

Aus der Klinik für Allgemeine Chirurgie, Viszeral-, Gefäß- und Kinderchirurgie,
Universitätsklinikum des Saarlandes, Homburg/Saar
Direktor: Professor Dr. med. Matthias Glanemann

**Physikalische und morphologische
Haarcharakteristika von
Pilonidalsinuspatienten und ihren
Vergleichsprobanden.**

Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin
der Medizinischen Fakultät
der UNIVERSITÄT DES SAARLANDES
2017

vorgelegt von: Friederike Dorothee Bosche
geb. am: 12.12.1990 in Düsseldorf

Erstberichterstatter:

Zweitberichterstatter:

Inhaltsverzeichnis

0	Abkürzungsverzeichnis.....	IV
1	Zusammenfassung / Summary.....	1
1.1	Zusammenfassung.....	1
1.2	Summary.....	2
2	Einleitung.....	2
2.1	Allgemeines – Definition, Ätiologie.....	2
2.2	Physikalische Grundlagen.....	6
2.3	Biologische / physiologische Grundlagen.....	8
2.3.1	Haut.....	8
2.3.2	Haar (Pilus).....	9
2.4	Entwicklung eines Testverfahrens zur Bestimmung der Haarfestigkeit.....	13
2.4.1	Knickttest.....	16
2.4.2	Biegetest.....	18
2.5	Fragestellung.....	20
3	Patienten und Methoden.....	20
3.1	Patientenkollektiv.....	20
3.2	Haarentnahme (Epilation und intraoperative Exzision).....	22
3.3	Haarsortierung und Konservierung.....	24
3.4	Etablierung und Evaluation des Testverfahrens.....	25
3.4.1	Einspannlänge.....	25
3.4.2	Testentscheidung.....	27
3.4.3	Mehrfacheinspannungen.....	28
3.4.4	Abstand zur Haarwurzel.....	30
3.4.5	Multitestungen.....	31
3.4.6	Nass-Trocken-Testung.....	34
3.4.7	Lagerung der Haare.....	35
3.4.8	Färbung der Haare mit Toluidinblau.....	36
3.4.9	Testung wurzelloser Haare.....	38
3.4.10	Anzahl und Auswahl der Testhaare.....	39

3.4.11	Etablierter Standard des Testverfahrens	41
3.5	Mikroskopische und makroskopische Untersuchung der Haare.....	42
3.6	Haarherkunft und Wahrscheinlichkeit	43
3.6.1	Datenbehandlung.....	43
3.7	Statistik	44
4	Ergebnisse	47
4.1	Physikalische Haarcharakteristika	47
4.1.1	Detailvergleich der Haarregionen einzelner PSD-Patienten.....	47
4.1.2	Haaranzahl im Sinus	54
4.1.3	Haarlänge an den verschiedenen Regionen - PSD versus MP.....	55
4.1.4	Haardurchmesser im Vergleich - PSD versus MP	57
4.1.5	Haarkraft in den verschiedenen Haarregionen - PSD versus MP	59
4.1.6	Statistische Auswertung der physikalischen Haarcharakteristika.....	60
4.2	Morphologische Haarcharakteristika	63
5	Diskussion.....	73
5.1	Haartest	73
5.1.1	Messverfahren	73
5.1.2	Waagen und Wiegeprozess	75
5.2	Testhaare.....	77
5.3	Patientenkollektiv	79
5.4	Mikroskopie.....	80
5.5	Physikalische Haarcharakteristika	82
6	Literaturverzeichnis	89
7	Anhang.....	94
7.1	Heatmaps.....	94
7.2	Abbildungsverzeichnis.....	102
7.3	Dank	105
7.4	Publikation	106

0 Abkürzungsverzeichnis

PSD - Pilonidalsinus

POE - Protuberantia occipitalis externa

UR - unterer Rücken

IGF - Interglutealfalte

PSD-Patienten - Pilonidalsinuspatienten

MP-Patienten - Gesunde, gematchte Vergleichsprobanden

MP - Matched Pair

bzw. - beziehungsweise

etc. - et cetera

ca. - circa

vgl. - vergleiche

BMI - Body Mass Index

SD - Standardabweichung

MW - Mittelwert

SEM - Standardfehler des Mittelwertes

PVC - Polyvinylchlorid

1 Zusammenfassung / Summary

1.1 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Testverfahren zur Messung der axialen Belastbarkeit (axialen Kraftübertragung) von Haaren entwickelt und etabliert. Im Gegensatz zu sämtlichen bisher in der Literatur beschriebenen Testverfahren testet dieser Knicktest die maximale über ein individuelles Haar axial übertragbare Normalkraft auf eine Unterlage oder ein Gewebe. Mithilfe eines Knicktestes konnte nachgewiesen werden, dass die Haare aus jeder der drei Behaarungsregionen Protuberantia occipitalis externa (Hinterkopf), Glabella sacralis (unterer Rücken) und der Region des cranialen Drittels der Interglutealfalte bei PSD-Patienten hochsignifikant steifer sind als bei nach Geschlecht, Alter und BMI übereinstimmend ausgewählten gesunden matched-pair-Vergleichsprobanden. Weiterhin wurde mit dem Knicktest gezeigt, dass die axiale Belastbarkeit der Haare einer Person abhängig von der Körperregion variieren kann, und dass die Kraft pro Durchmesser der Haare von Pilonidalsinus-Patienten signifikant größer ist als die von Nicht-Pilonidalsinus-Probanden.

Die detaillierte Analyse von axialer Belastbarkeit und der Länge der Haare aus den Pilonidalsinus ergab, dass einige, aber sicher nicht alle Haare aus dem Haarnest aus der interglutealen Region stammen. Anhand von Wahrscheinlichkeitsberechnungen, dargestellt in Heatmaps, konnte gezeigt werden, dass bei einem weiteren Teil der Patienten die Sinushaare mit großer Wahrscheinlichkeit dem Haupthaarbereich des Hinterkopfes entstammen. Dieses gilt ebenso für Patienten, die weder am unteren Rücken noch in der Interglutealfalte behaart waren. Anhand licht- und elektronenmikroskopischer Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass sich Schnitthaar des Hinterkopfes in großer Menge im Haarnest von Pilonidalsinus-Patienten sammeln kann. Die Tatsache, dass Haare der gesamten dorsalen Schweißrinne im Pilonidalsinus-Nest zu finden sind, erklärt nicht, welche Haarregion ursächlich den Sinus erzeugt hat. In Zusammenschau mit der nachgewiesenen größeren axialen Haarfestigkeit bei Pilonidalsinuspatienten rücken Haare des Hinterkopfes, und hier im Besonderen scharfkantige Schnitthaare, in den Vordergrund der zukünftigen Forschung. Diese hier vorgelegten Ergebnisse eröffnen eine neue Herangehensweise zur Senkung der steigenden Inzidenz des Pilonidalsinus.

1.2 Summary

For this thesis a testing procedure was developed and established in order to determine the axial loading capacity (critical force) of hair. As opposed to all publications to date (up to today), this testing procedure (kinking test) determines the axially transmitted maximal force by each single hair onto a surface or an organic tissue. Using the kinking test, it could be shown that hair from all three tested hair regions such as protuberantia occipitalis externa (occiput), glabella sacralis (lower back) and the cranial third of the intergluteal fold of patients suffering pilonidal sinus disease was statistically highly significant stiffer than the hair of healthy patients, matched by sex, age and body mass index. According to our test results, the axial loading capacity of single hair varies depending on the hair region it was epilated from. Furthermore, the transmittable force per diameter of hair is higher in patients with pilonidal sinus as compared to their matched pairs.

A detailed analysis of axial loading capacity and hair length lead to the conclusion that some but not all hair derived from the pilonidal sinus nest originate from the intergluteal fold. Using probability visualizing heat maps, it could be demonstrated that the hair from the pilonidal sinus of some patients originates from the occiput. This also applies to patients who were hairless on the lower back and in the intergluteal fold. Light- and scanning electron microscopic pictures confirmed that a great number of cut hair can collect in the pilonidal sinus. The fact that hair from the whole length of the dorsal sweat crest may be found in the pilonidal sinus does not explain which hair region initially caused the sinus. Taking into account the proven higher axial loading capacity of hair in pilonidal patients, hair from the occiput, especially cut hair characterized by razor sharp tips, is of special interest for future investigations. These new results open up a new approach to lowering the rising incidence of pilonidal sinus.

2 Einleitung

2.1 Allgemeines – Definition, Ätiologie

Der Pilonidalsinus beschreibt ein gutartiges Haarnest, welches durch Haareinspießung im lumbosacralen Übergang und in dem kranialen Drittel der Interglutealfalte entsteht (4; 73). Hierbei handelt es sich um eine Erkrankung, die gehäuft bei jungen Männern im Alter von 18-24 Jahren erstmals symptomatisch wird (31). Die Inzidenz ist seit 30 Jahren steigend, dieses beschrieben Evers *et al.* 2011 bei Soldaten-Patienten der deutschen Bundeswehrkrankenhäuser von 0,3/1000 im Jahre 1985 auf 2,4/1000 im Jahre 2007 (41)

und bestätigten damit frühere Vermutungen von Karydakis und Allen-Mersh (3; 62; 63). Die Inzidenz in der deutschen Gesamtbevölkerung gab Doll 2010 mit etwa 1/1000 an (28). Entsprechend des Terminus, bestehend aus ‚Pilus‘ (lat. Haar) und ‚Nidus‘ (lat. Nest), finden sich in den Fistelgangsystemen regelmäßig Haare, die eine entscheidende Rolle im Entstehungsmechanismus des Pilonidalsinus spielen. Die Haare können in den Gängen und im Haarnest liegen oder im Narbenwall der Kapsel eingebettet sein. Sie entstehen aber nicht im Sinus, da dieser ohne Haarbälge ist (13).

Beispielhaft zeigt Abbildung 1 den Querschnitt eines exziierten Pilonidalsinus nach 24-stündiger Formalinfixierung vor der histopathologischen Präparation. Im Bild oben rechts befindet sich die behaarte Epidermis der Interglutealfalte (roter Pfeil), die durch einen Porus mit dem Fistelgangsystem verbunden ist (blaue Pfeile). Das Fistelgangsystem ist von

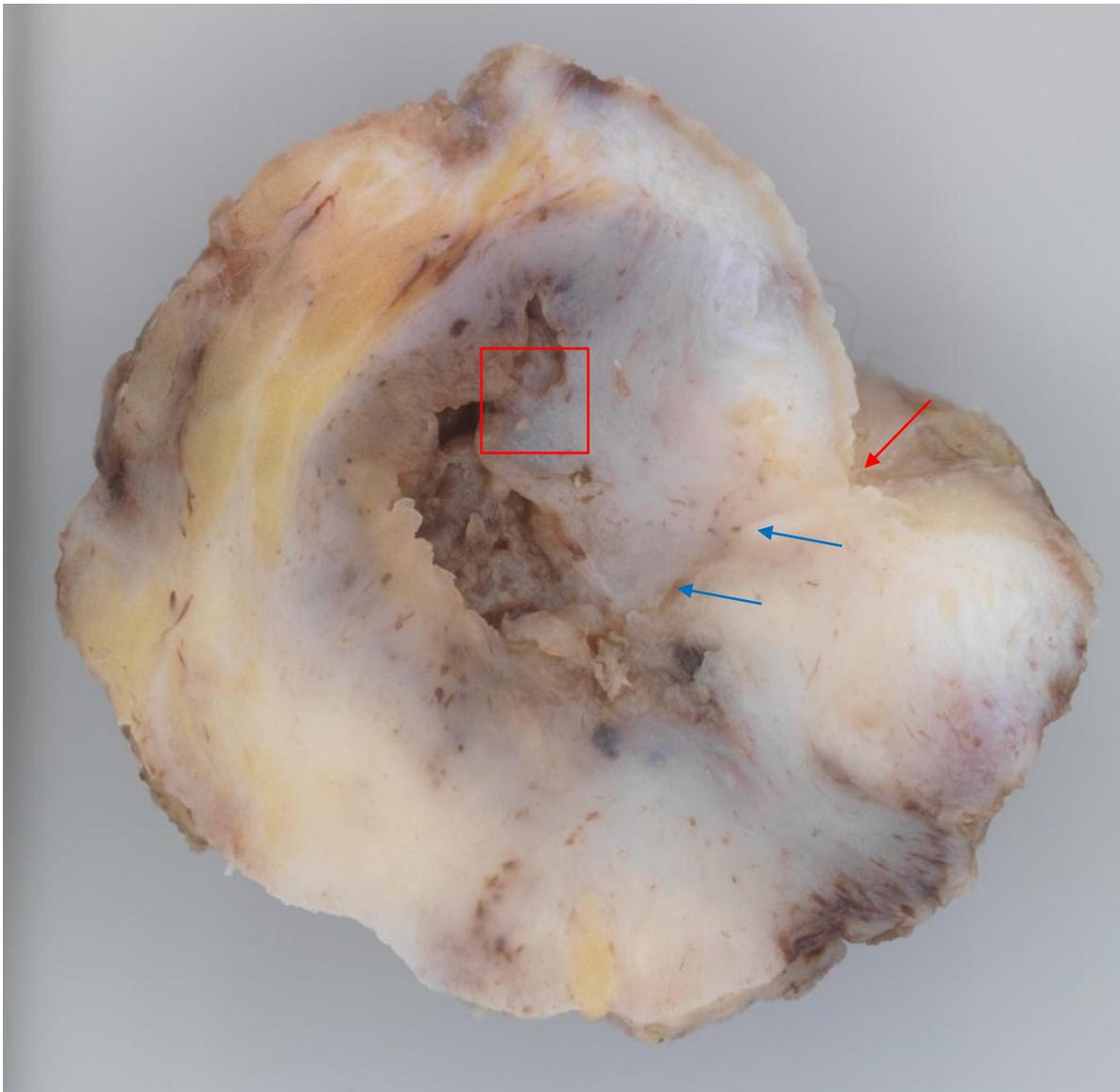


Abbildung 1: Exziiertes Präparat eines Pilonidalsinus nach 24h-Formalinfixierung; roter Pfeil = Interglutealfalte; blaue Pfeile = Fistelgang; roter Kasten = Ausschnitt von Abbildung 2



Abbildung 2: Vergrößerter Ausschnitt der Abbildung 1; roter Pfeil = in Narbenpannus eingebettetes Haar.

Fettgewebe und (unten rechts) auch von bräunlichem Muskelgewebe umgeben. In dem rot umrahmten Ausschnitt des Fistelgangsystems befindet sich ein Haar, das in der Vergrößerung dieses Ausschnittes (Abbildung 2) deutlich zu sehen ist.

Das Fistelgangsystem wurde intraoperativ mit Methylenblau eingefärbt, da die Anfärbung des Fistelgangsystems aufgrund der verbesserten Sichtbarkeit der Gänge und der folglich vollständigeren Entfernung des Fistelgangsystems die Rezidivrate des akuten Pilonidalsinus verringert (36). Der rote Pfeil in Abbildung 2 verweist auf ein in den Narbenpannus des Sinus eingebettetes Haar.

Die seit Langem währende Diskussion, ob es sich bei dem Pilonidalsinus um eine angeborene (22) oder eine erworbene Krankheitsentität handelt, geht im Moment von einer erworbenen Genese mit genetischer Komponente aus, da eine familiäre Häufung beschrieben wird (2; 17; 35; 108). Die Hypothese des Pilonidalsinus als erworbene Erkrankung postulierten erstmals Patey und Scarff 1946 (80). Histologische Untersuchungen Huestons unterstützten diese Hypothese, da er keine Haarfollikel in den mikroskopierten Schnitten fand und daraus folgerte, dass die Haare von außen durch die Haut eingedrungen sein müssen (58). Heute ist die Theorie eindringender Haare als Ursache des Pilonidalsinus, unter anderem Dank großer Studien von Karydakis (62; 63), weitgehend akzeptiert. Im Jahre 1992 stellte Karydakis folgende Formel zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit einer Pilonidalsinuserkrankung auf (63):

$$\text{Wahrscheinlichkeit} = \text{Hair (H)} * \text{Force (F)} * \text{Vulnerability (V)} \quad \text{<Formel 1>}$$

Er formuliert drei Einflussfaktoren auf die Entstehungswahrscheinlichkeit eines Pilonidalsinus:

1. Das Haar (H), das wiederum weitere Faktoren, sogenannte H-Faktoren besäße. Die H-Faktoren sind die Anzahl der losen Haare, die sich in der Interglutealfalte sammeln, die Schärfe der Haarenden, die Haarrigidität, die Haarform (lockig bzw. glatt) und die Schuppigkeit der Haare.

2. Die Kraft (F), die auf das Haar wirke und von der Tiefe, der Enge und der Reibung in der Interglutealfalte beeinflusst würde.

3. Die Verletzlichkeit (V) der Haut, die sich wiederum aus der Weichheit, eventuellen Mazerationen, Erosionen, Rissen, Wunden, Narben und der Porengröße der Haut zusammensetzen würde (63).

Karydakis erläuterte diese Formel detailliert, füllte sie jedoch nie mit Leben, obwohl sie nach seinen eigenen Angaben „die Varianz der Inzidenz des Pilonidalsinus in verschiedenen Bevölkerungsgruppen und die Varianz des Pilonidalsinus in derselben Bevölkerung über die Zeit“ erklären könne (63).

Dass diese Varianz in der Inzidenz zwischen unterschiedlichen Ethnien besteht, bestätigt eine 2013 im ‚Medical Surveillance Report‘ der U.S. Armed Forces erschienene Studie zur Inzidenz des Pilonidalsinus unter 35.517 Mitgliedern der U.S Army (1). Die Inzidenz unter Kaukasiern entsprach mit 2,2/1000 etwa der von Evers berechneten Inzidenz unter deutschen Bundeswehrsoldaten (41). Die Pilonidalsinus - Inzidenz von Schwarzafrikanern lag mit 1,3/1000 deutlich darunter, wie auch die Inzidenz unter Asiaten von 0,7/1000, obwohl bei allen U.S.-amerikanischen Armeemitgliedern ein vergleichbar westlicher Lebensstandard zu vermuten ist.

Eine steigende Inzidenz für Pilonidalsinus in der zivilen Bevölkerungsgruppe, genauer in Deutschland zwischen 2000 und 2012, wiesen Doll *et al.* kürzlich anhand von Zahlen des statistischen Bundesamtes nach (37). Weiterhin gelang es Doll *et al.* die Altersabhängigkeit der Inzidenz zu ermitteln, deren Maximum in Deutschland 2012 bei 1,75/1000 unter den 25-Jährigen betrug. Die Inzidenz der PSD-Patienten ist bei den unter 10-Jährigen und den über 60-Jährigen in Deutschland deutlich geringer (37).

Bisher ist ungeklärt, warum die PSD-Inzidenz derart in Abhängigkeit von der Ethnie und vom Alter der Patienten variiert. Ebenso wenig werden in der Literatur Gründe für die steigende Inzidenz in Militär und Gesellschaft beschrieben. Zwar wurde die Ursache in dem bundesweit ansteigenden Body-Mass-Index (BMI) vermutet, diese Theorie konnte jedoch bisher nicht bestätigt werden (37). Obwohl sich Haare so regelhaft in den Pilonidalsinus finden, dass sie sogar namensgebend waren, wurden diese dennoch bisher kaum näher in ihren mechanischen Eigenschaften untersucht.

2.2 Physikalische Grundlagen

Physikalisch gesehen nähert sich ein Haarschaft (ohne die bulböse Haarwurzel) im Hinblick auf seinen Aufbau dem Balken oder dem Stab aus der Lehre der Mechanik an. In beiden Fällen handelt es sich um stabförmige Bauteile, deren Querschnittsabmessungen deutlich kleiner sind als die Längenabmessungen. Ein Stab wird dabei in Richtung seiner Längsachse, also axial, auf Druck oder Zug belastet (46). Wird ein Stab auf Druck beansprucht, wirkt also eine Druckkraft auf diesen, spricht man vom sogenannten Druckstab. Die dabei in Richtung der Stabachse auf den Stab wirkende Kraft wird in der technischen Mechanik als Normalkraft (N) bezeichnet (89). Demgegenüber wird ein stabförmiges Bauteil, das senkrecht zu seiner Längsachse belastet wird, als Balken definiert (46). Die hierbei senkrecht zur Balkenachse wirkende Kraft wird Querkraft (Q) genannt (46). Die Querkraft kann bei einem ursprünglich geraden, elastischen Balken durch Deformierung zu einer Balkenbiegung führen (47).

Die Theorie des Pilonidalsinus erworbener Genese setzt das Eindringen von Haar in die Haut der Analfalte voraus (63). Der Gedanke, dass ein besonders festes, starres Haar hierzu deutlich besser geeignet ist als ein weiches, zartes Haar, liegt nahe und führte zu der Arbeitshypothese, dass PSD-Patienten in nicht vorhersagbarem Ausmaß steifere Haare der Kopf- und / oder Körperbehaarung vorweisen als gesunde Vergleichsprobanden.

Um die Festigkeit einzelner Haare zu bestimmen, wird das Haar im Folgenden als mechanischer, besonders schlanker Stab betrachtet. Aufgrund seiner Elastizität ähnelt ein Haar mechanisch einem Euler-Stab (48). Definitionsgemäß ist ein Eulerstab elastisch und kann sich im Gegensatz zum starren Stab verformen (48). Leonhard Euler (1707-1783) beschrieb vier unterschiedliche Fälle des Biegeknickens, bei denen axial druckbelastete Stäbe jeweils verschiedenen Randbedingungen ausgesetzt sind, da sie an ihren Enden jeweils ein- oder beidseits fest oder gelenkig eingespannt oder frei sind. In Anlehnung an die Eulerschen Knicklasten können die physikalischen Grundlagen des im Folgenden beschriebenen Versuchsaufbaus zum Knicktest beschrieben werden: Hierbei wird für das Haar, analog zum Eulerstab, ein optimierter, im unbelasteten Zustand exakt gerader Stab angenommen, auf den die äußere Kraft im Schwerpunkt des Querschnittes wirkt. Die kritische Kraft F_{krit} bezeichnet dabei den kleinsten Eigenwert (ungleich Null) der Last, unter der der Stab erstmals seitlich ausweicht. Der Knickversuch untersucht ein in einer Pinzette fest eingespanntes Haar, welches als Druckstab auf eine leicht haftende, ebene Oberfläche gedrückt wird. Das Haar ist folglich am oberen Ende (in der Pinzette) fest und unten, auf der Hauffläche, gelenkig gelagert (Abbildung 3).

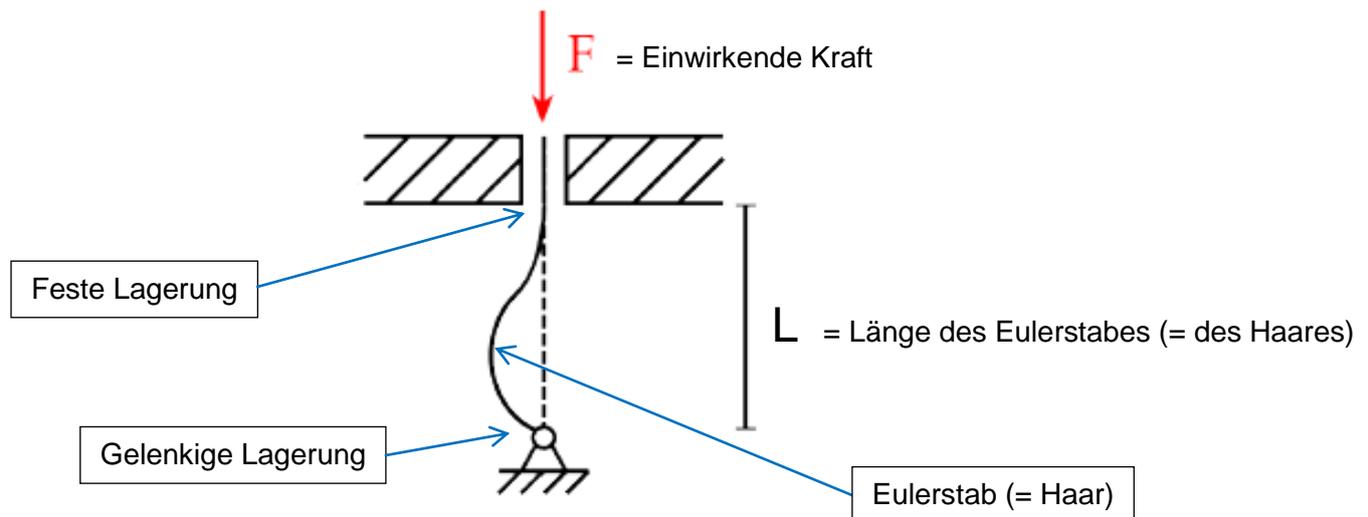


Abbildung 3: Physikalische Grundlagen des Knicktests.

Für einen wie in Abbildung 4 gelagerten Eulerstab gilt:

$$F_{\text{krit}} = \frac{4,49^2}{L^2} E * I \quad \text{<Formel 2>}$$

E entspricht dem Elastizitätsmodul, einem Materialkennwert aus der Werkstofftechnik, der den Zusammenhang zwischen Dehnung und Spannung eines Materials liefert. Der Elastizitätsmodul ist umso größer, je mehr Widerstand ein Material seiner elastischen Verformung entgegensetzt, also je steifer es ist. Ein Bauteil aus Stahl hat demzufolge einen größeren Elastizitätsmodul als ein Gummibauteil gleicher Abmessungen (45; 104).

Das Kürzel **I** beschreibt das axiale Flächenträgheitsmoment, welches die Querschnitts-Abhängigkeit der Verbiegung eines Stabes beschreibt. Je größer das axiale Flächenträgheitsmoment, desto geringer ist die Verbiegung des Stabes unter der Druckkraft, und desto kleiner sind die im Querschnitt entstehenden inneren Spannungen. Je größer der Querschnitt eines Haares ist, desto größer ist das Flächenträgheitsmoment **I** und desto starrer und damit weniger biegsam bzw. stabiler wird sich das Haar zeigen (49). **L** steht für die Länge des Eulerstabes.

Anhand dieser Formel 2 lässt sich herleiten, dass sich die kritische Kraft F_{krit} antiproportional zum Quadrat der Länge des Eulerstabes, in diesem Fall zur Länge des Haares, verhält. Außerdem hängt die F_{krit} direkt von $E * I$ ab. Der Elastizitätsmodul, multipliziert mit dem Flächenträgheitsmoment, entspricht in der Lehre der Mechanik der Biegesteifigkeit (89). Da es sich bei Haar um ein biologisches Material handelt, ist anzunehmen, dass der Elastizitätsmodul einzelner Haare variiert, ebenso wie deren Flächenträgheitsmomente (vgl.

Diskussion des Haartests, Seite 73 ff.). Die Berechnung von F_{krit} mithilfe obiger Formel ist demzufolge nicht möglich. Daher muss die F_{krit} (im Folgenden auch als axiale Haarkraft, Haarfestigkeit oder Kraft bezeichnet) jedes einzelnen Haares mithilfe des im Folgenden beschriebenen Knicktests direkt bestimmt werden.

2.3 Biologische / physiologische Grundlagen

2.3.1 Haut

Die menschliche Haut (Kutis) besteht aus drei Schichten: der außen gelegenen Epidermis, der darunter liegenden Dermis und letztlich der Subkutis mit ihren jeweiligen Adnexen wie Haarfollikeln, Nägeln, Schweiß- und Talgdrüsen. Der grundlegende Aufbau der Haut ist am gesamten menschlichen Körper gleich, es gibt jedoch zum Teil starke lokale Unterschiede der Hautbeschaffenheit. Variabel sind unter anderem die Dicke der epidermalen Hornschicht, des subkutanen Fettgewebes sowie Anzahl und Art der verschiedenen Hautanhangsgebilde (71).

Die Epidermis, die eigentliche Deckschicht des Körpers, misst in der Dicke zwischen 0,03 mm und 0,05 mm. Histologisch betrachtet handelt es sich bei der Epidermis um ein mehrschichtiges, zu mehr als 90% aus Keratinozyten bestehendes und deshalb verhornendes Plattenepithel (74). Die Keratinozyten wandern vom Stratum basale, der Grenze zur Dermis, nach hautoberflächenwärts, wo sie schließlich absterben und nach Verlust ihres Zellkerns und sämtlicher Organellen zunächst als polygonale Hornplättchen einen mechanisch und chemisch widerstandsfähigen Hautschutz bilden, um schließlich als Hautschuppen abgeschilfert zu werden. Dieser Vorgang, bis die Epidermis sich einmal komplett erneuert hat, dauert durchschnittlich einen Monat (70).

Die Dermis (Corium, Lederhaut) besteht hauptsächlich aus elastischen und kollagenen bindegewebigen Fasern und ist deutlich dicker als die Epidermis. Sie ist verantwortlich für die mechanische Belastbarkeit der Haut, da sie durch den gewellten, gitterartigen Verlauf der Kollagenfasern zugleich reißfest und reversibel dehnbar ist. Über die dermalen Blutgefäße (Plexus superficialis) wird auch die avaskuläre Epidermis durch Diffusion versorgt (71). Zudem enthält sie neben zahlreichen Nervenendigungen und Rezeptoren, unter anderem für den Temperatur- und den Tastsinn, auch die Talg- und Schweißdrüsen der Haut sowie die Haarfollikel.

Die Subkutis fungiert, da sie hauptsächlich aus von losem Bindegewebe umgebenem Fett besteht, als Energiespeicher und Schutzschicht. Als Verschiebeschicht und Druckpolster verbindet sie die Kutis mit den tiefer liegenden Geweben und führt die größeren Blutgefäße

(Plexus profundus) und Nerven. Einige Hautdrüsen und Haarfollikel können bis in die Subkutis hinunterreichen (70).

Die Haut untergliedert sich in Felderhaut und Leistenhaut. Letztere enthält lediglich Schweißdrüsen und keine weiteren Adnexe. Ihre Hornschicht besteht aus bis zu 100 Lagen von Hornzellen, und die Leistenhaut ist auch insgesamt deutlich dicker als die Felderhaut. Leistenhaut findet sich regelhaft an den palmaren Handflächen, den Fußsohlen, den Lippen, der Klitoris, sowie bei Männern an der Glans Penis.

Die rhombische Felderhaut hat eine ca. 25 Lagen umfassende Hornschicht. Sie bedeckt alle weiteren Hautareale und enthält sowohl Haarfollikel, als auch Schweiß- und Talgdrüsen (70). Demzufolge wird die gesamte dorsale Körperseite des Menschen, darunter auch die intergluteale Haut im lumbosacralen Übergang, von rhombischer Felderhaut gebildet.

2.3.2 Haar (Pilus)

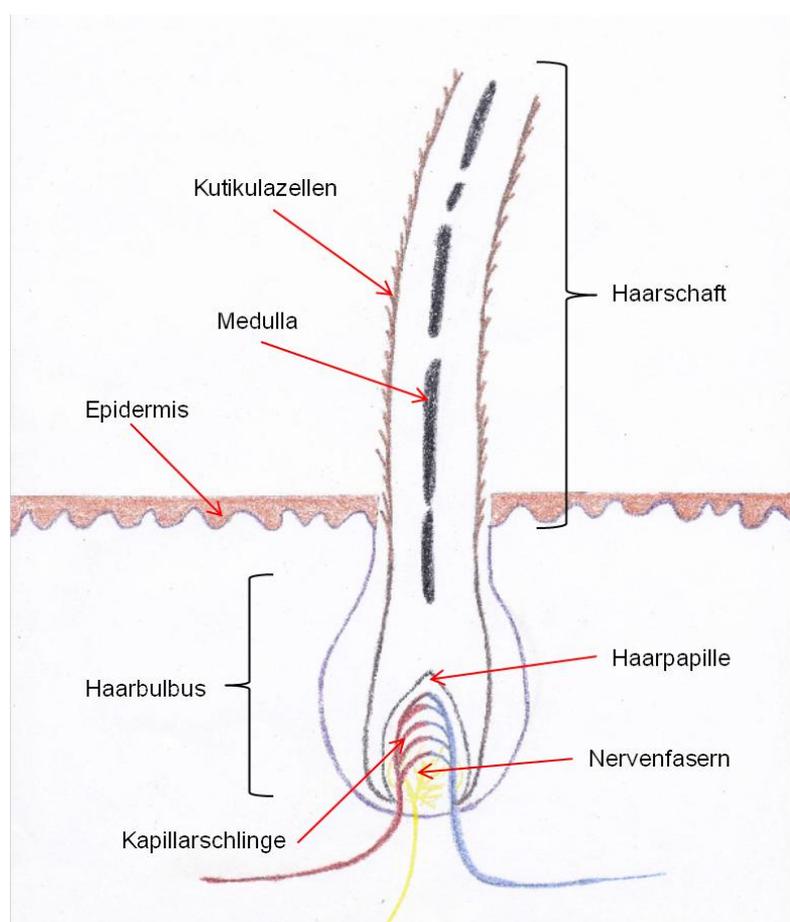


Abbildung 4: Vereinfachte Schemazeichnung des Haaraufbaus im Längsschnitt.

Insgesamt können vier verschiedene Haartypen unterschieden werden: Lanugo-, Vellus-, Terminal- und Sexualhaare. Die Lanugohaare bedecken den Fetus im Mutterleib und werden bereits im achten Lebensmonat abgestoßen (19), weshalb sie nur bei Frühgeborenen zu finden sind. Die Lanugohaare werden dann durch die zarten (Durchmesser $< 40 \mu\text{m}$), kurzen (kürzer als 2 cm), marklosen und unpigmentierten Vellushaare ersetzt (19). Das Vellushaar bildet beim Erwachsenen das normale Oberflächenhaar, das die Felderhaut des gesamten Körpers bedeckt (19). Alternativ definiert Clarence R. Robbins das Vellushaar mit

kürzer als 1 mm, dünner als 4 μm , unpigmentiert und mit einem kürzeren Lebenskreislauf, in dem sich Vellushaar zu neunzig Prozent der Zeit im telogenen Stadium befindet (86). Aufgrund der unkomplizierteren Handhabung wird in dieser Arbeit erstere, weniger diffizile Definition aus dem Standardwerk der Dermatologie verwendet.

An Kopf, Wimpern und Augenbrauen findet sich bereits bei der Geburt Terminalhaar (19). Dieses ist lang, dicker als 40 μm , pigmentiert und enthält häufig eine Medulla (Haarmark) (19). In der Pubertät entstehen schließlich unter Androgeneinfluss die Sexualhaare an definierten Körperarealen aus Vellushaar. Dazu zählen neben Achsel- und Schambehaarung auch Bart- und Körperbehaarung bei Männern (19).

Abbildung 4 visualisiert in einer Schemazeichnung den Haaraufbau im Längsschnitt. Die Haare werden in den Haarfollikeln, also zylindrischen Einstülpungen der Epidermis gebildet. Diese können bei Terminalhaar bis in die Subkutis hinunterreichen. Die Vellushaarfollikel befinden sich demgegenüber in der Dermis (71). Am unteren Ende des Haarfollikels befindet sich der verdickte Haarbulbus mit der zentral an dessen Grund gelegenen Haarpapille (19). Sie bildet das Wachstumszentrum des Haares und enthält eine Kapillarschlinge zur Versorgung des Haarbulbus und Nervenfasern (19). Der Haarbulbus enthält die stark proliferierenden Matrixzellen, deren Nachkommen langsam aufsteigen und sich lageabhängig zu den verschiedenen Zellen eines Haares differenzieren (71). Zwischen den Matrixzellen eingelagerte Melanozyten bestimmen die Haarfarbe (19). Dieser Differenzierungszone schließt sich eine keratogene Zone an, in der die Haarzellen verhornen, wodurch das Haar an Stabilität gewinnt (85). Knapp unter der Hautoberfläche beginnt der Haarschaft, der vollständig verhornte Teil des Haares, der über die Hautoberfläche hinausragt. Der Haarschaft stellt die im Rahmen dieser Arbeit hauptsächlich relevante Zone des (permanenten) Haares dar, da er den anteilig größten und stabilsten Teil des Haares bildet (19; 71; 85).

Das Haarwachstum ist ein zyklischer Prozess, beginnend mit der anagenen Phase, also derjenigen Wachstumsphase, die 2-6 Jahre andauern kann (85). In dieser Phase zeigen die Matrixzellen die starke mitotische Aktivität und der Haarfollikel erreicht seine maximale Größe (19). Die Dauer der anagenen Phase bestimmt die Länge des gebildeten Haares, wobei die Haarwachstumsrate bei Kopfhair am größten ist. Scheitelhaar wächst ca. 14 cm/Jahr und Schläfenhaar ca. 13 cm/Jahr; Körperhaar wächst hingegen mit ca. 10 cm/Jahr langsamer (85).

Für wenige Wochen folgt nun die katagene oder Übergangsphase, in der sich die metabolische Aktivität verlangsamt und bedingt durch zahlreiche Apoptosen der Haarbulbus auf ein Drittel seiner vorherigen Länge zusammenschrumpft (19). In dem 2-4 Monate andauernden Telogen findet keine Stoffwechselaktivität mehr statt (19), bis das Haar schließlich ausfällt. Zu diesem Zeitpunkt befindet sich im selben Haarschaft bereits das

nächste anagene Haar (19). Die normale Kopfhaut enthält über 80% anagene Haare, weniger als 20% der Haare befinden sich im telogenen Stadium und nur wenige in der kurzen katagenen Phase (19). Der Durchmesser menschlicher Haare variiert inter- und intraindividuell zwischen 40-120 μm (85) und hängt proportional von der Größe des Haarbulbus und der Haarpapille ab (19).

Von außen nach innen besteht das permanente Haar aus drei Schichten, der Kutikula (auch Haaroberhäutchen), der Haarrinde (auch Haarkortex genannt) sowie der nicht regelhaft vorhandenen Medulla, also dem Haarmark (85).

Die Kutikula setzt sich aus dachziegelartig überlappenden Zellen zusammen, die an ihrem jeweiligen proximalen Ende am Haarschaft anhaften, sodass ihr distales Ende, welches in Richtung der Haarspitze weist, leicht vom Haarschaft absteht. Sie messen ca. 0,5 μm in der Breite und sind etwa 45-60 μm lang. Menschliches Haar weist 6-8 Schichten derart angeordneter Kutikulazellen auf. In der Nähe der Haarwurzel liegen die Kutikulazellen dem Haarschaft noch gleichmäßig und geschmeidig an, doch schon einige Zentimeter weiter distal sind die zuvor gleichmäßigen Zellreihen aufgebrochen und die distalen Enden vieler Zellen stehen weit ab. Die Haaroberfläche wird dadurch mit zunehmender Entfernung von der Haarwurzel rauer. Hierbei handelt es sich um altersbedingte, aber auch mechanische Schäden am Haar durch beispielsweise Färben, Waschen und Kämmen (72; 84). Das elektronenmikroskopische Bild zeigt Kutikulazellen eines Kopfhaares (Abbildung 5).

Der Kortex bildet den größten Teil der Haarmasse und besteht aus spindelförmigen Zellen, deren Durchmesser 1-6 μm und deren Länge bis zu 150 μm betragen kann. Sie enthalten Makrofibrillen von 0,1-0,4 μm Durchmesser und diese beinhalten ihrerseits wiederum spiralförmig angeordnete Mikrofibrillen, die auch als Intermediärfilamente bezeichnet werden, und intermediäre Matrix (87).

Die Medulla ist in menschlichen Haaren nicht zwingend vorhanden und ist entweder gar nicht, diskontinuierlich oder kontinuierlich entlang der zentralen Haarachse vorzufinden. Sie kommt nur in Terminalhaar vor, nicht aber in Vellushaar. Die Zellen der Medulla schrumpfen im dehydrierten Zustand und hinterlassen dadurch luftgefüllte Vakuolen. Bedingt durch ihren geringen Anteil an der Masse eines Haare beeinflussen sie dessen mechanische und chemische Eigenschaften lediglich geringfügig (88). Wagner *et al.* untersuchten im Jahre 2007 die Medulla mittels Transmissionselektronenmikroskopie mit dem Ergebnis, dass sich die mechanischen Eigenschaften medullierter und unmedullierter Haare sehr ähneln. Als einen der wenigen Unterschiede ermittelten sie für unmedullierte Haare einen durchschnittlich geringeren Durchmesser sowie eine geringere Varianz der mechanischen Eigenschaften der unmedullierten Haare (102), aber keine reduzierte Festigkeit.

Auf dem lichtmikroskopischen Bild ist das distale Ende eines humanen Kopfhaars zu sehen, in dessen zentraler Haarachse eine diskontinuierliche Medulla verläuft (Abbildung 6).

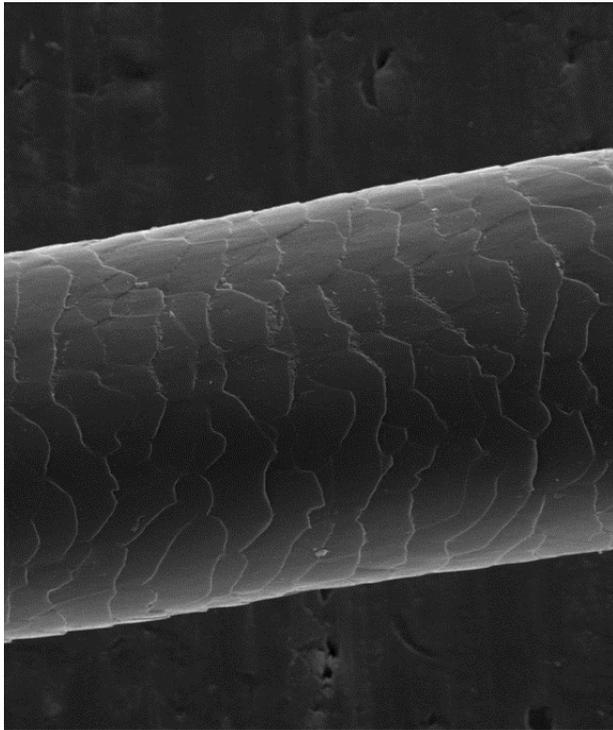


Abbildung 5: Normales/gesundes Kopfhaar, Kutikulazellschicht (Rasterelektronenmikroskopie; kohlebestäubt; 1000-fache Vergrößerung).



Abbildung 6: In der Haarmitte dunkel erscheinende, diskontinuierliche Medulla eines gesunden, wenig gealterten Haares (Lichtmikroskopie; 20-fache Vergrößerung).

2.4 Entwicklung eines Testverfahrens zur Bestimmung der Haarfestigkeit

Die Ermittlung der Festigkeit zahlreicher, einzelner Haare erfordert ein einfach durchführbares und zuverlässiges Testsystem. In der Literatur sind diverse Testverfahren beschrieben, welche die Wirkung von Querkräften auf einzelne Haare oder Haarsträhnen untersuchen. Es war zum Zeitpunkt der Planung und Durchführung dieser Studie jedoch in der Literatur kein Testverfahren beschrieben, das die Übertragung von Normalkraft (also einer senkrechten, in Längsrichtung wirkenden Kraft) durch ein einzelnes Haar untersucht. Somit wurde ein neues Verfahren zur Testung der Wirkung von Normalkraft auf einzelne Haare entwickelt, welches im Folgenden beschrieben wird.

Eine möglichst direkte Messung der maximalen Kraft, die ein auf die Spitze gestelltes Haar (in Abhängigkeit seines Querschnittes pro Fläche) entwickeln kann, ist durch den Druck der Haarspitze auf eine extrem präzise Waage quantifizierbar. Dabei muss das Haar möglichst gerade und langsam auf die Waage gedrückt werden. Sobald die auf die Haarspitze wirkende Kraft zu groß wird und dabei die kritische Kraft (F_{krit}) übersteigt, knickt das Haar zur Seite weg, was zu einem spontanen Abfall der auf die Wiegefläche der Waage wirkenden Kraft führt.

Die Anforderungen an eine möglichst präzise, digitale Waage im Milligramm-Bereich, welche automatisch den maximalen Wert einer bewegten Messung abspeichert, erfüllt das Waagenmodell Quintix 224-1S von Sartorius®. Diese Waage ist mit der internen Justierfunktion ‚isoCAL‘ ausgerüstet, welche in regelmäßigen Abständen eine automatische Nivellierung der Waage initiiert, wobei jeder dieser automatischen Justiervorgänge dabei im Rahmen der Qualitätssicherung gespeichert wird. In Kombination mit dem aufgesetzten Windschutz verbessern sich diese automatische Nivellierung und die Wiegepräzision weiter. Das langsame und gerade Absenken der Haare erfordert eine mechanische motorische Präzision, um valide Testungen zu ermöglichen. Der Eppendorf® Micromanipulator 5171 (im Weiteren als Mikromanipulator bezeichnet) wurde ursprünglich für Zellmanipulationen und –injektionen entwickelt. Mit dem Joystick lässt sich der Manipulator in x-, y- und z-Achse bewegen und zudem in einer Achse limitieren, sodass er sich nur in einer Ebene bewegt. Die Koordinaten, in denen sich der Mikromanipulator dabei jeweils befindet, werden auf dem digitalen Display angezeigt. Abbildung 7 zeigt den Mikromanipulator im Versuchsaufbau.

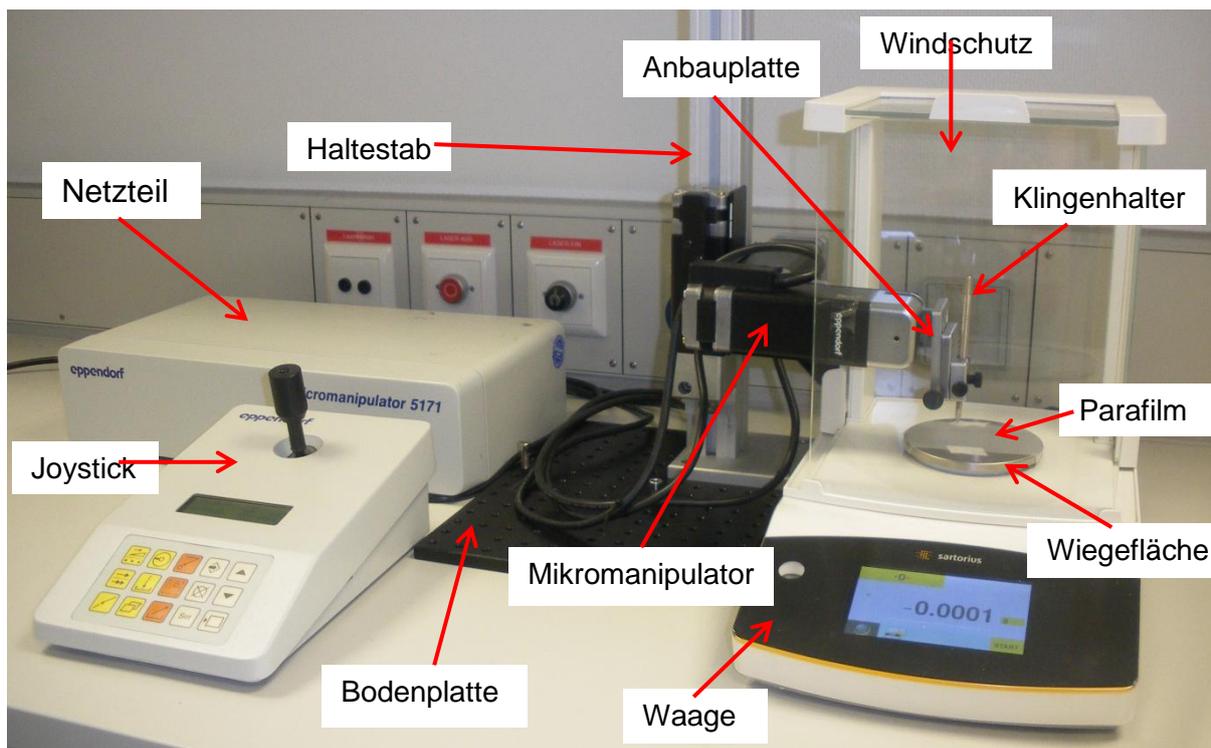


Abbildung 7: Versuchsaufbau mit Mikromanipulator (links im Bild) und Präzisionswaage (rechts im Bild).

Zur Montage wird der Mikromanipulator an eine schwere Bodenplatte mit Haltestab montiert, der wiederum den Manipulator auf geeigneter Höhe hält (Abbildung 7). Auf diese Weise lässt sich der Mikromanipulator-Kopf innerhalb des Windschutzes der Waage positionieren und darin vorsichtig bewegen. Der Joystick und das Netzteil werden neben der Waage auf dem Tisch platziert. An dem Kopf des Mikromanipulators befindet sich zudem eine Anbauplatte mit einigen Stellschrauben zur Fixierung der Haarproben (Abbildung 10).



Abbildung 8: Klingenhalter E35-010.

Für effektive Testungen sollten die Haare einfach und präzise einzuspannen sein und danach in ihrer Position stabil gehalten werden. Der mikrochirurgische Klingenhalter E35-010 (Abbildung 8) des Herstellers PMS (PMS Precision Medical Specialties GmbH, Kreuzstraße 5, D-78532 Tuttlingen; Troutman-Chris Klingenhalter, 5.5 mm Durchmesser x 9.5 cm Grifflänge, gerade Branchen mit konkaven/konvexen Innenflächen, E35-010) erfüllt diese Bedingungen. Die Haare werden in den Halterbranchen in Verlängerung der Halterspitze ausgerichtet und der Klingenhalter wird vorsichtig zgedrückt. Nach vollständigem Branchenschluss des Klingenhalters rastet dieser ein und bleibt geschlossen.

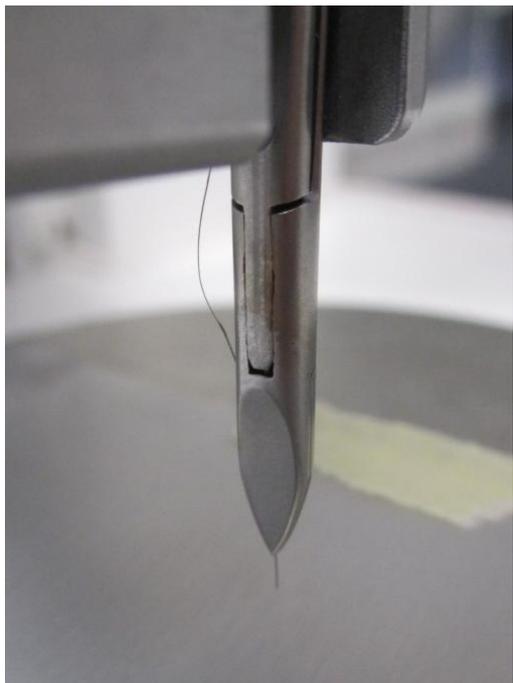


Abbildung 9: Im Klingenthaler eingespanntes Haar.

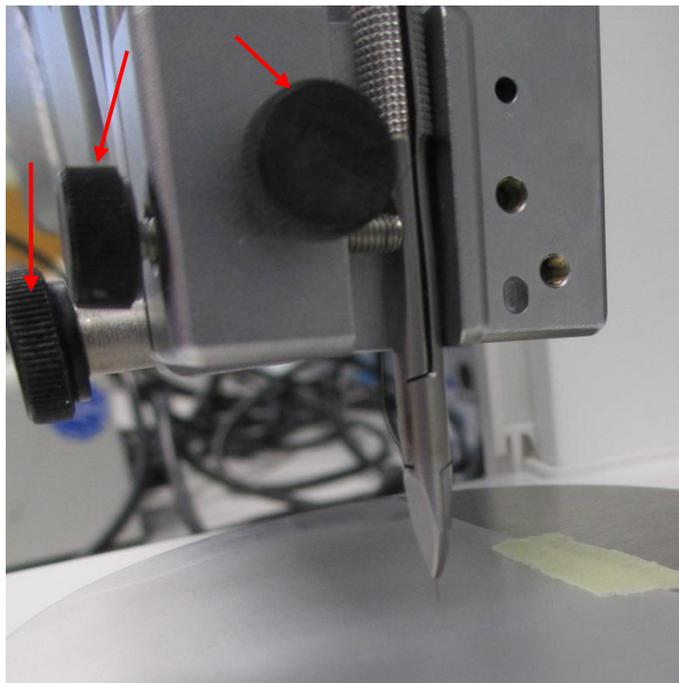


Abbildung 10: Klingenthaler an die Anbauplatte des Mikromanipulators montiert.

Das Haar verbleibt durch den Schließmechanismus in seiner Position (Abbildung 9). Der Halter mit dem eingespannten Haar lässt sich mit dem langen Griff leicht am Kopf des Mikromanipulators befestigen. Kurz hinter der Achse ist der Griff etwas verjüngt und abgeflacht, sodass er sich mithilfe der verschiedenen Stellschrauben (rote Pfeile) an der kippbaren Anbauplatte befestigen lässt (Abbildung 10).

Die schmale, gerade Fadenpinzette (Abbildung 11) des Instrumentenherstellers GEUDER AG (GEUDER AG, Hertzstraße 4, D-69126 Heidelberg; <http://www.geuder.de/geudergruppe>; Fadenpinzette Modell Tübingen, gerade, G-19030) wurde zur Feinausrichtung der eingespannten Haare verwendet. Diese besitzt eine glatte Mikrospitzenoberfläche, was Beschädigungen der Haare (wie beispielsweise durch chirurgische, anatomische oder De-Bakey-Pinzetten) vermeidet. Mithilfe der Fadenpinzette kann das Haar schnell und einfach positioniert werden, sodass es für die Testungen unbeschädigt zur Verfügung steht.

Für die Testung der Haarfestigkeit und ihre physikalischen Unterschiede im feuchten versus



Abbildung 11: Fadenpinzette G-19030.

nassen Zustand sowie im Trocknungsprozess wurden die Haare initial in einer kleinen Plastikschaale angefeuchtet. Erste Beobachtungen zeigten, dass ein

einmaliges Einführen eines Haares in das Wasserbad nicht ausreicht, um das Haar auf der ganzen Länge zu durchnässen. Die vollständige Durchnässung konnte besser mit zwei durchfeuchteten Wattestäbchen, welche von zwei Seiten gleichzeitig und ausgiebig gegen

das zu befeuchtende Haar gedrückt wurden, sichergestellt werden. Außerdem konnte die Befeuchtung auf diese Weise selbst dann vorgenommen werden, wenn das Haar mitsamt Klingenhalter noch in den Mikromanipulator eingespannt war.

Um die Haare mit Toluidinblau zu färben, wurden die bereits eingespannten Haare mehrmals einige Minuten lang in eine mit Toluidinblau gefüllte Plastikschiene getaucht und mit in Toluidinblau getränkten Wattestäbchen gepresst.

Mithilfe der beschriebenen Versuchsaufbauten wurden die folgenden Tests durchgeführt, um einerseits die Wirkung der Normalkraft auf einzelne Haare zu bestimmen, und andererseits diese mit der Wirkung der Querkraft zu vergleichen. Die Wirkung der Normalkraft auf ein Haar untersucht der Knicktest, während der Biegetest den Einfluss der Querkraft ermittelt.

2.4.1 Knicktest

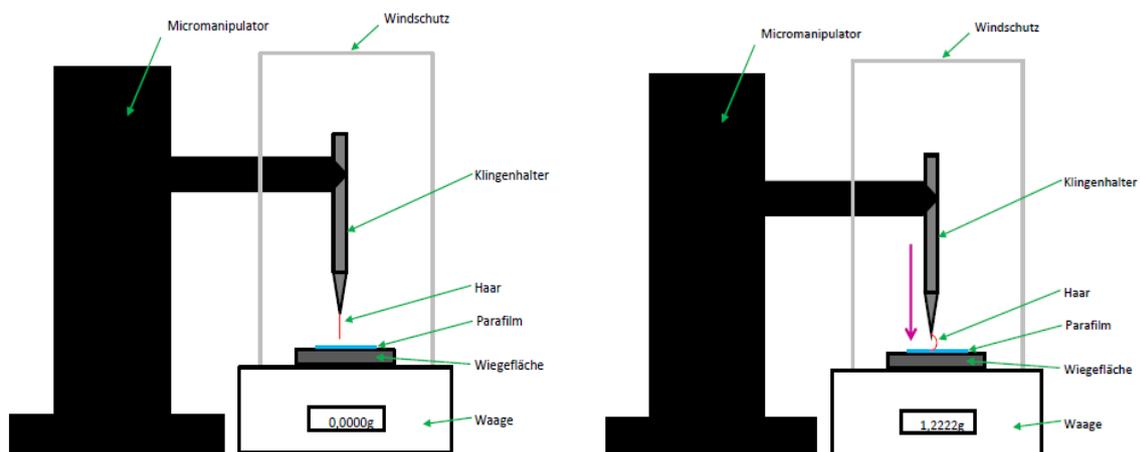


Abbildung 12: Skizze des Knicktests; links: Grundposition; rechts: Haar auf Wiegefläche abgesenkt und seitlich ausgeknickt.

Abbildung 12 veranschaulicht den Versuchsaufbau des Knicktests zur Testung der axialen Haarfestigkeit. Dazu wird der Klingenhalter an der Anbauplatte des Mikromanipulators® 5171 mithilfe der Stellschrauben senkrecht zur Wiegefläche befestigt. Das eingespannte Haar befindet sich danach im rechten Winkel zur Wiegefläche. Dann kann der Mikromanipulator seitlich in den geöffneten Windschutz der Waage geschoben und das Haar langsam und kontrolliert mithilfe des Mikromanipulators auf die Wiegefläche abgesenkt werden (vgl. auch Abbildung 7). Mithilfe des digitalen Displays der Waage lässt sich die Messung des Maximalwertes einer bewegten Messung einstellen, sodass nur der maximale Kraftwert, der direkt vor dem Wegknicken des Haares erreicht wird, gespeichert und angezeigt wird.

Mit zunehmendem Abstand von der Haarwurzel wird die Kutikulazellschicht ungleichmäßiger und die Haaroberfläche wird rauer (72; 84). Da die Kutikula bis zu 60% zur Festigkeit eines Haares beiträgt (98), muss zum Vergleich der Haarfestigkeit verschiedener Haare eine intakte Stelle der Kutikula gewählt werden, und diese liegt am ehesten nah an der Haarwurzel. Zudem können bei Testungen an der Wurzelseite Haare unterschiedlichster Längen untersucht werden. Haarwurzelnah ist auch der Durchmesser der Haare am größten. Aus diesen Gründen wurde der haarwurzelnahen Haarschaft als einheitliche und vergleichbare Teststelle für alle Haare definiert.

Erste Testdurchgänge mit Haaren gesunder Probanden waren aufgrund fehlenden Kraftschlusses zwischen Waage und Haar zunächst nicht erfolgreich. Das eingespannte Haar rutschte unmittelbar beim Auftreffen auf die Wiegefläche aus Edelstahl seitlich ab. Somit fand keine Druckkraftentwicklung auf die Haarspitze statt. Dies lag zum einen an der zahlreichen epilierten Haaren noch anhängenden, gekrümmten Haarwurzel, was ein senkrechtes Auftreffen des Haarschaftes auf die Waage unmöglich machte. Aus diesem Grunde wurden bei allen weiteren Testhaaren die Haarwurzeln an ihrem Übergang in den gleichmäßiger geformten Haarschaft abgetrennt, nachdem die Haare mit einem handelsüblichen Lineal der Länge nach vermessen wurden. An dieser Stelle knapp distal der Haarwurzel ist die Kutikula noch intakt und der Haarschaft sehr gerade. Die so entstandene gleichmäßige und ebene Schnittfläche ermöglichte ein senkrechtes Auftreffen der Haare und ein kontrolliertes Testen der Haare an ihrem proximalen Schaftende. Ein weiterer, selbst bei derart präparierten (knappes Abschneiden der Haarwurzel) Haaren den kontrollierten Kraftschluss noch in einem Drittel der Fälle (Testungen) inhibierender (und das Wegrutschen des Haares begünstigender Faktor) Faktor war die sehr glatte Edelstahl-Wiegefläche der Sartorius®-Waage Quintix 224-1S. Ein auf der Wiegefläche aufgebrachter Tesafilm®-Streifen löste dieses Problem nur bedingt, da dessen Oberfläche ebenfalls zu glatt war und dem Haar nicht ausreichend Möglichkeit zum Anhaften und demzufolge zur Kraftentwicklung bot. Die Bespannung der Wiegefläche mit Parafilm M (Bemis Corporate, One Neenah Center, P.O. Box 669, Neenah, WI 54957-0669, USA) erwies sich jedoch als geeignet. Hierbei handelt es sich um eine 0,127 mm dicke, weißliche, stark dehnbare Verschlussfolie aus Paraffin-Wachs und Polyolefin (18), die sich aufgrund ihrer Elastizität und Dehnbarkeit leicht über verschiedenste Materialien und Oberflächen spannen lässt. Bei Dehnung des Parafilms nimmt dessen Dicke ab. Daher ist es sinnvoll, nur die Enden des Filmstreifens um die Kanten der Wiegefläche herum zu dehnen, sodass in der Mitte des Streifens die Filmdicke von 0,127 mm erhalten bleibt. Zusätzlich muss der Streifen mit einfachem Klebeband befestigt werden, da er sonst an den Rändern nicht glatt auf der Wiegefläche aufliegt und kleine Falten wirft. Mit dem zusätzlichen Gewicht des Parafilms muss die Waage

genullt werden. In der Skizze zum Versuchsaufbau ist der Parafilm als hellblaue Schicht auf der Wiegefläche der genullten Waage eingezeichnet (vgl. Abbildung 12).

Die wächserne, gummiartige und minimal nachgebende Oberfläche des Parafilms verhindert nun, dass die Haare direkt nach dem Auftreffen auf die Waage seitlich wegrutschen. Stattdessen verbleibt die Haarspitze am Auftreffpunkt auf der Wiegefläche stehen, und das Haar entwickelt so lange eine Druckkraft auf die Waage, bis die auf das Haar wirkende Kraft ihren kritischen Wert übersteigt und das Haar zur Seite ausknickt. Beim Absenken des Haares ist es wichtig, das Haar so langsam und kontrolliert abzusenken, dass ein langsam ansteigender Druck auf die Wiegefläche ausgeübt wird und das Haar nicht aufgrund zu hoher Absenkgeschwindigkeit vor Kraftschluss seitlich wegrutscht.

Ohne Bespannung mit Parafilm rutschen die Haare bei einem Drittel der Testungen seitlich ab. Versuche zeigten, dass die Bespannung der Wiegefläche mit Parafilm das Abrutschen der Haare vollständig verhindert. Messungen der axialen Haarkraft mit und ohne Parafilm ergaben identische Testwerte. Deshalb wurden alle Testungen mit Parafilm-beschichteter Wiegefläche vorgenommen.

2.4.2 Biegetest

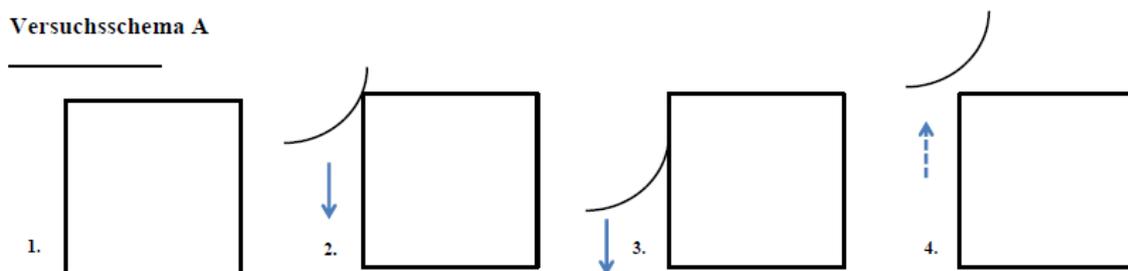
Die Kraft, die benötigt wird, um Haare seitlich an einer Ebene abzuscheren, ist ein Maß für die Biegesteifigkeit der Haare. Um die Wirkung einer Querkraft auf ein Haar modellhaft zu erfassen, wurden die Haare an einem kleinen Plastikwürfel (2 x 2 cm) abgeschert, der mittels Klebeband auf der Wiegefläche fixiert war. Die Waage musste mit dem zusätzlichen Gewicht genullt werden. Die Haare konnten in der gleichen Position wie im Knicktest in dem Klingenhalter verbleiben, da sich das in der Vertikalebene drehbare Kopfgelenk des Mikromanipulators mit Klingenhalter und Haar horizontal ausrichten ließ. Eventuelle Schäden am Haar durch wiederholte Neueinspannungen des zu testenden Haares ließen sich somit vermeiden.

Nach der korrekten Positionierung des Klingenhalters an dem Arm des Mikromanipulators wurde beides mithilfe des Joysticks kontrolliert abgesenkt. Das Haar drückte also mit seiner Seitenfläche von oben auf den Würfel, welcher die Kraft wiederum auf die Waage übertrug. Wurde das Haar abgesenkt, nahm die Druckkraft auf Würfel und Waage solange zu, bis die auf das Haar wirkende Kraft die Biegesteifigkeit des Haares überstieg. Die Haarlänge, die hierbei auf die Oberfläche des Würfels ragt, definiert gemeinsam mit der zurückgelegten Absenkungsstrecke und mit der Biegesteifigkeit des Haares die auf Würfel und Waage wirkende Kraft (siehe physikalische Grundlagen). Die über den Würfel ragende Haarlänge wird im Folgenden als überstehender Haaranteil bezeichnet und wurde in allen Versuchen auf 1 mm festgelegt. Dies entsprach einem Überstand von 50 % des auf 2 mm

eingespannten Haares über dem Plastikwürfel. Eine Linie, welche in einem Abstand von 1 mm parallel zur Würfelkante mit einem Permanentmarker auf den Würfel gezeichnet wurde, markierte diesen Überstand und ermöglichte so kontinuierlich eine einfache visuelle Kontrolle.

In ersten Abscherversuchen an einem geschlossenen Würfel (die dem Klingenhalter zugewandte Seite war vollständig geschlossen) fiel eine rasche Verknickung und Abnutzung der Haare auf. Die auf das Haar wirkende Querkraft führt unter Umständen auch zur permanenten Deformation desselben, die nur durch externes Geraderichten mit einer Pinzette revidiert werden konnte. Die Abscherung an der geschlossenen Würfelseite begünstigte eine permanente Deformation des Haares durch die prolongierte Wirkzeit der Querkraft, besonders bei wiederholter Testung. Dieser Effekt ist exemplarisch in der Skizze in der Bildfolge A dargestellt (Abbildung 13). Dieser Versuchsaufbau war demzufolge für wiederholtes Testen weniger geeignet als die in Bildfolge B dargestellte Abscherung am seitlich offenen Würfel.

Versuchsschema A



Versuchsschema B

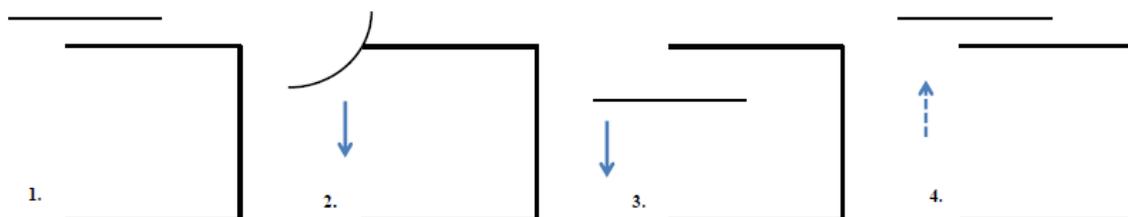


Abbildung 13: Versuchsschema der waagerechten Testung (Abscheren am geschlossenen (A) und offenen (B) Würfel).

War der Würfel an der zum Haar weisenden Seite hin offen, wurde das Haar beim Absenken nur initial umgebogen und dabei der Wirkung der Querkraft ausgesetzt. Sobald die auf das Haar wirkende Kraft die Biegesteifigkeit des Haares überstieg und das Haar weit genug abgesenkt wurde, schnellte es unterhalb der dünnen (1 mm) Oberflächenschicht des Würfels wieder in seine lineare Ausgangsposition zurück (vgl. Abbildung 13 Folge B.3.). Zudem wurde es beim Hochfahren wieder in die Gegenrichtung bewegt und nahm demzufolge

oberhalb des Würfels eher wieder eine linear ausgerichtete Form an (vgl. Abbildung 13 Folge B.4.).

2.5 Fragestellung

Karydakis formulierte drei Einflussfaktoren auf die Entstehungswahrscheinlichkeit eines Pilonidalsinus. In der folgenden Arbeit wird der erste postulierte Einflussfaktor ‚Haar‘ und dessen Rolle bei der Entstehung eines Pilonidalsinus untersucht. Dabei wird der Fokus auf die Rigidität bzw. die Steifigkeit der Haare und die Morphologie der Haarenden gelegt, um eventuell Rückschlüsse auf die Herkunft Sinusnesthaare ziehen zu können. Folgende Fragen sollen dabei beantwortet werden:

1. Lässt sich die Steifigkeit von Haaren verschiedener Qualitäten zuverlässig mit dem entwickelten Testverfahren bestimmen?
2. Unterscheiden sich die Haare von Pilonidalsinus- Patienten (PSD-Patienten) von den Haaren gesunder Vergleichsprobanden hinsichtlich physikalischer und morphologischer Aspekte?
3. Variieren die Charakteristika der Haare einer Person abhängig von der Körperstelle, an der sie wachsen?
4. Lässt die physikalische und morphologische Analyse der Haare aus den Pilonidalsinus Rückschlüsse auf die Körperregion zu, aus der sie stammen?

3 Patienten und Methoden

3.1 Patientenkollektiv

Es wurden die Haare von 20 konsekutiv behandelten Pilonidalsinus-Patienten mit einem Operationstermin am St. Marienhospital in Vechta im Zeitraum vom 15.09.2014 bis zum 01.08.2015 analysiert. Von allen Patienten wurden, wie im Kapitel ‚Haarentnahme‘ detailliert beschrieben, jeweils zehn POE-, UR-, IGF- und PSD-Haare epiliert bzw. intraoperativ aus dem OP-Präparat gewonnen. Sowohl Patienten mit einem PSD-Rezidiv als auch Patienten mit einer Erstmanifestation des Sinus pilonidalis wurden in die Studie eingeschlossen. Von 5 der 20 Patienten konnten keine Sinushaare geerntet werden, da keine im Sinus präsent waren.

Das Alter der Patienten lag zum Studienzeitpunkt zwischen 17 und 41 Jahren. Unter den Pilonidalsinus-Patienten waren 3 Frauen und 17 Männer. Jedem PSD-Patienten wurde ein nach Alter, BMI und Geschlecht passender, gesunder Vergleichsproband (im Folgenden als MP-Patient (matched pair) bezeichnet) zugeordnet, der nach Möglichkeit bei Vorliegen einer ähnlichen Außentemperatur getestet wurde. Die höchste Priorität beim Matching besaß das Geschlecht, gefolgt in absteigender Reihenfolge vom Alter, dem BMI und der Außentemperatur. Von den MP-Patienten wurden ebenfalls jeweils zehn POE-, UR-, IGF-Haare epiliert, sofern in der entsprechenden Region nicht ausschließlich Vellushaar wuchs. Als gesunde Vergleichsprobanden wurden alle Probanden gewertet, die nicht an einer chronischen Erkrankung, wie beispielsweise Diabetes oder Schilddrüsenerkrankungen, leiden, die selbst noch nie einen Pilonidalsinus hatten, keine dauerhafte Medikation einnehmen, und nicht schwanger, drogen-oder alkoholabhängig sind. Patienten mit infektiösen oder fieberhaften Erkrankungen waren nicht als MP geeignet.

Für das Matching der Probanden wurde der Körpermassenindex (Body Mass Index = BMI) in Microsoft Excel® entsprechend der Formel 3 berechnet:

$$\text{BMI} = \text{Masse (kg)} / (\text{Körpergröße (m)})^2 \quad \text{<Formel 3>}$$

Zum Finden der Vergleichspersonen mussten folgende Kriterien der matching-Parameter erfüllt sein:

Geschlecht – 100% Match

Alter – maximal 10% Abweichung möglich

BMI – maximal 10% Abweichung möglich

Außentemperatur – maximal 3°C Abweichung möglich

Die tatsächliche durchschnittliche Abweichung betrug:

Tabelle 1: Abweichungen beim Matching.

	Pilonidalsinus-patienten	Matched Pairs	Match	Durchschnittliche Abweichung
Geschlecht (m/w)	17 / 3	17 / 3	100%	0%
Alter	26,54 ± 7,63	26,7 ± 7,67	99,25%	0,75%
Body Mass Index	25,14 ± 3,04	25,03 ± 3,24	99,56%	0,44%
Außentemperatur (°C)	11,5 ± 4,2	11,2 ± 3,87	97,39%	2,61%

Das Matching erfolgte von einer Person, der die Werte der Haartestung nicht bekannt waren.

3.2 Haarentnahme (Epilation und intraoperative Exzision)

Alle Haare für die Testungen wurden von freiwilligen Testprobanden epiliiert, also mitsamt der Haarwurzel ausgezupft. Bei ersten makroskopischen und lichtmikroskopischen Examinierungen der mittels einer einfachen Pinzette epiliierten Haare fiel ein hoher Anteil an Haaren mit einer oder mehreren deutlich sichtbaren brüchigen Stellen ähnlich einer Quetschmarke auf. Diese befand sich durchschnittlich in einem Abstand von 1-2 cm zur Haarwurzel. Der Verdacht lag nahe, dass es sich hierbei um eine während der Epilation mit einer handelsüblichen Kosmetikpinzette an deren Kontaktpunkt verursachte Quetschung handeln könnte. Daraufhin wurden die Pinzettenbranchen armiert, also mit einem



Abbildung 14: Wimpernpinzette mit Infusionsschlauch überzogen (armiert).

abgeschnittenen, 1 cm langen Stück Infusionsschlauch überzogen (Abbildung 14). Das weiche PVC-Material polstert und vergrößert den

Kontaktpunkt zwischen den Pinzettenbranchen. Die Haare wurden bei der

Epilation also nicht mehr punktuell zwischen den scharfen Branchenspitzen druckbelastet, sondern von dem weichen PVC umschlossen. Mit einer beschichteten Pinzette epiliierte Haare weisen weder makroskopisch noch lichtmikroskopisch epilationsbedingte Quetschungen auf. Weiterhin erwies sich die ophthalmologische Wimpernpinzette vom Typ E30-772 des Herstellers PMS Precision Medical Specialties GmbH (PMS Precision Medical Specialties GmbH, Kreuzstraße 5, D-78532 Tuttlingen; Wimpernpinzette mit abgerundeten Branchen und Plattform) gegenüber einer handelsüblichen Kosmetikpinzette als besonders geeignet, da diese aufgrund ihrer breiten Branchenkontaktfläche in Kombination mit der PVC-Beschichtung das atraumatische Fassen der Haare erleichterte. Demzufolge wurde eine mit einem Infusionsschlauch beschichtete ophthalmologische Wimpernpinzette für alle weiteren Haarepilationen genutzt.

Für die Testungen wurden Haare gesunder Probanden und Pilonidalsinuspatienten (im Weiteren als PSD-Patienten bezeichnet) aus drei verschiedenen Körperregionen epiliiert. Kopfhaare wurden ausschließlich von der Protuberantia occipitalis externa (im Folgenden POE-Haare) epiliiert, um einen einheitlichen Entnahmeort zu gewährleisten. Die Haare des

Entnahmeortes ‚unterer Rücken‘ (im Weiteren UR-Haare) stammen aus dem Sakraldreieck, genauer aus dem Hautbereich zwischen den beiden Lendengrübchen (Fossae lumbales laterales), der Glabella sacralis. Als dritte Körperregion wurde das kranialseitige Drittel der Interglutealfalte (im Weiteren IGF-Haare) gewählt. Alle drei Regionen sind Teil der hinteren Schweißrinne und liegen kranial oder in der Region der PSD-Bildung. Abbildung 15 veranschaulicht die definierten Haarentnahmestellen als grün markierte Kreise, sowie das Sakraldreieck und die Fossae lumbales laterales an einer Testperson.

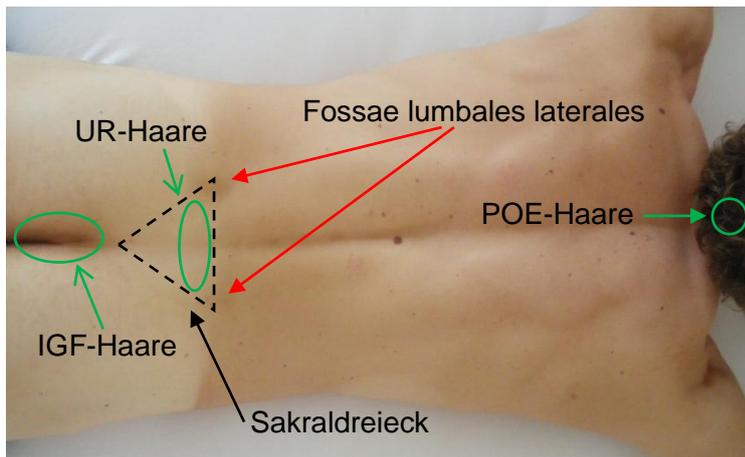


Abbildung 15: Haarentnahmeorte (UR = unterer Rücken, IGF = Interglutealfalte, POE = Protuberantia occipitalis externa).

Aus jeder Region wurden mindestens 6 Haare entfernt. Regionen, in denen Terminalhaar wuchs, wurden als behaart definiert. Sofern in einer der Behaarungsregionen nur Vellushaar und kein Terminalhaar wuchs, wurde die Region als haarlos vermerkt und keine Haare entnommen. Wuchsen neben Vellushaaren vereinzelte Terminalhaare, wurden diese entnommen, auch wenn es

weniger als sechs Haare waren. Die Region wurde entsprechend als behaart bewertet. Bei den PSD-Patienten wurden außerdem intraoperativ die Haare aus dem Sinus asserviert, um diese mit den Haaren aus den anderen Regionen zu vergleichen. Enthielten die Fistelgangsysteme und Haarnester keine Haare, wurde dieses schriftlich festgehalten.

Operatives Vorgehen

Alle PSD-Patienten erhielten eine elektive modifizierte Limberg-Lappen-Plastik nach eventuell vorgeschalteter Entdeckung und Abschwellung eines akut entzündeten Sinus. Haare, die von außen sichtbar in den Pori steckten, wurden als erstes asserviert und als PSD-Haare-out markiert. Auf die Ausspritzung und Einfärbung des Fistelgangsystems mit Toluidinblau folgte die komplette Entfernung des Fistelgangsystems mit anschließender Rekonstruktion als modifizierte Limberg-Plastik. Hierbei handelt es sich um eine operative Therapie mit geringer Rezidivrate (5; 29; 36). Die operative Therapie ist aktuell Gegenstand der medizinischen Forschung, wobei es verschiedene Ansätze gibt (27; 60; 90).

Aus dem OP-Präparat konnten anschließend die darin befindlichen Haare gewonnen werden, nachdem zuerst die eventuell in den Pori steckenden, von außen sichtbaren Haare (im Weiteren PSD-out-Haare) asserviert wurden. Nach Exstirpation wurde jedes

Fistelgangsystem makroskopisch examiniert und alle Haare daraus mithilfe einer atraumatischen Pinzette entnommen. Dabei wurde das Fistelgangsystem vorsichtig unter Schonung und direkter Asservierung aller darin enthaltenen Haare mit einem Skalpell entlang der Fistelgänge geöffnet, um auch alle tief in den Gängen und im Nest gelegenen Haare zu gewinnen. Weiterhin wurde das Narbengebiet um das exstirpierte Fistelgangsystem auf darin verbliebene Sinus-Haare genau untersucht. Alle Haare, die aus dem Gang- und Sinuslumen und dem es umgebenden Narbengewebe stammten, wurden als PSD-in-Haare gekennzeichnet.

Die Haare wurden getrocknet und nach Herkunftsregion getrennt (POE, UR, IGF und Sinus) in je einer handelsüblichen weißen Kompresse in einem verschließbaren 1l-Gefrierbeutel aufbewahrt. Alle Haare wurden nach Entnahme verwechslungssicher beschriftet.

Ein möglicher Abbauprozess erfolgt verschiedener Quellen und eigener Voruntersuchungen zufolge (vgl. Diskussion der Testhaare sowie Ergebnisse) in dem luftdichten, trockenen und abgeschlossenen Milieu derart langsam, dass er außer Acht gelassen werden kann, sofern die Haare innerhalb von wenigen Monaten getestet werden (68).

3.3 Haarsortierung und Konservierung

Alle intraoperativ gewonnen oder epilieren Haare wurden auf einem weißen Untergrund sorgfältig sortiert und mit kleinen Klebezetteln auf weiße Papierbögen aufgeklebt. Um Knickstellen zu vermeiden, waren die Haare mit den Fingern oder vorsichtig mit einer feinen Pinzette zu händeln. Die Klebezettel durften nicht zu klebrig sein, sodass sie das Haar beim Ablösen desselben nicht beschädigen. Eigene Beobachtungen zeigten, dass sich handelsübliches Kreppband nach einmaligem Ankleben schlecht wieder von den Haaren lösen ließ. Bei dem Versuch wurden die Haare in Einzelfällen beschädigt oder gar zerrissen. Zudem sollten keine Klebstoffreste an den Haaren haften bleiben, da diese die Messergebnisse beeinflussen könnten. Diese Bedingungen erfüllten die bunten Plastikklebezettel der Marke Tedi. Sie sind zudem leicht durchscheinend, sodass sich die Haare auch durch die Klebezettel hindurch zählen und vermessen ließen. Die Anzahl der erforderlichen Ablösungen der Haare von den Klebezetteln konnte dadurch reduziert werden. Makroskopisch ließen sich die verwendeten Klebezettel rückstandlos von den Haaren lösen. Bei der Kohlebestäubung im Rahmen der Präparation für elektronenmikroskopische Aufnahmen zeigte sich allerdings, dass die Kohle an den zuvor beklebten Haarenden deutlich schlechter haftete. Daher wurde zusätzlich auf eine maximale Reduktion der Kontaktfläche der Haare mit den Klebezetteln geachtet, indem die Haare mit weitem

Überstand an der Wurzelseite nur haarspitzenseitig aufgeklebt wurden und somit die Testregion von jeglichem Klebstoff unberührt blieb.

Die exzidierten Sinushaare waren oft stark verklebt und mit Toluidinblau (enthält den Redoxfarbstoff Toloniumchlorid) gefärbt (6; 36). Daher wurden sie gewaschen, indem sie auf ein mit lauwarmem Wasser getränktes Küchenpapier gelegt und mit einem zweiten getränkten Papier vorsichtig abgetupft werden. Anschließend wurden sie zum Trocknen auf einer trockenen Baumwollkompressen ausgebreitet.

3.4 Etablierung und Evaluation des Testverfahrens

Im Folgenden wird die Ermittlung der optimalen Testdurchführung aufgezeigt, um ein einheitliches Testschema für alle zukünftigen Tests mit den Haarproben der PSD-Patienten und ihrer Vergleichsprobanden festzulegen. Alle Tests wurden am wurzelseitigen geraden Haarschaft durchgeführt, von dem zuvor die Haarwurzel abgeschnitten wurde.

3.4.1 Einspannlänge

Die Definition einer einheitlichen Einspannlänge der einzelnen Haare in den Klingenthaler war Voraussetzung für alle folgenden Versuche. Die Einspannlänge ist die Länge des Haares, welche nach vorne bzw. nach unten aus dem Klingenthaler hervorragt, also der Abstand von dem abgeschnittenen Haarwurzelnende bis zu den Branchenspitzen des Klingenthalers. Um den Einfluss der Einspannlänge auf die kritische Kraft eines Haares zu überprüfen, wurde ein einzelner Haarschaft (bei den Tests wird der Haarschaft nur als Haar bezeichnet) von seiner Wurzel getrennt und zunächst mit einer Einspannlänge von 2,5 cm eingespannt. Die Einspannlänge wurde anschließend sukzessive über 2 cm; 1,5 cm; 1 cm; 0,5 cm und 0,2 cm auf letztlich 0,1 cm reduziert. Diese Vorgehensweise von der langen zur kurzen Einspannlänge garantierte eine Einspannung des Haares an der jeweiligen Einspannlänge ohne weiter wurzelwärts gelegene Quetschmarken. Beim umgekehrten Vorgehen, dem Setzen der ersten Einspannung bei 0,1 cm, dann bei 0,2 cm usw. hätte das Testhaar bei der Einspannlänge von 2,5 cm bereits sechs Quetschmarken von den vorangehenden Einspannungen erhalten.

Bei jeder Einspannlänge wurde das Haar zweimal auf die Wiegefläche aufgesetzt, der Mittelwert aus beiden Haarkraft-Werten berechnet und in der Grafik aufgetragen. Der Länge der Haare in Zentimeter auf der x-Achse ist die axiale Haarkraft in Gramm auf der y-Achse zugeordnet. Nach diesem Schema wurden insgesamt zehn Haare getestet, deren jeweilige Kraftwerte in Abbildung 16 verschiedenfarbig dargestellt sind.

Abbildung 16 ist zu entnehmen, dass die durch das Haar übertragene Kraft antiproportional mit abnehmender Einspannlänge zunimmt. Je kürzer das Haar eingespannt wird, desto größer ist die mögliche Kraftübertragung. Dieses Ergebnis entspricht dem im Unterkapitel ‚physikalische Grundlagen‘ erläuterten, antiproportionalen Zusammenhang zwischen der F_{krit} der Eulerstäbe und dem Quadrat ihrer Länge (49; 51).

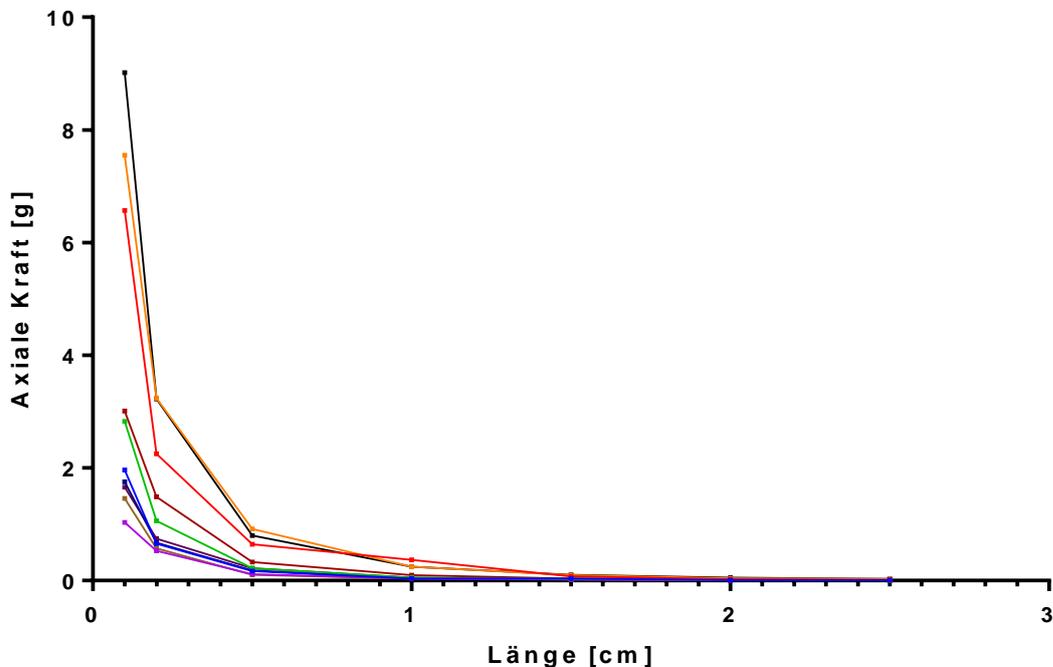


Abbildung 16: Kraftübertragung in Abhängigkeit zur Einspannlänge (trockene, senkrechte Testung); n = 10 Haare.

Lange Einspannlängen von 1,5 cm bis 2,5 cm erzielten bei den verschiedenen Haaren nur geringe Haarkraft-Werte von unter 0,5 g. Zudem waren lockige Haare teilweise unmöglich gerade einzuspannen, da sich die aus dem Klingenhalter herausstehenden 2,5 cm aufrollen und nur durch Manipulation mithilfe eines Glätteisens in eine gerade Position zu bringen wären. Diese thermale Denaturierung widerspräche allerdings dem Grundsatz der Testung natürlicher ‚Ursprungshaare‘. Die Testung der Haare mit kürzeren Einspannlängen war demzufolge sinnvoll, um zum einen den Bereich des Haares, der sich locken und damit von der geraden Form eines Eulerstabes abweichen konnte, maximal einzugrenzen. Zum anderen fanden sich auch sehr kurze Haare (< 1 cm) in den Sinus, die ohnehin nur mit einer sehr kurzen Einspannlänge zu testen waren.

Auch wenn gilt, dass mit kürzerem Haar größere Kraftübertragungen möglich sind, liegt die kleinstmögliche und vom Handling her dennoch praktikable Einspannlänge bei 0,2 cm. Eine noch kürzere Einspannlänge ist technisch schwierig einzuspannen, da die Haarabschnitte schlechter zu greifen sind. Zudem setzte die Spitze des Klingenhalters beim Absenken rascher auf die Wiegefläche auf und konnte somit beim Aufsetzen zu einem falsch hohen

Maximalwert und zu einer starken Verknickung des Haares führen. Dementsprechend wurde für alle weiteren Testungen eine Einspannlänge von 0,2 cm als Standard festgesetzt.

3.4.2 Testentscheidung

Abbildung 17 vergleicht die mögliche Kraftentwicklung bei der vertikalen (Knicktest; siehe auch Abbildung 12) mit der bei der horizontalen Haartestung (Biegetest; siehe auch Abbildung 13). Hierzu wurden 35 Haare von insgesamt 5 verschiedenen Probanden von der POE gewonnen und konsekutiv zunächst sechsmal horizontal und dann sechsmal vertikal getestet. Die Ausrichtung der Haare (vertikal oder horizontal) ist auf der x-Achse, die mögliche Kraftübertragung auf der y-Achse aufgetragen. Die Haarkraft-Mittelwerte aller Testungen sind mit der jeweiligen Standardabweichung nach horizontaler und vertikaler Testung gegliedert in Abbildung 17 zusammenfassend eingetragen.

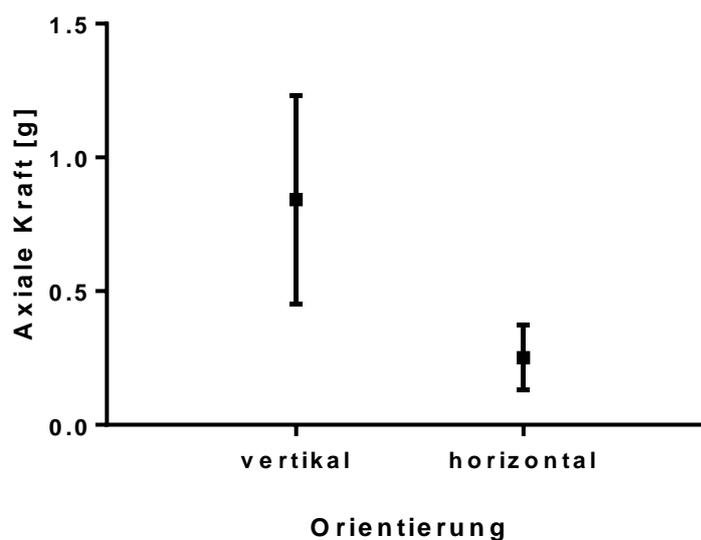


Abbildung 17: Kraftübertragung im Knicktest (vertikale Ausrichtung) und im Biegetest (horizontale Ausrichtung) (erste Einspannung; 0,2 cm; trockene Testung); n = 35 Haare.

Bei der vertikalen Testung ist die Kraftübertragung durchschnittlich 3,4-fach größer als bei der horizontalen Testung. Ein Haar kann demzufolge eine deutlich größere Kraft auf die Haut übertragen, wenn es parallel zu seiner Längsachse in Richtung der Haut druckbelastet wird, wenn also eine Normalkraft auf das Haar einwirkt. Wirken Querkräfte auf das Haar, ist die mögliche Kraftübertragung deutlich geringer. Da es bei der vorliegenden Fragestellung der Untersuchung um die maximal mögliche Krafteinwirkung des Haares auf die Haut geht, und

hier genau um die axiale Einspießung, wurde bei den weiteren Experimenten ausschließlich der senkrechte (vertikale) Knicktest durchgeführt.

3.4.3 Mehrfacheinspannungen

Eine Einspannung des Haares in den Klingenthaler musste das Haar derart kraftvoll halten, dass es auch unter Belastungsbedingungen nicht verrutschen konnte. Zur Klärung der Frage, ob das Haar bei dieser Einspannung beschädigt wird, wurde ein einmalig eingespanntes und dann wieder aus dem Klingenthaler entferntes Haar lichtmikroskopisch untersucht.

Auf der lichtmikroskopischen Aufnahme (Abbildung 18) wird sichtbar, wie sich die Haarmorphologie eines Haares bereits nach einmaliger Einspannung verändert.



Abbildung 18: einmalig eingespanntes Haar mit sichtbarer Einspannläsion (roter Pfeil) (Lichtmikroskopie; 10-fache Vergrößerung).

In der linken Hälfte des Bildes ist der Haarschaft deutlich dunkler, breiter und unregelmäßiger begrenzt als in der rechten Bildhälfte (roter Pfeil). Die Verbreiterung des Haarschaftes ist auf die Einspannung zurückzuführen, bei der das Haar im Klingenthaler komprimiert wurde. Die dunklere Färbung spricht für einen Oberflächendefekt, da der Teil des Haarschaftes in der rechten Bildhälfte eine einheitlichere Oberflächenstruktur hat und lichtmikroskopischen Aufnahmen frisch epilierter, nativer Haare ähnelt. Eine Kutikulazellschicht, wie sie auf der elektronenmikroskopischen Aufnahme im Unterkapitel ‚Biologische / physiologische Grundlagen‘ (Abbildung 5) sichtbar ist, lässt sich im Teil des Haarschaftes in der rechten Bildhälfte erkennen. Hier ist folglich die native Oberflächenstruktur bewahrt.

Inwiefern die Anzahl der Wiedereinspannungen bei schräg eingespanntem oder in der Halterung disloziertem Haar einen Einfluss auf die Haarmorphologie und damit auf die

Messgenauigkeit hat, untersuchte die folgende Serie, deren Ergebnisse Abbildung 19 zusammenfasst. Die konsekutive Anzahl der Einspannungen der einzelnen Haare sind auf der x-Achse aufgetragen (Einspannung Nummer 1-4), während die y-Achse die jeweils durch die Haare bei den verschiedenen Einspannungen übertragenen Kräfte [in Gramm] beschreibt.

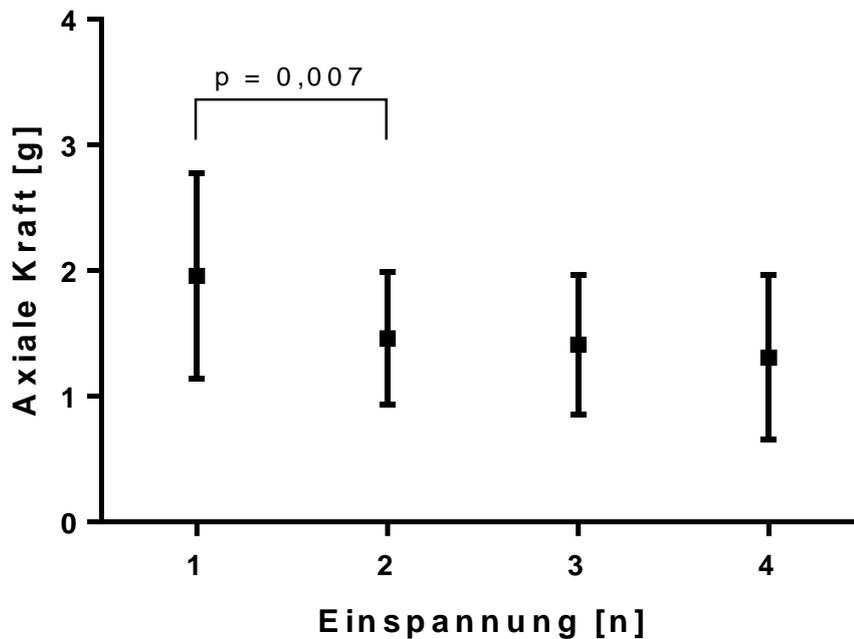


Abbildung 19: Mehrfacheinspannungen versus ausgeübte Kraft (erste Einspannung; 0,2 cm; trockene, senkrechte Testung); n = 10 Haare (POE).

Insgesamt wurden 10 POE Haare je dreimal bei jeder der ersten vier Einspannungen getestet. Alle Haare wurden vertikal im Knicktest, trocken und mit 0,2 cm Einspannlänge getestet. In Abbildung 19 sind die Mittelwerte der Testungen der 10 Haare mit der dazugehörigen Standardabweichung eingetragen. Bereits der Mittelwert bei der zweiten Einspannung differiert signifikant von dem Mittelwert der Ersteinsspannung ($p = 0,007$). Die Messwerte mehrfach eingespannter Haare stehen demnach bei trockener, 0,2 cm Mehrfacheinspannung in nicht-konstanter Relation zu den Werten der Ersteinsspannung.

Mehrfach- oder Wiedereinspannungen wurden aus diesem Grunde bei allen folgenden Versuchen vermieden und in der Einspannung dislozierte Haare von weiteren Tests ausgeschlossen, um eine Konstanz der Messwerte zu gewährleisten. In der ersten Einspannung gemessene Werte wurden bis zur Dislozierung eines Haares im Klingenthaler mit gewertet, auch wenn das Haar später verworfen werden musste.

3.4.4 Abstand zur Haarwurzel

Abbildung 20 dient der Klärung, ob dasselbe menschliche Haar bei verschieden großem Abstand zwischen Haarwurzel und Einspannung verschieden große Kräfte überträgt. Dazu wurden bei einzelnen, über 5 cm langen Kopfhaaren zunächst die Haarwurzeln abgeschnitten, um ein gerades, nicht verdicktes Haarende zu schaffen. Dann wurden die Haare im Abstand von 0,2 cm zum ehemaligen Haarwurzelsende eingespannt und getestet. Um eine Mehrfacheinspannung an der gleichen Stelle der jeweiligen Haare zu vermeiden (vgl. Unterkapitel ‚Mehrfacheinspannungen‘) wurde das Haar dann um 1 cm gekürzt und dort an der noch ‚unberührten‘ Stelle erneut eingespannt und sechsmal getestet. Sukzessive folgten Tests mit einer Einspannung im Abstand von 2 cm, 3 cm und 5 cm zur Haarwurzel. Die Abstände der Einspannung zum Haarwurzelsende sind in der Grafik auf der x-Achse den übertragenen Kräften auf der y-Achse gegenübergestellt.

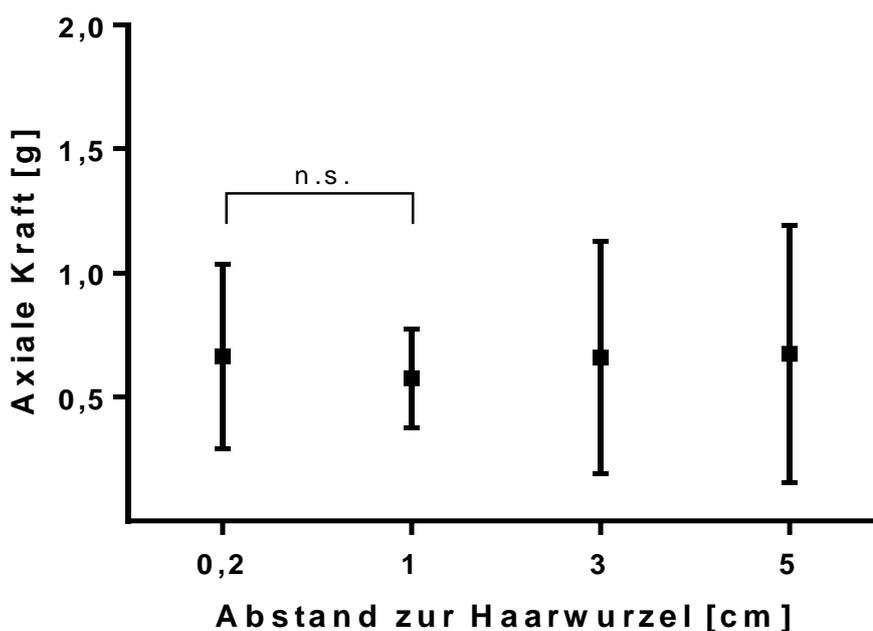


Abbildung 20: Kraftübertragung in Abhängigkeit zum Abstand der Einspannung von der Haarwurzel (erste Einspannung; 0,2 cm; trockene, senkrechte Testung); n = 4 Haare.

Bei der senkrechten Testung (Knicktest) ergeben sich hier vergleichbare Ergebnisse, demnach findet kein signifikanter Abfall der übertragenen Kraft mit zunehmendem Abstand zur Haarwurzel statt. Damit wären auch Haare von bis zu 5 cm Länge und Kurzhaarfragmente, deren Abstand zur Haarwurzel nicht bekannt ist, aus der Testung nicht ausgeschlossen (Abbildung 20). Auch Schnitthaarfragmente, deren vorherige Position im Langhaar unbekannt ist, dürfen somit in der Testung verwendet werden.

3.4.5 Multitestungen

Die folgenden drei Auswertungen widmen sich der Frage nach dem Einfluss mehrfacher Testungen einzelner Haare auf die jeweilig erreichbaren axialen Kraftwerte. Alle Haare wurden mit einer Einspannlänge von 0,2 cm, senkrecht und ausschließlich in der ersten Einspannung getestet.

Die Grafiken zeigen die Anzahl und Reihenfolge multipler Testungen im Verlauf auf der x-Achse, während auf der y-Achse die durch das Haar auf die Waage übertragene Kraft aufgetragen ist. Für Abbildung 21 wurde die axiale Haarkraft von 10 POE-Haaren verschiedener gesunder Probanden pro Haar zwanzigmal gemessen. Die Grafik präsentiert die Kraftwerte der Haare verschiedenfarbig (jede Farbe stellt ein Haar im Testungsverlauf dar), normiert auf die erste Testung als 100%.

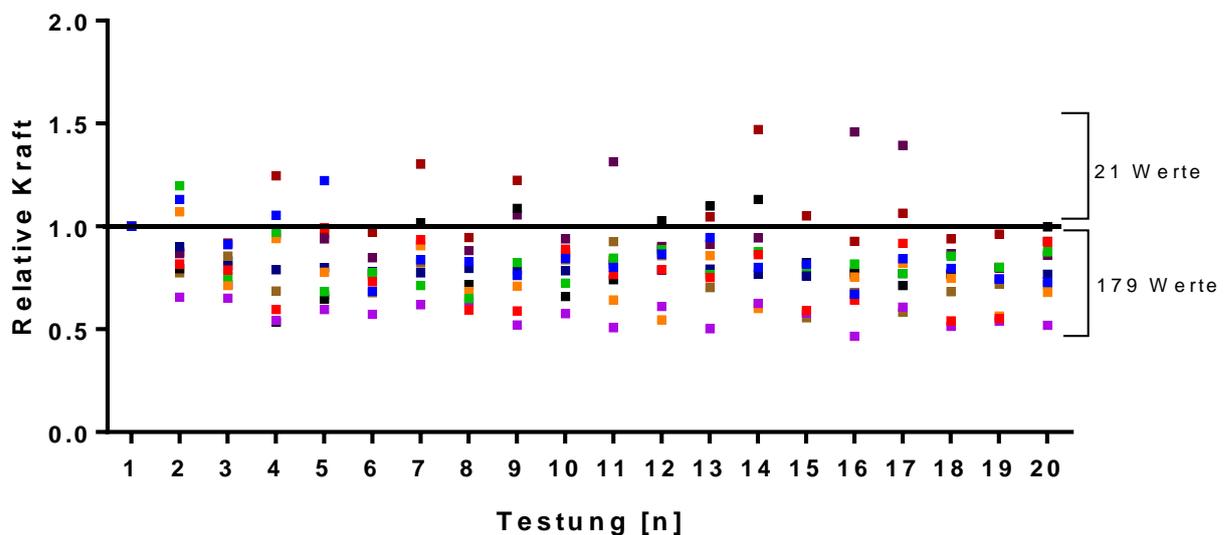


Abbildung 21: Multiple Testungen pro Haar (erste Einspannung; 0,2 cm; trockene, senkrechte Testung); n = 10 Haare; axiale Kraft normiert auf 100% entsprechend 1,0 (schwarze Linie).

Im Verlauf der 20 Haarkrafttestungen schwankt die gemessene Kraft um bis zu 50% um den Mittelwert aller Kraftmessungen dieses Haares.

Diese Schwankungsbreite hängt bei den getesteten Haaren nicht von der Größe des Haarkraft-Mittelwertes ab. Es schwanken sowohl die Kraftwerte der weniger steifen Haare mit einem geringeren Kraft-Mittelwert, als auch die Kraftwerte der Haare mit einem insgesamt höheren Kraft-Mittelwert. 175/200 der Werte liegen unterhalb des ersten Testwertes.

Aus dieser Feststellung resultiert die Frage nach der Anzahl der pro Haar erforderlichen und ohne signifikanten Kraftverlust möglichen Testungen, die mithilfe von der in Abbildung 22 dargestellten Serie ergründet werden soll.

Konsequente, 20-fache Haarkrafttestungen an zehn verschiedenen POE-Haaren gesunder Probanden liegen, wie Abbildung 21, ebenso Abbildung 22 zugrunde. Abbildung 22 stellt hier die Mittelwerte \pm SEM aller gemessener Kraftwerte der jeweiligen Haare dar. Statistisch differieren die Kraftwerte der Haare über die 20 Testungen hinweg nicht signifikant, aber es ist ein Trend hinsichtlich einer schwächeren Kraftausübung bei häufigerer Testung erkennlich.

Der p-Wert der ersten beiden Testungen (t-test) ist exemplarisch in der Grafik dokumentiert. Mit einer Größe von $p = 0,52$ zeigt dieser keinen statistisch signifikanten Unterschied zwischen der ersten und der zweiten Testung an. Standardabweichungen über 0,75 g und darüber finden sich bei den ersten, siebten und vierzehnten Testungen der Haare. Um die Streuung der Messwerte bei multipler Testung eines Haares möglichst gering zu halten, wurde daraufhin eine Anzahl von sechs Testungen pro Haar festgelegt.

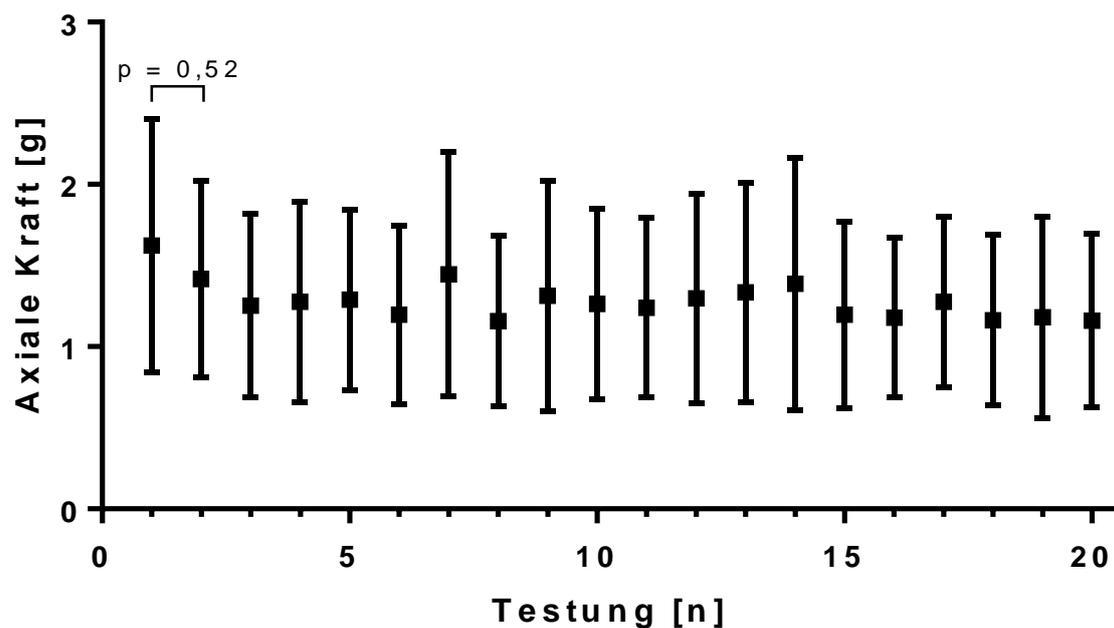


Abbildung 22: Multiple Testungen pro Haar (erste Einspannung; 0,2 cm; trockene, senkrechte Testung); n = 10 Haare.

Um die Festlegung auf sechs Testungen pro Haar an einer größeren Stichprobe und Haaren unterschiedlicher Körperregion zu verifizieren, wurden 240 Haare 20 gesunder Probanden getestet. Dabei wurden Körperhaare aus den drei Haarregionen POE, UR und IGF mittels der im Kapitel ‚Haarentnahme‘ festgelegten Methoden epiliiert. Die Ergebnisse der Testungen

zeigt Abbildung 23. Analog zu Abbildung 22 stellt Abbildung 23 die ersten sechs Testungen dieser Haare auf der x-Achse und die axiale Kraft auf der y-Achse dar.

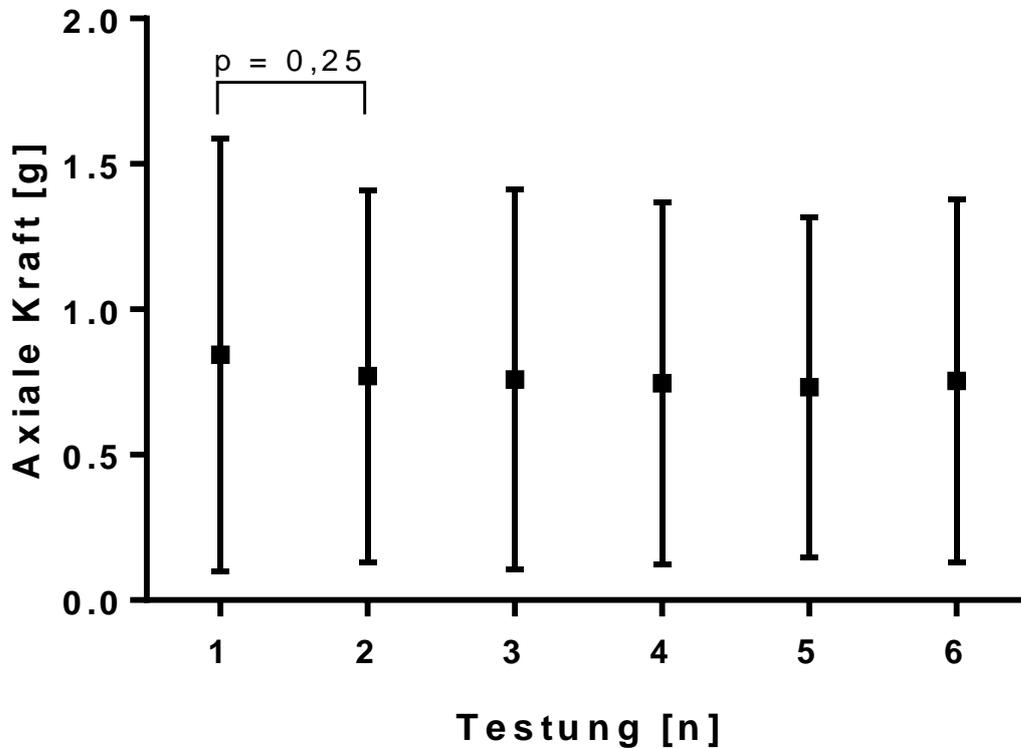


Abbildung 23: Erste 6 Testungen (erste Einspannung; 0,2 cm; trockene, senkrechte Testung); n = 240 Haare.

In dieser deutlich vergrößerten Stichprobe sind die ersten sechs Testungen untereinander nicht signifikant verschieden. Die ersten Testungen haben im Vergleich zu den darauf folgenden fünf Testungen die größte Standardabweichung von $\pm 0,04858$ g. Der p-Wert von der ersten gegen die zweite Testung beträgt $p = 0,25$, der p-Wert von der ersten gegen die dritte Haartestung beträgt $p = 0,19$. Auch gegen die folgenden Testungen sind die Ergebnisse der ersten Testung jeweils nicht signifikant verschieden.

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus Abbildung 22 und 23 wurde zunächst eine Anzahl von 6 durchzuführenden Krafttestungen pro Haar festgelegt. Statistische Berechnungen zu einem späteren Zeitpunkt nach Abschluss aller Testungen zeigten, dass eine dreimalige Testung pro Haar ausreichend gewesen wäre.

3.4.6 Nass-Trocken-Testung

Wurden die PSD-Haare intraoperativ entnommen, waren sie zunächst meist feucht und blutverklebt. Um sie separieren und einzeln testen zu können, mussten sie mit klarem Wasser abgespült und getrennt werden. Ob und wann die Haare nach dieser erforderlichen Waschung getestet werden können und wie schnell eine Trocknung der Haare erfolgt, soll der folgende Versuch klären: Die Festigkeitsentwicklung von insgesamt 10 POE-Haaren im Trocknungsprozess veranschaulicht Abbildung 24.

Der Zeit in Minuten auf der x-Achse ist die axiale Kraftübertragung der Haare im Trocknungsprozess auf der y-Achse gegenübergestellt. Die trockenen Haare wurden auf 0,2 cm eingespannt und jeweils zweimal senkrecht getestet. Diese Testung geschah ausnahmsweise nur zweifach, um die Anzahl der Gesamttestungen pro Haar (= mechanische Alterung) so klein wie möglich zu gestalten. Anschließend wurden die Haare im eingespannten Zustand vorsichtig in einer kleinen Wasserschale unter Zuhilfenahme von großzügig in Wasser getränkten Wattestäbchen befeuchtet. Die nassen Haare wurden direkt nach der Befeuchtung zweimal getestet.

Im Verlauf des Trocknungsprozesses wurde dasselbe Haar 5, 15 und 30 Minuten nach der Befeuchtung je zweimal getestet. Derart wurde mit allen 10 Haaren verfahren und die Mittelwerte sowie Standardabweichungen in Abbildung 24 zusammengefasst. Auf der x-Achse entspricht der Wert bei 0 Minuten dem mittleren Kraftwert der Haare im trockenen Zustand (Nasszeit = 0 min). Die anschließende Befeuchtung der Haare kennzeichnet die blaue Parallele zur y-Achse knapp hinter dem x-Wert 0. Nach der Befeuchtung befand sich das Haar im (auf der x-Achse dargestellten) Trocknungsprozess bei Raumluft ohne Luftkonvektion (in Minuten).

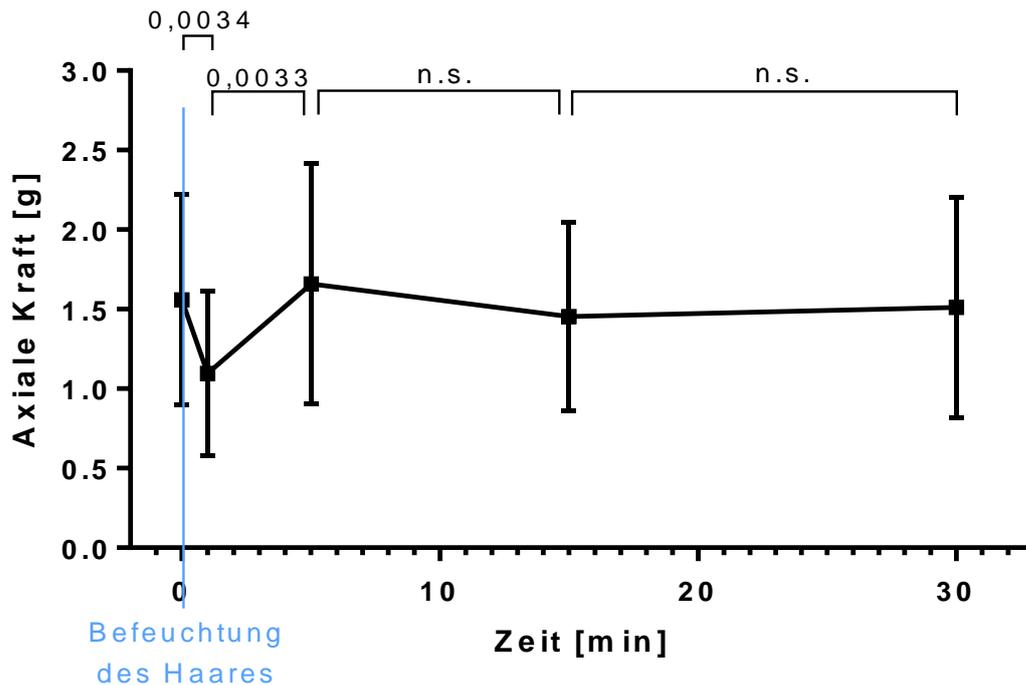


Abbildung 24: Kraftübertragung während des Trocknungsprozesses (erste Einspannung; 0,2 cm; senkrechte Testung); n = 10 Haare.

Die Grafik zeigt, dass die Haare direkt nach der Befeuchtung bis zu 30% an Steifheit verloren, um im Trocknungsprozess wieder an Steifheit zuzunehmen, bis sie nach 5 Minuten wieder das Ausgangsniveau an möglicher Kraftübertragung erreichten. Dieses Festigkeitsniveau blieb über die folgenden Testungen bei 15 und 30 Minuten nach der Befeuchtung konstant.

3.4.7 Lagerung der Haare

Eine zeitnahe Testung der Haare unmittelbar nach deren Epilation war in dieser Studie logistisch nicht immer möglich. Daher wurden die Haare in verschlossenen ‚Zip‘-Plastikbeuteln gelagert. Um einen möglichen Einfluss der Lagerungsmethode auf die axiale Kraftübertragung eines Haares zu untersuchen, wurde die relative Haarfestigkeit in Abhängigkeit von der Zeit seit Haarentnahme untersucht (Abbildung 25). Die Kraftwerte von 10 POE-Haaren verschiedener Probanden wurden innerhalb weniger Stunden nach ihrer Epilation ermittelt. Die Testung erfolgte senkrecht, trocken und bei 0,2 cm Einspannung. Dabei wurde pro Haar der Mittelwert aus zwei Krafttestungen berechnet. Die Haare wurden eingespannt belassen und mitsamt Klingenthaler in einer geschlossenen ‚Zip‘-Plastiktüte über unterschiedlich lange Zeiträume aufbewahrt. So wurde unter Vermeidung einer Mehrfacheinspannung die Lagerung der Haare in Plastiktüten simuliert.

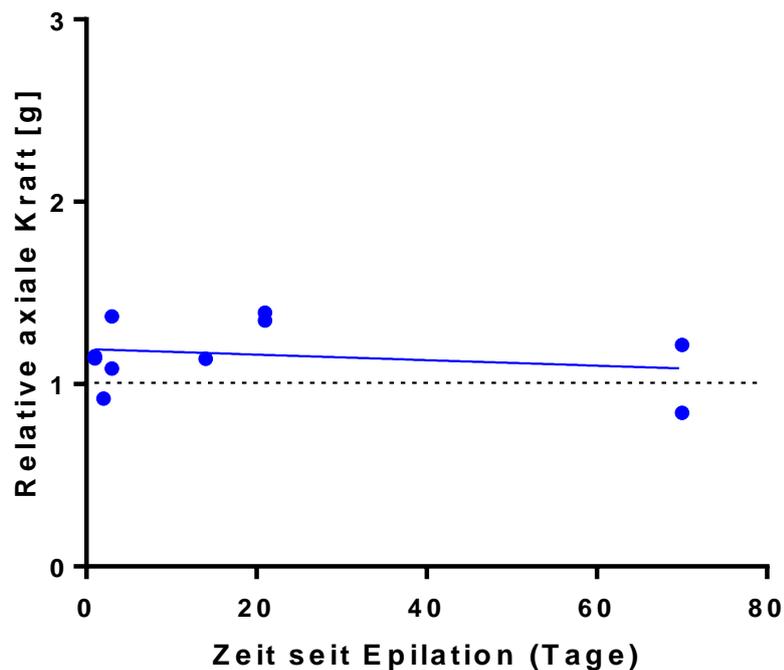


Abbildung 25: Haarfestigkeit im Zeitverlauf (erste Einspannung; 0,2 cm; trockene, senkrechte Testung); n = 10 Haare.

Die relative Haarfestigkeit wurde so berechnet, dass die axiale Kraft jedes Haares am Tag $x = „0“$ auf den Wert $y = „1“$ gesetzt wurden. Die Folgewerte wurden an dem Tag-0-Wert des Haares auf 100% normiert.

Die Zeiträume, in denen die Haare in den Plastiktüten gelagert wurden, rangierten von 1- 75 Tagen. Danach wurde das jeweilige Haar wieder aus der Tüte entnommen, zweimal dessen axiale Kraftübertragung getestet und die Werte daraus in die Mittelwertberechnung einbezogen.

Abbildung 25 zeigt auf der x-Achse die seit der Epilation vergangene Zeit und auf der y-Achse die relative Kraft (auf 100% normiert). Die relativen Kraftwerte gruppieren sich in dem Bereich von $y = 0,84$ bis $y = 1,39$ um die durch den Y-Wert 1 gelegte Parallele zur x-Achse. Bei der blauen Gerade handelt es sich um die Regressionsgerade, deren Steigung $m = -0,0015$ beträgt und mit einem p-Wert = 0,5307 nicht signifikant von null differiert. Folglich ist statistisch gesehen kein Einfluss der Lagerungszeit auf die axiale Haarkraft der getesteten Haare innerhalb des Untersuchungszeitraums zu verzeichnen.

3.4.8 Färbung der Haare mit Toluidinblau

Jeder PSD-Patient soll die optimale chirurgische Therapie erhalten, welche nach dem aktuellen Stand der Forschung die Färbung des Fistelgangsystems mit Toluidinblau

beinhaltet (36). Dabei wurden jedoch auch die in den Sinus liegenden Haare während der Operation mit Farbstoff angefärbt. Das Sortieren und Separieren der Haare vor den Tests erforderte teilweise die Waschung der exzidierten Haare, um Blut- und Toluidinblau-Verklebungen zu lösen. Die Frage, ob es möglich ist, auch intraoperativ gewonnene, also Toluidinblau-gefärbte und gewaschene Haare reliabel zu testen, soll die folgende Untersuchung von Färbezustand und axialer Kraftübertragung beantworten.

Dazu wurde die axiale Kraftübertragung von 10 epilierten POE-Haaren in Abhängigkeit von ihrem Färbezustand ermittelt. Zunächst wurden die Haare dreimal nativ, also ohne jede Färbung, nach der Epilation getestet und der Mittelwert aller Testungen \pm Standardabweichung aufgetragen. Danach wurden die Haare mit Toluidinblau gefärbt und getrocknet und erneut dreimal getestet. Anschließend wurde das Toluidinblau wieder ausgewaschen, die Haare getrocknet und erneut getestet. Während der Färbe- und Waschvorgänge wurden die Haare nicht aus ihrem Klingenthaler gelöst, um eine Mehrfacheinspannung zu vermeiden. Die Haare wurden im Hinblick auf Abbildung 24 nur in vollständig getrocknetem Zustand, also nach mindestens 15 Minuten Trocknungszeit, getestet (vgl. Unterkapitel ‚Nass-Trocken-Testung‘). Von den Kraftwerten der Haare im gefärbten und im ausgewaschenen Zustand wurden ebenfalls die Mittelwerte sowie die Standardabweichung berechnet und in Abbildung 26 eingefügt.

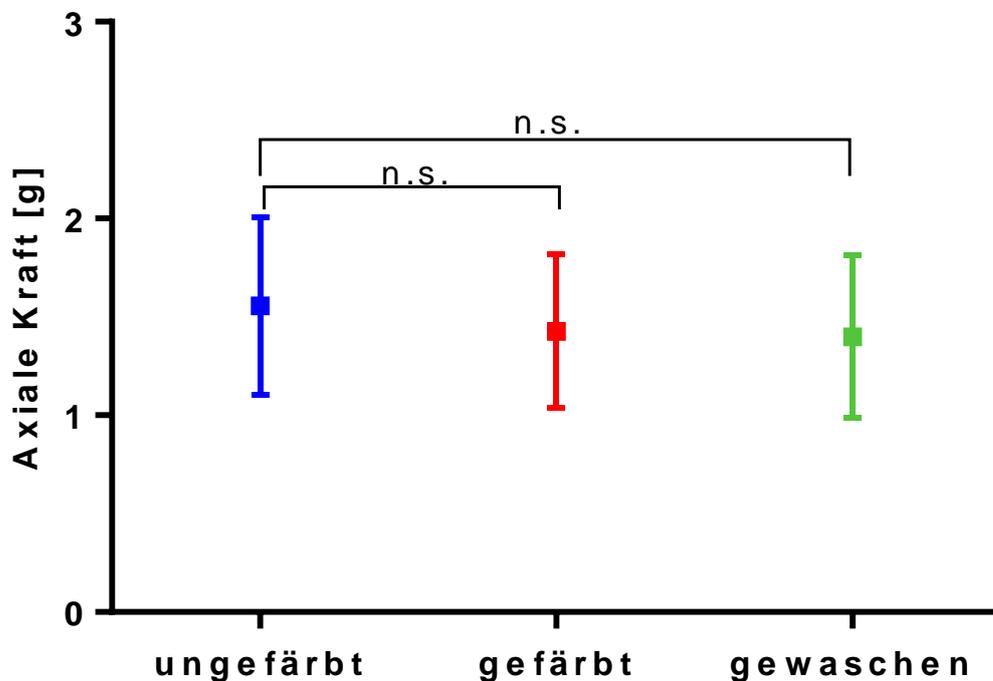


Abbildung 26: Färbung mit Toluidinblau (erste Einspannung; 0,2 cm; trockene, senkrechte Testung); n = 10 Haare.

Die mittleren Kraftwerte der Haare lassen erkennen, dass sich die Kraftübertragung der Haare im Färbe- und anschließenden Waschungsprozess nicht signifikant verändert hat. Die Toluidinblau-Färbung betreffend ist es also möglich, auch aus den Sinus exzidierte und damit eventuell gefärbte Haare direkt zu testen, sofern sie zuvor ausreichend lange getrocknet wurden. Dennoch war eine Waschung meist nötig, um verklebte Haare schonend ohne Krafteinwirkung voneinander zu lösen.

3.4.9 Testung wurzelloser Haare

Haare befinden sich von Stunden bis zu Jahren im PSD-Nest, die genaue Verbleibzeit ist unklar (32). Ob diese wurzellosen Haarnest-Haare vor der Testung endständig angefrischt werden sollten, untersuchen folgende rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen. Hier zeigt sich, dass einzelne Haare aus dem Sinus im Endbereich Lysezonen enthalten, die durch eine unregelmäßige Haarend-Oberfläche gekennzeichnet sind (Abbildung 28). Diese Oberfläche führt sicher nicht zu einer mechanisch gleichwertigen Kraftübertragung auf der Waage wie ein abgeschnittenes Haar. Der von der Lysezone wenige Zehntelmillimeter entfernte Haarschaft scheint hingegen wenig verändert zu sein (Abbildung 27). Um ein vergleichbares Aufsetzen der Haare auf die Parafilm-Schicht der Mikrowaage zu gewährleisten, wurden deshalb alle PSD-Haare aus dem Nest um mindestens 0,5 mm angefrischt.

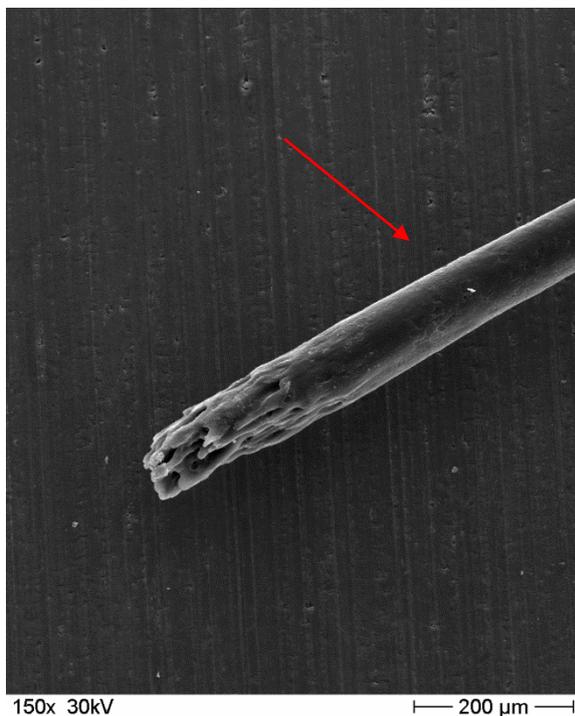


Abbildung 27: PSD-Haar; roter Pfeil = Haarschaft (Rasterelektronenmikroskopie, goldbeschichtet, 150-fach vergrößert).

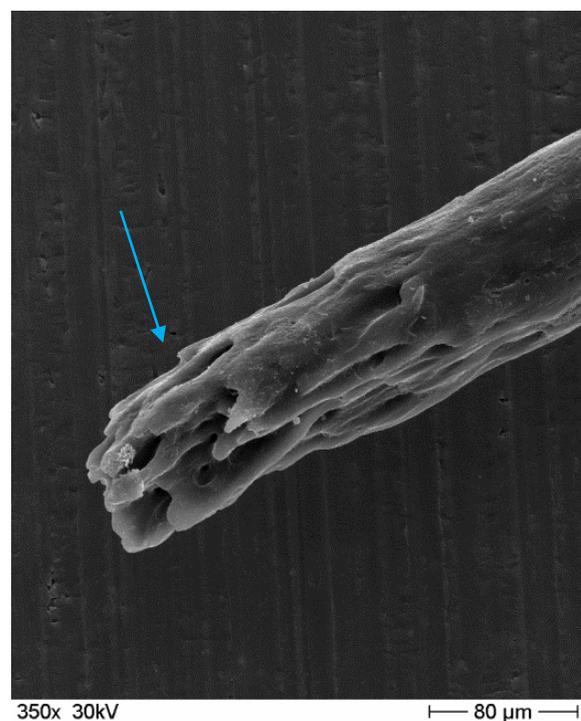


Abbildung 28: PSD-Haar aus Abbildung 27; blauer Pfeil = Lysezone (Rasterelektronenmikroskopie, goldbeschichtet, 350-fach vergrößert).

3.4.10 Anzahl und Auswahl der Testhaare

Bei Abbildung 29 handelt es sich um eine Grafik, die wiederum aus sechs einzelnen Untergrafiken besteht. In jeder Grafik sind auf der y-Achse die axiale Haarkraft und auf der x-Achse die verschiedenen Haare eines Probanden von 1-10 nummeriert aufgelistet. Jedes dieser Haare wurde sechsmal auf seine axial übertragbare Kraft getestet und der Mittelwert \pm Standardabweichung der sechs Testungen eingetragen. Die oberen drei Grafiken stellen die Kraftwerte von je 10 POE-Haaren drei verschiedener Probanden dar. Für jeden Probanden wurden zwei individuelle Grafiken erstellt. Die untere Reihe beinhaltet ebenso drei Grafiken, wobei jede Grafik zehn Haare aus der Region des unteren Rückens der drei Probanden beschreibt. In beiden Haarregionen und bei allen Probanden fallen die sehr unterschiedlichen Kraftwerte der Haare auf. Jeder Proband besaß in der jeweils untersuchten Region sowohl weichere als auch festere Haare. Vergleicht man die Grafiken der POE-Haare untereinander, fällt auf, dass die beiden ersten Probanden insgesamt höhere Kraftwerte erreichten. Gleichfalls erreichten die UR-Haare des ersten Probanden insgesamt die höchsten Kraftwerte unter den UR-Haaren der drei Patienten. Es besteht demzufolge sowohl intra- als auch interindividuell eine Schwankungsbreite um den Faktor 2-3 in den axialen Festigkeiten der einzelnen Haare.

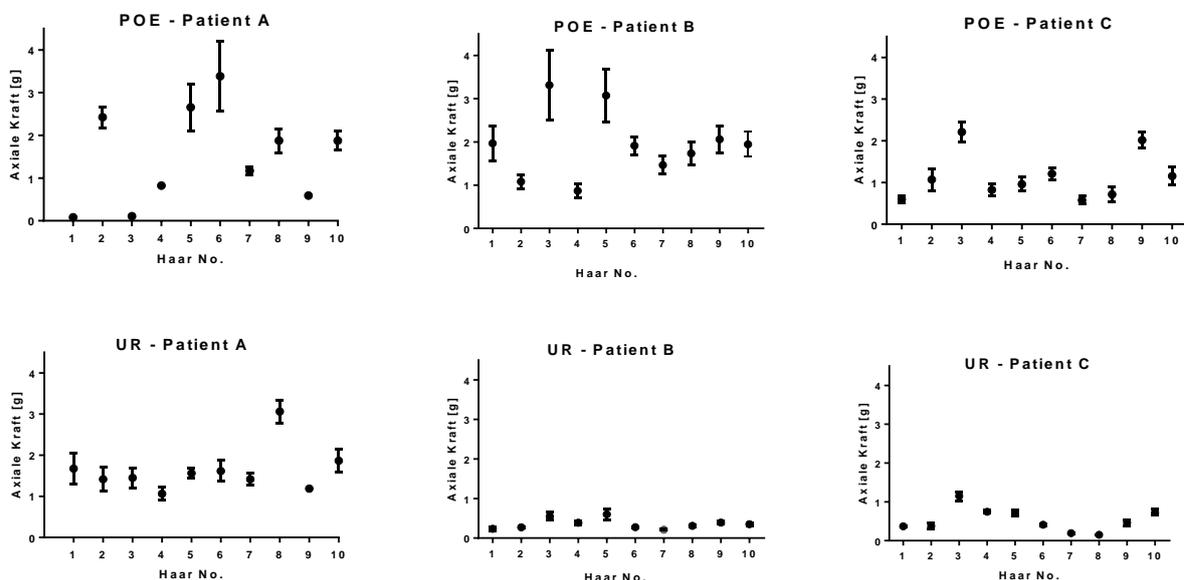


Abbildung 29: Kraftübertragung von jeweils zehn Haaren aus derselben Region von 3 gesunden Patienten; die Haare in den Grafiken in der oberen Zeile stammen von der POE (Protuberantia occipitalis externa), die in der Grafiken der unteren Zeile vom UR (unterer Rücken).

Um zu ergründen, welche Haare einer Haarregion getestet werden sollten, und wie diese Auswahl getroffen werden sollte, wurde der Durchmesser von Haaren aus verschiedenen Regionen unterschiedlicher Probanden lichtmikroskopisch bestimmt. Technische Details finden sich im Unterkapitel ‚Mikroskopische und makroskopische Untersuchung der Haare‘. Anschließend wurde die axiale Kraft der Haare bestimmt. Abbildung 30 und 31 veranschaulichen die Ergebnisse und führen den Durchmesser der Haare auf der x-Achse und die assoziierte Kraftübertragung auf der y-Achse zusammen. Mit zunehmendem Durchmesser der Haare steigen die Kraftwerte an. Der Durchmesser von Haaren korreliert folglich positiv mit ihrer axialen Haarkraft. Es fällt im Vergleich der Abbildungen 30 und 31 auf, dass die durchschnittliche Steigung der Kraftwerte der POE-Haare steiler ($m = 0,03391$) verläuft als die der UR-Haare ($m = 0,02377$). Die Steigung der Haarkraft-Durchmesser-Kurven variiert also abhängig von der Körperregion, aus der die Haare epiliert wurden. Kopfhare mit gleichem Durchmesser zeigen demnach eine größere axiale Festigkeit als UR-Haare bei Normalpersonen.

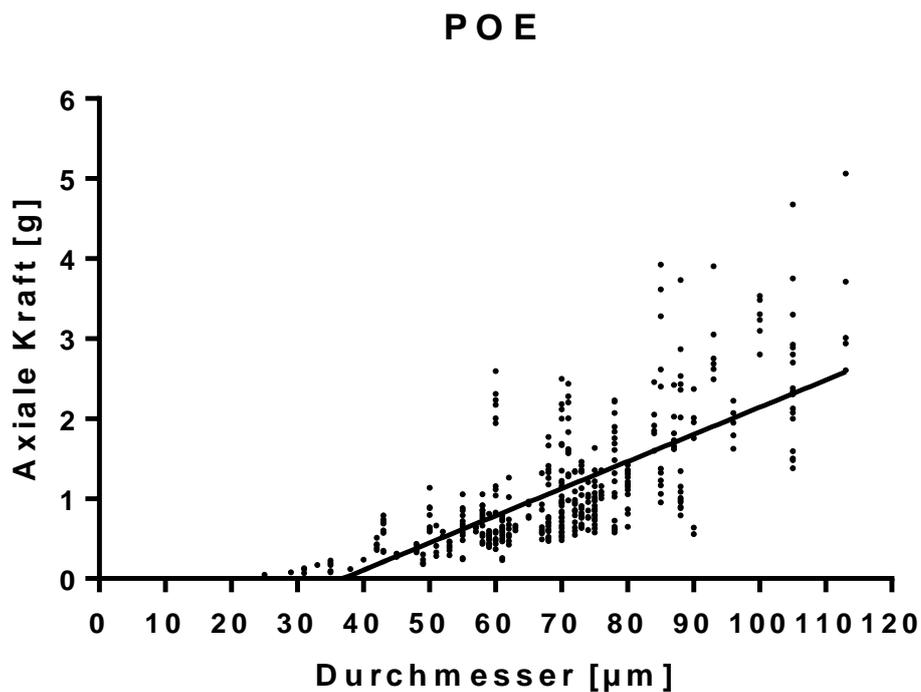


Abbildung 30: Durchmesser von POE-Haaren und axiale Kraftübertragung; $n = 100$ Haare.

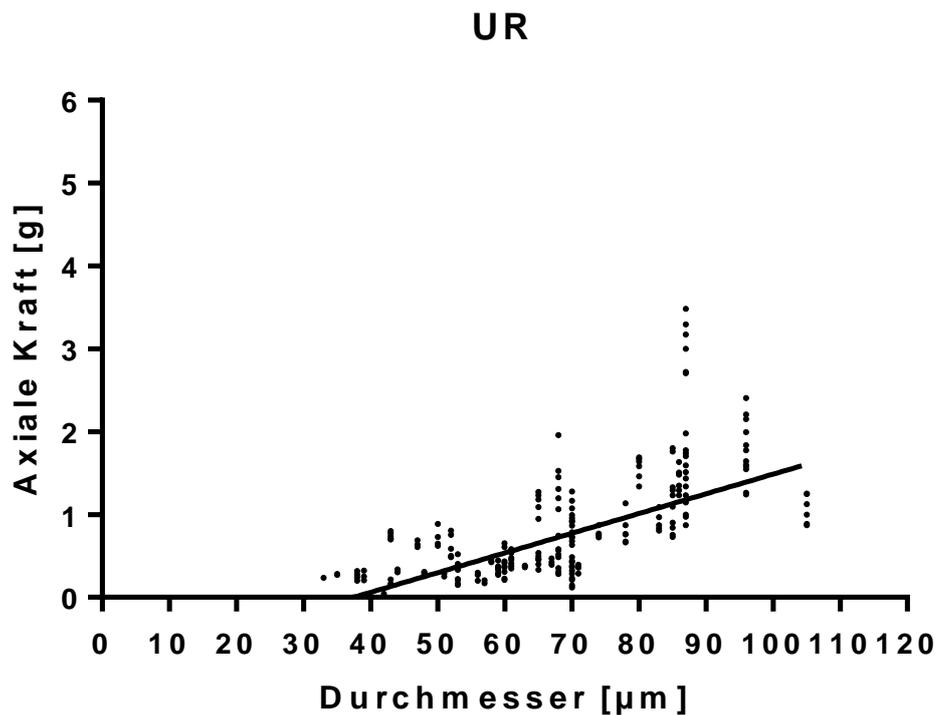


Abbildung 31: Durchmesser von UR-Haaren und axiale Kraftübertragung, n = 65 Haare.

Davon ausgehend, dass der Durchmesser der Haare mit der axial übertragbaren Kraft korreliert, lässt sich aus Abbildung 29 entnehmen, dass Haare derselben Region desselben Probanden, die unterschiedliche Kraftwerte erreichen, auch unterschiedliche Durchmesser haben. Die makroskopische Examinierung der Haare bestätigt diesen Zusammenhang. Makroskopisch dicke Haare sind in der Lage, leichter in die Haut einzudringen, da sie eine größere axiale Kraft ausüben können (vgl. Unterkapitel ‚Physikalische Grundlagen‘ ; Pfeil versus Speer). Deshalb wurde die axiale Haarkraft der kräftigsten Haare ermittelt, da sie am wahrscheinlichsten einen Pilonidalsinus verursachen könnten. Dazu werden pro Region 10 Haare epiliert und davon die 6 mit dem makroskopisch größten Durchmesser ausgewählt und auf ihre Kraft getestet. Spätere statistische Berechnungen zeigten, dass nach makroskopischer Dicke ausgewählte Haare die gleiche Kraft wie zufällig ausgewählte Haare der gleichen Region aufweisen.

3.4.11 Etablierter Standard des Testverfahrens

Die Haare wurden wie beschrieben aus den Haarregionen epiliert oder intraoperativ geerntet und bis zur Testung in Plastiktüten gelagert. Verklebte Sinushaare wurden vorsichtig gewaschen und mindestens 30 Minuten getrocknet. Alle übrigen sauberen Einzelhaare wurden ohne Waschung getestet. Alle Haare wurden in Länge und Durchmesser vermessen.

Die Haare aus den Sinus der PSD-Patienten wurden ausgezählt und die Gesamtzahl der in einem Sinus enthaltenen Haare vermerkt. Für den Knicktest wurde anschließend die eventuell vorhandene Haarwurzel abgetrennt und der Haarschaft mit einer Einspannlänge von 0,2 cm, trocken und senkrecht getestet. Missglückte die korrekte Einspannung beim ersten Versuch, wurde das Haar verworfen. Die korrekte Einspannung gelang am besten, wenn das Haar zunächst nicht gekürzt, sondern mitsamt der Haarwurzel etwas länger eingespannt (2-3 mm Abstand zum Übergang der Haarwurzel in den Haarschaft) und erst dann die Wurzel abgeschnitten und die Einspannlänge dabei auf 2 mm gekürzt wurde. Jedes Haar wurde 6-fach getestet, also sechsmal auf die Wiegefläche abgesenkt, da die ersten sechs Testungen die größte Konstanz in Bezug auf die Kraftübertragung haben. Aufgrund der starken intraindividuellen Varianz der Haarfestigkeit wurden von jedem Probanden und aus jeder der beschriebenen Haarregionen 10 Haare (sofern vorhanden) epiliiert, von denen dann optisch die sechs dicksten ausgewählt und getestet wurden.

3.5 Mikroskopische und makroskopische Untersuchung der Haare

Im Rahmen der Studie wurde jedes Haar makroskopisch untersucht, um, wie im Unterkapitel ‚Anzahl und Auswahl der Testhaare‘ beschrieben, die sechs Haare mit dem größten Durchmesser in jeder der Behaarungsregionen POE, UR, IGF und PSD herauszufiltern. Ausgewählte Haarproben, sowohl abgeschnittene als auch aus den Haarnestern geerntete Haare, wurden zusätzlich licht- oder auch elektronenmikroskopisch untersucht, um Informationen über ihre Oberflächenstruktur, den Haardurchmesser und die Beschaffenheit der Haarenden zu erhalten.

Für die lichtmikroskopischen Aufnahmen und zur Messung der Haardurchmesser wurde ein Leica DM2500 Lichtmikroskop und das Fotoprogramm ‚Leica Application Suite Version 2.8.1‘ verwendet. Die Haare wurden unbehandelt unter ein Deckgläschen auf den Objektträger gelegt und vollständig der Länge nach examiniert. Für die Fotografien wurde eine Ebene gewählt, in der die Haarenden möglichst scharf zu sehen waren.

Für eine noch höhere Vergrößerung wurden ausgewählte Haarproben elektronenmikroskopisch untersucht. Bei der Elektronenmikroskopie wird die Probe mit Elektronen abgebildet, indem ein fokussierter Elektronenstrahl (Primärelektronen) rasterartig über die Probe geführt wird. Abhängig von der Probenbeschaffenheit finden verschiedene Wechselwirkungen statt, die wiederum detektiert und zur Bilderzeugung genutzt werden. Ein Transmissionselektronenmikroskop folgt dabei grob dem Abbildungsprinzip eines Lichtmikroskops, wobei Elektronen eine sehr dünne Probenschicht (10-100 nm) penetrieren und dann mittels verschiedener Elektronenlinsen dargestellt werden. Demgegenüber wird in

einem Rasterelektronenmikroskop die Probe mithilfe eines fokussierten Elektronenstrahls (Primärelektronenstrahl) rasterartig abgefahren. In der Probe werden dadurch weitere Elektronen angeregt, die als Sekundärelektronenstrahl zurückgeworfen, durch Elektronenlinsen fokussiert und letztendlich detektiert werden, um ein Abbild der Probe zu generieren (40).

Erste elektronenmikroskopische Bilder wurden mit dem Rasterelektronenmikroskop Hitachi S5000 erstellt. Vorbereitend wurden die einzelnen Haarproben mithilfe eines Sputtercoaters mit einer 15 nm Goldschicht versehen. Die Proben wurden mit einem Arbeitsabstand, also der Distanz zwischen der Probe und der Objektivlinse (40), von 8 mm und einer Beschleunigungsspannung (mit der die Primärelektronen angeregt werden) von 30 kV untersucht.

Die zweite Charge von Haaren wurde nicht mit Gold, sondern mithilfe eines Sputtercoaters mit Kohle bestäubt. Zudem wurde die Beschleunigungsspannung auf 1,5-1,7 kV stark reduziert. Es wurde mit dem Elektronenmikroskop FEI XL-30 Emission Gun ESEM bei einem Arbeitsabstand von, je nach Vergrößerung, 9,8-12,7 mm gearbeitet, sodass die Objekte bis zu 1000-fach vergrößert dargestellt werden konnten.

3.6 Haarherkunft und Wahrscheinlichkeit

3.6.1 Datenbehandlung

Von den PSD-Patienten und den Vergleichsprobanden wurden deren Basisdaten Geschlecht, Geburtsdatum, Körpergröße, Körpergewicht, Listennummer des gematchten Probandenpaares, eventuelle Vorerkrankungen, Behaarungsgrad in den verschiedenen Regionen, Datum der Epilation, Uhrzeit der Epilation und die Außentemperatur unmittelbar zum Zeitpunkt der Epilation anonymisiert in eine Microsoft Excel®-Tabelle eingetragen. Diese Tabellen wurden täglich gesichert.

Auch während der mechanischen Haartestungen wurden die gemessenen Kraftwerte unmittelbar in Microsoft Excel®-Tabellen eingetragen und dort gesammelt. Vor der weiteren Auswertung wurden alle Daten händisch, mittels Pivot-Tabellen und anhand von Algorithmen in Microsoft Excel® auf Plausibilität, Vollständigkeit und Abwesenheit von Fehlern überprüft. Die statistische Auswertung der Daten erfolgte sowohl mithilfe von Pivot-Tabellen in Microsoft Excel®. Zur grafischen Darstellung der Ergebnisse wurde die Software GraphPad Prism® genutzt. Statistische Größen wie Mittelwert, Median, Minimum und Maximum wurden dabei mit beiden Programmen berechnet. Der Vergleich von multiplen Datengruppen mit der One-Way-Anova Testung wurde mittels GraphPad Prism® durchgeführt. Vergleiche von zwei

Datengruppen fanden unter Verwendung des t-Testes ebenfalls in dem Programm GraphPad Prism® statt. Eine statistische Signifikanz war bei $p < 0,05$ gegeben. Sämtliche Grafiken wurden mit GraphPad Prism® und die Tabelle (Tabelle 1) mit Microsoft Word® erstellt. Für die Textverarbeitung wurde Microsoft Word® herangezogen.

3.7 Statistik

Nach Abschluss der Testungen und Analysen der Daten der geplanten 20 Patientenpaare wurde ein Statistiker (Dr. Alain Hauser, Berner Fachhochschule, Technik und Informatik) mit der weiterführenden statistischen Auswertung der Daten betraut. Zielsetzung war die Klassifizierung jedes einzelnen Sinushaares, um zu ermitteln, aus welcher der drei untersuchten Haarregionen das jeweilige Haar wahrscheinlich stammt. Folglich wurden alle 15 Patienten, bei denen sich Haare im Sinusnest fanden, wurden in die statistischen Berechnungen inkludiert.

Die weitergehende Datenanalyse erfolgte auf der logarithmischen Skala der Haarkraftwerte. Durch das Logarithmieren der Werte kann die Annahme der Homoskedastizität an ein lineares Modell erfüllt werden. Die Homoskedastizität ist die statistische Annahme einer konstanten Varianz des Fehlers, der unabhängig vom Wert der erklärenden Variablen ist (103). Der nächste Schritt bestand im Anpassen eines linearen Regressionsmodells an diese logarithmierten Haarkraftwerte, um die mittlere Haarkraft eines jeden Haares aus den pro Haar sechsfach durchgeführten Haarkraftmessungen zu berechnen. Die Nummer der Kraftmessung war dabei die erklärende Variable. Die von diesem Modell vorhergesagte Kraft bei der 1. Messung diente für die folgenden Analysen als gemittelte Haarkraft. Die wichtigste Annahme in diesem Modell, die Homoskedastizitätsannahme des Modells wurde mit Hilfe eines Tukey-Anscombe-Diagramms überprüft und von den vorliegenden Daten erfüllt (Abbildung 32 links). Die Normalitätsannahme wurde mit Hilfe eines Quantil-Quantil-Diagramms getestet. Die Verteilung der Werte liegt wie in Abbildung 32 rechts zu sehen nicht exakt auf einer Gerade, sondern sie sich ergebende Kurve ist endständig leicht gebogen. Dennoch wurde das Modell insgesamt für passend befunden, um die verschiedenen Werte der Haarkrafttestungen pro Haar zusammenzufassen.

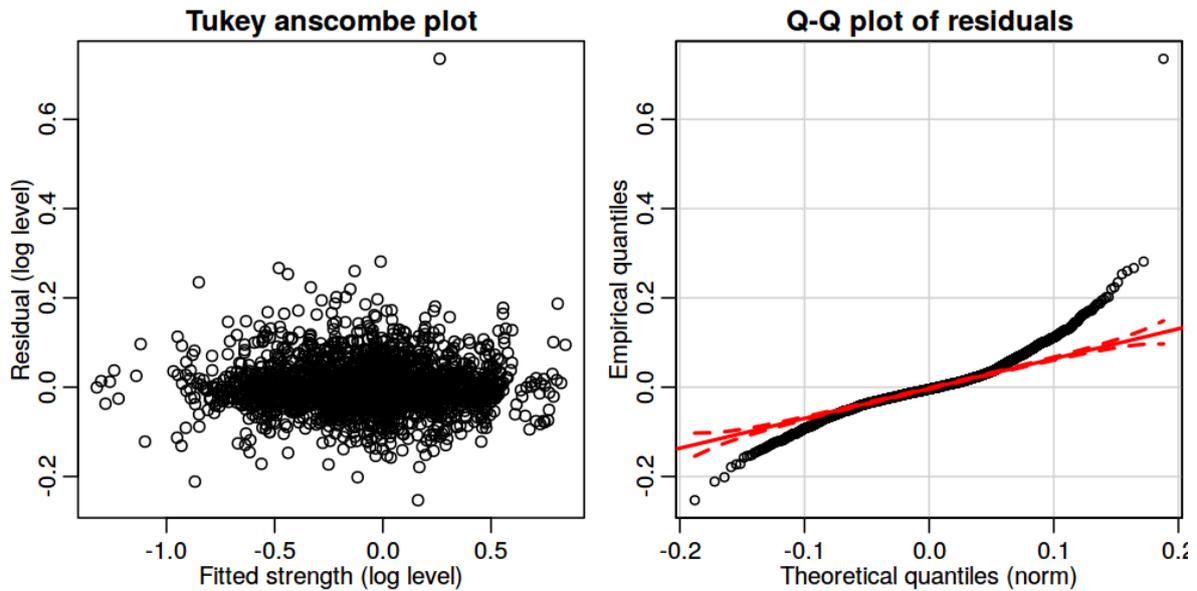


Abbildung 32: Grafiken zur Validierung des linearen Modells, was für die gesammelten wiederholten Haarkraftmessungen angewandt wurde. Linke Seite: Tukey-Anscombe plot (Werte vs. berechnete Anpassung); rechte Seite: Wert-Quantile vs. normale Quantile.

Mithilfe der gemittelten, logarithmischen Haarkräfte für die Haare von der POE, dem UR und aus der IGF wurde für jeden der 15 Patienten eine lineare Diskriminanzanalyse (im Weiteren LDA) erstellt. Dabei wurde jeder der drei Haarregionen eine a-priori-Wahrscheinlichkeit von $1/3$ zugeordnet. Über die LDA kann jedes PSD-Haar in Bezug auf seinen Ursprungsort (POE, UR, IGF) klassifiziert werden, indem die gemittelte Haarkraft des PSD-Haares mit den gemittelten Kräften der Haare aus den verschiedenen Haarregionen desselben Patienten verglichen wird. Eine separate Heatmap für jeden einzelnen PSD-Patienten visualisiert den wahrscheinlichen Herkunftsort eines jeden PSD-Haares dieses Patienten. Abbildung 33 zeigt die Heatmap von Patient 3. Dabei steht jede Reihe der Heatmap für ein Sinushaar des Patienten, und jede Spalte ist mit einer Haarregion beschriftet. In den Feldern der Heatmap ist jeweils das 95%-Konfidenzintervall der a-posteriori Wahrscheinlichkeit aufgeführt, mit der ein im Sinusnest gefundenes Haar aus der jeweiligen (untenstehenden) Haarregion stammt. Diese Konfidenzintervalle wurden mithilfe eines nicht-parametrischen Bootstraps berechnet, wobei 999 Bootstrap-Stichproben verwendet wurden.

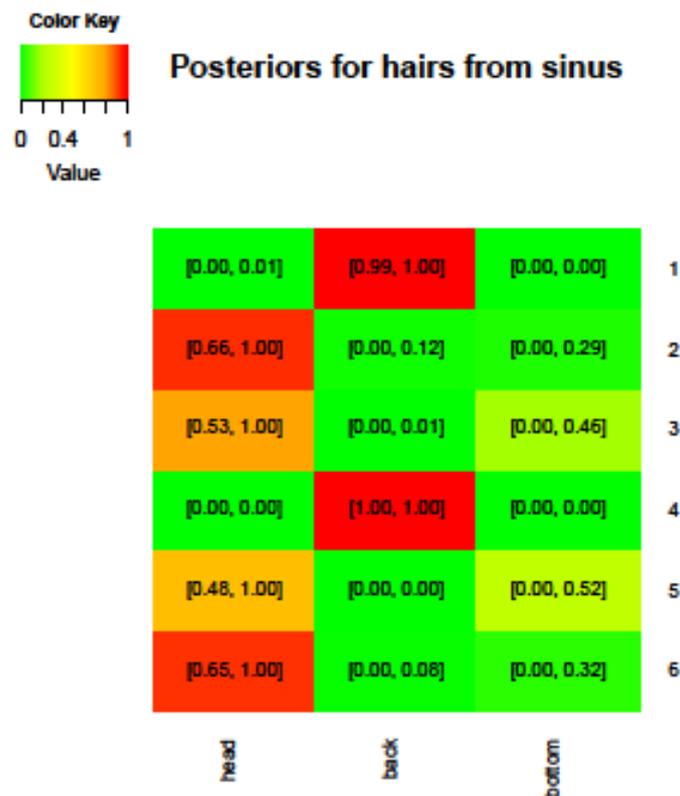


Abbildung 33: Heatmap von Patient 3.

Die Heatmaps dienen der farblichen Visualisierung der Wahrscheinlichkeiten, wobei grüne Zellen für eine geringe Wahrscheinlichkeit und rote Zellen für eine hohe Wahrscheinlichkeit stehen. Über den Farbverlauf der Wahrscheinlichkeiten informiert der für alle Heatmaps einheitliche Farbschlüssel (Color Key).

Die Heatmap von Patient 3 (Abbildung 33) liest sich wie folgt: Sinushaar 1 stammt mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,99 vom unteren Rücken, Sinushaar 2 vom Hinterkopf, Sinushaar 3 eher vom Hinterkopf (0,53) etc. Am wahrscheinlichsten stammen bei diesem Patienten 4/6 der im Sinusnest geborgenen Haare vom Hinterkopf, zwei vom UR und keines von intergluteal.

Anschließend wurden die Bayes-Faktoren und die korrespondierenden a-posteriori-Wahrscheinlichkeiten aller nach den LDA-Modellen klassifizierten Haare berechnet, um die Nullhypothese, dass das jeweilige PSD-Haar aus der IGF stammt, gegen die Alternativhypothese, dass das Haar von der POE oder dem UR stammt, abzuwägen. Ein Bayes-Faktor größer als 1 spricht dabei für die Nullhypothese, ein Bayes-Faktor kleiner als 1 für die Alternativhypothese.

Um abschließend die Frage zu beantworten, ob eines aller getesteter Sinushaare nicht aus der IGF stammt, sondern von der POE oder dem UR, wurde die verbundene Nullhypothese (alle

untersuchten Sinushaare stammen aus der IGF) gegen die verbundene Alternativhypothese (nicht alle untersuchten Haare stammen aus der IGF) abgewogen.

4 Ergebnisse

4.1 Physikalische Haarcharakteristika

4.1.1 Detailvergleich der Haarregionen einzelner PSD-Patienten

Die folgenden Abbildungen 34-39 vergleichen die Haarfestigkeit verschiedener PSD-Patienten untereinander und schlüsseln gleichzeitig die Haarfestigkeiten in den Haarregionen POE, UR, IGF und PSD der jeweiligen PSD-Patienten auf. Dazu sind auf der x-Achse die Patienten aufgelistet, wobei die gleichfarbigen Balkengruppen zu dem darunter numerisch aufgeführten Patienten gehören. Um die Struktur der Abbildungen 35-39 zu veranschaulichen, wird beispielhaft die Anordnung der Balkengruppen des Patienten 1 in Abbildung 34 dargestellt.

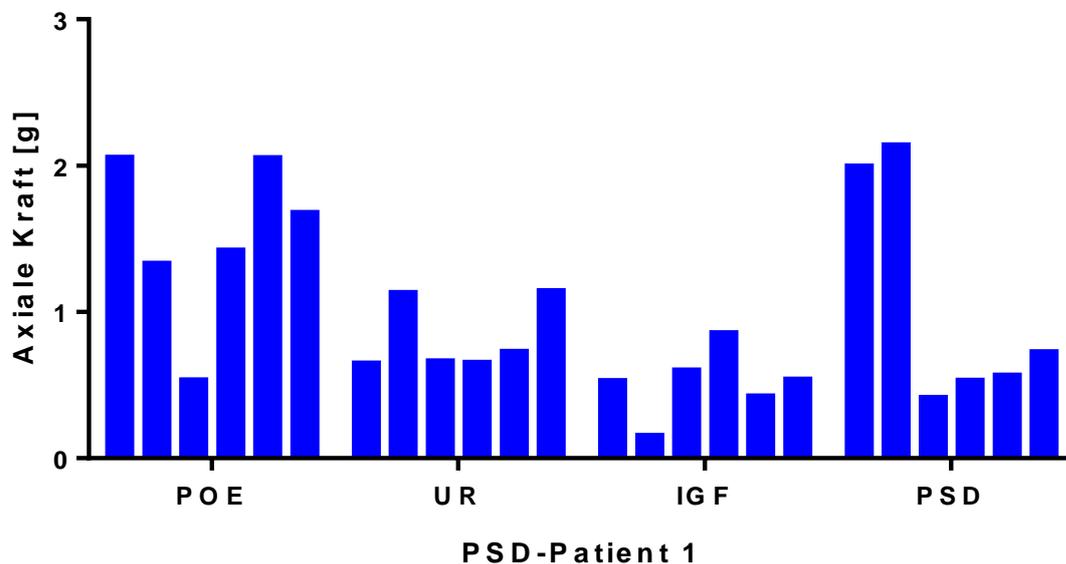


Abbildung 34: Haarregionen und axiale Haarkraft von Patient 1; Detailansicht.

Aus jeder Haarregion wurden die sechs makroskopisch dicksten Haare je sechsmal getestet und daraus für jedes Haar der Mittelwert berechnet. Die sechs Mittelwerte der axialen Haarkraft der 6 POE Haare bilden eine Balkengruppe. Ebenso bilden die sechs Kraft-Mittelwerte der UR-Haare eine Balkengruppe. Die Balken der jeweiligen Patienten sind stets

in einer einheitlichen Farbe nach einer für jeden Patienten gleichen Reihenfolge auf der x-Achse angeordnet. Dabei zeigt die linke blaue Balkengruppe die mittleren Kraftwerte der sechs getesteten Haare der POE an. Die zweite blaue Balkengruppe von links bildet die mittleren Kraftwerte der sechs Haare des UR von Patienten 1 ab; während die dritte blaue Balkengruppe von links die mittleren Kraftwerte der IGF-Haare darstellt. Die vierte und innerhalb der vier blauen Balkengruppen des Patienten 1 rechts angeordnete Balkengruppe beschreibt die mittleren Kraftwerte der intraoperativ gewonnenen Haare aus dem Haarnest des Patienten 1.

Abbildung 35 ermöglicht einen Gesamtüberblick über die individuellen Kraftwerte der Haare aus den vier Regionen eines Patienten sowie den Vergleich der Kraftwerte zwischen denselben 20 getesteten PSD-Patienten. Die vier blauen Balkengruppen ganz links auf der x-Achse repräsentieren die bereits aus Abbildung 34 bekannten Kraftwerte des Patienten 1. Haarlose Regionen sind durch die niedrigsten, einheitlich kleinen Platzhalter-Balkengruppen markiert, die unter anderem bei Patient 2 in den Regionen UR und IGF zu finden sind.

Es gilt zu beachten, dass auch in einer insgesamt hoch wirkenden Balkengruppe, wie zum Beispiel den PSD-Haaren von Patient 16, unter Umständen nur ein Haar eine besonders hohe axiale Kraft erreicht hat, und die Kraft der anderen Haare niedriger ist. Dennoch wird die Balkengruppe im Folgenden als ‚hoch‘ bezeichnet, sprich mindestens eines der Haare erreichte einen hohen Kraftwert > 4 g. Eine im Weiteren als ‚hoch‘ titulierte Balkengruppe hat also einen hohen Maximalwert infolge mindestens eines besonders steifen Haares. Bei derselben Balkengruppe lässt sich jedoch nicht zwingend ein hoher Kraft-Mittelwert aus den Werten der 6 einzelnen Haare berechnen. Weiterhin ist wichtig, dass auch eine Abweichung zweier Balkengruppen um 10% als gleiche Höhe gewertet wurde, da die Haarkraft, wie bereits im Unterkapitel Multitestungen gezeigt, zwischen den einzelnen Krafttestungen eines Haares variieren kann und diese Varianz daher Eingang in die Bewertung der Haarkrafttestungen finden darf.

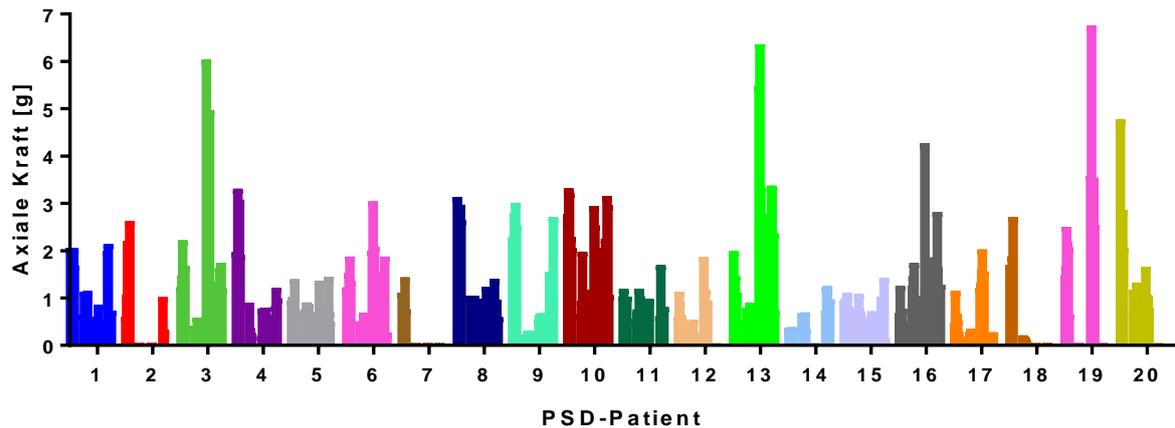


Abbildung 35: Vergleich der nach Haarregionen aufgeschlüsselten intra- und interindividuellen Haarfestigkeit bei PSD-Patienten; n = 20 PSD-Patienten.

Besonders in der überblickenden Abbildung 35 fallen die in der Relation zu den übrigen Haaren extrem hohen Kraftwerte von Haaren der Patienten 3, 13, 19 und 20 auf. Mit maximalen durchschnittlichen Kraftwerten von der Reihenfolge in der Grafik nach 6,0 g, 6,4 g, 6,7 g und 4,8 g übertreffen diese die Kraftwerte der übrigen Haare um ein Vielfaches.

Bei den folgenden vier Abbildungen 36-39 handelt es sich um vergrößerte Ausschnitte der Abbildung 35, wobei Abbildungen 36-39 die Kraftwerte von jeweils 5 PSD-Patienten zusammenfassen. Nummerierung, Reihenfolge und Farbkodierung der Patienten entsprechen Abbildung 35.

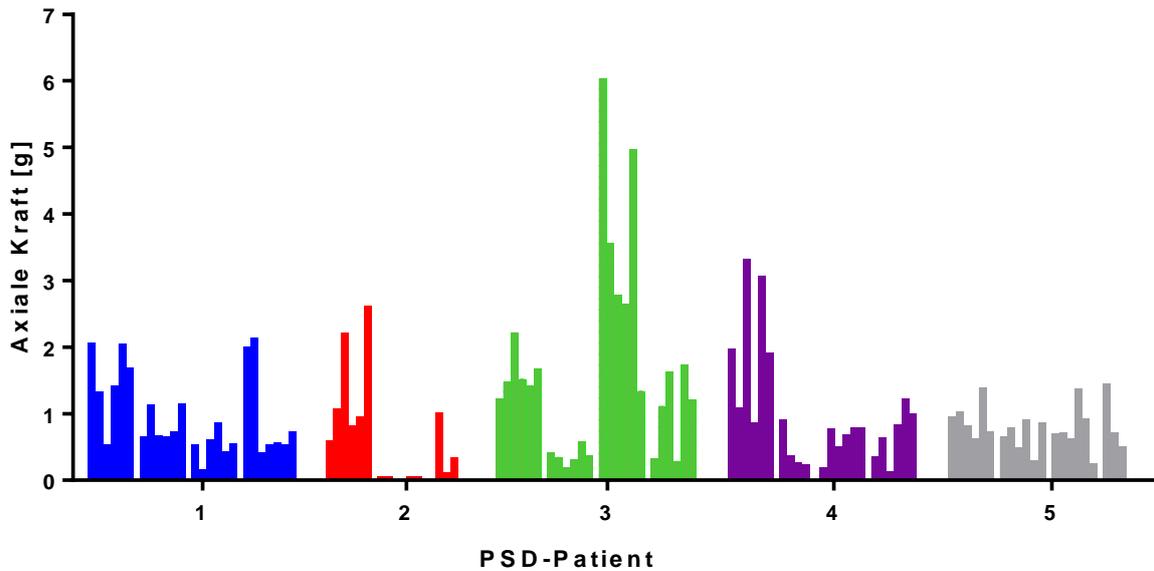


Abbildung 36: Haarkraftwerte der Patienten 1-5 (vergrößerte Detaildarstellung aus Abbildung 35).

Die Haarkraftwerte der Patienten 1-5 sind in Abbildung 36 vergrößert dargestellt. Bei Patient 1 (blau) fanden sich im Sinus (blau; 4. Balkengruppe) sowohl Haare mit einer Haarkraft, die ähnlich hoch war wie die Kraft der POE- Haare (blau; 1. Balkengruppe), als auch Haare mit niedrigerer Kraft, ähnlich der Haarkraft der UR- und IGF-Haare. Die steifen PSD-Haare könnten demzufolge von der POE und die etwas weicheren PSD-Haare von dem UR und/oder der IGF stammen. Patient 2 (rot) war am UR (rot; 2. Balkengruppe) und in der IGF (rot; 3. Balkengruppe) haarlos. Die Haare aus dem Sinus stammen somit mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit vom Hinterkopf.

Interessant sind die grün dargestellten Haarkraftwerte des Patienten 3. Dessen IGF-Haare erreichten hohe mittlere Kraftwerte von bis zu 6,03 g, wobei die POE-Haare maximal einen Kraftwert von 2,22 g und die UR-Haare maximal einen Kraftwert von 0,58 g erreichten. Die POE-Haare sind mit einem maximalen Kraftwert von 3,31 g die festesten Haare des Patienten 4 und rangieren damit deutlich vor allen anderen Haaren dieses Patienten. Im Kontrast dazu steht Patient 5, dessen Haare in allen vier untersuchten Regionen ähnliche Kraftwerte bis zu einer maximalen Haarkraft von 1,44 g eines PSD-Haares zeigten. Die ganz rechte, letzte Balkengruppe des Patienten 5, die also die Kraftwerte der PSD-Haare von Patient 5 abbildet, ist auffallend schmal. Dies liegt darin begründet, dass im Sinus des Patienten 5 lediglich 3 PSD-Haare zu finden waren. Ebenso fanden sich im Sinus des Patienten 2 nur 3 Haare, und somit ist auch die rechte rote Balkengruppe lediglich drei Balken breit.

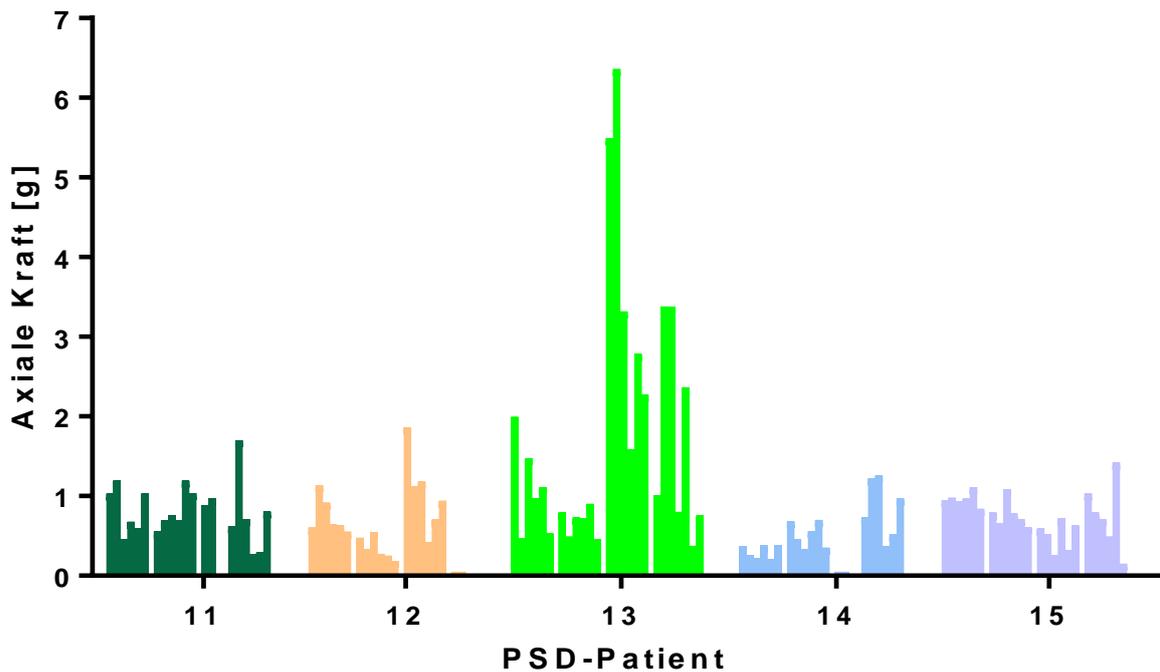


Abbildung 38: Haarkraftwerte der Patienten 11-15 (vergrößerte Detaildarstellung aus Abbildung 35).

Von den 5 in Abbildung 38 zusammengefassten Patienten fanden sich bei den Patienten 11 und 14 in den Sinus teilweise festere Haare als an den drei übrigen Körperstellen. Der UR des Patienten 14 war haarlos. Die Patienten 12 und 13 hatten wiederum, ähnlich den Patienten 3 und 6 aus den vorherigen Grafiken, deutlich festere IGF- als POE- oder PSD-Haare. Dabei enthielt der Sinus von Patient 12 zum OP-Zeitpunkt keine Haare.

Die Patienten 16-20 stellt die Abbildung 39 dar. Bei den Patienten 16 und 17 ist jeweils die Balkengruppe der IGF- Haare die höchste. Bei Patient 16 müssen die PSD-Haare zumindest teilweise von der IGF stammen, da die Haarkraft einiger PSD-Haare die Kraft der POE- und IGF-Haare übersteigt. Die PSD-Haare von Patient 17 könnten aus jeder der drei Körperbehaarungsregionen originieren. Patient 18 besaß keine Haare am UR, und auch aus dem Sinus konnten keine Haare geerntet werden. Ebenso konnten keine Haare aus den Sinus von Patient 19 und 20 asserviert werden.

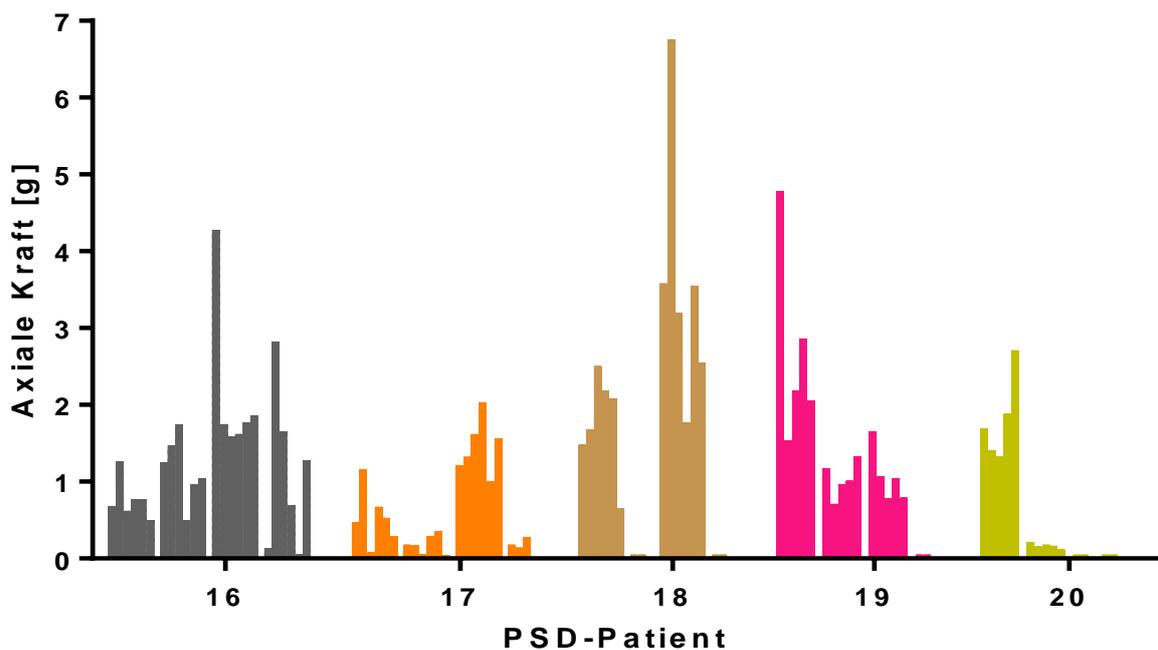


Abbildung 39: Haarkraftwerte der Patienten 16-20 (vergrößerte Detaildarstellung aus Abbildung 35).

Tabelle 2: Übersichtstabelle Haarregionen (POE = Protuberantia occipitalis externa, UR = unterer Rücken, IGF = Interglutealfalte).

Haarfestigkeit	Gesamt	POE	UR	IGF
POE \geq PSD	5	5	-	-
POE, UR \geq PSD	1	1	1	-
POE, IGF \geq PSD	4	4	-	4
IGF \geq PSD	2	-	-	2
POE, UR, IGF \geq PSD	6	6	6	6
PSD \geq POE, UR, IGF	2	-	-	-
Gesamt	20	16	7	13

Obige tabellarische Übersicht (Tabelle 2) fasst zusammen, aus welchen Haarregionen die PSD-Haare potentiell stammen könnten. Die Haarregion mit der größten Haarfestigkeit ist ein möglicher Verursacher eines PSD.

Bei 5 PSD-Patienten waren die POE-Haare die axial festesten Haare und fester als die PSD-Haare. Diese POE-Haare könnten ergo Quelle der Sinushaare sein. Bei einem Patienten wiesen die POE- und die UR-Haare eine höhere Haarkraft auf als die PSD-Haare. Bei 4 Patienten waren sowohl die POE- als auch die IGF-Haare fester als die PSD-Haare. Haare aus diesen beiden Regionen sind ergo fest genug, um den Haaren zu entsprechen, die sich in den Sinus fanden. Die IGF-Haare waren bei 2 PSD-Patienten die festesten der untersuchten Haarregionen und auch fester als die PSD-Haare desselben Patienten. Bei 6 Patienten ist kein genauer Rückschluss auf den Ursprung der PSD-Haare möglich, da die Sinushaare am weichsten von allen Haaren waren oder aber keine Haare aus dem Sinus geerntet werden konnten. In 2 Fällen waren die PSD-Haare fester als in den drei untersuchten Körperregionen.

In der visuellen Auswertung sind demnach POE-Haare mit 16-mal die häufigste und IGF-Haare die zweithäufigste (13-mal) Haarquelle der Sinus-Nest-Haare. UR-Haare spielen eine eher untergeordnete Rolle.

4.1.2 Haaranzahl im Sinus

Die folgende Abbildung beschäftigt sich näher mit den Pori der PSD-Patienten und beleuchtet die Eigenschaften der darin enthaltenen Haare. Die Pori bilden die Eintrittspforte der Haare in den Pilonidalsinus, sodass eine nähere Untersuchung der Pori interessant ist. Zunächst thematisiert Abbildung 40 die Anzahl der Haare in den Sinus und die Anzahl der Pori der PSD-Patienten. Auf der x-Achse ist die Haaranzahl logarithmisch eingetragen, während die y-Achse die Anzahl der Patienten definiert. Die roten Quadrate stehen für PSD-Patienten mit einem Porus, die blauen Quadrate für PSD-Patienten mit mehr als einem Porus.

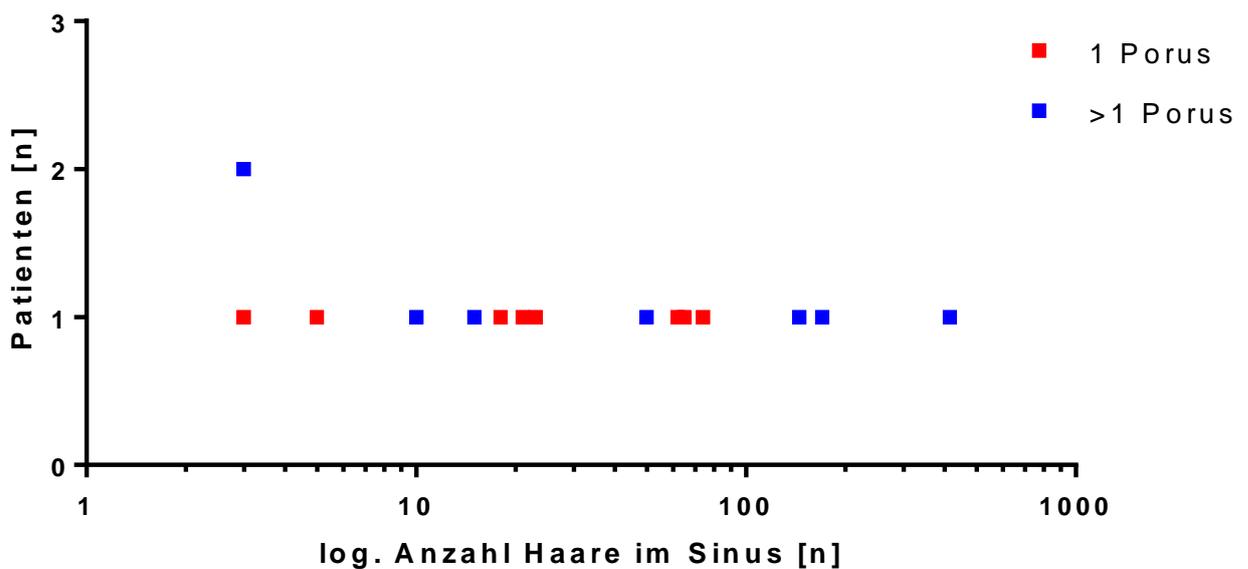


Abbildung 40: Anzahl der Haare pro PSD-Patient; n = 20 PSD-Patienten, davon konnten bei 5 Patienten keine Haare aus dem Sinus geerntet werden.

Unter den 20 studierten PSD-Patienten wurden maximal 8 Pori bei einem Patienten beobachtet. In den Sinus von fünf Patienten waren keine Haare zu finden, weshalb sie nicht auf der logarithmischen Skala dargestellt werden konnten. Aus den Sinus zweier weiterer Patienten, von denen einer einen und der andere zwei Pori hatten, wurden je 3 Haare geerntet. Insgesamt enthielten die Sinus eine variierende Anzahl von Haaren mit einer Spannweite von 1-415, wobei bei Patienten mit $n = 1$ Porus im Median 21 Haare, und bei Patienten mit $n > 1$ Porus im Median 32,5 Haare gefunden wurden. Überblickend ist also eine Tendenz zu erkennen, nach der bei sich den Patienten mit mehr als einem Porus eine größere Anzahl von Haaren in den Sinus befindet.

4.1.3 Haarlänge an den verschiedenen Regionen - PSD versus MP

Neben der Haarfestigkeit stellt die Länge der Haare der verschiedenen Körperstellen möglicherweise ein morphologisches Kriterium dar, das einen Hinweis auf den Ursprung der Sinushaare geben kann. Die mittleren Werte der Haarlängen in Zentimeter sind inklusive ihrer Standardabweichung in Abbildung 41 auf der y-Achse vermerkt. Auf der x-Achse sind entsprechend die Regionen angeordnet, aus denen die Haare geerntet wurden. Die Werte der Haare der PSD-Patienten sind rot und die der MP-Patienten schwarz markiert.

Dieselben Haarregionen der PSD- und MP-Patienten finden sich jeweils nebeneinander, begonnen ganz links auf der x-Achse mit den POE-Haaren der PSD-Patienten, gefolgt von den POE-Haaren der MP-Patienten. Darauf folgen die UR-Haare der PSD-Patienten und die

UR-Haare der MP-Patienten, sowie die IGF-Haare beider Gruppen. Die durchschnittlichen Haarlängen der Haare in den Sinusnestern (in) und in den Pori steckend, jedoch noch auf der Hautoberfläche sichtbar (out) visualisieren die beiden in der Abbildung 41 ganz rechten Balken.

An der POE differieren die Haarlängen der PSD- und MP-Patienten nicht signifikant voneinander, sind jedoch signifikant länger als die Haare der anderen Regionen ($p = 0,0148$ von POE zu UR der PSD-Patienten).

Mit einer durchschnittlichen Länge von $0,9 \text{ cm} \pm 0,7 \text{ cm}$ (Mittelwert \pm SD) finden sich die mit Abstand kürzesten Haare in den Sinus der PSD-Patienten. Diese sind mit je einem p -Wert $< 0,0001$ hochsignifikant kürzer sowohl als die POE, als auch als die UR- und IGF-Haare der PSD-Patienten. Die Haare in den Sinus sind hochsignifikant ($p < 0,0001$) kürzer als die außen in den Pori steckenden Haare mit ihrem Mittelwert von $1,8 \text{ cm} \pm 1,3 \text{ cm}$ (Mittelwert \pm SD). Die große Standardabweichung der PSD-out Haare begründet sich in ihrer geringen Anzahl ($n = 17$) im Vergleich zu den in den Sinus gefundenen PSD-in Haaren ($n = 616$).

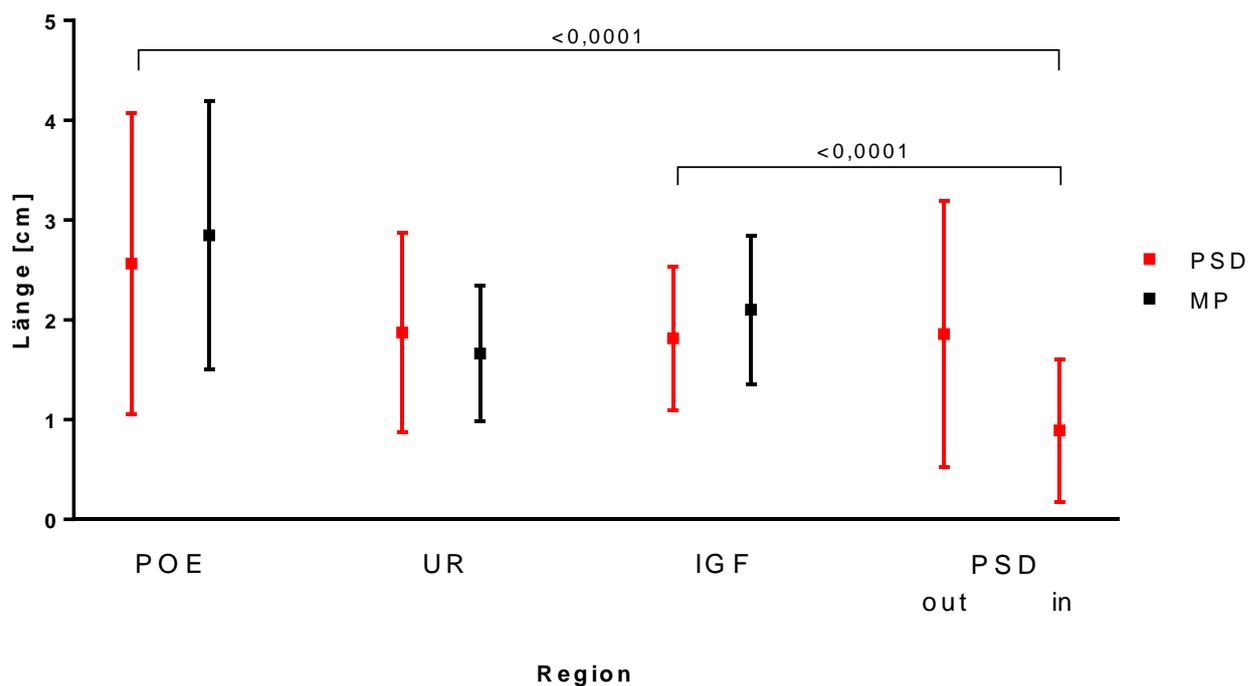


Abbildung 41: Haarlänge verschiedener Körperregionen; $n = 40$ Probanden (MP = 20; PSD = 20); $n = 704$ Haare (PSD = Pilonidalsinus; MP = matched pair).

Zusammenfassend ist hier festzustellen, dass die Haarlängen der in den Sinus zu findenden Haare signifikant von allen Haarregionen der dorsalen Körperseite differieren und sich in den Sinus die kürzesten Haare befinden. Dabei sind die Haare in den Sinus sogar kürzer, als die

auf dem Kopf wachsenden, üblicherweise regelmäßig vom Friseur geschnittenen, POE-Haare ($p < 0,0001$). Kürzer ist lediglich das beim Friseur entstehende Schnitthaar.

4.1.4 Haardurchmesser im Vergleich - PSD versus MP

Abbildung 42 fasst die mittleren Haardurchmesser in den Haarregionen POE, UR, IGF und PSD zusammen. Die Regionen finden sich auf der x-Achse und der Durchmesser ist auf der y-Achse aufgetragen. Der Durchmesser der POE-Haare liegt durchschnittlich bei $65 \mu\text{m}$, der der UR-Haare bei durchschnittlich $64 \mu\text{m}$, und die IGF-Haare scheinen mit $80 \mu\text{m}$ durchschnittlich dicker als die Haare der beiden anderen Regionen. Die PSD-Haare sind durchschnittlich $63 \mu\text{m}$ dick. Dennoch sind die Standardabweichungen der Durchmesser in allen Haarregionen sehr groß, sodass sich die durchschnittlichen Durchmesser der Haare in allen Regionen nicht statistisch signifikant unterscheiden. Zur Illustration dieses Zusammenhangs wurde eine Gerade bei $Y = 70$ in die Abbildung eingezeichnet.

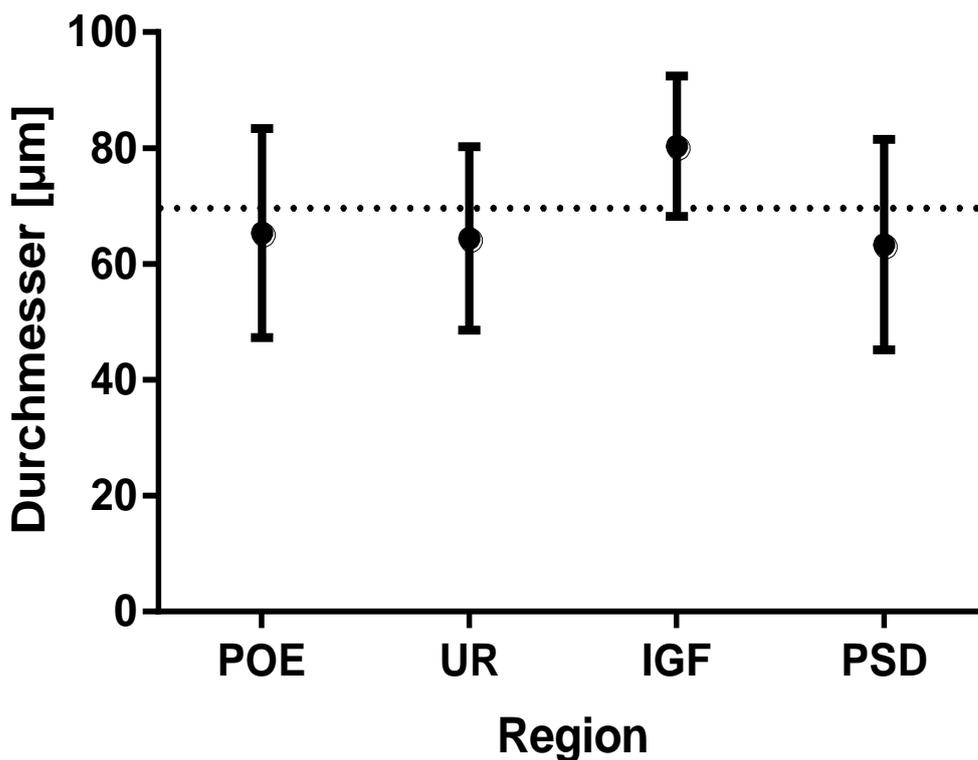


Abbildung 42: Durchschnittlicher Haardurchmesser nach Haarregionen; $n = 235$ Haare (POE = Protuberantia occipitalis externa, UR = unterer Rücken, IGF = Interglutealfalte).

Der Einfluss des Haardurchmessers auf die Festigkeit eines Haares wurde bereits in Abbildung 30-31 veranschaulicht. Ob die Kraftwerte der Haare nicht ausschließlich vom

Durchmesser abhängen, sondern auch zwischen PSD-Patienten und gesunden Probanden differieren, untersucht Abbildung 43. Aus der Gesamtheit der epilierten Körperhaare wurden sowohl von Sinuspatienten als auch von Vergleichspatienten per Zufallsprinzip Haare ausgewählt und lichtmikroskopisch deren Durchmesser, sowie mithilfe des Knicktests die Haarkraft bestimmt. Die rote Kolorierung in Abbildung 43 symbolisiert die Haarkraftwerte der PSD-Patienten und die schwarze Farbe entspricht den Haarkraftwerten der gesunden Vergleichsprobanden. Für beide Gruppen wurde eine lineare Regression durchgeführt und graphisch dargestellt.

In beiden Gruppen steigt die mögliche Kraftübertragung der Haare mit zunehmendem Durchmesser an. Es fällt dabei auf, dass die Haare der PSD-Patienten bei gleichem Durchmesser höhere Kraftwerte als die Haare der MP-Patienten erreichten. Dieser Unterschied in der Haarkraftübertragung zwischen den beiden Probandengruppen ist mit einem p-Wert von $p < 0,0001$ hochsignifikant. Die Steigung der roten Gerade, also der PSD-Patienten beträgt $m = 0,0262$. Die Steigung der schwarzen Gerade liegt bei $m = 0,0175$. Die unterschiedliche Haarkraft bei gleichem Durchmesser weist auf einen Materialunterschied der Haare zwischen den beiden Gruppen hin. Die dicksten Haare beider Gruppen maßen $105 \mu\text{m}$ im Durchmesser.

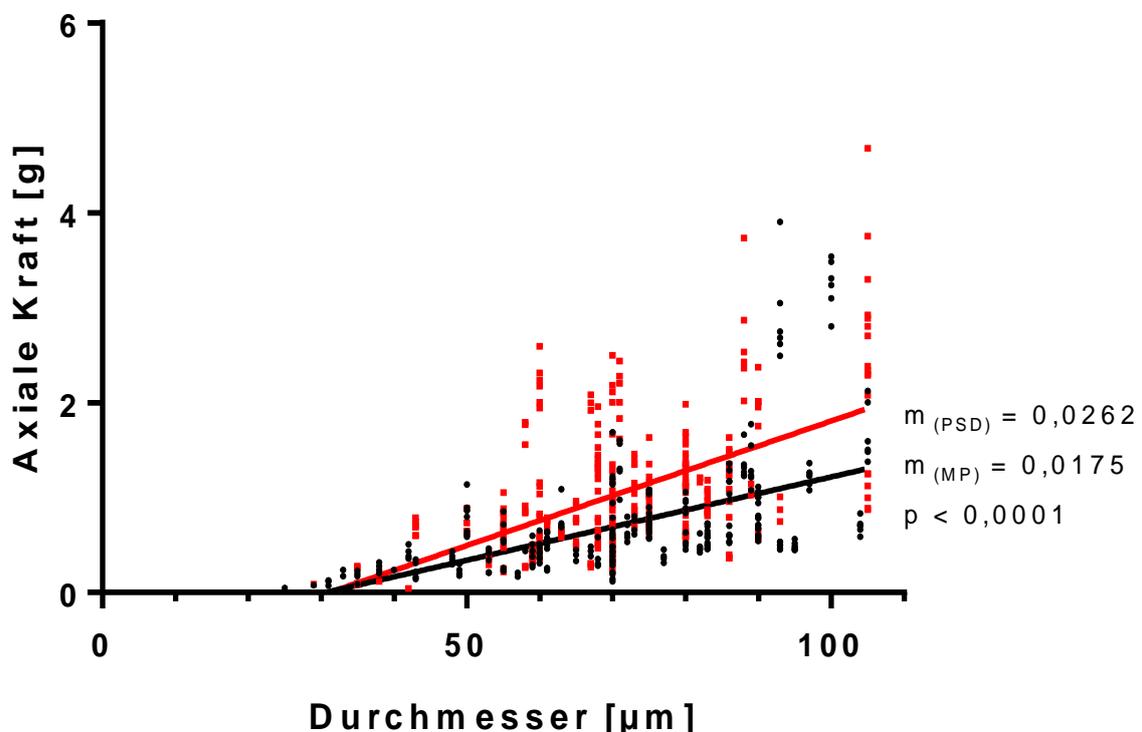


Abbildung 43: Haarkraft in Abhängigkeit vom Haardurchmesser; rot = PSD-Patienten; schwarz = MP-Patienten; $n = 235$ Haare (PSD = Pilonidalsinus; MP = matched pair).

4.1.5 Haarkraft in den verschiedenen Haarregionen - PSD versus MP

Als zentrale Grafik des Ergebnisteils visualisiert Abbildung 44 einerseits den direkten Vergleich der Haarfestigkeit von PSD-Patienten mit MP-Patienten, andererseits den Vergleich der Haarfestigkeit in den Regionen POE, UR und IGF der PSD-Patienten mit der Festigkeit der PSD-Haare. Für die Abbildung wurden die Haarkraftwerte von 20 operierten PSD Patienten (in der Grafik rot markiert) und den zugehörigen 20 MP-Patienten (in der Grafik schwarz vermerkt) bestimmt. Bei 5 der 20 PSD-Patienten konnten keine Haare aus den Sinus geerntet werden, und es gingen folglich nur die Haare der anderen drei Körperregionen, sofern behaart, in die Grafik mit ein. Der Mittelwert \pm SEM der Kraftwerte aller Patientenhaare der entsprechenden Region wurde aufgetragen und die Regionen auf der x-Achse mit den jeweiligen Kürzeln gelistet. Ganz rechts ist der Mittelwert \pm SEM der axialen Kraftwerte der Haare aus den Sinusnest aufgeführt, um den Vergleich der Haarsteifigkeit der PSD-Haare mit den Haaren aus den übrigen drei Körperregionen der PSD-Patienten zu schaffen. Die Y-Achse beschreibt die Kraftwerte in Gramm.

Sowohl die durchschnittliche Festigkeit der POE-, der UR-, als auch die der IGF-Haare ist bei den PSD-Patienten hochsignifikant höher als bei den gesunden Vergleichsprobanden. Der Mittelwert der Kraft der POE-Haare der PSD-Patienten liegt bei 1,3 g, bei den MP-Patienten dagegen bei 1,0 g. Die mittleren Kraftwerte der vom UR epiliierten Haare sind mit durchschnittlich 0,6 g für die Haare der PSD-Patienten und 0,4 g für die Haare der MP-Patienten hochsignifikant ($p < 0,0001$) geringer als die entsprechenden Kraftwerte der POE-Haare. Die mittlere axiale Kraft der IGF-Haare der PSD-Patienten liegt mit 1,5 g hochsignifikant ($p < 0,0001$) höher als die durchschnittliche axiale Kraft der UR-Haare der PSD-Patienten und signifikant ($p = 0,0064$) höher als die mittlere Kraft der POE-Haare der PSD-Patienten. Die mittleren Haarkraftwerte der UR- und IGF-Haare der MP-Patienten differieren hochsignifikant ($p < 0,0001$). Es lässt sich demzufolge festhalten, dass die mittleren Kraftwerte der Haare der PSD-Patienten in den drei untersuchten Haarregionen hochsignifikant höher sind als die der gesunden Vergleichsprobanden. Weiterhin zeigt Abbildung 44, dass von den drei Haarregionen der PSD-Patienten in der IGF die signifikant festesten Haare wachsen ($p = 0,0064$ im Vergleich zu den POE-Haaren der PSD-Patienten), gefolgt von den Haaren der POE ($p < 0,0001$ im Vergleich zu den UR-Haaren der PSD-Patienten) und letztlich des UR ($p < 0,0001$ im Vergleich zu den IGF-Haaren der PSD-Patienten).

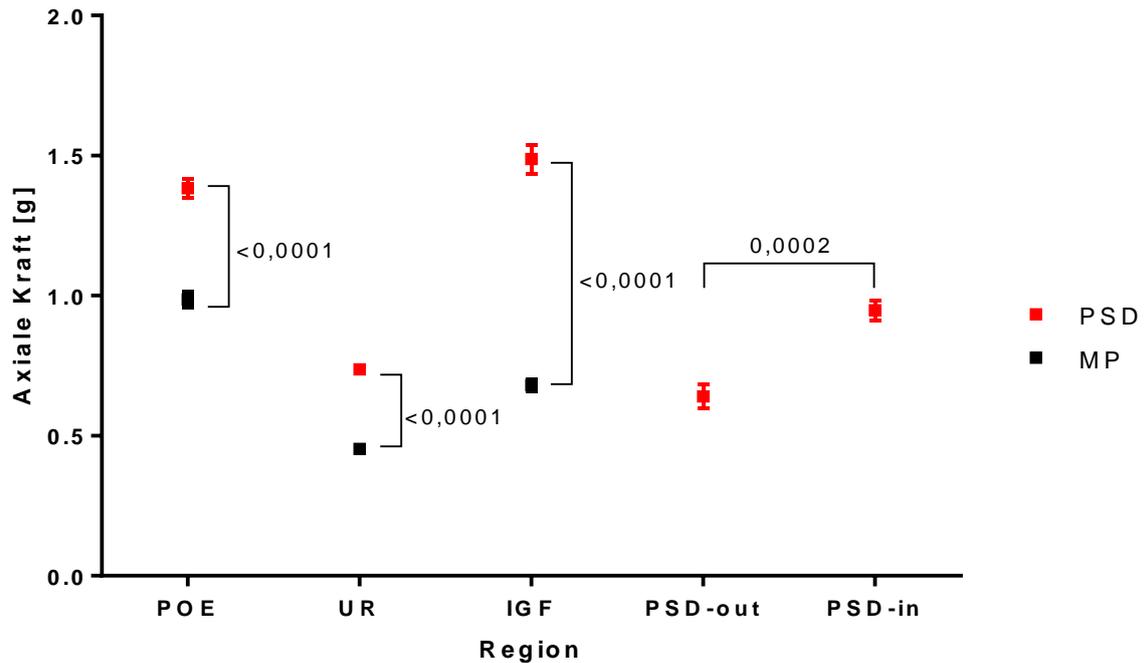


Abbildung 44: Haarregionen bei PSD-Patienten und MP im Vergleich, n = 20 Paare; n = 834 Haare (PSD = Pilonidalsinus; MP = matched pair).

Die mittlere Kraft der Haare aus den Sinusnestern beträgt 1,0 g mit einer Standardabweichung von $\pm 0,8$ g. Damit ist die mittlere Kraft der PSD-Haare sowohl hochsignifikant ($p < 0,0001$) geringer als die durchschnittliche Kraftübertragung der POE- als auch der IGF-Haare der PSD-Patienten. Die mittlere Kraft der UR-Haare hingegen liegt hochsignifikant ($p < 0,0001$) unter der durchschnittlichen Kraft der PSD-Haare.

Bei vier der 20 PSD-Patienten stecken Haare von außen sichtbar in den Pori des Sinus (PSD-out). Der mittlere Kraftwert dieser PSD-out Haare ist mit einem Mittelwert von $0,6 \pm 0,4$ Standardabweichung signifikant geringer ($p = 0,0002$) als der mittlere Kraftwert der Haare aus den Sinus (PSD-in). In einem Sinusnest sind folglich festere und kürzere Haare zu finden, da weichere und längere Haare eher in den Pori stecken zu bleiben scheinen.

4.1.6 Statistische Auswertung der physikalischen Haarcharakteristika

Zunächst wurde ein Tukey-Anscombe-Diagramm der erreichten, logarithmierten Haarkraftwerte erstellt und die Homoskedastizitätsannahmen geprüft (Abbildung 32). Sie scheinen auf der logarithmischen Skala der Haarkraftwerte erfüllt. Die Varianz des Fehlers auf der logarithmischen Skala ist also unabhängig vom Wert der erklärenden Variablen, sodass man dieselbe Fehlervarianz sowohl bei großen, als auch bei kleinen vorhergesagten Werten erhält. Die Normalitätsannahme hingegen scheint im Quantil-Quantil-Diagramm, bei dem das theoretische Quantil gegen das empirische Quantil aufgetragen wird, nicht erfüllt zu

sein. Da die genaue Mittelwertbestimmung der Haarkraft für das Auswerten der Daten nicht essentiell ist, kann das Modell dennoch genutzt werden.

Danach wurde statistisch geklärt, ob ein Unterschied der Kraftübertragung zwischen nach makroskopischer Dicke ausgewählten und zufällig ausgewählten Haaren besteht. Von drei der 20 Patienten wurden je 14 weitere Haare pro Haarregion zufällig ausgewählt und deren senkrechte Kraftübertragung getestet. Mittels eines t-Tests wurde die Haarkraft der zufällig ausgewählten Haare mit der Kraft der zuvor nach makroskopischer Dicke ausgewählten und getesteten Haare der drei Regionen verglichen. Den Berechnungen zufolge erreichten die vermeintlich dickeren und daher mutmaßlich festeren Haare keine signifikant höheren Kraftwerte als die zufällig ausgewählten Haare.

Tabelle 3: Auswertung der Heatmaps (POE = Protuberantia occipitalis externa, UR = unterer Rücken, IGF = Interglutealfalte).

Wahrscheinlicher Haarursprung	Gesamt	POE	UR	IGF
POE	2	2	-	-
POE und UR	2	2	2	-
POE und IGF	1	1	-	1
UR	1	-	1	-
IGF	3	-	-	3
POE, UR, IGF	5	5	5	5
Gesamt	14	10	8	9

Die folgenden LDA und die Heatmaps für jeden einzelnen Patienten ergaben meist sehr große Konfidenzintervalle, sodass der Ursprung der Haare nicht stets eindeutig festgestellt werden konnte. Die großen Konfidenzintervalle begründen sich darin, dass die LDA-Modelle der Patienten jeweils nur auf 6 Haaren pro Region beruhen. Im Sinus von Patient 3 (Abbildung 33) finden sich jedoch Haare, die mit hoher Wahrscheinlichkeit von der POE stammen (Haare 2, 3, 5 und 6), und andere, die mit hoher Wahrscheinlichkeit vom UR stammen (Haare 1 und 4). Die Ergebnisse aller Heatmaps sind überblickend in Tabelle 3 dargestellt. Bei zwei Patienten ist der statistisch wahrscheinlichste Ursprungsort der

Sinusnesthaare die POE, bei zwei weiteren Patienten sind sowohl die POE als auch der UR als Ursprungsort wahrscheinlich. Bei einem Patienten können die Haare von der POE oder der IGF stammen. In einem Fall lassen sich die Haare mit hoher Wahrscheinlichkeit auf den UR zurückführen, und in drei weiteren Fällen auf die IGF. Bei fünf Patienten kann statistisch nicht näher aufgeschlüsselt werden, aus welcher der drei Behaarungsregion die Sinusnesthaare stammen.

Auch wenn der Ursprung vieler PSD-Haare nicht eindeutig statistisch festlegbar ist, gibt es doch einzelne Haare, die sich einer Ursprungsregion mit hoher Wahrscheinlichkeit zuordnen lassen. Dennoch ist statistisch zu fordern, dass zumindest einige der Sinusnesthaare nicht von der IGF, sondern von der POE oder dem UR stammen.

Um dem Verdacht, dass nicht alle der PSD-Haare aus der IGF stammen, weiter nachzugehen, wurden die a posteriori-Wahrscheinlichkeiten der Haarkraft aller PSD-Haare für multiples Testen korrigiert. Dies geschah durch eine Anpassung der a priori-Wahrscheinlichkeiten für die Herkunft der einzelnen Haare: während bei den individuellen Tests, die den Heatmaps zu Grunde liegen, eine a priori-Wahrscheinlichkeit von 1/3 (gleiche Wahrscheinlichkeit für IGF, POE und UR) angenommen wurde, wurde diese Wahrscheinlichkeit für den globalen Test mit 62 Haaren auf

$$\left(\frac{1}{2}\right)^{\binom{1}{62}} = 0,98888 \quad \text{<Formel 4>}$$

gesetzt. Dadurch erhielt die zusammengesetzte Nullhypothese, dass alle Sinushaare aus der IGF stammen, eine a priori-Wahrscheinlichkeit von 50%.

Von den PSD-Haaren hatten 17,7% einen Bayes-Faktor $< 0,1$, der für die Alternativhypothese (Haar stammt von der POE oder dem UR) spricht. Zudem wiesen 8,1% der betrachteten PSD-Haare einen Bayes-Faktor von $< 0,01$ auf. Dieses bedeutet, dass Kopfhaare von der Hinterhauptsregion in Sinus-Haarnestern nachweisbar sind und einen statistisch signifikanten Anteil an deren Haarmenge haben. Die Testung der verbundenen Nullhypothese (alle getesteten Sinushaare stammen aus der IGF) gegen die verbundene Alternativhypothese (nicht alle der getesteten Sinushaare stammen aus der IGF), ergab den starken Verdacht, dass zumindest drei der getesteten Sinushaare nicht aus der IGF stammen.

4.2 Morphologische Haarcharakteristika



Abbildung 45: Haare aus einem Pilonidalsinus, roter Pfeil = Zelldetritus (Lichtmikroskopie, 10-fache Vergrößerung).

Ausgewählte Haare wurden lichtmikroskopisch oder mittels Elektronenmikroskopie näher untersucht, um Erkenntnisse über deren Morphologie zu gewinnen. Dabei handelte es sich um POE-Haare gesunder Vergleichsprobanden und um Haare aus den Haarnestern von 5 zufällig ausgewählten PSD-Patienten. Besonders auffällige Aufnahmen und Aspekte fasst dieses Kapitel zusammen. Dazu zählen besonders die Aufnahmen der Haarnest-Haare, wie Abbildung 45. An dieser lichtmikroskopischen Aufnahme zweier ausgewählter Haare aus einem Pilonidalsinus verwundert, dass keines der beiden Haare eine Haarwurzel besitzt. Im Gegenteil scheinen die Enden der Haare unnatürlich gerade (ergo kein Bruchhaar). Es ist also denkbar, dass sie abgeschnitten wurden. Das längere der beiden Haare ist 1,3 mm lang und das kürzere knapp 1 mm. An beiden Haaren haftet ein wenig Detritus (roter Pfeil) nach dem Aufenthalt in der entzündeten Wunde. In dem Sinus dieses PSD-Patienten fanden sich ausschließlich Haare mit einer Länge von maximal 5 mm. Derart kurze Bruchhaare sind ungewöhnlich und würden auch andere Kanten (Haarenden) zeigen (siehe auch Abbildung 49 und 50).

Deshalb wurden zum Vergleich elektronenmikroskopische Aufnahmen von epilierten Haaren angefertigt. Von diesen Haaren wurde eines künstlich gebrochenen und eines vor drei Wochen vom Friseur geschnitten. Das dritte Haar wurde frisch mit einer Haushaltsschere

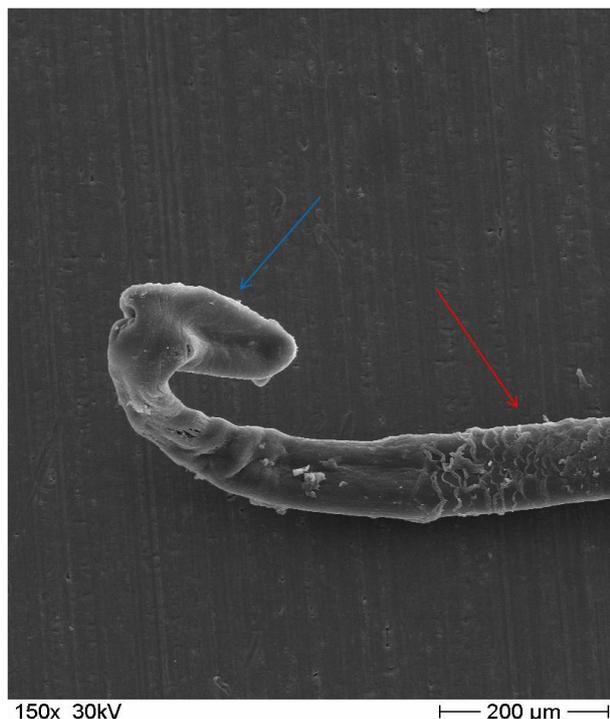


Abbildung 46: Mit Haarwurzel epiliertes POE-Haar; blauer Pfeil = Haarwurzel; roter Pfeil = Haarschaft (Rasterelektronenmikroskopie, goldbeschichtet, 150-fache Vergrößerung).

abgeschnitten. Bei allen drei Haaren blieb das Haarwurzeltende erhalten, und es wurden POE-Haare gesunder Probanden verwendet. Jedes Haar wurde mit dem Elektronenmikroskop auf morphologische Auffälligkeiten geprüft, welche, falls vorhanden, zusätzlich zu den beiden Haarenden dokumentiert wurden.

Wie erwartet, zeigte sich auf den Haaren der Vergleichsprobanden eine teilweise glatt anliegende und teilweise auch spröde, unregelmäßig abstehende Kutikula-Zellschicht.

Diese Befunde entsprechen der bereits im Unterkapitel ‚Haar (Pilus)‘ beschriebenen Abnutzung und Abschilferung der Kutikula durch Umwelteinflüsse, die bei menschlichem Haar üblicherweise auftritt.

Auch die Haarwurzeln der Haare des Vergleichsprobanden zeigten sich erwartungsgemäß unregelmäßig geformt, je

nachdem, ob es sich um ein anagenes oder ein telogenes Haar handelt. Ein telogenes Haar mit langer und gekrümmter Wurzel (blauer Pfeil), die in den Haarschaft übergeht (roter Pfeil), zeigt Abbildung 46. Im Vergleich wird deutlich, dass den PSD-in-Haaren aus Abbildung 45 die Haarwurzeln fehlen.

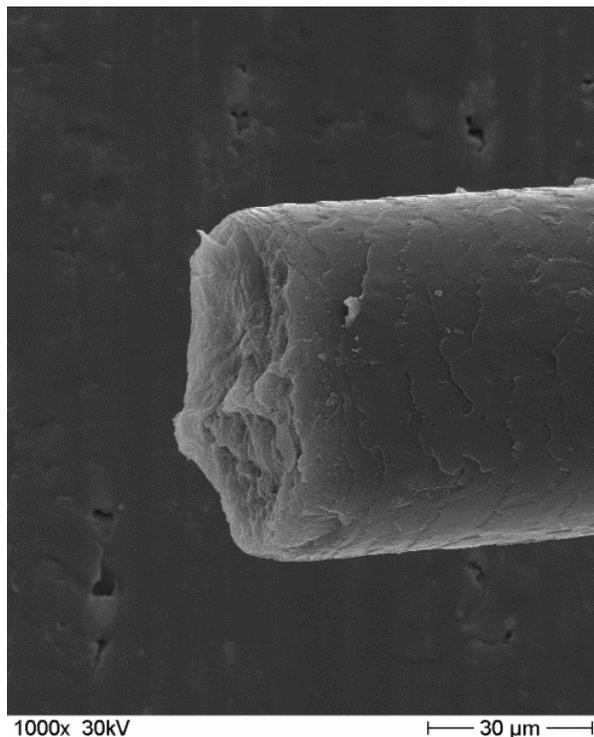


Abbildung 47: Vom Friseur geschnittenes Haar (Rasterelektronenmikroskopie, goldbeschichtet, 1000-fache Vergrößerung).

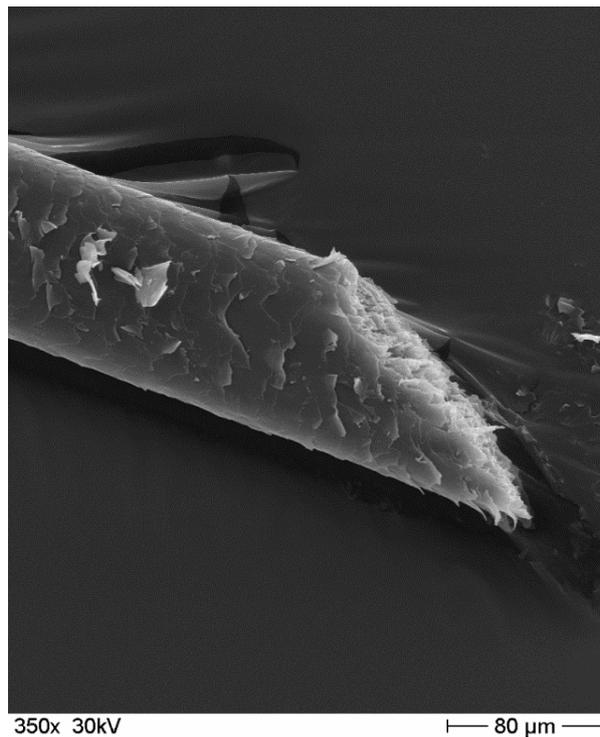
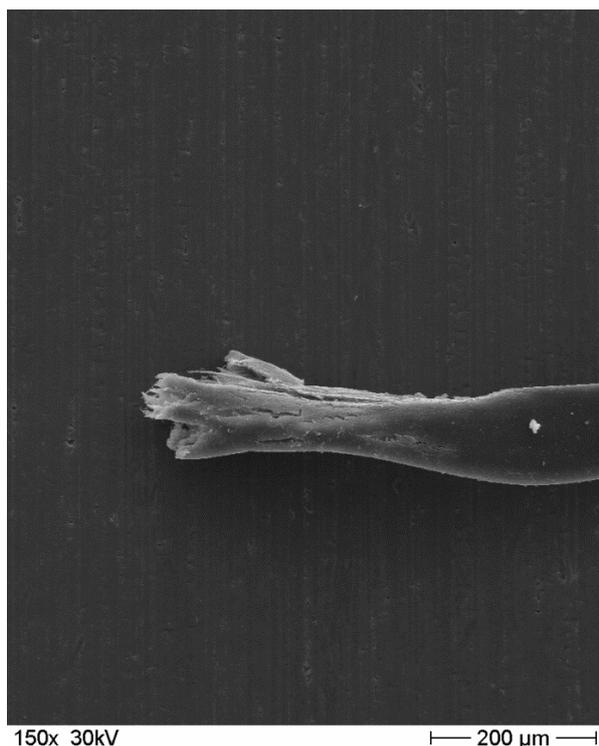


Abbildung 48: Frisch abgeschnittenes Haar (Rasterelektronenmikroskopie, goldbeschichtet, 350-fache Vergrößerung).

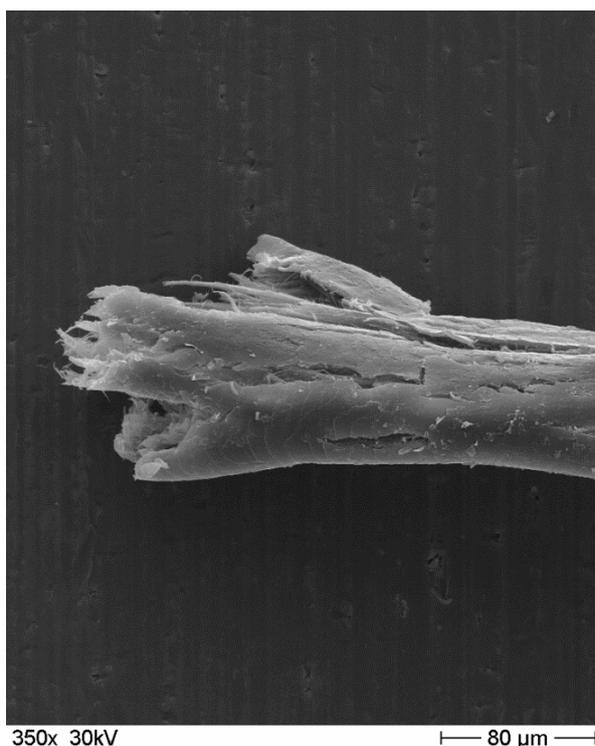
Die Enden der PSD-Haare in Abbildung 45 gleichen morphologisch eher dem vom Friseur geschnittenen Haar aus Abbildung 47, dessen Ende gerade abgeschnitten wurde. Das rechte Ende des längeren Haares in Abbildung 45 scheint spitzer abgeschnitten worden zu sein und weist eine Ähnlichkeit zu dem mit einer Haushaltsschere frisch geschnitten und dann elektronenmikroskopierten Haar aus Abbildung 48 auf. Generell ist anzunehmen, dass rasierte Haare den geschnitten sehr ähnlich sein werden, da in beiden Fällen das Haar durch eine geschärfte metallische Fläche entzweit wird. Lediglich die Schnittfläche könnte bei einem rasierten Haar noch schärfer, weil tangentialer, verlaufen.



150x 30kV

— 200 μm —

Abbildung 49: Abgebrochenes Haar (Rasterelektronenmikroskopie; goldbeschichtet; 150-fache Vergrößerung).



350x 30kV

— 80 μm —

Abbildung 50: Abgebrochenes Haar aus Abbildung 49 (Rasterelektronenmikroskopie; goldbeschichtet; 150-fache Vergrößerung).

Dass es sich bei den PSD-in-Haaren aus Abbildung 45 nicht um Bruchhaar handelt, wird im Hinblick auf das Haar in Abbildung 49 und 50 deutlich. Für die Aufnahmen wurde ein POE-Haar zunächst epiliert und dann künstlich, mit Hilfe einer handelsüblichen Pinzette durchgebrochen. Das Haar wirklich durchzubrechen und nicht zu zerreißen, erforderte manuelles Geschick und war unter Zuhilfenahme einer Pinzette möglich, wobei das Haar zwischen beiden Branchen eingeklemmt und so lange abgeplattet wurde, bis es entzwei brach. Dieses Manöver illustriert, wie schwierig es ist, ein Haar tatsächlich zu brechen. Die Bruchstelle wurde anschließend elektronenmikroskopisch untersucht und dokumentarisch in Abbildung 49 und weiter vergrößert in Abbildung 50 festgehalten. Das Haarende wirkt abgeplattet und wie ausgefranst. In der Vergrößerung (Abbildung 50) ist die aufgebrochene, spröde Kutikulazellschicht zu erkennen. Aus dem Haarinneren ragen einzelne kortikale, spindelförmige Zellen und Fibrillen hervor. Die unregelmäßige, verbreiterte und ausgefranste Haarstruktur an der Bruchstelle differenziert ein abgebrochenes (im Folgenden als Bruchhaar bezeichnet) deutlich von einem abgeschnittenen Haar (im Weiteren als Schnitthaar bezeichnet) (vgl. Abbildung 47 und Abbildung 48).

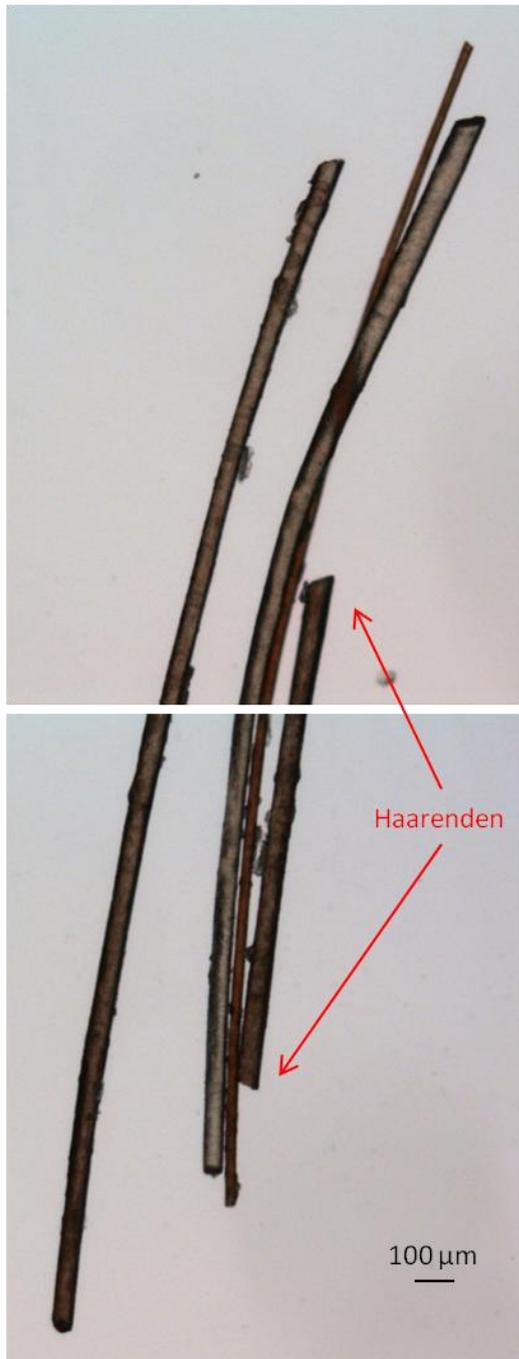


Abbildung 51: Haare aus Haarnest (Lichtmikroskopie, 10-fache Vergrößerung).

Bei den beiden PSD-in-Haaren aus Abbildung 45 kann es sich morphologisch folglich nicht um Bruchhaar handeln, sondern es wurde wahrscheinlich Schnitthaar aus dem Pilonidalsinus geerntet.

In dem Pilonidalsinus desselben Patienten, von dem die Haare in Abbildung 45 stammen, wurden lichtmikroskopisch weitere Haare identifiziert, deren Enden abgeschnitten oder abrasiert scheinen. Aufgrund der Länge war es nicht möglich, sie in akzeptabler Vergrößerung auf einer lichtmikroskopischen Aufnahme festzuhalten, weshalb Aufnahmen der beiden Enden der aus 4 Haaren bestehenden Haargruppe angefertigt wurden. Die beiden Aufnahmen wurden in Abbildung 51 zusammengefügt. Zwischen beiden Aufnahmen wurde ein kleiner Anteil der abgebildeten Haarschäfte der Übersichtlichkeit halber aus den Bildern ausgeschnitten, da nur die Haarenden von besonderem Interesse sind.

Keines der 4 Haare ist noch im Besitz seiner Haarwurzel, und die Haarenden scheinen ähnlich scharf abgetrennt zu sein wie die Haare in Abbildung 45. Rote Pfeile markieren die Haarenden des kürzesten Haares der Gruppe. An dem linken Haarschaft fallen weiterhin unscharf abgebildete Unregelmäßigkeiten auf. Hierbei handelt es sich um Detritus, der sich in dem Pilonidalsinus an das Haar angelagert hat. Detritus wurde an verschiedenen PSD-in-Haaren observiert, wobei dieser bei einigen Haaren

aufgrund der intraoperativen Toluidinblaufärbung im Lichtmikroskop bläulich schimmerte.

Haarnest-Haare desselben Patienten, dessen Haare bereits lichtmikroskopisch in Abbildung 45 und 51 untersucht wurden, wurden weiterhin elektronenmikroskopisch examiniert, um die Sinushaare in einer höheren Auflösung beurteilen zu können.

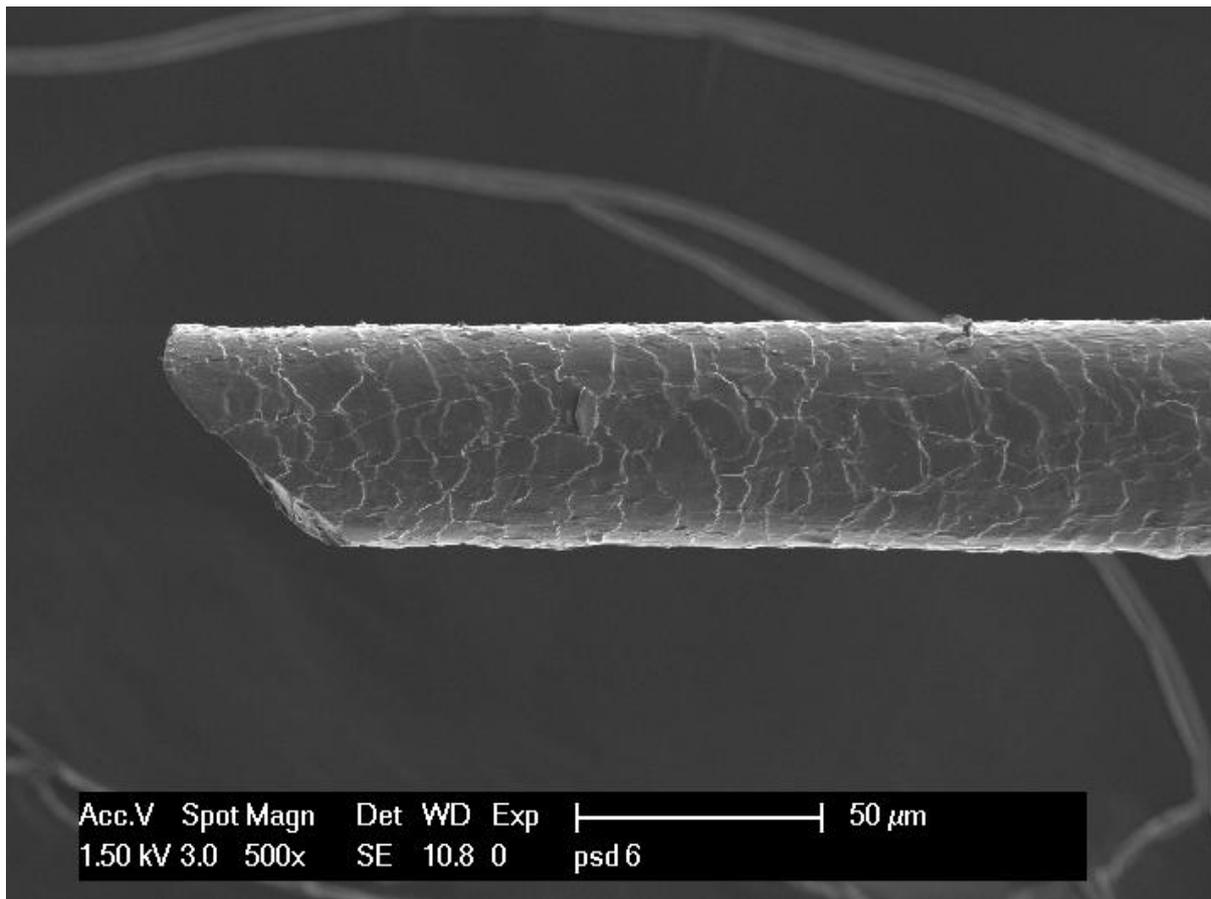


Abbildung 52: Haar aus Pilonidalsinus (Rasterelektronenmikroskopie; kohlebestäubt; 500-fache Vergrößerung).

An den rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen dieser Sinusnesthaare (Abbildung 52-55) fällt zunächst der qualitative Unterschied zu den rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen in Abbildung 46 bis 50 auf. Dieser liegt in der feineren Kohlebeschichtung und in der deutlich reduzierten Beschleunigungsspannung begründet (vgl. ‚Diskussion der Mikroskopie‘), die für diese Aufnahmen gewählt wurden, um noch mehr Details auf der Haaroberfläche abbilden zu können.

In den rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen der Sinusnesthaare (Abbildung 52-55) erhärtet sich der Verdacht, dass es sich bei einigen der untersuchten Haare um Schnitthaar handeln muss. Sowohl das Haar in Abbildung 52, als auch das Haar in Abbildung 53 weisen eine gerade, sehr scharfe Schnittkante auf, was durch biologische Vorgänge nicht herleitbar ist. Die Kutikulazellschicht des Haares in Abbildung 52 ist gut erhalten und zeigt an, dass das Haar wurzelseitig abgeschnitten wurde (die Kutikulazellen öffnen sich dachziegelartig nach rechts im Bild, also von der Schnittkante weg).

Bei dem Haar in Abbildung 53 ist die Kutikulazellschicht weniger gut erhalten und wirkt schuppenartig und spröde. Die einzelnen Kutikulazellen sind weniger gut abgrenzbar. Dies könnte ein Hinweis auf einen stärkeren immunologischen Abbau dieses Haares im

entzündlichen Gewebe des Pilonidalsinus sein, der in einer eventuell längeren Aufenthaltsdauer dieses Haares im Pilonidalsinus begründet liegt. Auch könnte das Haar aus einer haarspitzennäheren Zone stammen, wo mehr mechanische Alterierung erfolgt.

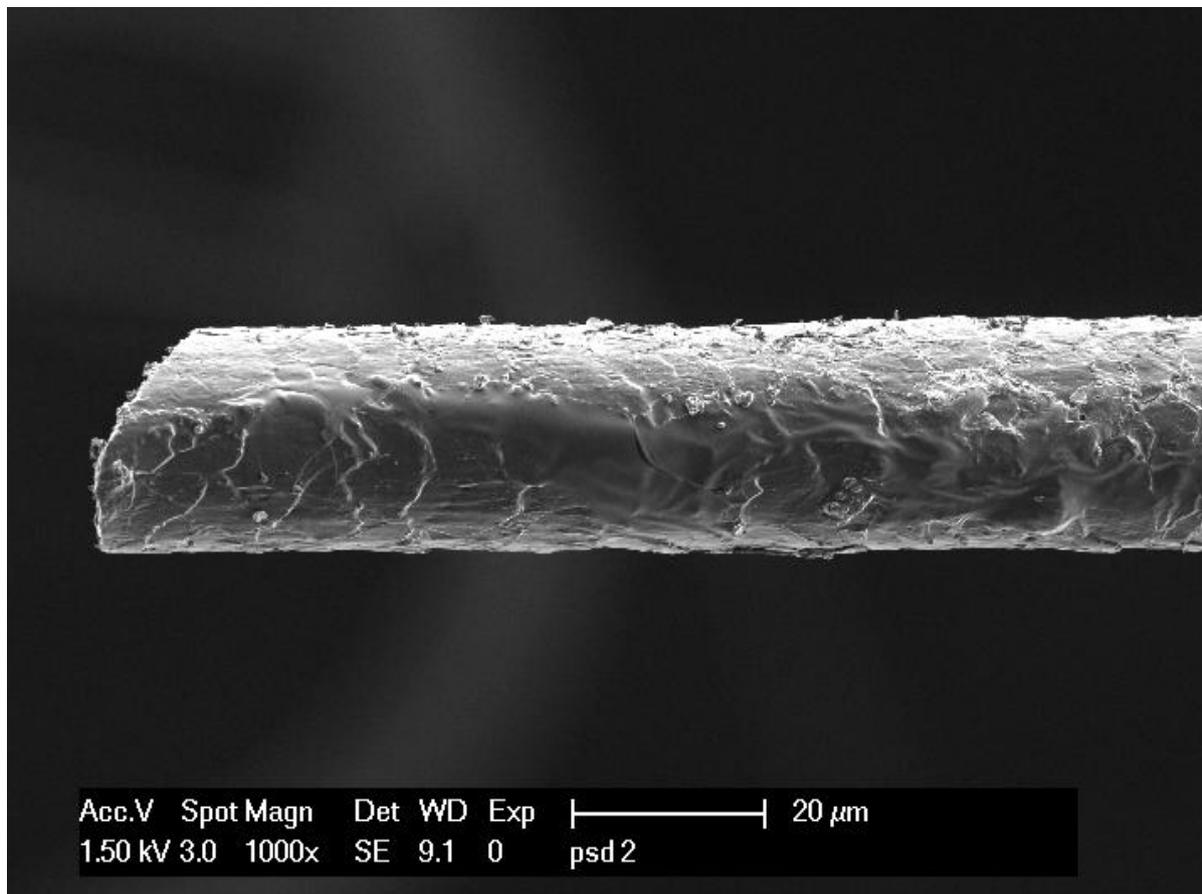


Abbildung 53: Haar aus Pilonidalsinus (Rasterelektronenmikroskopie; kohlebestäubt; 1000-fache Vergrößerung).

Dennoch wurden nicht nur scharfe Schnitt-, sondern auch an der Kante alterierte Haare aus dem Sinus geerntet, wie Abbildung 54 und 55 demonstrieren. Anstelle einer geraden Schnittstelle ist das Haarende dieses Haares tentakelartig aufgebrochen. Ähnlich dem artifiziellen Bruchhaar aus Abbildung 49 und 50, stehen die kortikalen Haarfibillen fransenartig von dem Haarende ab. Auch die Kutikula an der Haaroberseite scheint abgeschürft. Dies kann kein Artefakt der Rasterelektronenmikroskopie sein, da alle Haare gleich vorsichtig von einem sehr erfahrenen technischen Assistenten mikroskopiert wurden. In der 1000-fachen Vergrößerung des Bruchhaares ist die erhaltene Kutikula an der Haarunterseite deutlicher zu erkennen, und es scheint, als sei dieses Haar wurzelseitig abgebrochen oder durch eine stumpfe Schere abgeschert worden (Abbildung 55).

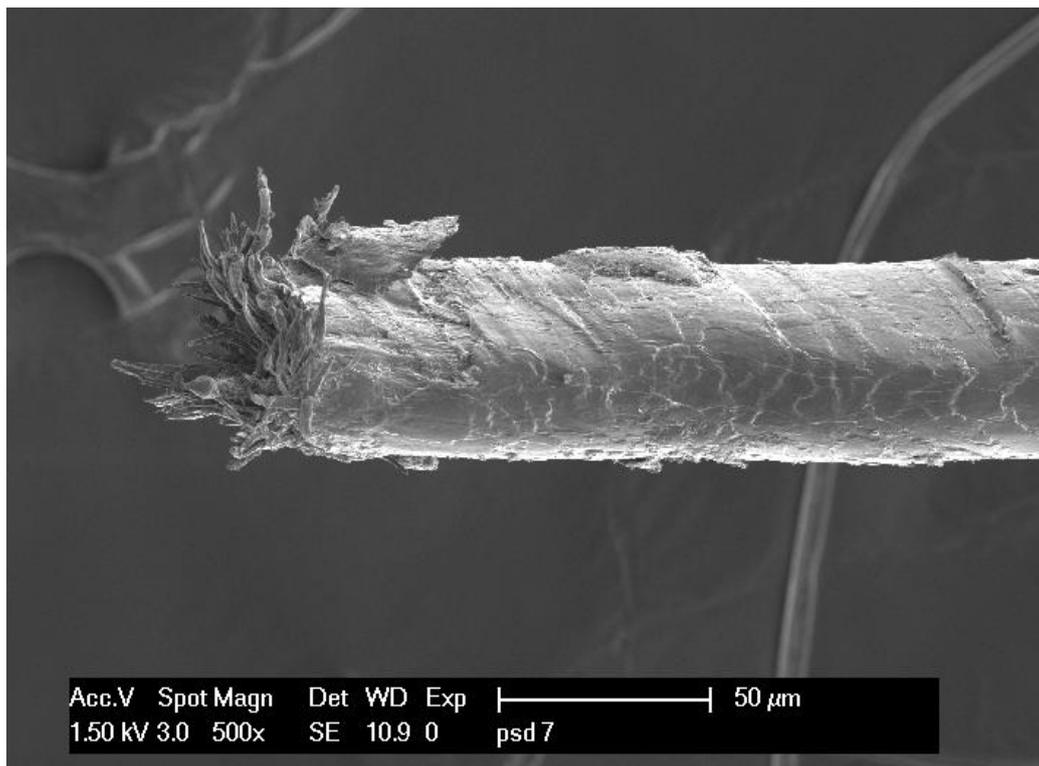


Abbildung 54: Bruchhaar aus Pilonidalsinus (Rasterelektronenmikroskopie; kohlebestäubt; 500-fache Vergrößerung).

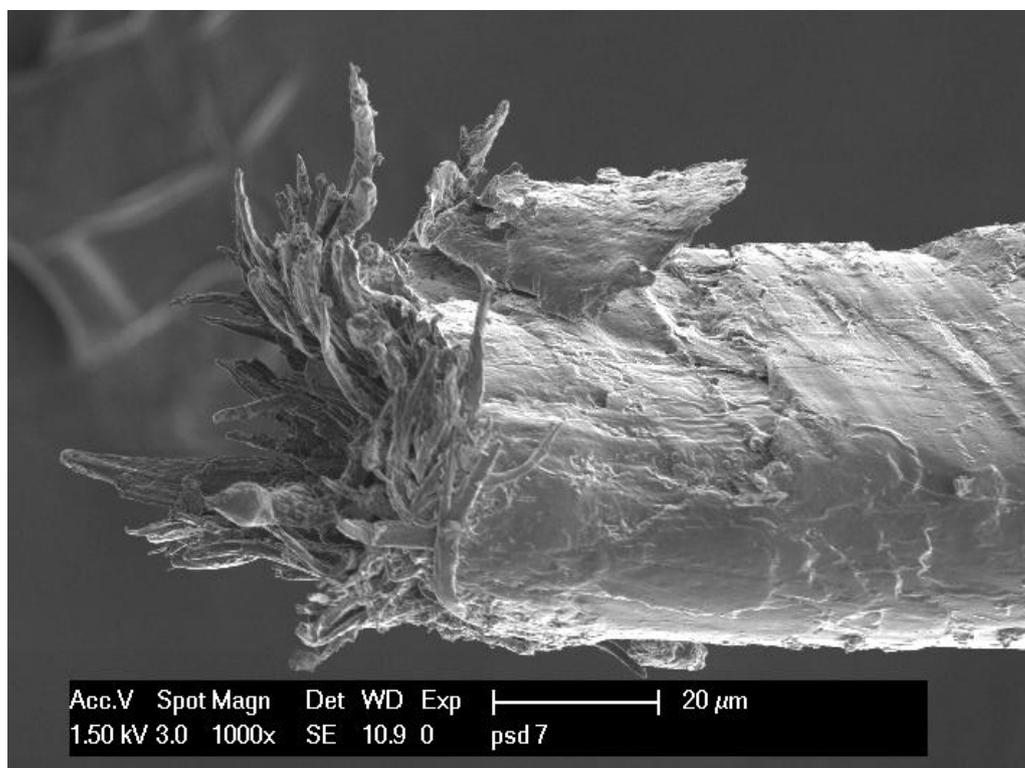


Abbildung 55: Bruchhaar aus Pilonidalsinus (Rasterelektronenmikroskopie; kohlebestäubt; 1000-fache Vergrößerung).

Zur Ermittlung des Herkunftsortes der im Sinus gefunden Haare wurde sowohl POE- als auch IGF-Haare desselben PSD-Patienten, von dem auch die Haarnest-Haare stammen, elektronenmikroskopisch untersucht. Abbildung 56 zeigt ein POE-Haar, dessen Kutikulazellen im Gegensatz zu denen des IGF-Haares in Abbildung 57 etwas großflächiger sind.

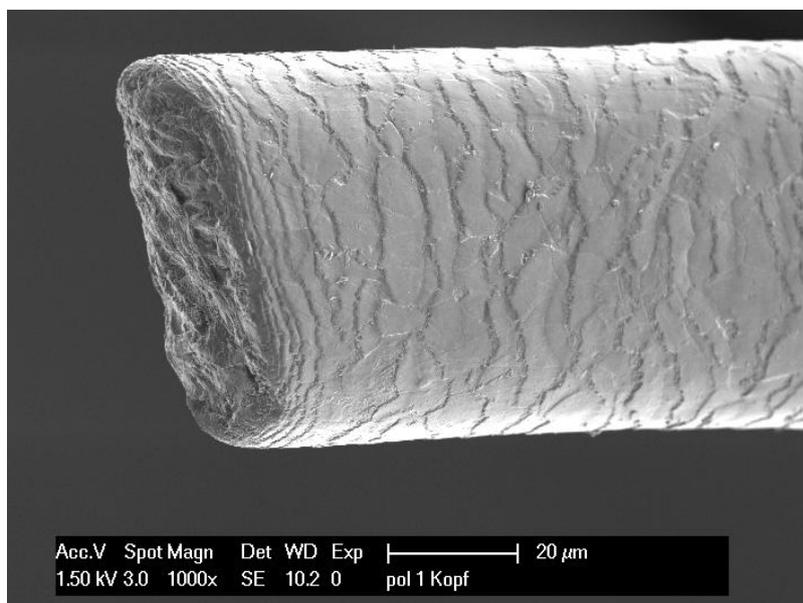


Abbildung 56: POE-Haar (Rasterelektronenmikroskopie; kohlebestäubt; 1000-fache Vergrößerung).

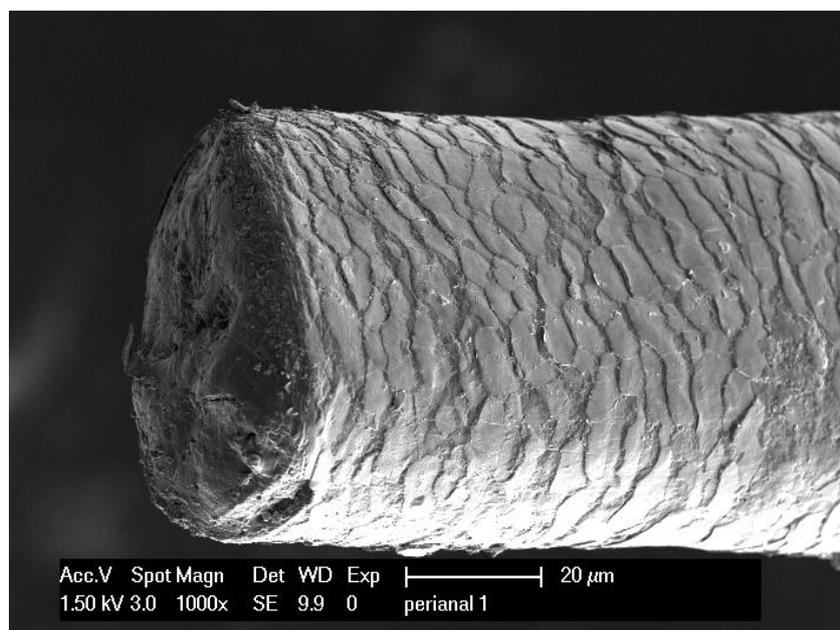


Abbildung 57: IGF-Haar (Rasterelektronenmikroskopie; kohlebestäubt; 1000-fache Vergrößerung).

Hinsichtlich der Kutikulazellen hat das PSD-Haar aus Abbildung 52 eine größere Ähnlichkeit mit dem POE-Haar aus Abbildung 55 und liefert damit einen Hinweis, dass die Haare in dem Pilonidalsinus gleichfalls von der POE stammen können.

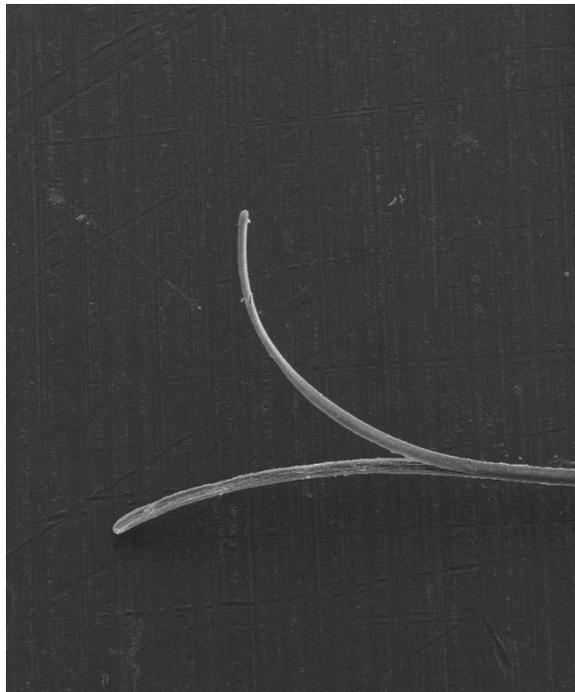


Abbildung 58: Haar aus Pilonidalsinus (Rasterelektronenmikroskopie, goldbeschichtet, 70-fache Vergrößerung).

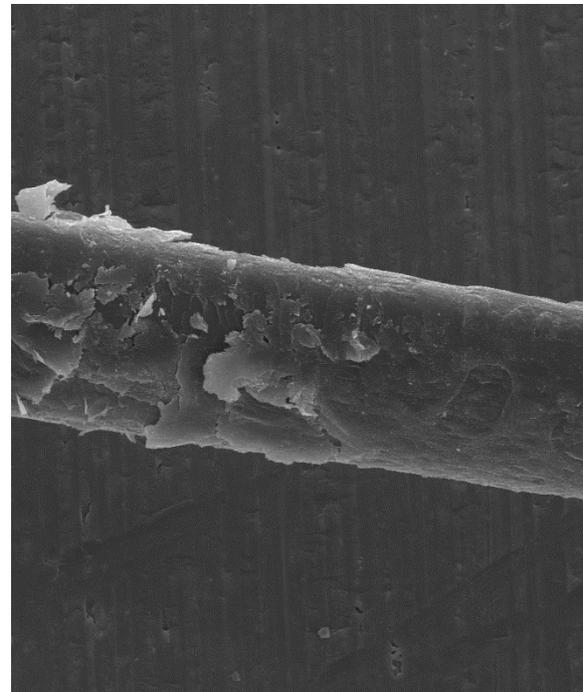


Abbildung 59: Haar aus Pilonidalsinus (Rasterelektronenmikroskopie, goldbeschichtet, 350-fache Vergrößerung).

Erneut fällt der morphologische Unterschied auf zwischen den kohlebestäubten Haarproben aus dem Pilonidalsinus, die mit einer Beschleunigungsspannung von bis zu 1,5 kV mikroskopiert wurden, und goldbeschichteten Haarproben aus einem anderen Pilonidalsinus, die mit einer Beschleunigungsspannung von bis zu 30 kV untersucht wurden. Die Oberflächenstrukturen lassen sich bei den goldbeschichteten Haaren weniger detailliert erkennen (vgl. Unterkapitel Diskussion der Mikroskopie). Zwei weitere Beispiele goldbestäubter Haarnest-Haare sind auf Abbildung 58 und 59 zu sehen. Das Haar in Abbildung 58 ist endständig aufgesplisst. Von dem Haar in Abbildung 59 stehen Teile der Kutikulazellschicht ab.

5 Diskussion

5.1 Haartest

5.1.1 Messverfahren

Verschiedenste Möglichkeiten, die physikalischen Eigenschaften des menschlichen Haares oder ähnlich strukturierter Kunstfasern zu testen, sind in der wissenschaftlichen Literatur aufgeführt. Je nach Testverfahren werden dabei ganze Haarsträhnen oder nur einzelne Haare untersucht und verschiedene Haareigenschaften getestet, wie die Quantität, die Biegesteifigkeit oder die Rigidität der Haare bei Haartorsion.

Zur Messung ‚aller biologischer Parameter des Haarwachstums‘ (56) entwickelte Hoffmann den Trichoscan, eine Methode, die die Epilumineszenzmikroskopie mit automatischer digitaler Bildanalyse kombiniert. So lassen sich Haardichte, Haardurchmesser, die Haarwachstumsrate sowie das Verhältnis von anagenem zu telogenem Haar *in vivo* bestimmen (55; 57). Materialeigenschaften einzelner Haare sind mit dem Trichoscan nicht bestimmbar.

Baltenneck *et al.* konzentrierten sich hingegen auf die Materialeigenschaften von Haaren und erarbeiteten einen Test zur Messung der Biegesteifigkeit von Haarsträhnen. Dabei schwenkt ein Pendel bis zu seinem Stillstand über 39 parallel angeordnete und am unteren Ende befestigte Haare. Bei jedem Schwung des Pendels über die Haarsträhne wird diese umgebogen, und die Gesamtzahl der Pendelausschläge bis zu dessen Stillstand wird als Maß für die Steifigkeit der Haare in der Haarsträhne gewertet (10). Die Methode von Baltenneck *et al.* untersucht die Festigkeit einer Gruppe von Haaren. Für die Genese des Pilonidalsinus wird jedoch die Penetration der Haut durch ein einzelnes Haar angenommen, dem weitere Haare folgen (21; 63). Die Penetration der Haut durch eine ganze Haarsträhne erscheint sehr unwahrscheinlich; wobei in den Sinus oft Gruppen verbackener Haare gefunden werden.

Der ‚small scale bending test‘ (98) von Tohmyoh *et al.* prüft die Biegesteifigkeit einzelner Haare. Dabei wird ein einzelnes, 5 mm langes Haar in einem Nadelöhr mit Hilfe von Klebstoff befestigt, und dann mittels einer Kraft ausgelenkt/ deformiert. Dabei wird die Kraft im Abstand von 2 und 2,5 mm vom an der Nadel fixierten Punkt appliziert, sowie jeweils in Richtung des Längs- und des Querdurchmessers des Haares. Die Ergebnisse besagten unter anderem, dass die Elastizität unabhängig von der Größe des Durchmessers in Belastungsrichtung ist.

Für die ‚balanced fiber Method‘ von Scott und Robbins (92) werden zwei gleich schwere Gewichte an den Enden des zu testenden Haares angebracht, welches anschließend über

einen feinen Haken gehängt wird. Die Distanz zwischen den beiden herabhängenden Haarenden ist ein Maßstab für die Steifigkeit des Haares.

Die beschriebenen und weitere Testverfahren untersuchen jedoch lediglich die Wirkung von Querkräften auf das Haar. Das Haar wird demzufolge von der Seite belastet und die resultierende Auslenkung betrachtet, so wie auch der für diese Arbeit entwickelte Biegetest die seitliche Auslenkung des Haares indirekt über die dabei ausgeübte seitliche Kraftübertragung misst.

In dem angenommenen Modell des die Haut penetrierenden Haares, wobei der Kraftvektor des Haares mit der langen Haarachse identisch/parallel liegt, überträgt das Haar jedoch eine Normalkraft. Diese Kraft wird in dieser Dissertation vorgelegten Knicktest direkt mittels eines neuen Testverfahrens bestimmt, was den Knicktest im Kontext des momentanen medizinwissenschaftlichen (in Bezug auf humanes Haar) Standes der Literatur Neuland betreten lässt. Außerdem können mit dem Test auch extrem kurze Haare (bis zu 3 mm), wie sie häufig in den Sinus gefunden werden, untersucht werden.

Theoretisch ließe sich auch aus dem Elastizitätsmodul die maximal übertragbare kritische Kraft berechnen, was den entwickelten Knicktest überflüssig machen würde. Aus der Distanz zwischen den herabhängenden Haarenden berechnet Robbins das Elastizitätsmodul (auch Youngs Modul) eines Haares und beschreibt eine Formel in seinem Werk ‚Chemical and Physical Behavior of Human Hair‘ (83). Alternativ berechnen Atsushi *et al.* das Elastizitätsmodul aus den beiden Querdurchmessern eines Haares, wobei die Arbeitsgruppe jeweils den minimalen und den maximalen Querdurchmesser eines (ovalen) Haares mithilfe von Laserstrahlenemission vermaß (7). Die Gruppe um Atsushi hat dabei verschiedene Elastizitätsmodule für Kutikula und Kortex angenommen und rechnerisch belegt (7). Der Studie zufolge sei das Elastizitätsmodul der Kutikula bis zu viermal größer als das des Kortex, sodass die Steifigkeit der Kutikula bis zu 60% zu der gesamten Haarsteifigkeit beiträgt.

Die Berechnung des Elastizitätsmoduls von Haaren ist jedoch mehr als fragwürdig, da sich ein Elastizitätsmodul nur für hinreichend homologe Materialien berechnen lässt (104), wozu das biologische Material Haar jedoch nicht zählt. Auch zeigen unsere Ergebnisse, dass Haare gleichen Durchmessers (aber unterschiedlicher Herkunft) ungleiche Normalkräfte ausüben können (Abbildung 30 und 31). Bei großen Verschiebungen und Verzerrungen im Material, wie sie bei Haaren zu erwarten sind, ist das Youngs-Modul nicht anwendbar. Kritikwürdig an der Methode von Atsushi *et al.* ist weiterhin, dass sich aus der Geometrie eines Körpers nicht auf dessen Materialeigenschaften schließen lässt (104). Der von uns entwickelte Knicktest allerdings ermöglicht die unmittelbare Testung der tatsächlichen Normalkraft einzelner Haare und hängt dabei nicht von berechneten Größen eines heterologen, biologischen Materials ab.

5.1.2 Waagen und Wiegeprozess

Zur Etablierung eines Testverfahrens zur Testung der Normalkraft wurden zunächst zwei kommerziell erhältliche Analysegeräte in Erwägung gezogen, der Texture Analyser sowie die Karg Tensile Testers. Die Analysegeräte können nach einem Baukastensystem individuell zusammengesetzt werden und verschiedenste Materialeigenschaften analysieren. Beide Geräte, den Texture Analyser TA.XTPlus und den Karg Tensile Tester (TT 27025E6), nutzten Hoessel *et al.* zur Messung der Biegesteifigkeit ganzer Haarsträhnen nach der Applikation unterschiedlicher Haarprodukte. Einzelne Haare untersuchten Hoessel *et al.* dabei nicht (54).

Der Texture Analyser, der in Deutschland durch die Firma Winopal Forschungsbedarf GmbH vertrieben wird, wird in der Lebensmittel-, Verpackungsindustrie und in der Entwicklung von Haarpflegeprodukten eingesetzt. Auf Anfrage informierte Winopal Forschungsbedarf GmbH, dass nur die Festigkeitstestung ganzer Haarsträhnen möglich sei. Die kleinste Kraftmesszelle sei die 500er Messzelle; damit könne eine Messgenauigkeit bis auf 1/10 Gramm (0,1 g) erreicht werden (Winopal Forschungsbedarf GmbH, Bahnhofstrasse 42, 31008 Elze; Telefon: 05068-99990-10; www.winopal.com). Erste Tests mit der Sartorius-Analysenwaage hingegen zeigten, dass die zu messenden Kräfte im Mikrogrammbereich liegen und die kritische Kraft einiger Haare unter 0,05 g liegt. Die kleinste Kraftmesszelle des Texture Analysers ist für diese Messungen eindeutig nicht präzise genug; die der Sartorius®-Waage schon.

Auf Anfrage, ob die Messung der Normalkraft/kritischen Kraft einzelner Haare mit dem Karg Tensile Tester (TT 27025E6) oder einem anderen Produkt aus der Serie möglich sei, informierte die Firma Emmeram Karg Industrietechnik, dass ihre Messgeräte vor allem auf die Testung von Baumaterialien ausgelegt und nicht auf den Mikrogrammbereich spezialisiert seien. Die präziseste Analysenwaage der Firma messe auf 10 µg genau. Mit der Karg Analysenwaage wären die Testungen demzufolge möglich.

Eine bewegte Kraftmessung, wie sie zur Bestimmung der Normalkraft/ kritischen Kraft nötig ist, sei mit der präzisesten, auf 10 µg genauen Analysenwaage hingegen nicht möglich. Die besagte Karg-Analysenwaage brauche eine Stabilisierungszeit von 5-10 Sekunden, in der das Gewicht auf der Waage konstant bleiben müsse (Emmeram Karg Industrietechnik, Justus-von-Liebig-Ring 15, DE-82152 Krailling; Telefon: 089-89796103-0; <http://www.karg-industrietechnik.de/index.php>). Bei der langsamen Haarabsenkung zur Bestimmung der kritischen Kraft ändert sich das Gewicht durch den steigenden Druck auf der Waage jedoch ständig, so dass eine ausreichende Stabilisierungszeit nicht gegeben ist.

Die Sartoriuswaage kann, wie andere hochpräzise Laborwaagen auch, bewegte Messungen durchführen und eignete sich deshalb bevorzugt für unsere Testungen. Der einzige

offensichtliche Nachteil der Waage, die glatte Wiegefläche, wird durch die Beschichtung mit Parafilm® M korrigiert. Dennoch verblieb die technische Herausforderung, die Haare langsam und kontrolliert absenken zu können. Ein Zellmanipulator, wie der verwendete Mikromanipulator, erfüllt diese Aufgabe besser und mit geringerer Varianz, als bei der manuellen Absenkung der Haare durch Ermüdungserscheinungen und die begrenzte Konzentrationszeit zu erwarten wäre. Der bei den durchgeführten Messungen verwendete Micromanipulator 5171 birgt den Vorteil, dass eine Einstellung der Bewegungsgeschwindigkeit in den Modus ‚slow‘ möglich ist, in dem sich der Manipulatorkopf nur sehr langsam bewegt, und so ein zu schnelles Absenken der Haare elektromechanisch ausgeschlossen wird.

Trotz der vorgenommen Optimierungen des Testverfahrens durch beispielsweise die Verwendung des Parafilms (um ein kontrolliertes Auftreffen des Haares zu ermöglichen), unterliegt der Knicktest dennoch einigen Limitationen. Hierzu zählen die Handarbeit und das menschliche Auge, da nicht explizit garantiert ist, dass das Haar trotz Messgerät genau auf 2 mm eingespannt ist. Eine maschinelle Einspannung oder die Einspannung unter einer Lupe mit einem feineren Lineal könnte diese Unwägbarkeiten weiter reduzieren. Gleiches gilt für das senkrechte Auftreffen des Haares auf die Waage, welches nur durch das menschliche Auge verifiziert wird. Das Anbringen eines Koordinatenpapiers hinter dem Haar, um die Ausrichtung von Haare zu Waage weiter zu präzisieren, war nicht realisierbar, ohne dass es die Wiegefläche tangiert und somit die Messungen verfälscht hätte.

Die automatische Maximalwertspeicherung und die Messpräzision der Waage schließen menschliche Fehler auf diesem Gebiet weitgehend aus. Auch die Absenkung der Haare mithilfe des Mikromanipulators erhöht die Vergleichbarkeit der Tests, da jedes Haar sehr langsam und kontrolliert abgesenkt wird, was dem manuellen Absenken deutlich an Präzision überlegen ist. Eine weitere Limitation des Testverfahrens, nämlich die Schäden, die eine Mehrfacheinspannung an einem Haar hinterlässt, wird durch die Testdefinition, genauer der Unterlassung von Mehrfachtestungen, ausgeschlossen. Weiterhin wurden alle >10.000 Haarkrafttestungen von derselben Doktorandin durchgeführt, um einen möglichen Bias bei der Haarkrafttestung durch verschiedene Personen zu vermeiden.

Der Rückschluss auf die Querschnittsfläche eines Haares anhand eines vermessenen Durchmessers ist diskutabel. Die meisten Haare sind als biologisches Material nicht exakt rund, sondern unregelmäßig oval geformt (85). Die Examinierung der Haare vor der Lichtmikroskopie und den Krafttestungen bestätigten den ovalen Querschnitt einiger Haare bereits makroskopisch. Wird ein potentiell ovales Haar allerdings auf einen Objektträger gelegt und mit dem Deckglas bedeckt, kommt es sehr wahrscheinlich aufgrund der Gravität und der verbesserten Balance auf seiner breiteren Seite zu liegen. Deshalb floss in die

Abbildungen nur der Querdurchmesser ein, und es wurde auf eine Berechnung der Querschnittsfläche verzichtet.

Die statistischen ex-post-Berechnungen ergaben, dass die gemessene Haarkraft bei konsekutiven Messungen nicht stark variiert, sodass es vorteilhaft gewesen wäre, die einzelnen Haare nur 3- statt 6-mal auf die Waage aufzusetzen und stattdessen mehr Haare aus jeder Region zu testen.

5.2 Testhaare

Den Anlass, Haare verschiedener Körperregionen separat zu testen, lieferten die Erkenntnisse von Hess *et al.* im Jahre 1990. Sie untersuchten elektronenmikroskopisch Haare verschiedener Körperregionen desselben Probanden und stellten fest, dass die ‚Haarmorphologie in Abhängigkeit zur Körperregion variiert‘. Achselhaar beschrieben Hess *et al.* als geringer im Durchmesser als Nackenhaar, welches wiederum einen geringeren Durchmesser als Kopfhaar aufwies. Schamhaare hingegen hatten einen größeren Durchmesser als Kopfhaar (53).

Diese Beobachtung korreliert mit den im Unterkapitel ‚Anzahl und Auswahl der Testhaare‘ in Abbildung 30-31 beschriebenen Zusammenhängen. Genauer, dass der Einfluss des Durchmessers, als Beispiel für ein morphologisches Haarcharakteristikum, auf die axial übertragbare Kraft behaarungsregionsabhängig differiert. Ebenso unterstützen die Abbildungen 29-31 die Ergebnisse von Naling *et al.* (75) bezüglich des Haardurchmessers. Naling *et al.* bemerkten sowohl Unterschiede zwischen den mittleren Haardurchmessern verschiedener Probanden. Weiterhin beschrieben sie eine Polydispersität des Verhältnisses von dem geringsten zu dem größten Haardurchmesser der Haare derselben Person, in der Studie erwachsene, kaukasische Frauen, um den Faktor 1,4 bis 2 (75). Folglich kann die Haarmorphologie und damit auch die axiale Haarkraft intra- und interindividuell variieren. Abgeleitet aus diesen Ergebnissen wurde jeder Patient individuell getestet. Weiterhin erfolgten Testungen von Haaren präzise definierter Behaarungsregionen sowie die Testung von 6 Haaren aus einer Region, um diese Verzerrungen (weitestgehend) zu reduzieren.

Die Entscheidung zur Krafttestung von Haaren aus den Körperregionen POE, UR sowie IGF basiert auf der Beobachtung, dass aus diesen Haarregionen schwerkraft- oder lokalisationsbedingt potentiell ein Haar, in der hinteren Schweißrinne herabfallend, in die Interglutealfalte gelangen kann. POE- und UR-Haare könnten auf natürlichem oder künstlichem Wege, beispielsweise nach einem Friseurbesuch oder einer Rasur, hinabfallen und in der Interglutealfalte landen. IGF-Haare könnten ebenfalls ein kleines Stück hinabfallen oder sich lagebedingt direkt in die Haut der Interglutealfalte einspießen. Haare aus allen drei

Behaarungsregionen könnten demzufolge potentielle Ursache eines interglutealen Pilonidalsinus sein und werden daher individuell getestet und verglichen. Es ist anzunehmen, dass Bart- oder Brusthaare im Unterschied dazu wahrscheinlicher an der Körpervorderseite hinabfallen. Die Entstehung eines interglutealen Pilonidalsinus durch Beinbehaarung scheint ebenso unwahrscheinlich. Testungen von Haaren dieser Körperregionen fanden daher nicht statt.

Die Haarnest-Haare wurden getestet, um durch den Vergleich mit den Festigkeiten der Haare aus den übrigen drei getesteten Regionen zu ermitteln, von welcher Körperstelle die Haare im Sinus potentiell stammen könnten. Die Reliabilität der Testungen der Haare aus den Sinus lässt sich jedoch berechtigt hinterfragen. Es wurde gezeigt, dass die intraoperative Färbung der Haare deren Festigkeit nicht beeinflusst (vgl. Unterkapitel 'Färbung der Haare mit Toluidinblau'). Allerdings sind die Haare nach dem unter Umständen jahrelangen Aufenthalt in einer entzündeten Wunde (43) unter Einfluss des aktivierten Immunsystems vermutlich angegriffen und teilweise immunologisch abgebaut. Doll *et al.* unterstützen die Hypothese, dass selbst 'asymptomatische Pilonidalsinus subklinisch entzündet sind' (30).

In dem eventuellen Entzündungsprozess werden die Haare aber lediglich feucht gelagert und nicht sicher denaturiert. Sie werden, wenn überhaupt, an Steifigkeit und übertragbarer Kraft verlieren. Es ist davon auszugehen, dass die Kraftwerte durch den Entzündungsprozess nicht zunehmen und die Haare folglich zum Zeitpunkt des Eindringens in die Haut über eine noch größere Festigkeit verfügten. Unter diesem Gesichtspunkt erscheint die Krafttestung auch der denaturierten Haare sinnvoll, um Rückschlüsse auf deren Ursprungsort ziehen zu können. Bei der Interpretation der Ergebnisse sollte bedacht werden, dass die ursprüngliche Kraft der Haare bei Eintritt in die Haut unter Umständen noch höher war, als die gemessenen Kraftwerte es im status quo darzustellen vermögen.

Die elektronenmikroskopisch Bilder im Unterkapitel 'Morphologische Haarcharakteristika' des Ergebnisteils zeigen deutlich die verschiedenartigen Haarenden von epiliertem Haar, sowie von Bruch- und Schnitthaar (Abbildungen 46-50). Um trotz dieser Differenzen gleiche Testvoraussetzungen für alle Haare zu schaffen, bestand die Notwendigkeit, jedes Haar vor der Testung anzufrischen.

Eine generelle Kritik an der Lagerung und dem eventuell resultierenden Steifigkeitsverlust der Haare konnte durch eigene Versuche entkräftet werden (vgl. Abbildung 25). Auf Anfrage bestätigte außerdem das Institut für Rechtsmedizin Münster, dass Haare und Nägel selbst lange verstorbener Menschen nicht verwesen (Institut für Rechtsmedizin Münster, Röntgenstraße 23, 48149 Münster; Telefon: 0251-8355160). Linch *et al.* postulieren ebenfalls, dass 'Haarwurzeln nach frischer Entfernung vom Kopf und Exposition gegenüber den äußeren Elementen nicht verwesen' (68). Eine veränderte Haarfestigkeit durch potentielle Kleberückstände an den aufgeklebten Haaren schließt die gewählte

Testanordnung aus. Nach dieser werden alle Haare an ihrem distalen Ende aufgeklebt, sodass der wurzelseitige Schaft des Haares und damit das Testende von Kleberückständen unberührt bleibt. Weiterhin wurde eine Abnahme der Haarfestigkeit durch die Färbung mit Toluidinblau in der Testetablierung widerlegt. Die Ergebnisse der Nass-Trocken-Testungen (Abbildung 24) entsprechen den Ergebnissen der Studie ‚Stiffness of human hair fibers‘ aus dem Jahre 1978 von Robbins und Scott, laut derer die ‚Biegesteifigkeit menschlichen Haares mit steigender relativer Luftfeuchtigkeit abnimmt‘ (93). Zur Vermeidung feuchtigkeitsbedingter, falsch niedriger Testergebnisse, wurden alle Haare nur nach einer Trocknungszeit von mindestens 15 Minuten untersucht.

Sämtliche Operationen und intraoperativen Haarentnahmen führte derselbe Chirurg durch. Dies garantiert eine identische Vorgehensweise bei allen Haarentnahmen.

5.3 Patientenkollektiv

Die PSD-Patienten wurden konsekutiv am St. Marienhospital in Vechta im Zeitraum vom 15.09.2014 bis zum 01.08.2015 operiert. Die Patienten des St. Marien Hospital entsprechen dem durchschnittlichen nordwestdeutschen Patientenkollektiv. Frühe Studien von Doll, Gips und Anderen greifen in Bezug auf die Geschlechterverteilung innerhalb des Patientenguts auf ein nicht repräsentatives Patientenkollektiv zurück, da sie in Bundeswehrkrankenhäusern durchgeführt wurden, in denen anteilig mehr Männer behandelt werden (33-35; 44). Das durchschnittliche Alter lag in einer Studie von Doll *et al.* bei 22-24 Jahren (33), und damit etwas unter dem durchschnittlichen Alter der PSD-Patienten dieser Studie von 26 Jahren.

Das Matching der PSD-Patienten mit Vergleichsprobanden erfolgte in absteigender Priorität nach Geschlecht, Alter, BMI und Außentemperatur. Denn bereits 1977 zeigten Wyatt und Riggott mittels Elektronenmikroskopie strukturelle Unterschiede der Kutikulazellen nicht nur in Abhängigkeit von der Körperregion, sondern auch von Geschlecht und Alter der Probanden (106). Aufgrund der augenscheinlichen Körperbehaarungsunterschiede zwischen den Geschlechtern und der stark geschlechtsabhängigen Inzidenz des Pilonidalsinus wurde dieser Faktor am höchsten priorisiert.

Auch Bogaty beschrieb die morphologischen Unterschiede kindlicher und erwachsener Haare (16). Wheeler führt zudem unter anderem die Haarveränderungen während der Pubertät aus (105); Kondo *et al.* bemerkten einen Einfluss der Serumhormonkonzentration von Östrogen und Testosteron auf das Haarwachstum (66), und Tobin untersuchte die ‚Alterung des Haarfollikelpigmentationssystems‘ (97). Im Hinblick auf diese Studien scheint es sinnvoll, die PSD-MP-Paare nach Alter zusammenzustellen, um eine Vergleichbarkeit zu

erreichen. Die Studienlage und die augenscheinliche Alterung von Haut und Haaren sowie die altersabhängige Inzidenz begründen die zweithöchste Priorisierung dieses Faktors.

Verschiedene Studien versuchen auf einen positiven Zusammenhang zwischen dem BMI und der Wahrscheinlichkeit zur Entwicklung eines Pilonidalsinus hinzuweisen; also je höher der individuelle BMI, desto wahrscheinlicher die Entstehung eines Pilonidalsinus (2; 17; 52). Laut Smalls *et al.* korreliert der BMI mit der Steifheit und Dicke der Haut (95). Die Gruppe um Smalls führt dieses als eine mögliche Erklärung an, wie der BMI die Entstehung eines Pilonidalsinus beeinflussen könnte. Die Existenz dieses Zusammenhanges bleibt allerdings umstritten, da zum Beispiel Cubukcu *et al.* Übergewicht allein nicht als wichtigen Faktor in der Ätiologie des Pilonidalsinus' (23) ausmachen konnten. Auch Doll *et al.* fanden in einer kürzlich veröffentlichten Analyse von Daten des statistischen Bundesamtes keinen Zusammenhang zwischen dem BMI und der Entwicklung eines Pilonidalsinus (37).

Dennoch kann der Zusammenhang zwischen BMI und der Entstehung eines Pilonidalsinus nicht vollständig ausgeschlossen werden und zur Vermeidung eines diesbezüglichen Bias wurden die gesunden Vergleichsprobanden letztlich auch anhand des BMI ausgewählt. Zudem könnte eine ausgeprägte Adipositas zu einer verfrühten Schweißneigung führen, was wiederum über eine Hautmazeration eine mögliche Haareinspießung begünstigen könnte. Auch deshalb erfolgte eine Zuordnung von Vergleichspersonen mit gleichem BMI.

Die Auswahl eines gesunden Vergleichspartners erfolge nicht nach Ethnie, obwohl Franbourg *et al.* ethnische Unterschiede bezüglich der Haargeometrie und der mechanischen Eigenschaften von Haaren feststellten (42). Auch die Inzidenz des Pilonidalsinus variiert in Abhängigkeit von der Ethnie (1). Dies ist eine eindeutige Limitation des durchgeführten Matchings. Allerdings besitzen 20% der Deutschen einen Migrationshintergrund, was folglich auch bei 20% der getesteten Probanden, sowohl unter den PSD- als auch den MP-Patienten, der Fall sein müsste. Das Zufallsprinzip sollte hier eine gleichmäßige Verteilung der konsekutiv ausgewählten Probanden sicherstellen. Tatsächlich stammen 4 PSD-Patienten und 3 Vergleichsprobanden, alle mit deutscher Staatsbürgerschaft, aus dem mediterranen Raum.

5.4 Mikroskopie

Sämtliche lichtmikroskopische Untersuchungen und fotografische Aufnahmen wurden von derselben Mitarbeiterin durchgeführt, um Fehler durch Bedienerwechsel zu vermeiden. Sowohl das Leica DM2500 Lichtmikroskop und das Fotoprogramm ‚Leica Application Suite Version 2.8.1‘ wurden regelmäßig gewartet und funktionierten einwandfrei. Da die Haare

unbehandelt und nativ examiniert wurden, ist eine Veränderung der Haarmorphologie durch Färbetechniken oder Präparationsmethoden ausgeschlossen.

Um die Haarmorphologie in noch höherer Vergrößerung zu untersuchen, wurden ausgewählte Haarproben elektronenmikroskopisch analysiert. Mehrere Autoren untersuchten Haare mithilfe verschiedener Elektronenmikroskope oder Rasterkraftmikroskope (11; 38). Um ein Haar mithilfe eines Transmissionselektronenmikroskops zu untersuchen, muss dieses im Rahmen der Präparation in weniger als 100 nm dünne Scheiben geschnitten werden. Nur so ist die für die Mikroskopie nötige Elektronentransparenz zu erreichen. Wagner *et al.* untersuchten Haarschnitte mit einem Transmissionselektronenmikroskop (102). Eine Untersuchung des Haarendes in toto ist mit dieser Technik jedoch unmöglich. Aus diesem Grunde fiel die Wahl auf ein Rasterelektronenmikroskop, womit dreidimensionale Strukturen stark vergrößert abgebildet werden können. So konnten einzelne Haarenden vollständig und exakt dargestellt werden.

Erste Haarproben wurden nach einer Goldbeschichtung mit einer sehr hohen Beschleunigungsspannung von 30 kV untersucht. Um die Oberfläche noch besser und präziser darstellen zu können, wurde die zweite Charge von Haaren nicht mit Gold, sondern mit Kohle bestäubt, womit sich eine feinere Schicht auf der Oberfläche generieren lässt, sodass im Rasterelektronenmikroskop mehr Oberflächendetails des Haares differenziert werden können (30). Zudem wurde die Beschleunigungsspannung auf 1,5 kV reduziert. So wurden weniger Strukturen der Haaroberfläche durch die mit 30 kV sehr große Spannung bei der elektronenmikroskopischen Untersuchung deterioriert. Vergleicht man die Bilder der beiden Probenchargen, fällt deutlich die detaillierte Darstellung der Haaroberflächen auf (zum Beispiel Abbildung 48 im Unterschied zu Abbildung 52). Trotz dieser Optimierungen konnten Haare, die einmal mit einem Klebezettel in Kontakt gekommen waren, nur an dem nicht festgeklebten Haarenden mit Kohle bestäubt und rasterelektronenmikroskopisch untersucht werden. Das Haarenden, das in Kontakt mit den Klebezetteln gekommen war, konnte aufgrund der Kleberückstände nicht adäquat mit Kohle präpariert werden. Dennoch können die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen ausgewertet werden, da alle Haare zuvor lichtmikroskopisch untersucht wurden. In diesen Aufnahmen ließen sich bereits die Schnittkanten der Haare abbilden, sodass die elektronenmikroskopischen Aufnahmen diese Erkenntnisse weiter unterstützen.

5.5 Physikalische Haarcharakteristika

Obwohl verschiedene Studien und Reviews (2; 24; 63) die in den Pilonidalsinus befindlichen Haare beschreiben, wurden diese nur in wenigen Studien näher untersucht. Harlak et al. examinierten den Grad der Körperbehaarung, wobei die Behaarung der Interglutealfalte bei 587 PSD-Patienten subjektiv in die Kategorien ‚haarlos‘, ‚leicht behaart‘ und ‚behaart‘ eingeteilt wurde (52). Im Vergleich zu einer gesunden Vergleichsgruppe fanden Harlak et al. unter den 587 in die Studie eingeschlossenen PSD-Patienten signifikant mehr ‚leicht behaarte‘ und ‚behaarte‘ Probanden (52). Die qualitativen, physikalischen Charakteristika der Haare in der Interglutealfalte wurden nicht beleuchtet. Morphologische Studien der Haare in den Sinus nahmen Dahl und Henrich vor, indem sie die Pilonidalsinus-Exzidate von PSD-Patienten unter anderem rasterelektronenmikroskopisch aufarbeiteten und dornenartige Fortsätze an den Haaren bemerkten (25).

Wie Yang *et al.* unter Verwendung von Röntgendiffraktionsuntersuchung an Haaren feststellen konnten, zeigen sich genetische und damit familiäre Häufungen ähnlicher Haarcharakteristika (107). Ebenso existiert eine familiäre Häufung bei PSD-Patienten (2; 17) und damit wahrscheinlich eine genetische Komponente, die die Entstehung eines Pilonidalsinus begünstigt. Doll *et al.* postulierten diesbezüglich sogar, Patienten mit einer positiven Familienanamnese ‚alle verfügbaren und bekannten Interventionen, die die Rezidivrate senken können‘ (35), zukommen zu lassen, da in dieser Patientengruppe die Rezidivrate bei bis zu 50% liegt (35). Die Gründe für die genetische Komponente des Pilonidalsinus könnten dabei in der Vererbung der Haarcharakteristika liegen, sodass die Gene für besonders festes Haar in einer Familie gehäuft auftreten und folglich auch die Inzidenz eines Pilonidalsinus in der Familie erhöht ist.

Insgesamt wurden die Charakteristika der Haare in den Sinusnestern bisher in der Literatur kaum determiniert. Vor allem die Ermittlung von Länge und Steifigkeit (axiale Kraft) der Haare in den Sinus sowie der Haare in den Regionen POE, UR und IGF war bisher nicht Gegenstand der medizinischen Forschung. Mehrere Gründe sprechen folglich dafür, die in den Sinus enthaltenen Haare näher zu untersuchen (63), um möglicherweise Rückschlüsse auf ihre Herkunft ziehen zu können. Eine Ermittlung der Herkunft der Haare bildet die Grundlage zur Entwicklung neuer Präventionsmethoden des Pilonidalsinus, sodass in der Zukunft die hohe Rezidivrate unter den Pilonidalsinuspatienten mit positiver Familienanamnese möglicherweise erstmalig gesenkt werden kann.

Im Detailvergleich der Haarregionen einzelner PSD-Patienten fällt zunächst auf, dass die Haare bei der Mehrheit der untersuchten Patienten mit hoher Wahrscheinlichkeit von der POE oder aus der IGF stammen, da die Haare dieser Regionen härter sind als die Haare im Haarnest. Es konnte gezeigt werden, dass die Haare in den Sinus von 13 der 20 PSD-

Patienten potentiell von der POE stammen können. Die statistische Auswertung lässt ebenfalls den Rückschluss zu, dass mehr als 18% der Sinushaare von der POE oder dem UR stammen. Dieser Hinweis darauf, dass Haare in einem Sinus möglicherweise von der POE stammen können, ist revolutionär und vollkommen neu, da bisherige Studien entweder das Haar in der IGF als Ursache des sacrococcygealen Pilonidalsinus angenommen haben (52), oder auf den Ursprung der PSD-Haare nicht weiter eingegangen wurde. Die zahlreichen Fallberichte von Friseuren mit Pilonidalsinus an der Hand (8; 15; 39; 61; 81; 99), interdigitalem Pilonidalsinus am Fuß (76) oder gar einem Pilonidalsinus in der Brust (67) verdeutlichen, dass menschliche Kopfhaare als Schnittfragmente leicht in die Haut eindringen können. Eigene Kurzumfragen unter Friseuren ergaben, dass eingespießte Haare an verschiedensten ventralen Körperstellen ein unter Friseuren durchaus bekanntes und häufiges Problem darstellen, nicht aber an dorsalen Körperpartien. Angesichts der vielen Fallberichte von Friseuren scheint die Argumentation, dass es sich bei den bei ihnen eingespießten Schnitthaaren nicht um allogene Kopf- oder Nackenhaare der Kunden handele, abwegig.

Keiner unserer Patienten war jemals als Friseur beruflich tätig. Die Haare in den Sinus der Patienten 1, 2, 8 und 9 könnten potentiell auch von Tieren stammen. Die Fallberichte von Schafscherrern (100) und Hundefriseuren (59; 79) mit einem interdigitalen Pilonidalsinus, der Haar oder Wollfragmente enthält, zeigen, dass auch tierisches Haar einen Pilonidalsinus verursachen kann. Keiner der Patienten arbeitete jedoch beruflich mit Tieren, einige hielten lediglich in der Vergangenheit Haustiere. Ein tierischer Ursprung der Haare scheint daher unwahrscheinlich.

Bei den Patienten 3, 6, 12, 13, 16 und 17 war die maximal erreichte Kraft der IGF-Haare deutlich größer als die Haarkraft der POE- und der PSD-Haare. Gerade bei diesen Patienten ist die Entstehung eines Pilonidalsinus durch Einspießen der IGF-Haare in die Analfalte denkbar. Diese auffällig hohen Kraftwerte der IGF-Haare könnten nicht nur die primäre Entwicklung eines Pilonidalsinus begünstigen, sondern auch die Rezidivwahrscheinlichkeit erhöhen, da nach einer operativen Sanierung des Pilonidalsinus, und damit verbundener Rasur des Operationsgebietes, die Haare mit einer gleichbleibenden Steifigkeit nachwachsen und in dem nun vernarbten und strukturgeschwächten Gewebe erneut einen Pilonidalsinus verursachen könnten. Diese Theorie wird durch die Studie von Badawy *et al.* gestützt, in der dieser eine reduzierte Rezidivrate bei PSD-Patienten aufzeigte, die zusätzlich zur Operation des Pilonidalsinus eine postoperative Nd:YAG-Laser gestützte Haarentfernung in der Analfalte erhielten (9). Ebenso ermittelten Oram *et al.* sowie Khan *et al.* eine erniedrigte Rezidivrate nach Alexandrite Laser-Haarentfernung (64; 78). Dazu konträre Ergebnisse lieferte die Studie von Demirkan *et al.*, wonach PSD-Patienten, die zusätzlich zur Karydakis-Lappenplastik zweimalig eine Laserepilation mittels Alexandrite-Laser erhielten,

eine höhere Rezidivrate erlitten als die PSD-Patienten, die nur der Operation unterzogen wurden (26). Die Frage nach der Effektivität der Laserepilation zur Reduktion der Rezidivrate bei PSD-Patienten verbleibt folglich offen.

Demgegenüber bemerkten Petersen *et al.* eine Erhöhung der Rezidivrate, wenn nach der operativen Sanierung des Pilonidalsinus eine regelmäßige Haarentfernung in der Analfalte mittels Rasur erfolgte (82). Ebenso kamen Stirnemann und Blasimann zu dem Ergebnis, dass eine regelmäßige Rasur Rezidive nicht verhindere (96).

Die Erkenntnis, dass POE-Haare den Sinus verursachen könnten, stellt sämtliche Studien zum Einfluss einer interglutealen Laserepilation oder einer interglutealen Rasur auf die Rezidivrate in ein neues Licht. Im Rahmen dieser Studien wurden lediglich die interglutealen Haare entfernt. Herabfallende POE-Haare konnten sich weiterhin in die Haut einspießen. Unter Umständen war die Haut in der Interglutealregion durch den Laser oder die Rasur zudem gereizt und mazeriert, was ein Eindringen begünstigen könnte. Dieser Faktor der herabfallenden POE-Haare wurde in keiner Studie zu dem Thema berücksichtigt, sodass ein Bias durch diese Haare wahrscheinlich ist, da auch die POE-Haare und nicht ausschließlich die IGF-Haare rezidivierende Pilonidalsinus verursachen können.

Zusätzlich kann natürlich eine behaarte Interglutealregion mehr herabfallende Haare fangen und so die Kontaktzeit verlängern. Dieses wird von Bolandparvez bestätigt, wo mehrfaches Baden die Rezidivrate senkt (17). Hierbei handelt es sich jedoch nicht um einen Effekt der sogenannten ‚Hygieneverbesserung‘ (37), sondern um die Präsenz oder Abwesenheit von Haaren in einer effektiveren ‚catching Zone‘.

Unsere Ergebnisse deuten weiterhin eine Tendenz an, derzufolge sich bei den Patienten mit mehr als einem Porus mehr Haare in den Sinus finden. Die Korrelation zwischen der Anzahl der Pori und der Haare in den Sinus findet bisher keine Erwähnung in der Literatur. Bei 5 der 20 PSD-Patienten fanden sich keine Haare im Sinus (vgl. Abbildung 35). Dies ist vereinbar mit den Studienergebnissen von Bascom, dass sich ‚in der Hälfte aller Pilonidalsinus Haare fänden‘ (14). Die Auswertung der Anzahl der Pori in Bezug auf die maximale Kraft der Haare eines PSD-Patienten unabhängig von der Haarregion lässt vermuten, dass die Anzahl der entstehenden Pori positiv mit der maximalen Haarkraft korrelieren könnte. Diese Korrelation lässt sich mit unserem begrenzten Patientenkollektiv jedoch nicht statistisch belegen, da unter den 20 PSD-Patienten nur je ein Patient 3, 7 oder 8 Pori besaß. Die Varianz der Anzahl der Pori von 1-8 deckt sich mit den Beobachtungen von Doll *et al.*, nach denen die Anzahl der Pori gar zwischen 1 und 16 variieren kann (31).

Einen weiteren Hinweis auf den Ursprung der Haare gibt der Vergleich der Haarlängen in den untersuchten Behaarungsregionen zu den Längen der PSD-in-Haare (Haare im

Sinusnest) und zu den Längen der PSD-out-Haare (von außen sichtbar in den Pori steckende Haare). In den Sinus finden sich hochsignifikant kürzere Haare als in allen anderen Körperregionen und als die PSD-out-Haare. Einerseits könnten die Haare bei dem immunologischen Abbau (vgl. Unterkapitel ‚Diskussion der Testhaare‘) theoretisch im Sinus durchtrennt oder von den Enden her verkürzt worden sein. Andererseits ist denkbar, dass kürzere Haare bevorzugt in einen existenten Sinus eindringen oder selbst einen Sinus generieren. Physikalisch lässt sich dies durch die höhere Steifigkeit kurzer Euler-Stäbe erklären (49; 51) (vgl. Unterkapitel Physikalische Grundlagen); steifere Haare können sich besser in die Haut einspießen. Diese Hypothese könnte erklären, warum eine regelmäßige postoperative Rasur der Analfalte die Rezidivrate eine Pilonidalsinus erhöht (82; 96). Bei einer solchen Rasur werden naturgemäß zahlreiche, bei häufiger Rasur sehr kurze Haarspitzen erzeugt, die direkt in der Analfalte zu liegen kommen und nicht alle ausnahmslos und unmittelbar abgewaschen werden.

Bei den Haaren in den Sinus muss es sich um Bruch- oder Schnitthaar handeln, da die Haarlängen der in den Sinus zu findenden Haare signifikant zu allen Haarregionen der dorsalen Körperseite differieren. Es kann sich kaum ein ausgefallenes Haar aus einer der anderen drei Behaarungsregionen in seiner Ursprungslänge in den Sinus befinden, da die PSD-in-Haare in der Gesamtheit deutlich kürzer sind als die Haare aus den untersuchten Haarregionen. Unter den untersuchten Patienten, bei denen die Haare in den Sinus potentiell von der POE kommen könnten, fanden sich sehr kurze Haare < 2 cm in den Sinus. In der Kurzbefragung verschiedener Friseure gaben diese an, dass, wenn sie eingespießte Haare in ihrer Haut entdeckten, diese oft sehr kurz seien. Diese ‚kurzen Haare mit abgeschnittenen Enden und ohne Wurzeln‘ an der Hand eines Friseurs beschrieb King bereits 1949 (65). Der Verdacht liegt also nahe, dass kurz abgeschnittene oder abrasierte Haare von Kopf oder Nacken der PSD-Patienten den Sinus verursacht haben könnten, indem sie nach einem Friseurbesuch an Nacken und der Kleidung verbleiben und der Schwerkraft folgend in die Analfalte hinabrutschen. Wie bereits erwähnt, wirft dieser Zusammenhang ein völlig neues Licht auf die konträren Studienergebnisse zur Laserdepilation der Analfalte zur Rezidivprävention. Er bietet ein Erklärungsmodell, warum die intergluteale/präsakrale Laserdepilation inkonsistent zwischen guten (20; 69; 94) moderaten (77) Ergebnissen schwankt. Hier sind zwei Wirkmechanismen möglich. 1. Die Epilation des einspießenden Haares und 2. die Epilation der ‚catching Zone‘. Die Laserbehandlung könnte bei Menschen mit festem IGF-Haar Erfolg zeigen. Unwirksam wäre sie bei den Patienten, bei denen Schnitthaare von der POE den Sinus verursachen. Zur Rezidivprävention müsste bei diesen die Entstehung oder das Hinabfallen von Schnitthaar vermieden werden. Dennoch könnte eine intergluteale Laserdepilation die Rate der gefangenen herabfallenden Haare reduzieren,

und zwar durch eine Reduktion der ‚catching Zone‘. Unabhängig von der Haarherkunft kann eine behaarte Interglutealregion mehr herabfallende Haare (POE, UR, IGF) vor Ort halten, was zu einer längeren Expositionszeit ergo Einspießungswahrscheinlichkeit führen würde. Eine intergluteale Laserdepilation kann die Erst- wie die Wiedererkrankungsrate senken, indem sie Rate der herabgefallenen und gefangenen Haare reduziert.

Die Struktur der POE-Haare von PSD-Patienten unterscheidet sich von der der POE-Haare gesunder Vergleichsprobanden in zweifacher Hinsicht: Die Haare der PSD-Patienten besaßen durchschnittlich einen größeren Durchmesser als die Haare der Vergleichsprobanden und ab einem Durchmesser von 50 µm zeigten sie bei gleichem Durchmesser auch eine höhere axiale Kraft als diese. Menschen, deren Haare einen großen Durchmesser und folglich eine hohe axiale Kraft haben, leiden im Umkehrschluss an einem erhöhten Risiko, einen Pilonidalsinus zu entwickeln, als das untersuchte Normalkollektiv. In Zusammenschau mit den anderen Ergebnissen kann weiter formuliert werden: Patienten mit dicken POE-Haaren sind empfänglicher für die Entwicklung eines PSD. Die Haardurchmesser von PSD-Patienten und ein Vergleich mit den Haardurchmessern gesunder Vergleichsprobanden wurden in der Literatur bisher nicht beschrieben. Einzig die Histologie von Pilonidalsinus und den darin enthaltenen Haaren wurde näher untersucht (12; 25; 65; 91; 101).

Die licht- und elektronenmikroskopische Analyse ausgewählter Haare und deren Vergleich mit künstlich präpariertem Schnitthaar erhärtet die bereits beschriebene Theorie, dass Schnitthaare in die Sinus gelangen oder diese sogar verursachen können. In dem Sinus eines PSD-Patienten der 5 aus der Gruppe der 20 PSD-Patienten zufällig ausgewählten Probanden befanden sich Haare, die offensichtlich an beiden Enden abgeschnitten oder abrasiert wurden (vgl. Unterkapitel Ergebnisse der Lichtmikroskopie). Diese Haare haben ergo keine Haarwurzel, und es ist unwahrscheinlich, dass ein Haar in einem immunologischen Abbauprozess mit derart glatten Schnittkanten versehen wird. Die Aufnahmen dieser Haare beweisen, dass abgeschnittene oder abrasierte Haare in einen sacrococcygealen Pilonidalsinus gelangen können.

Einzig Dahl und Henrich fertigten 1992 elektronenmikroskopische Aufnahmen von Kopfharen und von Haaren aus einem Pilonidalsinus an (25). Die von Dahl und Henrichs rasterelektronenmikroskopisch untersuchten Kopfhare weisen, ebenso wie die in dieser Arbeit examinierten POE-Haare, eine Kutikulazellschicht auf. Bei den Harnest-Haaren beschreiben sie ‚abgebrochene Haarspitzen‘ (25), die bei Betrachtung der Bilder allerdings den im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten abgeschnitten Haarenden ähneln. Das von Dahl und Henrich als Bruchhaar beschriebenes Haar weist eine glatte Schnittkante und kein

ausgefranztes Ende auf. Bei den von Dahl und Henrich beobachteten ‚dornenartige[n] Auswüchse[n]‘ (25) könnte es sich um die abgespaltene Kutikulazellschicht handeln, die auch an dem Bruchhaar in Abbildung 54 und 55 zu sehen ist. Für die Rasterelektronenmikroskopie beschichteten Dahl und Henrich ihre Haarproben mit Gold. Daher sind sie besser mit den goldbeschichteten als mit den kohlebestäubten Haaren in dieser Arbeit vergleichbar. Unter den goldbeschichteten Haaren fallen tatsächlich einzelne Haare auf, an denen sich die Kutikula abgelöst hat und dornenartig absteht (Abbildung 59). Fraglich ist, ob sich diese Haare bereits länger im Sinus befanden und dadurch angedaut sind, oder ob es sich bei der veränderten Kutikula um einen Schaden an der Haaroberfläche durch eine zu hohe Beschleunigungsspannung bei der Elektronenmikroskopie handelt. Die kohlebeschichteten und mit einer niedrigeren Beschleunigungsspannung untersuchten Haare weisen keine dornenartigen Fortsätze auf. Unter den goldbeschichteten Haaren befand sich wie bei Dahl und Henrich ein aufgesplisstes Haar (Abbildung 58). Auch hier ist fraglich, ob das Haar aufgesplisst in den Sinus gelangte, im Sinus denaturiert wurde, oder ob es sich um einen im Rahmen der operativen Entnahme oder bei der Elektronenmikroskopie verursachten Schaden handelt.

Haare eines jeden Patienten wurden zusätzlich von einem Diplom-Biologen des Bayerischen Landeskriminalamtes lichtmikroskopisch untersucht, um durch die morphologischen Merkmale der Haare Rückschlüsse auf den Ursprungsort der Haare ziehen zu können. Auch hierbei zeichnete sich ein sehr heterogenes Bild ab, und er beurteilte die Lage (ohne Kenntnisse unserer Ergebnisse) so, dass sich Haare unterschiedlicher Körperregionen in den Sinusnestern fanden. Es konnte daher mit Sicherheit ausgeschlossen werden, dass nur die Haare einer Haarregion an der Entstehung eines Pilonidalsinus beteiligt sind. Auch unsere elektronenmikroskopischen Aufnahmen liefern einen weiteren Hinweis auf die Präsenz von POE-Haaren in den Sinusnestern. Die Struktur der Kutikulazellen eines im Sinusnest gefundenen Haares (Abbildung 52) ähnelt eher der eines POE-Haares als der eines IGF-Haares.

In der vorliegenden Arbeit konnte erstmalig gezeigt werden, dass Patienten mit festen Haaren ein erhöhtes Risiko zeigen, einen Pilonidalsinus zu entwickeln. Mit dem in dieser Arbeit vorgestellten Knicktest ist die individuelle Haarfestigkeit einfach, schnell und nicht-invasiv ermittelbar. Der Knicktest eignet sich somit potentiell als Methode, Risikopatienten frühzeitig ausfindig zu machen. Dazu müsste dieser um Grenzwerte erweitert werden, die festlegen, ab welcher Haarkraft ein erhöhtes Pilonidalsinusrisiko besteht.

Die individuelle Hautfestigkeit beeinflusst eventuell das Pilonidalsinusrisiko, da sich Haare leichter in eine Haut von geringerer Festigkeit einspießen können (Vulnerability-Factor nach Karydakis) (63). Der Einfluss der Hautfestigkeit auf die Entstehung eines Pilonidalsinus sollte

ergo nun genauer untersucht und bei der Festlegung der Grenzwerte berücksichtigt werden, ebenso wie der Einfluss der Kraft, mit der die Haare in die Haut gedrückt werden (Force-Faktor nach Karydakis) (63).

Wenn also ein Patient sehr festes Haar und eine positive Familienanamnese hat, könnte dieser präventiv behandelt werden. Hierfür käme eine intergluteale Laserdepilation der Analfalte bei besonders festem IGF-Haar in Frage. Diese kann nur Erfolg zeigen, wenn sämtliche Haare dauerhaft aus der Analfalte entfernt werden. Zusätzlich, und als solitäre Präventionsmaßnahme bei weichem IGF und festem POE-Haar, muss das Herabfallen von abgeschnittenem POE-Haar unbedingt vermieden werden. Bei Patienten, die bereits einen Pilonidalsinus entwickelt haben, kann der Knicktest entscheidende Informationen über den Ursprung der Haare geben und auch determinieren, in welcher Region die Haare am steifsten sind. So kann entschieden werden, ob eine Laserdepilation der Analfalte zur Rezidivprävention sinnvoll ist, oder das Vermeiden von herabfallendem POE-Haar in die Analfalte ausreicht. Letzteres stellt eine besonders einfache Maßnahme dar, und sollte daher allen PSD-Patienten empfohlen werden.

Eine Testung von Patienten verschiedener Ethnien, so zum Beispiel in der Türkei, wird angestrebt. Auch die Untersuchung, ob Patienten mit einem regelmäßigen Trocken-Kurzhaarschnitt mit Maschine ohne nachfolgende Kopfwäsche eine höhere PSD-Inzidenz zeigen als langhaarige Patienten mit seltenen Haarschnitten und Haarwäsche nach dem Friseurbesuch, bleibt interessant. Dieses würde die erhöhte Inzidenz des Pilonidalsinus im Militär - damals und heute - erklären können.

Die Steifheit der Haare lässt sich mit dem hier etablierten Verfahren zuverlässig bestimmen. Es ließ sich zeigen, dass PSD-Patienten steifere Haare als MP-Patienten haben. Es konnte bewiesen werden, dass nicht nur IGF-Haare, sondern regelhaft POE-Haare teil der Haarpopulation im Sinus sind, und hier vor allem kurze, scharfkantige Haarfragmente von Rasur oder Friseurbesuch.

Wir sollten deshalb beginnen, den Pilonidalsinus nicht allein als eine intergluteale Erkrankung zu sehen, und neue Wege der Prävention zu suchen. Die Kopfwäsche nach dem Haarschnitt und das regelmäßige Duschen der behaarten Interglutealfalte sind erste und praktische Ideen für alle manifesten PSD-Patienten, die per definitionem Risikofaktoren für eine erneute PSD-Bildung besessen haben oder noch besitzen. Die Aufklärung des Pathomechanismus, die Identifizierung von vulnerablen Personen und die Prävention durch den Schutz der Interglutealfalte könnten jetzt - 184 Jahre nach Erstbeschreibung des PSD durch Mayo -erstmalig zur Realität werden.

6 Literaturverzeichnis

1. AFHSC. 2013. U.S. Armed Forces Health Surveillance Center Report: Pilonidal cysts 2000-2012. *Medical Surveillance Monthly Report MSMR* 20:8-11
2. Akinci OF, Bozer M, Uzunkoy A, Duzgun SA, Coskun A. 1999. Incidence and aetiological factors in pilonidal sinus among Turkish soldiers. *Eur.J.Surg.* 165:339-42
3. Allen-Mersh TG. 1990. Pilonidal sinus: finding the right track for treatment. *Br.J.Surg.* 77:123-32
4. Anderson AW. 1847. Hair extracted from an ulcer. *Boston Med Surg J* 36:74
5. Ardelt M, Kocijan R, Dittmar Y, Fahrner R, Rauchfuss F, et al. 2016. Effects of methylene-blue staining on the extent of pilonidal sinus excision. *J Wound Care* 25:342-7
6. Arzneimittelkommission der deutschen Ä. 2008. Mitteilungen: "Aus der UAW-Datenbank" - Schwerwiegende Kreislaufreaktionen nach intravenöser Gabe von Toluidinblau zur Darstellung der ableitenden Harnwege. *Ärzteblatt*:28-9
7. Atsushi S, Masaaki Y, Arika N. 2006. Physical Properties of Human Hair. 1: Evaluation of Bending Stress by Measuring the Major and the Minor Axis of Human Hair *Journal of Society of Cosmetic Chemists of Japan* 36:207-16
8. Aydin HU, Mengi AS. 2010. Recurrent interdigital pilonidal sinus treated with dorsal metacarpal artery perforator flap. *J.Plast.Reconstr.Aesthet.Surg.* 63:e832-e4
9. Badawy EA, Kanawati MN. 2009. Effect of hair removal by Nd:YAG laser on the recurrence of pilonidal sinus. *J.Eur.Acad.Dermatol.Venereol.* 23:883-6
10. Baltenneck F, Franbourg A, Leroy F, Mandon M, Vayssie C. 2001. A new approach to the bending properties of hair fibers *J.Cosmet.Sci.* 52:355-68
11. Baque CS, Zhou J, Gu W, Collaudin C, Kravtchenko S, et al. 2012. Relationships between hair growth rate and morphological parameters of human straight hair: a same law above ethnical origins? *Int.J Cosmet.Sci.* 34:111-6
12. Barthelemy NR, Bednarczyk A, Schaeffer-Reiss C, Jullien D, Van DA, Cavusoglu N. 2012. Proteomic tools for the investigation of human hair structural proteins and evidence of weakness sites on hair keratin coil segments. *Anal.Biochem.* 421:43-55
13. Bascom J. 1980. Pilonidal disease: origin from follicles of hairs and results of follicle removal as treatment. *Surgery* 87:567-72
14. Bascom J. 1983. Pilonidal disease: long-term results of follicle removal. *Dis.Colon Rectum* 26:800-7
15. Biondo V, Bastianini S, Cassara V, Baio T, Cutuli P, et al. 2007. ["Barber's hair sinus": new clinical observation]. *G.Ital.Med.Lav.Ergon.* 29:802-3
16. Bogaty H. 1969. Differences Between Adult and Children's Hair. pp. 159-71
17. Bolandparvaz S, Moghadam DP, Salah R, Paydar S, Bananzadeh M, et al. 2012. Evaluation of the risk factors of pilonidal sinus: a single center experience. *Turk.J.Gastroenterol.* 23:535-7
18. Brand.de. 2015. *Parafilm*. <http://www.brand.de/de/brand-produkte/allgemeiner-laborbedarf/parafilmr-m/downloads-faqs/>
19. Braun-Falco O, Plewig G, Wolff H. 2005. *Dermatologie und Venerologie*. Springer Medizin Verlag Heidelberg, pp 923-6
20. Braungart S, Powis M, Sutcliffe JR, Sugarman ID. 2016. Improving outcomes in pilonidal sinus disease. *J Pediatr Surg* 51:282-4
21. Brearley R. 1955. Pilonidal sinus; a new theory of origin. *Br.J.Surg.* 43:62-8
22. Chamberlain JW, Vawter GF. 1974. The congenital origin of pilonidal sinus. *J.Pediatr.Surg.* 9:441-4
23. Cubukcu A, Carkman S, Gonullu NN, Alponat A, Kayabasi B, Eyuboglu E. 2001. Lack of evidence that obesity is a cause of pilonidal sinus disease. *Eur.J.Surg.* 167:297-8
24. da Silva JH. 2000. Pilonidal cyst: cause and treatment. *Dis.Colon Rectum* 43:1146-56

25. Dahl HD, Henrich MH. 1992. [Light and scanning electron microscopy study of the pathogenesis of pilonidal sinus and anal fistula]. *Langenbecks Arch.Chir* 377:118-24
26. Demircan F, Akbulut S, Yavuz R, Agtas H, Karabulut K, Yagmur Y. 2015. The effect of laser epilation on recurrence and satisfaction in patients with sacrococcygeal pilonidal disease: a prospective randomized controlled trial. *Int.J.Clin.Exp.Med.* 8:2929-33
27. Dessily M, Charara F, Ralea S, Alle JL. 2017. Pilonidal sinus destruction with a radial laser probe: technique and first Belgian experience. *Acta Chir Belg*:1-8
28. Doll D. 2010. 5- and 10-year recurrence rate is the new gold standard in pilonidal sinus surgery benchmarking. *Med.Princ.Pract.* 19:216-7
29. Doll D, Evers T, Krapohl B, Matevossian E. 2013. Is there a difference in outcome (long-term recurrence rate) between emergency and elective pilonidal sinus surgery? *Minerva Chir* 68:199-205
30. Doll D, Friederichs J, Boulesteix AL, Dusel W, Fend F, Petersen S. 2008. Surgery for asymptomatic pilonidal sinus disease. *Int.J.Colorectal Dis.* 23:839-44
31. Doll D, Friederichs J, Dettmann H, Boulesteix AL, Duesel W, Petersen S. 2008. Time and rate of sinus formation in pilonidal sinus disease *Int.J.Colorectal Dis.* 23:359-64
32. Doll D, Novotny A, Wietelmann K, Matevossian E, Evers T, Lieber A, Düsel W, Petersen S. Factors Influencing Surgical Decisions in Chronic Pilonidal Sinus Disease. *European Surgery* 2009, 2(41):60-5.
33. Doll D, Krueger CM, Schrank S, Dettmann H, Petersen S, Duesel W. 2007. Timeline of recurrence after primary and secondary pilonidal sinus surgery. *Dis.Colon Rectum* 50:1928-34
34. Doll D, Matevossian E, Hoenemann C, Hoffmann S. 2013. Incision and drainage preceding definite surgery achieves lower 20-year long-term recurrence rate in 583 primary pilonidal sinus surgery patients. *J.Dtsch.Dermatol.Ges.* 11:60-4
35. Doll D, Matevossian E, Wietelmann K, Evers T, Kriner M, Petersen S. 2009. Family history of pilonidal sinus predisposes to earlier onset of disease and a 50% long-term recurrence rate. *Dis.Colon Rectum* 52:1610-5
36. Doll D, Novotny A, Rothe R, Kristiansen JE, Wietelmann K, et al. 2008. Methylene Blue halves the long-term recurrence rate in acute pilonidal sinus disease. *Int.J.Colorectal Dis.* 23:181-7
37. Doll DHO, Luedi MM, Wieferich K, van der Zypen D, Maak M, Glanemann M. 2015. Stop insulting the patient: neither incidence nor recurrence in pilonidal sinus disease is linked to personal hygiene. *Pilonidal Sinus Journal* 1
38. Durkan C, Wang N. 2014. Nanometre-scale investigations by atomic force microscopy into the effect of different treatments on the surface structure of hair. *Int.J Cosmet.Sci.* 36:598-605
39. Efthimiadis C, Kosmidis C, Anthimidis G, Grigoriou M, Levva S, et al. 2008. Barber's hair sinus in a female hairdresser: uncommon manifestation of an occupational disease: a case report. *Cases.J.* 1:214
40. Egerton RF. 2005. *Physical Principles of Electron Microscopy*. Springer. 143ff pp.
41. Evers T, Doll D, Matevossian E, Noe S, Neumann K, et al. 2011. [Trends in incidence and long-term recurrence rate of pilonidal sinus disease and analysis of associated influencing factors]. *Zhonghua Wai Ke.Za Zhi.* 49:799-803
42. Franbourg A, Hallegot P, Baltenneck F, Toutain C, Leroy F. 2003. Current research on ethnic hair. *J.Am.Acad.Dermatol.* 48:S115-S9
43. Fukumura Y, Takase M, Mitani K, Suda K, Imamhasan A, et al. 2012. Amount of CD4+CD25+ regulatory T cells in autoimmune pancreatitis and pilonidal sinus. *Pancreas* 41:910-5
44. Gips M, Melki Y, Salem L, Weil R, Sulkes J. 2008. Minimal surgery for pilonidal disease using trephines: description of a new technique and long-term outcomes in 1,358 patients. *Dis Colon Rectum* 51:1656-62; discussion 62-3
45. Gottstein G. 2014. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*. pp 207ff. Springer Vieweg
46. Gross D, Hauger W, Schröder Jr, Wall WA. 2006. *Technische Mechanik*. Springer-Verlag, pp 115 ff.

47. Gross D, Hauger W, Schröder Jr, Wall WA. 2007. *Technische Mechanik*. Springer-Verlag, pp 89 ff.
48. Gross D, Hauger W, Schröder Jr, Wall WA. 2007. *Technische Mechanik*. Springer-Verlag, pp 264 ff.
49. Gross D, Hauger W, Schröder Jr, Wall WA. 2007. *Technische Mechanik*. Springer-Verlag, pp 90 ff.
50. Gross D, Hauger W, Schröder J, Wall WA. 2006. *Technische Mechanik*. Springer-Verlag, p 115
51. Gross D, Hauger W, Schröder J, Wall WA. 2007. *Technische Mechanik*. Springer-Verlag, pp 90 ff.
52. Harlak A, Menten O, Kilic S, Coskun K, Duman K, Yilmaz F. 2010. Sacrococcygeal pilonidal disease: analysis of previously proposed risk factors. *Clinics.(Sao Paulo)* 65:125-31
53. Hess WM, Seegmiller RE, Gardner JS, Allen JV, Barendregt S. 1990. Human hair morphology: a scanning electron microscopy study on a male Caucasoid and a computerized classification of regional differences *Scanning Microsc.* 4:375-86
54. Hoessel P. 2010. Assessment of styling performance in hair gels and hair sprays by means of a new two-point stiffness test. ed. S Riemann, R Knebl, J Schroeder, G Schuh, C Castillo, pp. 343-52
55. Hoffmann R. 2001. TrichoScan: combining epiluminescence microscopy with digital image analysis for the measurement of hair growth in vivo. *Eur J Dermatol.* 11:362-8
56. Hoffmann R. 2002. [TrichoScan. A new instrument for digital hair analysis] *Hautarzt* 53:798-804
57. Hoffmann R. 2003. TrichoScan: a novel tool for the analysis of hair growth in vivo *J Investig.Dermatol.Symp.Proc.* 8:109-15
58. Hueston JT. 1953. The aetiology of pilonidal sinuses. *Br.J.Surg.* 41:307-11
59. Ito A, Yoshida Y, Yamamoto O. 2013. Case of interdigital pilonidal sinus in a dog groomer. *J.Dermatol.* 40:1051-2
60. Jain Y, Javed MA, Singh S, Rout S, Joshi H, Rajaganeshan R. 2016. Endoscopic pilonidal abscess treatment: a novel approach for the treatment of pilonidal abscess. *Ann R Coll Surg Engl:*1-3
61. Joseph HL, Gifford H. 1954. Barber's interdigital pilonidal sinus: the incidence, pathology, and pathogenesis. *AMA.Arch.Derm.Syphilol.* 70:616-24
62. Karydakis GE. 1973. New approach to the problem of pilonidal sinus. *Lancet* 2:1414-5
63. Karydakis GE. 1992. Easy and successful treatment of pilonidal sinus after explanation of its causative process. *Aust.N.Z.J.Surg.* 62:385-9
64. Khan MA, Javed AA, Govindan KS, Rafiq S, Thomas K, et al. 2016. Control of hair growth using long-pulsed alexandrite laser is an efficient and cost effective therapy for patients suffering from recurrent pilonidal disease. *Lasers Med Sci* 31:857-62
65. King ES. 1949. The interdigital pilonidal sinus. *Aust.N.Z.J.Surg.* 19:29-33
66. Kondo S, Hozumi Y, Aso K. 1990. Organ culture of human scalp hair follicles: effect of testosterone and oestrogen on hair growth *Arch.Dermatol.Res.* 282:442-5
67. Lahiri R, Mullen R, Ashton MA, Abbott NC, Pollock AM. 2014. Pilonidal abscess in the breast: a case report. *J.Surg.Case.Rep.* 2014
68. Linch CA, Prahlow JA. 2001. Postmortem microscopic changes observed at the human head hair proximal end. *J.Forensic Sci.* 46:15-20
69. Lindholt-Jensen CS, Lindholt JS, Beyer M. 2012. Nd-YAG laser treatment of primary and recurrent pilonidal sinus. *Lasers Med Sci* 27:505-8
70. Lüllmann-Rauch R. 2009. *Taschenlehrbuch Histologie*. Georg Thieme Verlag KG, pp 526-9
71. Lüllmann-Rauch R. 2009. *Taschenlehrbuch Histologie*. Georg Thieme Verlag KG, pp 533-8
72. Mario LG. 1978. Normal cuticle-wear patterns in human hair. ed. RSYLDH Joseph A.Epps, pp. 155-75
73. Mayo H. 1833. *Observations on injuries and diseases of the rectum*. London: Burgess & Hill
74. Moll I, Augustin M. 2010. *Dermatologie*. Stuttgart: Thieme
75. Naling EY, Roy HK, William ST, Ellyn MC. 1977. The effect of fiber diameter on the cosmetic aspects of hair. *Journal of the Society of Cosmetic Chemists* 28:139-50

76. O'Neill AC, Purcell EM, Regan PJ. 2009. Interdigital pilonidal sinus of the foot. *Foot (Edinb.)* 19:227-8
77. Odili J, Gault D. 2002. Laser depilation of the natal cleft--an aid to healing the pilonidal sinus. *Ann R Coll Surg Engl* 84:29-32
78. Oram Y, Kahraman F, Karıncaoglu Y, Koyuncu E. 2010. Evaluation of 60 patients with pilonidal sinus treated with laser epilation after surgery. *Dermatol.Surg.* 36:88-91
79. Papa CA, Ramsey ML, Tyler WB. 2002. Interdigital pilonidal sinus in a dog groomer. *J.Am.Acad.Dermatol.* 47:S281-S2
80. Patey DH, Scarff RW. 1946. Pathology of postanal pilonidal sinus; its bearing on treatment. *Lancet* 2:484-6
81. Patey DH, Scarff RW. 1948. Pilonidal sinus in a barber's hand with observations on postanal pilonidal sinus. *Lancet* 2:13
82. Petersen S, Wietelmann K, Evers T, Huser N, Matevossian E, Doll D. 2009. Long-term effects of postoperative razor epilation in pilonidal sinus disease. *Dis.Colon Rectum* 52:131-4
83. Robbins CR. 2012. *Chemical and Physical Behavior of Human Hair*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, p 565
84. Robbins CR. 2012. *Chemical and Physical Behavior of Human Hair*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp 42-5
85. Robbins CR. 2012. *Chemical and Physical Behavior of Human Hair*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp 3-10
86. Robbins CR. 2012. *Chemical and Physical Behavior of Human Hair*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, p 14
87. Robbins CR. 2012. *Chemical and Physical Behavior of Human Hair*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, p 5
88. Robbins CR. 2012. *Chemical and Physical Behavior of Human Hair*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp 90 ff.
89. Romberg O, Hinrichs N. 2006. *Keine Panik vor Mechanik!* : Vieweg-Verlag
90. Sahsamanis G, Samaras S, Mitsopoulos G, Deverakis T, Dimitrakopoulos G, Pinalidis D. 2017. Semi-closed surgical technique for treatment of pilonidal sinus disease. *Ann Med Surg (Lond)* 15:47-51
91. Saout J. 1968. [Histological aspect and histogenesis of pilonidal fistula]. *J.Sci.Med.Lille.* 86:241-3
92. Scott GV, Robbins CR. 1969. A convenient method for measuring fiber stiffness. *Textile Research Journal*:975-6
93. Scott GV, Robbins CR. 1978. Stiffness of human hair fibers. *Journal of the Society of Cosmetic Chemists*:469-85
94. Shafigh Y, Beheshti A, Charkhchian M, Rad FS. 2014. Successful treatment of pilonidal disease by intense pulsed light device. *Adv Clin Exp Med* 23:277-82
95. Smalls LK, Randall WR, Visscher MO. 2006. Effect of dermal thickness, tissue composition, and body site on skin biomechanical properties *Skin Res.Technol.* 12:43-9
96. Stirnemann H, Blasimann B. 1983. [Is preventive epilation following sacral dermoid operation useful or ineffective?]. *Chirurg* 54:548-9
97. Tobin DJ. 2009. Aging of the hair follicle pigmentation system. *Int.J.Trichology.* 1:83-93
98. Tohmyoh H, Ishihara M, Akanda MA, Yamaki S, Watanabe T, Iwabuchi T. 2011. Accurate determination of the structural elasticity of human hair by a small-scale bending test. *J.Biomech.* 44:2833-7
99. Uysal AC, Alagoz MS, Unlu RE, Sensoz O. 2003. Hair dresser's syndrome: a case report of an interdigital pilonidal sinus and review of the literature. *Dermatol.Surg.* 29:288-90
100. Vaiude P, Dhital M, Hancock K. 2011. A true pilonidal sinus in the hand of a sheep shearer. *J.Surg.Case.Rep.* 2011:6
101. Van Der MEIR, Moriame G, Achten G. 1961. [Clinical and histological study of a case of sacrococcygeal pilonidal sinus]. *Bull.Soc.Fr.Dermatol.Syphiligr.* 68:942-7

102. Wagner R, Joekes I. 2007. Hair medulla morphology and mechanical properties *J Cosmet.Sci.* 58:359-68
103. Weiß C. 2013. *Basiswissen Medizinische Statistik.* pp 184. Berlin: Springer Medizin
104. Weißbach W. 2012. *Werkstoffkunde.* pp 14ff. vieweg+Teubner Verlag
105. Wheeler MD. 1991. Physical changes of puberty. *Endocrinol.Metab Clin.North Am.* 20:1-14
106. Wyatt EH, Riggott JM. 1977. Scanning electron microscopy of hair. Observations on surface morphology with respect to site, sex and age in man. *Br.J.Dermatol.* 96:627-33
107. Yang FC, Zhang Y, Rheinstadter MC. 2014. The structure of people's hair. *PeerJ.* 2:e619
108. Yildiz T, Elmas B, Yucak A, Turgut HT, Ilce Z. 2016. Risk factors for Pilonidal Sinus Disease in teenagers. *Indian J Pediatr* (online first)

7 Anhang

7.1 Heatmaps

Heatmaps von allen Patienten, bei denen sich Haare im Sinusnest befanden (15 Patienten),

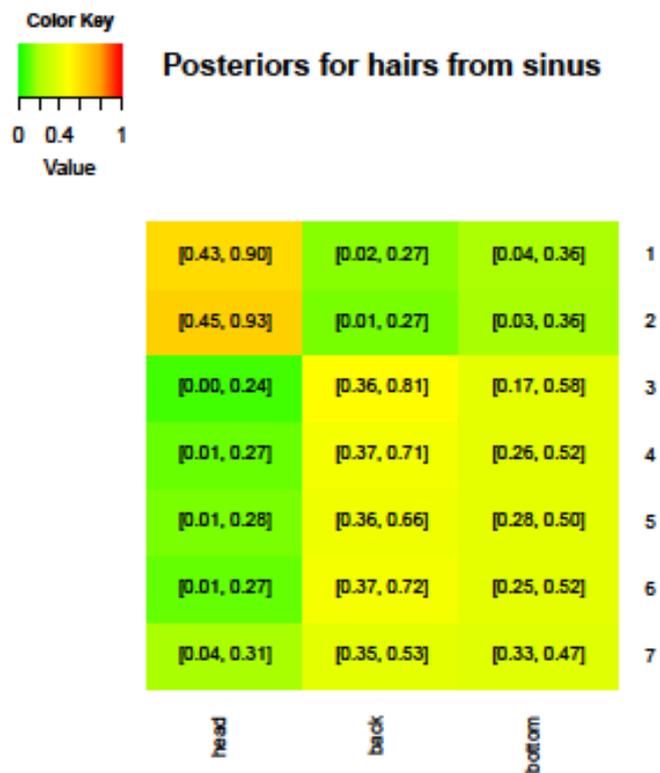
Legende:

Head = POE

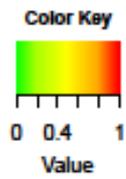
Back = UR

Bottom = IGF

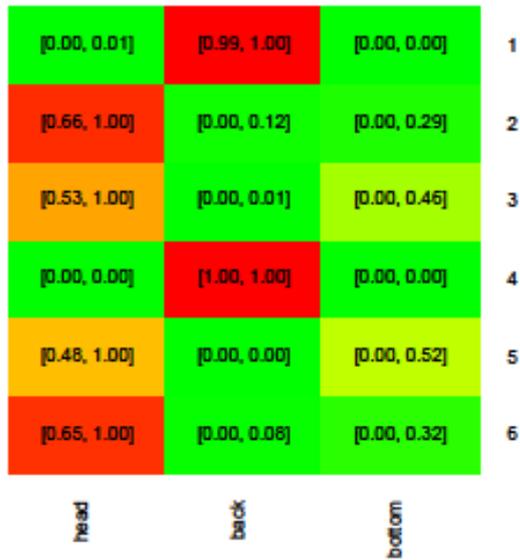
Patient 1



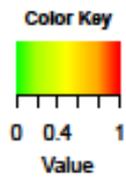
Patient 3



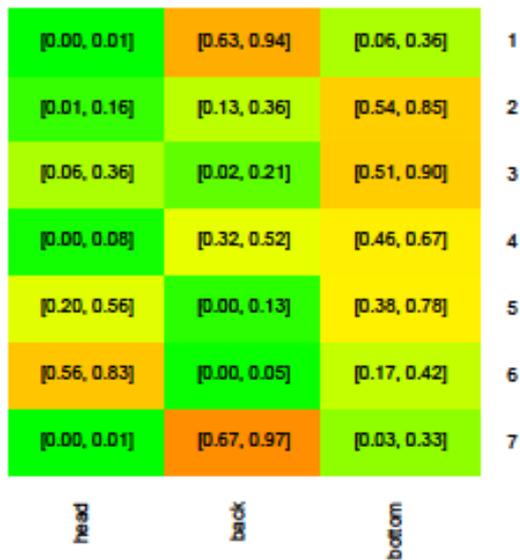
Posteriors for hairs from sinus



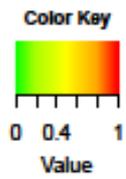
Patient 4



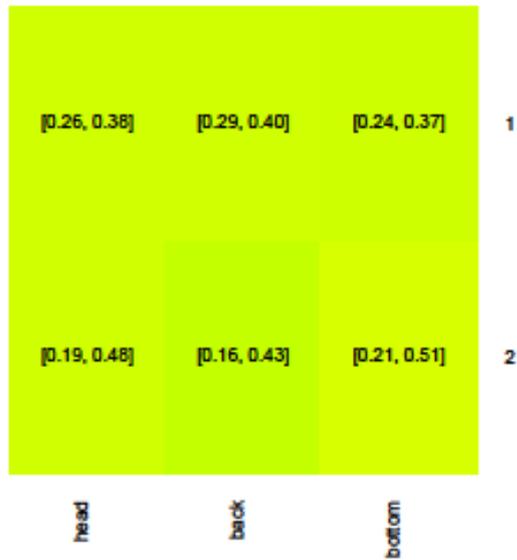
Posteriors for hairs from sinus



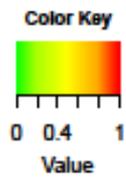
Patient 5



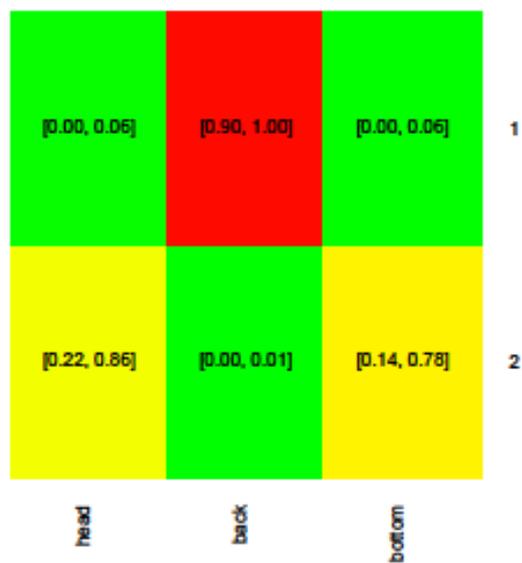
Posteriors for hairs from sinus



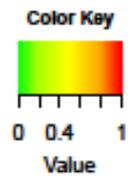
Patient 6



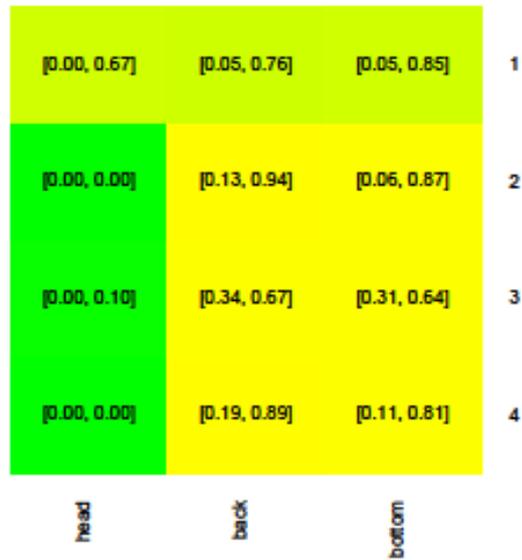
Posteriors for hairs from sinus



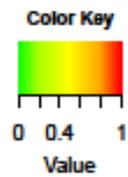
Patient 8



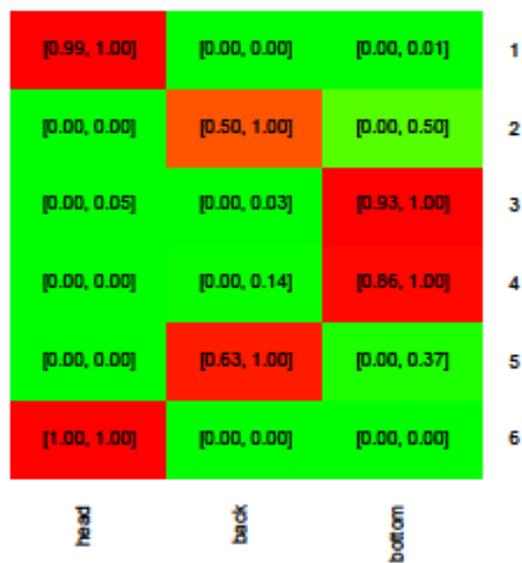
Posteriors for hairs from sinus



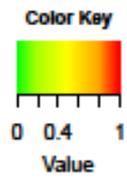
Patient 9



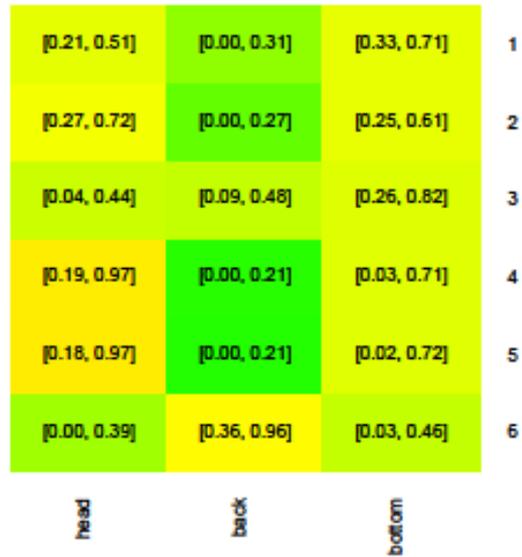
Posteriors for hairs from sinus



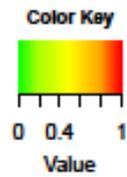
Patient 10



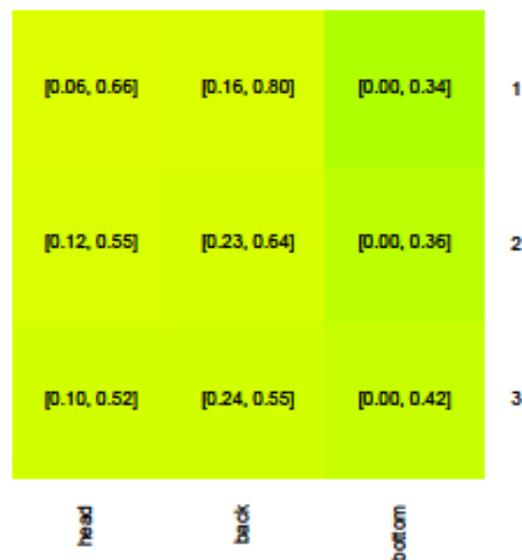
Posteriors for hairs from sinus



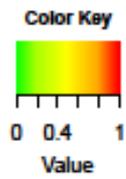
Patient 11



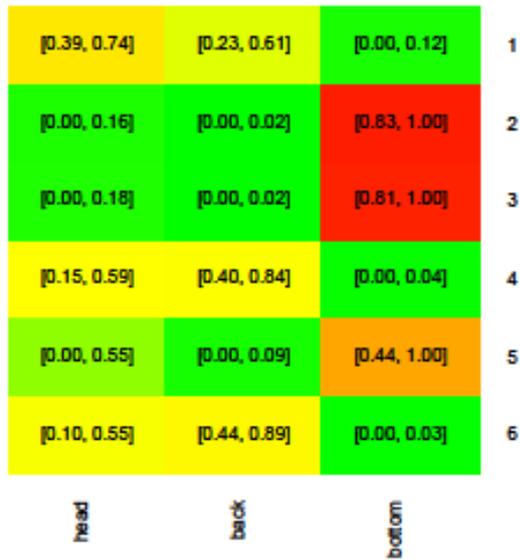
Posteriors for hairs from sinus



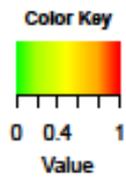
Patient 13



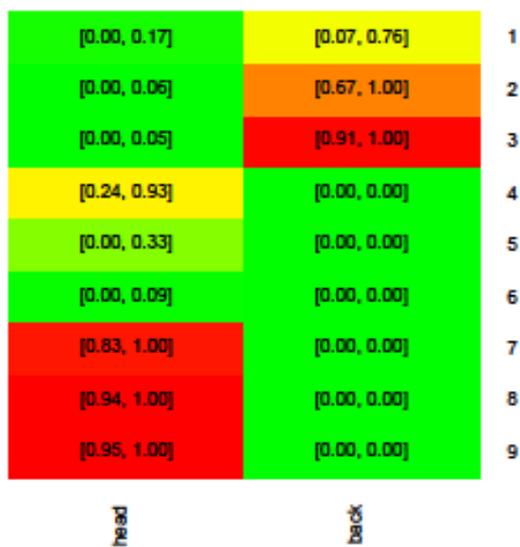
Posteriors for hairs from sinus



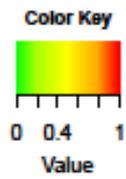
Patient 14



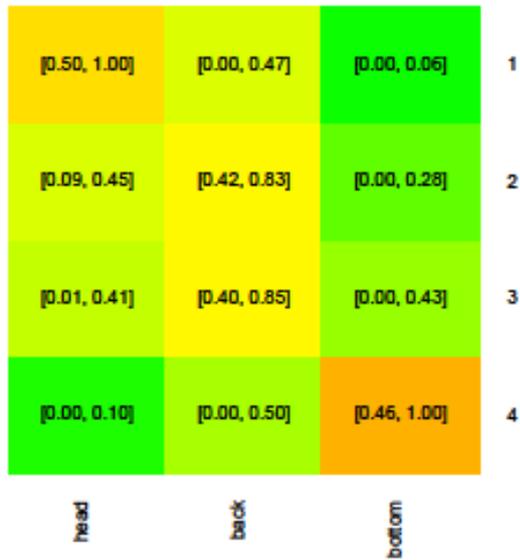
Posteriors for hairs from sinus



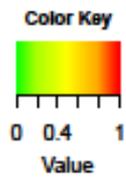
Patient 15



Posteriors for hairs from sinus



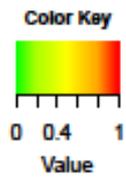
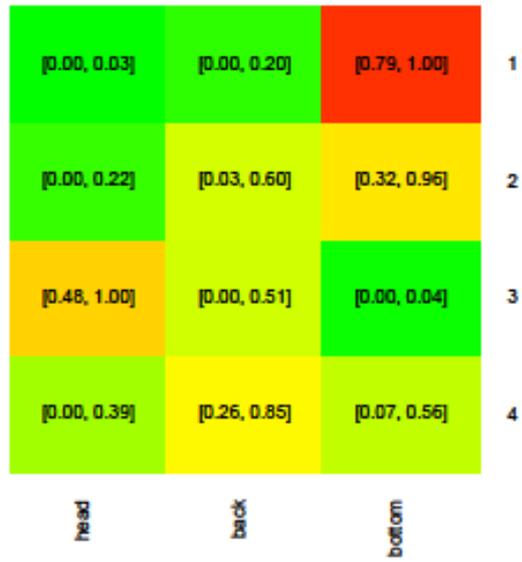
Patient 16



Posteriors for hairs from sinus



Patient 17

**Posteriors for hairs from sinus**

7.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Exzidiertes Präparat eines Pilonidalsinus nach 24h-Formalinfixierung; roter Pfeil = Interglutealfalte; blaue Pfeile = Fistelgang; roter Kasten = Ausschnitt von Abbildung 2 3	3
Abbildung 2: Vergrößerter Ausschnitt der Abbildung 1; roter Pfeil = in Narbenpannus eingebettetes Haar. 4	4
Abbildung 3: Physikalische Grundlagen des Knicktests..... 7	7
Abbildung 4: Vereinfachte Schemazeichnung des Haaraufbaus im Längsschnitt. 9	9
Abbildung 5: Normales/gesundes Kopfhaar, Kutikulazellschicht (Rasterelektronenmikroskopie; kohlebestäubt; 1000-fache Vergrößerung).....12	12
Abbildung 6: In der Haarmitte dunkel erscheinende, diskontinuierliche Medulla eines gesunden, wenig gealterten Haares (Lichtmikroskopie; 20-fache Vergrößerung).12	12
Abbildung 7: Versuchsaufbau mit Mikromanipulator (links im Bild) und Präzisionswaage (rechts im Bild).14	14
Abbildung 8: Klingenthaler E35-010.14	14
Abbildung 9: Im Klingenthaler eingespanntes Haar.15	15
Abbildung 10: Klingenthaler an die Anbauplatte des Mikromanipulators montiert.15	15
Abbildung 11: Fadenpinzette G-19030.15	15
Abbildung 12: Skizze des Knicktests; links: Grundposition; rechts: Haar auf Wiegefläche abgesenkt und seitlich ausgeknickt.16	16
Abbildung 13: Versuchsschema der waagerechten Testung (Abscheren am geschlossenen (A) und offenen (B) Würfel).....19	19
Abbildung 14: Wimpernpinzette mit Infusionsschlauch überzogen (armiert).22	22
Abbildung 15: Haarentnahmeorte (UR = unterer Rücken, IGF = Interglutealfalte, POE = Protuberantia occipitalis externa).23	23
Abbildung 16: Kraftübertragung in Abhängigkeit zur Einspannlänge (trockene, senkrechte Testung); n = 10 Haare.26	26
Abbildung 17: Kraftübertragung im Knicktest (vertikale Ausrichtung) und im Biegetest (horizontale Ausrichtung) (erste Einspannung; 0,2 cm; trockene Testung); n = 35 Haare.....27	27
Abbildung 18: einmalig eingespanntes Haar mit sichtbarer Einspannläsion (roter Pfeil) (Lichtmikroskopie; 10-fache Vergrößerung).28	28
Abbildung 19: Mehrfacheinspannungen versus ausgeübte Kraft (erste Einspannung; 0,2 cm; trockene, senkrechte Testung); n = 10 Haare (POE).29	29
Abbildung 20: Kraftübertragung in Abhängigkeit zum Abstand der Einspannung von der Haarwurzel (erste Einspannung; 0,2 cm; trockene, senkrechte Testung); n = 4 Haare.....30	30

Abbildung 21: Multiple Testungen pro Haar (erste Einspannung; 0,2 cm; trockene, senkrechte Testung); n = 10 Haare; axiale Kraft normiert auf 100% entsprechend 1,0 (schwarze Linie).....	31
Abbildung 22: Multiple Testungen pro Haar (erste Einspannung; 0,2 cm; trockene, senkrechte Testung); n = 10 Haare.....	32
Abbildung 23: Erste 6 Testungen (erste Einspannung; 0,2 cm; trockene, senkrechte Testung); n = 240 Haare.....	33
Abbildung 24: Kraftübertragung während des Trocknungsprozesses (erste Einspannung; 0,2 cm; senkrechte Testung); n = 10 Haare.....	35
Abbildung 25: Haarfestigkeit im Zeitverlauf (erste Einspannung; 0,2 cm; trockene, senkrechte Testung); n = 10 Haare.....	36
Abbildung 26: Färbung mit Toluidinblau (erste Einspannung; 0,2 cm; trockene, senkrechte Testung); n = 10 Haare.....	37
Abbildung 27: PSD-Haar; roter Pfeil = Haarschaft (Rasterelektronenmikroskopie, goldbeschichtet, 150-fach vergrößert).....	38
Abbildung 28: PSD-Haar aus Abbildung 27; blauer Pfeil = Lysezone (Rasterelektronenmikroskopie, goldbeschichtet, 350-fach vergrößert).....	38
Abbildung 29: Kraftübertragung von jeweils zehn Haaren aus derselben Region von 3 gesunden Patienten; die Haare in den Grafiken in der oberen Zeile stammen von der POE (Protuberantia occipitalis externa), die in der Grafiken der unteren Zeile vom UR (unterer Rücken).....	39
Abbildung 30: Durchmesser von POE-Haaren und axiale Kraftübertragung; n = 100 Haare.....	40
Abbildung 31: Durchmesser von UR-Haaren und axiale Kraftübertragung, n = 65 Haare.....	41
Abbildung 32: Grafiken zur Validierung des linearen Modells, was für die gesammelten wiederholten Haarkraftmessungen angewandt wurde. Linke Seite: Tukey-Anscombe plot (Werte vs. berechnete Anpassung); rechte Seite: Wert-Quantile vs. normale Quantile.....	45
Abbildung 33: Heatmap von Patient 3.....	46
Abbildung 34: Haarregionen und axiale Haarkraft von Patient 1; Detailansicht.....	47
Abbildung 35: Vergleich der nach Haarregionen aufgeschlüsselten intra- und interindividuellen Haarfestigkeit bei PSD-Patienten; n = 20 PSD-Patienten.....	49
Abbildung 36: Haarkraftwerte der Patienten 1-5 (vergrößerte Detaildarstellung aus Abbildung 35).....	50
Abbildung 37: Haarkraftwerte der Patienten 6-10 (vergrößerte Detaildarstellung aus Abbildung 35).....	51
Abbildung 38: Haarkraftwerte der Patienten 11-15 (vergrößerte Detaildarstellung aus Abbildung 35).....	52

Abbildung 39: Haarkraftwerte der Patienten 16-20 (vergrößerte Detaildarstellung aus Abbildung 35).....	53
Abbildung 40: Anzahl der Haare pro PSD-Patient; n = 20 PSD-Patienten, davon konnten bei 5 Patienten keine Haare aus dem Sinus geerntet werden.	55
Abbildung 41: Haarlänge verschiedener Körperregionen; n = 40 Probanden (MP = 20; PSD = 20); n = 704 Haare (PSD = Pilonidalsinus; MP = matched pair).....	56
Abbildung 42: Durchschnittlicher Haardurchmesser nach Haarregionen; n = 235 Haare (POE = Protuberantia occipitalis externa, UR = unterer Rücken, IGF = Interglutealfalte).	57
Abbildung 43: Haarkraft in Abhängigkeit vom Haardurchmesser; rot = PSD-Patienten; schwarz = MP-Patienten; n = 235 Haare (PSD = Pilonidalsinus; MP = matched pair).	58
Abbildung 44: Haarregionen bei PSD-Patienten und MP im Vergleich, n = 20 Paare; n = 834 Haare (PSD = Pilonidalsinus; MP = matched pair).	60
Abbildung 45: Haare aus einem Pilonidalsinus, roter Pfeil = Zelldetritus (Lichtmikroskopie, 10-fache Vergrößerung).	63
Abbildung 46: Mit Haarwurzel epiliiertes POE-Haar; blauer Pfeil = Haarwurzel; roter Pfeil = Haarschaft (Rasterelektronenmikroskopie, goldbeschichtet, 150-fache Vergrößerung).....	64
Abbildung 47: Vom Friseur geschnittenes Haar (Rasterelektronenmikroskopie, goldbeschichtet, 1000-fache Vergrößerung).....	65
Abbildung 48: Frisch abgeschnittenes Haar (Rasterelektronenmikroskopie, goldbeschichtet, 350-fache Vergrößerung).	65
Abbildung 49: Abgebrochenes Haar (Rasterelektronenmikroskopie; gold-beschichtet; 150-fache Vergrößerung).	66
Abbildung 50: Abgebrochenes Haar aus Abbildung 49 (Rasterelektronenmikroskopie; goldbeschichtet; 150-fache Vergrößerung).....	66
Abbildung 51: Haare aus Haarnest (Lichtmikroskopie, 10-fache Vergrößerung).....	67
Abbildung 52: Haar aus Pilonidalsinus (Rasterelektronenmikroskopie; kohlebestäubt; 500-fache Vergrößerung).	68
Abbildung 53: Haar aus Pilonidalsinus (Rasterelektronenmikroskopie; kohlebestäubt; 1000-fache Vergrößerung).	69
Abbildung 54: Bruchhaar aus Pilonidalsinus (Rasterelektronenmikroskopie; kohlebestäubt; 500-fache Vergrößerung).	70
Abbildung 55: Bruchhaar aus Pilonidalsinus (Rasterelektronenmikroskopie; kohlebestäubt; 1000-fache Vergrößerung).	70
Abbildung 56: POE-Haar (Rasterelektronenmikroskopie; kohlebestäubt; 1000-fache Vergrößerung).....	71
Abbildung 57: IGF-Haar (Rasterelektronenmikroskopie; kohlebestäubt; 1000-fache Vergrößerung).....	71

Abbildung 58: Haar aus Pilonidalinus (Rasterelektronenmikroskopie, goldbeschichtet, 70-fache Vergrößerung).	72
Abbildung 59: Haar aus Pilonidalinus (Rasterelektronenmikroskopie, goldbeschichtet, 350-fache Vergrößerung).	72

7.3 Dank

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr. Glanemann für die freundliche Überlassung dieses hochinteressanten Themas und Herrn PD Dr. Dietrich Doll für die hervorragende, intensive Betreuung. Er ist jeder meiner Ideen aufgeschlossen und konstruktiv kritisch gegenübergetreten, hat mich in den richtigen Momenten motiviert und mir sein Vertrauen in meine Arbeit geschenkt. Weiterhin danke ich Katharina Maier, die mir stets mit ihrem Nervenkostüm mit Rat und Tat zur Seite stand und geduldig alle meine Fragen beantwortet hat.

Dr. Alain Hauser gilt mein ausführlicher Dank für seine Freundlichkeit und die kunstvolle statistische Auswertung meiner Daten. Bei Professor Apostolos Papalois und ELPEN Pharmaceutical Co. Inc. möchte ich mich wärmstens für das zur Förderung meiner Arbeit verliehene Stipendium bedanken. Ganz vielen Dank an das gesamte Team des Instituts für Medizinische Biophysik der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster, in dessen Labor ich die Haartestungen durchführen durfte und von dessen Ideen ich so oft inspiriert wurde. Für die Anfertigung elektronenmikroskopischer Bilder danke ich Frau MTA Christiane Rasch (Institut für Medizinische Biophysik, Universität Münster) und Herrn BTA Norbert Pütz (Anatomie und Zellbiologie - Abteilung für Elektronenmikroskopie, Universität des Saarlandes) herzlichst. Vielen Dank auch an Herrn Christoph Kollhoff für Rat und Unterstützung bei der Berechnung der Knicklasten von Haaren.

Zuletzt möchte ich meiner Familie und meinen Freunden, besonders Pia Gregor, für die Toleranz und humorvolle Unterstützung danken, mit der sie mir und meinen Haarexperimenten stets begegnet sind. Tatkräftige Hilfe bekam ich besonders von meiner Mutter Dorothee, meiner Schwester Carolin, sowie von Simon Baar. Vielen Dank!

7.4 Publikation

ORIGINAL CONTRIBUTION

Strength of Occipital Hair as an Explanation for Pilonidal Sinus Disease Caused by Intruding Hair

Dietrich Doll, M.D., Ph.D.^{1,7} • Friederike D. Bosche, M.D.¹ • Verena K. Stauffer, M.D.²
 Inga Sinicina, M.D., Ph.D.³ • Sebastian Hoffmann, M.D., Ph.D.⁴
 Dominic van der Zypen, Ph.D.⁵ • Markus M. Luedi, M.D., M.B.A.⁶

1 Department of Procto-Surgery, St. Marienhospital Vechta, Academic Teaching Hospital of the Medizinische Hochschule Hannover, Vechta, Germany

2 Department of Surgery, Luzerner Kantonsspital Sursee, Sursee, Switzerland

3 Institute of Forensic Medicine, Technical University Munich, Munich, Germany

4 Marien-Krankenhaus Bergisch Gladbach, Bergisch Gladbach, Germany

5 Swiss Federal Office of Social Insurance, Bern, Switzerland

6 Department of Anesthesiology and Pain Therapy, Bern University Hospital Inselspital, University of Bern, Bern, Switzerland

7 Department of Surgery, Medical School, University of the Witwatersrand, Johannesburg, Soweto, South Africa

BACKGROUND: Pilonidal sinus disease is thought to be caused by intrusion of hair into healthy skin; loose hair in the intergluteal fold is thought to promote disease. However, compelling evidence to support these postulates is lacking; the cause of pilonidal sinus disease remains uncertain.

OBJECTIVE: To determine whether particular properties of hair are associated with susceptibility to pilonidal sinus disease, we compared physical properties of hairs of patients with pilonidal sinus disease with hairs from control subjects who were matched for sex, BMI, and age.

DESIGN: This was an experimental study with establishment of a mechanical strength test for single hairs to quantify the maximum vertical force that a hair could exert, following tests of strength of occipital, lumbar, and intergluteal hair.

SETTINGS: Hair from patients with pilonidal sinus disease and matched control subjects were harvested from patients of the St. Marienhospital Vechta Department of Procto-Surgery.

PATIENTS: A total of 17 adult patients with pilonidal sinus disease and 217 control subjects were included.

MAIN OUTCOME MEASURES: ANOVA and intraclass and interclass variations of data gained from mechanical strength tests of occipital, lumbar, and intergluteal hair were included.

RESULTS: Vertical hair strength was significantly greater in patients with pilonidal sinus disease. Occipital hair exhibited 20% greater, glabella sacralis 1.1 times greater, and intergluteal hair 2 times greater strength in patients with pilonidal sinus disease than in matched control subjects (all $p = 0.0001$). In addition, patients with pilonidal sinus disease presented with significantly more hair at the glabella sacralis and in the intergluteal fold.

LIMITATIONS: The study was limited by its relatively small number of patients from a specific cohort of European patients.

CONCLUSIONS: Occipital hair exhibited considerable vertical strength. Because occipital hair exerted the greatest force and cut hair fragments were found in the pilonidal nest in large quantities, these data suggest that pilonidal sinus disease is promoted by occipital hair (see **Video Abstract**, <http://links.lww.com/DCR/A329>).



Supplemental digital content is available for this article. Direct URL citations appear in the printed text, and links to the digital files are provided in the HTML and PDF versions of this article on the journal's Web site (www.dcrjournal.com).

Financial Disclosure: None reported.

Correspondence: Dietrich Doll, M.D., Ph.D., Department of Procto-Surgery, St. Marienhospital Vechta, Academic Teaching Hospital of the Hannover University, Marienstr 6–8, D-49377 Vechta, Germany. E-mail: ddoll@gmx.de

Dis Colon Rectum 2017; XX: 00–00
 DOI: 10.1097/DCR.0000000000000795
 © The ASCRS 2017

DISEASES OF THE COLON & RECTUM VOLUME XX: XXX (2017)

KEY WORDS: Hair; Karydakis; Pilonidal sinus; Scalp; Vertical strength.

Different theories regarding the etiology of pilonidal sinus disease (PSD) have been postulated. Although familial clustering of pilonidal disease is common, hereditary factors have not been identified.¹ Bascom² and others argued that midline pits occurred as a

result of follicle occlusion, inflammation, and rupture and suggested that loose hairs intruded through already existing pits. However, the fact that PSD also occurs in patients whose natal cleft is bald seriously challenges this theory.^{3,4} Karydakis⁵ suggested that intruding hair was the cause of PSD. He described a number of hair-related factors of pathogenetic importance (Table 1).

Some methods to prevent recurrent PSD, such as razor depilation/shaving, have been associated with increased recurrence^{6,7}; in addition, depilation with cream, x-rays,⁸ and lasers⁹ have been used, but the effectiveness of these has not been conclusively confirmed.⁴ Overall, the cause of both primary and recurrent PSD remains uncertain. Investigations aimed at elucidating the pathogenesis of the disease are needed, because the incidence of PSD is rising, and surgical interventions in Germany, for example, have doubled between 2000 and 2012.¹⁰ The purpose of this study was to examine the strength of hair; specifically, we wanted to test the capacity of hair to resist a vertical (trajectory) or rotational (drilling) force and to compare hairs of patients with PSD with control subjects matched by sex, BMI, and age. In addition, we aimed to study the hair density between the head and anus along the dorsal sweat crest in patients with PSD and control subjects and to correlate these densities with the occurrence of PSD.

PATIENTS AND METHODS

Institutional Review Board Approval and Informed Consent

The ethics committee of the Medical Association of Niedersachsen, Berliner Allee 20, 30175 Hannover, Germany (Prof. Dr. med. Andreas Creutzig, chair) fully and unanimously approved the study based on § 15 of the Niedersachsen Medical Association's professional code of conduct. The ethics committee of the Medical Association of Niedersachsen, Berliner Allee 20, 30175 Hannover, Germany (Prof. Dr. med. Andreas Creutzig, chair) fully and unanimously approved the study based on § 15 of the Niedersachsen Medical Association's professional code of conduct. Patient consent for hair usage was obtained after the surgeries to guarantee that they did not feel any preoperative pressure.

Patients

Patients were recruited at the Department of Proctosurgery at St. Marienhospital Vechta, a 321-bed academic teaching hospital of the University of Hannover (Germany). Adult patients with PSD (15 men and 2 women) were enrolled between September 2014 and July 2015. All 17 of the patients experienced primary PSD. An additional 33 patients with PSD (28 men and 5 women) were enrolled for hair distribution analysis but not hair sampling (Table 2). Control subjects without PSD (102 men and 115 women) were recruited from the same department and matched with the 17 patients with PSD for sex, BMI, and age at date of surgery.

TABLE 1. Factors promoting PSD as postulated by Karydakis⁵

Factors	
Hair-related factors (H)	
H1	The number of loose hairs collected in the natal cleft
H2	The more or less acuteness of the root end of hair
H3	The kind of hair (tough or silky)
H4	The shape of the hair (straight hair, not curly, is the type liable to insert)
H5	Scaliness of air, more marked in 10–22 y
Force-related factors (F)	
F1	Depth
F2	Narrowness of the natal cleft
F3	Friction movements between the sides of the cleft
Vulnerability-related factors (V)	
V1	Softness
V2	Maceration
V3	Erosions
V4	Splits
V5	Wide pores
V6	Wounds
V7	Scars at the natal cleft

Table is adapted with permission from Karydakis.⁵
PSD = pilonidal sinus disease.

Hair Samples

Terminal hair, defined as thick hairs found on specific body sites, which develops during and after puberty on an increase in androgen levels,^{11,12} was plucked with soft plastic-covered anatomical forceps (see Fig. S1, Supplemental Digital Content 2, <http://links.lww.com/DCR/A312>) from 3 body regions, including the occipital scalp overlying the protuberantia occipitalis externa (POE), the lumbar region glabella sacralis, and the upper third of the intergluteal fold. Plucking was used as a method to ensure harvesting of the entire hair. To avoid any bias in measuring, the pinched part of the hair was cut off. Six hairs at a minimum per region were epilated for testing. Vellus hair,

TABLE 2. Hairiness in a larger population cohort without performance of physical hair tests

No. of regions with hair	Men	Women	Total
Unmatched patients			
<u>with</u> PSD			
1	0	3	3
2	10	1	11
3	18	1	19
Total	28	5	33
Unmatched patients			
<u>without</u> PSD			
1	16	72	88
2	18	25	43
3	54	15	69
Total	88	112	200

Regions of interest were protuberantia occipitalis externa, glabella sacralis, and upper third of intergluteal fold. Patients were stratified according to number of regions with terminal hair present (1, 2, or 3). There was no performance of physical hair tests in these cohorts (cohorts with physical hair tests are shown in Table 3).
PSD = pilonidal sinus disease.

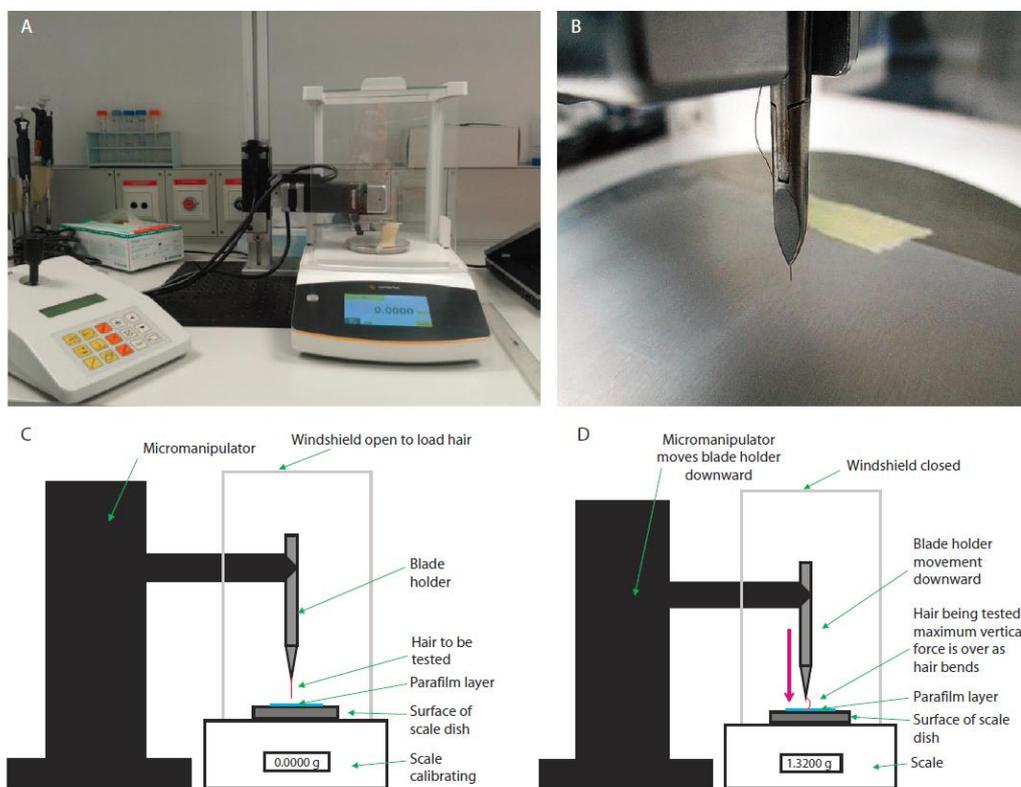


FIGURE 1. Instrumental design to test vertical hair strength, gripped once, tested 6 times per hair shaft. A, The tested hair was driven slowly vertically with an Eppendorf micromanipulator onto the microscale. B, Close-up view of the tested hair, fixed with an eye surgery forceps, with a parafilm layer fixed to the scale surface to prevent slipping. C, Experimental setup of vertical force test with hair ready to be lowered (left), and D, after exerting a maximal vertical force onto the scale at the moment when the hair starts to bend (right).

defined as soft curly white hair <2 mm in length,¹³ was not harvested. Body regions with solely vellus hair or no hair at all were defined as terminally bald. Factors of hair aging¹⁴ or dyeing were not suspected in our PSD population, which was predominantly young and male.

Hair Strength Test

To measure vertical hair strength, a single hair probe (hair root and 1 mm of the hair shaft) was fixed with a micromanipulator (Eppendorf, Hamburg, Germany) and slowly lowered onto the platform of a microscale (Eppendorf). A layer of parafilm was fixed to the scale surface to prevent slippage. Hair strength, expressed as pressure exerted by hair, was calculated as $P = F/A$, where P = pressure, F = force, and $A = \pi \times r^2$ (area of a circle, where r = radius and d = diameter). Figure 1 provides an overview of the procedures described.

Repeated testing of single hairs (≤ 20 times) showed that the vertical strength changed with repetition. Therefore, only results from the first 6 tests per single hair were considered

to be reliable for additional analysis (Fig. 2A). Repeated repositioning (regripping) of the hair within the forceps led to significant measurement bias because of hair contusion and mechanical alteration (Fig. 2B). Therefore, hair was tested without regripping. Wet hair was found to be softer and exhibited diminished vertical force strength, detectable within minutes of wetting (Fig. 2C). Accordingly, all of the hairs were dried passively for 12 hours at room temperature and kept in a dry and vented environment. The strength of hairs did not decay over months when kept between layers of gauze at room temperature under dry conditions after collection (Fig. 2D). Thus, we considered that test results obtained within 2 weeks after hair collection were reliable.

In addition, a larger (unmatched) cohort was studied for the presence of hairs in the 3 body regions without collection of hair for strength testing. A body region, specifically protuberantia occipitalis externa (POE), glabella sacralis (GS), and intergluteal fold (IGF), was defined as hairy if terminal hair was observed (Table 2).

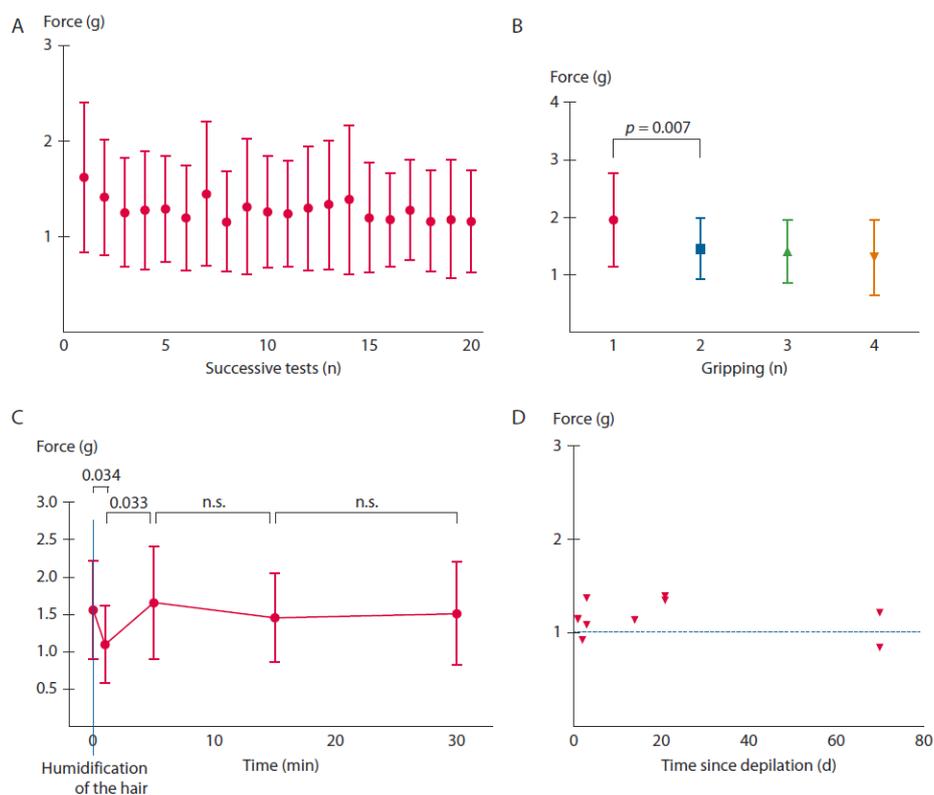


FIGURE 2. A, Hair force and multiple testing (vertical orientation) with dry hair shafts, single first grip; $n = 10$ hairs. B, Hair force and multiple grippings (0.2 cm free length, 0.2 cm from hair follicle; dry vertical testing); $n = 10$ hair shafts. C, Hair force and hair humidification with water. Blue line indicates the time of hair humidification, followed by drying time (x axis). Vertical testing, single first grip, 0.2 cm free hair length, 0.2 cm from follicle; $n = 10$ hair shafts. D, Hair strength and time since depilation; $n = 10$ hair shafts.

To allow short hair fragments to be tested, minimal free hair length (from tip of hair to tip of forceps) for examination was set to 2 mm. Also, if a full hair including the hair follicle was harvested, the follicle was decapitated and discarded at 2 mm. Hair without follicle was tested with the thicker end downward to scale. Pilonidal hair was sometimes found in clusters and sometimes contained dust, dirt, or cell debris. In these cases hair was rinsed with tap water, separated hair by hair, and then counted and dried accordingly.

Data Analysis and Statistics

We used R software (www.r-project.org, Vienna, Austria) for ANOVA testing for intraclass and interclass variation of hair strength. Permutation tests were applied for intraclass variance testing, because this method is more precise than the F test. F tests were performed for estimating interclass variance. After the null hypothesis that each hair had its origin from the place that the experiment claimed, significance for both tests was set as $p < 0.01$.

RESULTS

A single investigator (F.D.B.) performed 12,000 tests of hair strength in this study. The hair of 17 adult patients with PSD (14 men and 3 women) and 217 volunteers (102 men and 115 women) was tested. Hair was present in all 3 of the regions (protuberantia occipitalis, glabella sacralis, and upper third of intergluteal fold) in 11 of 17 patients with PSD and 8 of 17 matched patients without PSD (Table 3). All of the male patients with PSD (14/14) and 11 of 14 matched pair male patients had more than occipital hair. Female patients were less hairy at the glabella sacralis and intergluteal fold compared with men. Table 3 provides an overview of the hairiness among the patients tested.

Concerning hairiness (Table 2), all of the male patients with PSD exhibited terminal hair in at least 2 regions of the dorsal sweat crest, and 64% (18/33) of male patients with PSD had terminal hair present in all 3 of the regions. Among

TABLE 3. Hairiness among 17 patients with PSD and their matched pairs

Regions with hair	Men	Women	Total
Patients with PSD			
1	0	2	2
2	3	1	4
3	11	0	11
Total	14	3	17
Matched patients without PSD			
1	3	3	6
2	3	0	3
3	8	0	8
Total	14	3	17

Regions of interest were protuberantia occipitalis externa, glabella sacralis, and upper third of intergluteal fold. Patients were stratified according to number of regions with terminal hair present (1, 2, or 3). PSD = pilonidal sinus disease.

male non-PSD subjects, 61% (54/88) had terminal hair present in all 3 of the regions, and 13% (15/112) of female non-PSD subjects had terminal hair present in all 3 of the regions.

POE hair of patients with PSD was able to sustain significantly stronger vertical force than POE hair of matched pairs ($p < 0.0001$; t test). We found that hair from the region of the POE, one of the stiffest hair regions, was able to exert a vertical force of >1 g. Taking into account the average diameter of hair at $65 \mu\text{m}$, pressure was $\approx 300 \text{ g/mm}^2$ (30 kg/cm^2). Significantly stronger hair was present in patients with PSD all along the dorsal sweat crest. The hair of the lower back exerted a vertical force of $\approx 0.5 \text{ g}$ per hair. Intergluteal hair was significantly different in patients with PSD than in matched control subjects (Fig. 3). Maximum vertical hair force did not correlate with the number of pori seen in the upper third of the intergluteal fold (Fig. 4).

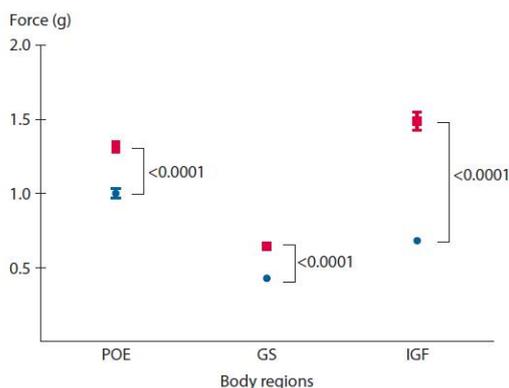


FIGURE 3. Hair from 3 different body regions compared between patients with pilonidal sinus disease (PSD, red squares) and matched control subjects (MP, blue dots); $n = 17$ PSD-MP pairs. POE = protuberantia occipitalis externa; GS = glabella sacralis; IGF = intergluteal fold.

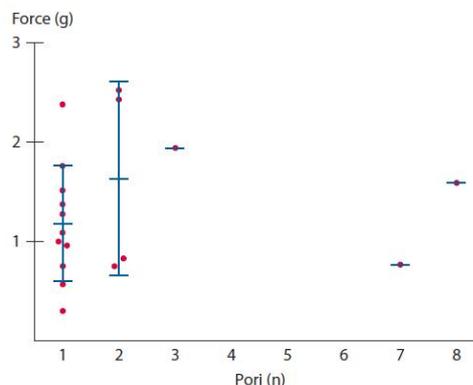


FIGURE 4. Maximal vertical hair force and number of pori in 17 patients with pilonidal sinus disease.

Based on the data, we rejected the null hypothesis and conclude that some occipital hairs must have found their way to the pilonidal region. We found an average of 21 hairs (range, 1–415 hairs) within the sinus of the 17 patients analyzed (Fig. 6). Most of the hairs were fragments with sharp cut ends (Fig. 5). Occipital hair is the likely source of pilonidal sinus generation, especially in patients where there is no lumbar or intergluteal hair, which was true for the 2 female patients in our series and for $>83\%$ of all non-PSD women and 21% of all non-PSD men seen.

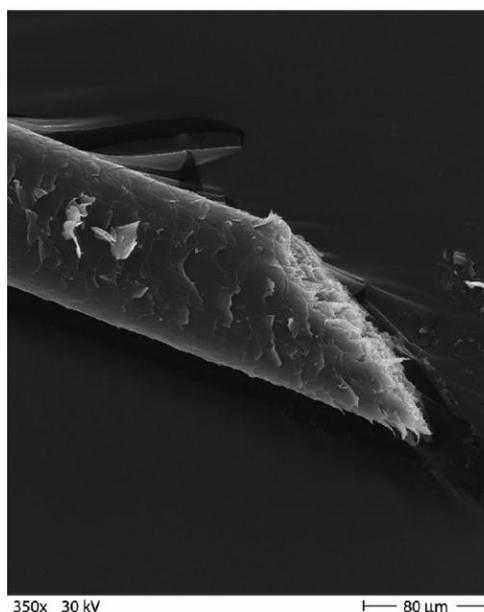


FIGURE 5. Freshly cut terminal hair end, scanning electron microscopy picture.

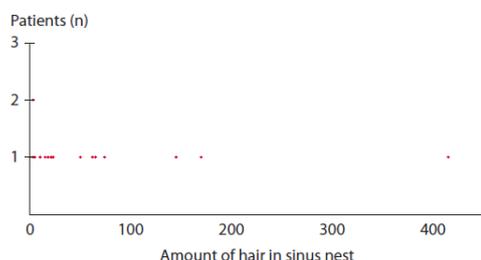


FIGURE 6. Amount of hair intraoperatively found in pilonidal sinus nest.

DISCUSSION

The purpose of this study was to examine PSD patient hair strength as an etiologic factor in PSD, as hypothesized by Karydakís⁵ in 1992. We established a mechanical strength test for single occipital, lumbar, and intergluteal hair to quantify the maximum vertical force that single hairs could exert. Our results show that vertical strength of occipital, lumbar, and intergluteal hair from patients with PSD was significantly greater than hair from their matched pairs.

A limitation of our study lies within the small number of patients who we were able to study. In addition, this study represents a specific cohort of Northern European patients with PSD and matched control subjects. Clearly, the work could be strengthened by including a larger and ethnically more diverse population. Hair characteristics may differ among other ethnically distinct cohorts, which remains to be investigated. Plucking as a harvesting method could potentially stretch the hair. However, given the setting of the study, this theoretical effect would be equal in both the PSD and the control groups. In addition, there is no definitive evidence that the strongest hair found in the sinus was the one that generated the tract and enabled the establishment of the hair nest. In 2 patients we found only 1 stiff hair in the sinus, which was embedded in a large scar. Even if only 1 hair was found, we cannot rule out observer bias, because softer hairs may be difficult to recover from a thick, fibrous tissue block. Scars and infection are present in every sinus, even in clinically inapparent patients.¹⁵ The maximum trajectory force depicts the maximum force that a hair may exert vertically, which will most probably never be reached in the everyday setting in patients with PSD. However, normal intergluteal hair may help to catch and retain occipital hair.¹⁶ If this caught hair has been cut, it will pinch easily into formerly healthy tissue, as described as early as 1946.¹⁷

Traditionally, PSD has been described as an occlusive, hyperkeratinizing follicular disorder along with acne inversa, acne conglobata, and dissecting cellulitis. Bascom² and others suggested that midline pits occur as a result of follicle occlusion, inflammation, and rupture and that loose hairs intrude through already existing pits; therefore, locoregional depilation has been promoted.^{18–21} However, the evi-

dence is not encouraging.^{22,23} Moderate sweating prevents hair fragments from sliding down,²⁴ which explains the suspected but never proven weak link between obesity and PSD incidence.^{25–27} A wide intergluteal fold is advantageous, whereas a narrow steep fold retains more hair.¹⁶ Local cutaneous fat thickness in patients with PSD appears to add to hair retention, but the mechanism is not fully understood.²⁵ Hair is generally caught at the upper end of the intergluteal fold, because most sinuses are typically present there. Cut hair is only occasionally caught below the upper third of the intergluteal fold, where it may give rise to pilonidal sinus in hairless areas, such as the anal canal.²⁸

The idea that upper back crest and head hair is the source of an intergluteal puncture sinus is not new.²⁹ Hair from the neck or the skin over the back will find its way to the same region,³⁰ where stiffer and sharp hair chisels itself into the skin.³¹ Lord³² has found head hair in a sinus nest of greater length than the patients' own hair, concluding that foreign hair may trigger a sinus. "Very short stiff hairs as the fragments to which barbers are exposed³³" can puncture intact skin. Every haircut client is exposed, especially young men who regularly renew their short haircut. This may be a reason why PSD commonly occurs within military cohorts worldwide.^{34,35}

We found that the strongest hairs in the sinus were predominantly of occipital origin. Because large numbers of short hair fragments (from haircut, showing freshly cut sharp ends) were found in the sinus, we postulate that PSD is likely generated by occipital hair. Undoubtedly, there is a mechanical aspect in sinus pathogenesis related to the intruder or arrow injection of hair into the skin, which suggests cofactors that might enable easier injection, including softer skin, or skin macerated through a steeper anal cleft and continuous sweating. Akinci et al¹⁶ have shown that a deeper natal cleft predisposes to PSD, which may enable the full erection of cut hair (hair parallel to the skin will not be able to pierce the surface, but perpendicularly upright hair may).

There would be no PSD in bald persons if the theory by Karydakís⁵ was fully correct. Thus, both occlusive follicular disease and the Karydakís theory⁵ can explain PSD pathogenesis. A combined pathogenesis with occipital hairs perforating intergluteal skin at multiple sites is possible. However, the Karydakís⁵ theory does not fully explain why and how multiple midline pits occur at the beginning of the disease, whereas the hyperkeratinization theory does. However, most tracts point cranially, because the hair nests are situated cranial to the pori as well. Although the sacrococcygeal angle does not seem to influence sinus incidence,³⁶ Akinci et al¹⁶ showed that patients with PSD have deeper natal clefts than a control group. It has been shown that BMI does not impact PSD incidence,³⁷ and bigger thickness of sacrococcygeal fat has been associated with PSD.²⁵ In any case, as Eryilmaz et al³⁶ point out, the hair approaches the intergluteal fold from the head, not from the perineal side. Assuming

PSD as a disease promoted by fragments from cut hair, the following measures may help prevent PSD: 1) reducing the production of hair fragments (which are especially prevalent with machine cut), 2) removing cut hair along the dorsal sweat crest, 3) reducing contact time of capital hair within the intergluteal fold, 4) preventing erection and injection of cut hair within the intergluteal fold, and 5) protecting skin at risk with shielding or hardening substances. Specifically, we suggest that clinicians recommend to patients at risk to promptly take an extensive shower after a haircut. Although laser epilation has not been proven to decrease recurrent PSD yet,³⁸ it certainly enables a shorter contact time of hair derived from other locations⁴ and can be recommended to patients at risk.

CONCLUSION

Occipital and intergluteal hair appear to be of increased stiffness in patients with PSD, which might enable easier puncture and sinus generation. If occipital hair slides down the dorsal sweat crest and is erected intragluteally, it may exert a strong local force onto the skin. Occipital hair may be caught intragluteally significantly more often in individuals predisposed to PSD, because patients with PSD present with significantly more hair at this location. The number of loose hairs collected in the natal cleft (Karydakias factor H1), the kind of hair (Karydakias factor H3), and the shape of the hair (Karydakias factor H4) appear to be risk factors in PSD generation. Because occipital hair exerts the strongest force, and because cut hair fragments are found in the pilonidal nest in large quantities, our data suggest that PSD could be promoted by occipital hair. Certainly, other factors described by Karydakias⁵ keep the justification in the pathogenesis of PSD.

REFERENCES

- Doll D, Matevosian E, Wietelmann K, Evers T, Kriner M, Petersen S. Family history of pilonidal sinus predisposes to earlier onset of disease and a 50% long-term recurrence rate. *Dis Colon Rectum*. 2009;52:1610–1615.
- Bascom J. Pilonidal disease: long-term results of follicle removal. *Dis Colon Rectum*. 1983;26:800–807.
- Doll D, Stauffer VK, Luedi MM. Intra-anal pilonidal sinus disease: a unique diagnosis possibly pointing to the occiput. *ANZ J Surg*. 2016;86:622.
- Doll D, Luedi MM. Laser may reduce recurrence rate in pilonidal sinus disease by reducing captured occipital hair. *Lasers Med Sci*. In press.
- Karydakias GE. Easy and successful treatment of pilonidal sinus after explanation of its causative process. *Aust N Z J Surg*. 1992;62:385–389.
- Stirnemann H, Blasimann B. Is preventive epilation following sacral dermoid operation useful or ineffective [in German]? *Chirurg*. 1983;54:548–549.
- Petersen S, Wietelmann K, Evers T, Hüser N, Matevosian E, Doll D. Long-term effects of postoperative razor epilation in pilonidal sinus disease. *Dis Colon Rectum*. 2009;52:131–134.
- Goldman B. Combined therapy for pilonidal (sacrococcygeal) cyst and sinus; roentgen epilation of operative field prior to surgical excision with primary closure. *J Int Coll Surg*. 1952;18:903–909.
- Khan MA, Javed AA, Govindan KS, et al. Control of hair growth using long-pulsed alexandrite laser is an efficient and cost effective therapy for patients suffering from recurrent pilonidal disease. *Lasers Med Sci*. 2016;31:857–862.
- Doll DH, Luedi MM, Wieferrich K, van der Zypen D, Maak M, Glanemann M. Stop insulting the patient: neither incidence nor recurrence in pilonidal sinus disease is linked to personal hygiene. *PSJ*. 2015;1:11–18.
- Marks J, Miller JJ, Lookingbill D. *Principles of Dermatology. Lookingbill and Marks Principles of Dermatology. 4th ed.* Philadelphia, PA: Saunders Elsevier 2006:3–50.
- Rosenfield RL. Clinical practice: hirsutism. *N Engl J Med*. 2005;353:2578–2588.
- Marks JGM, Jeffrey J. *Lookingbill and Marks' Principles of Dermatology.* New York, NY: Elsevier; 2013.
- Robbins RR. *Chemical and Physical Behavior of Human Hair. 5th ed.* New York, NY: Springer; 2012.
- Doll D, Friederichs J, Boulesteix AL, Düsel W, Fend F, Petersen S. Surgery for asymptomatic pilonidal sinus disease. *Int J Colorectal Dis*. 2008;23:839–844.
- Akinci OF, Kurt M, Terzi A, Atak I, Subasi IE, Akbilgic O. Natal cleft deeper in patients with pilonidal sinus: implications for choice of surgical procedure. *Dis Colon Rectum*. 2009;52:1000–1002.
- Patey DH, Scarff RW. Pathology of postanal pilonidal sinus; its bearing on treatment. *Lancet*. 1946;2:484–486.
- Conroy FJ, Kandamany N, Mahaffey PJ. Laser depilation and hygiene: preventing recurrent pilonidal sinus disease. *J Plast Reconstr Aesthet Surg*. 2008;61:1069–1072.
- García C, Ibañez N, Abrisqueta J. Laser epilation prior to pilonidal sinus surgery. *Lasers Med Sci*. 2015;30:2401–2402.
- Ghannam WM, Hafez DM. Laser hair removal as adjunct to surgery for pilonidal sinus: our initial experience. *J Cutan Aesthet Surg*. 2011;4:192–195.
- Girgin M, Kanat BH, Ayten R, et al. Minimally invasive treatment of pilonidal disease: crystallized phenol and laser depilation. *Int Surg*. 2012;97:288–292.
- Badawy EA, Kanawati MN. Effect of hair removal by Nd:YAG laser on the recurrence of pilonidal sinus. *J Eur Acad Dermatol Venerol*. 2009;23:883–886.
- Odili J, Gault D. Laser depilation of the natal cleft—an aid to healing the pilonidal sinus. *Ann R Coll Surg Engl*. 2002;84:29–32.
- KLASS AA. The so-called pilo-nidal sinus. *Can Med Assoc J*. 1956;75:737–742.
- Balik O, Balik AA, Polat KY, et al. The importance of local subcutaneous fat thickness in pilonidal disease. *Dis Colon Rectum*. 2006;49:1755–1757.
- Cubukçu A, Carkman S, Gönüllü NN, Alponat A, Kayabaşı B, Eyüboğlu E. Lack of evidence that obesity is a cause of pilonidal sinus disease. *Eur J Surg*. 2001;167:297–298.

27. Arda IS, Güney LH, Sevmiş S, Hiçsönmez A. High body mass index as a possible risk factor for pilonidal sinus disease in adolescents. *World J Surg.* 2005;29:469–471.
28. Weston SD, Schlachter IS. Pilonidal cyst of the anal canal: case report. *Dis Colon Rectum.* 1963;6:139–141.
29. Patey D. Pilonidal sinus: a postscript. *Lancet.* 1971;1:245.
30. Hueston JT. The aetiology of pilonidal sinuses. *Br J Surg.* 1953;41:307–311.
31. Weale FE. A comparison of barber's and postanal pilonidal sinuses. *Br J Surg.* 1964;51:513–516.
32. Lord PH. Unusual case of pilonidal sinus. *Proc R Soc Med.* 1970;63:967–968.
33. Brearley R. Pilonidal sinus; a new theory of origin. *Br J Surg.* 1955;43:62–68.
34. Akinci OF, Bozer M, Uzunköy A, Düzgün SA, Coşkun A. Incidence and aetiological factors in pilonidal sinus among Turkish soldiers. *Eur J Surg.* 1999;165:339–342.
35. Evers T, Doll D, Matevossian E, et al. Trends in incidence and long-term recurrence rate of pilonidal sinus disease and analysis of associated influencing factors [in Chinese]. *Zhonghua Wai Ke Za Zhi.* 2011;49:799–803.
36. Eryılmaz R, Isik A, Okan I, Bilecik T, Yekeler E, Sahin M. Does sacrococcygeal angle play a role on pilonidal sinus etiology? *Prague Med Rep.* 2015;116:219–224.
37. Sievert H, Evers T, Matevossian E, Hoenemann C, Hoffmann S, Doll D. The influence of lifestyle (smoking and body mass index) on wound healing and long-term recurrence rate in 534 primary pilonidal sinus patients. *Int J Colorectal Dis.* 2013;28:1555–1562.
38. Demircan F, Akbulut S, Yavuz R, Agtas H, Karabulut K, Yagmur Y. The effect of laser epilation on recurrence and satisfaction in patients with sacrococcygeal pilonidal disease: a prospective randomized controlled trial. *Int J Clin Exp Med.* 2015;8:2929–2933.

