

2/2025 April

C 14118

derm

Praktische Dermatologie



omnimed
www.omnimedonline.de

Ein Überblick über 25 Jahre: KI-gestützte Haaranalyse mittels »Deep Learning« – jetzt ohne Färben

Rolf Hoffmann, Ulf Ellwanger, Holger Lüdtko

Zusammenfassung

Die Haarforschung und -diagnostik hat in den vergangenen Jahren erhebliche Fortschritte erzielt, insbesondere in der präzisen und zuverlässigen Erfassung des Haarwachstums. TrichoScan® nutzt in der neuesten Softwareversion 5.0 Deep-Learning-Algorithmen, um die Genauigkeit und Effizienz der Haarerkennung signifikant zu verbessern. Der entscheidende Fortschritt besteht darin, dass das bislang erforderliche Färben der Haare für eine präzise Messung nicht mehr notwendig ist. Dies macht die Methode schneller, weniger invasiv und damit deutlich benutzerfreundlicher.

Schlüsselwörter

Trichoskopie, Haardichtemessung.

Summary

Hair research and diagnostics have made significant progress in recent years, particularly in the precise and reliable recording of hair growth. TrichoScan® now uses deep learning algorithms in the latest software version 5.0 to significantly improve the accuracy and efficiency of hair detection. What is particularly noteworthy is that the previously required coloring of the hair is no longer necessary for precise measurements. This represents a significant step towards a more user-friendly, much faster and less invasive method.

Keywords

Trichoscopy, Hair density.

Einleitung

Dünn werdendes Haar (Miniaturisierung), vermehrter Haarausfall (Effluvium) und Haarlosigkeit (Alopezie) sind häufig geschilderte Probleme in der ärztlichen Praxis. Mit wenigen Ausnahmen lassen sich Haarerkrankungen klinisch leicht erkennen und erfordern keine weiterführende Diagnostik. Oftmals zeigt sich jedoch, dass ein beschriebenes Haarproblem objektiv kaum nachvollziehbar oder der Erfolg beziehungsweise Misserfolg einer Therapie nur bedingt objektiv bewertet werden kann. Vor 25 Jahren standen lediglich der klinische Zupfstest und das Trichogramm als etablierte Methoden zur Verfügung, deren Genauigkeit und Aussage-

kraft jedoch eng begrenzt waren. Daher stellten wir bereits vor 25 Jahren die klassische Auflichtmikroskopie in Kombination mit einer Auswertesoftware vor und nannten dieses Verfahren in Anlehnung an das Trichogramm »TrichoScan« (1).

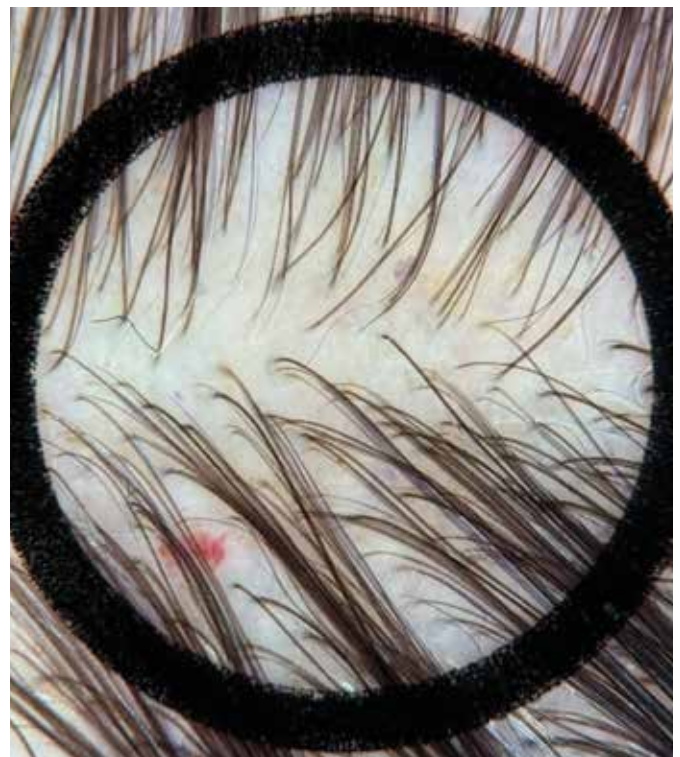


Abb. 1: Unrasiertes Areal mit sich überlappenden Haaren

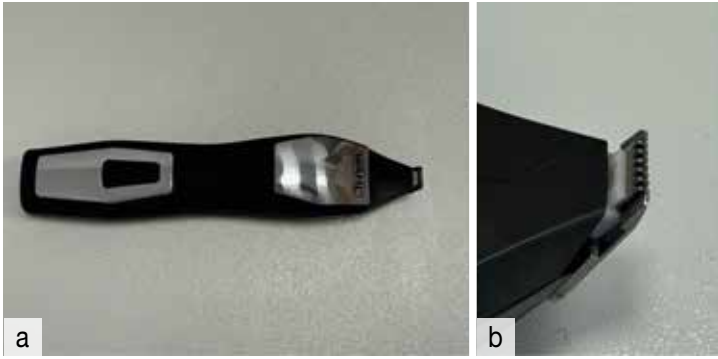


Abb. 2a und b: Kurzhaartrimmer (z.B. WAHL) mit schmalem Aufsatz

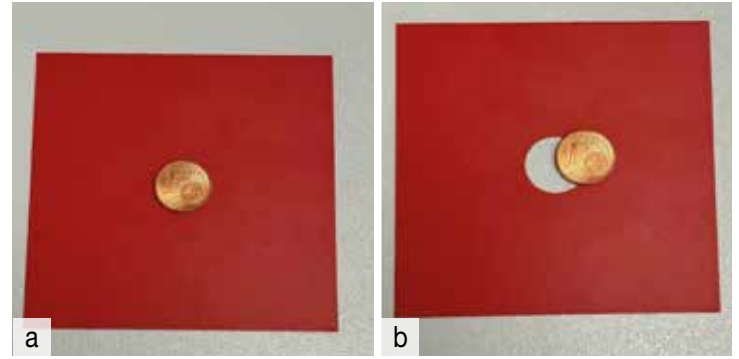


Abb. 3a und b: Rasurmaske als Vorlage für die minimal notwendige Rasurfläche

Damit waren wir weltweit die Ersten, die ein automatisiertes Haarmessverfahren anboten. Dieser Übersichtsartikel beschreibt die Weiterentwicklung dieser Methode bis hin zur Integration von »Deep Learning«.

Technische Aspekte

Dermatoskopie versus Makroaufnahme

Entgegen der Annahme, dass jede hochauflösende Nahaufnahme Haare zuverlässig darstellen kann, ist dies nur bei der Dermatoskopie der Fall. Diese Methode definiert den Abstand der Kopfhaut zum Objektiv durch eine Kontaktplatte. Mithilfe einer alkoholischen Lösung (z.B. Kodan®-Spray) und polarisiertem Licht entstehen so kontrastreiche Bilder.

Nach dem Rasieren des Messareals werden die Haarstopfeln durch die Kontaktplatte in eine Ebene flachgedrückt, nur so können Haarlänge und Haardurchmesser korrekt vermessen werden. Ohne diese Prozedur stehen Haare in jedem Winkel von der Kopfhaut ab und sind daher bei einer Betrachtung von oben nicht komplett sichtbar. Daher ist ein dermatoskopisches Bild unverzichtbar.

Messparameter

Es sind viele Haarparameter messbar, doch nur wenige haben wirklich eine klinische Bedeutung. Bereits in unserer Erstpublikation führten wir die kumulierte Haardicke als Synonym der Haarmenge als den empfindlichsten Parameter zur Beurteilung eines Therapieeffekts ein. Dieser Wert summiert den Durchmesser jedes gemessenen Haars zu einer Gesamtdicke, der Haarmenge. Zusätzlich lassen sich die Dichte von Gesamt-, Vellus- und Terminalhaaren sowie weitere Parameter bestimmen. Da der Messort und das Ausmaß des Haarverlusts individuell variieren, gibt es keine Standardwerte für ein Messareal, weshalb der Haarscan kein diagnostisches Verfahren ist, sondern der Verlaufsbeobachtung dient.

Wir unterscheiden Anagen-, Telogen- und Katagenhaare. Während Anagenhaare etwa 0,3 mm pro Tag wachsen, sta-

gnieren Telogen- und Katagenhaare. In unserer Erstpublikation beschrieben wir, dass auch die Haarlänge gemessen werden kann, um Unterschiede der Haarlängen zwei Tage nach einer gleichmäßigen Rasur festzustellen. Aus diesem Unterschied berechnet die Software als statistische Annäherung ein digitales Trichogramm, in dem Anagenhaare in der erwarteten Länge wachsen und Telo- beziehungsweise Katagenhaare nicht. Auch die Bestimmung folliculärer Einheiten und die Anzahl der Haare pro Einheit wäre möglich, jedoch hat dies wenig klinische Relevanz und erscheint daher nicht als Ausgabeparameter. Vielmehr geben wir Vellushaare als solche mit einer Dicke bis zu 40 µm an, sowie Terminalhaare als Haare dicker als 40 µm. Im englischen Sprachraum wird 30 µm als Grenze gesetzt.

Rasierte versus unrasierte Messstellen

Die Vorstellung, eine Kamera einfach auf die Haut aufzusetzen, um Haare direkt zu vermessen, erscheint auf den ersten Blick plausibel. Bei näherer Betrachtung hat dieses Vorgehen jedoch deutliche Grenzen. In einem Messareal mit geringer Haardichte, wie etwa bei fortgeschrittener androgenetischer Alopezie oder bei einzeln stehenden Haaren (z. B. Körperhaaren), ist dies gut möglich. Möchte man jedoch am Oberkopf messen, müssen die Haare exakt gescheitelt werden. Je weiter sich der Messort vom Scheitel entfernt, desto mehr kreuzen beziehungsweise überlappen sich die Haare, was das eigentliche Messfeld stark einschränkt (Abb. 1).

Auch wenn es trivial klingt, ist ein exakt gerader Scheitel, besonders bei welligem Haar, schwer oder nur mit viel Zeitaufwand realisierbar. Daher empfehlen wir eine kleine Rasurstelle mit einem Trimmer, der etwa 0,5 mm lange Haarstopfeln belässt (Abb. 2).

Nach der Rasur sollte die Gesamterscheinung nicht beeinträchtigt werden, weshalb Stellen ausgewählt werden sollten, die nach der Rasur klinisch unauffällig bleiben. Ungeeignet sind die Scheitelmittle oder der Mittelpunkt eines Haarwirbels. Optimal sind Bereiche mit sichtbarer Haarlichtung, aber etwa ein bis zwei Fingerbreiten neben dem Scheitel oder direkt an der Stirn-Haargrenze, damit benachbarte Haare



Abb. 4a und b: In der Regel ist die kleine Rasurstelle wieder überkämmbbar und daher klinisch unbedeutsam

über die rasurbedingte Kahlstelle (ca. 1-Eurocent-Größe), (Abb. 3) gekämmt werden können.

Messfläche

Da für die Messung eine Rasur erforderlich ist, sollte die Fläche möglichst klein gehalten werden, damit die Patienten der Prozedur zustimmen (Abb. 4).

Haarfärbung versus KI-gestützte Analyse

Traditionell erforderte die präzise Messung des Haarwachstums eine recht aufwendige Vorbereitung. Um die Haare klar sichtbar zu machen und die Haardichte zuverlässig zu messen, mussten die Haare gefärbt werden, insbesondere bei Patienten mit helleren oder grauen Haaren. Das Färben verursachte nicht nur zusätzlichen Aufwand, sondern führte auch zu potenziellen Unannehmlichkeiten für die Patienten. Daher war das Färben für viele Anwender ein Hindernis und Haarfärbereste führten mitunter zu Artefakten (Abb. 5) und damit zu nicht auswertbaren Bildern.

Schon seit 2005 versuchten wir, durch andere Farbspektren Haare auch ohne Färbung besser sichtbar zu machen. Der Durchbruch gelang uns jedoch erst jetzt mit den neuen Mög-



Abb. 5: Farbreste im Bild führen zu Messartefakten und entsprechende Bilder sind nicht auswertbar

lichkeiten der KI. TrichoScan® 5.0 nutzt nun »Deep-Learning«, um die Erkennung der Haare auch ohne Färbung zu ermöglichen. Diese Algorithmen, die auf neuronalen Netzwerken basieren, sind in der Lage, komplexe Muster in den Bilddaten zu erkennen und zuverlässig zwischen Haarfollikeln und Haut zu unterscheiden. Durch das Training auf umfangreichen Datensätzen konnte die Software lernen, Haare



Abb. 6: KI-unterstütztes digitales Trichogramm bei androgenetischer Alopezie mit deutlicher Miniaturisierung. Grün sind Anagenhaare, rot nicht wachsende Telogen/Katagenhaare. Gelb sind Haare, die den Messrand erreichen. Da vereinfacht etwa gleich viel Haare von außen in das Messfeld ragen wie Haare das Messfeld verlassen, werden diese Randhaare für die Haardichte zur Hälfte gezählt. Für die Messung des Haarwachstums werden die Haarlängen bestimmt. Randhaare werden über statistische Verfahren (Produkt-Limit-Schätzung) dabei ebenfalls berücksichtigt

in verschiedensten Farben und Dichten sicher zu identifizieren (Abb. 6).

In der Anwendung bedeutet dies, dass zur Durchführung einer Messung nur noch das Kürzen der Haare erforderlich ist, um eine klare Sicht auf die Kopfhaut zu gewährleisten. Die »Deep-Learning«-Technologie übernimmt dann die präzise Analyse und Messung der Haare, ohne dass eine Färbung notwendig ist. Dies spart Zeit und macht den Prozess für Patienten und Anwender angenehmer und weniger aufwendig.

Die Implementierung von »Deep Learning« bringt mehrere Vorteile mit sich: Neben der Beseitigung des Färbeprozesses kann die Messung nun schneller und präziser durchgeführt werden. Dadurch wird die Effizienz erhöht und die Zuverlässigkeit der Ergebnisse verbessert. Zudem hat die neue Technologie das Potenzial, in der klinischen Praxis breiter eingesetzt zu werden, da der geringere Aufwand und die ein-

fache Handhabung den Einsatz auch in weniger spezialisierten Umgebungen erleichtern und zu einer stärkeren Verbreitung der Haarmessung als Forschungswerkzeug führen könnte.

Vergleich: TrichoScan® 4.0 (gefärbt) versus TrichoScan® 5.0 (ungefärbt)

Bei der Einführung einer neuen Messmethode ist ein Vergleich mit dem Vorgänger naheliegend. Daher haben wir bereits veröffentlichte Studiendaten zu gefärbten Haaren (2) mit neuen Studiendaten zu ungefärbten Haaren gegenübergestellt. Beide Studien untersuchten den Effekt einer Minoxidil-Haartinktur im Vergleich zu einer Placebo-Kontrollgruppe.

In beiden Untersuchungen konnte ein signifikanter Anstieg der Haarmasse (»Cumulative Hair Thickness Density «

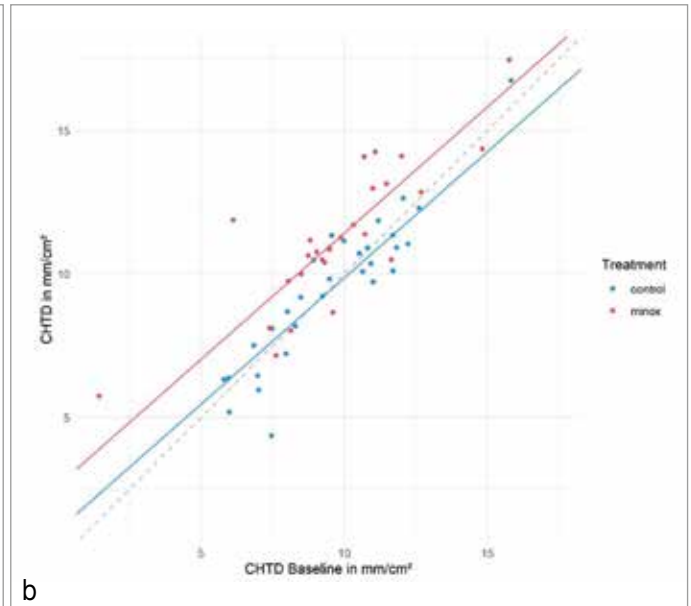
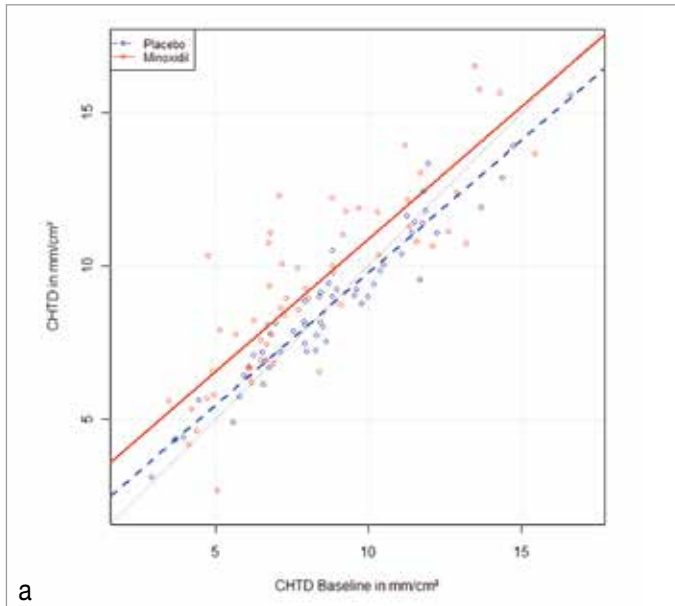


Abb. 7 a und b: Ergebnis der ANCOVA für a) die Studie mit TrichoScan® 4.0 (gefärbt) und b) der Auswertung von Bildern mit ungefärbten Haaren mit TrichoScan® 5.0. In beiden Untersuchungen konnte eine deutliche Erhöhung (Lage der roten Linie im Vergleich zur blauen Linie) der Haarmasse unter Minoxidil nachgewiesen werden

[CHTD] kumulierte Haardicke pro Fläche) wie erwartet nachgewiesen werden (Abb. 7a u. b). Zur statistischen Auswertung wurde jeweils eine Kovarianzanalyse (»Analysis Of Covariance« [ANCOVA]) mit den Baseline-Werten als Kovariable berechnet.

Größe des Messareals

Interessant ist natürlich die notwendige Größe des Messareals. Dazu hatten wir berechnet, wie groß ein Messareal sein muss, um einen therapeutischen Effekt einer Minoxidil-Haartinktur zuverlässig detektieren zu können (3). Dies war bereits bei einer Fläche von 0,06 cm² der Fall. Ab einer Fläche von etwa 0,5 cm² konnte durch Vergrößerung der Fläche kein statistisch deutlicheres Ergebnis mehr erzielt werden (Abb. 8). Der Grund hierfür ist, dass die Variabilität der Probanden ab einer Fläche von circa 0,5 cm² deutlich größer ist als die Variabilität der Messung. Davor verringert sich die Anzahl der benötigten Probanden mit zunehmender Messfläche, da bei größeren Flächen die Stichprobe und damit die Anzahl der gemessenen Haare größer wird. Auf dieser Basis haben wir das Messareal auf 0,5–1,0 cm² festgelegt. Methodisch wurde für verschiedene Flächen jeweils eine ANCOVA berechnet. In Abbildung 8 sind dann die Residuen der statistischen Analyse gegen die Analysefläche abgetragen. Diese Ergebnisse lassen sich sehr gut durch eine verschobene Hyperbel modellieren. Für große Flächen strebt die Funktion gegen einen Grenzwert, der durch die Variabilität der Probanden gegeben ist. In den neuen Daten liegt diese mit 1,25 etwas höher als in der früheren Untersuchung mit 1,06.

Für eine Studie entscheidend ist die Anzahl der benötigten Studienteilnehmer. Diese ergibt sich zum einen aus der ge-

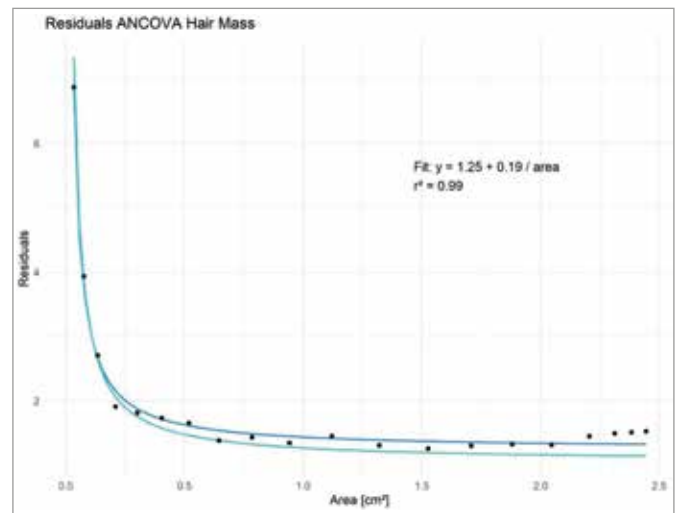


Abb. 8: Residuen der statistischen Analyse der Auswertung für verschiedene Messflächen der Studie mit TrichoScan 4.0 (hellblau) und TrichoScan 5.0 (dunkelblau). Die Asymptote verdeutlicht die Variabilität der Probanden und liegt mit der neuen Methode etwas höher

schätzten Variabilität der Probanden und der Messung, zum anderen aus dem zu erwartenden Effekt. Da der Effekt von Minoxidil mit der neuen Auswertung größer ist, ergibt sich trotz der etwas höheren Variabilität eine kleinere geschätzte Fallzahl (Abb 9a und b). Aus beiden Diagrammen geht hervor, dass eine Messfläche von 1,0 cm² ausreichend ist.

Wie präzise muss das Messareal übereinstimmen?

Um einen Therapieeffekt festzustellen, sollte dasselbe Messfeld verwendet werden. War das Messareal zuvor rasiert, so

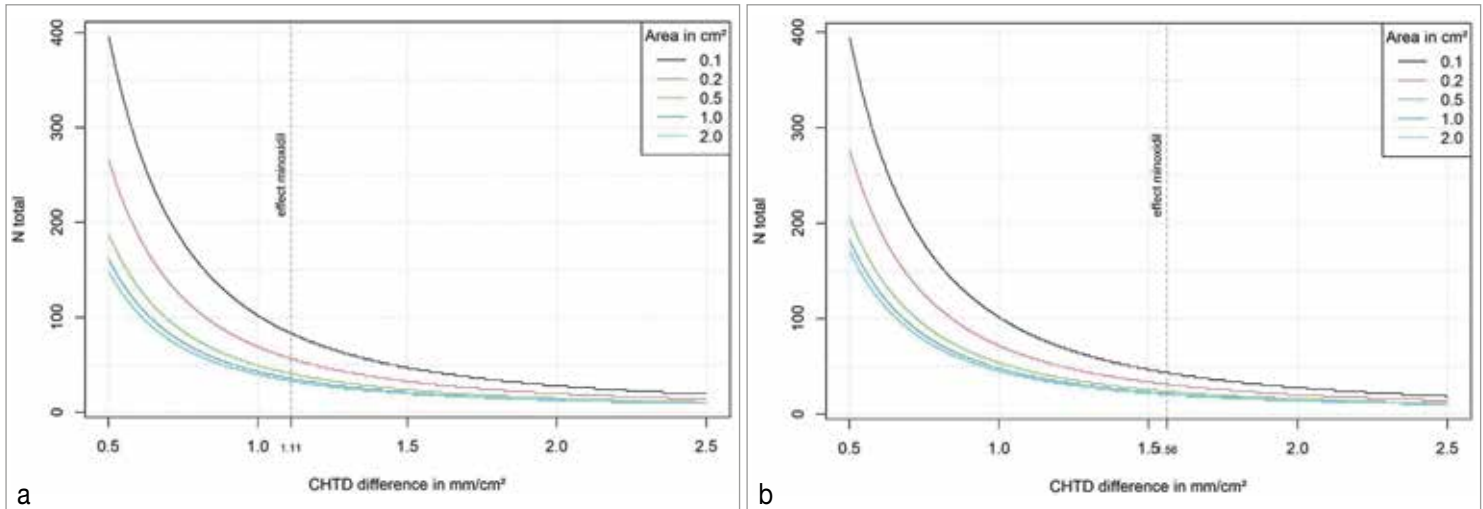


Abb. 9a und b: a) Fallzahlschätzung für verschieden große Messareale und den nachzuweisenden Effekt der Haarmasse (»Cumulative Hair Thickness Density« [CHTD]). In der früheren Studie mit gefärbten Haar und der TrichoScan® 4.0 betrug der Minoxidil-Effekt 1,11 mm/cm². Aus dem Diagramm ist ersichtlich, dass eine Fläche von 1,0 cm² ausreichend ist. b) Entsprechende Fallzahlschätzung für TrichoScan® 5.0-Untersuchung. Der Minoxidil-Effekt war hier mit 1,56 mm/cm² etwas größer. Dies führt letztendlich zu etwas kleineren notwendigen Fallzahlen. Auch hier ist ersichtlich, dass eine Messfläche von 1,0 cm² ausreichend ist

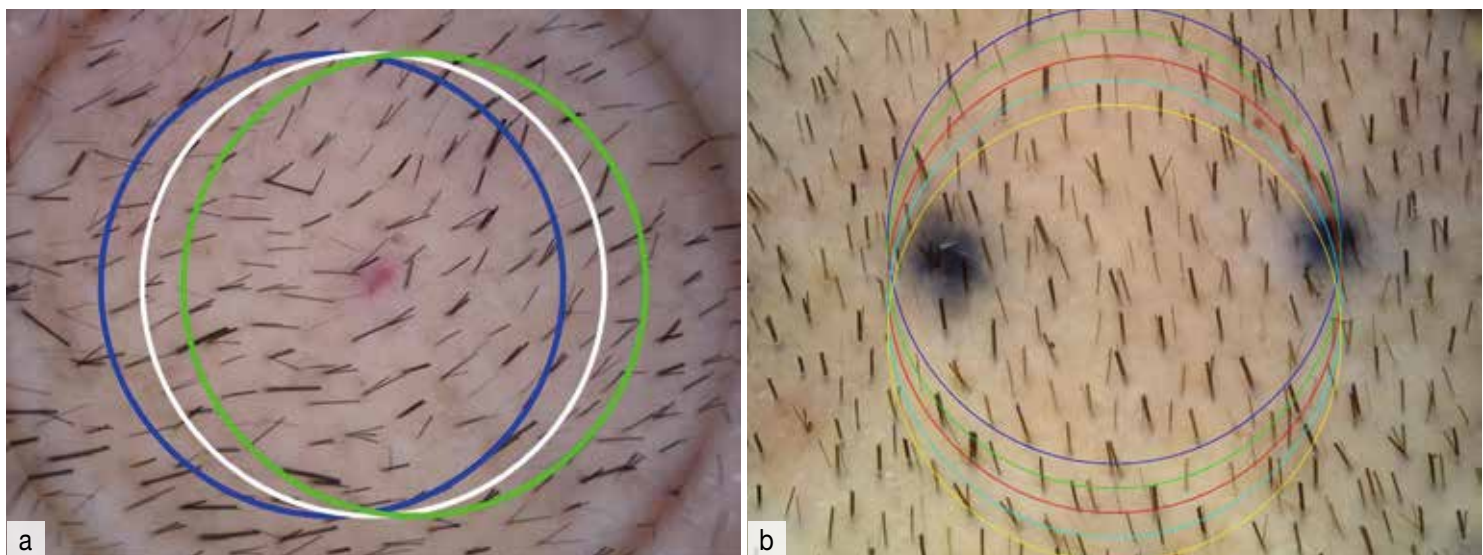


Abb. 10a und b: a) Verschiebung des Messareals in der früheren Studie und b) in der aktuellen Untersuchung. In b) ist die maximale Verschiebung etwas mehr als 20 % der Messfläche

wird bei längeren Haaren ein kurzer Haarschopf sichtbar sein, der als Indikator für das ursprüngliche Messfeld dient. Das ist jedoch nur eine grobe Orientierung und speziell für klinische Studien unzureichend. Zuletzt wurde über eine Haar-zu-Haar-Technologie (HzHT) berichtet (4), die das Vermessen desselben Areals mit exakt denselben Haaren ermöglicht. Doch ist das nötig? Jede Therapie wirkt flächig, und ein Messareal muss repräsentativ für die behandelte Fläche sein. Die HzHT ist technologisch zwar elegant, aber zeitaufwendig und aus unserer Sicht nicht zielführend. Schon 2014 untersuchten wir, wie sich das Verschieben des Messfelds auf das Messergebnis auswirkt. Wir berechneten, wie sich die Ergebnisse unterscheiden, wenn das Tattoo im Zentrum, links oder rechts im Bild liegt (Abb. 10). Letztlich war statistisch kein

Unterschied messbar, und ein Minoxidil-Effekt war in jedem Szenario nachweisbar. Das resultiert aus der deutlich größeren Variabilität der Probanden im Vergleich zur zusätzlichen Variabilität durch Aufnahmen von etwas versetzten Stellen. Unsere Empfehlung ist daher ein kleines rotes Tattoo im Zentrum der Messstelle. Diese Tattoos sind klinisch unauffällig, kleiner als ein Hämangiom und bei Bedarf leicht zu erneuern. Sterile Einzeltattooanadeln und sichere rote Tattoofarbe sind im Fachhandel erhältlich. Die gleiche Berechnung haben wir nun mit der 5.0-Version mit ungefärbten Haaren und sogar ohne zentrales Tattoo durchgeführt. Beide Untersuchungen zeigen das gleiche Ergebnis, nämlich dass es selbst bei circa 20 % Verschiebung der Messfläche keine relevanten Unterschiede in den Ergebnissen gibt (Abb 10a u. b sowie Abb. 11).

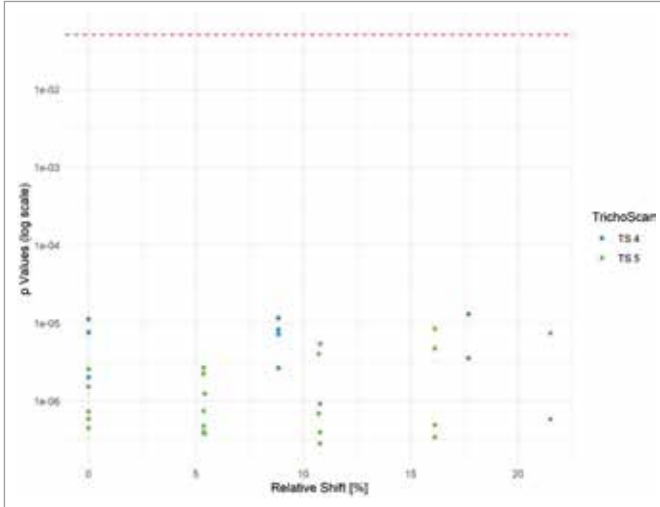


Abb. 11: Einfluss der Überlappung des Messareals auf das statistische Ergebnis. Die gestrichelte rote Linie zeigt das typische Signifikanzniveau 0,05. Für die beiden Auswertungen TrichoScan® 4.0 (blaue Punkte) und TrichoScan® 5.0 (grüne Punkte) sind die p-Werte für den Unterschied der Minoxidil- zur Kontrollgruppe dargestellt. Da die Berechnungen an unterschiedlichen Daten und auch mit unterschiedlichen Fallzahlen durchgeführt worden sind, sind die dargestellten p-Werte nur innerhalb der jeweiligen Studien vergleichbar. In beiden Studien kann innerhalb des gezeigten Versatzes keine Verschlechterung der Studienergebnisse erkannt werden

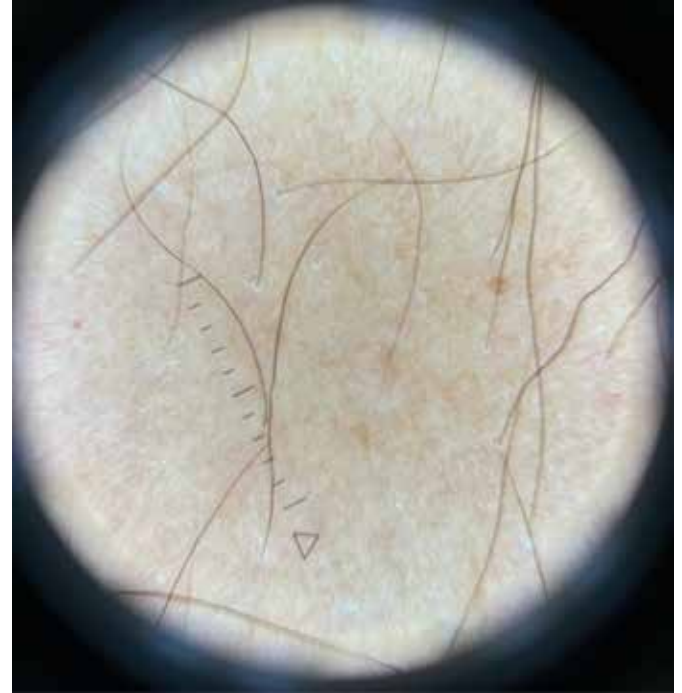


Abb. 12: Mit einem größeren Messfeld lassen sich gekürzte Körperhaare gut erkennen

Datenbank und Bildverarbeitung

Für die nachfolgende Auswertung ist die Bildverwaltung in einer validierten Bilddatenbank entscheidend. Diese kann traditionell vor Ort auf einem eigenen PC erfolgen, verbunden mit einer Kamera wie der Dino-Lite per USB oder Skin-DOC der Firma DermaMedicalSystems.

Flexibler und ortsunabhängig erfolgt die Bildaufnahme mit einem HEINE Delta 30 Dermatoskop zusammen mit einem Handy-Adapter und einem aktuellen Smartphone. Die Bilder werden einfach über einen personalisierten HEINE DerManager-Account in eine Cloud hochgeladen, wo die Scan-Auswertung erfolgt. Innerhalb weniger Sekunden erscheint das Ergebnis auf dem eigenen Smartphone. Die Hardwareanforderungen sind minimal, da häufig ohnehin ein Delta30 Dermatoskop verwendet wird. Nur eine TrichoScan-adaptierte Kontaktplatte (Abb. 14) ist zusätzlich notwendig.



Abb. 13: Kleines Messfeld für die direkte Auswertung von Haardichten

Weitere Anwendungen

Ohne die Notwendigkeit einer Haarfärbung sind weitere Anwendungen denkbar. Mit einer anderen HEINE Delta-30-Kontaktplatte lassen sich auch größere Areale einsehen, was die Vermessung von Arealen mit geringer Haardichte ermöglicht. Dies könnte zum Beispiel bei der Laserepilation von Körperhaaren genutzt werden (Abb. 12). Wie weiter oben bereits erwähnt, ist aus unserer Sicht eine Rasur die beste Methode, um eine Messstelle am Kopf vorzubereiten. Den-

noch kann es im Einzelfall sinnvoll sein, kleinere Areale (z.B. Augenbrauen) im klinischen Alltag zu vermessen. Ebenfalls mit einer angepassten Kontaktplatte könnten solche Messungen wohl in Zukunft auch ohne Rasur möglich sein. Darüber hinaus ermöglicht die Analyse von Kopfhaaren ohne Färbung die Auswertung der Haarfarbe. Erste Untersuchungen zeigten, dass unterschiedliche Haarfarben ebenfalls messbar sind. Eine Anwendung wäre denkbar, in der die Ver-

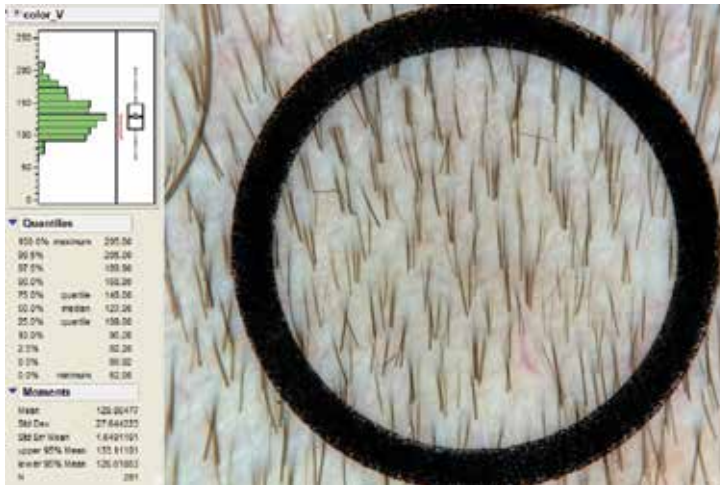


Abb. 14: Säulendiagramm unterschiedlicher Haarfarben bei ungefärbtem Haar. Aufgenommen mit einem HEINE Delta30 Dermatoskop und einer TrichoScan®-Kontaktplatte

änderung des Anteils grauer Haare unter Therapie beobachtet wird (Abb. 14).

Fazit

Die Haarforschung und -diagnostik hat in den letzten Jahren bedeutende Fortschritte erzielt, insbesondere in der präzisen und zuverlässigen Erfassung des Haarwachstums. TrichoScan®, eines der führenden Systeme zur Messung von Haardichte und Haarwachstumsrate, verwendet in der neuesten Softwareversion 5.0 »Deep-Learning«-Algorithmen, um die Genauigkeit und Effizienz der Haarerkenntnis deutlich zu verbessern.

Besonders hervorzuheben ist, dass das zuvor erforderliche Färben der Haare für eine präzise Messung nicht mehr notwendig ist und die Messgenauigkeit auch ohne Kontrastverstärkung durch Haarfarbe mit der Vorgängerversion vergleichbar ist. Dies stellt einen bedeutenden Schritt hin zu einer benutzerfreundlicheren, sehr viel schnelleren und weniger invasiven Methode dar.

Diese technologische Weiterentwicklung steigert nicht nur die Effizienz in der Haarforschung und -diagnostik, sondern bietet auch klare Vorteile für Anwender und Patienten sowie weitere Möglichkeiten in der Anwendung.

Interessenkonflikte

Die Autoren haben das TrichoScan®-Verfahren gemeinsam entwickelt. Ulf Ellwanger und Holger Lüdtker haben das Verfahren als Software umgesetzt und sind am kommerziellen Anbieter der Software beteiligt. Rolf Hoffmann hat für Vorträge über das TrichoScan®-Verfahren und als wissenschaftlicher Berater für das TrichoScan®-Projekt Honorare erhalten.

Dies könnte als potenzieller Interessenkonflikt gewertet werden.

TrichoScan® ist eingetragenes Warenzeichen der Tricholog GmbH. Rolf Hoffmann ist Gründer und Gesellschafter der Tricholog GmbH

Literatur

- Hoffmann R (2001): TrichoScan: combining epiluminescence microscopy with digital image analysis for the measurement of hair growth in vivo. Eur J Dermatol 11 (4), 362–368
- J Gassmueller, E Rowold, T Frase and B Hughes-Formella (2009): Validation of TrichoScan® technology as a fully-automated tool for evaluation of hair growth parameters. Eur J Dermatol 19 (3), 224–231
- Hoffmann R, Lüdtker H, Hoffman-Wecker M, Hughes-Formella BJ (2014): Digital imaging for measuring of hair growth on the human scalp. In: Berardesca E, Maibach HI, Wilhelm KP (Hrsg); Non Invasive Diagnostic Techniques in Clinical Dermatology. Springer, Berlin, Heidelberg, 413–422
- Bokhari L, Cottle P, Grimalt R, Kasprzak M, Sicińska J, Sinclair R, Tosti A (2022): Efficiency of Hair Detection in Hair-to-Hair Matched Trichoscopy. Skin Appendage Disord 8 (5), 382–388

Anschriften der Verfasser

Prof. Dr. med. Rolf Hoffmann
c/o Tricholog GmbH
In den Eschmatten 24
79117 Freiburg
E-Mail info@tricholog.de

Dr. Ulf Ellwanger und Dr. Holger Lüdtker
c/o Datinf GmbH
Wilhelmstraße 42
72074 Tübingen
E-Mail info@datinf.de