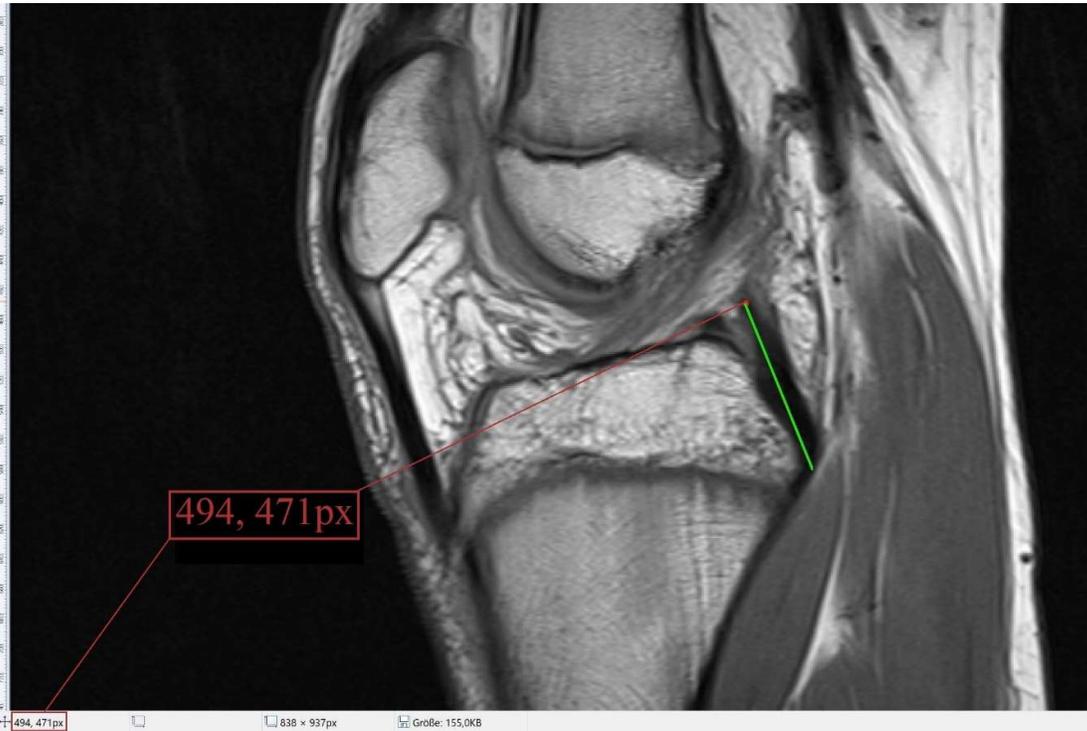


*Abbildung 19: Verlauf des HKBs in  
Schnittebene 1*

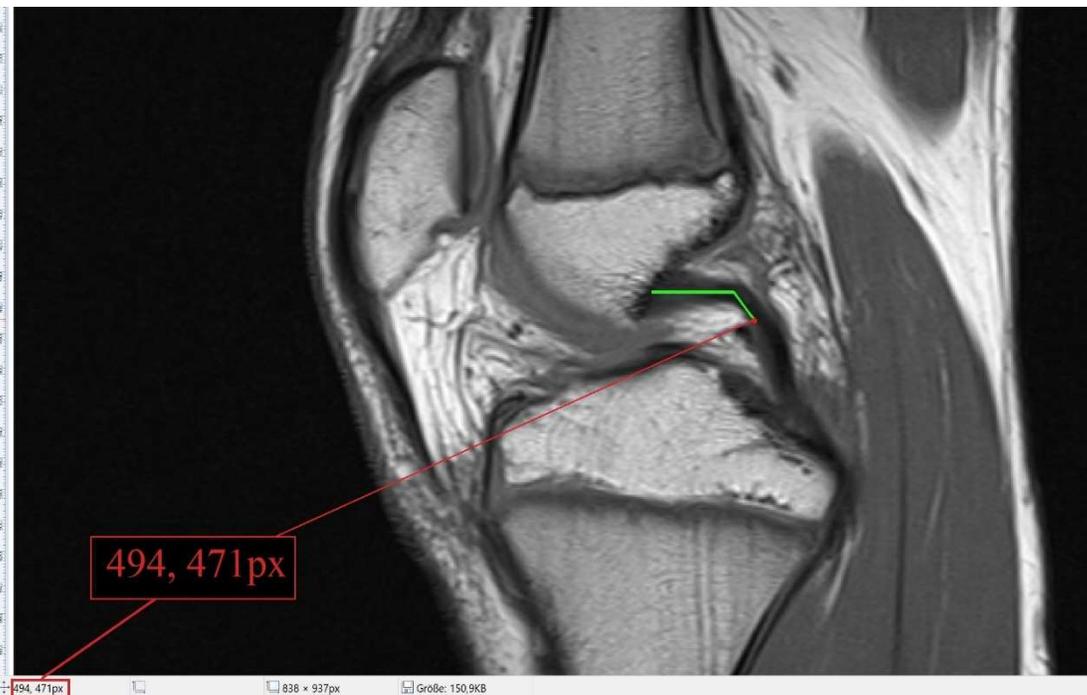


*Abbildung 20: Verlauf des HKBs in  
Schnittebene 2*

Zur Ausmessung der Länge des HKBs in mehreren Schnittebenen wurde von jeder Schnittebene eine Bildschirmaufnahme gemacht, welche anschließend in ein Bildbearbeitungsprogramm (Microsoft Paint (Version 19H1) ©) übertragen wurde. Hierbei wurde darauf geachtet, dass die Maße der Bildschirmaufnahmen übereinstimmten, sodass anhand der Koordinaten der Messpunkt der vorangegangenen Schnittebene auf der nächsten Schnittebene markiert und so die Messung in bis zu drei Schnittebenen durchgeführt werden konnte (s. Abb. 21 und 22).

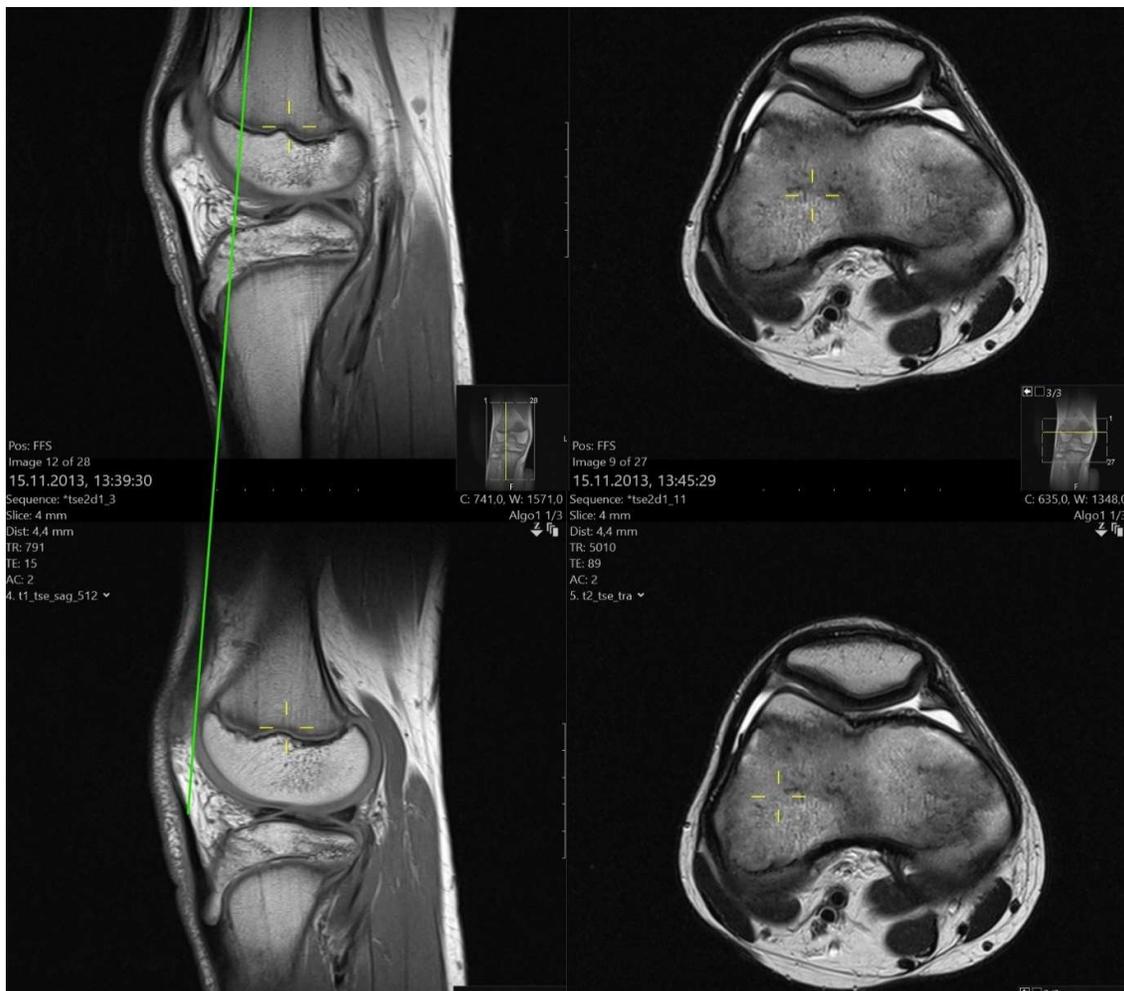


**Abbildung 21:** Markieren des Endpunktes des HKBs in Schnittebene 1 in Paint und notieren der Koordinaten in Pixel.



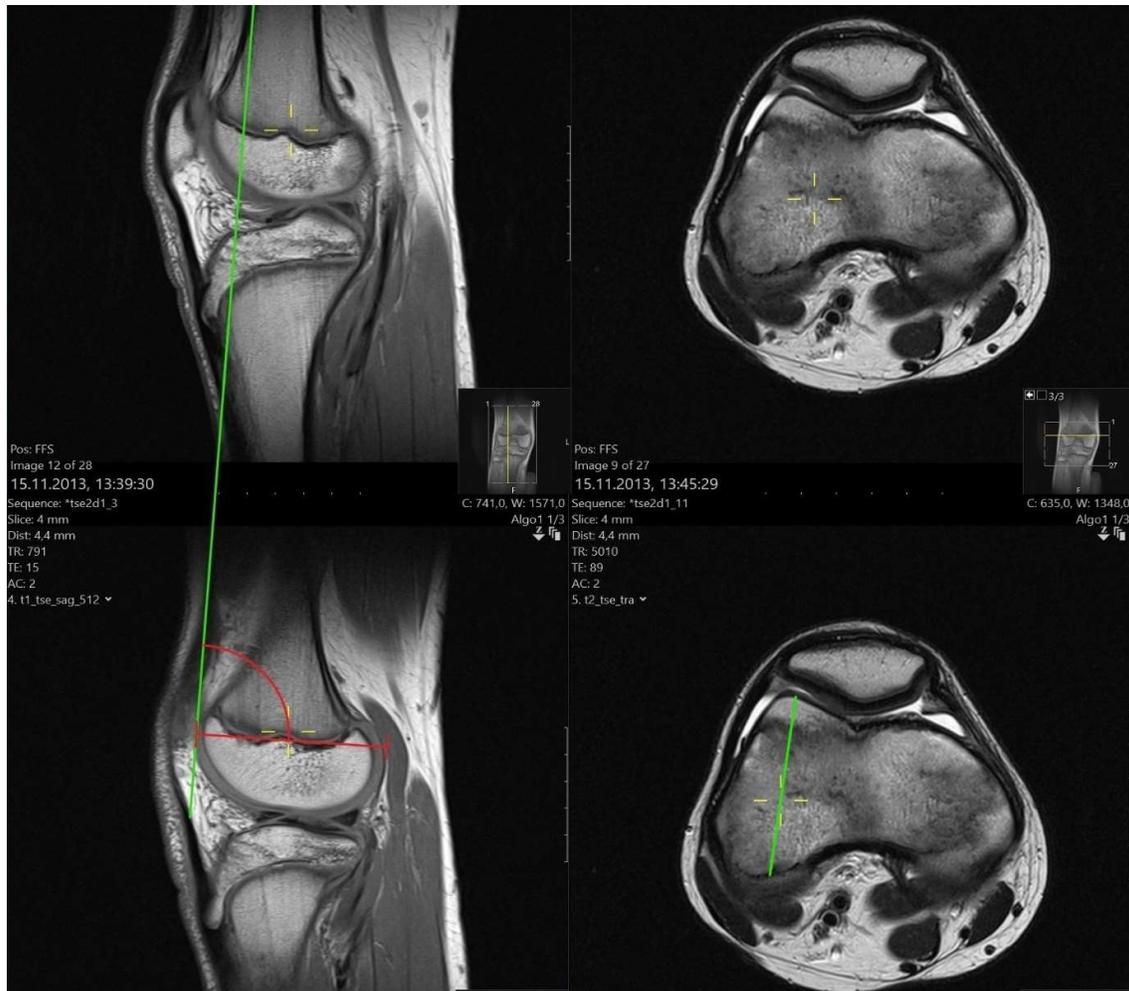
**Abbildung 22:** Übernehmen dieses Punktes (s. Abb. 21) an identischen Koordinaten und Messung des weiteren Verlaufs des HKBs ab diesem Punkt.

Die Messung der lateralen Femurkondyle in der Sagittalebene erfolgte in Anlehnung an die Methode, die Orakzai et al. [62] angewandt haben. Jedoch wurden in dieser Studie zwei Schnittebenen betrachtet, um so eine bessere Darstellung der Breite der lateralen Femurkondyle zu erreichen. Die erste Ebene bildete die ventrale Femurkortikalis ab, an die eine Tangente nach distal angelegt wurde. Die zweite Ebene zeigte die Schnittebene, welche einerseits die Epiphysenfuge des Femurs in vollständiger Ausdehnung von ventral nach dorsal abbildet und zudem in der axialen Ebene den breitesten Anteil der lateralen Femurkondyle darstellt. Durch die Aufnahme zweier Bildausschnitte und die Übertragung dieser in ein Bildbearbeitungsprogramm („Ausschneiden und skizzieren © 2018“ Version 10) konnten die Bildausschnitte untereinander platziert und so in Relation zueinander gesetzt werden (s. Abb. 23).



**Abbildung 23:** *Abbildung sagittaler und axialer Schnittebene nebeneinander (oben: Schnittebene 1, unten: Schnittebene 2). Korrelation mittels Fadenkreuz-Funktion. Kopieren zweier Bildausschnitte untereinander. Einzeichnen der Tangente an die ventrale Femurkortikalis in Schnittebene 1*

Die Tangente an die ventrale Femurkortikalis in der ersten Ebene lässt sich in der zweiten Ebene nachverfolgen. Sie liegt vor der zu messenden Femurkondyle. An diese Tangente wurde orthogonal eine weitere Hilfslinie eingetragen, welche die Epiphysenfuge mittig schneidet. Auf dieser Höhe wurde die Breite der lateralen Femurkondyle von ventral nach dorsal gemessen. In einer mithilfe der Fadenkreuz-Funktion parallel dazu betrachteten axialen Schnittebene wurde überprüft, ob es sich bei dieser Schnittebene um die breiteste Stelle der lateralen Femurkondyle handelte (s. Abb. 24).



**Abbildung 24:** Einzeichnen der Senkrechten (rote Linie) zur o.g. Tangente (grüne Linie; s. Abb. 23) auf Höhe der Epiphysenfuge. Abmessen der Distanz der Femurkondyle von ventral nach dorsal. Betrachten der entsprechenden axialen Schnittebene mittels Fadenkreuz-Funktion und Messung der Femurkondylenbreite in dieser Ebene.

## Berechnung relevanter Indices, Flächen und Volumina aus Messwerten

### *Index aus lateraler Femurkondylenbreite und sagittaler HKB-Länge*

Es wurde ein Quotient aus der Breite der lateralen Femurkondyle und der sagittalen HKB-Länge gebildet. Orakzai et al. konnten feststellen, dass chronische HKB-Rupturen in der MRT häufig eine unauffällige Morphologie aufweisen und im Falle einer solchen Läsion die Abnahme des Quotienten eine relative Überdehnung des HKBs nachweisen kann [62].

### *VKB-Fläche*

Nach der Methode von Anderson et al. [2] wurde aus den erhobenen Messwerten für die anteroposteriore Breite des VKBs in der Sagittalebene und der mediolateralen Breite des VKBs in der Transversalebene die Fläche des VKBs berechnet. Hierfür wurde die Formel zur Bestimmung der Fläche einer ovalen Struktur folgendermaßen genutzt:

$$\text{VKB-Fläche} = (0,5 \cdot \text{VKBapBreite}) \cdot (0,5 \cdot \text{VKBmlBreite}) \cdot \pi$$

Diese Formel stellt eine Annäherung an die eigentliche Größe der Fläche des VKBs dar.

### *VKB-Volumen*

Betrachtet man das VKB als eine zylindrische Struktur, lässt sich anhand der gemessenen Fläche des VKBs mittels der Formel zur Volumenberechnung von Zylindern folgende Formel aufstellen:

$$\text{VKB-Volumen} = \text{VKB-Fläche} \cdot \text{VKBLängeSag}$$

Diese Formel stellt eine Annäherung an die eigentliche Größe des Volumens des VKBs dar.

### *Notch-Width-Index*

Der sog. Notch-Width-Index wird als Quotient der Notchbreite durch die bikondyläre Femurbreite definiert [20]. Mehrere Studien konnten einen Zusammenhang zwischen Notchgröße und Notch-Width-Index und dem Risiko, eine VKB-Verletzung zu erleiden, nachweisen [53,85]. Dies betrifft ebenfalls die pädiatrische Population [19].

### *VKB/Notch-, HKB/Notch-, VKB/Bikondyläre Breite- und HKB/Bikondyläre Breite-Index*

Weitere Quotienten, die aus den Messergebnissen gebildet wurden, waren der Quotient aus der VKB-Breite in der Coronarebene mit der bikondylären Femurbreite, der HKB-Breite in der Coronarebene mit der bikondylären Femurbreite, der VKB-Breite in der Coronarebene mit der Notchbreite und der HKB-Breite mit der Notchbreite. Diese Quotienten dienen der Feststellung, ob und wie die Morphologie von VKB und HKB sich in Bezug auf die Gesamtgröße des Femurs in unterschiedlichen Altersgruppen verändern [16,20].

# Statistische Analyse

IBM SPSS Statistics Version 25 ® (Armonk, New York, USA) wurde zur Datenanalyse und Auswertung der Messdaten genutzt.

## *Retest-Reliabilität, Intra-Untersucher-Reliabilität*

Um festzustellen, ob die Messungen eine gute Retest-Reliabilität (Intra-Untersucher-Reliabilität) aufweisen, wurden die Messergebnisse zwischen den beiden Untersuchungszeitpunkten mit Hilfe der Pearson-Korrelation verglichen.

Der Pearson Korrelations-Koeffizient misst lineare Zusammenhänge zweier Parameter und kann Werte zwischen -1 und +1 annehmen. Im Fall einer positiven Korrelation werden die untersuchten Parameter gemeinsam vergrößert bzw. verkleinert. Im Fall einer negativen Korrelation wird beim Wachstum eines Parameters der andere verkleinert und umgekehrt. Je eher sich ein Wert des Korrelations-Koeffizienten der -1 bzw. +1 annähert, desto stärker ist die Korrelation zweier Parameter zueinander [42].

In dieser Studie ließ sich bei der Analyse der erhobenen Werte der Untersucher nachweisen, dass insbesondere bei Messungen des VKBs und HKBs in Sagittal- und Coronarebene sowie knöchern abgrenzbarer Strukturen (Femurkondylen, interkondyläre Notch) starke bis sehr starke Korrelations-Koeffizienten auftraten:

- VKBLängeSag  $\geq 0,948$
- VKBapBreite  $\geq 0,984$
- VKBmlBreite  $\geq 0,953$
- BikondyläreBreite  $\geq 0,97$
- NotchBreite  $\geq 0,851$
- HKBLängeSag  $\geq 0,963$
- LatFemurkondylenbreite  $>0,977$

Die Messungen von VKB und HKB in der Coronarebene auf Höhe der interkondylären Notch zeigten niedrigere und somit weniger starke Korrelations-Koeffizienten:

- VKBBreite  $\geq 0,757$
- HKBBreite  $\geq 0,697$

Die Winkelmessungen in Sagittal- und Coronarebene zeigten starke Korrelations-Koeffizienten:

- VKBSagAnstiegswinkel  $\geq 0,88$

- VKBCorAnstiegswinkel  $\geq 0,825$
- NotchAnstiegswinkel  $\geq 0,78$

Es konnte gezeigt werden, dass die Messmethodik eine hohe Retest-Reliabilität (Intra-Untersucher-Reliabilität) aufweist.

### *Inter-Untersucher-Reliabilität*

Um zu untersuchen, ob die Messwerte zwischen den beiden Untersuchern eine hohe Korrelation zeigen (Inter-Untersucher-Reliabilität) wurde der „intraclass correlation coefficient (ICC)“ bestimmt. Der ICC nimmt Werte zwischen 0 und 1 an. Mit Hilfe des ICC lassen sich Aussagen über die Reliabilität eines Verfahrens machen. Hierbei sprechen Werte kleiner als 0,5 für eine geringe Reliabilität und Werte größer als 0,8 für eine gute bzw. exzellente Reliabilität [50].

In dieser Studie wurden alle vier Messwerte zugleich analysiert. Da die Messungen durch die festgelegten Untersucher erfolgten, wurde der ICC auf zweifach gemischt festgelegt. Es wurde ein unjustiertes Modell genutzt und absolute Übereinstimmung der Analyse festgelegt.

Folgende ICC-Koeffizienten wurden berechnet:

- VKBLängeSag: einzelne Maße ICC  $\geq 0,968$ , durchschnittliche Maße ICC  $\geq 0,992$
- VKBapBreite: einzelne Maße ICC  $\geq 0,86$ , durchschnittliche Maße ICC  $\geq 0,961$
- VKBmlBreite: einzelne Maße ICC  $\geq 0,852$ , durchschnittliche Maße ICC  $\geq 0,958$
- VKBSagAnstiegswinkel: einzelne Maße ICC  $\geq 0,913$ , durchschnittliche Maße ICC  $\geq 0,977$
- VKBCorAnstiegswinkel: einzelne Maße ICC  $\geq 0,906$ , durchschnittliche Maße ICC  $\geq 0,975$
- NotchAnstiegswinkel: einzelne Maße ICC  $\geq 0,843$ , durchschnittliche Maße ICC  $\geq 0,955$
- BikondyläreBreite: einzelne Maße ICC  $\geq 0,984$ , durchschnittliche Maße ICC  $\geq 0,996$
- NotchBreite: einzelne Maße ICC  $\geq 0,894$ , durchschnittliche Maße ICC  $\geq 0,971$
- VKBBreite: einzelne Maße ICC  $\geq 0,852$ , durchschnittliche Maße ICC  $\geq 0,958$
- HKBBreite: einzelne Maße ICC  $\geq 0,814$ , durchschnittliche Maße ICC  $\geq 0,946$
- HKBLängeSag: einzelne Maße ICC  $\geq 0,968$ , durchschnittliche Maße ICC  $\geq 0,992$
- LatFemurkondylenbreite: einzelne Maße ICC  $\geq 0,974$ , durchschnittliche Maße ICC  $\geq 0,993$

Die angewandte Messmethodik zeigte eine gute bis sehr gute Inter-Untersucher-Reliabilität.

## Deskriptive Statistik

Im Rahmen der deskriptiven Statistik erfolgte für die jeweiligen Altersgruppen (s. S. 24) die Bestimmung von Mittelwert, Standardabweichung und Minimal- bzw. Maximalwert der Messergebnisse. Des Weiteren wurden die untere und obere Konfidenzgrenze (KG) des Mittelwertes bestimmt. Das Konfidenzniveau wurde hierbei auf 95% festgelegt. Diese geben den Bereich an, in dem der geschätzte Mittelwert der ausgewählten Population mit einer festgelegten Konfidenz, hier zu 95%, vorzufinden ist [21].

Die Ergebnisse wurden graphisch anhand von einem Histogramm zusammengefasst abgebildet, um die Menge der ermittelten Werte als Absolutwerte einer physiologischen Anatomie und Morphologie der Kreuzbänder im Kindesalter darzustellen.

Zusätzlich erfolgte eine Subanalyse der Messwerte nach Geschlecht, um mögliche geschlechterspezifische Unterschiede zu detektieren.

Die Ergebnisse wurden in Q-Q-Plots aufgetragen und es wurde eine Abschätzung der Werte auf Normalverteilung durchgeführt.

## Korrelation

Mittels der Pearson-Korrelation wurde der Zusammenhang zwischen den Messwerten und Patient\*innengröße, -gewicht sowie dem Body-Mass-Index (BMI) überprüft. Die Ergebnisse wurden bei vorliegender signifikanter Korrelation mittels Streudiagramm mit Anpassungslinie graphisch dargestellt. Hierbei ist die entsprechende Stärke der Korrelation an der Steigung der Geraden abschätzbar, wobei eine geringe Steigung für eine geringe Korrelation steht und umgekehrt.

Es wurden Streudiagramme, welche die Korrelationen von entsprechenden Messwerten zu Körpergröße, -gewicht und BMI aufzeigen angelegt. Hierbei ist die entsprechende Stärke der Korrelation an der Steigung der Geraden abschätzbar, wobei eine geringe Steigung für eine geringe Korrelation steht und umgekehrt.

## Vergleich von Mittelwerten

Die Messergebnisse wurden nach Altersgruppen aufgeteilt. Mit Hilfe des t-Tests für unabhängige Stichproben wurde für jede Gruppe überprüft, ob sich die Messergebnisse abhängig vom Geschlecht der Probanden signifikant unterscheiden.

Im Falle von signifikanten Unterschieden wurde zur weiteren Differenzierung der Ergebnisse der Quotient aus Messwert und Körpergröße multipliziert mit Körpergewicht gebildet und dadurch ein von Körpergröße und -gewicht unabhängiger bzw. nach Körpergröße und -

gewicht „adjustierter“ Wert gebildet. Da männliche Probanden in den Altersgruppen 5 und 6 signifikant größer bzw. größer und schwerer sind als die weiblichen Probanden (s. Tab. 2 und 3), wurden die adjustierten Werte weiblicher und männlicher Proband\*innen in diesen Altersgruppen mittels t-Test für unabhängige Stichproben untersucht. Besteht weiterhin eine signifikante Differenz nach Durchführung des erneuten Tests, ist der Unterschied auf das Geschlecht und nicht auf die unterschiedlichen Körpermaße zurückzuführen.

# Ergebnisse

## Analyse der Körpermaße der Probanden

Es erfolgte die Bestimmung der Mittelwerte von Größe, Gewicht und BMI der Probanden\*innen für die jeweilige Altersgruppe unter Berücksichtigung des Geschlechts (s. Tabelle 1).

				GRÖßE (m)	GEWICHT (kg)	BMI (kg/m <sup>2</sup> )
				Mittelwert	Mittelwert	Mittelwert
GESCHLECHT	Gesamt	ALTERSGRUPPE	1	0,91	16	19,22
			2	1,18	23	17,03
			3	1,36	31	16,64
			4	1,54	44	18,60
			5	1,65	62	22,47
			6	1,74	70	23,00
	weiblich	ALTERSGRUPPE	1	0,91	16	18,64
			2	1,12	24	19,07
			3	1,39	35	17,85
			4	1,53	42	18,01
			5	1,61	57	22,12
			6	1,68	62	21,74
	männlich	ALTERSGRUPPE	1	0,92	17	20,19
			2	1,23	23	15,39
			3	1,34	29	15,64
			4	1,56	48	19,59
			5	1,70	66	22,86
			6	1,79	78	24,14

**Tabelle 1:** Körpermaße (Größe in Meter, Gewicht in Kilogramm, BMI in kg/m<sup>2</sup>) der Probanden im Mittelwert für die jeweiligen Altersgruppen

Mit Hilfe des t-Tests für unabhängige Stichproben wurde überprüft, inwieweit sich die durchschnittlichen Körpermaße der weiblichen und männlichen Probanden signifikant unterscheiden. Hierbei entspricht das Signifikanzniveau  $p \leq 0,01$ . In der Altersgruppe 5 konnte eine signifikant größere Körpergröße und in der Altersgruppe 6 sowohl eine signifikant größere Körpergröße als auch ein signifikant größeres Körpergewicht bei den männlichen Probanden verglichen mit den weiblichen Probanden nachgewiesen werden (s. Tabelle 2 und 3).

Test bei unabhängigen Stichproben					
	Sig. (2- seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
				Untere	Obere
GRÖßE	0,005	0,08	0,03	0,03	0,14
GEWICHT	0,052	8,6	4,29	-0,07	17,3
BMI	0,644	0,74	1,59	-2,48	3,96
a. ALTERSGRUPPE = 5					

**Tabelle 2:** t-Test für unabhängige Stichproben, beschreibt den signifikanten Unterschied in Körpermaßen von weiblichen und männlichen Probanden in Altersgruppe 5; „Sig.“ entspricht hier und im weiteren Text immer der Signifikanz

Test bei unabhängigen Stichproben					
	Sig. (2- seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
				Untere	Obere
GRÖßE	0,000	0,11	0,03	0,05	0,16
GEWICHT	0,033	15,77	6,92	1,38	30,15
BMI	0,232	2,4	1,95	-1,65	6,44
a. ALTERSGRUPPE = 6					

**Tabelle 3:** t-Test für unabhängige Stichproben, beschreibt den signifikanten Unterschied in Körpermaßen von weiblichen und männlichen Probanden in Altersgruppe 6

## VKB-Länge in der Sagittalebene (VKBLängeSag)

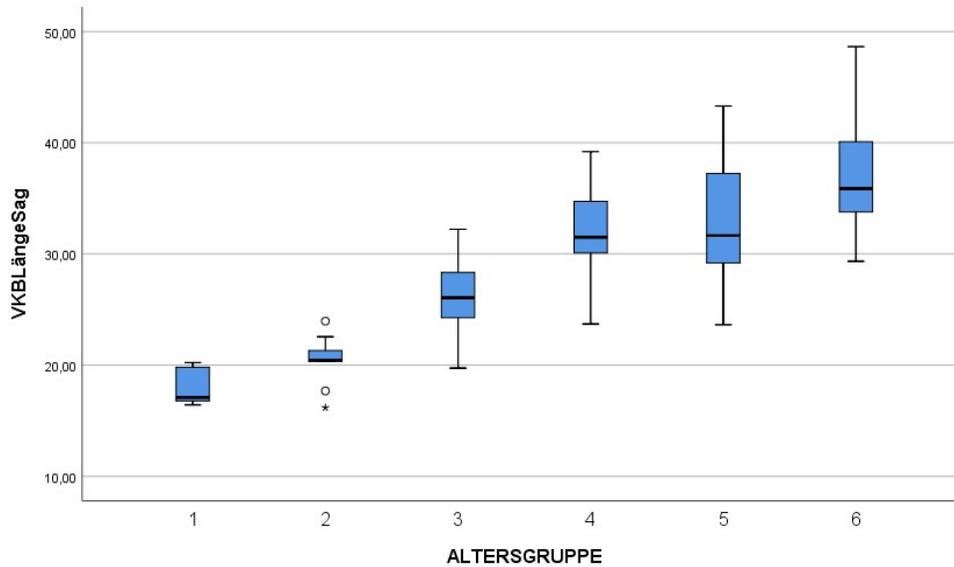
Die Tabelle 4 (s.u.) zeigt die Messwerte der VKB-Länge in der Sagittalebene. Der Mittelwert der VKB-Länge in der Sagittalebene unterschied sich zwischen den Altersgruppen 1 und 6 um 18,8 mm (18 mm zu 36,8 mm). Die Zunahme der Länge war nicht konstant, nahm aber kontinuierlich von Altersgruppe zu Altersgruppe zu, wobei der Unterschied zwischen den Altersgruppen 3 und 4 am größten ausfiel (+6 mm). Die Probandinnen zeigten in den Altersgruppen 2 bis 3 größere Mittelwerte als die Probanden, während ab Altersgruppe 4 die männlichen Versuchsteilnehmer größere Mittelwerte vorwiesen.

Anhand der Q-Q Plots konnte eine Normalverteilung der VKB-Länge in der Sagittalebene in allen Altersgruppen festgestellt werden.

			VKBLängeSag (mm)					
			ALTERSGRUPPE					
			1	2	3	4	5	6
GESCHLECHT	Gesamt	Mittelwert	18,00	20,44	26,18	32,18	33,16	36,79
		Anzahl	8	9	20	27	40	23
		95,0% Untere KG für Mittelwert	16,63	18,64	24,65	30,63	31,64	34,83
		95,0% Obere KG für Mittelwert	19,37	22,24	27,70	33,73	34,68	38,76
		Maximum	20,23	23,95	32,23	39,20	43,30	48,65
		Minimum	16,43	16,17	19,73	23,70	23,63	29,34
		Standardabweichung	1,64	2,34	3,26	3,92	4,76	4,54
	weiblich	Mittelwert	17,31	22,04	28,32	31,80	31,98	34,49
		Anzahl	5	4	9	17	21	11
		95,0% Untere KG für Mittelwert	15,75	19,57	26,43	29,64	30,44	32,14
		95,0% Obere KG für Mittelwert	18,86	24,51	30,21	33,96	33,53	36,84
		Maximum	19,50	23,95	32,23	39,03	40,33	40,47
		Minimum	16,43	20,38	25,17	23,70	27,97	29,34
		Standardabweichung	1,25	1,55	2,46	4,20	3,40	3,49
	männlich	Mittelwert	19,15	19,16	24,42	32,84	34,45	38,90
		Anzahl	3	5	11	10	19	12
		95,0% Untere KG für Mittelwert	14,79	16,52	22,55	30,33	31,69	36,06
		95,0% Obere KG für Mittelwert	23,51	21,79	26,30	35,34	37,22	41,75
		Maximum	20,23	21,13	28,80	39,20	43,30	48,65
		Minimum	17,13	16,17	19,73	28,30	23,63	33,10
		Standardabweichung	1,75	2,13	2,79	3,50	5,73	4,47

*Tabelle 4: Deskriptive Analyse der VKB-Länge in Millimetern in der Sagittalebene, Unterscheidung nach Altersgruppe und Geschlecht (KG: Konfidenzgrenze)*

Der Boxplot zeigt die Verteilung der erhobenen Mittelwerte der VKB-Länge in der Sagittalebene über die Altersgruppen hinweg (s. Abb. 25).

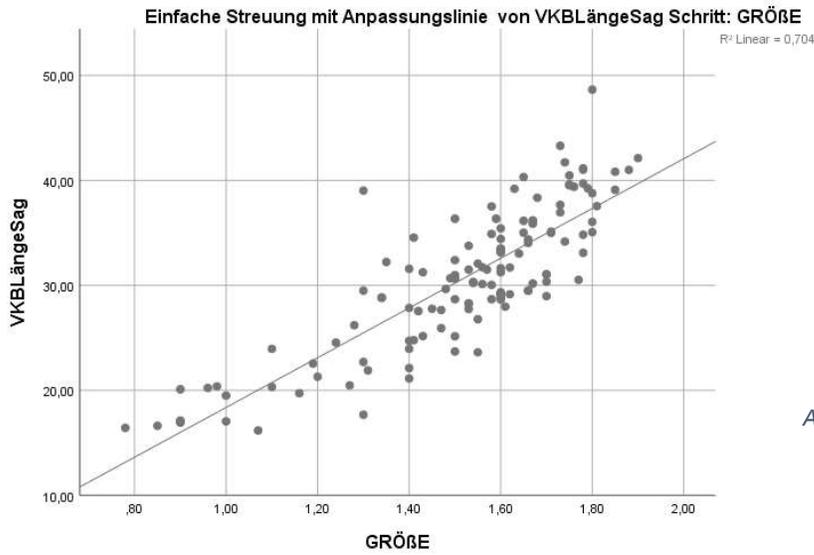


**Abbildung 25:** Boxplot von mittlerer VKB-Länge (mm) in der Sagittalebene in den jeweiligen Altersgruppen; Punkte: milde Ausreißer, Stern: extremer Ausreißer

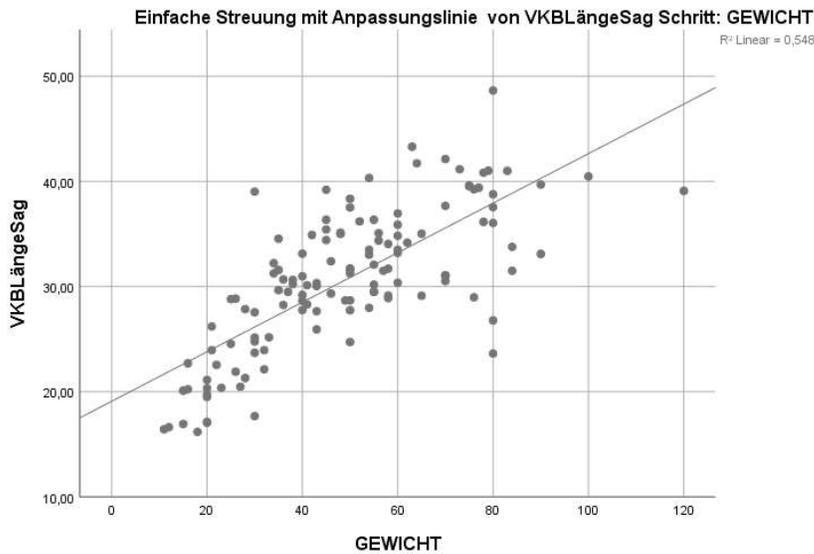
Es wurde eine Pearson-Korrelation von VKB-Länge in Relation zu Größe, Gewicht und BMI durchgeführt. Hierbei wurden Pearson-Korrelationskoeffizienten von 0,839, 0,741 bzw. 0,371 ermittelt (s. Tabelle 5). Die Korrelationen waren auf dem 0,01 Niveau signifikant. Daher sprechen diese Werte für eine starke Korrelation der VKB-Länge in Relation zu Größe und Gewicht, während die Korrelation zum BMI schwach ist. Die Korrelationen wurden graphisch dargestellt (s. Abb. 26ff.). Die Gerade stellt die Anpassungslinie der Werte dar.

Korrelationen				
		GRÖÙE	GEWICHT	BMI
VKB LängeSag	Korrelation nach Pearson	0,839**	0,741**	0,371**
	Signifikanz (2-seitig)	0,000	0,000	0,000
	N	127	127	127
** Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.				

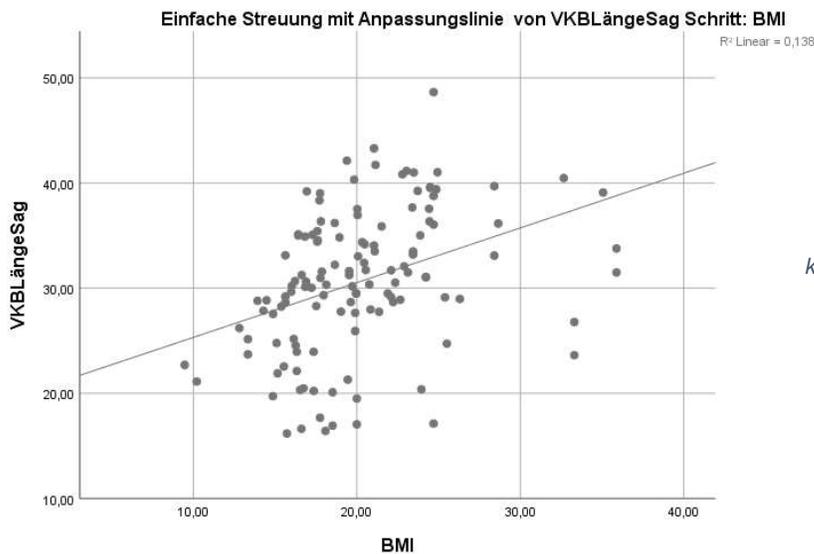
**Tabelle 5:** Pearson-Korrelation von VKB-Länge in der Sagittalebene in Relation zu Größe, Gewicht und BMI



**Abbildung 26:**  
Darstellung der VKB-  
Länge (mm) in der  
Sagittalebene mit der  
korrespondierenden  
Größe (m), die Gerade  
stellt in allen  
Diagrammen die  
Anpassungslinie aus den  
ermittelten Werten dar



**Abbildung 27:**  
Darstellung der VKB-  
Länge (mm) in der  
Sagittalebene mit dem  
korrespondierenden  
Gewicht (kg)



**Abbildung 28:**  
Darstellung der VKB-  
Länge (mm) in der  
Sagittalebene mit dem  
korrespondierenden BMI  
( $k/m^2$ )

Der t-Test für unabhängige Stichproben zeigte in den Altersgruppen 3 und 6 signifikante geschlechtsspezifische Unterschiede für die VKB-Länge. Hierbei zeigten sich die Ergebnisse der Probanden in der Altersgruppe 3 signifikant kleiner und in der Altersgruppe 6 signifikant größer als die der Probandinnen (s. Tabellen 6 und 7).

Test bei unabhängigen Stichproben					
	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
				Untere	Obere
VKBLängeSag	0,004	3,89	1,19	1,4	6,4
a. ALTERSGRUPPE = 3					

***Tabelle 6:** t-Test für unabhängige Stichproben, zeigt signifikante geschlechtsspezifische Unterschiede für die VKB-Länge in der Sagittalebene in der Altersgruppe 3*

Test bei unabhängigen Stichproben					
	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
				Untere	Obere
VKBLängeSag	0,016	-4,42	1,69	-7,92	-0,91
a. ALTERSGRUPPE = 6					

***Tabelle 7:** t-Test für unabhängige Stichproben, zeigt signifikante geschlechtsspezifische Unterschiede für die VKB-Länge in der Altersgruppe 6*

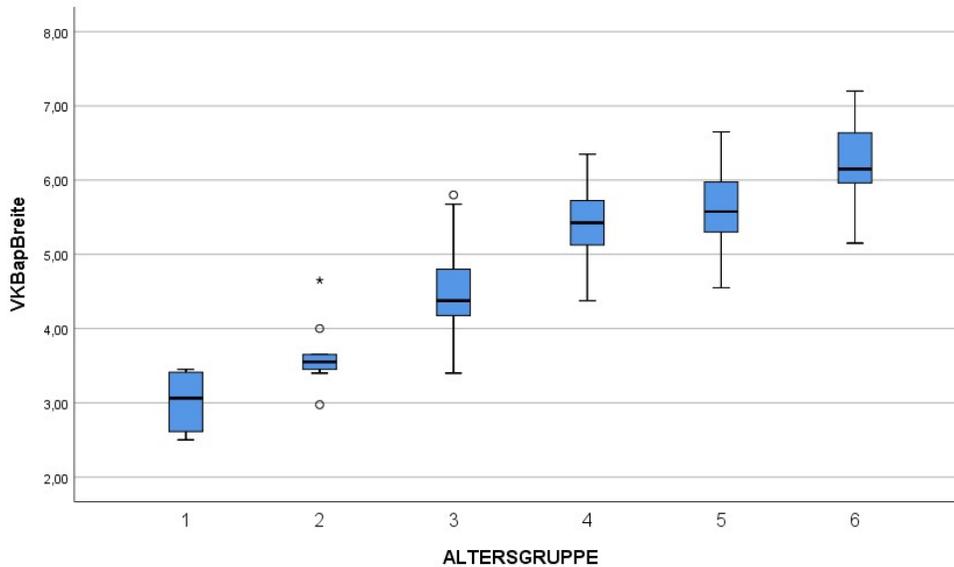
Nach Adjustieren von Körpergröße und -gewicht und der Durchführung eines erneuten t-Tests für unabhängige Stichproben konnte kein signifikanter geschlechtsspezifischer Unterschied nachgewiesen werden.

## VKB-Breite in der Sagittalebene (VKBapBreite)

Der Mittelwert dieser Messung zeigte Unterschiede von 3,2 mm zwischen den Altersgruppen 1 und 6 mit Mittelwerten von 3 mm in Altersgruppe 1 zu 6,2 mm in der letzten Altersgruppe.

			VKBapBreite (mm)					
			ALTERSGRUPPE					
			1	2	3	4	5	6
GESCHLECHT	Gesamt	Mittelwert	3,02	3,64	4,46	5,39	5,63	6,24
		Anzahl	8	9	20	27	40	23
		95,0% Untere KG für Mittelwert	2,68	3,29	4,14	5,18	5,48	6,02
		95,0% Obere KG für Mittelwert	3,35	4,00	4,79	5,59	5,78	6,47
		Maximum	3,45	4,65	5,80	6,35	6,65	7,20
		Minimum	2,50	2,98	3,40	4,38	4,55	5,15
		Standardabweichung	0,40	0,46	0,69	0,51	0,47	0,52
	weiblich	Mittelwert	2,92	3,88	4,78	5,39	5,40	6,06
		Anzahl	5	4	9	17	21	11
		95,0% Untere KG für Mittelwert	2,42	2,95	4,16	5,10	5,25	5,78
		95,0% Obere KG für Mittelwert	3,42	4,80	5,39	5,67	5,55	6,34
		Maximum	3,43	4,65	5,80	6,35	6,00	6,82
		Minimum	2,50	3,40	3,40	4,40	4,55	5,45
		Standardabweichung	0,40	0,58	0,80	0,56	0,34	0,42
	männlich	Mittelwert	3,18	3,46	4,21	5,39	5,88	6,41
		Anzahl	3	5	11	10	19	12
		95,0% Untere KG für Mittelwert	2,10	3,11	3,88	5,06	5,65	6,06
		95,0% Obere KG für Mittelwert	4,25	3,80	4,53	5,72	6,10	6,77
		Maximum	3,45	3,65	4,90	5,98	6,65	7,20
		Minimum	2,68	2,98	3,40	4,38	5,05	5,15
		Standardabweichung	0,43	0,27	0,49	0,46	0,48	0,56

*Tabelle 8: Deskriptive Analyse der VKB-Breite in Millimetern in der Sagittalebene, Unterscheidung nach Altersgruppe und Geschlecht*



**Abbildung 29:** Boxplot von mittlerer VKB-Breite (mm) in der Sagittalebene in den jeweiligen Altersgruppen; Punkte: milde Ausreißer, Stern: extremer Ausreißer

Es zeigte sich eine nicht konstante, aber kontinuierliche Zunahme der Mittelwerte mit zunehmendem Alter. Die größte Zunahme der Mittelwerte zeigte sich zwischen den Altersgruppen 3 und 4 (+0,93 mm). Die Mittelwerte der Probandinnen waren in den Altersgruppen 2 und 3 höher als die der Probanden (s. Tabelle 8).

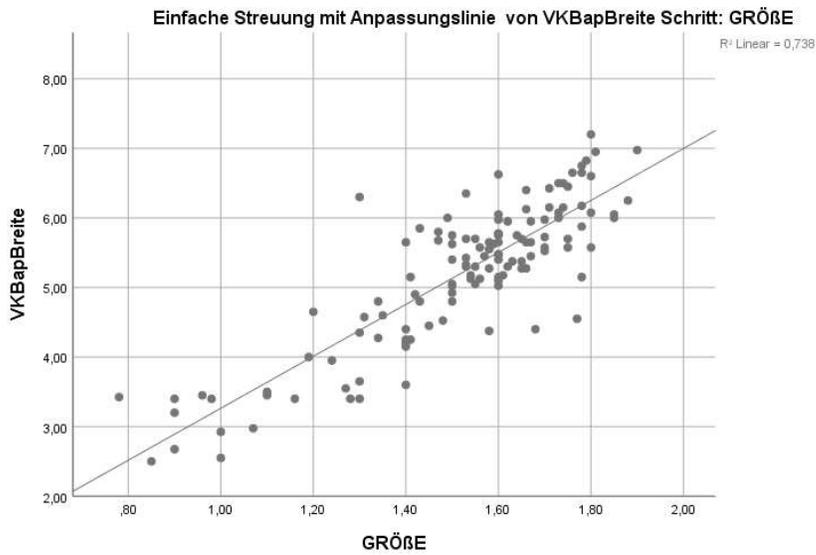
Eine Normalverteilung ließ sich nach Durchsicht der Q-Q Plots annehmen.

Der Boxplot zeigt die Mittelwerte in den entsprechenden Altersgruppen (s. Abb. 27).

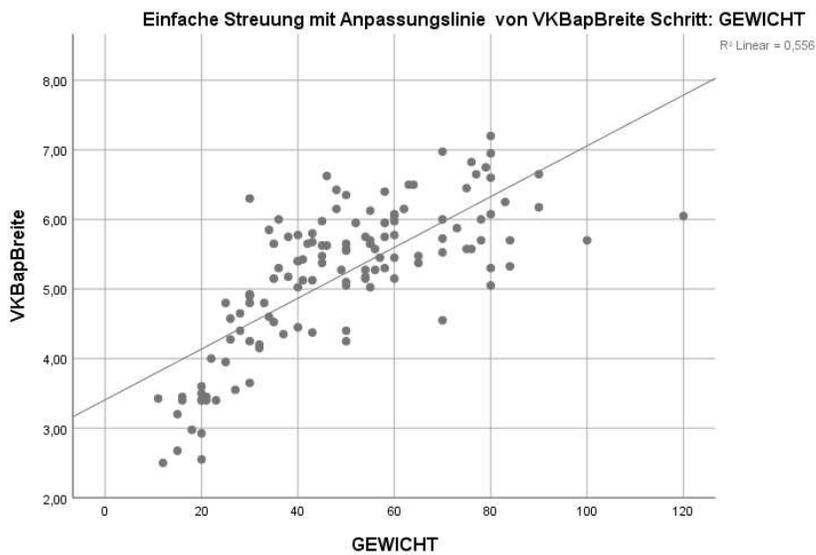
Die Pearson-Korrelation von Größe, Gewicht und BMI der Proband\*innen mit der VKB-Breite in der Sagittalebene zeigte Korrelations-Koeffizienten von 0,859, 0,746 (mittel-/starke Korrelation) bzw. 0,393 (schwache Korrelation). Die Korrelationen waren auf dem 0,01 Niveau signifikant (s. Tabelle 9). Die Korrelationen wurden graphisch dargestellt (s. Abb. 30ff.). Die Gerade stellt die Anpassungslinie der Werte dar.

Korrelationen				
		GRÖÙE	GEWICHT	BMI
VKBapBreite	Korrelation nach Pearson	0,859**	0,746**	0,393**
	Signifikanz (2-seitig)	0,000	0,000	0,000
	N	127	127	127
**. Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.				

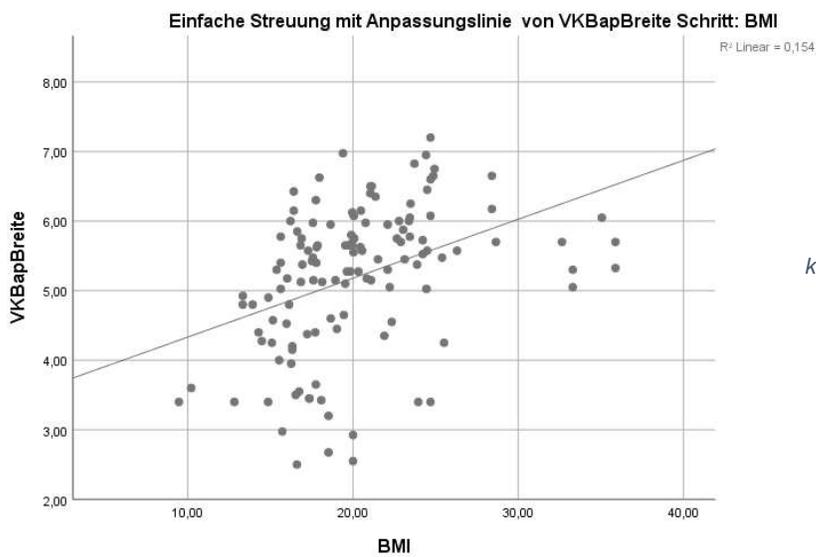
**Tabelle 9:** Pearson-Korrelation von VKB-Breite in der Sagittalebene in Relation zu Größe, Gewicht und BMI



**Abbildung 30:**  
Darstellung der VKB-  
Breite (mm) in der  
Sagittalebene mit der  
korrespondierenden  
Größe (m)



**Abbildung 31:**  
Darstellung der VKB-  
Breite (mm) in der  
Sagittalebene mit dem  
korrespondierenden  
Gewicht (kg)



**Abbildung 32:**  
Darstellung der VKB-  
Breite (mm) in der  
Sagittalebene mit dem  
korrespondierenden BMI  
(kg/m<sup>2</sup>)

Der t-Test zeigte signifikante Unterschiede zwischen den Werten von männlichen und weiblichen Probanden in der Altersgruppe 5, wobei die Werte der Probanden größer waren als die der Probandinnen (s. Tabelle 10).

Test bei unabhängigen Stichproben					
	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
				Untere	Obere
VKBapBreite	0,001	-0,47	0,13	-0,74	-0,21
a. ALTERSGRUPPE = 5					

*Tabelle 10: t-Test für unabhängige Stichproben, zeigt signifikante geschlechtsspezifische Unterschiede in der jeweiligen Altersgruppe*

Nach Adjustieren von Körpergröße und -gewicht und der Durchführung eines erneuten t-Tests für unabhängige Stichproben konnte kein signifikanter geschlechtsspezifischer Unterschied nachgewiesen werden.

### VKB in der Transversalebene (VKBmlBreite)

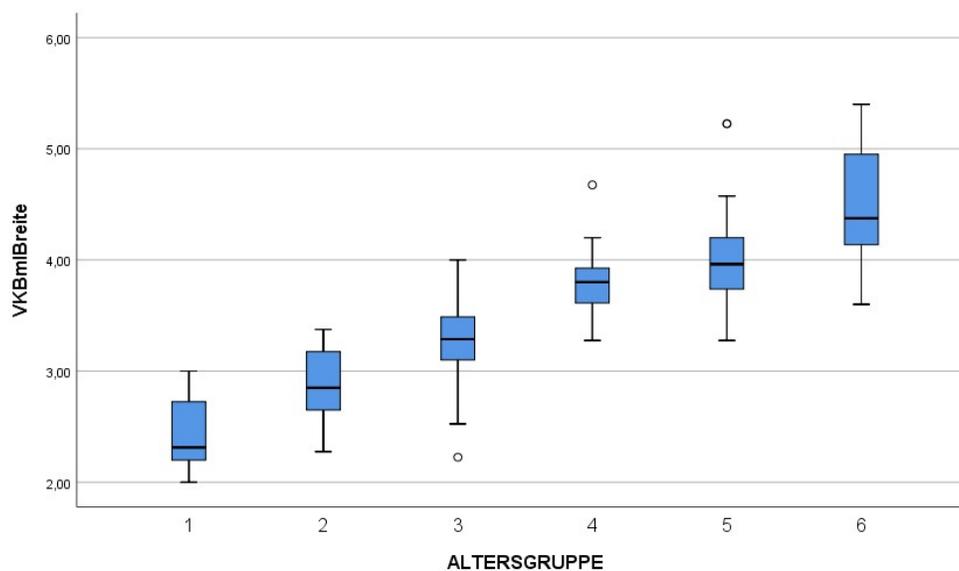
Die Messung der mediolateralen Breite des VKBs in der Transversalebene lieferte Mittelwerte zwischen 2,43 mm und 4,5 mm (+2,07 mm). Die kontinuierliche Zunahme zeigte den größten Anstieg zwischen den Altersgruppen 3 und 4 (+0,56 mm).

Die Mittelwerte der Probandinnen zeigten sich in den Altersgruppen 2 und 3 größer als die der Probanden (s. Tabelle 11). Der Boxplot zeigt die Mittelwerte der VKBmlBreite über die entsprechenden Altersgruppen hinweg.

			VKBmlBreite (mm)					
			ALTERSGRUPPE					
			1	2	3	4	5	6
GESCHLECHT	Gesamt	Mittelwert	2,43	2,86	3,24	3,80	4,00	4,50
		Anzahl	8	9	20	27	40	23
		95,0% Untere KG für Mittelwert	2,14	2,58	3,06	3,68	3,87	4,29
		95,0% Obere KG für Mittelwert	2,72	3,14	3,43	3,92	4,13	4,72
		Maximum	3,00	3,38	4,00	4,68	5,23	5,40
		Minimum	2,00	2,28	2,22	3,28	3,27	3,60
		Standardabweichung	0,35	0,37	0,39	0,31	0,41	0,50
	weiblich	Mittelwert	2,39	3,03	3,29	3,76	3,92	4,11
		Anzahl	5	4	9	17	21	11
		95,0% Untere KG für Mittelwert	1,97	2,56	2,85	3,62	3,78	3,95

		95,0% Obere KG für Mittelwert	2,80	3,50	3,72	3,90	4,05	4,26
		Maximum	2,83	3,38	4,00	4,20	4,50	4,48
		Minimum	2,00	2,72	2,22	3,28	3,45	3,60
		Standardabweichung	0,34	0,30	0,57	0,27	0,30	0,23
	männlich	Mittelwert	2,52	2,72	3,21	3,85	4,09	4,86
		Anzahl	3	5	11	10	19	12
		95,0% Untere KG für Mittelwert	1,47	2,24	3,08	3,59	3,85	4,61
		95,0% Obere KG für Mittelwert	3,56	3,21	3,34	4,11	4,33	5,12
		Maximum	3,00	3,18	3,50	4,68	5,23	5,40
		Minimum	2,23	2,28	2,88	3,33	3,27	4,20
		Standardabweichung	0,42	0,39	0,19	0,37	0,49	0,40

**Tabelle 11:** Deskriptive Analyse der VKB-Breite (mm) in der Transversalebene, Unterscheidung nach Altersgruppe und Geschlecht



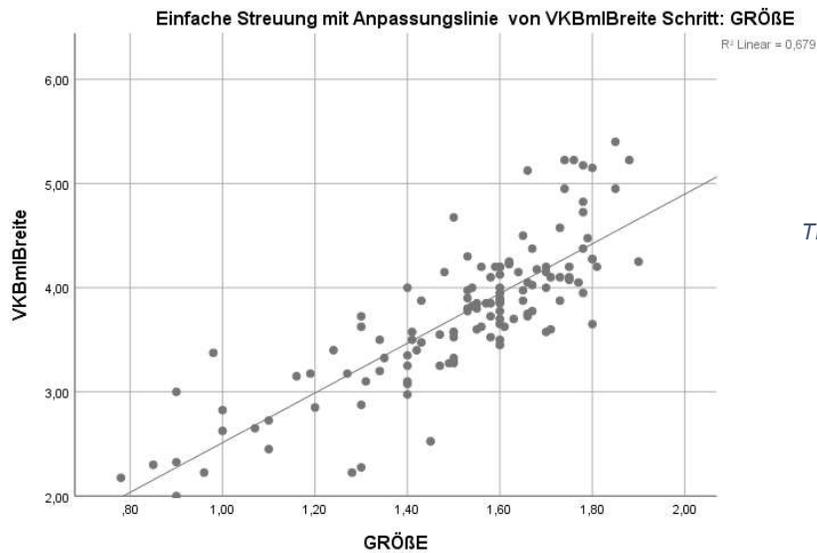
**Abbildung 33:** Boxplot von mittlerer VKB-Breite (mm) in der Transversalebene in den jeweiligen Altersgruppen, Punkte: milde Ausreißer

Es zeigte sich in der Pearson-Korrelation von Patient\*innengröße, -gewicht und BMI mit den Mittelwerten der Messung Korrelationskoeffizienten von 0,824, 0,765 (mittel-/starke Korrelation) und 0,439 (schwache Korrelation). Die Korrelationen waren auf dem 0,01-Niveau signifikant. Die Korrelationen wurden graphisch dargestellt (s. Abb. 34ff.). Die Gerade stellt die Anpassungslinie der Werte dar.

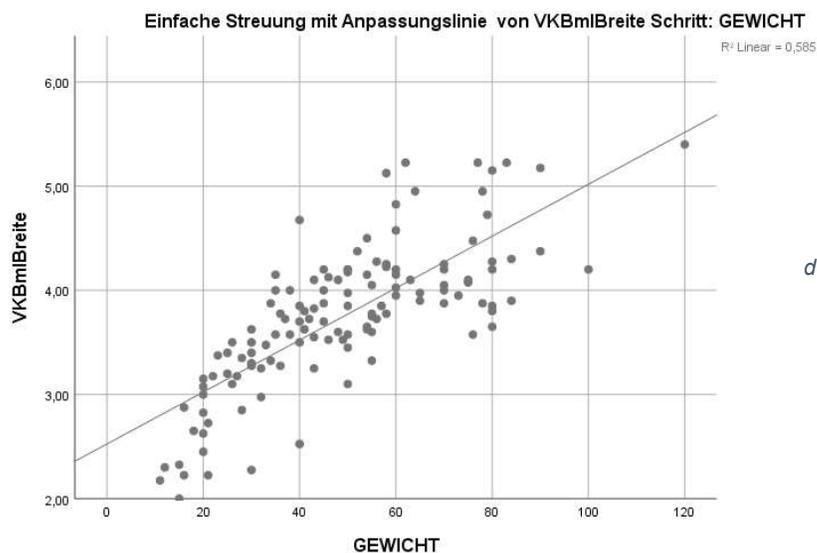
Korrelationen				
		GRÖßE	GEWICHT	BMI
VKBmlBreite	Korrelation nach Pearson	,824**	,765**	,439**
	Signifikanz (2-seitig)	0,000	0,000	0,000
	N	127	127	127

\*\* Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

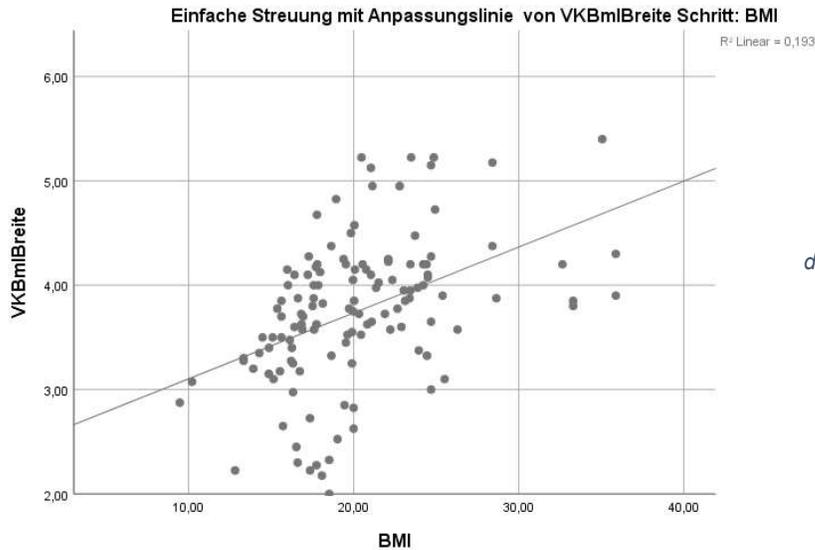
**Tabelle 12:** Pearson-Korrelation von VKB-Breite in der Transversalebene in Relation zu Größe, Gewicht und BMI



**Abbildung 34:**  
Darstellung der VKB-Breite (mm) in der Transversalebene mit der korrespondierenden Größe (m)



**Abbildung 35:**  
Darstellung der VKB-Breite (mm) in der Transversalebene mit dem korrespondierenden Gewicht (kg)



**Abbildung 36:**  
Darstellung der VKB-  
Breite (mm) in der  
Transversalebene mit  
dem korrespondierenden  
BMI (kg/m<sup>2</sup>)

Im t-Test für unabhängige Stichproben zeigten sich in der Altersgruppe 6 signifikant größere Werte für männliche verglichen mit weiblichen Probanden (s. Tabelle 13).

Test bei unabhängigen Stichproben					
	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
				Untere	Obere
VKBmlBreite	0,000	-0,75	0,14	-1,04	-0,47
a. ALTERSGRUPPE = 6					

**Tabelle 13:** t-Test für unabhängige Stichproben, zeigt signifikante geschlechtsspezifische Unterschiede in Altersgruppe 6

### Anstiegswinkel des VKBs in der Sagittalebene (VKBSagAnstiegswinkel)

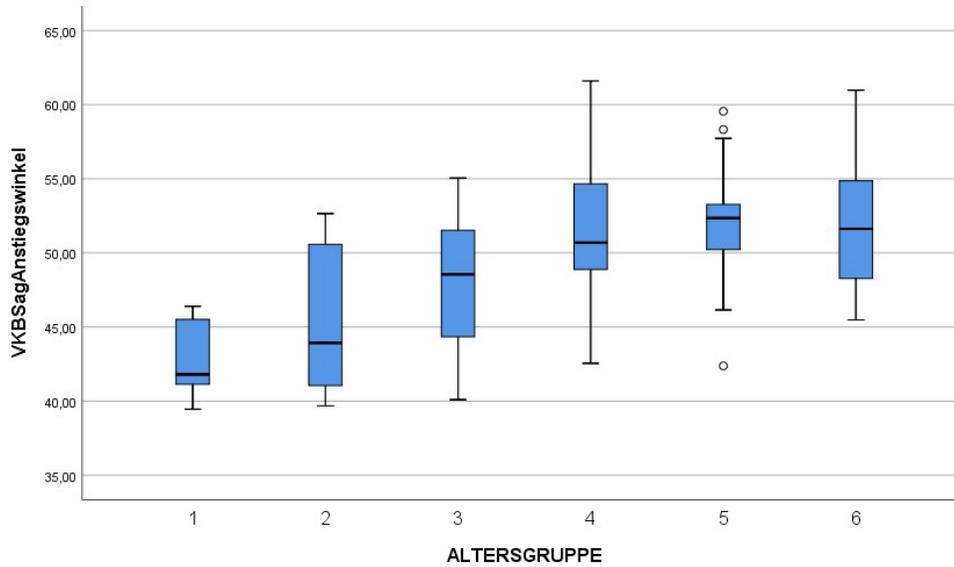
Die Anstiegswinkel des VKBs in der Sagittalebene zeigten Mittelwerte zwischen 42,8° und 51,9°. Eine kontinuierliche Zunahme zeigte sich in den ersten 5 Altersgruppen (+9°), wohingegen zwischen den Altersgruppen 5 und 6 ein diskreter Abfall (<0,1°) vorlag. Die Zunahme in den ersten drei Altersgruppen war vergleichbar groß, in den Altersgruppen 4 bis 6 stagnierte die Zunahme bzw. nahm wie oben erwähnt ab. Die Mittelwerte der Probandinnen zeigten sich in den Altersgruppen 1 bis 5 größer als die der Probanden (s. Tabelle 14).

Anhand der Q-Q Plots konnte die Normalverteilung der Ergebnisse angenommen werden.

Der Boxplot zeigte die Mittelwerte des VKB-Anstiegswinkels über die Altersgruppen hinweg (s. Abb. 37)

			VKBsagAnstiegswinkel (°)					
			ALTERSGRUPPE					
			1	2	3	4	5	6
GESCHLECHT	Gesamt	Mittelwert	42,84	45,82	48,07	51,48	51,90	51,88
		Anzahl	8	9	20	27	40	23
		95,0% Untere KG für Mittelwert	40,67	41,97	45,92	49,57	50,80	49,97
		95,0% Obere KG für Mittelwert	45,02	49,68	50,22	53,39	53,01	53,80
		Maximum	46,40	52,65	55,05	61,60	59,55	60,98
		Minimum	39,45	39,68	40,10	42,55	42,38	45,47
		Standardabweichung	2,60	5,02	4,60	4,82	3,46	4,43
	weiblich	Mittelwert	43,04	46,36	48,30	52,07	52,83	51,79
		Anzahl	5	4	9	17	21	11
		95,0% Untere KG für Mittelwert	39,20	38,22	44,18	50,01	51,50	48,98
		95,0% Obere KG für Mittelwert	46,88	54,50	52,43	54,12	54,15	54,59
		Maximum	46,40	52,65	54,80	61,60	58,33	57,48
		Minimum	39,45	40,88	40,10	45,00	46,88	46,15
		Standardabweichung	3,09	5,11	5,36	3,99	2,91	4,17
	männlich	Mittelwert	42,52	45,39	47,88	50,49	50,89	51,97
		Anzahl	3	5	11	10	19	12
		95,0% Untere KG für Mittelwert	37,37	38,57	45,11	46,12	49,05	48,90
		95,0% Obere KG für Mittelwert	47,66	52,21	50,66	54,85	52,72	55,05
		Maximum	44,88	51,73	55,05	60,60	59,55	60,98
		Minimum	41,00	39,68	40,15	42,55	42,38	45,47
		Standardabweichung	2,07	5,49	4,13	6,10	3,81	4,84

*Tabelle 14: Deskriptive Analyse des VKB-Anstiegswinkels (°) in der Sagittalebene, Unterscheidung nach Altersgruppe und Geschlecht*

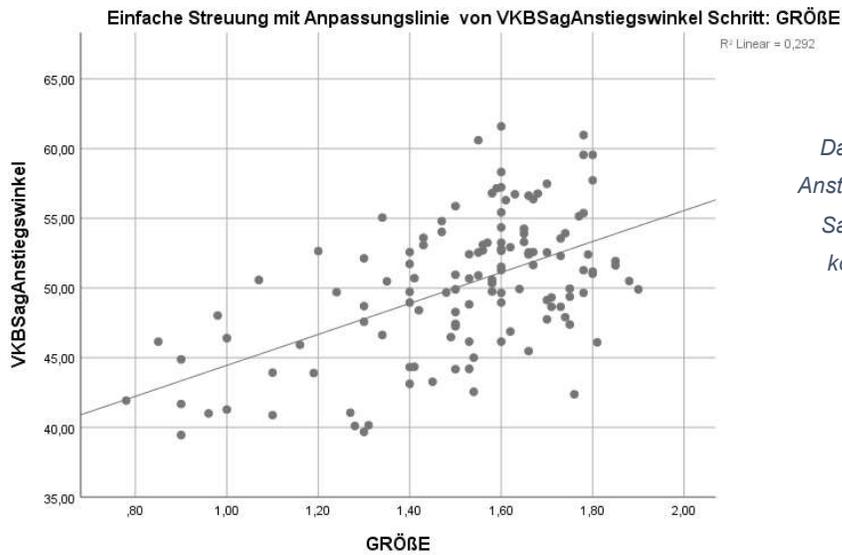


**Abbildung 37:** Boxplot von mittlerem VKB-Anstiegswinkel (°) in der Sagittalebene in den jeweiligen Altersgruppen; Punkte: milde Ausreißer

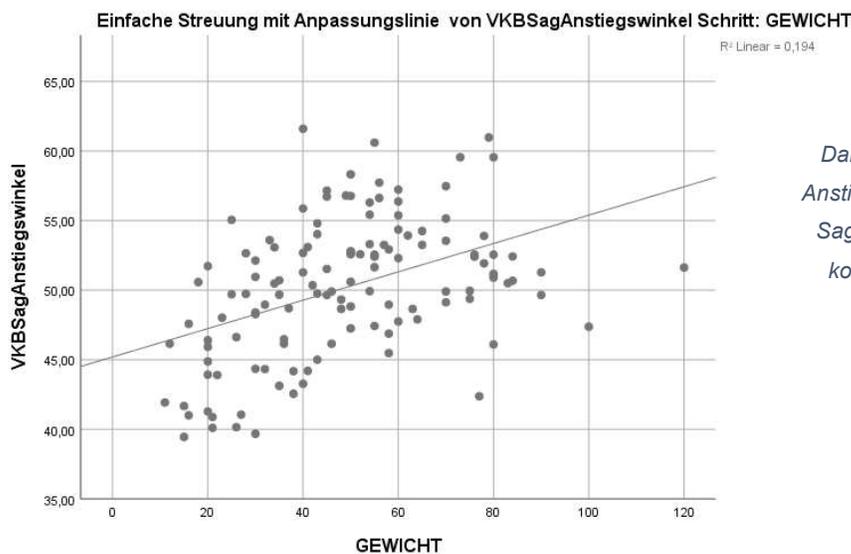
In Korrelation mit Patient\*innengröße, -gewicht und BMI zeigten sich Korrelationskoeffizienten von 0,54, 0,44 bzw. 0,234 (schwache Korrelationen). Die Korrelationen waren auf dem 0,01-Niveau signifikant (s. Tabelle 15). Die Korrelationen wurden graphisch dargestellt (s. Abb. 38ff.). Die Gerade stellt die Anpassungslinie der Werte dar.

Korrelationen				
		GRÖßE	GEWICHT	BMI
VKBSagAnstiegswinkel	Korrelation nach Pearson	0,540**	0,440**	0,234**
	Signifikanz (2-seitig)	0,000	0,000	0,008
	N	127	127	127
** Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.				

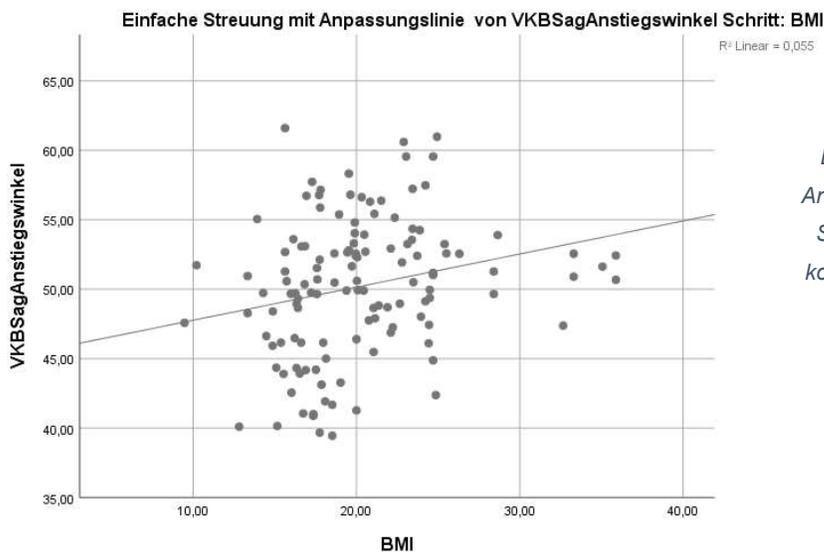
**Tabelle 15:** Pearson-Korrelation von VKB-Anstiegswinkel in der Sagittalebene in Relation zu Größe, Gewicht und BMI



**Abbildung 38:**  
Darstellung des VKB-Anstiegswinkels (°) in der Sagittalebene mit der korrespondierenden Größe (m)



**Abbildung 39:**  
Darstellung des VKB-Anstiegswinkels (°) in der Sagittalebene mit dem korrespondierenden Gewicht (kg)



**Abbildung 40:**  
Darstellung des VKB-Anstiegswinkels (°) in der Sagittalebene mit dem korrespondierenden BMI (kg/m<sup>2</sup>)

Der t-Test für unabhängige Stichproben lieferte keine signifikanten Ergebnisse bei der Unterscheidung der Werte von weiblichen bzw. männlichen Probanden.

## Anstiegswinkel der interkondylären Notch in der Sagittalebene (NotchAnstiegswinkel)

Die Mittelwerte des Anstiegswinkels der interkondylären Notch zeigten ein Maximum von 45,2° in der Altersgruppe 3 nachdem sie kontinuierlich von 44,3° in der Altersgruppe 1 angestiegen waren (+0,9°). Nach dem größten Mittelwert in der Altersgruppe 3 sanken sie diskontinuierlich auf den kleinsten Mittelwert in der Altersgruppe 6 von 42,4° (-2,8°).

Mit Ausnahme der Altersgruppe 1 waren in allen Altersgruppen die Werte der Probandinnen kleiner als die der Probanden (s. Tabelle 16).

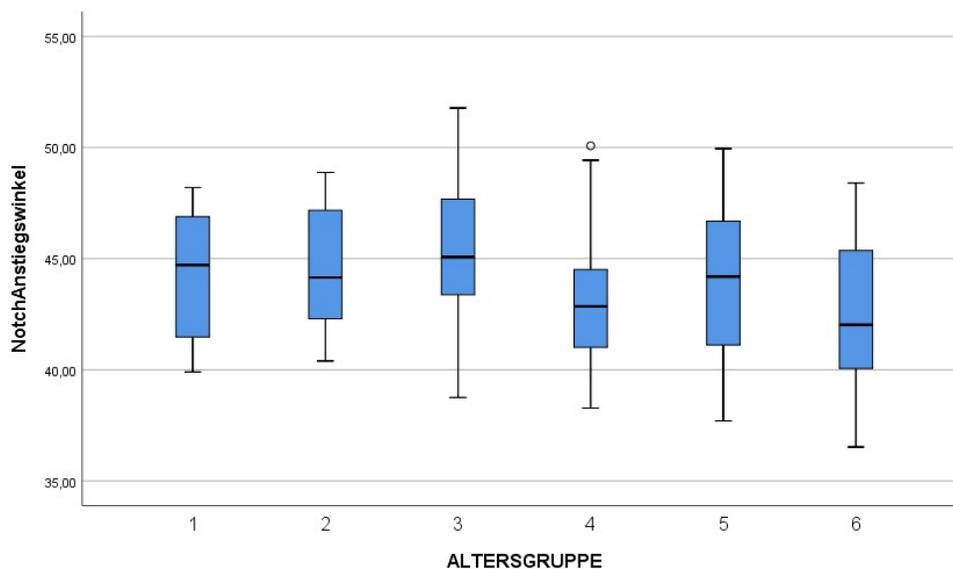
Die Q-Q Plots zeigten eine annähernde Normalverteilung der Werte an.

Der Boxplot zeigt die erhobenen Werte des Notch Anstiegswinkels über die entsprechenden Altersgruppen hinweg (s. Abb. 41).

			NotchAnstiegswinkel (°)					
			ALTERSGRUPPE					
			1	2	3	4	5	6
GESCHLECHT	Gesamt	Mittelwert	44,28	44,71	45,16	43,12	43,82	42,37
		Anzahl	8	9	20	27	40	23
		95,0% Untere KG für Mittelwert	41,72	42,38	43,52	41,89	42,78	40,96
		95,0% Obere KG für Mittelwert	46,84	47,04	46,80	44,36	44,87	43,78
		Maximum	48,20	48,88	51,77	50,08	49,95	48,40
		Minimum	39,90	40,40	38,75	38,28	37,70	36,53
		Standardabweichung	3,06	3,03	3,50	3,13	3,27	3,26
	weiblich	Mittelwert	44,35	43,68	43,47	42,66	42,87	41,85
		Anzahl	5	4	9	17	21	11
		95,0% Untere KG für Mittelwert	40,18	37,92	41,21	41,12	41,41	40,36
		95,0% Obere KG für Mittelwert	48,52	49,44	45,72	44,19	44,33	43,35
		Maximum	48,20	48,57	48,08	49,43	47,65	46,30
		Minimum	39,90	40,40	38,75	38,28	37,70	38,85
		Standardabweichung	3,36	3,62	2,93	2,98	3,21	2,22
	männlich	Mittelwert	44,17	45,54	46,55	43,92	44,87	42,84
		Anzahl	3	5	11	10	19	12

		95,0% Untere KG für Mittelwert	36,25	42,33	44,25	41,51	43,39	40,27
		95,0% Obere KG für Mittelwert	52,09	48,74	48,85	46,33	46,35	45,40
		Maximum	46,98	48,88	51,77	50,08	49,95	48,40
		Minimum	40,70	42,30	39,75	40,10	37,75	36,53
		Standardabweichung	3,19	2,58	3,43	3,37	3,07	4,03

**Tabelle 16:** Deskriptive Analyse des Anstiegswinkels der Notch (°) in der Sagittalebene, Unterscheidung nach Altersgruppe und Geschlecht



**Abbildung 41:** Boxplot von mittlerem Anstiegswinkel der Notch (°) in der Sagittalebene in den jeweiligen Altersgruppen; Punkt: milde Ausreißer

Die Pearson-Korrelation des Anstiegswinkels der interkondylären Notch mit Patient\*innengröße, -gewicht sowie BMI zeigte schwache, negative Korrelations-Koeffizienten mit Werten von -0,142, -0,04 bzw. 0,065 (schwache bzw. keine Korrelation). Die Korrelationen zeigten sich nicht signifikant (s. Tabelle 17). Daher erfolgte keine graphische Darstellung.

Korrelationen				
		GRÖßE	GEWICHT	BMI
NotchAnstiegswinkel	Korrelation nach Pearson	-0,142	-0,040	0,065
	Signifikanz (2-seitig)	0,111	0,652	0,466
	N	127	127	127

**Tabelle 17:** Pearson-Korrelation von Anstiegswinkel der Notch in der Sagittalebene in Relation zu Größe, Gewicht und BMI

Die Durchführung eines t-Tests zeigte in der Altersgruppe 3 signifikante geschlechtsspezifische Unterschiede mit größeren Werten bei den Probanden verglichen mit den Probandinnen (s. Tabelle 18).

Test bei unabhängigen Stichproben					
	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
				Untere	Obere
NotchAnstiegswinkel	0,047	-3,09	1,45	-6,12	-0,05
a. ALTERSGRUPPE = 3					

*Tabelle 18: t-Test für unabhängige Stichproben, zeigt signifikante geschlechtsspezifische Unterschiede in der Altersgruppe*

### Anstiegswinkel des VKBs in der Coronarebene (VKBCorAnstiegswinkel)

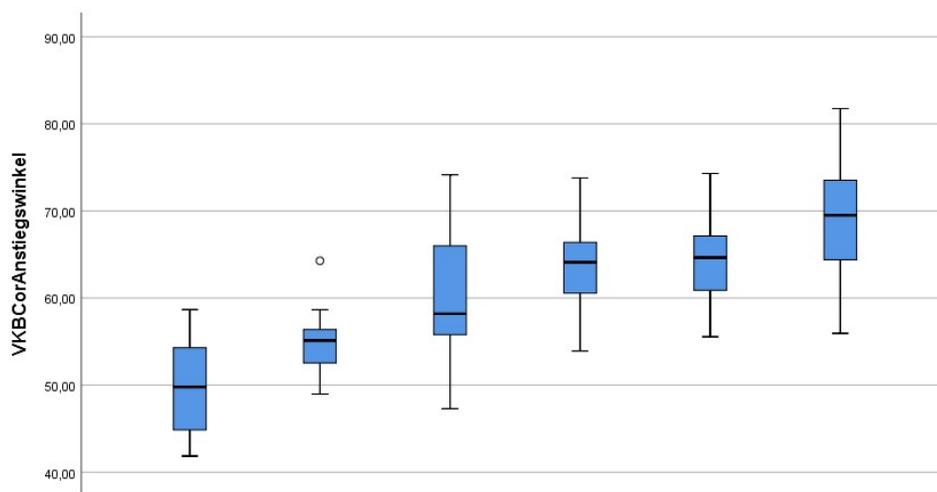
Die Messung des Anstiegswinkels des VKBs in der Coronarebene erbrachte Werte, welche zwischen 49,8° und 68,9° lagen. Die Werte zeigten eine kontinuierliche Zunahme der Mittelwerte in den ersten vier Altersgruppen (+14,4°), stagnierten zwischen den Altersgruppen 4 und 5 und zeigten die höchsten Mittelwerte in der Altersgruppe 6 (+4,7°). In der Gruppe der Probandinnen fanden sich mit Ausnahme von der Altersgruppe 3 immer kleinere Werte als in der Gruppe der Probanden (s. Tabelle 19). Die Q-Q Plots ließen Rückschlüsse auf eine Normalverteilung der Werte zu.

Der Boxplot zeigte die Mittelwerte der Anstiegswinkel in der Coronarebene über die entsprechenden Altersgruppen hinweg (s. Abb. 42).

			VKBCorAnstiegswinkel (°)					
			ALTERSGRUPPE					
			1	2	3	4	5	6
GESCHLECHT	Gesamt	Mittelwert	49,80	55,33	59,93	64,20	64,16	68,89
		Anzahl	8	9	20	27	40	23
		95,0% Untere KG für Mittelwert	44,74	52,00	56,52	62,47	62,79	66,00
		95,0% Obere KG für Mittelwert	54,86	58,65	63,34	65,92	65,53	71,78
		Maximum	58,68	64,28	74,15	73,78	74,30	81,75
		Minimum	41,85	48,97	47,30	53,93	55,55	55,95
		Standardabweichung	6,05	4,33	7,28	4,36	4,29	6,69
	weiblich	Mittelwert	47,83	53,91	62,10	64,03	63,63	68,20
		Anzahl	5	4	9	17	21	11
		95,0% Untere KG für Mittelwert	40,08	50,98	57,82	61,59	61,19	63,84

		95,0% Obere KG für Mittelwert	55,59	56,85	66,38	66,46	66,06	72,55
		Maximum	57,38	56,38	70,38	73,78	74,30	78,90
		Minimum	41,85	52,45	55,45	53,93	55,55	57,40
		Standardabweichung	6,25	1,84	5,57	4,73	5,35	6,48
	männlich	Mittelwert	53,08	56,46	58,16	64,49	64,75	69,52
	männlich	Anzahl	3	5	11	10	19	12
	männlich	95,0% Untere KG für Mittelwert	40,83	49,52	52,61	61,72	63,44	65,01
	männlich	95,0% Obere KG für Mittelwert	65,34	63,40	63,71	67,25	66,07	74,03
	männlich	Maximum	58,68	64,28	74,15	70,73	68,93	81,75
	männlich	Minimum	49,35	48,97	47,30	59,70	60,38	55,95
	männlich	Standardabweichung	4,93	5,59	8,26	3,86	2,73	7,10

**Tabelle 19:** Deskriptive Analyse des VKB-Anstiegswinkels in der Coronarebene (°), Unterscheidung nach Altersgruppe und Geschlecht

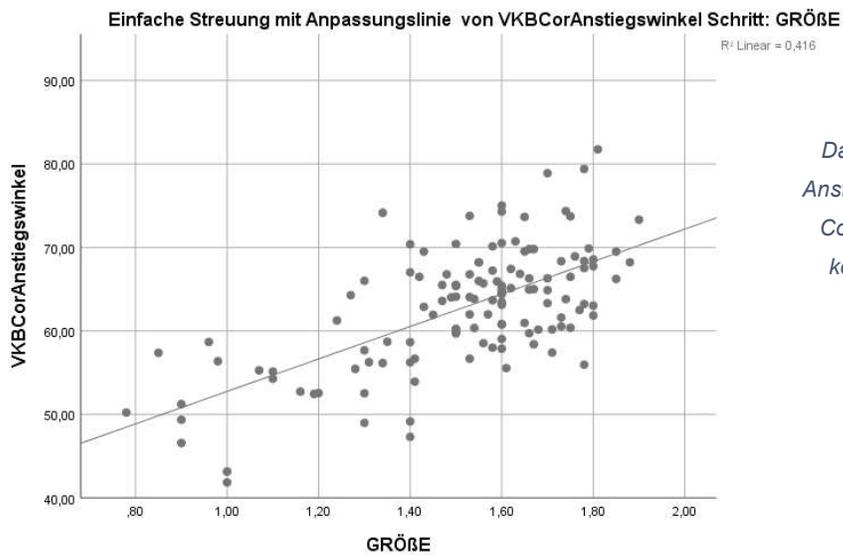


**Abbildung 42:** Boxplot von mittlerem VKB-Anstiegswinkel (°) in der Coronarebene in den jeweiligen Altersgruppen; Punkt: milder Ausreißer

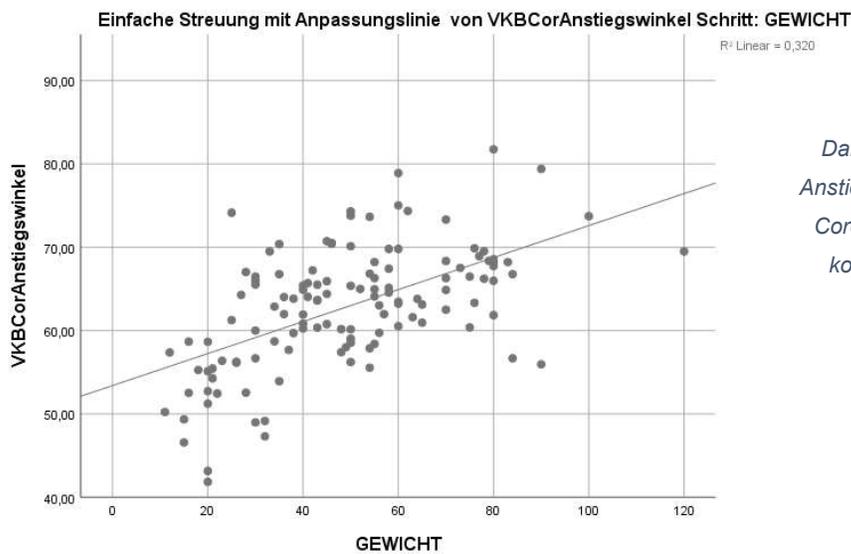
Die Korrelation mit Patient\*innengröße, -gewicht und BMI zeigte nach der Pearson-Korrelation Koeffizienten von 0,645, 0,566 (mittelstarke Korrelation) und 0,291 (schwache Korrelation). Die Korrelationen zeigten sich auf dem 0,01-Niveau signifikant (s. Tabelle 20). Die Korrelationen wurden graphisch dargestellt (s. Abb. 43ff.). Die Gerade stellt die Anpassungslinie der Werte dar.

Korrelationen				
		GRÖßE	GEWICHT	BMI
VKBCorAnstiegswinkel	Korrelation nach Pearson	0,645**	0,566**	0,291**
	Signifikanz (2-seitig)	0,000	0,000	0,001
	N	127	127	127
** Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.				

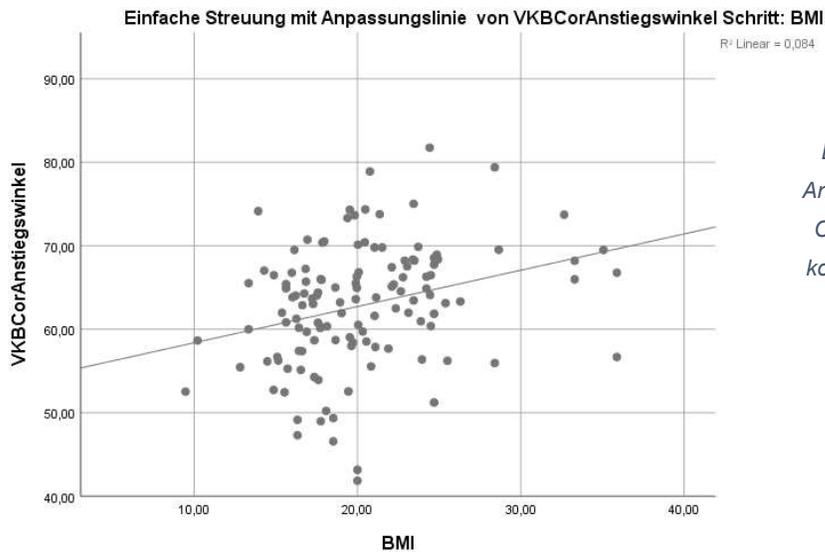
**Tabelle 20:** Pearson-Korrelation von VKB-Anstiegswinkel in der Coronarebene in Relation zu Größe, Gewicht und BMI



**Abbildung 43:**  
Darstellung des VKB-Anstiegswinkels (°) in der Coronarebene mit der korrespondierenden Größe (m)



**Abbildung 44:**  
Darstellung des VKB-Anstiegswinkels (°) in der Coronarebene mit dem korrespondierenden Gewicht (kg)



**Abbildung 45:**  
Darstellung des VKB-  
Anstiegswinkels (°) in der  
Coronarebene mit dem  
korrespondierenden BMI  
(kg/m<sup>2</sup>)

Es zeigten sich keine signifikanten geschlechtsspezifischen Unterschiede zwischen den Ergebnissen nach Durchführung des t-Tests für unabhängige Stichproben.

### Bikondyläre Breite in der Coronarebene (BikondyläreBreite)

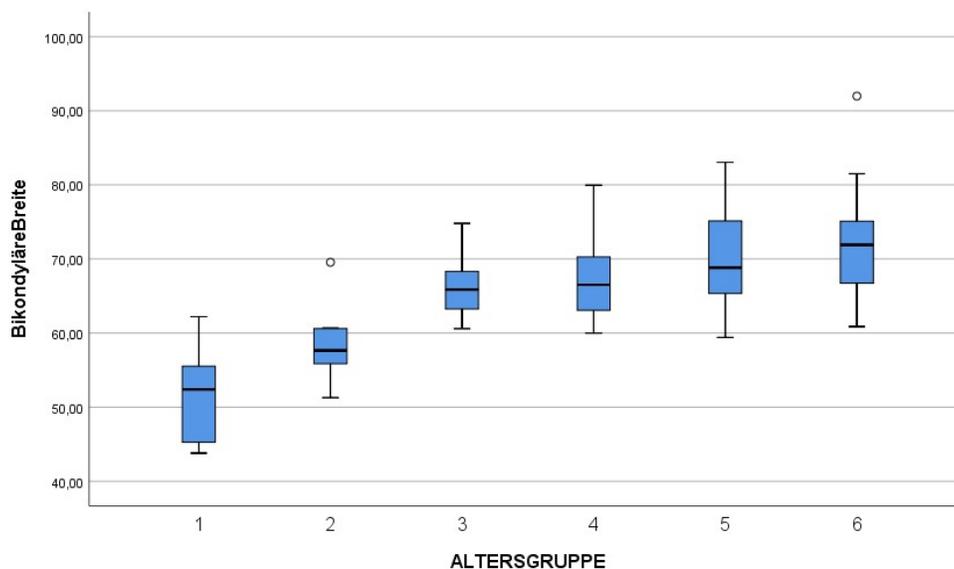
Die Messungen der bikondylären Breite zeigten eine kontinuierliche Zunahme der Werte über alle Altersgruppen hinweg von 51,5 mm in der Altersgruppe 1 auf 71,7 mm in der Altersgruppe 6 (+20,2 mm). Der größte Anstieg zeigte sich zwischen den Altersgruppen 2 und 3 (+7,5 mm). Die Werte der Probandinnen zeigten sich über alle Altersgruppen hinweg kleiner als die der Probanden (s. Tabelle 21). Die Werte zeigten sich nach Durchsicht der Q-Q Plots näherungsweise normalverteilt.

Der Boxplot zeigt die Mittelwerte der bikondylären Breite über die entsprechenden Altersgruppen hinweg (s. Abb. 46).

			BikondyläreBreite (mm)					
			ALTERSGRUPPE					
			1	2	3	4	5	6
GESCHLECHT	Gesamt	Mittelwert	51,54	58,47	65,96	67,48	69,96	71,74
		Anzahl	8	9	20	27	40	23
		95,0% Untere KG für Mittelwert	46,15	54,60	64,26	65,33	68,04	68,63
		95,0% Obere KG für Mittelwert	56,94	62,35	67,67	69,63	71,87	74,84
		Maximum	62,20	69,55	74,80	79,95	83,05	91,98
		Minimum	43,80	51,27	60,60	60,00	59,40	60,88

	weiblich	Standardabweichung	6,45	5,05	3,65	5,43	6,00	7,19
		Mittelwert	49,08	57,23	64,00	64,65	65,97	66,31
		Anzahl	5	4	9	17	21	11
		95,0% Untere KG für Mittelwert	41,64	55,59	61,73	63,08	64,16	64,11
		95,0% Obere KG für Mittelwert	56,51	58,87	66,27	66,21	67,77	68,52
		Maximum	55,75	58,28	69,65	69,30	72,95	71,90
		Minimum	43,80	55,85	60,60	60,00	59,40	60,88
	männlich	Standardabweichung	5,99	1,03	2,96	3,04	3,96	3,28
		Mittelwert	55,66	59,47	67,57	72,29	74,37	76,71
		Anzahl	3	5	11	10	19	12
		95,0% Untere KG für Mittelwert	41,35	50,93	65,24	68,51	72,14	72,84
		95,0% Obere KG für Mittelwert	69,97	68,01	69,90	76,07	76,59	80,58
		Maximum	62,20	69,55	74,80	79,95	83,05	91,98
		Minimum	51,35	51,27	61,53	62,35	65,25	66,68
Standardabweichung	5,76	6,88	3,47	5,28	4,62	6,09		

**Tabelle 21:** Deskriptive Analyse der bikondylären Breite (mm) der Coronarebene, Unterscheidung nach Altersgruppe und Geschlecht



**Abbildung 46:** Boxplot der mittleren bikondylären Breite (mm) in den jeweiligen Altersgruppen; Punkte: milde Ausreißer

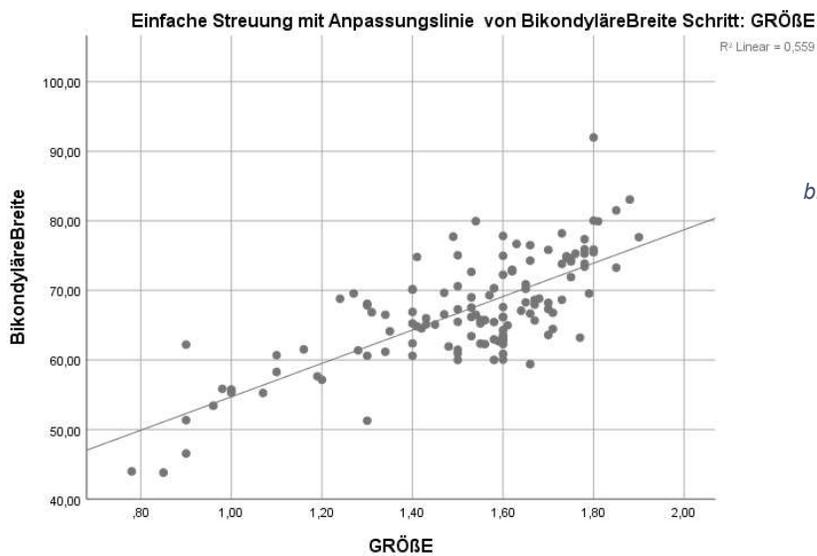
Nach der Pearson-Korrelation der bikondylären Breite mit Patient\*innengröße, -gewicht und BMI zeigten sich Korrelationskoeffizienten von 0,748, 0,625 (mittel-/starke Korrelation) bzw.

0,273 (schwache Korrelation). Diese Korrelationen waren auf dem Niveau von 0,01 signifikant (s. Tabelle 22). Die Korrelationen wurden graphisch dargestellt (s. Abb. 47ff.). Die Gerade stellt die Anpassungslinie der Werte dar.

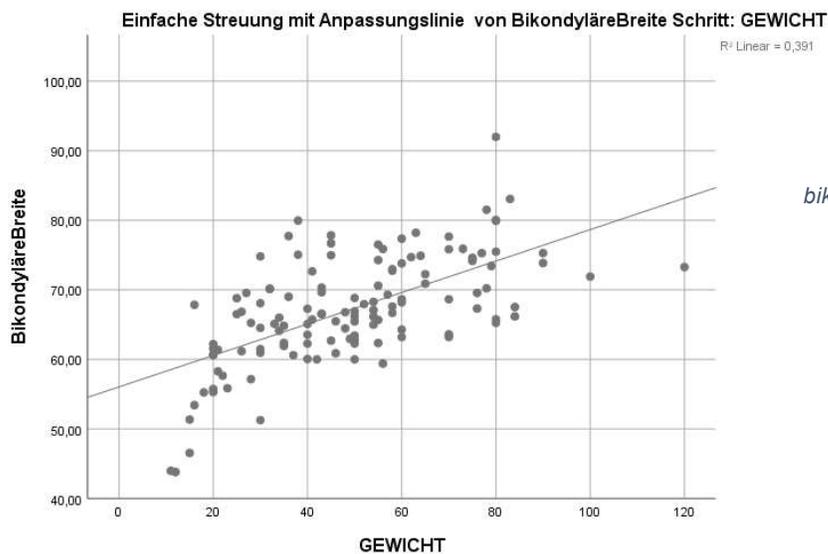
Korrelationen				
		GRÖÙE	GEWICHT	BMI
BikondyläreBreite	Korrelation nach Pearson	0,748**	0,625**	0,273**
	Signifikanz (2-seitig)	0,000	0,000	0,002
	N	127	127	127

\*\* . Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

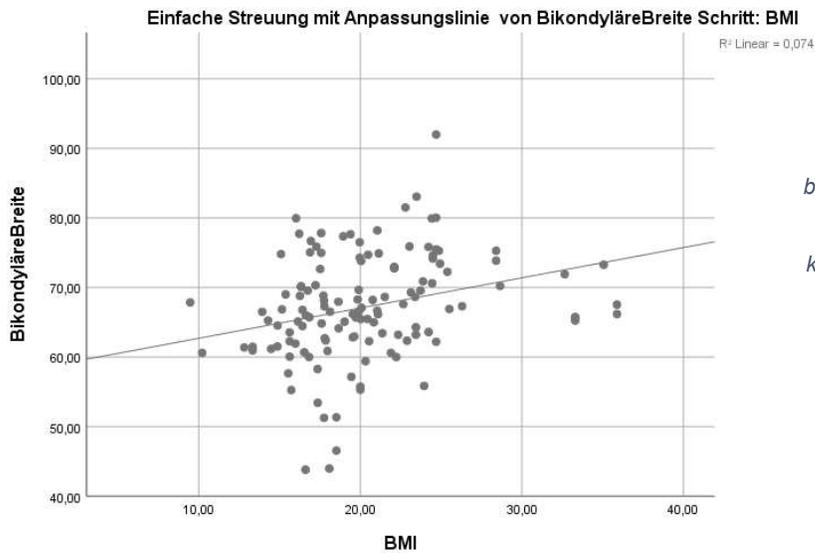
**Tabelle 22:** Pearson-Korrelation von bikondylärer Breite in Relation zu Größe, Gewicht und BMI



**Abbildung 47:**  
Darstellung der bikondylären Breite (mm) mit der korrespondierenden Größe (m)



**Abbildung 48:**  
Darstellung der bikondylären Breite (mm) mit dem korrespondierenden Gewicht (kg)



**Abbildung 49:**  
Darstellung der  
bikondylären Breite (mm)  
mit dem  
korrespondierenden BMI  
(kg/m<sup>2</sup>)

Der t-Test für unabhängige Stichproben lieferte für die Altersgruppen 3 bis 6 signifikante geschlechtsspezifische Unterschiede. Hierbei zeigten sich die Werte der Probanden signifikant größer als die der Probandinnen (s. Tabellen 23-26).

Test bei unabhängigen Stichproben					
	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
				Untere	Obere
BikondyläreBreite	0,025	-3,57	1,46	-6,64	-0,5
a. ALTERSGRUPPE = 3					

**Tabelle 23:** t-Test für unabhängige Stichproben, zeigt signifikante geschlechtsspezifische Unterschiede in der Altersgruppe 3

Test bei unabhängigen Stichproben					
	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
				Untere	Obere
BikondyläreBreite	0,000	-7,64	1,59	-10,93	-4,36
a. ALTERSGRUPPE = 4					

**Tabelle 24:** t-Test für unabhängige Stichproben, zeigt signifikante geschlechtsspezifische Unterschiede in der Altersgruppe 4

Test bei unabhängigen Stichproben					
	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
				Untere	Obere
BikondyläreBreite	0,000	-8,4	1,36	-11,15	-5,65
a. ALTERSGRUPPE = 5					

**Tabelle 25:** t-Test für unabhängige Stichproben, zeigt signifikante geschlechtsspezifische Unterschiede in der Altersgruppe 5

Test bei unabhängigen Stichproben <sup>a</sup>					
	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
				Untere	Obere
BikondyläreBreite	0,000	-10,4	2,07	-14,7	-6,09
a. ALTERSGRUPPE = 6					

**Tabelle 26:** t-Test für unabhängige Stichproben, zeigt signifikante geschlechtsspezifische Unterschiede in der Altersgruppe 6

Nach Adjustieren von Körpergröße und -gewicht und der Durchführung eines erneuten t-Tests für unabhängige Stichproben konnte kein signifikanter geschlechtsspezifischer Unterschied nachgewiesen werden.

### Breite der interkondylären Notch in der Coronarebene (NotchBreite)

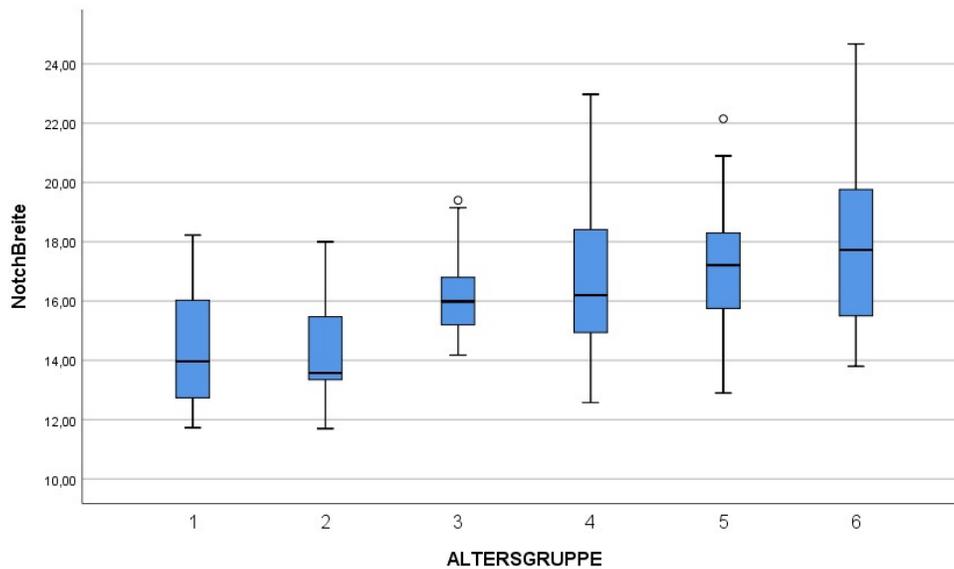
Die Breite der interkondylären Notch war in den Altersgruppen 1 und 2 am schmalsten bei Mittelwerten von 14,4 mm. Es zeigte sich eine kontinuierliche Zunahme der Mittelwerte von der Altersgruppe 2 bis zur Altersgruppe 6 auf das Maximum von 17,8 mm (+3,4 mm).

Bei den Probandinnen war die Breite der Notch in allen Altersgruppen geringer als die der Probanden (s. Tabelle 27). Die Q-Q Plots ließen eine Normalverteilung der Werte annehmen. Ein Boxplot zeigt die erhobenen Werte der Notchbreite über die entsprechenden Altersgruppen hinweg (s. Abb. 50).

			NotchBreite (mm)					
			ALTERSGRUPPE					
			1	2	3	4	5	6
GESCHLECHT	Gesamt	Mittelwert	14,43	14,43	16,26	16,60	17,11	17,81
		Anzahl	8	9	20	27	40	23
		95,0% Untere KG für Mittelwert	12,61	12,98	15,57	15,61	16,46	16,57
		95,0% Obere KG für Mittelwert	16,24	15,88	16,95	17,60	17,75	19,04

		Maximum	18,22	18,00	19,40	22,98	22,15	24,67
		Minimum	11,73	11,70	14,18	12,58	12,90	13,80
		Standardabweichung	2,17	1,89	1,48	2,51	2,02	2,86
	weiblich	Mittelwert	13,62	14,02	15,82	15,44	16,10	15,80
		Anzahl	5	4	9	17	21	11
		95,0% Untere KG für Mittelwert	11,69	12,12	14,76	14,67	15,31	14,96
		95,0% Obere KG für Mittelwert	15,54	15,92	16,88	16,21	16,89	16,64
		Maximum	15,80	15,80	18,45	18,00	18,53	18,58
		Minimum	11,73	13,35	14,18	12,58	12,90	14,17
	männlich	Standardabweichung	1,55	1,19	1,37	1,50	1,73	1,25
		Mittelwert	15,78	14,75	16,62	18,58	18,21	19,64
		Anzahl	3	5	11	10	19	12
		95,0% Untere KG für Mittelwert	9,02	11,77	15,59	16,64	17,38	17,93
		95,0% Obere KG für Mittelwert	22,53	17,74	17,65	20,52	19,05	21,35
		Maximum	18,22	18,00	19,40	22,98	22,15	24,67
		Minimum	12,85	11,70	14,88	12,90	14,80	13,80
	Standardabweichung	2,72	2,40	1,53	2,71	1,74	2,69	

**Tabelle 27:** Deskriptive Analyse der Notchbreite (mm) in der Coronarebene, Unterscheidung nach Altersgruppe und Geschlecht



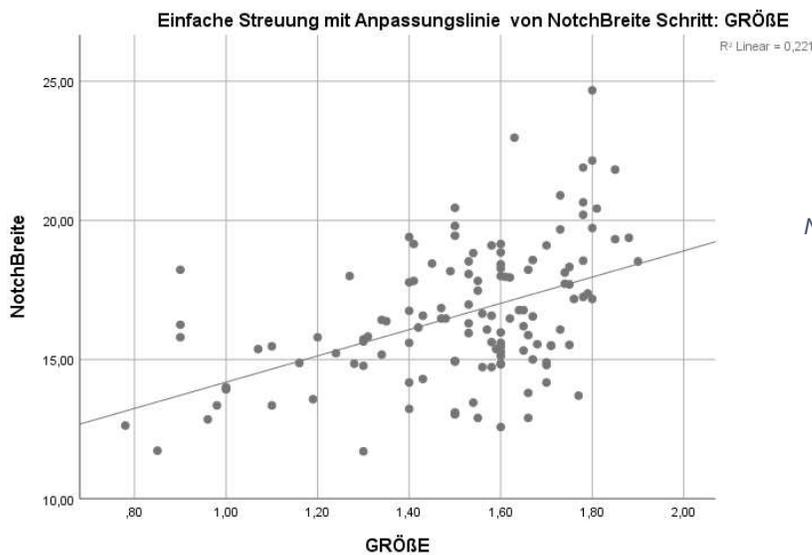
**Abbildung 50:** Boxplot der mittleren Notchbreite (mm) in der Coronarebene in der jeweiligen Altersgruppe; Punkte: milde Ausreißer

Die Pearson-Korrelation von Größe, Gewicht und BMI mit der Notchbreite zeigte Koeffizienten von 0,47, 0,467 (schwache bis mittelstarke Korrelationen) und 0,281 (schwache Korrelation). Diese Korrelationen waren auf dem 0,01-Niveau signifikant (s. Tabelle 28). Die Korrelationen wurden graphisch dargestellt (s. Abb. 51ff.). Die Gerade stellt die Anpassungslinie der Werte dar.

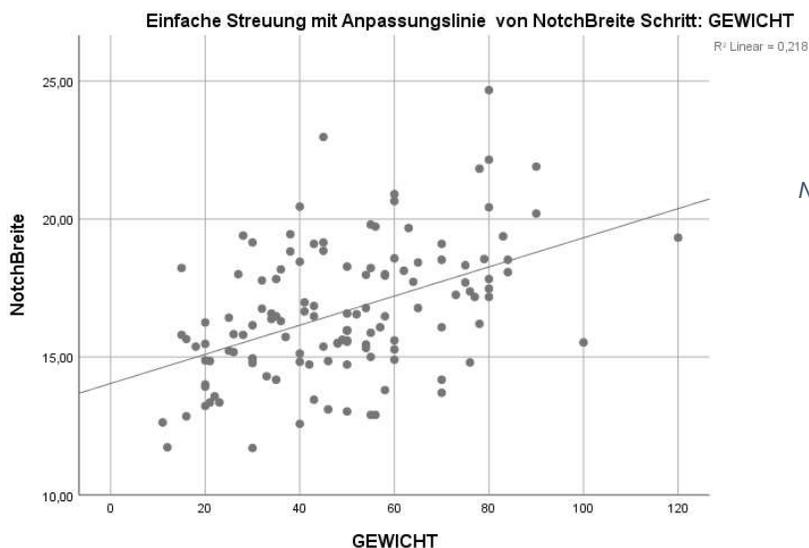
Korrelationen				
		GRÖßE	GEWICHT	BMI
NotchBreite	Korrelation nach Pearson	0,470**	0,467**	0,281**
	Signifikanz (2-seitig)	0,000	0,000	0,001
	N	127	127	127

\*\* Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

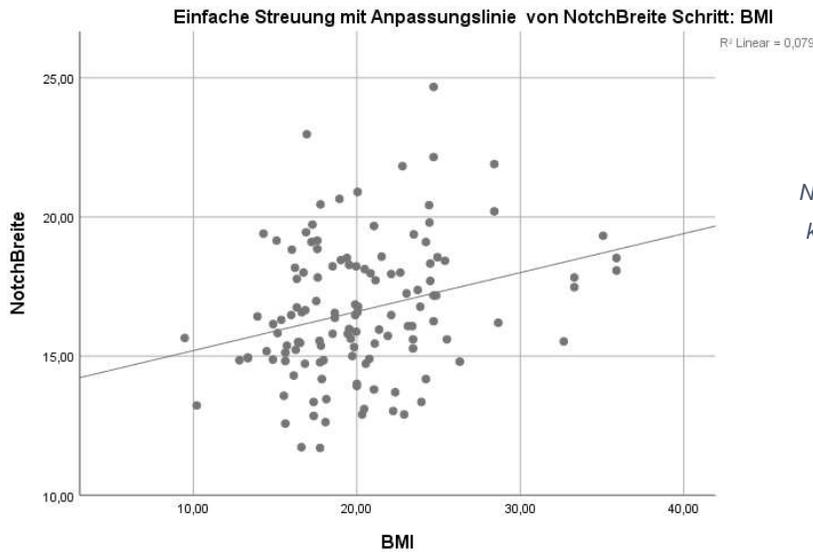
**Tabelle 28:** Pearson-Korrelation der Notchbreite in der Coronarebene in Relation zu Größe, Gewicht und BMI



**Abbildung 51:**  
Darstellung der Notchbreite (mm) mit der korrespondierenden Größe (m)



**Abbildung 52:**  
Darstellung der Notchbreite (mm) mit dem korrespondierenden Gewicht (kg)



**Abbildung 53:**  
Darstellung der  
Notchbreite (mm) mit dem  
korrespondierenden BMI  
(kg/m<sup>2</sup>)

Der t-Test für unabhängige Stichproben lieferte in den Altersgruppen 4, 5 und 6 signifikante geschlechtsspezifische Unterschiede für die Messwerte der Notchbreite, wobei die der Probanden signifikant größer waren als die der Probandinnen (s. Tabellen 29-31).

Test bei unabhängigen Stichproben <sup>a</sup>					
	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
				Untere	Obere
NotchBreite	0,001	-3,15	0,81	-4,8	-1,49
a. ALTERSGRUPPE = 4					

**Tabelle 29:** t-Test für unabhängige Stichproben, zeigt signifikante geschlechtsspezifische Unterschiede in der Altersgruppe 4

Test bei unabhängigen Stichproben <sup>a</sup>					
	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
				Untere	Obere
NotchBreite	0,000	-2,11	0,55	-3,23	-1
a. ALTERSGRUPPE = 5					

**Tabelle 30:** t-Test für unabhängige Stichproben, zeigt signifikante geschlechtsspezifische Unterschiede in der Altersgruppe 5

Test bei unabhängigen Stichproben <sup>a</sup>					
	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
				Untere	Obere
NotchBreite	0,000	-3,84	0,89	-5,69	-1,99
a. ALTERSGRUPPE = 6					

*Tabelle 31: t-Test für unabhängige Stichproben, zeigt signifikante geschlechtsspezifische Unterschiede in der Altersgruppe 6*

Nach Adjustieren von Körpergröße und -gewicht und der Durchführung eines erneuten t-Tests für unabhängige Stichproben konnte kein signifikanter geschlechtsspezifischer Unterschied nachgewiesen werden.

### VKB-Breite in der Coronarebene (VKBBreite)

Die Breite des VKBs in der Coronarebene nahm von der Altersgruppe 1 mit einem Mittelwert von 4 mm kontinuierlich bis zur Altersgruppe 3 zu (+1,5 mm), zeigte einen minimalen Abfall von der Altersgruppe 3 zur Altersgruppe 4 (-0,1 mm) und stieg dann erneut bis zur Altersgruppe 6 auf den größten Mittelwert von 5,8 mm an (+0,4 mm).

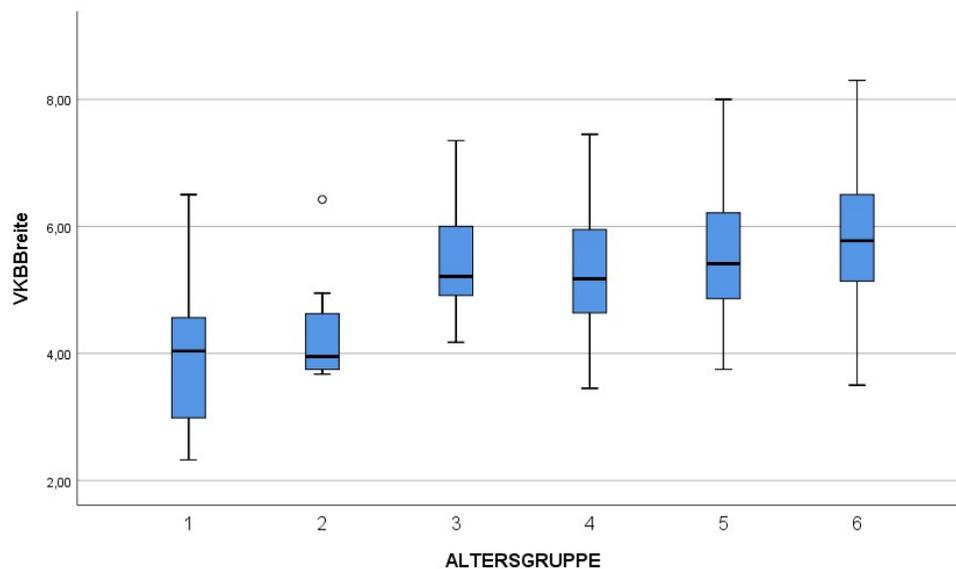
Die Messwerte der Probandinnen zeigten sich mit Ausnahme der Altersgruppe 1 immer kleiner als die der Probanden (s. Tabelle 32). Die Werte zeigten sich nach Durchsicht der Q-Q Plots normalverteilt.

Der Boxplot zeigt die erhobenen Werte der VKB-Breite über die entsprechenden Altersgruppen hinweg (s. Abb. 54).

			VKBBreite (mm)					
			ALTERSGRUPPE					
			1	2	3	4	5	6
GESCHLECHT	Gesamt	Mittelwert	4,00	4,37	5,46	5,35	5,52	5,78
		Anzahl	8	9	20	27	40	23
		95,0% Untere KG für Mittelwert	2,89	3,68	5,06	4,95	5,19	5,25
		95,0% Obere KG für Mittelwert	5,11	5,05	5,86	5,74	5,84	6,31
		Maximum	6,50	6,43	7,35	7,45	8,00	8,30
		Minimum	2,33	3,68	4,18	3,45	3,75	3,50
		Standardabweichung	1,33	0,89	0,85	1,00	1,02	1,23
	weiblich	Mittelwert	4,08	3,98	5,33	5,03	5,15	5,13
		Anzahl	5	4	9	17	21	11
		95,0% Untere KG für Mittelwert	2,17	3,30	4,78	4,61	4,69	4,51

		95,0% Obere KG für Mittelwert	5,99	4,67	5,88	5,45	5,62	5,75
		Maximum	6,50	4,63	6,25	6,88	6,90	6,95
		Minimum	2,33	3,73	4,18	3,45	3,75	3,50
		Standardabweichung	1,54	0,43	0,71	0,82	1,01	0,92
	männlich	Mittelwert	3,87	4,68	5,56	5,89	5,91	6,38
		Anzahl	3	5	11	10	19	12
		95,0% Untere KG für Mittelwert	0,90	3,32	4,90	5,11	5,49	5,62
		95,0% Obere KG für Mittelwert	6,83	6,03	6,21	6,66	6,34	7,13
		Maximum	4,88	6,43	7,35	7,45	8,00	8,30
		Minimum	2,55	3,68	4,40	4,30	4,53	3,65
		Standardabweichung	1,19	1,09	0,97	1,09	0,88	1,19

**Tabelle 32:** Deskriptive Analyse der VKB-Breite (mm) in der Coronarebene, Unterscheidung nach Altersgruppe und Geschlecht

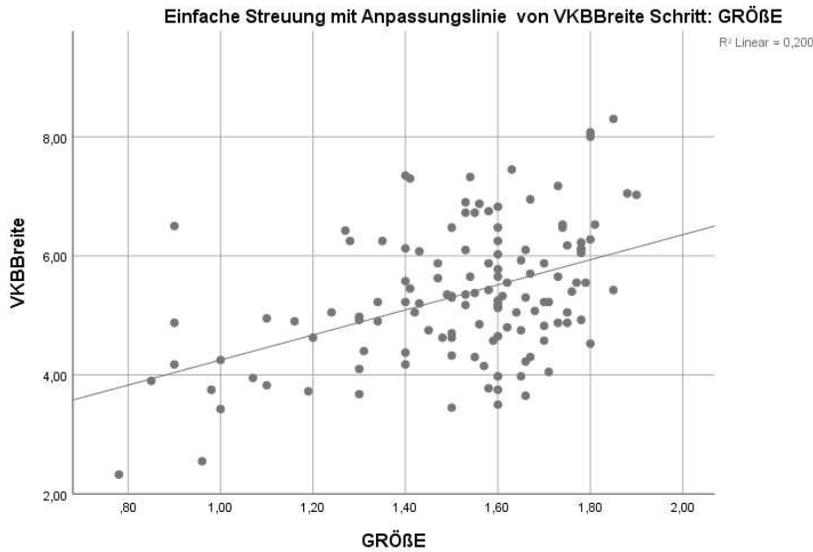


**Abbildung 54:** Boxplot der mittleren VKB-Breite (mm) in der Coronarebene in der jeweiligen Altersgruppe, Punkt: milder Ausreißer

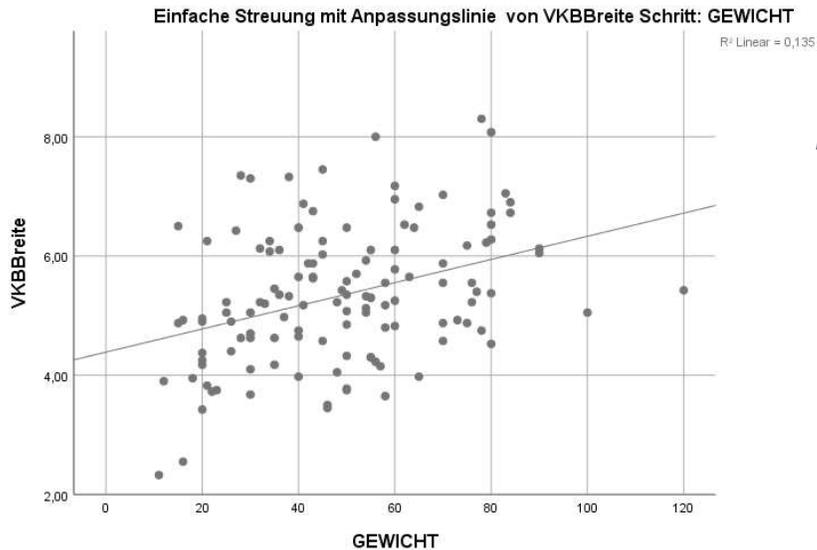
Die Pearson-Korrelation der VKB-Breite mit Patient\*innengröße, -gewicht und BMI zeigte Werte von 0,448, 0,367 (schwache Korrelationen) bzw. 0,161 (sehr schwache Korrelation). Die Korrelationen mit Größe und Gewicht waren auf dem 0,01-Niveau signifikant, wohingegen die Korrelation mit dem BMI nicht signifikant war (s. Tabelle 33). Die Korrelationen wurden graphisch dargestellt (s. Abb. 55ff.). Die Gerade stellt die Anpassungslinie der Werte dar.

Korrelationen				
		GRÖÙE	GEWICHT	BMI
VKBBreite	Korrelation nach Pearson	0,448**	0,367**	0,161
	Signifikanz (2-seitig)	0,000	0,000	0,070
	N	127	127	127
**. Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.				

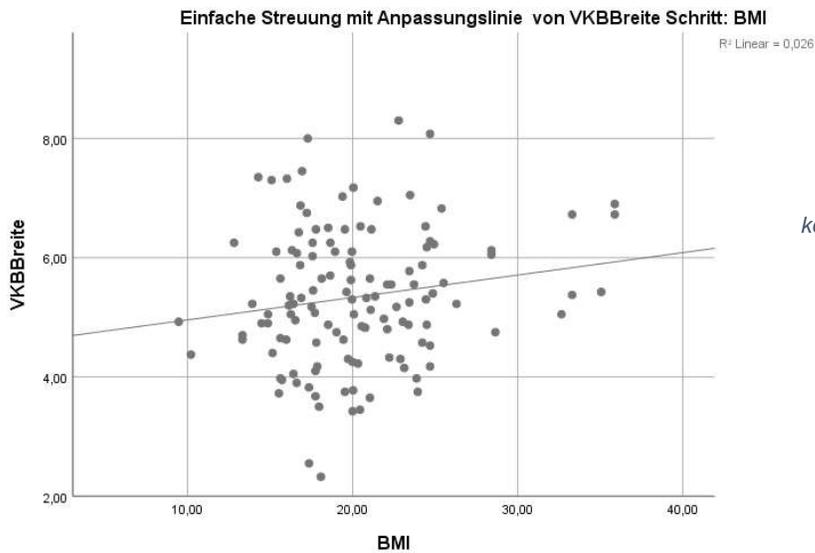
**Tabelle 33:** Pearson-Korrelation der VKB-Breite in der Coronarebene in Relation zu Größe, Gewicht und BMI



**Abbildung 55:**  
Darstellung der VKB-Breite (mm) mit der korrespondierenden Größe (m)



**Abbildung 56:**  
Darstellung der VKB-Breite (mm) mit dem korrespondierenden Gewicht (kg)



**Abbildung 57:**  
Darstellung der VKB-Breite (mm) mit dem korrespondierenden BMI ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )

Der t-Test für unabhängige Stichproben lieferte signifikant größere Werte für die Probanden im Vergleich zu den Probandinnen ab der Altersgruppe 4 bis einschließlich der Altersgruppe 6 (s. Tabellen 34-36).

Test bei unabhängigen Stichproben					
	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
				Untere	Obere
VKBBreite	0,03	-0,86	0,37	-1,62	-0,1
a. ALTERSGRUPPE = 4					

**Tabelle 34:** t-Test für unabhängige Stichproben, zeigt signifikante geschlechtsspezifische Unterschiede in der Altersgruppe 4

Test bei unabhängigen Stichproben					
	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
				Untere	Obere
VKBBreite	0,016	-0,76	0,30	-1,37	-0,15
a. ALTERSGRUPPE = 5					

**Tabelle 35:** t-Test für unabhängige Stichproben, zeigt signifikante geschlechtsspezifische Unterschiede in der Altersgruppe 5

Test bei unabhängigen Stichproben					
	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
				Untere	Obere
VKBBreite	0,011	-1,24	0,45	-2,17	-0,31
a. ALTERSGRUPPE = 6					

*Tabelle 36: t-Test für unabhängige Stichproben, zeigt signifikante geschlechtsspezifische Unterschiede in der Altersgruppe 6*

Nach Adjustieren von Körpergröße und -gewicht und der Durchführung eines erneuten t-Tests für unabhängige Stichproben konnte kein signifikanter geschlechtsspezifischer Unterschied nachgewiesen werden.

### HKB-Breite in der Coronarebene (HKBBreite)

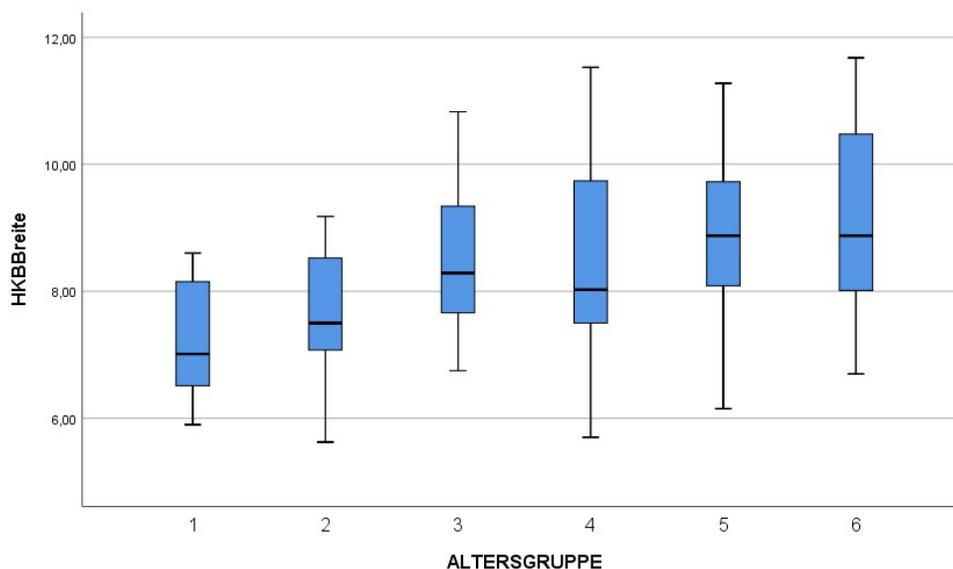
Die Breite des HKBs maß in der Coronarebene Mittelwerte von 7,23 mm in der Altersgruppe 1, während sie in Altersgruppe 6 bei einem Mittelwert von 9,13 mm lag (+1,9 mm). Die Probandinnen hatten, mit Ausnahme von der Altersgruppe 2, kleinere Werte als die Probanden (s. Tabelle 37). Es konnte nach Durchsicht der Q-Q Plots von einer Normalverteilung ausgegangen werden.

Der Boxplot zeigt die erhobenen Werte der HKB-Breite in den entsprechenden Altersgruppen an (s. Abb. 58).

			HKBBreite (mm)					
			ALTERSGRUPPE					
			1	2	3	4	5	6
GESCHLECHT	Gesamt	Mittelwert	7,23	7,54	8,47	8,50	8,88	9,13
		Anzahl	8	9	20	27	40	23
		95,0% Untere KG für Mittelwert	6,41	6,69	7,99	7,92	8,46	8,48
		95,0% Obere KG für Mittelwert	8,05	8,40	8,95	9,08	9,30	9,79
		Maximum	8,60	9,18	10,83	11,53	11,27	11,68
		Minimum	5,90	5,63	6,75	5,70	6,15	6,70
		Standardabweichung	0,98	1,11	1,03	1,47	1,32	1,52
	weiblich	Mittelwert	6,76	7,64	7,84	7,88	8,46	8,02
		Anzahl	5	4	9	17	21	11
		95,0% Untere KG für Mittelwert	5,80	6,56	7,37	7,42	7,90	7,39
		95,0% Obere KG für Mittelwert	7,71	8,72	8,31	8,34	9,02	8,65

		Maximum	7,93	8,63	9,23	10,05	10,52	9,42
		Minimum	5,90	7,08	7,28	6,48	6,15	6,70
		Standardabweichung	0,77	0,68	0,61	0,90	1,23	,94
	männlich	Mittelwert	8,03	7,46	8,99	9,56	9,34	10,16
		Anzahl	3	5	11	10	19	12
		95,0% Untere KG für Mittelwert	6,02	5,66	8,29	8,35	8,72	9,40
		95,0% Obere KG für Mittelwert	10,03	9,26	9,68	10,76	9,96	10,92
		Maximum	8,60	9,18	10,83	11,53	11,27	11,68
		Minimum	7,10	5,63	6,75	5,70	6,80	8,02
		Standardabweichung	0,81	1,45	1,04	1,68	1,28	1,20

**Tabelle 37:** Deskriptive Analyse der HKB-Breite (mm) in der Coronarebene, Unterscheidung nach Altersgruppe und Geschlecht

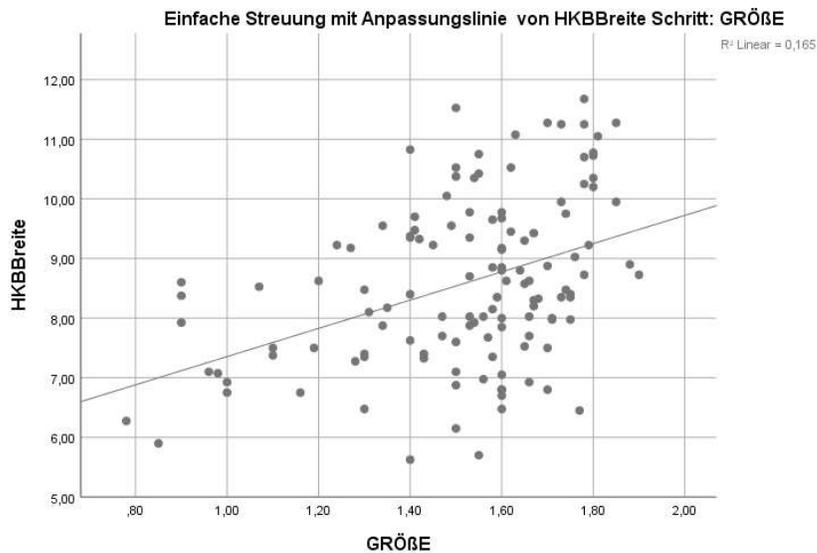


**Abbildung 58:** Boxplot der mittleren HKB-Breite (mm) in der Coronarebene in der jeweiligen Altersgruppe

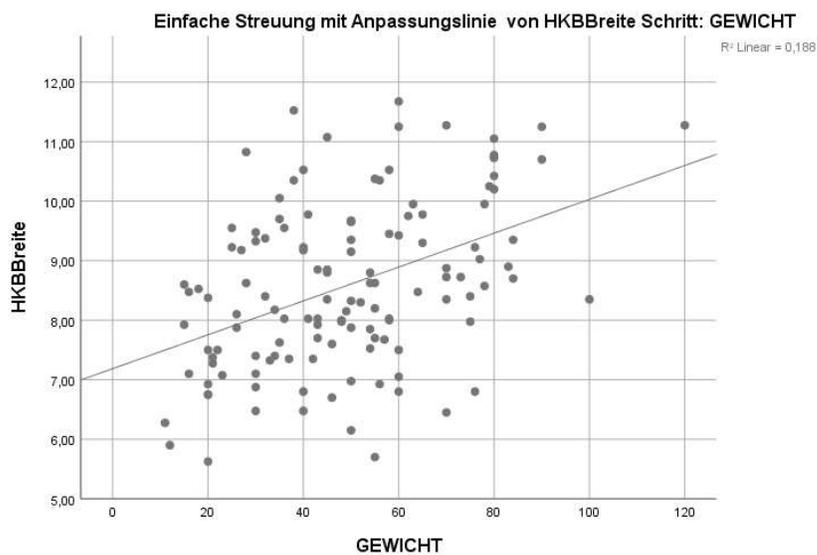
Die Pearson-Korrelation der Ergebnisse für die HKB-Breite mit Patient\*innengröße, -gewicht sowie BMI zeigten Korrelationskoeffizienten von 0,407, 0,434 bzw. 0,296 (schwache Korrelationen). Die Korrelationen waren auf dem 0,01-Niveau signifikant (s. Tabelle 38). Die Korrelationen wurden graphisch dargestellt (s. Abb. 59ff.). Die Gerade stellt die Anpassungslinie der Werte dar.

Korrelationen				
		GRÖÙE	GEWICHT	BMI
HKBBreite	Korrelation nach Pearson	0,407**	0,434**	0,296**
	Signifikanz (2-seitig)	0,000	0,000	0,001
	N	127	127	127
**. Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.				

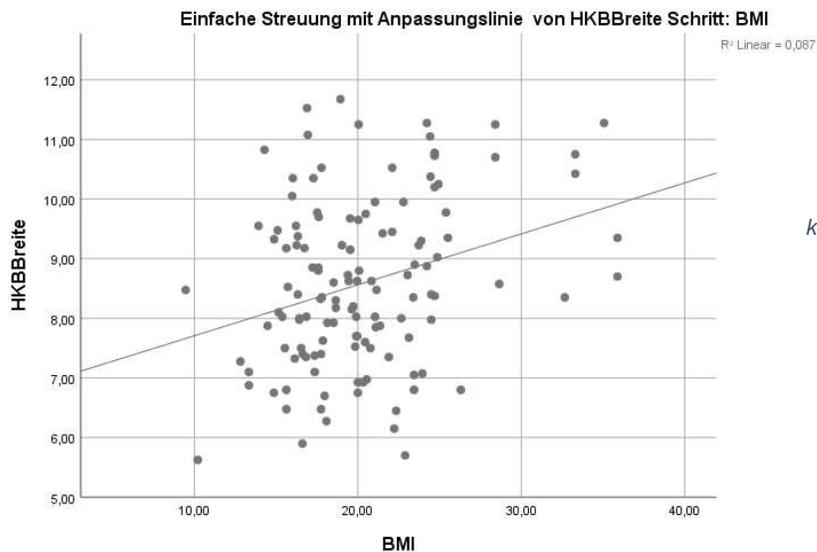
**Tabelle 38:** Pearson-Korrelation der HKB-Breite in der Coronarebene in Relation zu Größe, Gewicht und BMI



**Abbildung 59:**  
Darstellung der HKB-Breite (mm) mit der korrespondierenden Größe (m)



**Abbildung 60:**  
Darstellung der HKB-Breite (mm) mit dem korrespondierenden Gewicht (kg)



**Abbildung 61:**  
Darstellung der HKB-  
Breite (mm) mit dem  
korrespondierenden BMI  
(kg/m<sup>2</sup>)

Der t-Test für unabhängige Stichproben wies in den Altersgruppen 3 bis 6 für die Ergebnisse der HKB-Breite signifikante geschlechtsspezifische Unterschiede auf, wobei die Werte der Probanden signifikant größer waren als die der Probandinnen (s. Tabelle 39-42).

Test bei unabhängigen Stichproben					
	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
				Untere	Obere
HKBBreite	0,009	-1,14	0,39	-1,97	-0,32
a. ALTERSGRUPPE = 3					

**Tabelle 39:** t-Test für unabhängige Stichproben, zeigt signifikante geschlechtsspezifische Unterschiede in der Altersgruppe 3

Test bei unabhängigen Stichproben					
	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
				Untere	Obere
HKBBreite	0,002	-1,67	0,49	-2,69	-0,66
a. ALTERSGRUPPE = 4					

**Tabelle 40:** t-Test für unabhängige Stichproben, zeigt signifikante geschlechtsspezifische Unterschiede in der Altersgruppe 4

Test bei unabhängigen Stichproben					
	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
				Untere	Obere
HKBBreite	0,033	-0,88	0,4	-1,69	-0,07
a. ALTERSGRUPPE = 5					

**Tabelle 41:** t-Test für unabhängige Stichproben, zeigt signifikante geschlechtsspezifische Unterschiede in der Altersgruppe 5

Test bei unabhängigen Stichproben					
	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
				Untere	Obere
HKBBreite	0,000	-2,14	0,45	-3,08	-1,2
a. ALTERSGRUPPE = 6					

**Tabelle 42:** t-Test für unabhängige Stichproben, zeigt signifikante geschlechtsspezifische Unterschiede in der Altersgruppe 6

Nach Adjustieren von Körpergröße und -gewicht und der Durchführung eines erneuten t-Tests für unabhängige Stichproben konnte kein signifikanter geschlechtsspezifischer Unterschied nachgewiesen werden.

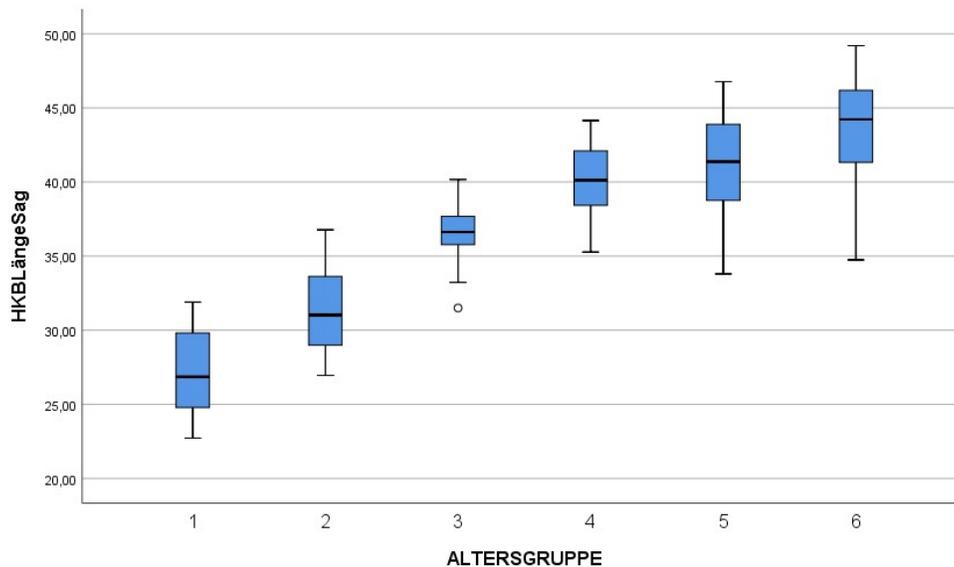
## HKB in der Sagittalebene (HKBLängeSag)

Die Länge des HKBs zeigte in der Sagittalebene eine Zunahme der Mittelwerte von 27,2 mm in der Altersgruppe 1 bis auf 43,6 mm in der Altersgruppe 6 (+16,4 mm). Die Zunahme zeigte sich kontinuierlich für alle Altersgruppen. Der größte Zuwachs fand zwischen den Altersgruppen 2 und 3 statt (+5,3 mm). Die Mittelwerte der Probandinnen waren in den Altersgruppen 1 und 2 größer als die der Probanden, in den anderen Altersgruppen verhielt es sich umgekehrt (s. Tabelle 43). Anhand der Q-Q-Plots konnte von einer Normalverteilung ausgegangen werden. Der Boxplot zeigt die erhobenen Werte der HKB-Länge in den entsprechenden Altersgruppen (s. Abb. 62).

			HKBLängeSag (mm)					
			ALTERSGRUPPE					
			1	2	3	4	5	6
GESCHLECHT	Gesamt	Mittelwert	27,19	31,18	36,48	40,17	41,18	43,55
		Anzahl	8	9	20	27	40	23
		95,0% Untere KG für Mittelwert	24,49	28,72	35,52	39,24	40,13	41,88

		95,0% Obere KG für Mittelwert	29,89	33,63	37,43	41,09	42,24	45,23
		Maximum	31,90	36,78	40,18	44,15	46,78	49,20
		Minimum	22,72	26,95	31,50	35,28	33,80	34,75
		Standardabweichung	3,23	3,19	2,03	2,34	3,30	3,87
	weiblich	Mittelwert	27,65	31,37	36,17	39,86	39,58	41,25
		Anzahl	5	4	9	17	21	11
		95,0% Untere KG für Mittelwert	22,68	25,40	34,47	38,57	38,22	38,71
		95,0% Obere KG für Mittelwert	32,62	37,34	37,87	41,15	40,94	43,78
		Maximum	31,90	36,78	39,43	43,22	44,15	45,65
		Minimum	22,72	28,62	31,50	35,28	33,80	34,75
		Standardabweichung	4,00	3,75	2,22	2,51	2,99	3,78
		männlich	Mittelwert	26,43	31,03	36,73	40,68	42,96
	Anzahl		3	5	11	10	19	12
	95,0% Untere KG für Mittelwert		21,98	27,15	35,42	39,23	41,65	44,00
	95,0% Obere KG für Mittelwert		30,87	34,90	38,03	42,13	44,26	47,33
	Maximum		28,20	34,43	40,18	44,15	46,78	49,20
	Minimum		24,63	26,95	33,23	37,65	36,60	40,23
	Standardabweichung		1,79	3,12	1,94	2,02	2,71	2,62

**Tabelle 43:** Deskriptive Analyse der HKB-Länge (mm) in der Sagittalebene, Unterscheidung nach Altersgruppe und Geschlecht

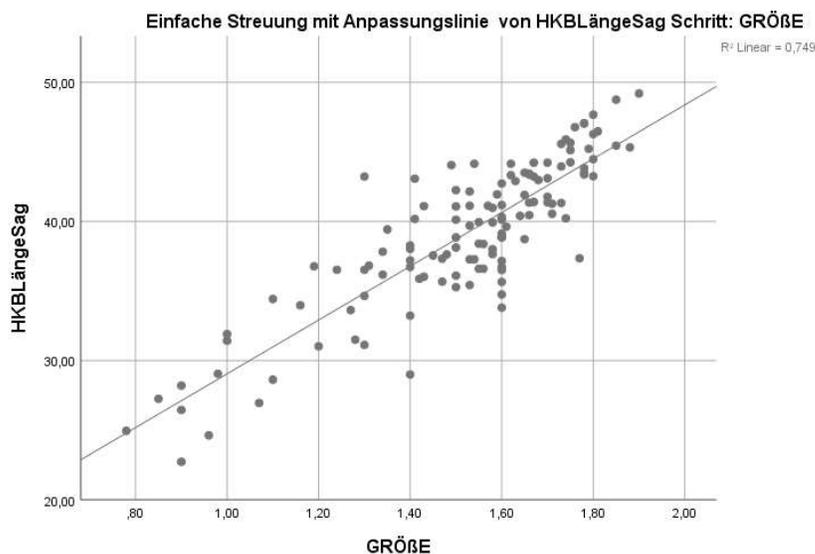


**Abbildung 62:** Boxplot der mittleren HKB-Länge (mm) in der Sagittalebene in der jeweiligen Altersgruppe; Punkt: milder Ausreißer

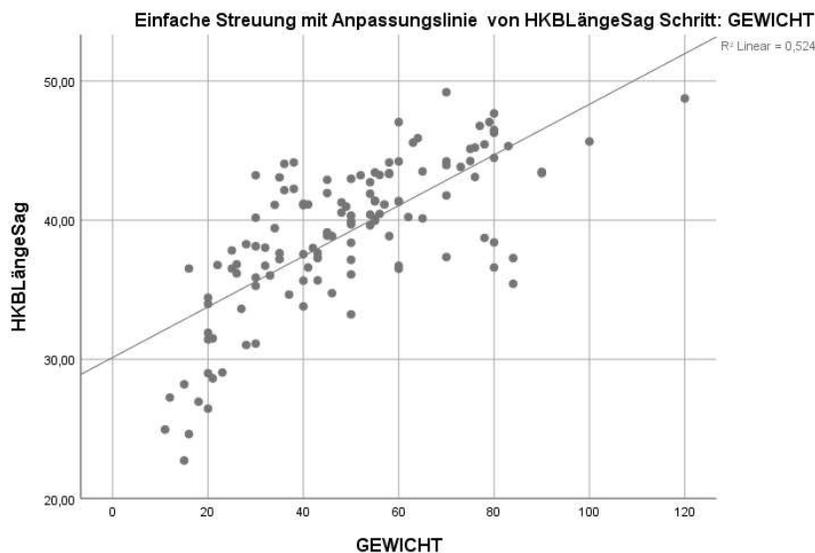
Nach der Pearson-Korrelation der HKB-Länge in der Sagittalebene mit Patient\*innengröße, -gewicht und BMI ergaben sich Korrelationskoeffizienten von 0,866, 0,724 (starke Korrelationen) bzw. 0,31 (schwache Korrelation). Diese Korrelationen waren auf dem 0,01-Niveau signifikant (s. Tabelle 44). Die Korrelationen wurden graphisch dargestellt (s. Abb. 63ff.). Die Gerade stellt die Anpassungslinie der Werte dar.

Korrelationen				
		GRÖßE	GEWICHT	BMI
HKBLängeSag	Korrelation nach Pearson	0,866**	0,724**	0,310**
	Signifikanz (2-seitig)	0,000	0,000	0,000
	N	127	127	127
** Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.				

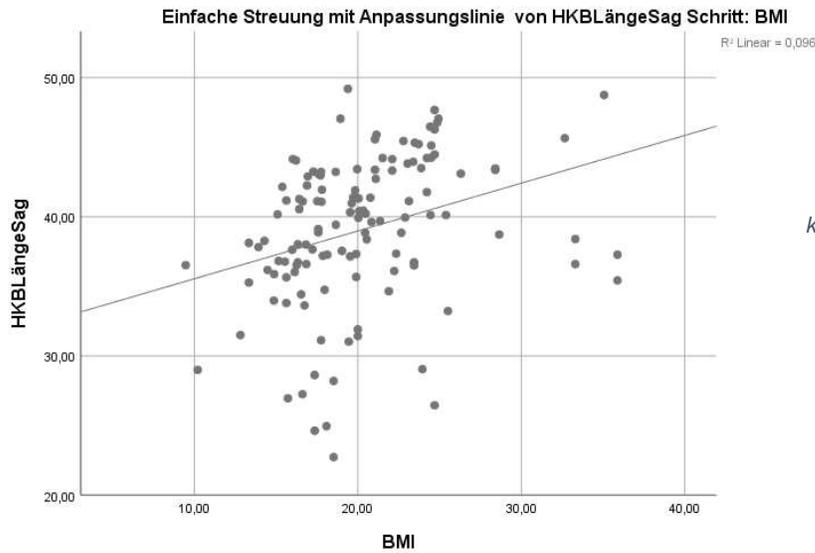
**Tabelle 44:** Pearson-Korrelation der HKB-Länge in der Sagittalebene in Relation zu Größe, Gewicht und BMI



**Abbildung 63:**  
Darstellung der HKB-Länge (mm) mit der korrespondierenden Größe (m)



**Abbildung 64:**  
Darstellung der HKB-Länge (mm) mit dem korrespondierenden Gewicht (kg)



**Abbildung 65:**  
Darstellung der HKB-  
Länge (mm) mit dem  
korrespondierenden BMI  
(kg/m<sup>2</sup>)

Es bestanden signifikante geschlechtsspezifische Unterschiede ab der Altersgruppe 5, wobei die Werte der Probanden signifikant größer waren als die der Probandinnen (s. Tabellen 45f.).

Test bei unabhängigen Stichproben					
	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
				Untere	Obere
HKBLängeSag	0,001	-3,38	0,90	-5,21	-1,54
a. ALTERSGRUPPE = 5					

**Tabelle 45:** t-Test für unabhängige Stichproben, zeigt signifikante geschlechtsspezifische Unterschiede in der Altersgruppe 5

Test bei unabhängigen Stichproben					
	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
				Untere	Obere
HKBLängeSag	0,004	-4,42	1,35	-7,21	-1,62
a. ALTERSGRUPPE = 6					

**Tabelle 46:** t-Test für unabhängige Stichproben, zeigt signifikante geschlechtsspezifische Unterschiede in der Altersgruppe 6

Nach Adjustieren von Körpergröße und -gewicht und dem Durchführen eines erneuten t-Tests für unabhängige Stichproben zeigte sich in Altersgruppe 6 ein signifikanter Unterschied zwischen den Werten der Probandinnen und denen der Probanden (s. Tabelle 47).

Test bei unabhängigen Stichproben					
	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
				Untere	Obere
HKBLängeSag Adjustiert	0,033	0,07	0,03	0,01	0,13
a. ALTERSGRUPPE = 6					

*Tabelle 47: t-Test für unabhängige Stichproben, nach Adjustieren von Körpergröße und -gewicht, zeigt signifikante geschlechtsspezifische Unterschiede in der Altersgruppe 6*

## Femurkondylenbreite in der Sagittalebene (LatFemurkondylenbreite)

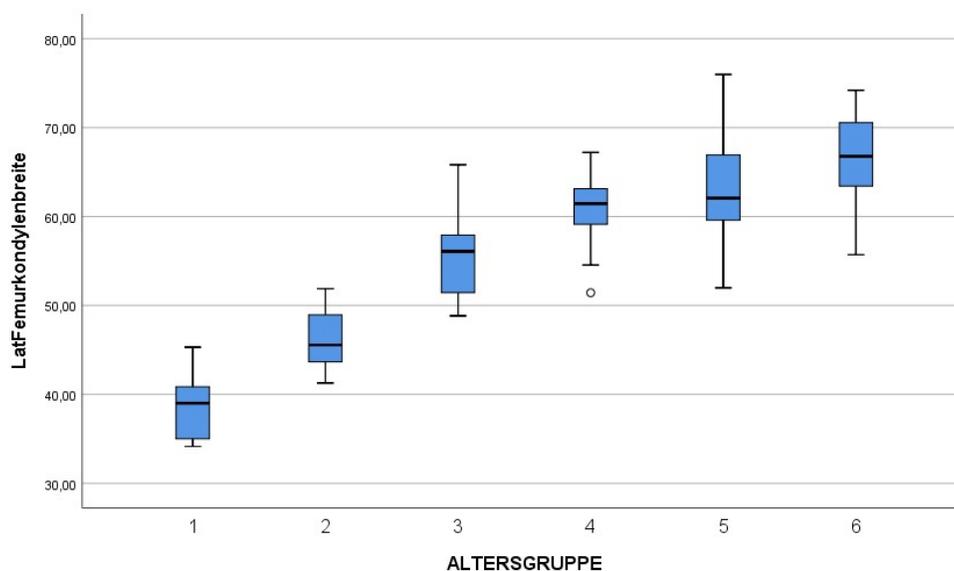
Die Mittelwerte der lateralen Femurkondylenbreite stiegen von der Altersgruppe 1 kontinuierlich bis zur Altersgruppe 6 an. Die Werte erstreckten sich zwischen 38,64 mm und 66,77 mm (+28,13 mm). Der stärkste Zuwachs fand zwischen den Altersgruppen 2 und 3 statt (+9,61 mm). Die Probandinnen haben ab der Altersgruppe 4 durchschnittlich kleinere Werte als die Probanden gezeigt (s. Tabelle 48). Es konnte nach Durchsicht der Q-Q Plots von einer Normalverteilung ausgegangen werden.

Der Boxplot zeigt die erhobenen Werte der lateralen Femurkondylenbreite in den entsprechenden Altersgruppen (s. Abb. 66).

			LatFemurkondylenbreite (mm)					
			ALTERSGRUPPE					
			1	2	3	4	5	6
GESCHLECHT	Gesamt	Mittelwert	38,64	46,00	55,61	60,91	63,51	66,77
		Anzahl	8	9	20	27	40	23
		95,0% Untere KG für Mittelwert	35,45	43,20	53,50	59,44	61,72	64,72
		95,0% Obere KG für Mittelwert	41,84	48,80	57,73	62,37	65,31	68,82
		Maximum	45,30	51,88	65,83	67,20	75,98	74,20
		Minimum	34,15	41,28	48,83	51,43	51,97	55,70
		Standardabweichung	3,82	3,64	4,52	3,71	5,60	4,73
	weiblich	Mittelwert	37,17	47,16	56,72	60,00	60,44	63,68
		Anzahl	5	4	9	17	21	11
		95,0% Untere KG für Mittelwert	32,92	40,02	52,35	58,02	58,90	60,87
		95,0% Obere KG für Mittelwert	41,42	54,30	61,09	61,99	61,97	66,49
		Maximum	41,60	51,88	65,83	67,20	67,43	70,48
		Minimum	34,15	41,28	48,83	51,43	51,97	55,70

		Standardabweichung	3,42	4,49	5,68	3,87	3,38	4,18
	männlich	Mittelwert	41,10	45,08	54,70	62,44	66,92	69,60
		Anzahl	3	5	11	10	19	12
		95,0% Untere KG für Mittelwert	32,06	41,35	52,49	60,28	64,19	67,53
		95,0% Obere KG für Mittelwert	50,14	48,80	56,92	64,60	69,65	71,67
		Maximum	45,30	49,75	59,28	67,13	75,98	74,20
		Minimum	38,95	41,63	50,63	57,65	57,58	63,43
		Standardabweichung	3,64	3,00	3,30	3,02	5,66	3,25

**Tabelle 48:** Deskriptive Analyse der lateralen Femurkondylenbreite (mm) in der Sagittalebene, Unterscheidung nach Altersgruppe und Geschlecht

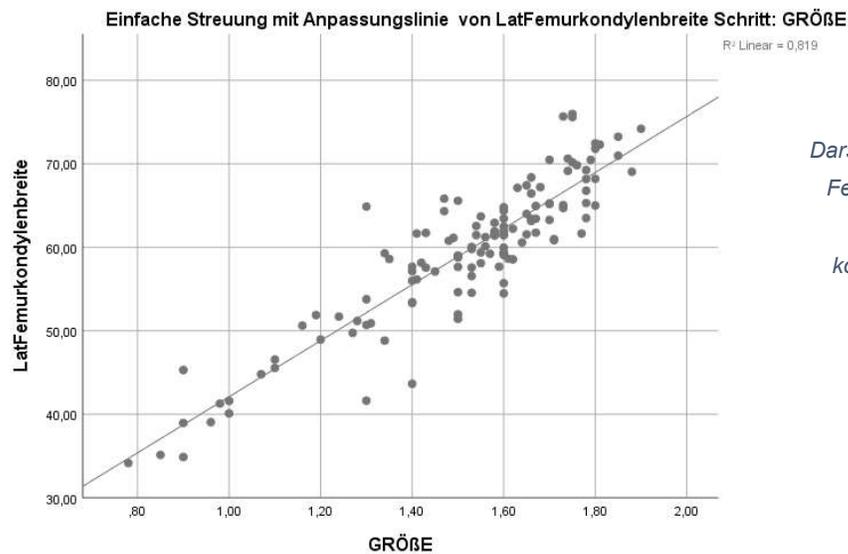


**Abbildung 66:** Boxplot der mittleren lateralen Femurkondylenbreite (mm) in der Sagittalebene in der jeweiligen Altersgruppe; Punkt: milder Ausreißer

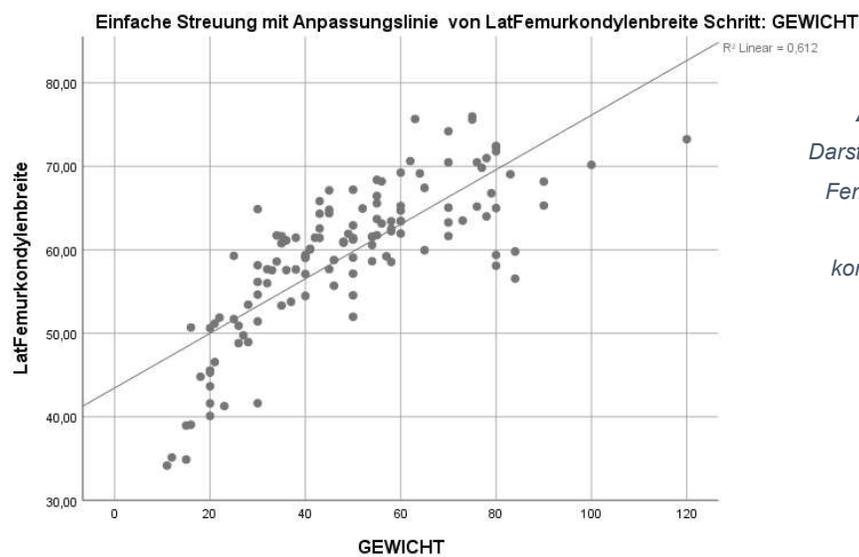
Nach der Pearson-Korrelation der lateralen Femurkondylenbreite mit Patient\*innengröße, -gewicht sowie BMI ergaben sich Koeffizienten von 0,905, 0,783 (sehr starke/starke Korrelationen) bzw. 0,390 (schwache Korrelation). Diese Korrelationen waren auf dem 0,01-Niveau signifikant (s. Tabelle 49). Die Korrelationen wurden graphisch dargestellt (s. Abb. 67ff.). Die Gerade stellt die Anpassungslinie der Werte dar.

Korrelationen				
		GRÖßE	GEWICHT	BMI
LatFemurkondylenbreite	Korrelation nach Pearson	0,905**	0,783**	0,390**
	Signifikanz (2-seitig)	0,000	0,000	0,000
	N	127	127	127
** Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.				

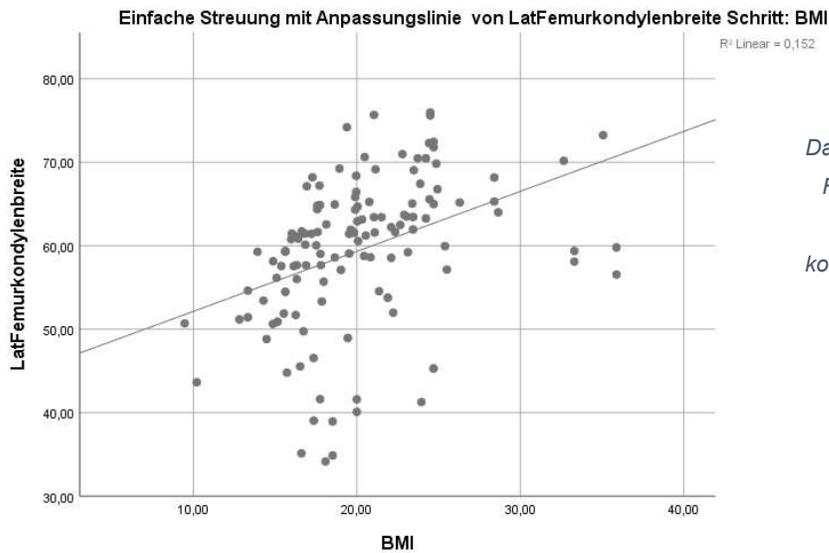
**Tabelle 49:** Pearson-Korrelation der lateralen Femurkondylenbreite in Relation zu Größe, Gewicht und BMI



**Abbildung 67:**  
Darstellung der lateralen Femurkondylenbreite (mm) mit der korrespondierenden Größe (m)



**Abbildung 68:**  
Darstellung der lateralen Femurkondylenbreite (mm) mit dem korrespondierenden Gewicht (kg)



**Abbildung 69:**  
Darstellung der lateralen  
Femurkondylenbreite  
(mm) mit dem  
korrespondierenden BMI  
(kg/m<sup>2</sup>)

Die Messwerte der lateralen Femurkondylenbreite wiesen nach Durchführung des t-Tests für unabhängige Stichproben signifikante geschlechtsspezifische Unterschiede in den Altersgruppen 5 und 6 auf. Hierbei waren die Werte der Probanden signifikant größer als die der Probandinnen (s. Tabelle 50f.).

Test bei unabhängigen Stichproben					
	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
				Untere	Obere
LatFemurkondylenbreite	0,000	-6,48	1,49	-9,54	-3,42
a. ALTERSGRUPPE = 5					

**Tabelle 50:** t-Test für unabhängige Stichproben, zeigt signifikante geschlechtsspezifische Unterschiede in der Altersgruppe 5

Test bei unabhängigen Stichproben					
	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
				Untere	Obere
LatFemurkondylenbreite	0,001	-5,92	1,55	-9,16	-2,69
a. ALTERSGRUPPE = 6					

**Tabelle 51:** t-Test für unabhängige Stichproben, zeigt signifikante geschlechtsspezifische Unterschiede in der Altersgruppe 6

Nach Adjustieren von Körpergröße und -gewicht und dem Durchführen eines erneuten t-Tests für unabhängige Stichproben zeigte sich für die Messwerte in der Altersgruppe 6 ein signifikanter geschlechtsspezifischer Unterschied (s. Tabelle 52).

Test bei unabhängigen Stichproben					
	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
				Untere	Obere
LatFemurkondylenbreite Adjustiert	0,021	0,12	0,05	0,02	0,21
a. ALTERSGRUPPE = 6					

*Tabelle 52: t-Test für unabhängige Stichproben, nach Adjustieren von Körpergröße und -gewicht, zeigt signifikante geschlechtsspezifische Unterschiede in der Altersgruppe 6*

## Index aus lateraler Femurkondylenbreite und HKB-Länge in der Sagittalebene (LatFemkoHKBLsag)

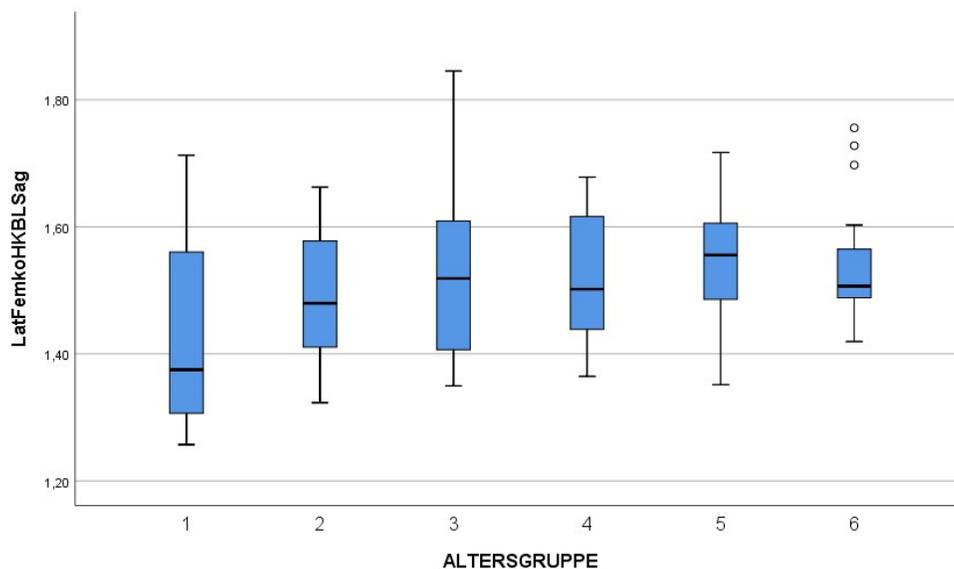
Es zeigte sich der kleinste Mittelwert in der Altersgruppe 1 mit 1,43, welcher über die Altersgruppen hinweg anstieg und ab der Altersgruppe 5 bei 1,54 im Durchschnitt verblieb. Der Maximalwert wurde mit 1,76 bestimmt (Altersgruppe 6), der Minimalwert mit 1,26 (Altersgruppe 1) (s. Tabelle 53). Es konnte nach Durchsicht der Q-Q Plots von einer Normalverteilung ausgegangen werden.

Der Boxplot zeigt die ermittelten Werte des LatFemkoHKBLsag-Index in den entsprechenden Altersgruppen (s. Abb. 70).

		LatFemkoHKBLsag						
		ALTERSGRUPPE						
		1	2	3	4	5	6	
GESCHLECHT	Gesamt	Mittelwert	1,43	1,48	1,53	1,52	1,54	1,54
		Anzahl	8	9	20	27	40	23
		95,0% Untere KG für Mittelwert	1,30	1,39	1,47	1,48	1,52	1,50
		95,0% Obere KG für Mittelwert	1,57	1,58	1,59	1,56	1,57	1,58
		Maximum	1,71	1,66	1,85	1,68	1,72	1,76
		Minimum	1,26	1,32	1,35	1,36	1,35	1,42
		Standardabweichung	0,16	0,12	0,13	0,10	0,09	0,09
	weiblich	Mittelwert	1,35	1,51	1,57	1,51	1,53	1,55
		Anzahl	5	4	9	17	21	11
		95,0% Untere KG für Mittelwert	1,22	1,33	1,46	1,46	1,49	1,48
		95,0% Obere KG für Mittelwert	1,49	1,68	1,69	1,56	1,57	1,62
		Maximum	1,53	1,63	1,85	1,68	1,66	1,73

	männlich	Minimum	1,26	1,41	1,35	1,37	1,35	1,43
		Standardabweichung	0,11	0,11	0,15	0,10	0,08	0,10
		Mittelwert	1,56	1,46	1,49	1,54	1,56	1,53
		Anzahl	3	5	11	10	19	12
		95,0% Untere KG für Mittelwert	1,14	1,29	1,42	1,46	1,51	1,47
		95,0% Obere KG für Mittelwert	1,98	1,63	1,57	1,62	1,61	1,58
		Maximum	1,71	1,66	1,72	1,66	1,72	1,76
		Minimum	1,38	1,32	1,38	1,36	1,37	1,42
		Standardabweichung	0,17	0,14	0,11	0,11	0,10	0,08

**Tabelle 53:** Deskriptive Analyse des Quotienten aus lateraler Femurkondylenbreite und HKB-Länge in der Sagittalebene, Unterscheidung nach Altersgruppe und Geschlecht

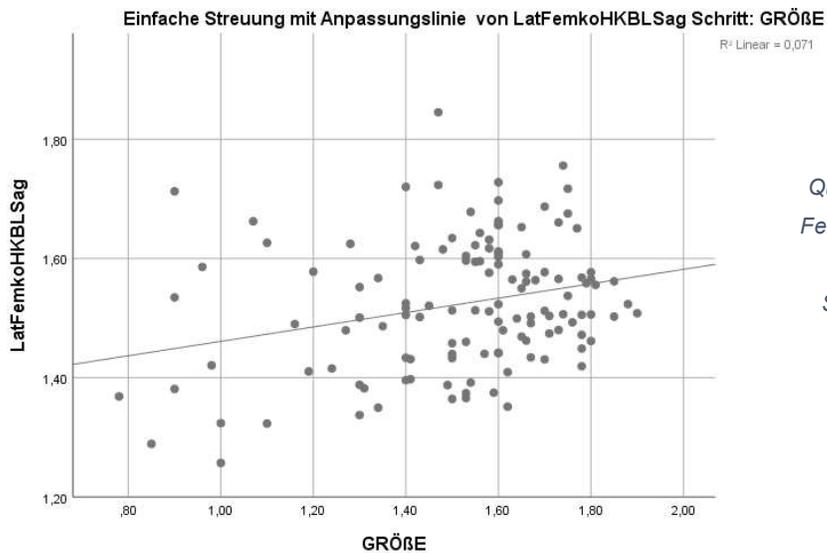


**Abbildung 70:** Boxplot des mittleren Quotienten aus lateraler Femurkondylenbreite und HKB-Länge in der Sagittalebene in der jeweiligen Altersgruppe; Punkte: milde Ausreißer

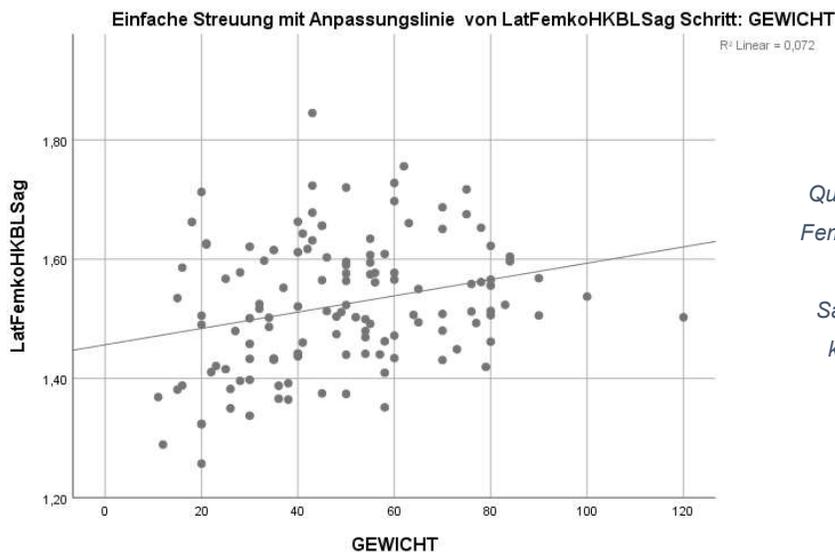
Die Pearson-Korrelation der Messwerte mit Patient\*innengröße, -gewicht sowie BMI zeigte Korrelationskoeffizienten von 0,266, 0,268 bzw. 0,231 (sehr schwache Korrelationen). Die Korrelationen waren auf dem 0,01-Niveau signifikant (s. Tabelle 54). Die Korrelationen wurden graphisch dargestellt (s. Abb. 71ff.). Die Gerade stellt die Anpassungslinie der Werte dar.

Korrelationen				
		GRÖÙE	GEWICHT	BMI
LatFemkoHKBLsag	Korrelation nach Pearson	0,266**	0,268**	0,231**
	Signifikanz (2-seitig)	0,002	0,002	0,009
	N	127	127	127
**. Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.				

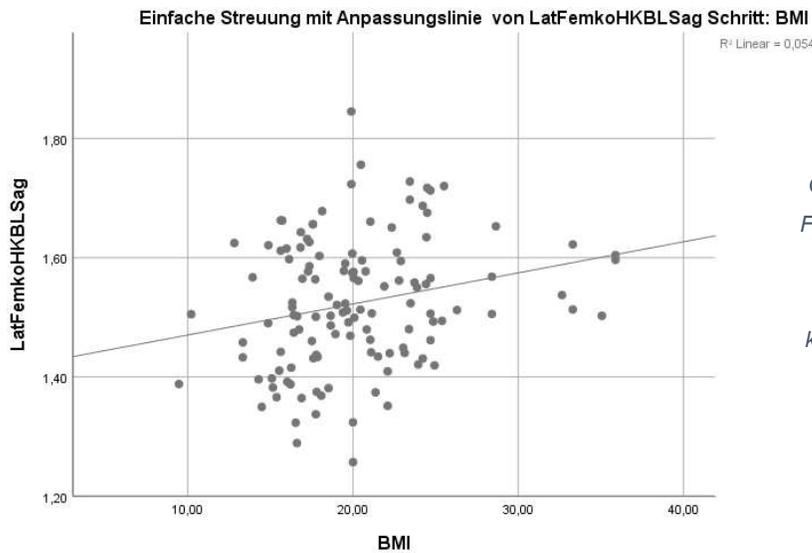
**Tabelle 54:** Pearson-Korrelation des Quotienten aus lateraler Femurkondylenbreite und der HKB-Länge in der Sagittalebene in Relation zu Größe, Gewicht und BMI



**Abbildung 71:**  
Darstellung des Quotienten aus lateraler Femurkondylenbreite und HKB-Länge in der Sagittalebene mit der



**Abbildung 72:**  
Darstellung des Quotienten aus lateraler Femurkondylenbreite und HKB-Länge in der Sagittalebene mit dem korrespondierenden Gewicht (kg)



**Abbildung 73:**  
Darstellung des Quotienten aus lateraler Femurkondylenbreite und HKB-Länge in der Sagittalebene mit dem korrespondierenden BMI (kg/m<sup>2</sup>)

Im t-Test für unabhängige Stichproben zeigte sich kein signifikanter geschlechtsspezifischer Unterschied.

### VKB-Fläche (VKBFläche)

Die Fläche des VKBs zeigte einen Mittelwert von 5,76 mm<sup>2</sup> in der Altersgruppe 1 und nahm kontinuierlich auf einen maximalen Mittelwert von 22,1 mm<sup>2</sup> in der Altersgruppe 6 zu (+16,34 mm<sup>2</sup>). Die größte Zunahme zeigte sich zwischen den Altersgruppen 3 und 4 (+4,57 mm<sup>2</sup>).

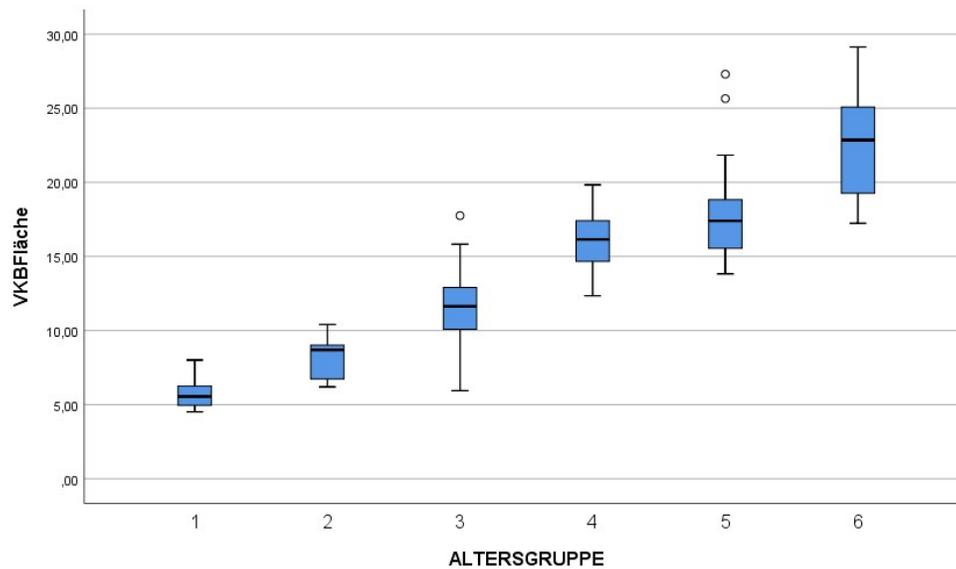
Die Probandinnen zeigten in den Altersgruppen 2 und 3 größere Mittelwerte als die Probanden. In den anderen Altersgruppen waren die Mittelwerte der Probandinnen stets kleiner als die der Probanden (s. Tabelle 55). Anhand der Q-Q-Plots konnte von einer Normalverteilung ausgegangen werden.

Der Boxplot zeigt die erhobenen Werte der VKB-Fläche in den entsprechenden Altersgruppen (s. Abb. 74).

			VKBFläche (mm <sup>2</sup> )					
			ALTERSGRUPPE					
			1	2	3	4	5	6
GESCHLECHT	Gesamt	Mittelwert	5,76	8,20	11,49	16,06	17,74	22,10
		Anzahl	8	9	20	27	40	23
		95,0% Untere KG für Mittelwert	4,82	7,01	10,20	15,29	16,82	20,70
		95,0% Obere KG für Mittelwert	6,70	9,38	12,77	16,84	18,66	23,50
		Maximum	8,01	10,41	17,75	19,83	27,29	29,13

	weiblich	Minimum	4,52	6,19	5,94	12,35	13,82	17,23
		Standardabweichung	1,12	1,54	2,75	1,96	2,89	3,23
		Mittelwert	5,43	9,20	12,53	15,93	16,64	19,56
		Anzahl	5	4	9	17	21	11
		95,0% Untere KG für Mittelwert	4,48	7,06	9,79	14,88	15,78	18,30
		95,0% Obere KG für Mittelwert	6,38	11,33	15,27	16,97	17,50	20,83
		Maximum	6,49	10,41	17,75	19,83	19,86	23,99
		Minimum	4,52	7,38	5,94	12,35	13,82	17,23
	männlich	Standardabweichung	0,76	1,34	3,56	2,03	1,89	1,88
		Mittelwert	6,31	7,40	10,63	16,29	18,95	24,43
		Anzahl	3	5	11	10	19	12
		95,0% Untere KG für Mittelwert	2,38	5,82	9,58	14,93	17,34	22,96
		95,0% Obere KG für Mittelwert	10,24	8,98	11,69	17,65	20,56	25,90
		Maximum	8,01	8,85	13,09	19,83	27,29	29,13
Minimum		4,89	6,19	7,68	13,12	15,07	19,52	
Standardabweichung		1,58	1,27	1,57	1,90	3,34	2,31	

**Tabelle 55:** Deskriptive Analyse der VKB-Fläche (in mm<sup>2</sup>), Unterscheidung nach Altersgruppe und Geschlecht

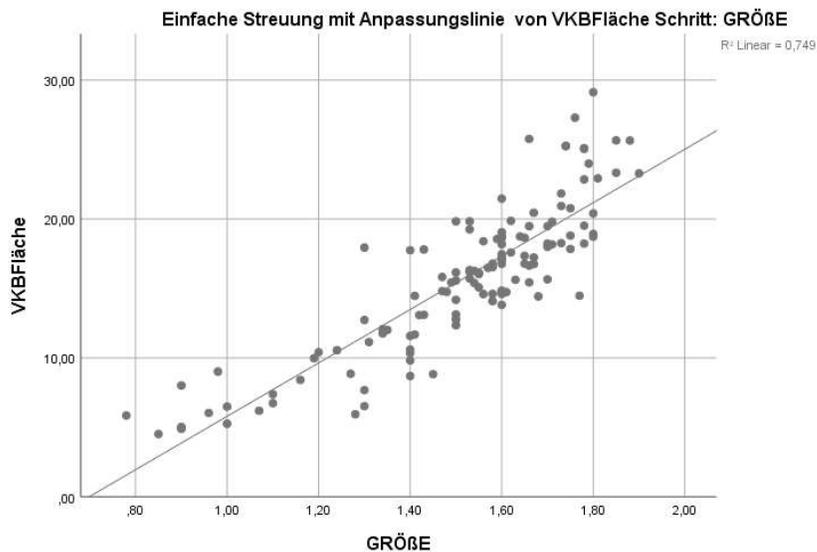


**Abbildung 74:** Boxplot der mittleren VKB-Fläche (in mm<sup>2</sup>) in der jeweiligen Altersgruppe; Punkte: milde Ausreißer

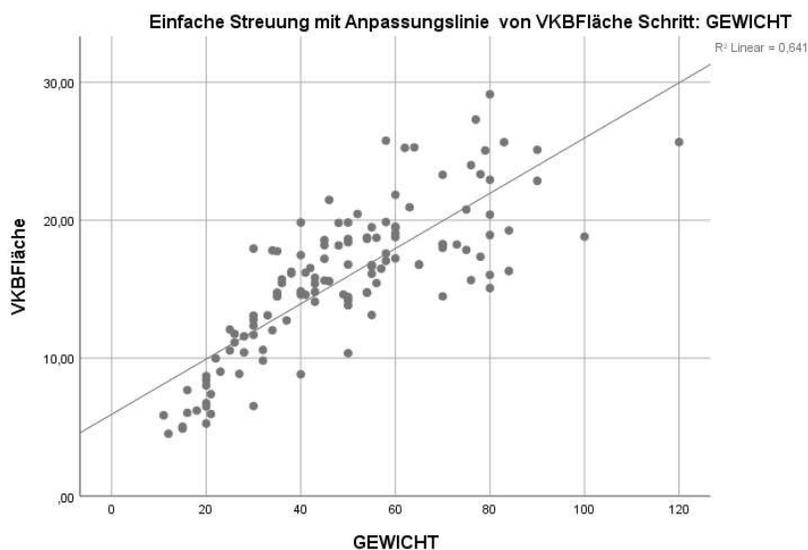
Korrelationen				
		GRÖßE	GEWICHT	BMI
VKBFläche	Korrelation nach Pearson	0,865**	0,801**	0,451**
	Signifikanz (2-seitig)	0,000	0,000	0,000
	N	127	127	127
** Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.				

**Tabelle 56:** Pearson-Korrelation der VKB-Fläche in Relation zu Größe, Gewicht und BMI

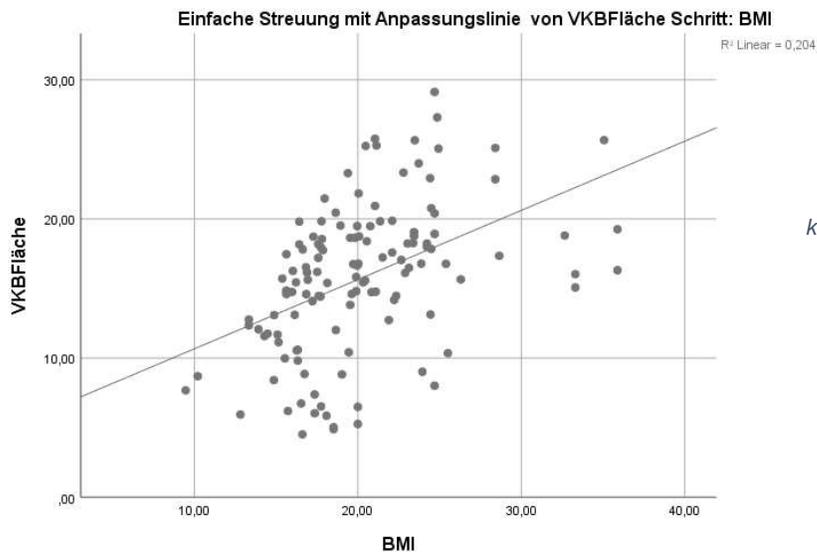
Die VKB-Fläche zeigte in der Korrelation mit Patient\*innengröße, -gewicht und BMI Korrelationskoeffizienten von 0,865, 0,801 bzw. 0,451 entsprechend einer starken Korrelation mit Größe bzw. Gewicht und einer mittelstarken Korrelation mit dem BMI. Die Korrelationen waren auf dem 0,01-Niveau signifikant (s. Tabelle 56). Die Korrelationen wurden graphisch dargestellt (s. Abb. 75ff.). Die Gerade stellt die Anpassungslinie der Werte dar.



**Abbildung 75:**  
Darstellung der VKB-  
Fläche (mm<sup>2</sup>) mit der  
korrespondierenden  
Größe (m)



**Abbildung 76:**  
Darstellung der VKB-  
Fläche (mm<sup>2</sup>) mit dem  
korrespondierenden  
Gewicht (kg)



**Abbildung 77:**  
Darstellung der VKB-  
Fläche (mm<sup>2</sup>) mit dem  
korrespondierenden BMI  
(kg/m<sup>2</sup>)

Der t-Test für unabhängige Stichproben ergab in den Altersgruppen 5 und 6 signifikant größere Werte bei männlichen verglichen mit weiblichen Probanden (s. Tabelle 57f.).

Test bei unabhängigen Stichproben					
	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
				Untere	Obere
VKBFläche	0,010	-2,31	0,85	-4,02	-0,59
a. ALTERSGRUPPE = 5					

**Tabelle 57:** t-Test für unabhängige Stichproben, zeigt signifikante geschlechtsspezifische Unterschiede in der Altersgruppe 5

Test bei unabhängigen Stichproben					
	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
				Untere	Obere
VKBFläche	0,000	-4,86	0,88	-6,7	-3,02
a. ALTERSGRUPPE = 6					

**Tabelle 58:** t-Test für unabhängige Stichproben, zeigt signifikante geschlechtsspezifische Unterschiede in der Altersgruppe 6

Nach Adjustieren von Körpergröße und -gewicht und der Durchführung eines erneuten t-Tests für unabhängige Stichproben konnte kein signifikanter geschlechtsspezifischer Unterschied nachgewiesen werden.

## VKB-Volumen (VKBVolumen)

Die Volumina des VKBs zeigten Werte zwischen 103,73 mm<sup>3</sup> in der Altersgruppe 1 sowie 821,22 mm<sup>3</sup> in der Altersgruppe 6 (+717,49 mm<sup>3</sup>). Diese nahmen von Altersgruppe zu Altersgruppe kontinuierlich zu.

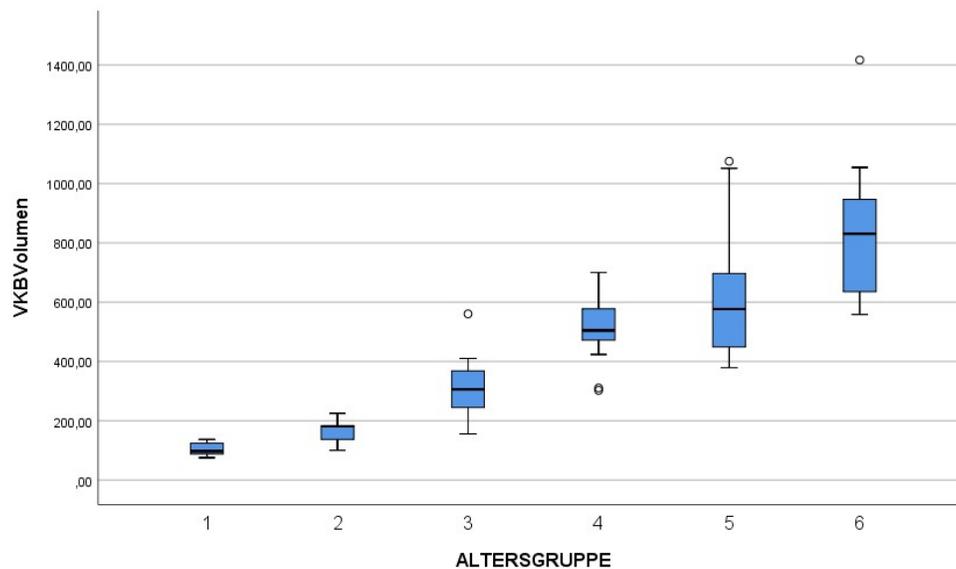
Analog zu der Fläche des VKBs war die größte Wertzunahme zwischen der Altersgruppe 3 und 4 (+213,38 mm<sup>3</sup>) und die Probandinnen besaßen in den Altersgruppen 2 und 3 größere Mittelwerte als die Probanden (s. Tabelle 59). Anhand der Q-Q-Plots konnte von einer Normalverteilung ausgegangen werden.

Der Boxplot zeigt die erhobenen Werte für das VKB-Volumen in den entsprechenden Altersgruppen (s. Abb. 78).

			VKBVolumen (mm <sup>3</sup> )					
			ALTERSGRUPPE					
			1	2	3	4	5	6
GESCHLECHT	Gesamt	Mittelwert	103,73	169,39	305,12	518,50	596,76	821,22
		Anzahl	8	9	20	27	40	23
		95,0% Untere KG für Mittelwert	85,23	135,88	258,68	481,12	542,20	733,32
		95,0% Obere KG für Mittelwert	122,24	202,90	351,57	555,89	651,32	909,12
		Maximum	137,21	224,96	560,53	700,06	1075,35	1417,00
		Minimum	75,09	100,17	155,69	302,56	378,66	558,53
		Standardab weichung	22,13	43,60	99,23	94,50	170,59	203,26
		weiblich	Mittelwert	94,50	201,80	356,95	509,30	534,83
	Anzahl	5	4	9	17	21	11	
	95,0% Untere KG für Mittelwert	70,30	161,92	270,01	455,73	490,04	603,95	
	95,0% Obere KG für Mittelwert	118,70	241,68	443,90	562,86	579,62	747,57	
	Maximum	126,57	224,96	560,53	700,06	751,89	941,63	
	Minimum	75,09	176,86	155,69	302,56	406,65	558,53	
	Standardab weichung	19,49	25,06	113,11	104,19	98,40	106,89	
	männlic h	Mittelwert	119,12	143,46	262,72	534,16	665,21	954,56
Anzahl	3	5	11	10	19	12		

	95,0% Untere KG für Mittelwert	70,28	96,35	219,81	478,43	565,41	841,46
	95,0% Obere KG für Mittelwert	167,96	190,58	305,63	589,88	765,01	1067,66
	Maximum	137,21	183,69	360,53	627,19	1075,35	1417,00
	Minimum	98,19	100,17	165,94	423,40	378,66	679,74
	Standardab weichung	19,66	37,95	63,87	77,90	207,07	178,00

**Tabelle 59:** Deskriptive Analyse des VKB-Volumens (in mm<sup>3</sup>), Unterscheidung nach Altersgruppe und Geschlecht



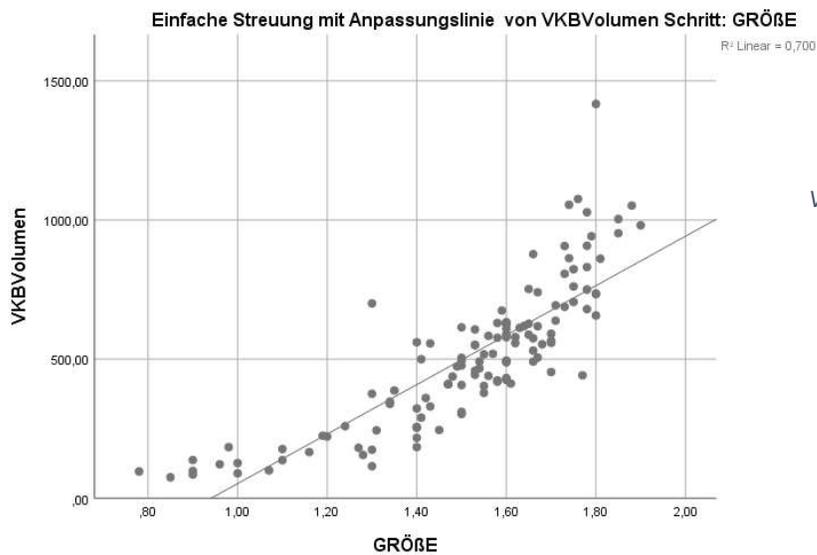
**Abbildung 78:** Boxplot des mittleren VKB-Volumens (in mm<sup>3</sup>) in der jeweiligen Altersgruppe; Punkte: milde Ausreißer

Nach der Pearson-Korrelation mit Patient\*innengröße, -gewicht sowie BMI zeigten sich Korrelationskoeffizienten von 0,837, 0,794 (starke Korrelationen) bzw. 0,443 (schwache Korrelation). Diese Korrelationen waren auf dem 0,01-Niveau signifikant (s. Tabelle 60). Die Korrelationen wurden graphisch dargestellt (s. Abb. 79ff.). Die Gerade stellt die Anpassungslinie der Werte dar.

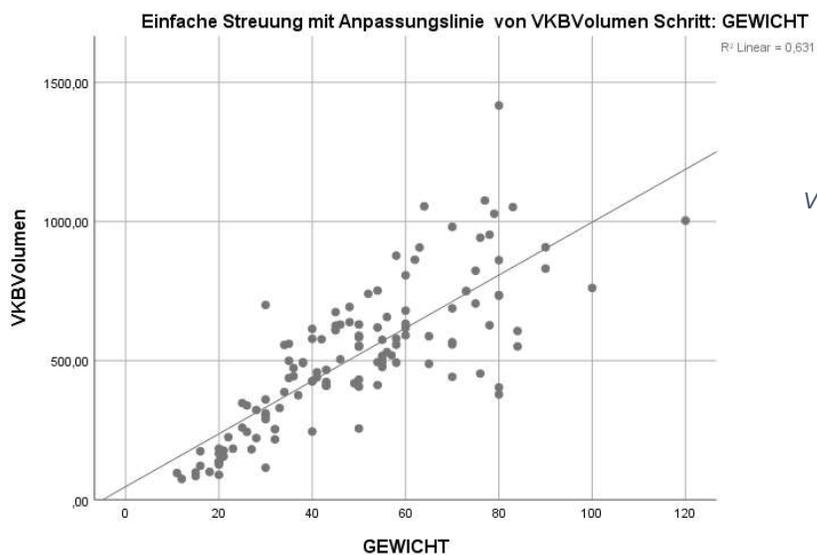
Korrelationen				
		GRÖßE	GEWICHT	BMI
VKBVolumen	Korrelation nach Pearson	0,837**	0,794**	0,443**
	Signifikanz (2-seitig)	0,000	0,000	0,000
	N	127	127	127

\*\* Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

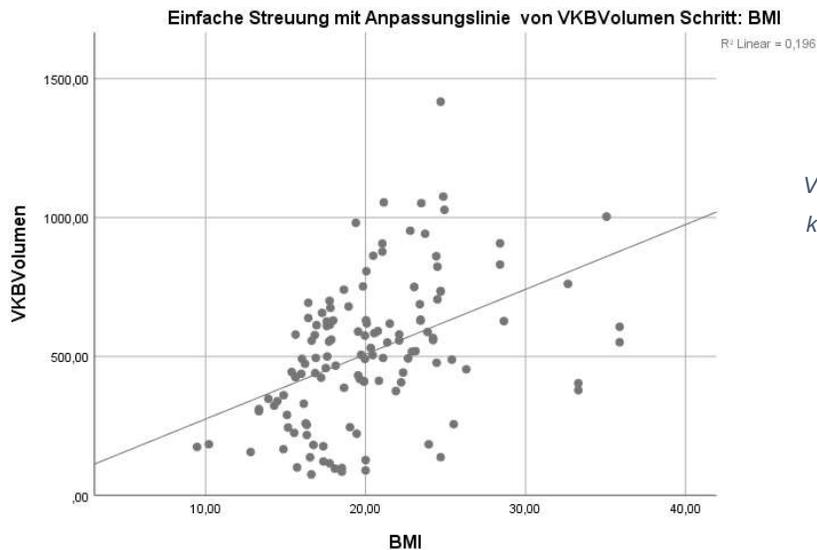
**Tabelle 60:** Pearson-Korrelation des VKB-Volumens in Relation zu Größe, Gewicht und BMI



**Abbildung 79:**  
Darstellung des VKB-Volumens (mm<sup>3</sup>) mit der korrespondierenden Größe (m)



**Abbildung 80:**  
Darstellung des VKB-Volumens (mm<sup>3</sup>) mit dem korrespondierenden Gewicht (kg)



**Abbildung 81:**  
Darstellung des VKB-  
Volumens ( $\text{mm}^3$ ) mit dem  
korrespondierenden BMI  
( $\text{kg}/\text{m}^2$ )

Es konnte für die Ergebnisse in den Altersgruppen 2, 3, 5 und 6 mit dem t-Test ein signifikanter geschlechtsspezifischer Unterschied gezeigt werden. Hierbei zeigten sich die Werte der Probandinnen in den Altersgruppen 2 und 3 signifikant größer als die der Probanden, während in den Altersgruppen 5 und 6 die Werte der Probanden signifikant größer waren als die der Probandinnen (s. Tabellen 61-64).

Test bei unabhängigen Stichproben					
	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
				Untere	Obere
VKBVolumen	0,034	58,34	22,17	5,92	110,75
a. ALTERSGRUPPE = 2					

**Tabelle 61:** t-Test für unabhängige Stichproben, zeigt signifikante geschlechtsspezifische Unterschiede in der Altersgruppe 2

Test bei unabhängigen Stichproben					
	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
				Untere	Obere
VKBVolumen	0,030	94,23	40,08	10,03	178,44
a. ALTERSGRUPPE = 3					

**Tabelle 62:** t-Test für unabhängige Stichproben, zeigt signifikante geschlechtsspezifische Unterschiede in der Altersgruppe 3

Test bei unabhängigen Stichproben					
	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
				Untere	Obere
VKBVolumen	0,019	-130,38	52,13	-237,71	-23,05
a. ALTERSGRUPPE = 5					

**Tabelle 63:** t-Test für unabhängige Stichproben, zeigt signifikante geschlechtsspezifische Unterschiede in der Altersgruppe 5

Test bei unabhängigen Stichproben					
	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
				Untere	Obere
VKBVolumen	0,000	-278,8	61,97	-407,67	-149,94
a. ALTERSGRUPPE = 6					

**Tabelle 64:** t-Test für unabhängige Stichproben, zeigt signifikante geschlechtsspezifische Unterschiede in der Altersgruppe 6

Nach Adjustieren von Körpergröße und -gewicht und der Durchführung eines erneuten t-Tests für unabhängige Stichproben konnte kein signifikanter geschlechtsspezifischer Unterschied nachgewiesen werden.

## Notch-Width-Index (NWI)

Der NWI besaß den größten Mittelwert mit 0,282 in der Altersgruppe 1 und zeigte sich nach einer Abnahme auf 0,247 in der Altersgruppe 2 in den weiteren Altersgruppen weitestgehend konstant mit Werten zwischen 0,245 und 0,247.

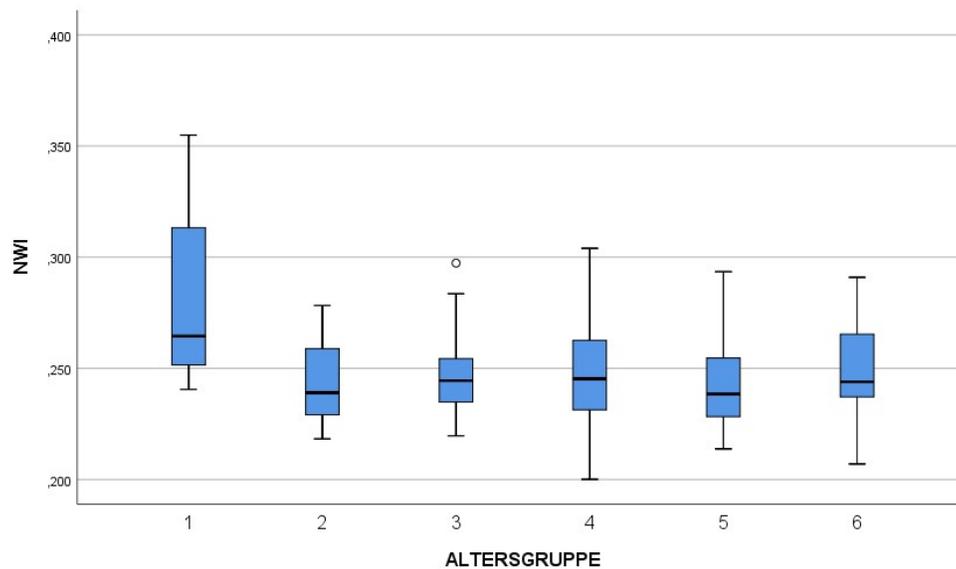
Bei den Probandinnen wurden mit Ausnahme von der Altersgruppe 3 kleinere NWI als bei den Probanden ermittelt (s. Tabelle 65). Die Q-Q-Plots lassen eine Normalverteilung annehmen.

Der Boxplot zeigt die erhobenen Werte für den NWI in den entsprechenden Altersgruppen (s. Abb. 82).

			NWI					
			ALTERSGRUPPE					
			1	2	3	4	5	6
GESCHLECHT	Gesamt	Mittelwert	0,282	0,247	0,247	0,246	0,245	0,247
		Anzahl	8	9	20	27	40	23
		95,0% Untere KG für Mittelwert	0,246	0,230	0,238	0,235	0,238	0,238

		95,0% Obere KG für Mittelwert	0,318	0,263	0,255	0,256	0,251	0,256
		Maximum	0,355	0,278	0,297	0,304	0,293	0,291
		Minimum	0,241	0,218	0,220	0,200	0,214	0,207
		Standardabweichung	0,043	0,022	0,019	0,027	0,021	0,021
	weiblich	Mittelwert	0,279	0,245	0,247	0,239	0,244	0,238
		Anzahl	5	4	9	17	21	11
		95,0% Untere KG für Mittelwert	0,234	0,211	0,233	0,228	0,235	0,228
		95,0% Obere KG für Mittelwert	0,325	0,279	0,262	0,250	0,253	0,249
		Maximum	0,339	0,276	0,284	0,275	0,277	0,271
		Minimum	0,251	0,229	0,220	0,200	0,217	0,216
		Standardabweichung	0,037	0,021	0,019	0,022	0,020	0,016
	männlich	Mittelwert	0,286	0,248	0,246	0,257	0,245	0,255
		Anzahl	3	5	11	10	19	12
		95,0% Untere KG für Mittelwert	0,134	0,218	0,233	0,234	0,235	0,241
		95,0% Obere KG für Mittelwert	0,437	0,278	0,259	0,280	0,256	0,269
		Maximum	0,355	0,278	0,297	0,304	0,293	0,291
		Minimum	0,241	0,218	0,221	0,207	0,214	0,207
		Standardabweichung	0,061	0,024	0,020	0,032	0,022	0,022

**Tabelle 65:** Deskriptive Analyse des berechneten NWI, Unterscheidung nach Altersgruppe und Geschlecht



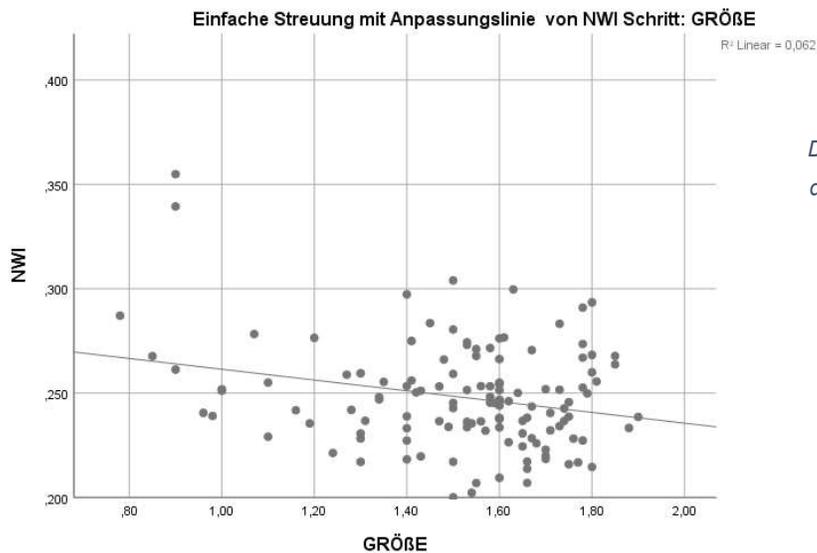
**Abbildung 82:** Boxplot des mittleren NWI in der jeweiligen Altersgruppe; Punkt: milder Ausreißer

Der NWI zeigte in der Pearson-Korrelation schwache, negative Korrelationskoeffizienten von -0,249, -0,86 bzw. 0,084 (keine Korrelation) bei der Korrelation mit Patient\*innengröße, -gewicht und BMI. Die Korrelation mit der Patient\*innengröße zeigte sich auf dem 0,01-Niveau signifikant, die anderen beiden waren nicht signifikant (s. Tabelle 66). Daher erfolgte lediglich die graphische Darstellung der Korrelation mit Patient\*innengröße. Die Gerade stellt die Anpassungslinie der Werte dar.

Korrelationen				
		GRÖßE	GEWICHT	BMI
NWI	Korrelation nach Pearson	-0,249**	-0,086	0,084
	Signifikanz (2-seitig)	0,005	0,337	0,349
	N	127	127	127

\*\* . Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

**Tabelle 66:** Pearson-Korrelation des NWI in Relation zu Größe, Gewicht und BMI



**Abbildung 83:**  
Darstellung des NWI mit der korrespondierenden Körpergröße (m)

Eine signifikante geschlechtsspezifische Differenz der Werte bestand in der Altersgruppe 6, wobei der Wert von den Probanden größer war als der von den Probandinnen (s. Tabelle 67).

Test bei unabhängigen Stichproben					
	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
				Untere	Obere
NWI	0,046	-0,02	0,01	-0,03	-0,001

a. ALTERSGRUPPE = 6

**Tabelle 67:** t-Test für unabhängige Stichproben, zeigt signifikante geschlechtsspezifische Unterschiede in der Altersgruppe 6

Nach Adjustieren von Körpergröße und -gewicht und Durchführung eines erneuten t-Tests für unabhängige Stichproben, wurde ein signifikanter geschlechtsspezifischer Unterschied in der Altersgruppe 6 nachgewiesen (s. Tabelle 68).

	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
				Untere	Obere
NWI Adjustiert	0,015	0,001	0,0002	0,0001	0,001
a. ALTERSGRUPPE = 6					

*Tabelle 68: t-Test für unabhängige Stichproben, nach Adjustieren von Körpergröße und -gewicht, zeigt signifikante geschlechtsspezifische Unterschiede in der Altersgruppe 6*

### VKB-Notch-Index (VKBNotch)

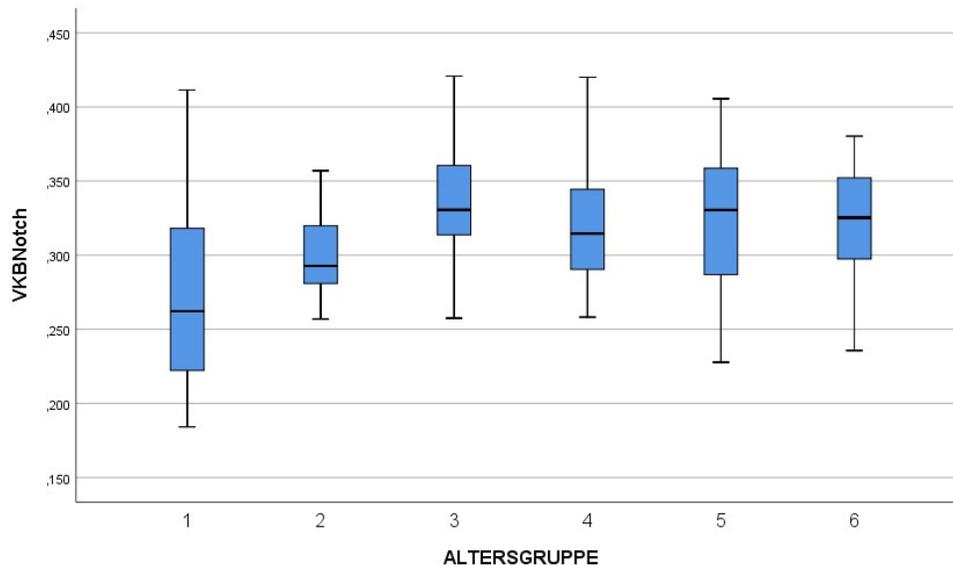
Der Index, welcher aus dem Quotienten von der VKB-Breite zur Notchbreite in der Coronarebene berechnet wurde, zeigte folgende Werte: Der maximale Mittelwert zeigte sich in der Altersgruppe 3, wohingegen in der Altersgruppe 1 der kleinste Mittelwert zu finden war. Die Altersgruppen 4 bis 6 zeigten einen konstant bleibenden Wert von 0,323 bzw. 0,324 (s. Tabelle 69). Anhand der Q-Q-Plots kann von einer Normalverteilung ausgegangen werden.

Der Boxplot zeigt die erhobenen Werte für den VKB-Notch-Index in den entsprechenden Altersgruppen an (S. Abb. 84).

			VKBNotch					
			ALTERSGRUPPE					
			1	2	3	4	5	6
GESCHLECHT	Gesamt	Mittelwert	0,275	0,301	0,335	0,323	0,323	0,324
		Anzahl	8	9	20	27	40	23
		95,0% Untere KG für Mittelwert	0,213	0,277	0,317	0,305	0,308	0,306
		95,0% Obere KG für Mittelwert	0,337	0,326	0,353	0,341	0,338	0,341
		Maximum	0,411	0,357	0,421	0,420	0,406	0,380
		Minimum	0,184	0,257	0,257	0,258	0,228	0,236
		Standardabweichung	0,074	0,031	0,039	0,046	0,047	0,041
	weiblich	Mittelwert	0,296	0,284	0,339	0,327	0,321	0,324
		Anzahl	5	4	9	17	21	11
		95,0% Untere KG für Mittelwert	0,189	0,271	0,301	0,301	0,296	0,295

		95,0% Obere KG für Mittelwert	0,403	0,296	0,376	0,353	0,345	0,352
		Maximum	0,411	0,293	0,421	0,420	0,405	0,378
		Minimum	0,184	0,274	0,257	0,258	0,228	0,236
		Standardabweichung	0,086	0,008	0,049	0,051	0,053	0,042
	männlich	Mittelwert	0,241	0,316	0,333	0,317	0,325	0,324
	männlich	Anzahl	3	5	11	10	19	12
	männlich	95,0% Untere KG für Mittelwert	0,149	0,270	0,312	0,291	0,306	0,298
	männlich	95,0% Obere KG für Mittelwert	0,333	0,361	0,353	0,343	0,344	0,350
	männlich	Maximum	0,267	0,357	0,381	0,389	0,406	0,380
	männlich	Minimum	0,198	0,257	0,278	0,268	0,263	0,264
	männlich	Standardabweichung	0,037	0,037	0,031	0,036	0,040	0,041

**Tabelle 69:** Deskriptive Analyse des VKB-Notch-Index, Unterscheidung nach Altersgruppe und Geschlecht

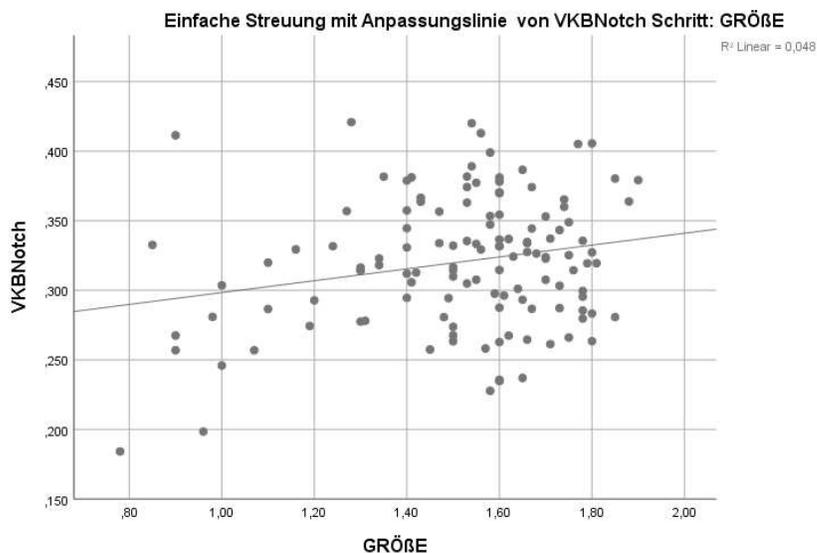


**Abbildung 84:** Boxplot des mittleren VKB-Notch-Index in der jeweiligen Altersgruppe

Die Korrelation nach Pearson des VKB-Notch-Index mit Patient\*innenengröße, -gewicht und BMI lieferte Werte von 0,219 (schwache Korrelation), 0,096 und -0,035 (keine Korrelationen). Die Korrelation mit Patient\*innengröße war auf dem 0,05-Niveau signifikant (s. Tabelle 70). Es wurde lediglich die Korrelation mit Patient\*innengröße graphisch dargestellt (s. Abb. 87). Die Gerade stellt die Anpassungslinie der Werte dar.

Korrelationen				
		GRÖßE	GEWICHT	BMI
VKBNotch	Korrelation nach Pearson	0,219*	0,096	-0,035
	Signifikanz (2-seitig)	0,013	0,284	0,698
	N	127	127	127
* Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant.				

**Tabelle 70:** Pearson-Korrelation des Quotienten aus VKB-Breite und Notchbreite in Relation zu Größe, Gewicht und BMI



**Abbildung 85:**  
Darstellung des VKB-Notch-Index und der korrespondierenden Größe (m)

Der t-Test für unabhängige Stichproben lieferte für die Werte keine signifikanten geschlechtsspezifischen Unterschiede.

### HKB-Notch-Index (HKBNotch)

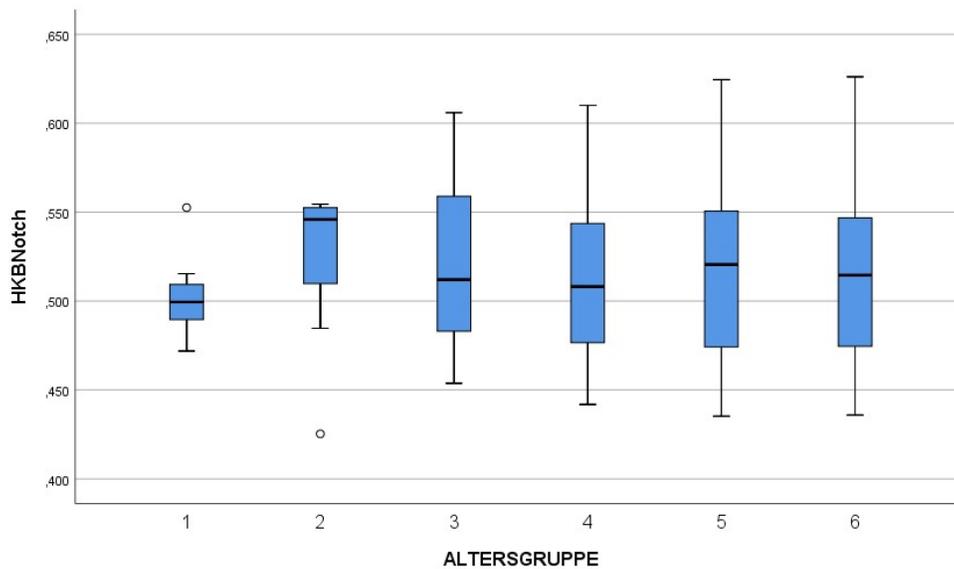
Der HKB-Notch-Index nahm von 0,503 in der Altersgruppe 1 auf 0,523 in der Altersgruppe 2 zu. Danach zeigte sich eine diskrete Abnahme zur Altersgruppe 3. Zwischen den Altersgruppen 4 und 6 undulierte der Index zwischen 0,513 und 0,519 (s. Tabelle 71). Die Q-Q-Plots lassen von einer Normalverteilung ausgehen.

Der Boxplot zeigt die erhobenen Werte des HKB-Notch-Index in den entsprechenden Altersgruppen (s. Abb. 86).

			HKBNotch					
			ALTERSGRUPPE					
			1	2	3	4	5	6
GESCHLECHT	Gesamt	Mittelwert	0,503	0,523	0,521	0,513	0,519	0,515

		Anzahl	8	9	20	27	40	23
		95,0% Untere KG für Mittelwert	0,482	0,489	0,500	0,493	0,503	0,493
		95,0% Obere KG für Mittelwert	0,523	0,557	0,543	0,532	0,535	0,536
		Maximum	0,553	0,554	0,606	0,610	0,624	0,626
		Minimum	0,472	0,425	0,454	0,442	0,435	0,436
		Standardabweichung	0,024	0,044	0,047	0,049	0,049	0,051
	weiblich	Mittelwert	0,496	0,545	0,497	0,512	0,525	0,508
		Anzahl	5	4	9	17	21	11
		95,0% Untere KG für Mittelwert	0,486	0,528	0,478	0,487	0,505	0,474
		95,0% Obere KG für Mittelwert	0,507	0,562	0,515	0,537	0,545	0,542
		Maximum	0,503	0,552	0,538	0,610	0,607	0,626
		Minimum	0,482	0,530	0,467	0,444	0,459	0,436
		Standardabweichung	0,008	0,011	0,024	0,049	0,044	0,051
	männlich	Mittelwert	0,513	0,506	0,541	0,513	0,513	0,521
		Anzahl	3	5	11	10	19	12
		95,0% Untere KG für Mittelwert	0,413	0,439	0,507	0,477	0,486	0,488
		95,0% Obere KG für Mittelwert	0,614	0,572	0,576	0,550	0,540	0,554
		Maximum	0,553	0,554	0,606	0,593	0,624	0,583
		Minimum	0,472	0,425	0,454	0,442	0,435	0,437
		Standardabweichung	0,040	0,054	0,051	0,051	0,056	0,052

**Tabelle 71:** Deskriptive Analyse des HKB-Notch-Index, Unterscheidung nach Altersgruppe und Geschlecht



**Abbildung 86:** Boxplot des mittleren HKB-Notch-Index in der jeweiligen Altersgruppe;  
Punkte: milde Ausreißer

Die Korrelation nach Pearson des HKB-Notch-Index mit Patient\*innengröße, -gewicht und BMI lieferte Koeffizienten von -0,09, 0,044 und 0,087 (keine Korrelationen). Diese Korrelationen waren nicht signifikant (s. Tabelle 72). Auf die graphische Darstellung wurde daher verzichtet.

Korrelationen				
		GRÖßE	GEWICHT	BMI
HKBNotch	Korrelation nach Pearson	-0,009	0,044	0,087
	Signifikanz (2-seitig)	0,924	0,627	0,332
	N	127	127	127

*Tabelle 72: Pearson-Korrelation des HKB-Notch-Index in Relation zur Größe, Gewicht und BMI*

Der t-Test für unabhängige Stichproben zeigte in der Altersgruppe 3 einen signifikanten geschlechtsspezifischen Unterschied, wobei die Werte der Probanden signifikant größer waren als die der Probandinnen (s. Tabelle 73).

Test bei unabhängigen Stichproben					
	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
				Untere	Obere
HKBNotch	0,022	-0,04	0,02	-0,08	-0,01
a. ALTERSGRUPPE = 3					

*Tabelle 73: t-Test für unabhängige Stichproben, zeigt signifikante geschlechtsspezifische Unterschiede in der Altersgruppe 3*

## VKB-Femur-Index (VKBFemur)

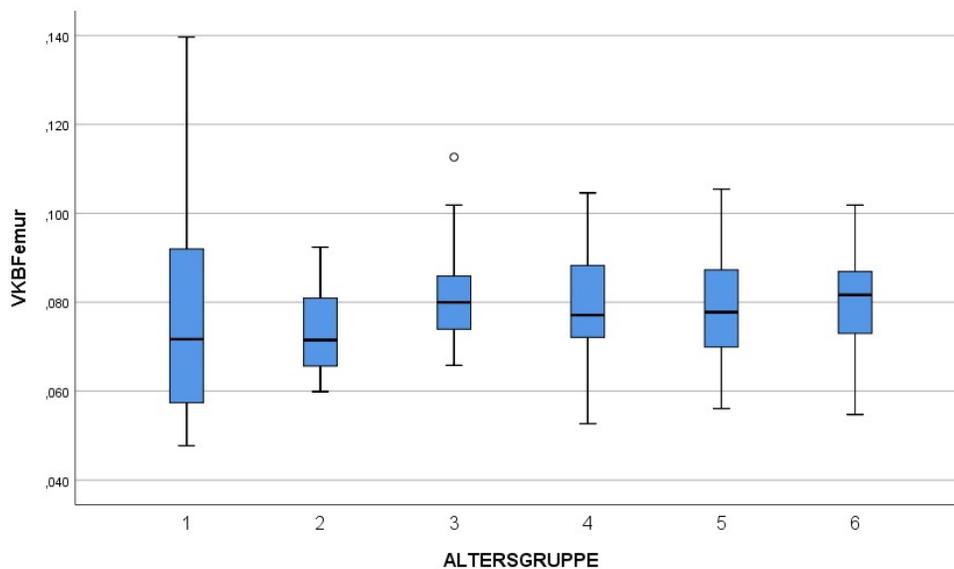
Der Index aus VKB-Breite und bikondylärer Breite zeigte sich weitestgehend konstant mit Werten zwischen 0,73 und 0,83. Dieser ist geschlechterunabhängig über alle Altersgruppen hinweg vergleichbar (s. Tabelle 74). Die Q-Q-Plots lassen von einer Normalverteilung ausgehen.

Der Boxplot zeigt die erhobenen Werte für die entsprechenden Altersgruppen an (s. Abb. 87).

			VKBFemur					
			ALTERSGRUPPE					
			1	2	3	4	5	6
GESCHLECHT	Gesamt	Mittelwert	0,079	0,073	0,083	0,079	0,079	0,080
		Anzahl	8	9	20	27	40	23

		95,0% Untere KG für Mittelwert	0,054	0,065	0,077	0,074	0,075	0,075
		95,0% Obere KG für Mittelwert	0,103	0,081	0,088	0,084	0,083	0,085
		Maximum	0,140	0,092	0,113	0,105	0,105	0,102
		Minimum	0,048	0,060	0,066	0,053	0,056	0,055
		Standardabweichung	0,030	0,010	0,012	0,013	0,013	0,012
	weiblich	Mittelwert	0,084	0,070	0,083	0,078	0,078	0,077
		Anzahl	5	4	9	17	21	11
		95,0% Untere KG für Mittelwert	0,042	0,057	0,075	0,071	0,072	0,069
		95,0% Obere KG für Mittelwert	0,126	0,082	0,092	0,085	0,085	0,086
		Maximum	0,140	0,081	0,102	0,105	0,104	0,101
		Minimum	0,053	0,065	0,067	0,053	0,056	0,057
		Standardabweichung	0,034	0,008	0,011	0,013	0,014	0,012
	männlich	Mittelwert	0,070	0,076	0,082	0,081	0,080	0,083
		Anzahl	3	5	11	10	19	12
		95,0% Untere KG für Mittelwert	0,011	0,060	0,073	0,072	0,074	0,076
		95,0% Obere KG für Mittelwert	0,129	0,091	0,091	0,090	0,086	0,090
		Maximum	0,095	0,092	0,113	0,097	0,105	0,102
		Minimum	0,048	0,060	0,066	0,068	0,057	0,055
		Standardabweichung	0,024	0,012	0,013	0,012	0,013	0,011

**Tabelle 74:** Deskriptive Analyse des VKB-Femur-Index, Unterscheidung nach Altersgruppe und Geschlecht



**Abbildung 87:** Boxplot des mittleren VKB-Femur-Index in der jeweiligen Altersgruppe; Punkt: milder Ausreißer

Die Korrelation nach Pearson des VKB-Femur-Index mit Patient\*innengröße, -gewicht und BMI lieferte Korrelationskoeffizienten von 0,049, 0,039 und 0,026 (keine Korrelation). Diese Korrelationen waren nicht signifikant (s. Tabelle 75). Daher wurde auf die graphische Darstellung der Korrelationen verzichtet.

Korrelationen				
		GRÖßE	GEWICHT	BMI
VKBFemur	Korrelation nach Pearson	0,049	0,039	0,026
	Signifikanz (2-seitig)	0,587	0,663	0,771
	N	127	127	127

*Tabelle 75: Pearson-Korrelation des VKB-Femur-Index in Relation zu Größe, Gewicht und BMI*

Der t-Test für unabhängige Stichproben lieferte keine signifikanten geschlechtsspezifischen Unterschiede.

### HKB-Femur-Index (HKBFemur)

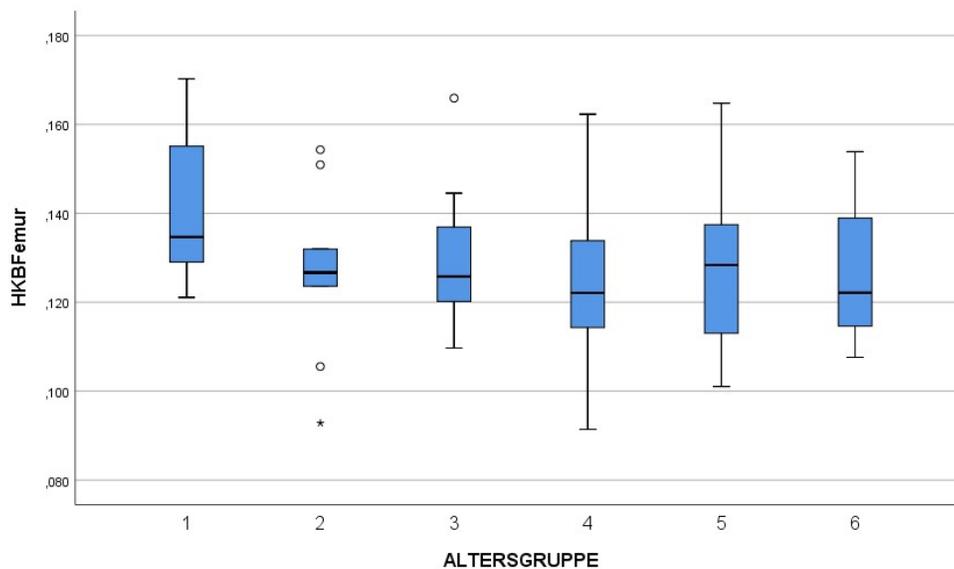
Der Index aus der HKB-Breite und der bikondylären Breite hielt sich weitestgehend konstant auf Werten zwischen 0,126 und 0,128. In der Altersgruppe 1 wurde dieser mit 0,141 etwas höher bestimmt. Die Werte zeigten sich in den Altersgruppen 1, 3, 4 und 6 bei den Probanden diskret erhöht verglichen mit denen der Probandinnen (s. Tabelle 76). Die Q-Q-Plots lassen von einer Normalverteilung ausgehen.

Der Boxplot zeigt die erhobenen Werte für die entsprechenden Altersgruppen an (s. Abb. 88).

			HKBFemur					
			ALTERSGRUPPE					
			1	2	3	4	5	6
GESCHLECHT	Gesamt	Mittelwert	0,141	0,127	0,128	0,126	0,127	0,127
		Anzahl	8	9	20	27	40	23
		95,0% Untere KG für Mittelwert	0,126	0,112	0,122	0,119	0,122	0,121
		95,0% Obere KG für Mittelwert	0,156	0,142	0,135	0,132	0,132	0,133
		Maximum	0,170	0,154	0,166	0,162	0,165	0,154
		Minimum	0,121	0,093	0,110	0,091	0,101	0,108
		Standardabweichung	0,018	0,019	0,014	0,017	0,017	0,015
	weiblich	Mittelwert	0,139	0,134	0,123	0,122	0,128	0,121
		Anzahl	5	4	9	17	21	11
		95,0% Untere KG für Mittelwert	0,115	0,115	0,115	0,115	0,121	0,113

		95,0% Obere KG für Mittelwert	0,163	0,152	0,130	0,129	0,135	0,129
		Maximum	0,170	0,151	0,142	0,162	0,147	0,140
		Minimum	0,121	0,127	0,111	0,108	0,102	0,108
		Standardabweichung	0,019	0,012	0,009	0,014	0,015	0,012
	männlich	Mittelwert	0,145	0,122	0,133	0,132	0,126	0,133
	männlich	Anzahl	3	5	11	10	19	12
	männlich	95,0% Untere KG für Mittelwert	0,097	0,092	0,123	0,117	0,117	0,123
	männlich	95,0% Obere KG für Mittelwert	0,193	0,151	0,143	0,146	0,135	0,143
	männlich	Maximum	0,167	0,154	0,166	0,156	0,165	0,154
	männlich	Minimum	0,133	0,093	0,110	0,091	0,101	0,112
	männlich	Standardabweichung	0,019	0,024	0,015	0,020	0,019	0,015

**Tabelle 76:** Deskriptive Analyse des HKB-Femur-Index, Unterscheidung nach Altersgruppe und Geschlecht



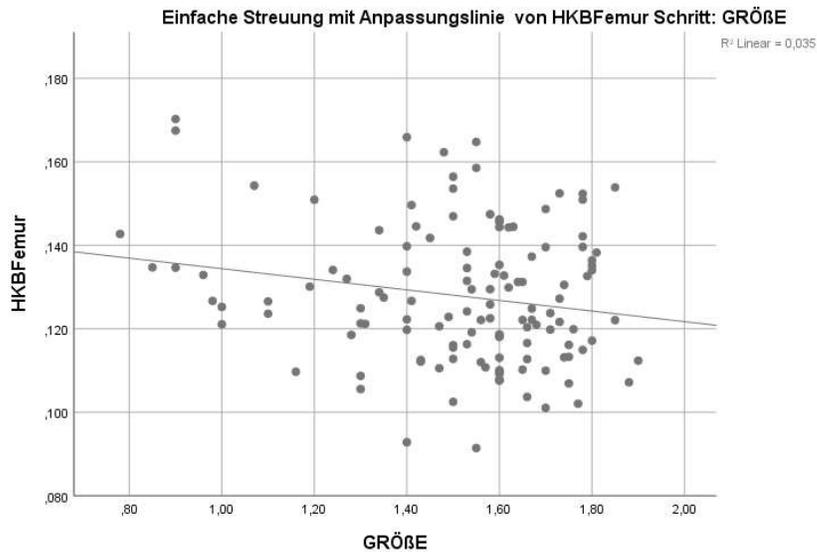
**Abbildung 88:** Boxplot des mittleren HKB-Femur-Index in der jeweiligen Altersgruppe;  
Punkte: milde Ausreißer, Stern: extremer Ausreißer

Die Korrelation nach Pearson des HKB-Femur-Index mit der Größe der Patienten\*innen lieferte einen signifikanten, negativen und schwachen Korrelations-Koeffizienten von  $-0,187$ . Diese Korrelation war auf dem  $0,05$ -Niveau signifikant. Das Patient\*innengewicht und der BMI zeigten in der Korrelation nicht-signifikante Werte von  $-0,025$  bzw.  $0,133$  [Korrelationen nicht

vorhanden (s. Tabelle 77)]. Daher erfolgte lediglich die graphische Darstellung der Korrelation mit der Größe (s. Abb. 89). Die Gerade stellt die Anpassungslinie dar.

Korrelationen				
		GRÖßE	GEWICHT	BMI
HKBFemur	Korrelation nach Pearson	-0,187*	-0,025	0,133
	Signifikanz (2-seitig)	0,036	0,784	0,137
	N	127	127	127
* Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant.				

**Tabelle 77:** Pearson-Korrelation des HKB-Femur-Index in Relation zu Größe, Gewicht und BMI



**Abbildung 89:**  
Darstellung des HKB-Femur-Index mit der korrespondierenden Größe (m)

Es waren keine signifikanten geschlechtsspezifischen Unterschiede in den Messwerten mittels t-Test zu eruieren.

## Normwerttabelle

Abschließend wurde anhand der erhobenen Daten eine Normwerttabelle erarbeitet. Diese ist im Anhang 1 dargestellt.

# Diskussion

## VKB in der Sagittal- und Transversalebene

Die in dieser Studie ermittelten Werte der VKB-Länge bei Kindern decken sich mit den Absolutwerten anderer Studien, welche mittels MRT die VKB-Länge untersucht haben [70]. Die Werte der höheren Altersgruppen (ab Altersgruppe 4) entsprechen den Messwerten der VKB-Länge bei Erwachsenen in anatomischen Studien (31-38 mm) [54,93]. Das Wachstum des VKBs zeigte sich am ausgeprägtesten zwischen den Altersgruppen 2 und 3 bzw. 3 und 4. Es lässt sich in dieser Studie ein Zusammenhang zwischen der VKB-Länge und der Zunahme der Körpergrößen der Proband\*innen erkennen, da das Längenwachstum in diesen Altersgruppen bei den Proband\*innen dieser Studie ebenfalls deutlich zugenommen hat. Während die Körpergröße zunahm und insbesondere eine Gewichtszunahme in den folgenden Altersstufen weiterhin deutlich war, nahm das Wachstum des VKBs in diesen Altersstufen (5 und 6) ab. Die vorliegenden Ergebnisse legen nahe, dass das Hauptwachstum des VKBs zwischen dem 4. und 12. Lebensjahr stattfindet, was sich in den Ergebnissen von Putur et. al widerspiegelt. In deren Studie wurden drei Phasen unterschieden, in denen das durchschnittliche Längenwachstum des VKBs entsprechend bestimmt wurde, wobei das Längenwachstum des VKBs mit zunehmendem Alter abnahm [70]. Passend hierzu zeigt sich, dass das Wachstum des VKBs in der Altersgruppe zwischen 16 und 18 Jahren weitestgehend abgeschlossen ist, da im Vergleich zu vollständig ausgewachsenen Probanden kein relevanter Unterschied in der VKB-Länge mehr besteht.

Die Relation von Körperlängenwachstum und Wachstum des VKBs spiegelt sich in der signifikanten Korrelation zwischen der Probandengröße und der VKB-Länge wider. Auch das Gewicht der Probanden korrelierte stark positiv mit der VKB-Länge. Es konnten in Studien an Kindern und Adoleszenten Zusammenhänge von BMI und Längenwachstum aufgezeigt werden. So hatten durchschnittlich kleinere Kinder auch geringere BMI-Werte, während größere Kinder höhere BMI-Werte hatten [5]. Eine signifikante Korrelation zwischen BMI und Längenwachstum konnte bei Kindern zwischen 1 und 9 Jahren gezeigt werden [83]. So lässt sich die positive, signifikante Korrelation von BMI mit VKB-Länge – und im Folgenden auch mit den anderen untersuchten Strukturen des Kniegelenks – mit der Abhängigkeit des BMI von Körpergröße und Längenwachstum der Kinder begründen.

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass die Probandinnen im jüngeren Alter (Altersgruppen 2-3) bereits durchschnittlich längere VKBs besitzen als die Probanden (2,88 mm bzw. 3,9 mm länger). Ab der Präpubertät allerdings steigen die Werte der Probanden stärker an, sodass mit abgeschlossenem Wachstum die Probanden signifikant größere Werte und somit

durchschnittlich längere VKBs besitzen als die Probandinnen. Diese Ergebnisse zeigen sich vergleichbar mit den Resultaten der Studien von Anderson et al. und Chandrashekar et al. [2,7]. Man erkennt somit, dass das VKB in der Pubertät – ähnlich dem Längen- und Breitenwachstum – bei männlichen Adoleszenten deutlich wächst. Das Wachstum des VKBs in weiblichen Adoleszenten hingegen zeigt sich weniger ausgeprägt.

Die Breite des VKBs in der Sagittalebene zeigte eine ähnliche Größenzunahme wie die VKB-Länge und hatte die größte Zunahme zwischen den Altersgruppen 2 und 3 sowie 3 und 4. Ähnlich der VKB-Länge stabilisierte sich dieser Anstieg in den älteren Altersgruppen mit der Abnahme des Längenwachstums. Auch in diesem Fall zeigten sich signifikante Korrelationen mit Größe, Gewicht und BMI, analog zum Längenwachstum vom VKB.

In der Altersgruppe 6 zeigten sich, verglichen mit den Ergebnissen aus der Studie von Anderson et al. mit Probanden ähnlichen Alters, trotz vergleichbarer Messmethodik, Abweichungen der Messwerte im Durchschnitt um ca. 2 mm, bei den Probandinnen um ca. 1,5 mm und bei den Probanden um 2,3 mm, wobei Anderson et al. im Durchschnitt größere Werte aufzeigten [2]. Dies hat Auswirkungen auf die berechnete VKB-Fläche und das VKB-Volumen (s.u.). Die Abweichungen sind am ehesten durch die Unterschiede in der Patient\*innenselektion, sowie die Über- bzw. Unterschätzung der wahren Strukturgröße in der durchgeführten Bildgebung entstanden. In der vorliegenden Studie wurden retrospektiv vorhandene MRT-Datensätze analysiert. Angaben über den Aktivitätsgrad der Probanden zum Zeitpunkt der MRT-Untersuchung lagen nicht vor. Anderson et al. untersuchten in ihrer Studie High School Athleten, die aktiv Basketball spielten und einer festgelegten Altersgruppe angehörten [2]. Da die Studie von Anderson et al. an gesunden High School Athleten durchgeführt wurde, könnte hier einer der Gründe für den Unterschied der Messergebnisse liegen. Myrick et al. konnten nachweisen, dass sportlich aktive Menschen, insbesondere nach einer Phase intensiven Trainings, über längere Zeit größere Volumina des VKBs zeigen als sportlich inaktive Menschen [61]. In ihrer Studie wurde das VKB-Volumen ebenfalls mittels MRT-Diagnostik ermittelt, allerdings wurde für die Messungen und Volumenbestimmung eine Software (Medical Image Processing, Analysis and Visualization, MIPAV) genutzt. Für unsere Studie konnte aufgrund des retrospektiven Studiendesigns die Patientenselektion nicht geplant und somit keine Aussage über den sportlichen bzw. körperlichen Aktivitätsgrad gemacht werden. Es erscheint naheliegend, dass dies eine Auswirkung auf die erhobenen Daten hat. Des Weiteren ermöglicht die Anwendung einer speziellen Software wie MIPAV eine präzisere Bestimmung des VKB-Volumens.

Eine Überschätzung der Größe der Strukturen in der Studie von Anderson et al. kann unabhängig davon auf eine geringere Auflösung und weniger deutliche Abgrenzbarkeit des

VKBs von seinem Synovialschlauch in der genutzten MRT-Diagnostik (vor dem Jahre 2001) zurückzuführen sein. Wenngleich die höhere Auflösung eine genauere Abgrenzung der Strukturen voneinander vereinfacht, ist hier jedoch eine Unterschätzung bei den Messungen in der vorliegenden Studie möglich.

Die Probandinnen zeigten in unserer Studie größere Werte in den Altersgruppen 2 und 3, was ähnlich der VKB-Länge für ein ausgeprägteres Wachstum des VKBs in Probandinnen jüngerer Alters spricht. Ab der Altersgruppe 5 zeigten die Probanden größere Werte, wobei diese in der Altersgruppe 5 auch signifikant waren.

Die Ausdehnung des VKBs in der Transversalebene korrespondiert ebenfalls mit o.g. Parametern (VKBLängeSag und VKBapBreite) und nahm am stärksten zwischen den Altersgruppen 3 und 4 zu. Auch hier ist zu erkennen, dass bei den Probandinnen in den Altersgruppen 2 und 3 größere Werte ermittelt wurden, wobei die Probanden mit zunehmendem Alter zunehmend größere Werte zeigten. Verglichen mit den von Anderson et al. erhobenen Werten zeigen sich in dieser Studie für diese Messung in der Altersgruppe 6 kleinere Werte, von im Durchschnitt ca. 0,7 mm, wobei Differenzen von 0,6 mm bei den Probandinnen und von 0,75 mm bei den Probanden zu verzeichnen sind [2].

Die Korrelationen mit Patientengröße, -gewicht und BMI waren bei allen Parametern (VKBLängeSag, VKBapBreite, VKBmlBreite) signifikant und weisen somit daraufhin, dass das körperliche Wachstum, insbesondere in der präpubertären Phase, sich deutlich auf die Dimension des VKBs auswirkt. Hierbei stellt sich die Frage, ob diese Phase eine besonders vulnerable Situation für die ligamentären Kniestrukturen darstellt, obgleich die Analyse der Ätiologie von Bandverletzungen in diesem Alter von vielen Faktoren abhängt, wie beispielsweise der sportlichen Aktivität, dem Leistungsanspruch und der praktizierten Sportart. Allerdings scheint es von Interesse zu sein, weitere Untersuchungen auf diesem Gebiet durchzuführen, da Shaw et al. für Patienten zwischen 10 und 14 Jahren – also eben denen, die den Altersgruppen 3 und 4 dieser Studie entsprechen – einen ausgeprägten Anstieg an VKB-Verletzungen in den letzten Jahren feststellen konnten [79]. Außerdem lassen die geschlechtsspezifischen Unterschiede im Wachstumsverhalten vermuten, dass sich hieraus die größere Verletzungsrate des VKBs in weiblichen Adoleszenten mitbegründet [38,52].

## Anstiegswinkel des VKBs und der interkondylären Notch

### *VKB-Anstiegswinkel in der Sagittalen*

Kim et al. ermittelten in ihrer Studie Werte von  $53,2 \pm 6,2^\circ$  in Kindern und Jugendlichen mit offenen Wachstumsfugen, während ausgewachsene Probanden mit geschlossenen Wachstumsfugen Werte von  $58,8 \pm 4,9^\circ$  aufwiesen [41]. Dies deckt sich mit den ermittelten Werten in dieser Studie insofern, als die Werte für die VKB-Anstiegswinkel über die Altersgruppen hinweg eine weitestgehend stetige Zunahme aufwiesen. Die Ergebnisse von Lima et al. decken sich noch eindeutiger mit denen aus dieser Studie (Mittelwert von  $51,9^\circ$ ) [51]. Die Probandinnen wiesen in den Altersgruppen 1 bis 5 größere Werte auf als die Probanden, ähnlich den Ergebnissen beider o.g. Studien, die in allen Altersgruppen ebenfalls größere Werte bei den Versuchsteilnehmerinnen erhoben haben [41,51]. Im Konsens mit der Studienlage zeigten sich jedoch für die erhobenen Parameter keine signifikanten geschlechtsspezifischen Unterschiede [11,73]. In der Studie von Saxena et al. wurden anhand anatomischer Präparate Unterschiede in der Morphologie der Kreuzbänder in gesunden und pathologischen Kniegelenken untersucht. Hierbei fielen bei Probanden mit einem vorherigen Trauma des VKBs deutlich geringere Anstiegswinkel auf [78]. Die Werte dieser Studie nahmen zwischen den Altersgruppen 1 und 4 stetig und stark zu, mit dem maximalen Anstieg zwischen den Altersgruppen 3 und 4. Dies entsprach dem Verhalten des Längenwachstums des VKBs. Die Zunahme des Winkels korrelierte mit Patientengröße, -gewicht und BMI signifikant. Da sowohl VKB-Länge und -breite als auch der Anstiegswinkel des VKBs in den Altersgruppen 3 und 4 am stärksten zunehmen, lassen sich analoge Wachstumsmuster sowohl in der Ausdehnung als auch im Anstiegswinkel des VKBs erkennen. In Anlehnung an die Studie von Saxena et al. ist somit davon auszugehen, dass auch bei nicht ausgewachsenen Patient\*innen ein verringerter Anstiegswinkel des VKBs auf eine Schädigung des VKBs bzw. auf ein erhöhtes Risiko für eine Schädigung des VKBs hinweist [78].

### *Anstiegswinkel der interkondylären Notch*

In anderen Studien wurde der Anstiegswinkel der interkondylären Notch bei erwachsenen Probanden im Mittel auf Werte von  $36,29^\circ$  festgelegt [71]. Die Ergebnisse dieser Studie zeigten im Durchschnitt etwas größere Werte und entsprachen denen von Lima et al. und Kim et al., welche in ihren Studien insbesondere die pädiatrische Population untersucht haben [41,51]. Die Entwicklung dieser Werte zeigte sich diskontinuierlich, wobei dies mit der geringeren Fallzahl in den Altersgruppen 1 und 2 zusammenhängen könnte. Über alle Altersgruppen hinweg zeigte sich eine Abnahme der Anstiegswinkel und somit eine zunehmende Steilheit der interkondylären Notch. Analog zu den Ergebnissen von Lima et al. und Kim et al. kann hier von einer progredienten „Vertikalisierung“ der interkondylären Notch gesprochen werden [41,51].

Verschiedene Studien konnten zeigen, dass größere Anstiegswinkel der Notch und somit eine geringere Steilheit des VKB-Anstiegs mit einer erhöhten Verletzungsanfälligkeit des VKBs einhergehen [26,39]. Die vergleichsweise größeren Werte in der Altersgruppe 3 könnten somit ein Faktor für ein erhöhtes Verletzungsrisiko in dieser Altersgruppe darstellen.

Mit Ausnahme von der Altersgruppe 1 sind in allen anderen Altersgruppen die Werte der Probandinnen kleiner als die der Probanden, mit signifikant größeren Werten in der Altersgruppe 3. Dass die Probanden größere Werte für den interkondylären Notchwinkel aufzeigen als die Probandinnen, wurde ebenfalls von Lima et al. und Kim et al. erkannt [41,51]. Dies ist von Interesse, da eine steilere Notch – dargestellt durch geringere Notch Anstiegswinkel – häufiger in Probanden\*innen mit VKB-Ruptur gesehen werden, während flachere Notches – dargestellt durch größere Notch Anstiegswinkel – gehäuft bei Verletzungen der Eminentia intercondylaris beobachtet worden sind [76].

Eine signifikante Korrelation mit Patientengröße, -gewicht bzw. BMI besteht nicht, somit ist letztlich das Alter und damit auch die Reifung des Bewegungsapparates, sprich die Entwicklung der Form und Morphologie der interkondylären Notch im Rahmen der Pubertät, ausschlaggebend. Zusätzlich spielen hier auch hormonelle Einflüsse und die Auswirkung von körperlicher Aktivität eine Rolle [31].

#### *Anstiegswinkel des VKBs in der Coronarebene*

Die in dieser Studie ermittelten Ergebnisse für den Anstiegswinkel des VKBs in der Coronarebene zeigten eine vergleichbare Entwicklung über die Altersstufen hinweg, wie sie Kim et al. nachweisen konnten [38]. Jedoch waren in dieser Studie die Werte der Probanden größer als die der Probandinnen, wobei diese Unterschiede – wie auch in anderen Studien [11,41] – nicht signifikant waren. Die Zunahme um circa 20° vom Säuglings- bis ins Erwachsenenalter in dieser Studie entspricht den Ergebnissen anderer Studien [41,73]. Die Zunahme der Werte war am ausgeprägtesten zwischen den Altersgruppen 1 und 2 zu erkennen. Sowohl in dieser als auch in anderen Studien wurden keine signifikanten, geschlechterspezifischen Unterschiede festgestellt [73]. Andere Studien haben festgestellt, dass geringere Anstiegswinkel des VKBs zwar keine signifikante Korrelation mit einer höheren Verletzungsrate des VKBs haben, wohl aber mit Verletzungen von HKB und Menisken haben können [78]. Mit Ausnahme der Messwerte von den Probanden in den Altersgruppen 4 und 5 war eine stetige Wertzunahme zu sehen. Die Korrelationen mit Patientengröße, -gewicht und BMI waren signifikant.

Zusammenfassend lässt sich im Konsens mit der Studienlage erkennen, dass mit zunehmendem Alter der Anstiegswinkel des VKBs ebenfalls zunimmt und mit einer progredient steiler werdenden Notch einhergeht. Gesunde VKBs scheinen in Knieextension,

wie bei Erwachsenen, auch in älteren Adoleszenten größere Anstiegswinkel zu haben. Gentili et al. und Saxena et al. konnten in ihren Studien nachweisen, dass geringere VKB-Anstiegswinkel im Vergleich zur Altersnorm für eine Ruptur oder Pathologie des VKBs bei Erwachsenen sprechen [29,78]. Nach den Erkenntnissen dieser Studie kann postuliert werden, dass das VKB eines jungen Kindes in der Entwicklung im unreifen, physiologischen Zustand im Vergleich zu einem Erwachsenen geringere Anstiegswinkel besitzt, welche mit zunehmendem Alter deutlich an Größe zunehmen. Hierbei stellt sich die Frage, ob diese geringeren Anstiegswinkel, ähnlich wie bei Studien an erwachsenen Probanden, auch für eine erhöhte Verletzungsanfälligkeit sprechen. Es bleibt Gegenstand aktueller Forschung zu untersuchen, ob dies Rückschlüsse auf die Inzidenz von VKB-Verletzungen in Kindern und Adoleszenten über verschiedene Altersgruppen hinweg zulässt, wobei entsprechend Kofaktoren berücksichtigt werden müssten um allgemein gültige Aussagen diesbezüglich treffen zu können.

Die erhobenen Daten sind außerdem von Interesse, wenn es um den operativen Ersatz des VKBs und die Anlage der Bohrkanäle, die die intraartikuläre Verlaufsrichtung des Kreuzbandtransplantates bestimmen, in Kniegelenken von jungen Patient\*innen geht. Da die geschlechtsspezifischen Unterschiede der Ergebnisse nur mit einer Ausnahme nicht signifikant waren, scheint es möglich, bei der Entscheidung an welcher Stelle und in welchem Winkel der femorale und tibiale Bohrkanaal angelegt werden soll, das Geschlecht außer Acht lassen zu können. Im Gegensatz hierzu, sollte insbesondere auf Patientengröße und -gewicht sowie das Alter geachtet werden. Entsprechend zeigte die Korrelation von Patientengröße und -gewicht sowie BMI mit den VKB-Anstiegswinkeln signifikante Ergebnisse. Die Anlage des femoralen und tibialen Bohrkanaals und das Einbringen eines VKB-Ersatzes in einem vergleichsweise geringen Anstiegswinkel bergen entsprechend das erhöhte Risiko einer Re-Ruptur bzw. einer Insuffizienz der VKB-Plastik. Dies wurde durch eine systematische Übersichtsarbeit von Fabricant et al. bestätigt, in der von einer Re-Rupturrate von VKB-Plastiken in Adoleszenten von bis zu 60% gesprochen wird [24]. Wobei hier keine Aussage bezüglich der Genese der Re-Ruptur gemacht werden kann.

## Bikondyläre Breite, Notchbreite und Breite von VKB und HKB in der Coronarebene

### *Bikondyläre Breite*

Für die bikondyläre Breite von erwachsenen Probanden wurden nach identischem Messverfahren in anderen Studien bei Probandinnen Werte von  $68,7 \pm 3,3$  mm, bei Probanden Werte von  $78,7 \pm 4,8$  mm und im Durchschnitt Werte von  $74 \pm 6,5$  mm ermittelt [16]. Dies entspricht den Ergebnissen, welche in dieser Studie in der Altersgruppe 6 erhoben

wurden. Trotz der Anwendung eines Messverfahrens in der Transversalebene, erhoben Anderson et al. in ihrer Studie bei 16 bis 18-jährigen Proband\*innen vergleichbare Werte für die bikondyläre Breite (67,8 mm bei weiblichen; 76 mm bei männlichen Probanden) [2]. Die Entwicklung der bikondylären Breite zeigte sich progredient mit zunehmendem Patientenalter, wobei ein Wachstumsschub zwischen den Altersgruppen 1 und 2 sowie 2 und 3 zu verzeichnen war. Dies entspricht weitestgehend der Phase, in der Säuglinge bzw. Kleinkinder zu Schulkindern werden und häufig auch im Längenwachstum eine deutliche Zunahme besteht. Insbesondere bei Probanden dieser Studie nahm das Längenwachstum in diesen Gruppen am deutlichsten zu. Im Vergleich zur Gewichtszunahme, welche in späteren Altersgruppen stärker war, scheint das ossäre Wachstum mit dem Längenwachstum einherzugehen. Diese Feststellung stimmt damit überein, was Shelbourne et al. in ihrer Untersuchung zum Zusammenhang von Notchbreite zu Größe, Gewicht und Geschlecht in Erwachsenen zeigen konnten, nämlich dass die bikondyläre Breite signifikant mit Größe und Gewicht der Proband\*innen zusammenhängt [81]. Die Werte der Probanden zeigten sich ab der Altersgruppe 3 signifikant größer als die der Probandinnen. Dies ist analog zu den Ergebnissen von Charlton et al. [8]. Allerdings bestand der signifikante Unterschied nach Adjustieren von Größe und Gewicht nicht weiter, sodass die signifikant größeren Werte der Probanden im Vergleich zu denen der Probandinnen, insbesondere ab der Altersgruppe 5, auf die insgesamt größeren Körpermaße der Probanden zurückzuführen sind.

### *Notchbreite*

Bereits 1938 erkannte Palmer et al., dass kleinere Notchbreiten mit einer erhöhten VKB-Verletzungsrate einhergehen [64]. Die interkondyläre Notchbreite von erwachsenen Probanden konnte in Studien nach dem in dieser Studie ähnlichen Messverfahren mit  $17,7 \pm 2,6$  mm bestimmt werden. Frauen hatten Durchschnittswerte von  $16,2 \pm 2,3$  mm, Männer hatten Durchschnittswerte von  $19 \pm 2,1$  mm [16]. Die in dieser Studie in der Altersgruppe 6 erhobenen Werte nähern sich diesen Ergebnissen an. Die Ergebnisse von Davis et al. decken sich hiermit, während die von Anderson et al. erhobenen Werte circa 5-6 mm darüber liegen, wobei diese von Anderson et al. durchgeführten Messungen in einer anderen Schnittebene erhoben wurden [2,16]. Shelbourne et al. verglichen intraoperative Messungen der Notch mit Patientengröße und -gewicht in Patienten nach VKB-Ruptur und ermittelten bei Probandinnen Werte von  $13,9 \pm 2,2$  mm, bei Probanden  $15,9 \pm 2,5$  mm [72]. Insgesamt liegen mehrere Studien vor, welche aufzeigen, dass das Auftreten einer VKB-Ruptur statistisch häufiger mit einer engeren Notchbreite einhergeht [1,53,85,88]. Somit lassen sich die von Shelbourne et al. erhobenen, deutlich geringeren Werte damit begründen, dass die entsprechend untersuchten Probanden statistisch gesehen bei stattgehabter VKB-Ruptur kleinere Notchbreiten als der Durchschnitt der Allgemeinbevölkerung hatten. Bekräftigt wird diese

Aussage dadurch, dass in anatomischen Studien an Leichenpräparaten ohne vorangegangenes Trauma der Kreuzbänder Notchbreiten im Durchschnitt mit  $18,1 \pm 3,5$  mm bestimmt wurden [60]. Es zeigten sich demnach valide Ergebnisse für die Notchbreite in dieser Studie, welche vergleichbar mit der Literatur sind.

Die Notchbreite entwickelte sich progredient in allen Altersstufen und zeigte ein maximales Wachstum zwischen den Altersgruppen 2 und 3, ähnlich wie die bikondyläre Breite. Es scheint jedoch dem Wachstum von dieser um wenige Monate bzw. Jahre (um eine Altersgruppe, sprich bis zu 3 Jahren) versetzt zu sein, da die Altersgruppen 1 und 2 denselben Mittelwert vorwiesen. Ab der Altersgruppe 4 zeigten die Probanden signifikant größere Werte für die Notchbreite als die Probandinnen, wobei diese Unterschiede nach Adjustieren von Größe und Gewicht nicht mehr signifikant waren. Kerr und Shelbourne et al. konnten ebenfalls signifikante geschlechtsspezifische Unterschiede feststellen. In ihrer Studie lag keine signifikante Korrelation von Notchbreite mit der Patientengröße und -gewicht vor, allerdings bezog sich dies ausschließlich auf erwachsene Probanden [81]. Des Weiteren unterscheiden sich die Ergebnisse der Literatur, sodass Charlton et al. eine signifikante Korrelation der Notchbreite mit dem Gewicht der Probanden, allerdings keine signifikante Korrelation mit der Patientengröße zeigen konnten [8]. Es lässt sich festhalten, dass nach den Ergebnissen dieser Studie im Wachstum eine signifikante Korrelation zwischen der Notchbreite und Patientengröße, -gewicht und BMI nachgewiesen werden konnte.

#### *VKB-Breite in der Coronarebene*

Andere Studien, welche Messungen des VKBs in der Coronarebene nach einer vergleichbaren Methode bei erwachsenen Probanden durchgeführt haben, ermittelten Durchschnittswerte von  $6,4 \pm 1,4$  mm. Bei Probandinnen wurden Werte von  $5,7 \pm 1,1$  mm und bei Probanden von  $7,1 \pm 1,2$  mm bestimmt [16]. Eine Studie an Leichenpräparaten stellte eine Breite des VKBs von 11 mm fest, wobei hierbei die Messmethode nicht genauer beschrieben wurde [30]. Eine andere anatomische Studie hingegen fand durchschnittliche Werte von  $5,4 \pm 0,8$  mm im mittleren Bereich des VKBs heraus [60]. Die in dieser Studie ermittelten Werte für die Breite des VKBs in der Coronarebene zeigten im Durchschnitt vergleichbare Werte in der Altersgruppe 6, sodass man davon ausgehen kann, dass die hier genutzte Messmethodik repräsentative Ergebnisse erheben kann.

Es zeigte sich ein weitestgehend progredientes Wachstum – mit einem Ausreißer zwischen den Altersgruppen 3 und 4 – mit dem deutlichsten Wachstum zwischen den Altersgruppen 2 und 3, analog zum Wachstum der Notchbreite. Die VKB-Breite korrelierte signifikant mit Patientengröße und -gewicht. Die Probandinnen zeigten signifikant kleinere VKB-Breiten ab

der Altersgruppe 4. Dies erscheint im Konsens mit den Ergebnissen aus der Studie von Charlton et al., wobei in deren Studie nicht unterschieden werden konnte, ob dies letztlich auf die Unterschiede in Patientengröße und weniger auf das Geschlecht zurückzuführen war [8]. In dieser Studie zeigte sich nach Adjustieren von Größe und Gewicht kein signifikanter geschlechtsspezifischer Unterschied. Davis et al. beschrieben allerdings ebenfalls signifikante Unterschiede in der VKB-Breite von erwachsenen Männern und Frauen [16]. In Zusammenschau der Erkenntnisse aus dieser Studie lässt sich festhalten, dass die VKB-Breite im Wachstum mit Patientengröße und -gewicht unabhängig vom Geschlecht signifikant korrelierte und dass ab einem Alter von 10-12 Jahren die Probandinnen signifikant niedrigere Werte aufwiesen als die Probanden. Da eine geringere Notchbreite mit einer erhöhten VKB-Rupturrate einhergeht, behaupten Davis et al., dass eine geringere VKB-Breite ebenso zu einer erhöhten VKB-Rupturrate führen kann [16].

#### *HKB-Breite in der Coronarebene*

In Studien an humanen Leichenpräparaten wurde eine durchschnittliche Breite des HKBs von  $11,03 \pm 1,72$  mm [63] bzw. im zentralen Abschnitt von 13 mm festgestellt [30]. Der Mittelwert der HKB-Breite in der Coronarebene in der Altersgruppe 6 nähert sich dem genannten Durchschnittswert an. Die Ergebnisse anderer Studien, die die Messungen in vergleichbarer Technik an erwachsenen Probanden durchgeführt haben, erbrachten HKB-Breiten von  $9,5 \pm 1,7$  mm bei Frauen und  $10,9 \pm 2$  mm bei Männern [16]. Verglichen mit den Werten der Probandinnen und Probanden in der Altersgruppe 6 dieser Studie zeigen diese eine gewisse Übereinstimmung.

Die Messungen in dieser Studie zeigten einen progredienten Anstieg der Mittelwerte von den Altersgruppen 1 bis 6. Es zeigte sich zwischen den Altersgruppen 2 und 3 der stärkste Anstieg, analog zum Anstieg der VKB- und Notchbreite in diesen Altersgruppen. Die HKB-Breite korrelierte signifikant mit Patientengröße, -gewicht und BMI. Die Probanden zeigten ab der Altersgruppe 3 signifikant größere Werte als die Probandinnen, im Konsens zu den Daten erwachsener Probanden, wobei auch hier – wie bei der VKB-Breite – nach Adjustieren von Größe und Gewicht kein weiter bestehender signifikanter Unterschied besteht.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die erhobenen Messwerte dieser Studie mit der bisherigen Literatur im Einklang stehen und es sich zusätzlich eine Aussage über das Wachstum dieser Strukturen im Kindesalter treffen lässt. Während die ossären Strukturen im Kleinkindalter ein starkes Wachstum aufzeigen, folgen die Bandstrukturen in der Notch in den Altersgruppen 2 und 3, dem Alter von 4-9 Jahren entsprechend. Das HKB ist in der Coronarebene breiter als das VKB. Die Probandinnen dieser Studie zeigten ab der Altersgruppe 3 bzw. 4 kleinere Strukturen als die Probanden. Daher ist es naheliegend, dass

das Wachstum bei den Probanden in der (Prä-)Pubertät, das von den Probandinnen übersteigt. Diese Schlussfolgerung ist von besonderem Interesse, da andere Studien nachweisen konnten, dass eine veränderte Notchkonfiguration im Sinne einer schmaleren Notch, insbesondere im Verhältnis zur Breite der Kreuzbänder, zu einer erhöhten Verletzungsanfälligkeit führen kann [53,88]. Es wird vermutet, dass die vermehrte Verletzungsanfälligkeit des VKBs bei Frauen mitunter hierauf zurückzuführen ist [80]. Während es bei erwachsenen Probanden weniger signifikante Korrelationen zwischen Körpergröße und -gewicht und den genannten Strukturen gibt, fallen im Wachstum jedoch signifikante Korrelationen auf. Kinder und Adoleszente, die durchschnittlich größer und schwerer sind, haben also ebenfalls durchschnittlich größere Bandstrukturen.

## HKB in der Sagittalebene und die laterale Femurkondylenbreite sowie der hieraus gebildete Index

### *HKB in der Sagittalebene*

Die durchschnittliche Länge des HKBs wurde in anatomischen Studien an Leichenpräparaten von Erwachsenen mit 36 bis 38 mm ausgemessen [3,6,63]. Diese Studie zeigte bei den Probanden aus den Altersgruppen 4 bis 6 größere Durchschnittswerte. Aufgrund des Verlaufes des HKBs wurden in dieser Studie mehrere Schnittebenen genutzt, um die Länge des HKBs festzustellen. Der Ursprung des HKBs stellt sich in der MRT nicht eindeutig dar, außerdem kann durch die unterschiedlichen Formen des HKBs (gekrümmte, bogenförmige oder U-Form) die exakte Vermessung erschwert sein. Dennoch stellt sich die Frage, ob die Struktur in vivo – MR-tomographisch gemessen – verglichen mit der von Leichenpräparaten größer ausfällt. Bei anderen vermessenen Strukturen zeigt sich diese Diskrepanz nicht, daher scheint dies letztlich mit der Struktur und dem Ursprung bzw. Ansatz des HKBs zusammenzuhängen. Dies fällt auch in anatomischen Studien auf: So wird auf die große Variation in Form und Größe des femoralen Ansatzes eingegangen [3]. Zudem haben in vivo Studien, welche die Veränderung der Kreuzbänder unter dynamischer Belastung untersucht haben, festgestellt, dass das anterolaterale und das posteromediale Bündel mit zunehmender Kniegelenksflexion auch zunehmend an Länge gewinnen. So konnten Li et al. und DeFrate et al. mittels unterschiedlicher Techniken an dreidimensionalen Kniegelenksmodellen, welche anhand von MRT-Bildern konstruiert wurden, Vergrößerungen von bis zu 22% bzw. 23% bei unterschiedlichen Graden der Knieflexion unter Belastung verzeichnen [17,49]. Kim et al. bestimmten in MRT-Aufnahmen des kindlichen Kniegelenks Winkel des HKBs und das Verhältnis zwischen horizontal und vertikal verlaufenden Anteilen des HKBs. Hierbei sind die Absolutwerte nicht aufgezeigt worden, die Beispielmessung zeigt jedoch eine HKB-Länge von

30,81 mm bei einem 3-jährigen Mädchen und eine HKB-Länge von 45,28 mm bei einer 19-Jährigen und somit – wenn auch nur exemplarisch – sehr ähnliche Werte, die dieser Studie entsprechen [41]. Es sollte Gegenstand aktueller Forschung bleiben, Messverfahren zu entwickeln, welche das HKB optimal darstellen und die Messung vereinfachen, hier auch mit einem Augenmerk auf den Vergleich zwischen Messungen an anatomischen (Leichen)-Präparaten mit MRT-Messungen.

Unabhängig von den Absolutwerten konnte nachgewiesen werden, dass das HKB ein progredientes Wachstum über alle Altersgruppen hinweg zeigte. Das ausgeprägteste Wachstum fiel zwischen den Altersgruppen 2 und 3 auf, ähnlich dem Wachstum des VKBs. Dieses Schema deckt sich mit den bereits erhobenen Erkenntnissen zum Wachstumsmuster, die in oben genannten Messungen gezeigt wurden.

Eine Korrelation mit Patientengröße, -gewicht und BMI zeigte sich für Größe und Gewicht. Die Probandinnen hatten in den Altersgruppen 1 und 2 größere Werte als die Probanden. Ab der Altersgruppe 3 veränderte sich dies zugunsten der Probanden, sodass die Altersgruppen 5 und 6 signifikant größere Werte bei den Probanden im Vergleich zu den Probandinnen aufwiesen. Auch nach Adjustieren von Größe und Gewicht zeigten sich für die Werte der Altersgruppe 6 signifikante geschlechtsspezifische Unterschiede.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die anatomische Untersuchung an humanen Leichenpräparaten im Vergleich zu radiologisch durchgeführten Messungen oder in vivo Messungen, in Bezug auf das HKB Diskrepanzen aufweist, welchen es in weiteren Studien nachzugehen gilt. Eine MRT mit geringerer Schichtdicke und optimaler Darstellung des gesamten HKBs in einer Schnittebene könnte hierbei zielführend sein.

Das HKB entwickelt sich ähnlich dem VKB und zeigt im Längenwachstum Spitzen in den Altersgruppen 2 und 3 und scheint bis zur Altersgruppe 6 weiterhin zu wachsen. Dies deckt sich mit dem Wachstumsmuster in der Coronarebene und spricht für ein gleichmäßiges Längen- und Breitenwachstum. Es zeigten sich signifikante Korrelationen mit der Patientengröße, dem Gewicht und dem BMI. Die Entwicklung zeigt sich ähnlich dem des VKBs mit initial größeren HKB-Längen der Probandinnen (Altersgruppen 1-2) und im Verlauf mit größeren Werten der Probanden. Es bleiben in der Altersgruppe 6 weiterhin signifikant größere Werte der Probanden auch nach Adjustieren von Größe und Gewicht bestehen, was dafürspricht, dass das HKB bei Männern auch unabhängig von den Körpermaßen größer ist als bei Frauen. Bis dato wurden hierzu in vergangenen Studien bzgl. des HKBs keine Aussagen gemacht. Es sollte Gegenstand aktueller Forschung werden, diesen Sachverhalt weiterhin zu untersuchen.

### *Laterale Femurkondylenbreite*

Die Mittelwerte der lateralen Femurkondylenbreite stiegen von der Altersgruppe 1 kontinuierlich bis zur Altersgruppe 6 an, der stärkste Zuwachs fand – analog zur HKB-Länge – zwischen den Altersgruppen 2 und 3 statt. Auch zwischen den Altersgruppen 1 und 2 stieg die Breite der lateralen Femurkondyle an. Dies deckt sich mit der Entwicklung der bikondylären Breite und spricht dafür, dass das Knochenwachstum in diesen Altersgruppen am ausgeprägtesten ist. Passend dazu zeigte die laterale Femurkondylenbreite signifikante Korrelationen mit Probandengröße, -gewicht und BMI.

Die Probandinnen haben in den Altersgruppen 2 und 3 größere Werte und ab der Altersgruppe 4 im Durchschnitt kleinere Werte als die Probanden gezeigt, wobei diese ab der Altersgruppe 5 auch signifikant kleiner waren. Auch nach Adjustieren von Größe und Gewicht besteht dieser signifikante Unterschied in der Altersgruppe 6 weiter. Daher kann ähnlich den Erkenntnissen von Pinskerova et al. angenommen werden, dass Männer ebenfalls größere laterale Femurkondylen haben als Frauen [68]. Hier sind insbesondere in Bezug auf die Entwicklung passender Implantate für die endoprothetische Versorgung des Kniegelenkes Absolutwerte bei erwachsenen Proband\*innen erhoben worden [10,74]. Das Wachstumsmuster der lateralen Femurkondyle entspricht dem des VKBs, HKBs und der bikondylären Breite.

### *Index aus lateraler Femurkondylenbreite und HKB-Länge in der Sagittalebene*

Orakzai et al. [57] konnten in ihrer Studie zeigen, dass der Index einen Vorteil in der Diagnostik von chronischen HKB-Rupturen im MRT bringt. Es wurde festgestellt, dass Patienten mit chronischen HKB-Rupturen geringere Werte für den Index aufwiesen, welche für eine Heilung des HKBs im elongierten Zustand sprechen. Der Mittelwert des pathologischen Index betrug 1,49, während die Werte der gesunden Kontrollgruppe Mittelwerte von 1,96 aufwiesen. Es handelte sich hierbei um ausgewachsene Proband\*innen. Die im Rahmen dieser Studie ermittelten Indices zeigen einen auffälligen Unterschied hierzu. Demnach zeigt sich, dass insbesondere in den Altersgruppen 1 und 2, sprich bei Säuglingen bzw. Kleinkindern, dieser Index im Durchschnitt 1,43 bzw. 1,48 beträgt. Allerdings auch in den höheren Altersgruppen zeigten sich die Indices im Mittel bei 1,54, wobei Maximalwerte von 1,76 ermittelt wurden. Fraglich ist, ob ein weiter fortschreitendes Wachstum der Femurkondylen ab dem Alter von 16-18 Jahren stattfindet, welches zu größeren Indices führen könnte. Außerdem könnte eine Überschätzung der HKB-Länge in dieser Studie verantwortlich für die kleineren Indices sein. Dies wurde bereits zuvor diskutiert. In dieser Studie wurden alle Proband\*innen mit einer Vorgeschichte von Läsionen der Kreuzbänder exkludiert, was gegen eine Elongation der HKBs in den Proband\*innen dieser Studie spricht. Es bedarf einer tiefergehenden Bearbeitung dieser Thematik in zukünftiger Forschung, insbesondere mit einer größeren Fallzahl, um

letztlich hierzu klare Aussagen formulieren zu können. In dieser Studie konnte jedoch gezeigt werden, dass im physiologischen Zustand o.g. Indices mit zunehmendem Patientenalter ebenfalls zunehmen. Passend hierzu zeigte sich eine signifikante Korrelation zwischen dem Index und Patientengröße, -gewicht sowie BMI.

Insgesamt erkennt man, dass das Wachstum der HKB-Länge und der lateralen Femurkondylenbreite mit dem der VKB-Länge bzw. VKB- und HKB-Breite und dem der bikondylären Breite einhergeht. Im Wachstum zeigen sich deutliche Korrelationen mit der Größe und dem Gewicht der Proband\*innen und unabhängig davon weisen die Probanden ab einem gewissen Alter regelhaft größere Strukturen auf als die Probandinnen (ab Altersgruppe 3 bzw. 4). Es muss weiterhin untersucht werden, wie sich das HKB in vivo kernspintomographisch darstellt und gegebenenfalls komplexere Verfahren angewandt werden, um dieses zu vermessen. Es ist bis dato unklar, ob der oben beschriebene Index in der Diagnostik von chronischen HKB-Läsionen in der pädiatrischen Population valide anzuwenden ist. Da die Behandlung von HKB-Verletzungen – ob isoliert oder in komplexen, multiligamentären Verletzungen des Kniegelenks – noch nicht standardisiert ist und wenig Literatur bezüglich der Langzeitergebnisse von operativer verglichen mit konservativer Therapie vorhanden ist, scheint es insbesondere für die pädiatrischen Patient\*innen notwendig, weitere wissenschaftliche Daten zu sammeln, sodass Langzeitfolgen wie persistente Instabilität, Meniskusschäden und Gonarthrose nach HKB-Verletzungen möglichst vermieden werden können [66,82,87].

## Fläche und Volumen des VKBs

### *VKB-Fläche*

Die Ergebnisse bisheriger Studien an humanen Leichenpräparaten zur Bestimmung des Durchmessers des VKBs erwachsener Probanden zeigten größere Diskrepanzen [36,60,93]. Anderson et al., die die Fläche nach dem gleichen Schema dieser Studie bestimmt haben, ermittelten durchschnittlich VKB-Flächen von 36,1 mm<sup>2</sup> bei weiblichen und 48,9 mm<sup>2</sup> bei männlichen Probanden [2]. Die Studie von Lima et al., die die Messungen ebenfalls nach dem o.g. Schema durchgeführt haben, erbrachte mit der vorliegenden Studie vergleichbare Werte [51]. Hierbei sollte beachtet werden, dass in dieser Studie eine vereinfachte Abschätzung der wahren Fläche des VKBs erhoben wurde. Des Weiteren ist zu bemerken, dass in Studien zur Untersuchung der Fläche von ligamentären oder tendinösen Strukturen festgestellt werden konnte, dass es häufig zu Über- bzw. Unterschätzungen bei der Verwendung der MRT als Messverfahren kommt [28].

Unabhängig von den erhobenen Absolutwerten lassen sich bezüglich des Wachstumsmusters jedoch folgende Aussagen treffen: Die Fläche in der Altersgruppe 1 nahm kontinuierlich bis zur Altersgruppe 6 zu. In dieser Studie präsentierte sich das Wachstum weitestgehend progredient über alle Altersgruppen hinweg, mit einer Spitze zwischen den Altersgruppen 3 und 4, wobei die absolute Zunahme zur Altersgruppe 5 hin abnimmt. Lima et al. stellten fest, dass das Längen- und Größenwachstum von Kindern und Adoleszenten nicht analog zum Wachstum der VKB-Fläche ist, sondern dass es ab einem Alter von 11-12 Jahren einen Rückgang im Wachstum der VKB-Fläche gibt [51]. Der geringere Zuwachs zwischen den Altersgruppen 4 und 5 (entsprechend dem Alter zwischen 10 und 15 Jahren) in dieser Studie kann dem entsprechen, was Lima et al. ab dem Alter von 11-12 Jahren erkannt haben. Jedoch wurden die Altersgruppen in den beiden Studien unterschiedlich eingeteilt, was den Vergleich der Ergebnisse erschwert.

Des Weiteren zeigten sich in dieser Studie signifikante Korrelationen mit Patientengröße, -gewicht und BMI. Die Probanden haben ab der Altersgruppe 5 signifikant größere Werte als die Probandinnen. Diese Feststellung entspricht den Erkenntnissen weiterer Studien, wobei in dieser Studie nach Adjustieren von Größe und Gewicht kein signifikanter geschlechtsspezifischer Unterschied erkannt wurde [2,51,60,93]. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die signifikant größere Fläche des VKBs mit durchschnittlich größeren Körpermaßen von Männern einhergeht.

### *VKB-Volumen*

Die in dieser Studie errechneten VKB-Volumina setzen voraus, dass das VKB einen zylindrischen Körper darstellt und dadurch über die geometrische Formel zur Berechnung des Volumens eines solchen Körpers ermittelt werden kann. Die erhobenen Werte sind eine Abschätzung, welche weitestgehend ohne Invasivität, schnell und einfach reproduzierbar ist. Die Ergebnisse dieser Studie fallen verglichen mit aufwendigeren anatomischen Studien deutlich geringer aus [7,36]. Hierbei wurden in der Studie von Chandresakar et al., welche Präparate an Kadavern kombiniert mit 3-D Scannern genutzt haben, Absolutwerte des VKB-Volumens von 2967 mm<sup>2</sup> bei Männern bzw. 1954 mm<sup>3</sup> bei Frauen ermittelt [7].

Studien, die das Volumen des VKBs mittels 3-D Scan erarbeitet haben, haben erkannt, dass hierbei Überschätzungen der wahren Volumina auftreten, da Konkavitäten in der Oberfläche nicht berücksichtigt werden können [35].

Betrachtet man das VKB an der tibialen Insertion, so beträgt bei Erwachsenen die anteroposteriore Ausdehnung im Durchschnitt  $17.6 \pm 2.1$  mm, die mediolaterale Ausdehnung  $12.7 \pm 2.8$  mm [54]. Außerdem konnte gezeigt werden, dass die Ursprungs- bzw. Ansatzareale

des VKBs bis zu 3,5-fach größere Flächen aufwiesen als das VKB im zentralen Bereich [93]. Somit ist eine deutliche Diskrepanz zwischen dem Durchmesser im zentralen Bereich des Bandes – welcher in dieser Studie zur Kalkulation des Volumens genutzt wurde – und den Insertionsarealen typisch. Dies wird einer der Gründe sein, weswegen mit der in dieser Studie angewandten Methode im Vergleich zu anderen Studien deutlich niedrigere Absolutwerte für das Volumen des VKBs ermittelt wurden. Die Ergebnisse dieser Studie liegen denen von Charlton et al. nahe (Probanden 839 mm<sup>3</sup>, Probandinnen 652 mm<sup>3</sup>), die in ihrer Studie ebenfalls mittels radiologischer Methodik eine Annäherung an das Volumen durchgeführt haben [8]. Im Unterschied zu unserer Studie wurden hierbei Flächen des VKBs und die Fläche der Notch in der axialen Bildgebung bestimmt. Das Volumen wurde aus der Summe der Schnittebenen, die das VKB abbilden, multipliziert mit der Schichtdicke der MRT-Bildgebung (2,5 mm) und der zuvor in dem axialen Bildausschnitt gemessenen Fläche berechnet. Auch mit dem Verfahren von Charlton et al. stellen dies jedoch lediglich Annäherungen an das wahre Volumen des VKBs dar [8].

In dieser Studie zeigte das VKB Volumen einen progredienten Anstieg über alle Altersgruppen hinweg, wobei der größte Anstieg zwischen den Altersgruppen 5 und 6 zu finden war, gefolgt von dem zwischen den Altersgruppen 3 und 4. Geringe Zunahmen waren zwischen den Altersgruppen 1 und 2 sowie 4 und 5 zu verzeichnen. Dies ist von Interesse, da Lima et al. den Rückgang des Wachstums der VKB-Fläche ab einem Alter von 11-12 Jahren feststellen konnten und das Volumen in dieser Studie ebenso aus der VKB-Fläche berechnet worden ist [51]. Dieser Rückgang im Wachstum kann hier nachvollzogen werden. Tuca et al. untersuchten in ihrer Studie Kniegelenke mittels MRT bei Kindern und Jugendlichen im Alter von 3-13 Jahren und konnten zeigen, dass das Volumen des VKBs bis ins Alter von ca. 10 Jahren linear zunimmt und anschließend in ein Wachstumsplateau übergeht [86]. Da ihre Studie keine Probanden über dieses Alter hinaus betrachtet hat und die Altersgruppen anders eingeteilt wurden als in dieser Studie, ist ein direkter Vergleich schwer. Man kann jedoch vermuten, dass die in dieser Studie bemerkte geringere Zunahme des Volumens von der Altersgruppe 4 zu 5 und somit einem Alter von 10-15 Jahren, mit den von Tuca et al. [86] bzw. Lima et al. [51] erkannten Wachstumsplateaus einhergeht.

Ähnlich den Ergebnissen von Charlton et al. konnte in dieser Studie eine signifikante Korrelation des Volumens mit Patientengröße und -gewicht aufgezeigt werden. Auch der BMI zeigte eine signifikante Korrelation. Außerdem ist im Konsens mit Charlton et al. aufgefallen, dass es signifikante geschlechtsspezifische Unterschiede in den Volumina des VKBs gibt [8]. In dieser Studie zeigte sich dieser Unterschied in den Altersgruppen 2, 3, 5 und 6 signifikant. Nach Adjustieren von Größe und Gewicht konnten diese signifikanten Unterschiede nicht

bestätigt werden. Somit haben die Körpermaße einen größeren Einfluss auf das Volumen des VKBs als das Geschlecht.

Aufgrund abweichender Messergebnisse zu anatomischen Studien empfiehlt es sich, bei der Bestimmung der wahren Fläche und des Volumens nach Möglichkeit komplexere Verfahren anzuwenden. Da Studien an humanen Leichenpräparaten von Kindern und Jugendlichen schwer realisierbar sind und eine komplexe Software zur Ermittlung der Fläche bzw. des Volumens von Strukturen in der MRT nicht überall verfügbar ist, ist der Vorteil der hier durchgeführten Messungen darin zu sehen, dass mit simplen Methoden eine Annäherung an das wahre VKB-Volumen erzielt werden konnte. Somit lassen die Daten dieser Studie Rückschlüsse auf Wachstum und Entwicklung der VKB-Fläche und des Volumens zu. Obwohl die Feststellungen von Lima et al. und Tuca et al. nicht vollständig reproduziert wurden, zeigt sich dennoch eine Auffälligkeit im Wachstum insbesondere zwischen der Altersgruppe 4 und 5. Durch die starke Korrelation mit Patientengröße und -gewicht lassen sich abhängig von den Körpermaßen eines Patienten Rückschlüsse auf die VKB-Fläche und das VKB-Volumen ziehen. Dies kann im Rahmen des operativen Kreuzbandersatzes bei der Auswahl von Bohrkanaldurchmesser und Transplantatgröße (Länge und Durchmesser) von Interesse sein.

## Notch-Width-Index und weitere Quotienten

### *Notch-Width-Index*

Erstmals von Souryal et al. angewandt, ist der NWI bei anatomisch-morphologischen Untersuchungen des VKBs und der Notch nicht mehr zu vernachlässigen [84]. So wird er in etlichen Studien bei ausgewachsenen Proband\*innen untersucht und es werden Unterschiede zwischen männlichen und weiblichen NWI aufgezeigt. Ein erhöhtes Verletzungsrisiko soll bei verringerten NWI vorliegen [18,81,85,94]. Die Untersuchung des NWI bei Kindern und Jugendlichen ist somit ebenfalls von großem Interesse. So haben Domzalski et al. in ihrer Studie Daten an Probanden im Alter von 3-17 Jahren erhoben, welche, ähnlich wie in dieser Studie, mit zunehmendem Alter eine Abnahme zeigten. Allerdings blieben die Werte in dieser Studie nach der Altersgruppe 2 weitestgehend konstant, wobei eine Abnahme zur Altersgruppe 5 mit konsekutiver Zunahme zur Altersgruppe 6 zu sehen war. Es ist zu bemerken, dass Dienst et al. in ihrer Studie mit einem ähnlichen Verfahren bei älteren Probanden (durchschnittlich 25 Jahre) NWI nachweisen konnten, welche mit 0,28 bei weiblichen und 0,31 bei männlichen Proband\*innen größer waren als die in der Altersgruppe 6 dieser Studie sowie denen von Domzalski et al. [18,20]. Auch Anderson et al. stellten größere NWI von 0,305 in Probandinnen und 0,311 in Probanden in ihrer Studie fest, welche 16-18 jährige Proband\*innen untersuchte [2]. In der anatomischen Studie von Muneta et al.

[55] an humanen Präparaten (Alter zwischen 49 und 92 Jahren) wurden NWI von 0,27 beschrieben, wobei die der Probanden geringer waren als die der Probandinnen. Eine umfangreiche Studie von Souryal et al. [85] untersuchte 902 High-school Schüler im durchschnittlichen Alter von 16 Jahren, bei denen ein NWI von  $0,231 \pm 0,044$  als Mittelwert gefunden wurde. Es lassen sich demnach in der Literatur gewisse Diskrepanzen bezüglich des NWI erkennen. Eine Ursache für die größeren NWI bei älteren Probanden könnte ein weiteres Wachstum der Notch jenseits des Alters von 16-18 Jahren sein. Eine nachfolgende Studie, welche Probanden zwischen 15 und 25 Jahren untersuchen würde, könnte hier gegebenenfalls weitere Erkenntnisse liefern. Shelbourne et al. [72] erkannten, dass die bikondyläre Breite signifikant mit der Körpergröße korreliert, die Notchbreite jedoch nicht. Sie schlussfolgern, dass somit bei größeren Proband\*innen im Durchschnitt kleinere NWI erscheinen. Mit Ausnahme der Studie von Muneta et al. [60] konnten andere Studien, wie auch diese Studie, zeigen, dass männliche Probanden im Durchschnitt größere NWI haben [2,16,18]. Insbesondere fielen in dieser Studie signifikant größere Werte der Probanden verglichen mit denen der Probandinnen in der Altersgruppe 6 auf. Diese Aussage wird in der vorliegenden Studie dadurch bekräftigt, dass dieser signifikante geschlechtsspezifische Unterschied auch nach Adjustieren von Größe und Gewicht weiterhin bestand. Beachtet man allerdings die These von Shelbourne et al., könnte dies auch mit der Körpergröße der Proband\*innen und der dazu durchschnittlich größeren bikondylären Breite bei männlichen Probanden zusammenhängen [80]. Passend hierzu ist auch die Feststellung der vorliegenden Studie, dass die Körpergröße mit dem NWI zusammenhängt.

Letztlich ist jedoch zu bemerken, dass aufgrund der Annahme, dass geringere NWI mit einer erhöhten Verletzungsanfälligkeit des VKBs einhergehen, die hier erhobenen Daten für eine Zunahme des Verletzungsrisikos mit zunehmendem Alter sprechen und die weiblichen Probandinnen insgesamt ein erhöhtes Risiko haben [18,80,85,94].

Dennoch bewerten wir nach Betrachtung der Literatur und den vorliegenden Ergebnissen des NWI dessen Nutzung als diagnostisches Mittel für die pädiatrische Population kritisch.

### *VKB-Notch-Index*

In der Altersgruppe 1 wurde der geringste Wert ermittelt und es zeigte sich eine Zunahme mit zunehmendem Alter bis einschließlich zur Altersgruppe 3. Domzalski et al. beschreiben ebenfalls eine progrediente Zunahme der Werte mit zunehmendem Alter, wobei auch in deren Studie zwischen dem Alter von 7 bis 15 Jahren keine Zunahme zu verzeichnen war [19]. Da der Wert sich ab der Altersgruppe 4 in dieser Studie weitestgehend konstant zeigt, liegt es nahe, dass insbesondere in Kniegelenken junger Menschen die Notch weniger stark an Breite zunimmt, als das darin befindliche VKB. Die Abnahme des Wachstums des VKBs mit

zunehmendem Alter in der pädiatrischen Population konnte, ähnlich zu den Erkenntnissen dieser Studie, von Putur et al. beobachtet werden [63]. Yellin et al. bestärken in ihrer Studie die Aussage, dass eine geringe Notchbreite in pädiatrischen Patienten einen Risikofaktor für eine erhöhte Rate an VKB-Rupturen darstellt [92]. Ebenso zeigt eine Meta-Analyse über 16 Studien von Zeng et al., dass eine verringerte Notchgröße ein erhöhtes Risiko für VKB-Verletzungen darstellt [94]. Der starke Anstieg des Index in den Altersgruppen 2 und 3 könnte im Zusammenhang mit der veränderten Belastung des Kniegelenks zwischen Säuglingen, Kleinkindern und Schulkindern stehen. Die Erkenntnis, dass die übrigen Messungen in diesen Altersstufen ebenfalls die stärkste Zunahme aufzeigen, geht mit diesem Gedanken einher. Allerdings bedarf es, um diesbezüglich repräsentative Aussagen zu machen, tiefergehende Forschungsergebnisse, insbesondere in Bezug auf die biomechanische Belastung in Kniegelenken bei Säuglingen, Kleinkindern und Schulkindern.

Eine signifikante Korrelation von VKB-Notch-Index bestand auch mit der Körpergröße, während keine signifikante Unterscheidung zwischen den Geschlechtern zu finden war.

#### *HKB-Notch-Index*

Domzalski et al. fanden einen progredienten Anstieg dieses Index über die Altersgruppen hinweg. In dieser Studie zeigte der HKB-Notch-Index ebenfalls in der Altersgruppe 1 den geringsten Wert [20]. Eine Zunahme zur Altersstufe 2 stellte sogleich das Maximum des ermittelten Wertes dar. So scheint das Wachstum des HKBs dem der Notch in dieser Altersstufe voranzugehen. Eine progrediente Zunahme des Index konnte somit nicht festgestellt werden. Eine signifikante geschlechtsspezifische Differenz der Werte zeigte sich lediglich in der Altersgruppe 3 mit einem größeren Wert für die Probanden. Allerdings unterschritten die Mittelwerte der Probanden auch die der Probandinnen in den Altersgruppen 2 und 5, obgleich diese Unterschiede nicht signifikant waren. Es konnte keine signifikante Korrelation mit Probandengröße, -gewicht oder BMI erkannt werden, analog zu dem weitestgehend stabilen Wert des Index ab der Altersgruppe 3. Die Aussagekraft dieses Wertes sollte kritisch angesehen werden, da wenige Rückschlüsse auf die Entwicklung der Absolutwerte möglich sind.

#### *VKB-Femurkondylenbreite*

In dieser Studie zeigte sich dieser Parameter in allen Altersgruppen weitestgehend konstant unabhängig vom Geschlecht. Dies ist vergleichbar mit den Erkenntnissen von Domzalski et al. [20]. Lediglich ein diskreter Abfall des Wertes in der Altersgruppe 2 und ein Anstieg auf den maximal gemessenen Wert in der Altersgruppe 3 waren hier auffällig. Dies könnte mit einem stärkeren bzw. geringeren Wachstum der Femurkondylen im Vergleich zum VKB in der entsprechenden Altersgruppe zusammenhängen. Es konnten für die Werte keine

signifikanten geschlechtsspezifischen Unterschiede erkannt werden und auch mit Körpergröße, -gewicht und BMI zeigten sich, entsprechend des konstanten Wertes des Index, keine signifikanten Zusammenhänge. Aufgrund dessen wird die Vermutung von Domzalski et al. [18] bestärkt, dass das Wachstum von VKB-Breite und Femurkondylen weitestgehend proportional ist und dass die Verhältnisse dieser Parameter geschlechterunabhängig zu sein scheinen.

### *HKB-Femurkondylenbreite*

Dieser Wert hielt sich ebenfalls weitestgehend konstant über die Altersgruppen 2 bis 6 hinweg, wobei der Wert in der Altersgruppe 1 etwas größer war. In Säuglingen scheint also das HKB verglichen mit den Femurkondylen verhältnismäßig größer zu sein, während sich dies im Wachstum etwas relativiert und dann ein konstantes Wachstum beider Strukturen zu verzeichnen ist. Dies deckt sich damit, dass in der Korrelation mit Körpergröße ein signifikanter negativer Zusammenhang erkennbar war. Domzalski et al. stellten ebenfalls relativ konstante Werte über alle Altersgruppen hinweg fest. Auch in deren Studie zeigte sich der Wert der jüngsten Altersgruppe von 3-7 diskret größer [20]. Zwischen Probanden und Probandinnen ist kein signifikanter Unterschied in den Werten erhoben worden und zeigt auch hier, dass dieser Wert geschlechterunabhängig zu sein scheint.

Die Analyse der Literatur zeigt für die Indices inkonsistente Resultate. Die in dieser Studie erhobenen Ergebnisse bestätigen, dass die Kreuzbänder ein ausgeprägteres Wachstum im Verhältnis zu der umgebenden Notch aufweisen. Die Femurkondylen wachsen weitestgehend konstant und proportional zu den Kreuzbändern. Dies spiegelt sich in der Abnahme des NWI wider. Ein Zusammenhang zwischen geringem NWI und erhöhtem Verletzungsrisiko des VKBs konnte in mehreren Studien aufgezeigt werden [8,80,85]. Die Bestimmung weiterer Indices, wie die in dieser Studie (VKB-Notch, HKB-Notch, VKB-Femurkondylenbreite, HKB-Femurkondylenbreite), und die Korrelation solcher Indices mit Verletzungsraten des VKBs bzw. HKBs sollten Gegenstand aktueller Forschung bleiben. Aufgrund der Erkenntnisse dieser Studie und der aktuellen Datenlage sollte die Bewertung der Indices aktuell zurückhaltend erfolgen. Je mehr Daten auf diesem Gebiet vorliegen, desto eher können Zusammenhänge bezüglich Verletzungsrisiko und entsprechender Werte erkannt werden. Die erhobenen Daten stellen die Ergebnisse der Untersuchungskohorte dieser Studie dar und können zukünftigen Studien als wertvolle Vergleichswerte dienen.

## Limitationen

Die Limitationen dieser Studie werden im Folgenden dargelegt. Es handelte sich um eine retrospektive Analyse von vorbestehenden MRT-Datensätzen von kindlichen bzw.

jugendlichen Kniegelenken. Viele Informationen konnten nicht primär erhoben werden bzw. mussten sekundär eingeholt werden. Ein prospektives Studiendesign mit Erfassung des Aktivitätsgrades, der Anamnese und Symptomatik der Proband\*innen sowie der Bildung einer Vergleichsgruppe mit Patient\*innen, die eine Verletzung des VKBs und/oder HKBs erlitten haben, hätten die Methodenstärke dieser Studie erhöht. Nach Anwendung der Ausschlusskriterien limitierte sich die Fallzahl dieser Studie auf 127 MRT-Untersuchungen. Zudem konnten letztlich nicht immer die exakt identischen Untersuchungsparameter in der MRT festgelegt werden. Insbesondere bei den Säuglingen und Kleinkindern musste ein Großteil der vorhandenen Datensätze ausgeschlossen werden. Eine höhere Anzahl an MRT-Untersuchungen pro Altersgruppe hätte die Aussagekraft der Ergebnisse insbesondere im Altersgruppenvergleich erhöht.

Ogleich die Messmethodik an jedem konventionellen PACS-System mithilfe gängiger Bildbearbeitungsprogramme reproduziert werden kann, besteht eine Fehlerquelle durch den Untersucher und eine mögliche Über- bzw. Unterschätzung der Messparameter. Insbesondere die Messungen über mehrere Ebenen hinweg erwiesen sich als fehleranfällig. Zur Optimierung solcher Messungen sind aufwendige Softwareprogramme notwendig und sollten in Zukunft entsprechenden Abteilungen zukommen. Mit Erhöhung der Auflösung von MRT-Untersuchungen könnte die Festlegung anatomischer Landmarken zur Durchführung von Messungen im MRT noch optimiert werden.

Eine größere Anzahl an Probanden wäre von Vorteil gewesen, insbesondere in den Altersgruppen 1 und 2. Aufgrund der strengen Indikationsstellung und im klinischen Alltag relativ seltenen Indikation zur Durchführung einer MRT bei Säuglingen und Kleinkindern zeigte sich eine relativ geringe Fallzahl für diese Altersgruppe. Daher ist die Aussagekraft der Ergebnisse in dieser Altersgruppe eingeschränkt.

Die vereinfachten Formeln zur Berechnung anderer Parameter wie VKB-Fläche und VKB-Volumen stellen mathematisch eine Annäherung dar. Selbstverständlich ist die wahre Anatomie der Kreuzbänder nicht mit der eines Zylinders gleichzustellen und dadurch fehlerbehaftet. So müsste zur genaueren Bestimmung von Fläche und Volumen des VKBs auf komplexere Verfahren zurückgegriffen werden. Wie bereits beschrieben stellten Charlton et al. eine alternative Methode zur Berechnung vom VKB-Volumen dar, wobei diese Methodik ebenfalls eine Annäherung darstellt [8]. Eine weitere Alternative zur Bestimmung von Volumina stellt, wie in der Studie von Myrick et al. genutzt, das sog. MIPAV dar [56]. Da diese Software zur Volumenbestimmung von Strukturen auch in anderen Gebieten häufig genutzt wird, stellt dies eine sinnvolle Alternative dar, wenngleich die Software nicht ubiquitär zur Verfügung steht.

## Fazit

Das Ziel dieser Studie war es, repräsentative Absolutwerte für kernspintomographische Parameter zur Beschreibung der Morphologie der Kreuzbänder in verschiedenen Altersstufen einer pädiatrischen Population zu erfassen. Die erhobenen Werte sprechen für die weitere Nutzung von Absolutwerten. Der Gebrauch von Indices, die sich bei der Beurteilung von erwachsenen Kniegelenken im MRT bewährt haben, stellt sich zumindest für die untersuchte pädiatrische Population als eingeschränkt dar. Die Notwendigkeit solcher Werte ist bei zunehmender Inzidenz von Kniegelenkstraumata und infolgedessen häufiger chirurgischer Therapieansätze in der pädiatrischen Population gegeben. Zusammenfassend lässt sich erkennen, dass die Kreuzbänder im Kindesalter kein absolut kontinuierliches Wachstum haben, sondern in verschiedenen Altersgruppen ein unterschiedliches Wachstumsverhalten zeigen. Insbesondere lässt sich erkennen, dass Kinder im Alter zwischen 4 und 9 Jahren das ausgeprägteste Kreuzbandwachstum vorweisen. Dies folgt dem größten Wachstum von ossären Strukturen bei Kindern im Alter zwischen 1 und 3 Jahren. Das absolute Körpergrößenwachstum ist in diesen Altersgruppen ebenfalls am ausgeprägtesten, dies lässt sich annäherungsweise anhand der Wachstumskurven beziehungsweise -tabellen der WHO bestätigen [98]. Da Kinder ab dem Alter von 3 Jahren sicher alleine laufen und daraus eine deutlich veränderte und vermehrte Belastung für das Kniegelenk und die Kreuzbänder mit zunehmendem Alter resultiert, ist die strukturelle Veränderung und Anpassung der Kreuzbänder auch in diesen Altersgruppen zu erwarten. Dies spiegelt sich in den Daten dieser Studie wider. Es zeigte sich die signifikante Zunahme in den Dimensionen der Kreuzbänder, welche insbesondere mittelstark bis stark mit der Körpergröße und -gewicht korrelieren, weniger stark mit dem BMI. Die Körpermaße scheinen deutlicher Einfluß auf die Morphologie der beurteilten Kniegelenksstrukturen zu nehmen als das Geschlecht. So konnten in den Analysen häufig nach Feststellung signifikanter, geschlechterspezifischer Unterschiede nach Adjustieren von Körpergröße und -gewicht die Ursache für diese Unterschiede auf die Körpergröße zurückgeführt werden. Unabhängig davon zeigten die Probandinnen in jüngeren Altersgruppen (Altersgruppen 2-3) verglichen mit den Probanden häufig im Durchschnitt größerer Messwerte (VKBLängeSag, VKBapBreite, VKBmlBreite, Bikondyläre Breite, etc.), während sich die Tendenz im Zuge des Wachstums (ab Altersgruppe 4) umkehrte, sodass im Verlauf die Probanden nach der Pubertät größere Strukturen im Vergleich zu den Probandinnen zeigten. So lässt sich im Rahmen der Pubertät ein ausgeprägteres Wachstum der Strukturen bei männlichen Probanden annehmen.

Die erhobenen Daten lassen Schlussfolgerungen zum Wachstumsverhalten der Kreuzbänder und anliegenden ossären Strukturen zu. So stellt sich weiterhin die Frage, inwieweit sich diese Veränderungen auf die Verletzbarkeit der Kreuzbänder auswirken. Es bleibt zu klären, ob sich

in gewissen Altersgruppen größere Verletzungsraten zeigen, weil die Strukturen sich in einer morphologischen Veränderung befinden, oder ob sich diese eher auf den größeren Anspruch der nicht vollständig ausgereiften Strukturen zurückführen lassen. Es erscheint sinnvoll und notwendig, weitere Studien mit und für die pädiatrische Population in Bezug auf die Belastung, Verletzungsmuster und Therapiemöglichkeiten der Kniebinnenstrukturen, insbesondere der kindlichen Kreuzbänder, durchzuführen. Ein nicht unwesentlicher Teil von Langzeitfolgen und -schäden, welche nach Verletzungen des Kniegelenks in Kindern und Adoleszenten auftreten, könnten sich damit gegebenenfalls in Zukunft vermeiden lassen.

Schließlich wurden anhand der erhobenen Daten dieser Studie repräsentative Normwerte für die Morphologie der kindlichen Kniegelenksbinnenstrukturen über verschiedene Altersgruppen hinweg aufgezeigt (s. Anhang 1). Diese sollen in Zukunft als wertvolle Grundlage in der Planung für die chirurgische Intervention im Sinne einer Kreuzbandrekonstruktion bei Kindern und Jugendlichen dienen und als Richtwerte für die Größe von Sehnentransplantaten fungieren.

	Gesamt						Weiblich						Männlich					
							Altergruppen											
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
VKBLängesag (mm)	18,00	20,44	26,18	32,18	33,16	36,79	17,31	22,04	28,32	31,80	31,98	34,49	19,15	19,16	24,42	32,84	34,45	38,90
VKBapbreite (mm)	3,02	3,64	4,46	5,39	5,63	6,24	2,92	3,88	4,78	5,39	5,40	6,06	3,18	3,46	4,21	5,39	5,88	6,41
VKBmlbreite (mm)	2,43	2,86	3,24	3,80	4,00	4,50	2,39	3,03	3,29	3,76	3,92	4,11	2,52	2,72	3,21	3,85	4,09	4,86
VKSagAnstiegswinkel (°)	42,84	45,82	48,07	51,48	51,90	51,88	43,04	46,36	48,30	52,07	52,83	51,79	42,52	45,39	47,88	50,49	50,89	51,97
VKBCorAnstiegs- Winkel (°)	49,80	55,33	59,93	64,20	64,16	68,89	47,83	53,91	62,10	64,03	63,63	68,20	53,08	56,46	58,16	64,49	64,75	69,52
Bikordylärebite (mm)	51,54	58,47	65,96	67,48	69,96	71,74	49,08	57,23	64,00	64,65	65,97	66,31	55,66	59,47	67,57	72,29	74,37	76,71
Notchbreite (mm)	14,43	14,43	16,26	16,60	17,11	17,81	13,62	14,02	15,82	15,44	16,10	15,80	15,78	14,75	16,62	18,58	18,21	19,64
VKBbreite (mm)	4,00	4,37	5,46	5,35	5,52	5,78	4,08	3,98	5,33	5,03	5,15	5,13	3,87	4,68	5,56	5,89	5,91	6,38
HKBBbreite (mm)	7,23	7,54	8,47	8,50	8,88	9,13	6,76	7,64	7,84	7,88	8,46	8,02	8,03	7,46	8,99	9,56	9,34	10,16
HKBLängesag (mm)	27,19	31,18	36,48	40,17	41,18	43,55	27,65	31,37	36,17	39,86	39,58	41,25	26,43	31,03	36,73	40,68	42,96	45,67
Latfemurkondylenbreite (mm)	38,64	46,00	55,61	60,91	63,51	66,77	37,17	47,16	56,72	60,00	60,44	63,68	41,10	45,08	54,70	62,44	66,92	69,60
VKBFläche (mm <sup>2</sup> )	5,76	8,20	11,49	16,06	17,74	22,10	5,43	9,20	12,53	15,93	16,64	19,56	6,31	7,40	10,63	16,29	18,95	24,43
VKBVolumen (mm <sup>3</sup> )	103,73	169,39	305,12	518,50	596,76	821,22	94,50	201,80	356,95	509,30	534,83	675,76	119,12	143,46	262,72	534,16	665,21	954,56

Abbildung 90: Normwerte für Absolutwerte, nach Altersgruppen eingeteilt, nach Geschlecht unterschieden

## Literaturverzeichnis

1. Anderson AF, Lipscomb AB, Liudahl KJ, Addlestone RB (1987) Analysis of the intercondylar notch by computed tomography. *Am J Sports Med* 15:547–552
2. Anderson AF, Dome DC, Gautam S, Awh MH, Rennirt GW (2001) Correlation of anthropometric measurements, strength, anterior cruciate ligament size, and intercondylar notch characteristics to sex differences in anterior cruciate ligament tear rates. *Am J Sports Med* 29:58–66
3. Arthur JR, Haglin JM, Makovicka JL, Chhabra A (2020) Anatomy and Biomechanics of the Posterior Cruciate Ligament and Their Surgical Implications. *Sports Med Arthrosc Rev* 28:e1–e10
4. Bloch F (1951) Nuclear induction. *Physica* 17:272–281
5. Bonthuis M, Jager KJ, Abu-Hanna A, Verrina E, Schaefer F, van Stralen KJ (2013) Application of body mass index according to height-age in short and tall children. *PLoS One* 8:e72068
6. Bowman KF, Sekiya JK (2010) Anatomy and biomechanics of the posterior cruciate ligament, medial and lateral sides of the knee. *Sports Med Arthrosc Rev* 18:222–229
7. Chandrashekar N, Slauterbeck J, Hashemi J (2005) Sex-based differences in the anthropometric characteristics of the anterior cruciate ligament and its relation to intercondylar notch geometry: a cadaveric study. *Am J Sports Med* 33:1492–1498
8. Charlton WPH, St John TA, Ciccotti MG, Harrison N, Schweitzer M (2002) Differences in femoral notch anatomy between men and women: a magnetic resonance imaging study. *Am J Sports Med* 30:329–333
9. Chhabra A, Elliott CC, Miller MD (2001) Normal Anatomy and Biomechanics of the Knee. *Sports Med Arthrosc Rev* 9:166–177
10. Chin KR, Dalury DF, Zurakowski D, Scott RD (2002) Intraoperative measurements of male and female distal femurs during primary total knee arthroplasty. *J Knee Surg* 15:213–217
11. Cone SG, Simpson SG, Piedrahita JA, Fordham LA, Spang JT, Fisher MB (2017) Orientation changes in the cruciate ligaments of the knee during skeletal growth: A porcine model. *J Orthop Res Off Publ Orthop Res Soc* 35:2725–2732
12. Dalip D, Iwanaga J, Oskouian RJ, Tubbs RS (2018) A Comprehensive Review of the Fabella Bone. *Cureus* 10:e2736
13. Damadian R (1971) Tumor detection by nuclear magnetic resonance. *Science* 171:1151–1153
14. Damadian R, Minkoff L, Goldsmith M, Stanford M, Koutcher J (1976) Tumor imaging in a live animal by focusing NMR (FONAR). *Physiol Chem Phys* 8:61–65
15. Davies H, Unwin A, Aichroth P (2004) The posterolateral corner of the knee. Anatomy, biomechanics and management of injuries. *Injury* 35:68–75

16. Davis TJ, Shelbourne KD, Klootwyk TE (1999) Correlation of the intercondylar notch width of the femur to the width of the anterior and posterior cruciate ligaments. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 7:209–214
17. DeFrate LE, Gill TJ, Li G (2004) In vivo function of the posterior cruciate ligament during weightbearing knee flexion. *Am J Sports Med* 32:1923–1928
18. Dienst M, Schneider G, Altmeyer K, Voelkering K, Georg T, Kramann B, Kohn D (2007) Correlation of intercondylar notch cross sections to the ACL size: a high resolution MR tomographic in vivo analysis. *Arch Orthop Trauma Surg* 127:253–260
19. Domzalski M, Grzelak P, Gabos P (2010) Risk factors for Anterior Cruciate Ligament injury in skeletally immature patients: analysis of intercondylar notch width using Magnetic Resonance Imaging. *Int Orthop* 34:703–707
20. Domzalski ME, Keller MS, Grzelak P, Gabos P (2015) MRI evaluation of the development of intercondylar notch width in children. *Surg Radiol Anat SRA* 37:609–615
21. Dorey FJ (2010) In Brief: Statistics in Brief: Confidence Intervals: What is the Real Result in the Target Population? *Clin Orthop* 468:3137–3138
22. Dunn KL, Lam KC, Valovich McLeod TC (2016) Early Operative Versus Delayed or Nonoperative Treatment of Anterior Cruciate Ligament Injuries in Pediatric Patients. *J Athl Train* 51:425–427
23. Edelman RR, Hesselink J, Zlatkin M *Clinical Magnetic Resonance Imaging* 3rd Edition, 2006; p 3-5; 23; 55-56; 76; 88
24. Fabricant PD, Brusalis CM, Schachne JM, Matava MJ (2020) Which Metrics Are Being Used to Evaluate Children and Adolescents After ACL Reconstruction? A Systematic Review. *Arthrosc Sports Med Rehabil* 2:e417–e428
25. Fanelli GC, Beck JD, Edson CJ (2010) Current concepts review: the posterior cruciate ligament. *J Knee Surg* 23:61–72
26. Fernández-Jaén T, López-Alcorocho JM, Rodríguez-Iñigo E, Castellán F, Hernández JC, Guillén-García P (2015) The Importance of the Intercondylar Notch in Anterior Cruciate Ligament Tears. *Orthop J Sports Med* 3:2325967115597882
27. Flandry F, Hommel G (2011) Normal anatomy and biomechanics of the knee. *Sports Med Arthrosc Rev* 19:82–92
28. Ge X, Zhang L, Xiang G, Hu Y, Lun D (2020) Cross-Sectional Area Measurement Techniques of Soft Tissue: A Literature Review. *Orthop Surg* 12:1547–1566
29. Gentili A, Seeger LL, Yao L, Do HM (1994) Anterior cruciate ligament tear: indirect signs at MR imaging. *Radiology* 193:835–840
30. Girgis FG, Marshall JL, Monajem A (1975) The cruciate ligaments of the knee joint. Anatomical, functional and experimental analysis. *Clin Orthop* 216–231
31. Griffin LY, Agel J, Albohm MJ, Arendt EA, Dick RW, Garrett WE, Garrick JG, Hewett TE, Huston L, Ireland ML, Johnson RJ, Kibler WB, Lephart S, Lewis JL, Lindenfeld TN, Mandelbaum BR, Marchak P, Teitz CC, Wojtyls EM (2000) Noncontact anterior cruciate

- ligament injuries: risk factors and prevention strategies. *J Am Acad Orthop Surg* 8:141–150
33. Grood ES, Noyes FR, Butler DL, Suntay WJ (1981) Ligamentous and capsular restraints preventing straight medial and lateral laxity in intact human cadaver knees. *J Bone Joint Surg Am* 63:1257–1269
  34. Grover JS, Bassett LW, Gross ML, Seeger LL, Finerman GA (1990) Posterior cruciate ligament: MR imaging. *Radiology* 174:527–530
  35. Hashemi J, Chandrashekar N, Cowden C, Slaughterbeck J (2005) An alternative method of anthropometry of anterior cruciate ligament through 3-D digital image reconstruction. *J Biomech* 38:551–555
  36. Hashemi J, Mansouri H, Chandrashekar N, Slaughterbeck JR, Hardy DM, Beynon BD (2011) Age, sex, body anthropometry, and ACL size predict the structural properties of the human anterior cruciate ligament. *J Orthop Res Off Publ Orthop Res Soc* 29:993–1001
  37. Hedderwick M, Stringer MD, McRedmond L, Meikle GR, Woodley SJ (2017) The oblique popliteal ligament: an anatomic and MRI investigation. *Surg Radiol Anat SRA* 39:1017–1027
  38. Hewett TE, Myer GD, Ford KR, Heidt RS, Colosimo AJ, McLean SG, van den Bogert AJ, Paterno MV, Succop P (2005) Biomechanical measures of neuromuscular control and valgus loading of the knee predict anterior cruciate ligament injury risk in female athletes: a prospective study. *Am J Sports Med* 33:492–501
  39. Huang M, Li Y, Li H, Liao C, Xu H, Luo X (2020) Predictive effects of the intercondylar notch morphology on anterior cruciate ligament injury in males. *Medicine (Baltimore)* 99:e19411
  40. Joseph AM, Collins CL, Henke NM, Yard EE, Fields SK, Comstock RD (2013) A multisport epidemiologic comparison of anterior cruciate ligament injuries in high school athletics. *J Athl Train* 48:810–817
  41. Kim HK, Laor T, Shire NJ, Bean JA, Dardzinski BJ (2008) Anterior and Posterior Cruciate Ligaments at Different Patient Ages: MR Imaging Findings. *Radiology* 247:826–835
  42. Kirch W, Herausgeber (2008) *Pearson's Correlation Coefficient*. Springer Netherlands, Dordrecht. URL: [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5614-7\\_2569](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5614-7_2569)
  43. Kohn D, Schneider G, Dienst M, Rupp S (2002) [Diagnosis of rupture of the anterior cruciate ligament]. *Orthopade* 31:719–730
  44. Kohn D, Abermann E, Herausgeber (2016) *Expertise Knie*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart New York. 19-52; 87-95
  45. Kreisler, P (2003) 20 Years of Development and a Constantly Improving Performance. *Magnetom. Magnetom Flash Siemens Med* 1:124–127
  46. LaPrade RF, Morgan PM, Wentorf FA, Johansen S, Engebretsen L (2007) The anatomy of the posterior aspect of the knee. An anatomic study. *J Bone Joint Surg Am* 89:758–764

47. Lauterbur PC (1983) NMR Imaging in Medicine: History, Principles and Prospects. Proc Annu Symp Comput Appl Med Care 8–10
48. Lauterbur PC (1989) Image formation by induced local interactions. Examples employing nuclear magnetic resonance. 1973. Clin Orthop 3–6
49. Li G, DeFrate LE, Sun H, Gill TJ (2004) In vivo elongation of the anterior cruciate ligament and posterior cruciate ligament during knee flexion. Am J Sports Med 32:1415–1420
50. Liljequist D, Elfving B, Roaldsen KS (2019) Intraclass correlation – A discussion and demonstration of basic features. PLOS ONE 14:e0219854
51. Lima FM, Debieux P, Astur DC, Luzo MVM, Cohen M, Cardoso FN, Aihara AY, Grimberg A, Fernandes ARC (2019) The development of the anterior cruciate ligament in the paediatric population. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc Off J ESSKA 27:3354–3363
52. Louw QA, Manilall J, Grimmer KA (2008) Epidemiology of knee injuries among adolescents: a systematic review. Br J Sports Med 42:2–10
53. Lund-Hanssen H, Gannon J, Engebretsen L, Holen KJ, Anda S, Vatten L (1994) Intercondylar notch width and the risk for anterior cruciate ligament rupture. A case-control study in 46 female handball players. Acta Orthop Scand 65:529–532
54. Mall NA, Lee AS, Cole BJ, Verma NN (2013) The Functional and Surgical Anatomy of the Anterior Cruciate Ligament. Oper Tech Sports Med 21:2–9
55. Mallard J (1983) NMR imaging at Aberdeen: A historical perspective. Partain CL James AE Rollo FD Al Eds Nucl Magn Reson NMR Imaging Saunders Phila 15–41
56. Mansfield P, Pykett IL (2011) Biological and medical imaging by NMR. 1978. J Magn Reson San Diego Calif 1997 213:513–531
57. Masouros SD, Bull AMJ, Amis AA (2010) (i) Biomechanics of the knee joint. Orthop Trauma 24:84–91
58. Miyasaka K (1991) The incidence of knee ligament injuries in the general population. Am J Knee Surg 3–8
59. Montalvo AM, Schneider DK, Yut L, Webster KE, Beynon B, Kocher MS, Myer GD (2019) „What’s my risk of sustaining an ACL injury while playing sports?“ A systematic review with meta-analysis. Br J Sports Med 53:1003–1012
60. Muneta T, Takakuda K, Yamamoto H (1997) Intercondylar Notch Width and Its Relation to the Configuration and Cross-Sectional Area of the Anterior Cruciate Ligament: A Cadaveric Knee Study. Am J Sports Med 25:69–72
61. Myrick KM, Voss A, Feinn RS, Martin T, Mele BM, Garbalosa JC (2019) Effects of season long participation on ACL volume in female intercollegiate soccer athletes. J Exp Orthop 6:12
62. Orakzai SH, Egan CM, Eustace S, Kenny P, O’flanagan SJ, Keogh P (2010) Correlation of intra-articular osseous measurements with posterior cruciate ligament length on MRI scans. Br J Radiol 83:23–27

63. Osti M, Tschann P, Künzel KH, Benedetto KP (2012) Anatomic Characteristics and Radiographic References of the Anterolateral and Posteromedial Bundles of the Posterior Cruciate Ligament. *Am J Sports Med* 40:1558–1563
64. Palmer I (2007) On the injuries to the ligaments of the knee joint: a clinical study. 1938. *Clin Orthop* 454:17–22; discussion 14
65. Paraskevas G, Papaziogas B, Kitsoulis P, Spanidou S (2006) A study on the morphology of the popliteus muscle and arcuate popliteal ligament. *Folia Morphol* 65:381–384
66. Patel DV, Allen AA, Warren RF, Wickiewicz TL, Simonian PT (2007) The nonoperative treatment of acute, isolated (partial or complete) posterior cruciate ligament-deficient knees: an intermediate-term follow-up study. *HSS J Musculoskelet J Hosp Spec Surg* 3:137–146
67. Petersen W, Tillmann B (2002) [Anatomy and function of the anterior cruciate ligament]. *Orthopade* 31:710–718
68. Pinskerova V, Nemeč K, Landor I (2014) Gender differences in the morphology of the trochlea and the distal femur. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc Off J ESSKA* 22:2342–2349
69. Purcell EM, Bloembergen N, Pound RV (1946) Resonance Absorption by Nuclear Magnetic Moments in a Single Crystal of CaF<sub>2</sub>. *Phys Rev* 70:988–988
70. Putur DE, Slaven SE, Niu EL (2020) ACL Growth With Age in Pediatric Patients: An MRI Study. *J Pediatr Orthop* 40:438–447
71. Raja BS, Garg V, Paul S, Singh S, Thomas W, R K S, Verma A (2020) Assessment of Anterior Cruciate Ligament Tibial Footprint Sagittal Diameter and Orientation of the Ligament in the Intercondylar Notch in Indian Population: A Magnetic Resonance Imaging (MRI) Analysis. *Cureus* 12:e7511
72. Reicher MA, Rauschnig W, Gold RH, Bassett LW, Lufkin RB, Glen W (1985) High-resolution magnetic resonance imaging of the knee joint: normal anatomy. *AJR Am J Roentgenol* 145:895–902
73. Reid JC, Yonke B, Tompkins M (2017) The angle of inclination of the native ACL in the coronal and sagittal planes. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc Off J ESSKA* 25:1101–1105
74. Rosenstein AD, Veazey B, Shephard D, Xu KT (2008) Gender differences in the distal femur dimensions and variation patterns in relation to TKA component sizing. *Orthopedics* 31:652
75. Rr E (2014) The history of MR imaging as seen through the pages of radiology. *Radiology* 273:181–200
76. Samora W, Beran MC, Parikh SN (2016) Intercondylar Roof Inclination Angle: Is It a Risk Factor for ACL Tears or Tibial Spine Fractures? *J Pediatr Orthop* 36:e71-74
77. Sanders TL, Pareek A, Barrett IJ, Kremers HM, Bryan AJ, Stuart MJ, Levy BA, Krych AJ (2017) Incidence and long-term follow-up of isolated posterior cruciate ligament tears. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc Off J ESSKA* 25:3017–3023

78. Saxena A, Ray B, Rajagopal KV, D'Souza AS, Pyrtuh S (2012) Morphometry and magnetic resonance imaging of anterior cruciate ligament and measurement of secondary signs of anterior cruciate ligament tear. *Bratisl Lek Listy* 113:539–543
79. Shaw L, Finch CF (2017) Trends in Pediatric and Adolescent Anterior Cruciate Ligament Injuries in Victoria, Australia 2005–2015. *Int J Environ Res Public Health* 14:599
80. Shelbourne KD, Davis TJ, Klootwyk TE (1998) The relationship between intercondylar notch width of the femur and the incidence of anterior cruciate ligament tears. A prospective study. *Am J Sports Med* 26:402–408
81. Shelbourne KD, Kerr B (2001) The relationship of femoral intercondylar notch width to height, weight, and sex in patients with intact anterior cruciate ligaments. *Am J Knee Surg* 14:92–96
82. Shelbourne KD, Benner RW, Ringenberg JD, Gray T (2017) Optimal management of posterior cruciate ligament injuries: current perspectives. *Orthop Res Rev* 9:13–22
83. Soliman A, Itani M, Jour C, Shaat M, Elsiddig S, Souiek F, Al-Naimi N, Alsaadi RK, De Sanctis V (2019) Relation between changes in weight parameters and height parameters in prepubertal children: daily weight gain and BMI changes in relation to linear growth during nutritional rehabilitation of underweight children. *Acta Bio Medica Atenei Parm* 90:7–19
84. Souryal TO, Moore HA, Evans JP (1988) Bilaterality in anterior cruciate ligament injuries: associated intercondylar notch stenosis. *Am J Sports Med* 16:449–454
85. Souryal TO, Freeman TR (1993) Intercondylar notch size and anterior cruciate ligament injuries in athletes. A prospective study. *Am J Sports Med* 21:535–539
86. Tuca M, Hayter C, Potter H, Marx R, Green DW (2016) Anterior cruciate ligament and intercondylar notch growth plateaus prior to cessation of longitudinal growth: an MRI observational study. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc Off J ESSKA* 24:780–787
87. Wang C-J (2002) Injuries to the posterior cruciate ligament and posterolateral instabilities of the knee. *Chang Gung Med J* 25:288–297
88. Whitney DC, Sturnick DR, Vacek PM, DeSarno MJ, Gardner-Morse M, Tourville TW, Smith HC, Slaughterbeck JR, Johnson RJ, Shultz SJ, Hashemi J, Beynon BD (2014) Relationship Between the Risk of Suffering a First-Time Noncontact ACL Injury and Geometry of the Femoral Notch and ACL: A Prospective Cohort Study With a Nested Case-Control Analysis. *Am J Sports Med* 42:1796–1805
89. Woo SL, Debski RE, Withrow JD, Jannashek MA (1999) Current Concepts: Biomechanics of knee ligaments. *Am J Sports Med* 27:533–543
90. Woo SL-Y, Abramowitch SD, Kilger R, Liang R (2006) Biomechanics of knee ligaments: injury, healing, and repair. *J Biomech* 39:1–20
91. Yasuda K (1995) [Current advances and future direction of arthroscopic surgery for disorders in the knee joint]. *Hokkaido Igaku Zasshi* 70:383–389
92. Yellin JL, Parisien RL, Talathi NS, Farooqi AS, Kocher MS, Ganley TJ (2021) Narrow Notch Width is a Risk Factor for Anterior Cruciate Ligament Injury in the Pediatric Population: A Multicenter Study. *Arthrosc Sports Med Rehabil* 3:e823–e828

93. Zantop T, Petersen W, Sekiya JK, Musahl V, Fu FH (2006) Anterior cruciate ligament anatomy and function relating to anatomical reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc Off J ESSKA* 14:982–992
94. Zeng C, Gao S, Wei J, Yang T, Cheng L, Luo W, Tu M, Xie Q, Hu Z, Liu P, Li H, Yang T, Zhou B, Lei G (2013) The influence of the intercondylar notch dimensions on injury of the anterior cruciate ligament: a meta-analysis. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc Off J ESSKA* 21:804–815
95. Zhang L, Liu G, Han B, Wang Z, Yan Y, Ma J, Wei P (2020) Knee Joint Biomechanics in Physiological Conditions and How Pathologies Can Affect It: A Systematic Review. *Appl Bionics Biomech* 2020:7451683–7451683
96. 21-01 | Facts and figures: Organ distribution of MRI studies - Number of MRI machines worldwide - Field strength of MRI machines. Last update October 2018 | MRI NMR Magnetic Resonance • Essentials, introduction, basic principles, facts, history | The primer of EMRF/TRTF. URL: <https://www.magnetic-resonance.org/ch/21-01.html>
97. MAGNETOM Vida. URL: <https://www.siemens-healthineers.com/en-us/medical-imaging/magnetic-resonance-imaging/3t-mri-scanner/magnetom-vida>
98. Length/height-for-age. URL: <https://www.who.int/tools/child-growth-standards/standards/length-height-for-age>

## Publikation

Parallel zur Ausarbeitung der Dissertationsarbeit wurde ein Paper angefertigt, welche unter folgendem Titel eingereicht worden ist:

"The size and morphology of anterior and posterior cruciate ligaments in different paediatric age groups: a MRI analysis"

Brockmeyer M, Norrick S, Wagenpfeil G, Stroeder J, Landgraeber S

Submission: American Journal of Sports Medicine

## Danksagung

Ich möchte an dieser Stelle gerne allen danken, die mich bei der Erstellung der vorliegenden Promotionsarbeit unterstützt haben.

Herrn Prof. Dr. Med. Stefan Landgraeber, danke ich für die Überlassung des Themas und für die konstruktiven Ratschläge und Anregungen bei Fertigstellung der Arbeit.

Herrn Dr. Med. Matthias Brockmeyer danke ich für die einzigartige Betreuung, dem großen Engagement und der Mithilfe bei der Durchführung der Messungen, der Auswertung sowie der Erstellung der Arbeit. Er stand mir stets mit hilfreichen Ratschlägen und konstruktiver Kritik zur Seite und hat mich gelehrt wissenschaftlich zu Arbeiten.

Herrn Dr. Med. Jonas Stroeder danke ich für das Bereitstellen der radiologischen Untersuchungen, sowie seine Unterstützung bei Entwicklung und Durchführung der Messmethodik.

Ich danke außerdem Frau Dipl. Stat. Gudrun Wagenpfeil für die Unterstützung während der Erstellung der Statistiken, der Erklärungen und Erläuterungen bei der statistischen Auswertung.

Ohne die Unterstützung wäre die Durchführung und Fertigstellung dieser Arbeit nicht möglich gewesen. Ich danke Ihnen von Herzen.

## Lebenslauf

Aus datenschutzrechtlichen Gründen wird der Lebenslauf in der elektronischen Fassung der Dissertation nicht veröffentlicht.

Tag der Promotion: 09.03.2023

Dekan: Univ.-Prof. Dr. med. M. Menger

Berichterstatter: Prof. Dr. med. S. Landgraeber

Prof. Dr. med. T. Pohlemann