



Bundesamt
für Strahlenschutz

Ressortforschungsberichte zum Strahlenschutz

Wahrnehmungsschwellen und Wirkmechanismen
statischer und niederfrequenter elektrischer
Felder bei Menschen

Vorhaben 3621SNA401

Forschungszentrum für Elektro-Magnetische
Umweltverträglichkeit (femu)

Institut für Arbeits,- Sozial- und Umweltmedizin

Universitätsklinikum RWTH Aachen

Dr. Kathrin Jankowiak

Dr. Michael Kursawe

Das Vorhaben wurde im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) mit Mitteln durchgeführt, die die Stromnetzbetreiber dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) im Rahmen ihrer Absichtserklärung aus dem Dezember 2020 zur Verfügung gestellt haben.

Dieser Band enthält einen Ergebnisbericht eines vom Bundesamt für Strahlenschutz im Rahmen der Ressortforschung des BMUV in Auftrag gegebenen Untersuchungsvorhabens. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autoren. Das BfS übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung ganz oder teilweise vervielfältigt werden.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der des BfS übereinstimmen.

Impressum

Bundesamt für Strahlenschutz
Postfach 10 01 49
38201 Salzgitter

Tel.: +49 30 18333-0

Fax: +49 30 18333-1885

E-Mail: ePost@bfs.de

De-Mail: epost@bfs.de-mail.de

www.bfs.de

BfS-RESFOR-242/25

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:

urn:nbn:de:0221-2025030650649

Salzgitter, März 2025

Projekt 3621SNA401

Vorhabenbezeichnung: **Wahrnehmungsschwellen und Wirkmechanismen statischer und niederfrequenter elektrischer Felder bei Menschen**

Laufzeit: **01.12.2021 – 31.01.2024**

Gefördert durch:

Bundesamt für Strahlenschutz

Postfach 10 01 49

38201 Salzgitter

Abschlussbericht

Mitarbeit: Dr. Kathrin Jankowiak, Dr. Michael Kursawe

Forschungszentrum für Elektro-Magnetische Umweltverträglichkeit (femu)

Institut für Arbeits-, Sozial- und Umweltmedizin

Direktor: Univ.-Prof. Dr. med. Thomas Kraus

Universitätsklinikum RWTH Aachen

Pauwelsstraße 30,

52074 Aachen

Aachen, 30.04.2024

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung der Auftraggeberin übereinstimmen

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	4
1. AP1: Wissenschaftlicher Kenntnisstand zur menschlichen Wahrnehmung von statischen und niederfrequenten elektrischen Feldern	6
1.1. Empfehlungen nationaler und internationaler Gremien	10
1.2. Wirkmechanismen von elektrischen Feldern.....	11
1.3. Zusammenfassung des wissenschaftlichen Kenntnisstands	12
1.4. Zielsetzung.....	13
2. AP2: Expositionslabor.....	13
3. AP3: Bestimmung der niedrigsten AC-Schwelle.....	14
3.1. Methodik.....	15
3.1.1. Proband*innen.....	15
3.1.2. Versuchsdesign.....	15
3.1.3. Testablauf.....	16
3.1.4. Datenauswertung.....	17
3.2. Ergebnisse.....	18
3.2.1. Sensitivität.....	18
3.2.2. Wahrnehmungsschwellen.....	20
3.3. Diskussion.....	21
3.4. Einschränkende Anmerkungen	22
3.5. Implikationen.....	23
4. AP4: Wirkmechanismen – Rolle der Behaarung.....	23
4.1. Methodik.....	24
4.1.1. Probanden*innen.....	24
4.1.2. Versuchsdesign.....	24
4.1.3. Charakterisierung der Haare	26
4.1.4. Bestimmung der Feuchtigkeit	26

4.1.5.	Mikroskopische Analyse	27
4.1.6.	Datenauswertung	29
4.2.	Ergebnisse.....	30
4.2.1.	Sensitivität	30
4.2.2.	Wahrnehmungsschwellen	38
4.2.3.	Einfluss der Haare.....	41
4.2.4.	Wahrnehmungsort	46
4.3.	Diskussion.....	46
4.4.	Einschränkende Anmerkungen	48
4.5.	Implikationen.....	49
5.	Literatur	49

Zusammenfassung

Durch die fortschreitende Energiewende entsteht ein zunehmender Strombedarf in Deutschland und gleichzeitig ein Verteilungsproblem, da Strom aus regenerativen Energiequellen beispielsweise in großen Windparks in der Nordsee erzeugt wird, der Bedarf sich aber nicht nur auf den Norden beschränkt. Zur Verteilung wird neben der bestehenden Hochspannungswechselstromübertragung (HWÜ) die Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) zum Einsatz kommen. Dabei entstehen elektrische Gleichfelder (engl. Direct Current; DC) sowie Wechselfelder (engl. Alternating Current; AC) und im Falle einer parallelen Führung auf einer Trasse auch Hybrid-Felder. Die menschliche Wahrnehmung dieser elektrischen Felder war bereits Gegenstand wissenschaftlicher Studien, in jüngster Zeit auch vermehrt mit Blick auf die Wirkung von Hybrid-Feldern. Grundsätzlich begünstigen Hybrid-Felder die menschliche Wahrnehmung, was zu herabgesetzten Wahrnehmungsschwellen im Vergleich zu einfachen DC- und AC-Feldern führt. Dabei konnte gezeigt werden, dass geringe Erhöhungen des AC-Anteils in Hybrid-Feldern die Wahrnehmungsschwellen der kombinierten AC-DC-Feldstärken statistisch signifikant senken. Daher wurde im ersten Teil des gegenwärtigen Forschungsvorhabens der Einfluss der DC-Komponente auf die Wahrnehmungsschwellen elektrischer Hybrid-Felder an einer überdurchschnittlich sensitiven Probandengruppe ($n = 49$) untersucht. Dabei wurden DC-Felder zwischen 1 und 4 Kilovolt pro Meter (kV/m) mit AC-Feldstärken zwischen 1 und 14 kV/m kombiniert. Es zeigte sich, dass ein Anstieg der DC-Komponente des elektrischen Feldes die Wahrnehmungsschwelle der kombinierten Feldstärke statistisch signifikant reduziert. Das Ergebnis impliziert, dass bei Übertragungstrassen die elektrischen Felder beider Seile interagieren und es einen synergistischen Effekt auf die menschliche Wahrnehmung gibt. Daher sind die Ergebnisse – gemeinsam mit den Befunden zur AC-Komponente – ein wichtiger Beitrag zur Planung der Strom-Trassen und können helfen, unerwünschte Wahrnehmungsprozesse zu vermeiden bzw. einzuschränken.

Im zweiten Teil des Forschungsprojektes steht der biologische Mechanismus der Wahrnehmung elektrischer Felder auf individueller Ebene im Fokus. Da in vergangenen Studien verschiedentlich die Haare als zumindest wichtiger Einflussfaktor identifiziert wurden, erfolgte eine detaillierte Laboranalyse der Haare. Es wurden insgesamt 30 Proband*innen mit AC-, DC- und Hybrid-Feldern untersucht. Dabei entfernten sich alle Teilnehmenden nach dem ersten Testtag die Kopf-, Arm- und ggf. Barthaare wurden am zweiten Testtag mit einem identischen Protokoll getestet. Zusätzlich wurde die relative Luftfeuchtigkeit in 50 % der Messungen bei der Hälfte der Teilnehmenden von 50 % auf 30 % reduziert, bei der anderen Hälfte auf 70 % erhöht. Die entfernten Haare wurden laboranalytisch untersucht und Länge, Dicke, Rauheit, sowie Feuchtigkeitsparameter bestimmt. Im Ergebnis zeigen sich statistisch signifikant erhöhte Wahrnehmungsschwellen, wenn die Haare entfernt wurden. Darüber hinaus traten statistisch signifikante Korrelationen zwischen der Feuchtigkeit des Kopfhaars

und der DC-Schwelle, sowie zwischen der Rauheit der Armhaare und der AC-Schwelle auf. Die Veränderung der relativen Luftfeuchtigkeit führte zu einer signifikanten Interaktion: Trockene Umgebungsluft begünstigt die Wahrnehmung von AC-Feldern, feuchte Umgebung erleichtert das Wahrnehmen von DC-Feldern. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass der Behaarung eine entscheidende Rolle bei der Wahrnehmung elektrischer Felder zukommt. Darüber hinaus erklären individuelle Charakteristiken der Behaarung Varianz in der interindividuellen Wahrnehmungsleistung. Zusammenfassend bieten die Ergebnisse des Gesamtvorhabens relevante Befunde für die Planung und den Ausbau des für die Energiewende wichtigen Höchstspannungsnetzes, sowie auf individueller Ebene ein besseres Verständnis für den Mechanismus der menschlichen Wahrnehmung elektrischer Felder.

1. AP1: Wissenschaftlicher Kenntnisstand zur menschlichen Wahrnehmung von statischen und niederfrequenten elektrischen Feldern

Elektrische Felder sind bereits ein fester Bestandteil unseres alltäglichen Umfelds. Dennoch wurde die menschliche Wahrnehmung von elektrischen Feldern bisher in wenigen Studien untersucht. Es konnte jedoch eindeutig gezeigt werden, dass Menschen in der Lage sind sowohl statische elektrische Felder als auch niederfrequente elektrische Felder bewusst wahrzunehmen. Wissenschaftler*innen testeten die Wahrnehmbarkeit von Gleich-(DC; engl. für Direct Current) Feldern, Wechsel-(AC; engl. für Alternating Current) Feldern und der Kombination beider Feldarten (Hybrid-Felder). Dabei kann grob unterschieden werden zwischen der Exposition einzelner Körperstellen (lokale Exposition oder Teilkörperexposition) und der Exposition des gesamten Körpers (Ganzkörperexposition). Eine lokale DC-Exposition am Arm wurde von den Probanden*innen durchschnittlich bei 375 kV/m detektiert (Odagiri-Shimizu & Shimizu, 1999), während lokale AC-Felder zwischen 8 und 33 kV/m wahrgenommen wurden (Chapman et al., 2005). Bei diesen Untersuchungen gaben die Probanden*innen verbal (Odagiri-Shimizu & Shimizu, 1999) oder per Tastendruck (Chapman et al., 2005) an, ob sie eine Wahrnehmung im Armbereich hatten. Unter Hochspannungsleitungen im freien Feld nahmen Probanden*innen durchschnittliche Feldstärken von 25 kV/m DC und 15 kV/m AC wahr (Clairmont, Johnson, Zaffanella, & Zelingher, 1989). Dabei wurden die Probanden*innen verbal befragt und sollten auf einer 6-stufigen Skala (0 = nicht wahrnehmbar, 6 = intolerabel) gleichzeitig Wahrnehmbarkeit und qualitative Bewertung angeben. Auch in weiteren Studien, die unter Laborbedingungen durchgeführt wurden, ergaben sich vor allem in der DC-Bedingung deutlich geringere Wahrnehmungsschwellen unter Ganzkörperexposition als unter lokaler Exposition (Blondin et al., 1996; Jankowiak et al., 2021; Kursawe et al., 2021). Eine mögliche Erklärung dafür könnte die Feldüberhöhung an der Körperstelle sein, die der Quelle am nächsten ist, wodurch elektrische Felder unter Ganzkörperexposition bereits bei niedrigeren Feldstärken wahrgenommen werden könnten (Petri et al., 2017). In einer experimentellen Studie untersuchten Blondin et al. (1996) die menschliche Wahrnehmung von statischen elektrischen Feldern mit und ohne Ionenstrom. In dieser von Hydro-Québec durchgeführten Studie wurden 48 Probanden*innen mit statischen elektrischen Feldern bis zu 50 kV/m und Ionenströmen bis zu 120 nA/m² unter Laborbedingungen exponiert, während sie ihren Wahrnehmungseindruck per Tastendruck unter verschiedenen Testbedingungen angaben. Der durchschnittliche Wahrnehmungsschwellenwert lag ohne Ionenstrom bei 45,1 kV/m DC und mit einer maximalen Ionenstromdichte bei 36,9 kV/m. Insgesamt wurde eine große interindividuelle Variabilität festgestellt. Während ein Drittel der Probanden*innen Feldstärken von 25 kV/m wahrnehmen konnten, war ein weiteres Drittel nicht in der Lage die maximale Feldstärke von 50 kV/m erfolgreich zu detektieren (Blondin et al., 1996).

Auch der Wahrnehmungseindruck der Probanden*innen war individuell sehr verschieden. Oft wurde ein leichtes Kribbeln oder Vibrieren der Körperhaare beschrieben (Blondin et al., 1996; Jankowiak et al., 2021). Während DC-Felder hauptsächlich im Kopfbereich (Kopfhaar und Gesichtsbehaarung) wahrgenommen wurden, führten AC-Felder häufiger zu Empfindungen an den Armen und Beinen (Jankowiak et al., 2021). Einflussfaktoren und mögliche Erklärungen für die individuellen Wahrnehmungseindrücke könnten sowohl Eigenschaften der Haare sein, wie die Länge, Dicke und Feuchtigkeit, aber auch externe Faktoren, wie die relative Luftfeuchtigkeit (Chapman et al., 2005; Jankowiak et al., 2021; Kato, Ohta, Shimizu, Tsuchida, & Matsumoto, 1989; Kursawe et al., 2021; Odagiri-Shimizu & Shimizu, 1999). Im Rahmen einer Vorstudie konnte unsere Arbeitsgruppe unter Laborbedingungen eine verbesserte Wahrnehmungsleistung von AC-Feldern bei niedriger relativer Luftfeuchtigkeit (30%) und eine verbesserte Wahrnehmungsleistung von DC-Feldern bei hoher relativer Luftfeuchtigkeit (70%) zeigen (Jankowiak et al., 2021). Die Experimente wurden in einem eigens errichteten Labor durchgeführt, in dem DC-Feldstärken bis zu 50 kV/m mit optionaler Ionenstromdichte von bis zu 550 nA/m² erzeugt werden konnten. 50 Hz AC-Felder erreichten maximale Feldstärken von 30 kV/m und Hybrid-Felder konnten bis zu einer Gesamtfeldstärke von 50 kV/m generiert werden. Die anhand von elf Probanden*innen ermittelten Schwellenwerte (DC: 23,4 kV/m; AC: 16,9 kV/m; Hybrid: 11,4 kV/m) dienen als Orientierungswerte für Folgestudien. Zusätzlich wurde der Einfluss weiterer umweltbedingter und experimenteller Faktoren auf die Wahrnehmung von elektrischen Feldern bestimmt. Diese Erkenntnisse dienen als Grundlage für die Durchführung einer groß angelegten Studie (Jankowiak et al., 2021).

In diese von unserer Arbeitsgruppe durchgeführte experimentelle Studie wurden 203 Probanden*innen eingeschlossen, welche gleichmäßig über Geschlecht und Alter verteilt waren (Kursawe et al., 2021). Die durchschnittlichen Wahrnehmungsschwellen für DC-, AC- und Hybrid-Felder wurden mithilfe von zwei verschiedenen Testverfahren (SIAM und SDT) bestimmt. Das Staircase-Verfahren nach der Single Interval Adjustment Matrix (SIAM) basiert auf einer Funktionsweise, bei der die Antwort des Teilnehmenden nach einem Durchgang als Basis für die darauffolgenden Durchgänge herangezogen wird (Kaernbach, 1990). Die Methode basierend auf der Signalentdeckungstheorie (SDT) kann ebenfalls die Datengrundlage zur Berechnung der Schwellenwerte bilden und wurde daher in einer Vielzahl an Studien zur Wahrnehmung elektrischer Felder eingesetzt (Blondin et al., 1996; Chapman et al., 2005; Jankowiak et al., 2021; Jankowiak, Kaifie, Krampert, Kraus, & Kursawe, 2022; Kursawe et al., 2021). Die SDT liefert ein Maß für die Sensitivität d' (d prime) bei der Detektion von sensorischen Reizen (Green & Swets, 1966). In einer Sequenz aus Reizen wird der Testperson ein Signal mehrfach präsentiert, wobei die Sequenz auch Durchgänge mit Scheinexpositionen enthält. Aufgabe der Testperson ist es, mittels einer Antwortbox anzugeben, ob das Signal detektiert wurde oder nicht.

Insgesamt können bei der Detektion von elektrischen Feldern die folgenden Antwortkombinationen auftreten: Ein vorhandenes Feld detektiert („hit“), Ein vorhandenes Feld nicht erkannt („miss“), eine Scheinexposition als Feld erkannt („false alarm“) sowie eine Scheinexposition als solche erkannt („correct rejection“). Die Sensitivität der Testperson wird durch eine z-Transformation der relativen Häufigkeit der „hits“ und „false alarms“ und der anschließenden Differenzbildung beider z-Werte ermittelt: $d' = z(\text{hit}) - z(\text{false alarm})$. Geringe Detektionsleistungen für Signale an der Wahrnehmungsschwelle spiegeln sich in d' -Werten = 0 wider, wohingegen d' -Werte im Bereich von 1 bzw. 2 auf gute bis sehr gute Detektionsleistungen hinweisen. Werte über 3 zeigen eine hervorragende Detektionsleistung an. Durch lineare Interpolation kann für jeden Proband in der psychometrischen Funktion der Punkt ermittelt werden, an dem rechnerisch die Feldstärke einem d' -Wert von 1 entspricht. Auf diese Weise ergaben sich in der aktuellen Studie durchschnittliche Schwellenwerte von 18,69 kV/m (DC), 14,16 kV/m (AC) und 6,76 kV/m (Hybrid), wobei Hybrid-Felder immer aus einer konstanten AC-Komponente von 4 kV/m und einem variablen DC-Anteil bestanden (Kursawe et al., 2021). Eine zusätzliche Ionenstrom-Exposition unter DC-Bedingung verbesserte die Wahrnehmung der elektrischen DC-Felder, was mit den Ergebnissen von Blondin et al. (1996) übereinstimmt. Neben den Unterschieden der Wahrnehmungsleistung zwischen verschiedenen Feldarten zeigte sich auch eine große interindividuelle Varianz. Zudem wurde durch eine Subanalyse in zwei Untergruppen bestätigt, dass eine niedrige relative Luftfeuchtigkeit die Wahrnehmung von AC-Feldern erleichtert ($n = 24$), während eine hohe relative Luftfeuchtigkeit die Wahrnehmung von DC-Feldern verstärkt ($n = 25$). Wie sich aus den Ergebnissen der Vorstudie vermuten ließ, zeigten sich unter Hybrid-Bedingung deutlich niedrigere Wahrnehmungsschwellen als unter separater Exposition von DC- und AC-Feldern. 39 % der Probanden*innen waren in der Lage die niedrigste untersuchte Hybrid-Feld-Kombination von 2 kV/m DC und 4 kV/m AC erfolgreich zu detektieren (siehe Abbildung 1c). Somit deutete sich ein synergetischer Effekt auf die menschliche Wahrnehmung aus der Kombination beider Feldarten an (Kursawe et al., 2021). Die Ergebnisse dieser systematischen Untersuchung bestätigen erste Hinweise von Clairmont et al. (1989), die aus ihren Versuchen unter Hochspannungsfreileitungen schlussfolgerten, dass statische elektrische Felder bei gleichzeitigem Vorhandensein von 50 Hz Wechselfeldern verstärkt wahrgenommen werden (Clairmont et al., 1989). Auch eine Studie des Electric Power Research Institute (EPRI) zur Wahrnehmung von elektrischen Hybrid-Feldern kam zu ähnlichen Erkenntnissen (EPRI, 2010).

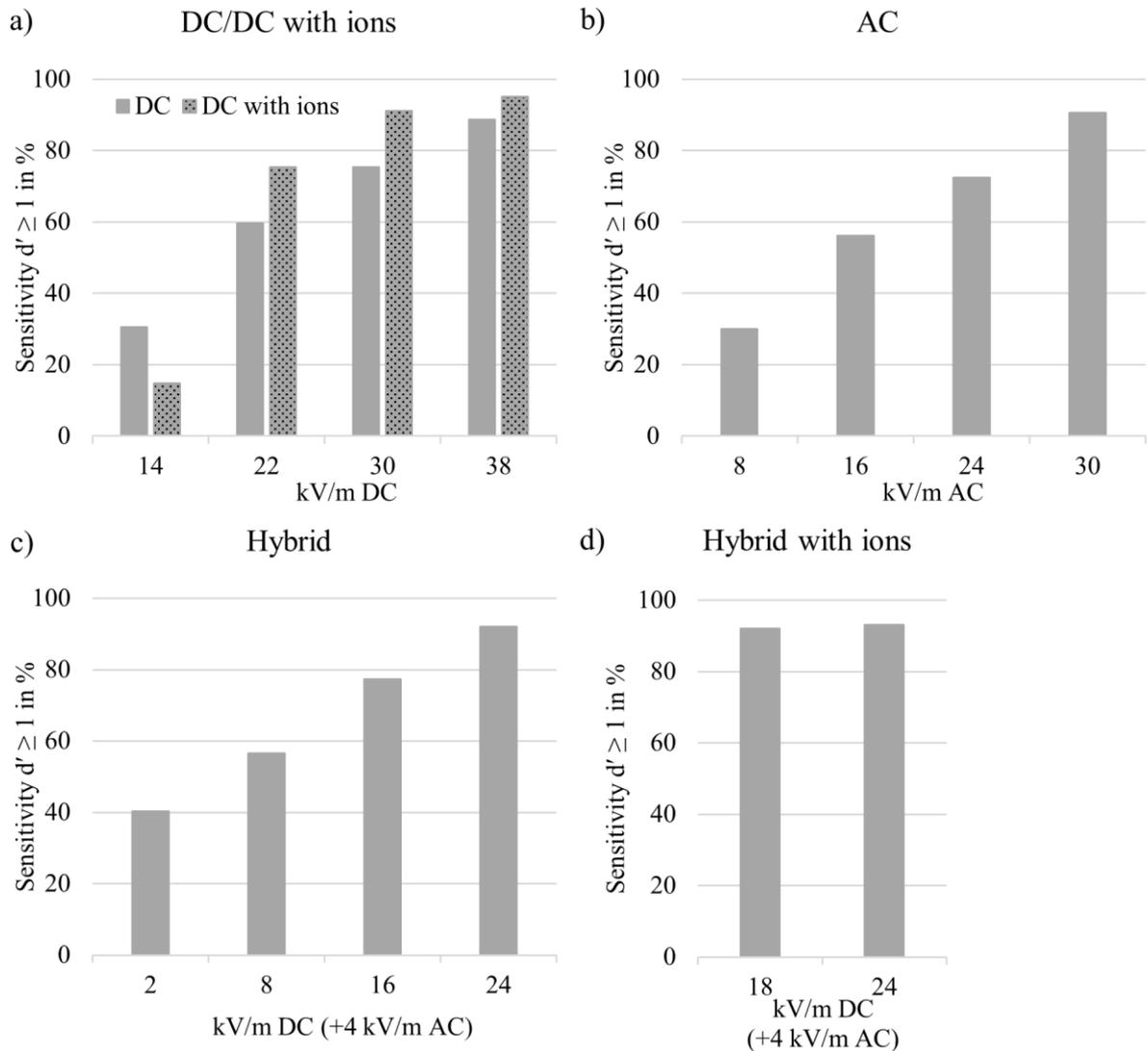


Abbildung 1: Anteil der Probanden*innen (n = 203) der Studie von Kursawe et al. (2021), die eine erfolgreiche Wahrnehmung der elektrischen Felder aufwiesen für DC und DC mit Ionen (a), AC (b), Hybrid-Felder (c) und Hybrid-Felder mit Ionen (d).

Niedrige Wahrnehmungsschwellen unter Hybrid-Feld-Exposition wurden im Zuge einer Folgestudie anhand der Ergebnisse von 51 Probanden*innen verifiziert (Jankowiak et al., 2022). Einschlusskriterium für diese Studie war eine sehr gute Wahrnehmungsleistung von elektrischen Hybrid-Feldern, die sich bereits in der vorherigen Studie zeigte. Mithilfe des SDT-Verfahrens wurden durchschnittliche Wahrnehmungsschwellen unter sehr niedriger Hybrid-Feld-Exposition berechnet. Zur Veranschaulichung des synergetischen Einflusses von elektrischen DC- und AC-Feldern auf die Wahrnehmung wurden kumulierte Feldstärken nach der Formel $\sqrt{E_{DC}^2 + E_{AC}^2}$ berechnet, wobei E_{DC} und E_{AC} den Effektivwert (engl. rms value) der elektrischen Feldstärken angeben (vgl. Jankowiak et al., 2022; Kursawe et al., 2021). Somit zeigten sich mit steigender AC-Komponente (1, 2, 3 und 4 kV/m) sinkende Wahrnehmungsschwellen in den kumulierten Schwellenwerten von 8,9, 7,8, 6,5, und 5,7 kV/m,

wodurch ein statistisch signifikanter Einfluss der AC-Komponente auf die Wahrnehmung von elektrischen Hybrid-Feldern festgestellt wurde. Auch die niedrigste Feldstärkenkombination von 1 kV/m DC und 1 kV/m AC wurde von einem Teilnehmenden erfolgreich wahrgenommen, was die menschliche Sensibilität gegenüber elektrischen Hybrid-Feldern betont (Jankowiak et al., 2022).

1.1. Empfehlungen nationaler und internationaler Gremien

Trotz zunehmender Exposition von elektrischen Feldern im Alltag existieren nur für Wechselstrom-Felder Grenzwerte zum Schutz der Allgemeinbevölkerung. Internationale Gremien haben für die Frequenzen von 1 Hz bis 50 Hz einen Referenzwert von 5 kV/m festgelegt (ICNIRP, 2010; IEEE Std C95.1TM, 2019). Den Empfehlungen der Europäischen Union folgend (1999/519/EG, 1999) wurde der allgemeine Referenzwert von 5 kV/m (Effektivwert) für 50 Hz Felder auch auf nationaler Ebene in das Bundes-Immissionsschutzgesetz aufgenommen (26. BImSchV, 2013). Zum Schutz von Beschäftigten beinhaltet die Arbeitsschutzverordnung zu elektromagnetischen Feldern (EMFV) Spitzenwerte einer unteren und oberen Auslöseschwelle für externe elektrische 50 Hz Felder (EMFV, 2016), welche auf Empfehlungen der Europäischen Union zwischen 10 und 20 kV/m (Effektivwerte) basieren (2013/35/EU, 2013). Im Rahmen einer systematischen experimentellen Studie ermittelten Kursawe et al. (2021) bei elektrischen 50-Hz Feldern eine durchschnittliche Wahrnehmungsschwelle von 14,16 kV/m (Effektivwert). Dieser Schwellenwert liegt somit oberhalb des Referenzwertes für die Allgemeinbevölkerung und innerhalb des Referenzbereichs für Beschäftigte. Dennoch ist zu beachten, dass für 18 Probanden*innen ein Schwellenwert zwischen 4 und 8 kV/m bestimmt wurde und 31 % aller Probanden*innen 8 kV/m 50-Hz Feldstärken sicher detektieren konnten (siehe Abbildung 1b; Kursawe et al., 2021).

Für statische elektrische Felder existieren bisher weder auf nationaler noch auf internationaler Ebene Expositionsgrenzwerte für die Allgemeinbevölkerung (ICNIRP, 1998, 2010; IEEE Std C95.1TM, 2019; SSK, 2013). Auch seitens der Europäischen Union gibt es sowohl für die Allgemeinbevölkerung als auch für Beschäftigte keine Richtlinien zur Einhaltung von Grenzwerten bei statischen elektrischen Feldern (1999/519/EG, 1999; 2013/35/EU, 2013). Gleichwohl wurde in der aktuellen Arbeitsschutzverordnung zu elektromagnetischen Feldern ein Referenzwert für statische elektrische Felder an Arbeitsstätten von 28,2 kV/m festgelegt (EMFV, 2016), welcher an den Referenzwert von 30 kV/m der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung angelehnt ist (DGUV IFA Report 1/2019, 2019; DGUV Vorschrift 15, 2001). Dieser Wert liegt über dem durchschnittliche Schwellenwert von 18,69 kV/m, der von Kursawe et al. (2021) bestimmt wurde. In der experimentellen Studie nahmen über 75 % aller Probanden*innen ein statisches elektrisches Feld von 30 kV/m erfolgreich wahr (siehe Abbildung 1a; Kursawe et al., 2021). In den Hinweisen zur Durchführung der deutschen 26. BImSchV heißt es zu statischen

elektrischen Feldern, dass trotz fehlendem Grenzwert „bei Gleichstromanlagen ggf. auch statische elektrische Felder zu erfassen [sind], um damit Aussagen über mögliche Wirkung durch Funkentladung (...) machen zu können“ (Länderausschuss für Immissionsschutz, 2014, S.61). Auch die Strahlenschutzkommission (SSK) empfiehlt aufgrund der mangelnden Datenlage, „elektrische Gleichfelder von [Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungs-] HGÜ-Leitungen mit dem Ziel der Vermeidung gesundheitlicher Beeinträchtigungen oder erheblicher Belästigungen zu begrenzen“ und weitere Forschungsprojekte zur Wahrnehmung von elektrischen Feldern durchzuführen (SSK, 2013, S.3). Zudem berechnete die SSK auf Basis der Wahrnehmungsschwellen von 0,39 μC bis 0,90 μC (International Electrotechnical Commission, 2007) eine theoretische Feldstärke von 8,8 kV/m für die untere Wahrnehmungsschwelle (SSK, 2013). Kursawe et al. (2021) zeigten, dass 13 Probanden*innen bei statischen elektrischen Feldern einen Schwellenwert zwischen 8 und 12 kV/m erreichten. Für elektrische Hybrid-Felder existieren bisher weder auf nationaler noch auf internationaler Ebene Empfehlungen für Grenzwerte zum Schutz von Beschäftigten und der allgemeinen Bevölkerung.

1.2. Wirkmechanismen von elektrischen Feldern

Laut Weltgesundheitsorganisation sind durch die Exposition von elektrischen Feldern keine chronischen gesundheitsschädlichen Auswirkungen zu erwarten (WHO, 2006, 2007). Statische und niederfrequente elektrische Felder gehören zur nichtionisierenden Strahlung und dringen kaum bis gar nicht in Körpergewebe ein. Ihre Wirkung beschränkt sich daher auf die Körperoberfläche (TREMFI, 2021). Bisher sind jedoch weder spezifische Rezeptoren noch zugrunde liegende biologische Mechanismen für die Wahrnehmung von elektrischen Feldern klar nachgewiesen. Es gibt Hinweise, dass Rezeptoren an der Haarwurzel, die für die Wahrnehmung von Vibrationen genutzt werden, auch bei der Wahrnehmung von elektrischen Feldern eine Rolle spielen (Chapman et al., 2005; Odagiri-Shimizu & Shimizu, 1999). Bei der Wahrnehmung von Wechselfeldern könnte die Bewegung von Ladungen, die auf der Haut induziert werden, entlang der hydrierten Haare zu einer gegenseitigen Abstoßung der einzelnen Haare führen, was in einer spürbaren Vibration resultiert (Reilly, 1998). Dabei scheint besonders die Haarfeuchtigkeit in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchtigkeit entscheidend zu sein (Kato et al., 1989; Odagiri-Shimizu & Shimizu, 1999). Die Feuchtigkeit der Haut scheint nach aktuellen Studien jedoch keinen direkten Einfluss auf die Wahrnehmung von elektrischen Feldern zu haben (Jankowiak et al., 2022; Kursawe et al., 2021). Allerdings können weitere physikalische Eigenschaften der Haare den individuellen Wahrnehmungseindruck beeinflussen. Odagiri-Shimizu und Shimizu (1999) stellten bei lokaler Feld-Exposition geringere Schwellenwerte bei längeren und dichteren Haaren fest. So könnten individuelle Unterschiede in spezifischen Eigenschaften eine mögliche Erklärung für die großen Varianzen in der Wahrnehmungsleistung von elektrischen Feldern

sein. Frühere Studien zeigen, dass die Wahrnehmung von elektrischen Feldern an unbehaarter Haut stark eingeschränkt aber nicht ausgeschlossen ist (Chapman et al., 2005; Odagiri-Shimizu & Shimizu, 1999). Daher besteht die Vermutung, dass auch andere Rezeptoren an der Wahrnehmung von elektrischen Feldern beteiligt sind. Unsere Arbeitsgruppe fand einen Zusammenhang zwischen der Fähigkeit Vibrationen von 31 und 63 Hz an unbehaarter Haut wahrzunehmen und der Fähigkeit elektrische AC- und Hybrid-Felder zu detektieren (Kursawe et al., 2021). Unterstützt wird dies durch den Befund, dass die Sensitivität gegenüber der Oszillation von Körperhaaren eng mit dem Vibrationsempfinden verbunden ist (Merzenich & Harrington, 1969). Auch wenn diese Korrelation in der nachfolgenden Studie nicht repliziert werden konnte, stärkt es die Annahme der Existenz weiterer Signaltransduktionswege (Jankowiak et al., 2022). Ein tieferes Verständnis der Wirkmechanismen kann dabei helfen, die unterschiedlich gute Wahrnehmungsleistung in Abhängigkeit der Feldart oder -kombination zu verstehen. So haben Nedachi et al. (2021) kürzlich berechnet, dass die elektrische Kraftwirkung auf die Körperbehaarung in Hybrid-Feldern bis zu dreimal höher ist als die elektrische Kraftwirkung in reinen DC- oder AC-Feldern. Hier könnte eine Erklärung für die geringeren Wahrnehmungsschwellen von Hybrid-Feldern liegen. Abhängigkeiten von der Art und Präsenz der Körperbehaarung könnten dabei Varianz aufklären. Insgesamt besteht im Bereich der Wirkmechanismen von elektrischen Feldern noch großer Forschungsbedarf, um die zugrunde liegenden Mechanismen und den Einfluss von individuellen Merkmalen zu verstehen.

1.3. Zusammenfassung des wissenschaftlichen Kenntnisstands

Es besteht wissenschaftlicher Konsens darüber, dass Menschen statische und niederfrequente elektrische Felder wahrnehmen können. Dabei werden elektrische 50 Hz Felder im Durchschnitt bereits bei niedrigeren Feldstärken wahrgenommen als statische elektrische Felder, für die wiederum die Anwesenheit von Ionen einen Wahrnehmungsvorteil darstellt. Grundsätzlich kann auch festgestellt werden, dass die Wahrnehmungsschwelle von Hybrid-Feldern durchschnittlich deutlich unterhalb der Wahrnehmungsschwelle von reinen Gleich- und Wechselfeldern liegt. Gleichwohl bleibt offen welche Form der Interaktion von elektrischen DC- und AC-Feldern die begünstigte Wahrnehmbarkeit fördert. Bei geringen AC-Anteilen bis 4 kV/m scheint die AC-Komponente Treiber dieses Synergieeffektes zu sein. Andererseits besteht Unklarheit darüber, ob geringe Variationen der DC-Komponente einen vergleichbaren Effekt auf die Wahrnehmung elektrischer Hybrid-Felder haben. Zusätzlich mehren sich die Hinweise, dass die Behaarung an Kopf und Körper als entscheidende Schnittstelle zwischen Mensch und elektrischem Feld die Wahrnehmung moderiert. Auch hier besteht erheblicher Forschungsbedarf, um herauszustellen in welchem Umfang die Beschaffenheit und Anwesenheit der Körperbehaarung Einfluss auf die Wahrnehmung der verschiedenen Feldarten nimmt.

1.4. Zielsetzung

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Durchführung einer Studie zur menschlichen Wahrnehmung von elektrischen Hybrid-Feldern, in der besonders der Einfluss von Variationen niedriger DC-Felder auf die Wahrnehmungsschwelle untersucht wird (AP3). Es wird die Frage geklärt, ob die DC-Komponente ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf die kombinierten Wahrnehmungsschwellen hat, wie dies bei der AC-Komponente beobachtet wurde. Im zweiten Teil des Projektes werden biologische Wirkmechanismen an einer möglichst homogenen Probandengruppe untersucht. Dabei stehen vor allem die Haare und deren Bewegung als möglicher Wirkmechanismus der Wahrnehmung elektrischer Felder im Fokus (AP4).

2. AP2: Expositionslabor

Alle Untersuchungen zur Wahrnehmung elektrischer Felder fanden im Expositionslabor am Forschungszentrum für Elektro-Magnetische Umweltverträglichkeit (femu), Institut für Arbeits-, Sozial- und Umweltmedizin der Uniklinik RWTH Aachen statt (Abbildung 2). Das Innenmaß des Expositionslabors beträgt 4×4 Meter mit einer Deckenhöhe von 3 Metern. Die Proband*innen befanden sich sitzend mittig auf dem fest installierten Stuhl im ansonsten leeren Raum. Es können hier DC-Felder bis 50 kV/m in Kombination mit einer Ionenstromdichte von maximal 550 nA/m^2 erzeugt werden, sowie AC-Felder mit einem Effektivwert bis 30 kV/m , die auch mit DC-Feldern kombiniert werden können (Hybrid-Bedingung). Hinsichtlich der Feldstärke kann in Hybrid-Bedingungen die Summe aus beiden Feldarten 50 kV/m nicht überschreiten. Während der Exposition waren die Proband*innen über Beinelektroden aus Silikon, über die auch der Ableitstrom aufgezeichnet wurde, geerdet. Darüber hinaus stellt die Konstruktion der Anlage eine doppelblinde Versuchsanordnung sicher. Die Versuchsleitung erhält somit keine Informationen über die aktuell präsentierten Feldstärken, während die Proband*innen ebendiese durch Wahrnehmung auf der Körperoberfläche erkennen sollen. Außerdem wird stets ein Rauschsignal über vier Lautsprecher im Expositionsraum mit einer Lautstärke von $61,7 \text{ Dezibel (A)}$ eingespielt, das eine Maskierung aller hörbaren Einflüsse sicherstellt. Technischer Aufbau, Feldverteilung, sowie der Prozess der Kalibrierung können den Publikationen von Jankowiak et al. (2021) sowie Krampert et al. (2017) entnommen werden.

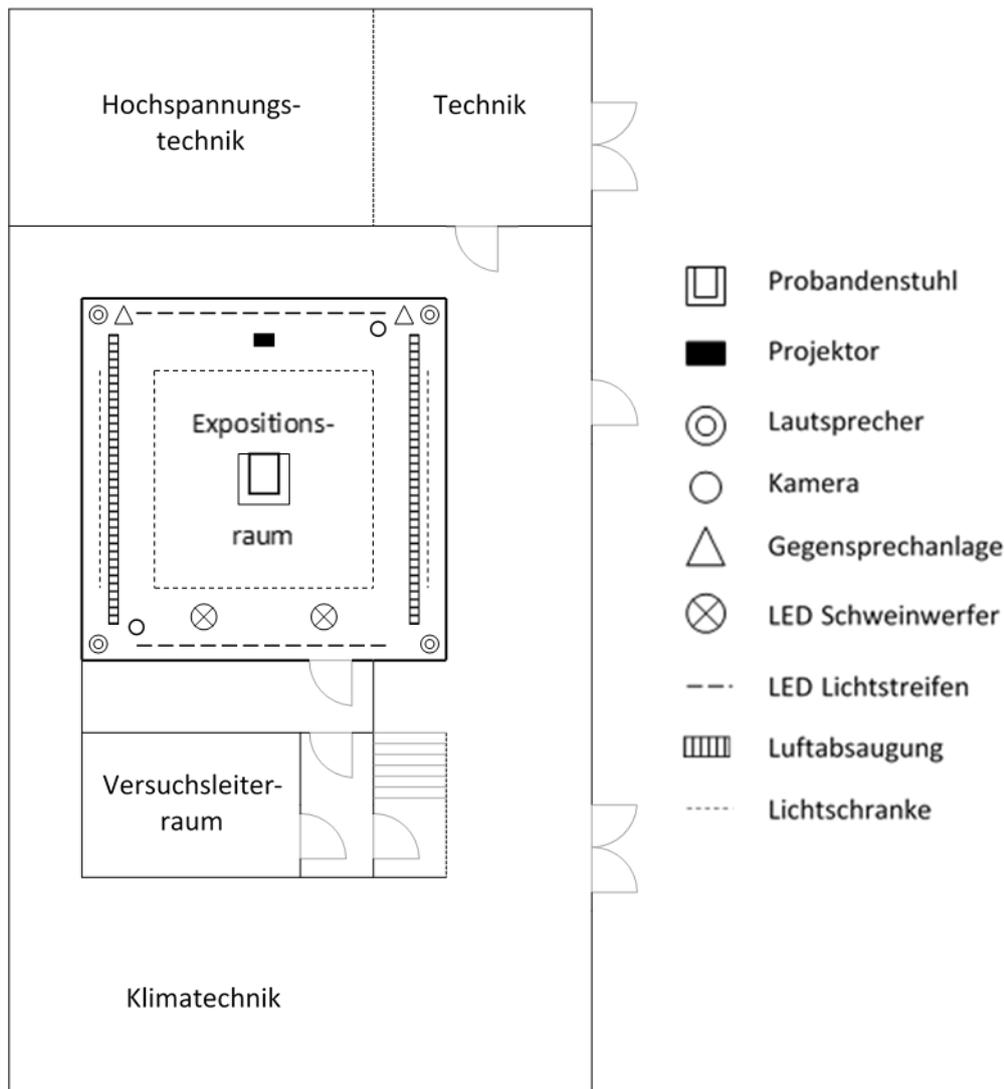


Abbildung 2: Schematischer Aufbau des Expositionslabors. Technik und Hochspannungstechnik befinden sich im hinteren Drittel (oben), der Expositionsraum in der Mitte, daran angeschlossen ist der Versuchsleiterraum. Die Klimatechnik ist im vorderen Bereich (unten) installiert.

3. AP3: Bestimmung der niedrigsten AC-Schwelle

In diesem Arbeitspaket wurde eine Studie zur menschlichen Wahrnehmung von elektrischen Hybridfeldern, in der besonders der Einfluss von Variationen niedriger DC-Felder auf die Wahrnehmungsschwelle untersucht wird, durchgeführt. Im Fokus steht die Frage, ob die DC-Komponente ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf die kombinierten Wahrnehmungsschwellen hat, wie dies bei der AC-Komponente beobachtet wurde. Die Ergebnisse dieses Arbeitspaketes wurden mittlerweile veröffentlicht (Kursawe et al., 2023).

3.1. Methodik

3.1.1. Proband*innen

In die Studie wurden 49 gesunde weibliche und männliche Probanden eingeschlossen. Voraussetzung für die Teilnahme war eine sehr gute Fähigkeit geringe Hybrid-Felder detektieren zu können. Daher wurden anhand von vorherigen Studienergebnissen (Jankowiak et al., 2022) diejenigen Proband*innen erneut eingeladen, die in Hybrid-Feldern eine sehr gute Erkennungsleistung aufwiesen. Die Proband*innen waren zwischen 24 und 79 Jahren alt (Altersdurchschnitt: 51 Jahre). 19 Probanden waren männlich und 30 weiblich. Es wurden unter anderem Personen mit elektronischen Implantaten oder Piercings, Personen, die sich selbst als elektrosensibel bezeichnen würden, sowie Personen mit Hauterkrankungen oder neurologischen Erkrankungen ausgeschlossen. Im Rahmen der ärztlichen Begutachtung vor Studieneinschluss erfolgte eine ausführliche Anamnese, u. a. zu Substanzmissbrauch (Alkohol, Drogen, Medikamente), gefolgt von einer körperlichen Untersuchung. Die körperliche Untersuchung umfasste Parameter, wie Vitalzeichen (Puls, Blutdruck), Infektionszeichen, Auffälligkeiten an der Haut sowie Sensibilitätsstörungen oder neurologische Auffälligkeiten. Bei weiblichen Probanden erfolgte zusätzlich ein hCG-Test, um eine bestehende Schwangerschaft auszuschließen. Alle Teilnehmenden erhielten eine Aufwandsentschädigung von insgesamt 100 € sowie einen Gutschein für ein Mittagessen in der hauseigenen Kantine. Für das Vorhaben lag ein positives Votum der Ethikkommission der Medizinischen Fakultät der RWTH Aachen (EK435/21) vor und es erfolgte eine Präregistrierung beim Deutschen Register für klinische Studien (DRKS, 00027400).

3.1.2. Versuchsdesign

Während der Exposition mit verschiedenen Feldstärkekombinationen unter konstanten Laborbedingungen von 22 °C und 50 % Luftfeuchtigkeit saß jeweils ein/e Proband*in in der Mitte des Expositionsraums und folgte den Anweisungen, welche auf die vor ihm/ihr liegende Wand projiziert wurden. Mithilfe einer Antwortbox konnte nach jedem Durchgang der momentane Wahrnehmungseindruck angegeben werden. Es wurden unterschiedliche Kombinationen der AC- und DC-Feldstärken getestet. Dabei ergaben sich vier verschiedene Testbedingungen, bei denen jeweils eine DC-Feldstärke von 1, 2, 3 oder 4 kV/m konstant gehalten wurde, während die AC-Feldstärke innerhalb einer Testbedingung zwischen 1 kV/m und 14 kV/m variierte. Die Testbedingungen sind in Tabelle 1 dargestellt.

Diese Versuchsanordnung ermöglicht es den Einfluss der eingestellten DC-Feldstärke auf die Wahrnehmung des Hybrid-Feldes zu ermitteln. Neben den Feldexpositionen wurde die gleiche Anzahl

an Scheinexpositionen präsentiert. Durch das doppelblinde Studiendesign und die zufällige Reihenfolge der Expositionen wusste weder der/die Proband*in noch die Versuchsleitung zu welchem Zeitpunkt ein elektrisches Feld vorhanden war. Dadurch können sowohl eine Erwartungshaltung des/der Proband*in als auch eine Beeinflussung durch die Versuchsleitung ausgeschlossen werden. Insgesamt nahm jede/r Proband*in an acht Sitzungen mit einer Dauer von jeweils 15 Minuten teil, die in zufälliger Reihenfolge durchgeführt wurden. Dies führte inklusive der prüfärztlichen Untersuchung, der Unterweisung der Proband*innen, sowie den Pausen zwischen den Blöcken zu einer ungefähren Gesamttestdauer von 5 Stunden.

3.1.3. Testablauf

Die Aufgabe der Testperson war es, eine Feldexposition korrekt zu erkennen bzw. eine Scheinexposition korrekt als solche zu klassifizieren. Zu Beginn eines Durchgangs erfolgte das „Hochfahren“ des Feldes (Anstieg). Dies dauerte immer 3 Sekunden und diente dazu, die gewünschte Feldstärke im Expositionsraum herzustellen. Anschließend stand das Feld für 5 Sekunden im Raum (Konstante). Danach wurde auf der Wand vor der Testperson die Frage angezeigt „Nehmen Sie ein elektrisches Feld wahr?“. Dazu erschienen die vier Antwortmöglichkeiten „ja – sicher“, „ja – unsicher“, „nein – unsicher“ und „nein – sicher“. Währenddessen wurde ein Balken im unteren Bereich des Bildes angezeigt, der zu erkennen gab wie viel Zeit für die Eingabe verblieb. Die Testpersonen wurden instruiert innerhalb dieser 4 Sekunden eine Antwort auf einer Antwortbox einzugeben. Anschließend wurde das Feld wieder heruntergefahren und die Anlage wurde geerdet (Abstieg). Dies dauerte etwa 7-9 Sekunden. Ohne Verzögerung startete der nächste Durchgang. Im Falle eines Scheindurchgangs war der zeitliche Ablauf identisch, es wurde jedoch kein Feld präsentiert.

Tabelle 1: Vier Testbedingungen mit DC- und AC-Feldstärken sowie der kombinierten Feldstärke, die nach folgender Formel berechnet wurde: $E_{RMS} = \sqrt{E_{DC}^2 + E_{AC}^2}$. Jede kombinierte elektrische Feldstärke wurde acht Mal präsentiert und kombiniert mit acht Scheinexpositionen.

	DC Feldstärke (kV/m)	AC Feldstärke (kV/m)	Kombinierte Feldstärke (kV/m)
Testbedingung 1	1	1, 2, 4, 8, 14	1,41, 2,24, 4,12, 8,06, 14,4
Testbedingung 2	2	1, 2, 4, 8, 14	2,24, 2,83, 4,47, 8,25, 14,14
Testbedingung 3	3	1, 2, 4, 8, 14	3,16, 3,61, 5,00, 8,54, 14,32
Testbedingung 4	4	1, 2, 4, 8, 14	4,12, 4,47, 5,66, 8,94, 14,56

3.1.4. Datenauswertung

Für die experimentelle Konzeption sowie die Betrachtung der Ergebnisse wurde in der vorliegenden Untersuchung der Ansatz der Signalentdeckungstheorie (SDT) eingesetzt (Green & Swets, 1966). Auf diese Weise lässt sich ein Maß für die Sensitivität d' (d prime) bei der Wahrnehmung von Sinnesreizen bestimmen. Bei der Beantwortung der Frage durch den/die Proband*in können vier Antwortkombinationen auftreten: 1.) Feld vorhanden und Feld erkannt („Treffer“), 2.) Feld vorhanden und kein Feld erkannt („miss“), 3.) Scheinexposition und Feld erkannt („falscher Alarm“) sowie 4.) Scheinexposition und kein Feld erkannt („richtige abgelehnt“). Die Sensitivität der Proband*innen (d') wird durch eine z-Transformation der relativen Häufigkeit der „Treffer“ und „Falschen Alarme“ und der anschließenden Differenzbildung beider z-Werte ermittelt: $d' = z(\text{Treffer}) - z(\text{falscher Alarm})$. Geringe Erkennungsleistungen für Reize unterhalb der Wahrnehmungsschwelle spiegeln sich in d' -Werten = 0 wider, wohingegen d' -Werte ab 1 auf eine erfolgreiche Wahrnehmung hindeuten. Bei d' -Werten von 1 bis 2, bzw. 3 wird von guten bis sehr guten, bzw. hervorragenden Wahrnehmungsleistungen gesprochen. Da z-Werte nicht berechnet werden können, wenn die relative Erfolgsrate bei der Erkennung 0 oder 1 war, wurde eine log-lineare Transformation der „Treffer“- und „falscher Alarm“-Raten nach Hautus (1995) durchgeführt.

Für die Bestimmung der individuellen Wahrnehmungsschwellen wurden kombinierte Feldstärken E_{RMS} aus DC und AC berechnet:

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{E_{\text{DC}}^2 + E_{\text{AC}}^2},$$

wobei E_{DC} und E_{AC} die jeweiligen quadratischen Mittel (RMS) Werte der elektrischen Feldstärke sind. Aus diesen kombinierten Feldstärken wurden anschließend psychometrische Funktionen für jede Testbedingung (DC: 1, 2, 3, 4 kV/m) bestimmt. Der Punkt, an dem diese Funktion den Wert von 1 erreicht, gilt somit als Schwellenwert hinsichtlich der Feldwahrnehmung. Dies war nur möglich, wenn der Verlauf plausibel war, d.h. ein Anstieg von d' mit zunehmender Feldstärke vorlag. Zum Beispiel, wenn in Testbedingung 1 ein $d' \geq 1$ bei einer Feldstärke von 1,41 und 2,24 kV/m gefunden, aber ein $d' < 1$ bei einer Feldstärke von 4,12 kV/m beobachtet wurde, wurde der Verlauf als unplausibel eingestuft. Darüber hinaus, wenn die Teilnehmenden grundsätzlich keine elektrischen Felder erkennen konnten, z. B. unter Testbedingung 1, konnte keine Erkennungsschwelle berechnet werden.

Für die statistische Betrachtung wurden d' -Werte in eine 4×5 messwiederholten Varianzanalyse (rm ANOVA) mit den Faktoren *DC-Feldstärke* (1, 2, 3, 4 kV/m) und *AC-Feldstärke* (1, 2, 4, 8, 14 kV/m)

eingetragen. Ein α -Niveau von $p = 0,05$ wurde für das Signifikanzniveau akzeptiert, und partielle Eta-Quadrat-Werte (η^2) wurden zur Schätzung der Effektstärken angegeben. Die individuellen Detektionsschwellen von Proband*innen, die an der aktuellen Studie sowie an unserer früheren Studie (Jankowiak et al., 2022) teilgenommen haben, wurden korrelationsanalytisch untersucht. Der Pearson-Koeffizient r wurde für die Detektionsschwellen über alle Testbedingung berechnet. Dabei zeigt ein Koeffizient von $r = 0$ keinen, ein Wert von $r = 1$ einen perfekten Zusammenhang.

3.2. Ergebnisse

3.2.1. Sensitivität

Die durchschnittlichen d' -Werte für alle getesteten Feldstärkekombinationen lassen sich Abbildung 3 entnehmen. Da ab einem d' -Wert ≥ 1 von einer erfolgreichen Wahrnehmung ausgegangen wird, kann gesagt werden, dass sieben Feldstärkekombinationen im Gruppendurchschnitt erkannt wurden. Dazu gehören 8 kV/m AC kombiniert mit 2, 3 oder 4 kV/m DC und 14 kV/m AC in Kombination mit allen vier DC-Feldstärken (1, 2, 3 und 4 kV/m). Sehr gut zu erkennen ist der Einfluss der DC-Komponente auf die Wahrnehmungsleistung. Mit zunehmender DC-Feldstärke scheint die durchschnittliche Sensitivität zu steigen. Die vorliegenden Daten deuten jedoch darauf hin, dass dieser Effekt erst ab einer ausreichenden AC-Feldstärke um 8 kV/m zu erkennen ist.

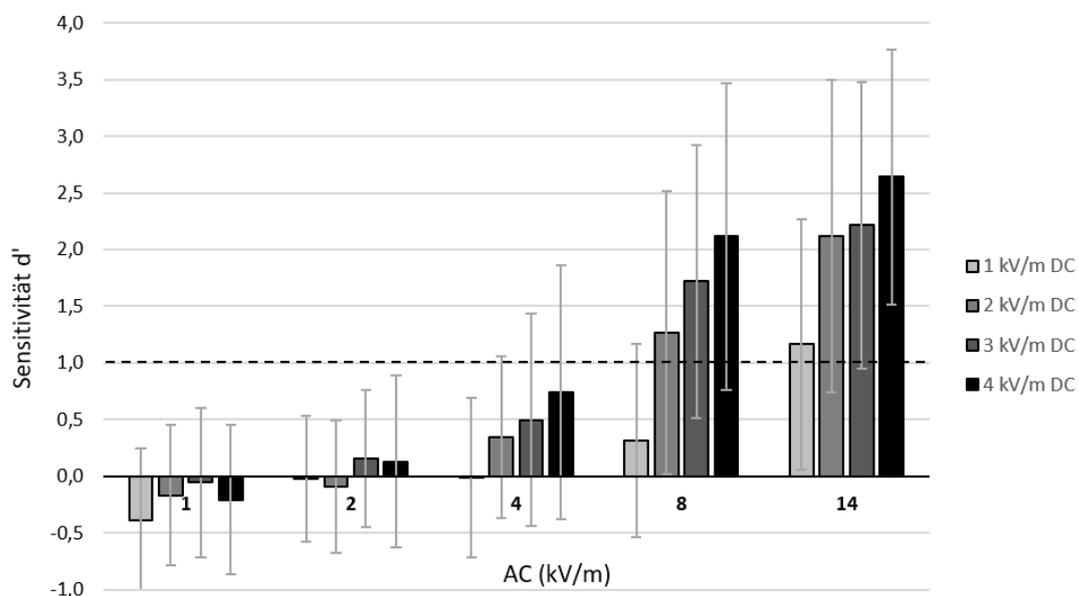


Abbildung 3: Einfluss der DC-Komponente auf die Wahrnehmungsleistung. Aufgetragen sind die durchschnittlichen Sensitivitäten d' ($n=49$) für die verschiedenen Feldstärkekombinationen. Die DC-Feldstärken 1, 2, 3 und 4 kV/m wurden in Kombination mit AC-Feldstärken von 1, 2, 4, 8 und 14 kV/m getestet. Die horizontal gestrichelte Linie markiert einen d' -Wert = 1, ab dem von einer erfolgreichen Wahrnehmung ausgegangen wird.

Variationen der Faktoren *AC-Feldstärke* und *DC-Feldstärke* haben einen statistisch signifikanten Einfluss auf die Sensitivität, wie an den Ergebnissen der rm ANOVA zu erkennen ist (Tabelle 2). Als Folge der signifikanten Interaktion der Faktoren *DC-Feldstärke* und *AC-Feldstärke* wurden rm ANOVAs für jede AC-Feldstärke gerechnet. Es zeigten sich dabei signifikante Effekte für die Stufen 1, 4, 8, und 14 kV/m (alle $p \leq 0,05$), nicht aber für 2 kV/m ($p = 0,13$). Für jede DC-Feldstärke wurde ein signifikanter AC-Effekt für die Stufen 1, 2, 3, and 4 kV/m gefunden (alle $p \leq 0,001$). Wie in Abbildung 3 dargestellt, beeinflusst die DC-Komponente signifikant die Detektionsleistung, was am deutlichsten erkennbar ist, wenn die AC-Feldstärke 8 oder 14 kV/m beträgt. Zusätzlich waren AC-Feldstärken unter 8 kV/m nicht ausreichend, um die Erkennung unabhängig von der DC-Komponente zu ermöglichen.

Tabelle 2: Ergebnisse der 4×5 rm ANOVA der Sensitivitäten d' mit den Faktoren *DC-Feldstärke* (1, 2, 3, 4 kV/m) und *AC-Feldstärke* (1, 2, 4, 8, 14 kV/m).

Faktor	df	F	p	η_p^2
<i>DC-Feldstärke</i>	3, 144	37,21	<0,001	0,44
<i>AC-Feldstärke</i>	4, 192	156,53	<0,001	0,77
<i>DC-Feldstärke*AC-Feldstärke</i>	12, 576	10,75	<0,001	0,18

Zusätzlich wurde für jede Feldstärkekombination die Anzahl der Teilnehmenden bestimmt, die eine erfolgreiche Wahrnehmung zeigten. Es zeigte sich, dass sowohl mit zunehmender AC-Feldstärke als auch mit Zunahme der DC-Feldstärke mehr Teilnehmende eine erfolgreiche Wahrnehmung hatten. Die niedrigste getestete Feldstärkekombination konnte von einer Person zuverlässig erkannt werden (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Anzahl der Teilnehmenden (von $n = 49$), die erfolgreich eine bestimmte elektrische Feldstärkekombination erkannt haben ($d' \geq 1$).

DC (kV/m)	AC (kV/m)				
	1	2	4	8	14
1	1	1	2	8	25
2	1	2	12	25	40
3	2	5	9	34	40
4	1	6	15	38	44

3.2.2. Wahrnehmungsschwellen

In Abbildung 4 sind die durchschnittlichen Wahrnehmungsschwellen dargestellt. Eine rm ANOVA mit dem Faktor *Testbedingung* (1, 2, 3, 4) zeigte einen statistisch signifikanten Effekt ($F(3, 11) = 9,84, p < 0.01, \eta_p^2 = 0,73$). Paarweise Vergleiche aller benachbarten Stufen des Faktors *Testbedingung* wiesen statistische Signifikanz auf (alle p 's ≤ 0.05). Es zeigte sich, dass mit steigendem DC-Anteil die kombinierte Wahrnehmungsschwelle sank. Dieser Effekt ist bei einer DC-Feldstärke von 1, 2 und 3 kV/m sichtbar und setzt sich bei 4 kV/m nicht weiter fort.

Die Detektionsschwellen der Teilnehmenden in der aktuellen Studie und der früheren Studie (Jankowiak et al., 2022) wurden mittels korrelativer Analysen verglichen. Es wurde eine statistisch signifikante Korrelation zwischen den Detektionsschwellen der kombinierten Feldstärken beider Studien mit $r = 0,54, p < 0,001$ festgestellt. Im Durchschnitt war eine gute Leistung bei der Felderkennung in der aktuellen Studie mit einer guten Leistung in der früheren Studie (Jankowiak et al., 2022) assoziiert (Abbildung 5).

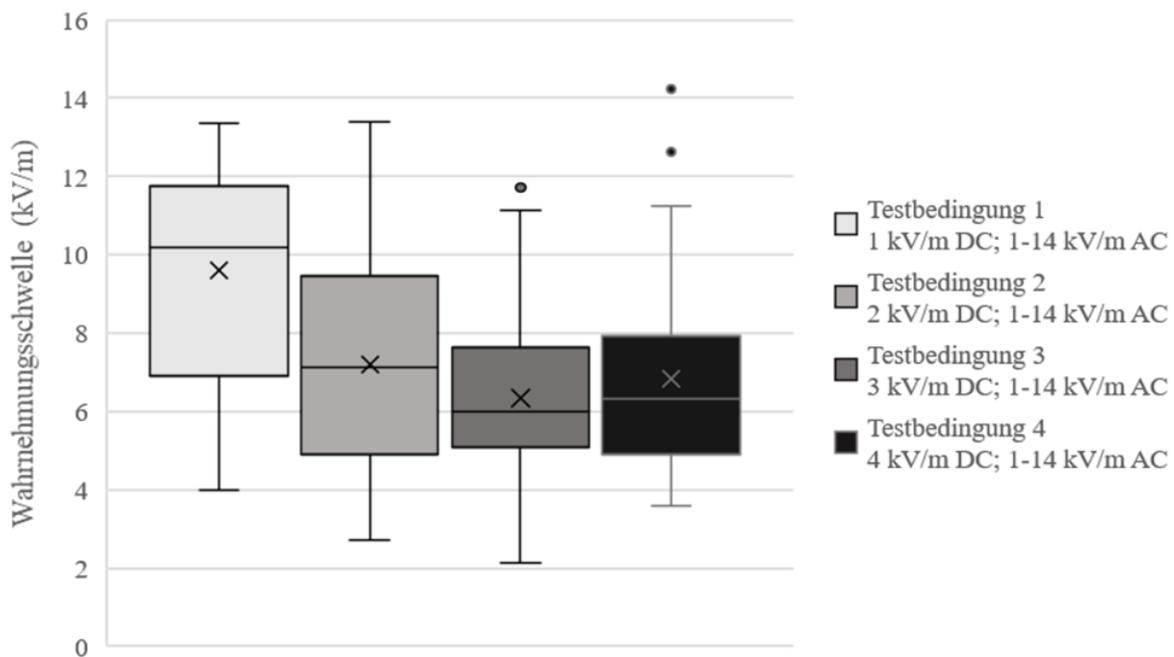


Abbildung 4: Detektionsschwellen kombinierter elektrischer Felder. Durchschnittliche Detektionsschwellen für alle Testbedingungen. Die AC-Feldstärken pro Bedingung betragen 1, 2, 4, 8 oder 14 kV/m; DC-Komponente: 1 kV/m in Testbedingung 1, 2 kV/m in Testbedingung 2, 3 kV/m in Testbedingung 3 und 4 kV/m in Testbedingung 4. Die Anzahl der Teilnehmenden betrug 24, 33, 37 und 44 für Testbedingung 1, 2, 3 bzw. 4. Kreuze markieren Mittelwerte. Die Medianwerte sind durch den horizontalen Balken innerhalb der Kästchen angegeben. Minima und Maxima sind durch Whisker gekennzeichnet. Ausreißer sind durch Punkte markiert. Die Zahl der Teilnehmenden, bei denen die Detektionsschwellen über alle Bedingungen geschätzt werden konnte, betrug $n = 14$.

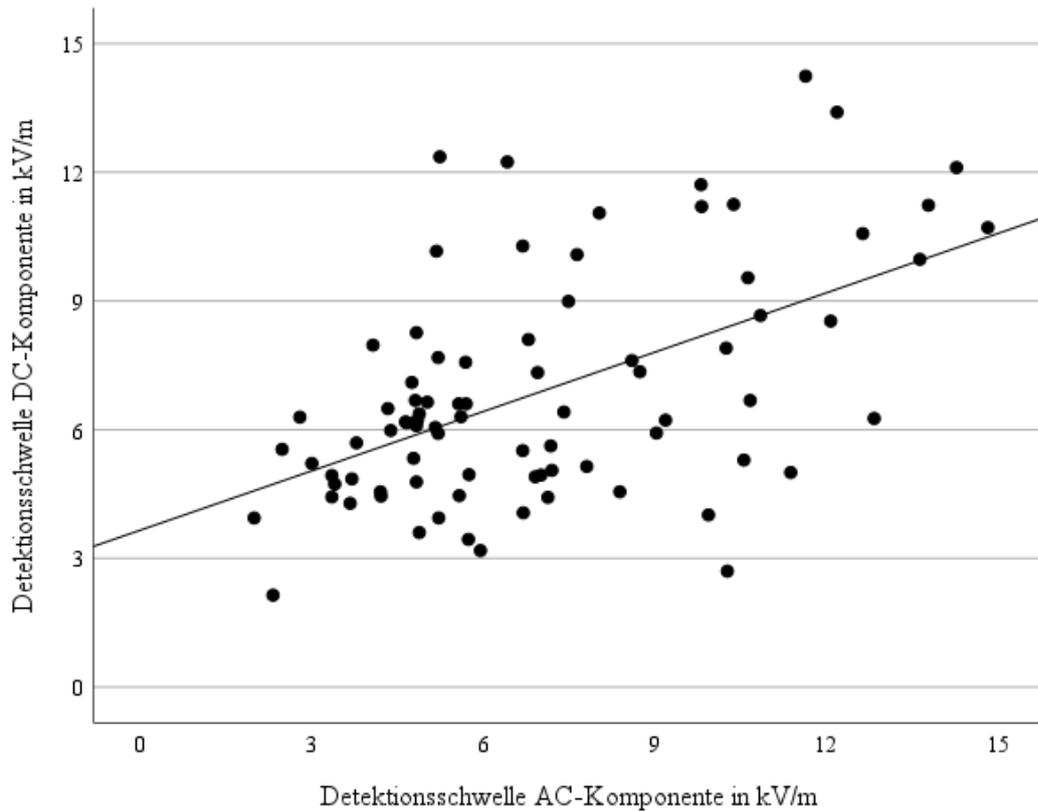


Abbildung 5: Korrelation der Detektionsschwellen der kombinierten Feldstärken aus der aktuellen Studie (DC-Komponente; Kursawe et al., 2023) und der früheren Studie (AC-Komponente; Jankowiak et al., 2022). Aufgrund methodischer Einschränkungen, d. h. Teilnehmenden, die nicht plausible Verläufe in den d' -Werten zeigten, war die Anzahl der Fälle auf 15, 20, 23 und 25 für die Testbedingungen 1, 2, 3 und 4 begrenzt, was zu einer Gesamtzahl von 83 Fällen führte.

3.3. Diskussion

Die Studie hatte zum Ziel, zu untersuchen, wie kleine Änderungen der DC-Komponente die menschliche Wahrnehmung von Hybrid-Feldern beeinflussen. Dafür wurden 49 Teilnehmende mit sehr guter Detektionsfähigkeit mit Hybrid-Feldern exponiert, wobei die DC-Komponente in vier Testbedingungen zwischen 1 und 4 kV/m variiert und zusammen mit AC-Feldstärken zwischen 1 und 14 kV/m kombiniert wurde. Es wurde gezeigt, dass die Detektionsschwellen der kombinierten Feldstärken mit zunehmender DC-Komponente abnahmen, während sogar die niedrigste Hybrid-Kombination von einem Teilnehmer erkannt wurde. Die Studie erweitert die Ergebnisse von Jankowiak et al. (2022), die zeigen, dass die AC-Komponente einen wesentlichen Einfluss auf die Erkennung von elektrischen Hybrid-Feldern hat.

Die durchschnittlichen Sensitivitätswerte stiegen mit zunehmender DC- und AC-Feldstärke an, was allerdings nur bei Kombinationen mit AC-Feldstärken von 8 und 14 kV/m sichtbar wird. Da Unterschiede in den Sensitivitäten von $d' < 1$ nicht interpretierbar sind, kann gefolgert werden, dass

keine Detektion im Gruppendurchschnitt bei AC-Feldstärken von 1, 2 und 4 kV/m stattfand, unabhängig von der DC-Komponente. Im Gegensatz dazu konnte auf numerischer Ebene ein Teilnehmer sogar die niedrigste Feldstärkekombination von 1 kV/m DC und 1 kV/m AC erkennen. Interessanterweise führt eine Erhöhung der DC-Komponente nicht dazu, dass mehr Teilnehmer erfolgreich elektrische Hybrid-Felder erkennen, wenn die AC-Feldstärke 1 kV/m beträgt. Im Vergleich zu Jankowiak et al. (2022) war die Verteilung der Sensitivitätswerte über Testbedingungen ähnlich, während in der früheren Studie eine AC-Komponente von 1–4 kV/m mit variierenden DC-Feldstärken kombiniert wurde. Die insgesamt numerische Verteilung der Teilnehmer, die eine bestimmte Hybrid-Feldstärke erfolgreich erkannten, war ebenfalls ähnlich und reichte von 1 bis 44 in der aktuellen Studie ($n = 49$), während sie in der früheren Studie ($n = 51$, Jankowiak et al., 2022) von 1 bis 43 reichte. Dennoch konnten auf einer detaillierten Ebene elf Proband*innen der früheren Studie erfolgreich 1 kV/m DC und 4 kV/m AC erkennen, während in der aktuellen Studie nur zwei Proband*innen diese Feldstärkekombination erkennen konnten. Dieser Unterschied könnte durch einen anderen Kontext erklärt werden, der durch das dominante elektrische Feld definiert ist. Während in der früheren Studie von den Teilnehmenden verlangt wurde, DC-Felder zu erkennen (kombiniert mit niedrigen AC-Feldern), war in der aktuellen Studie AC die Hauptkomponente (kombiniert mit niedrigen DC-Feldern).

Die Detektionsschwellen für kombinierte Feldstärken nahmen insgesamt mit zunehmender DC-Komponente ab. Dennoch wurde in Testbedingung 4 eine leichte Änderung der Richtung dieses Trends beobachtet. Dieser Effekt kann hauptsächlich auf Ausreißer im Bereich von 12 bis 15 kV/m zurückgeführt werden (siehe Abbildung 4). Diese Ausreißer in den Testbedingungen 3 und 4 könnten einen Teil einer Gruppe am oberen Ende der Verteilung widerspiegeln, die Felder mit AC-Dominanz weniger gut erkennen können als elektrische Felder mit DC-Dominanz, die in der früheren Studie angewendet wurden. Im Vergleich zu Jankowiak et al. (2022) waren die Erkennungsschwellen mit 9,6 kV/m (ehemals: 8,89 kV/m), 7,19 kV/m (ehemals: 7,82 kV/m), 6,35 kV/m (ehemals: 6,48 kV/m) und 6,83 kV/m (ehemals: 5,7 kV/m) für Testbedingungen 1, 2, 3 und 4 ähnlich. Eine DC-Komponente von 1, 2 und 3 kV/m ist mit einem statistisch signifikanten Rückgang der Detektionsschwellen verbunden, während bei einem DC-Feld von 4 kV/m kein weiterer Rückgang der durchschnittlichen Detektionsschwelle beobachtet wurde, was durch individuelle Leistungsunterschiede bei der Wahrnehmung von elektrischen Feldern mit AC- und DC-Dominanz erklärt werden könnte.

3.4. Einschränkende Anmerkungen

Die Übertragbarkeit der aktuellen Ergebnisse auf die Bevölkerung kann nicht erfolgen, da nur Teilnehmer mit einer überdurchschnittlichen Fähigkeit zur Erkennung von Hybrid-Feldern einbezogen wurden, um eine möglichst homogene Kohorte zu erhalten. Darüber hinaus wurden die

Teilnehmenden aus Sicherheitsgründen während der Experimente geerdet. Daher könnte die Wahrnehmung unter realen Bedingungen von der Wahrnehmung innerhalb der im Rahmen der aktuellen Studie angewendeten Laboreinrichtung abweichen. Bei der Berechnung der Erkennungsschwellen wurden Probanden*innen, die in mindestens einer Testbedingung un plausible Verläufe aufwiesen, aus der Gesamtanalyse ausgeschlossen, was zu einer Gesamtanzahl von $n = 14$ führte, die in der rm-ANOVA zu den Detektionsschwellen einbezogen wurden (siehe 3.2.2). Die Analysen von d' sowie die in Abbildung 4 dargestellten Daten zu den Detektionsschwellen sind von dieser Einschränkung nicht betroffen.

3.5. Implikationen

Die statistisch signifikante Korrelation zwischen den Erkennungsleistungen in der aktuellen Studie (Kursawe et al., 2023) und der früheren Studie (Jankowiak et al., 2022) unterstreicht die Robustheit der Ergebnisse hinsichtlich der hier durchgeführten Forschung. Es wurden jedoch Unterschiede in der Leistung zwischen den beiden Studien beobachtet, die auf Variationen in den Anteilen von DC- und AC-Komponenten zurückgeführt werden können. Während die Erkennungsschwellen der meisten Probanden*innen in beiden Studien ähnlich waren, unterschied sich die Verteilung der Leistung einiger Proband*innen, möglicherweise aufgrund individueller Faktoren wie der Körperbehaarung. Weitere Forschung, die sich auf individuelle Faktoren konzentriert, ist erforderlich, um diese Mechanismen besser zu verstehen. Die Ergebnisse der aktuellen Studie zeigen deutlich den Einfluss der DC-Komponente auf die menschliche Wahrnehmung von Hybrid-Feldern, wie die Abnahme der Detektionsschwellen in den kombinierten Feldstärken mit zunehmender DC-Feldstärke belegt. Bei der Konstruktion von Hochspannungsleitungen könnte dieses Ergebnis dazu beitragen, die Pylonengeometrie so zu gestalten, dass sensorische Prozesse bei Menschen in unmittelbarer Nähe vermieden werden. In Kombination mit den Ergebnissen von Jankowiak et al. (2022) lässt sich folgern, dass sowohl die steigende DC- als auch AC-Komponente die kombinierten Detektionsschwellen statistisch signifikant senken. Daher sollten beide Komponenten im Konstruktionsprozess gleichermaßen berücksichtigt werden. Die aktuellen Ergebnisse können dazu beitragen, die Energiewende zu realisieren, indem sie Richtwerte für die Feldwahrnehmung einer überdurchschnittlich sensitiven Kohorte bereitstellen.

4. AP4: Wirkmechanismen – Rolle der Behaarung

In diesem Arbeitspaket werden biologische Wirkmechanismen an einer möglichst altershomogenen Probandengruppe untersucht. Dabei stehen vor allem die Haare als möglicher Wirkmechanismus der Wahrnehmung elektrischer Felder im Fokus. Um den Einfluss der Behaarung auf die Fähigkeit zur

Wahrnehmung elektrischer Felder bestmöglich abzubilden, wurden dieselben Proband*innen mit und ohne Haare untersucht, sowie Haarproben jedes Teilnehmenden laboranalytisch untersucht.

4.1. Methodik

4.1.1. Probanden*innen

Insgesamt wurden 30 gesunde weibliche und männliche Proband*innen in die Studie eingeschlossen. Voraussetzung für die Teilnahme war, dass keinerlei Vorerfahrung mit der Exposition und Wahrnehmung elektrischer Felder bestand. Die Proband*innen waren zwischen 18 und 35 Jahre alt (Altersdurchschnitt: 25,8 Jahre). 15 Probanden waren männlich und 15 weiblich. Bei der Auswahl der Probanden*innen wurde darauf geachtet ein möglichst breites Spektrum an unterschiedlichen Haareigenschaften in die Studie einzuschließen. Um einen nennenswerten Unterschied zwischen der unrasierten und der rasierten Bedingung zu gewährleisten, waren eine volle Kopfbehaarung und eine Mindesthaarlänge von 3 cm vorgegeben. Ausgeschlossen wurden u. a. Personen mit elektronischen Implantaten oder Piercings, Personen, die sich selbst als elektrosensibel bezeichnen würden, sowie Personen mit Hauterkrankungen oder neurologischen Erkrankungen. Im Rahmen der ärztlichen Begutachtung vor Studieneinschluss erfolgte eine ausführliche Anamnese, u. a. zu Substanzmissbrauch (Alkohol, Drogen, Medikamente), gefolgt von einer körperlichen Untersuchung. Die körperliche Untersuchung umfasste Parameter, wie Vitalzeichen (Puls, Blutdruck), Infektionszeichen, Auffälligkeiten an der Haut sowie Sensibilitätsstörungen oder neurologische Auffälligkeiten. Bei weiblichen Probanden erfolgte zusätzlich ein hCG-Test, um eine bestehende Schwangerschaft auszuschließen. Alle Teilnehmenden erhielten eine Aufwandsentschädigung von insgesamt 600 € sowie einen Gutschein für ein Mittagessen in der hauseigenen Kantine an beiden Testtagen. Für das Vorhaben lag ein positives Votum der Ethikkommission der Medizinischen Fakultät der RWTH Aachen (EK435/21) vor und es erfolgte eine Präregistrierung beim Deutschen Register für klinische Studien (DRKS, 00027400).

4.1.2. Versuchsdesign

Nach der prüfärztlichen Untersuchung um 8:30 Uhr morgens erfolgte am ersten Testtag eine ausführliche Einweisung in die Laborsituation durch die Versuchsleitung. Dabei wurden technische Hintergründe, Sicherheitseinrichtungen, sowie der konkrete Ablauf der Wahrnehmungsuntersuchung erläutert und mögliche Fragen geklärt. Nach der Haarprobenentnahme an Testtag 1 (siehe 4.1.3), bzw. der Überprüfung der vollständigen Rasur an Testtag 2 begannen die Wahrnehmungsuntersuchungen. Während der Exposition mit verschiedenen Feldstärkekombinationen saß die Testperson in der Mitte

des Expositionsraums und folgte den Anweisungen, welche auf die vor ihm/ihr liegende Wand projiziert wurden. Mithilfe einer Antwortbox konnte nach jedem Durchgang der momentane Wahrnehmungseindruck angegeben werden. Der Testablauf war identische zur Methodik in AP3 (siehe Kapitel 3.1.3). Es wurden AC- und DC-Felder in verschiedenen Stärken getestet sowie Kombinationen aus AC- und DC-Feldern (Hybrid-Felder, siehe Tabelle 4). Neben den Feldexpositionen wurde die gleiche Anzahl an Scheinexpositionen präsentiert. Durch das doppelblinde Studiendesign und die zufällige Reihenfolge der Expositionen wusste weder der/die Proband*in noch die Versuchsleitung zu welchem Zeitpunkt ein elektrisches Feld vorhanden war. Dadurch konnten sowohl eine Erwartungshaltung des/der Proband*in als auch eine Beeinflussung durch die Versuchsleitung ausgeschlossen werden. Insgesamt nahm jede/r Proband*in an zwölf Sitzungen mit einer Dauer von jeweils etwa 15 Minuten teil, die in zufälliger Reihenfolge durchgeführt wurden. Dies führte inklusive der prüfärztlichen Untersuchung, der Unterweisung der Proband*innen, sowie den Pausen zwischen den Blöcken zu einer ungefähren Gesamttestdauer von maximal 8 Stunden.

Tabelle 4: Feldstärken in den jeweiligen Feldarten, die im Rahmen des SDT-Verfahrens verwendet wurden. Jeder Testperson wurde eine Feldstärke 10-mal bei 50 % rel. Luftfeuchtigkeit und 8-mal bei 30 % oder 70 % rel. Luftfeuchtigkeit präsentiert. Der Anteil der Scheindurchgänge ist in Klammern angegeben. Expositionen wurden in Sitzungen von je 40 (bzw. 36) Durchgängen zusammengefasst. Die Feldart war innerhalb einer Sitzung konstant. Die Reihenfolge der Expositionen bzw. Scheinexpositionen wurde randomisiert. Die kombinierten Feldstärken in der Hybrid-Bedingung wurden nach folgender Formel berechnet: $E_{RMS} = \sqrt{E_{DC}^2 + E_{AC}^2}$.

Feldart	DC- Feldstärke (kV/m)	AC- Feldstärke (kV/m)	Kombinierte Feldstärke (kV/m)	Anzahl der Durchgänge bei 50 % rel. Luftfeuchtigkeit	Anzahl der Durchgänge bei 30 % oder 70 % rel. Luftfeuchtigkeit
DC	14, 22, 30, 38	-		80 (40)	72 (36)
AC	-	8, 16, 24, 30		80 (40)	72 (36)
Hybrid	2, 8, 16, 24	4	4,47, 8,94, 16,49, 24,33	80 (40)	72 (36)

Um den Einfluss unterschiedlicher Umgebungsbedingungen zu untersuchen, wurde die relative Luftfeuchtigkeit innerhalb eines Testtages variiert. Während der ersten sechs Sitzungen am Vormittag betrug die relative Luftfeuchtigkeit im Labor 50 %. Nachmittags wurde die relative Luftfeuchtigkeit bei der Hälfte der Teilnehmenden auf 30 % verringert, bei der anderen Hälfte auf 70 % erhöht (vgl. Tabelle

4 für die jeweilige Anzahl der Durchgänge). Diese Variation war an beiden Testtagen innerhalb einer Testperson identisch. Die Temperatur wurde zu jeder Zeit mit 22 °C konstant gehalten.

Der beschriebene Testablauf wurde bei jeder Testperson zweimal im Abstand von sieben Tagen durchgeführt (Testtag 1 und Testtag 2). Die Personen wurden instruiert, sich am Vorabend des zweiten Testtags die Haare auf dem Kopf, an den Armen und ggf. im Gesicht (Barthaar) gänzlich mittels Nassrasur zu entfernen. Augenbrauen und Wimpern waren von der Maßnahme nicht betroffen. Die Reihenfolge der Sitzungen war wie die Variation der Luftfeuchtigkeit am zweiten Testtag identisch, wobei die Präsentation der Expositions- und der Scheindurchgänge innerhalb der Sitzungen in zufälliger Reihenfolge erfolgte, um weiterhin ein doppelblindes Studiendesign zu gewährleisten.

Eine zusätzliche Variation wurde bei Teilnehmerinnen eingefügt: Sie wurden an beiden Testtagen instruiert sich nach den ersten drei Sitzungen am Morgen Wimperntusche aufzutragen, um zusätzlich dadurch entstehende Veränderungen in der Feldwahrnehmung zu untersuchen.

Direkt nach der jeweils ersten Sitzung einer Feldart (AC, DC, Hybrid) wurden die Teilnehmenden an Testtag 1 befragt, an welchen Orten sie die Wahrnehmungsempfindung hatten. Dabei konnten freie Antworten gegeben werden, die durch die Versuchsleitung protokolliert wurden.

4.1.3. Charakterisierung der Haare

Zum Zweck einer detaillierten Laboranalyse wurde jeder Testperson an Testtag 1 unmittelbar vor Beginn der Wahrnehmungsuntersuchung eine Haarprobe entnommen. Dazu wurden Kopfhare an verschiedenen Stellen im Umfang von mindestens 150 Milligramm möglichst nah an der Kopfhaut abgeschnitten. Um eine Verfälschung der Haaranalysen zu vermeiden und den Zustand der Haare möglichst konstant zu halten, wurden die Probanden*innen instruiert, ihre Haare am Vortag zu waschen und keine Pflege- oder Stylingprodukte aufzutragen. Zusätzlich wurden etwa 10 Haare von beiden Unterarmen in möglichst voller Länge abgeschnitten und für die Laboranalyse verpackt. Auch die Armhaare wurden zuvor nicht eingecremt oder behandelt.

4.1.4. Bestimmung der Feuchtigkeit

Basierend auf zuvor durchgeführten Voruntersuchungen wurde im Zuge der Feuchtigkeitsmessungen ausschließlich das Verfahren der Thermogravimetrischen Analyse (TGA) eingesetzt (siehe Abbildung 6). Dies bietet die Möglichkeit neben der prozentualen Gesamtwassermenge, auch die vorhandene externe (bei einer Temperatur von 65 °C) und interne (bei einer Temperatur von 180 °C) Feuchtigkeit zu bestimmen. Die Kopfhhaarproben der 30 Proband*innen (jeweils drei Proben/Proband*in) wurden

vor den TG-Analysen für 24 Stunden in einer Klimakammer konditioniert, um die Umgebungsbedingungen im Expositionslabor zu rekonstruieren. Dabei wurde die Temperatur bei ca. 22 °C (± 3 °C) konstant gehalten, während sich die relative Luftfeuchtigkeit (30 %, 50 %, 70 %; jeweils mit einer Standardabweichung von ± 3 %) nach den individuellen Umgebungsbedingungen während der Wahrnehmungsuntersuchungen richtete. Somit wurden die Proben hälftig mit 50 % und 30 % relativer Luftfeuchtigkeit bzw. 50 % und 70 % relativer Luftfeuchtigkeit konditioniert. Anschließend wurden die Proben in einem 100 μ l großen Aluminiumtiegel hermetisch verschlossen und erst kurz vor Messbeginn mithilfe einer Vorrichtung an der TGA angestochen und anschließend unmittelbar mit folgenden Parametereinstellungen in der TGA zweistufig untersucht:

Bestimmung der externen Feuchtigkeit des Kopfhaars (*KH_ExtHum*): Temperaturbereich: 30 °C bis 65 °C; Heizrate: 20 °C/min.; Isotherme Haltezeit bei 65 °C: 40 Minuten.

Bestimmung der internen Feuchtigkeit des Kopfhaars (*KH_IntHum*): Temperaturbereich: 65 °C bis 180 °C; Heizrate: 20 °C/min.; Isotherme Haltezeit bei 180 °C: 30 Minuten.

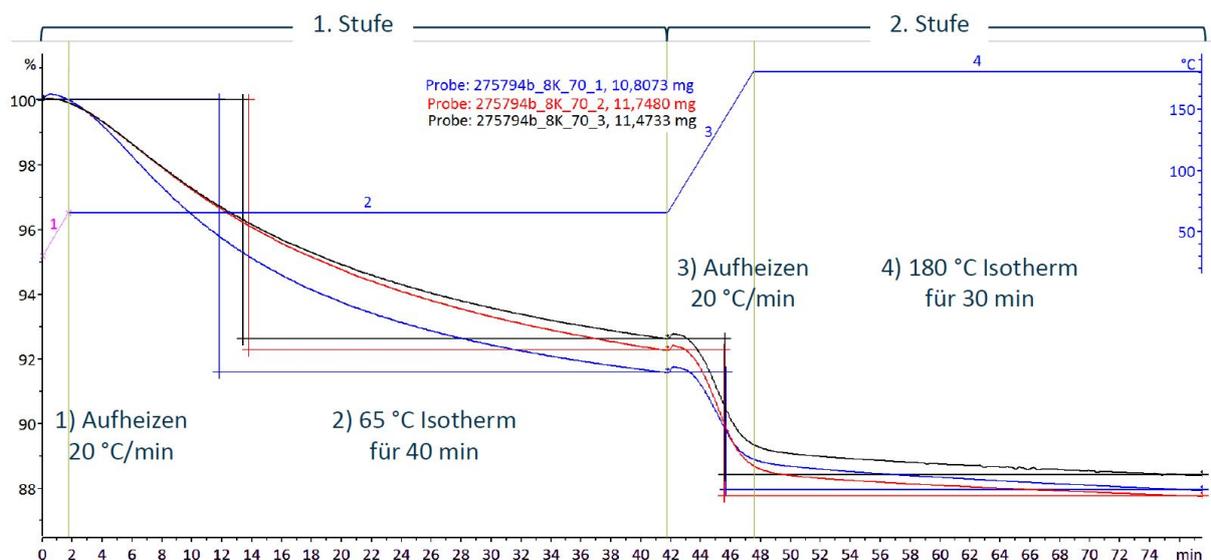


Abbildung 6: Illustration der TGA anhand von drei Beispielproben. Zu erkennen sind zwei Stufen mit jeweils einer Aufheizphase (20 °C/min) und einer isothermen Phase bei 65 °C in der ersten und 180 °C in der zweiten Stufe.

4.1.5. Mikroskopische Analyse

Um die Haarlänge für die Kopf- und Armhaare (*KH_Länge*; *AH_Länge*) vermessen zu können, wurde die Messmethode in Abhängigkeit der Haarlänge gewählt. Haare mit einer Länge von weniger als 150 mm wurden mit einem analogen Messschieber gemessen und längere Haare mittels Stahllineal. Die Haare wurden zum Vermessen manuell unter leichter Spannung aufgeklebt, um natürliche

Krümmungen (z. B. bei lockigen oder welligen Haaren) ausgleichen zu können. Hierbei wurden stets drei Haare pro Proband*in und Konditionierungszustand vermessen. Die Messung der Haardicke für Kopf- und Armhaar (*KH_Dicke*; *AH_Dicke*) fand an den zuvor aufgeklebten Haaren statt (siehe Abbildung 7). Dabei wurden stets drei Positionen eines jeden Haares vermessen. Position 1 wurde nah an der Haarwurzel gewählt, Position 2 in der Mitte des Haares (bezogen auf die Gesamtlänge) und Position 3 am Ende des Haares (Haarspitze, welche bei Kopfhaaren in der Regel abgeschnitten ist). Die Messungen wurden dabei mit Hilfe eines Lichtmikroskops durchgeführt (Kombination von Auf- und Durchlichtverfahren). Alle Haare wurden an gleichwertigen Positionen zu den Haardickenmessungen mittels LSM (Laser Scanning Microscope) hinsichtlich der Rauheit vermessen (siehe Abbildung 8). Die maximale Höhe der Rauheit (*KH_Rz*; *AH_Rz*) berechnet sich als Mittelwert von fünf Einzelrautiefen aufeinanderfolgender Einzelmessstrecken innerhalb der gewählten Position. Um den Konditionierungszustand bestmöglich erhalten zu können, wurden alle Messungen eines jeden Haares nach Öffnung des versiegelten Probenbehälters innerhalb von maximal 30 Minuten durchgeführt. Dabei wurde stets zuerst die Haardicke, anschließend die Haarrauheit und zum Schluss die Haarlänge vermessen. Für die statistische Betrachtung wurden die Messungen an den drei Positionen gemittelt.

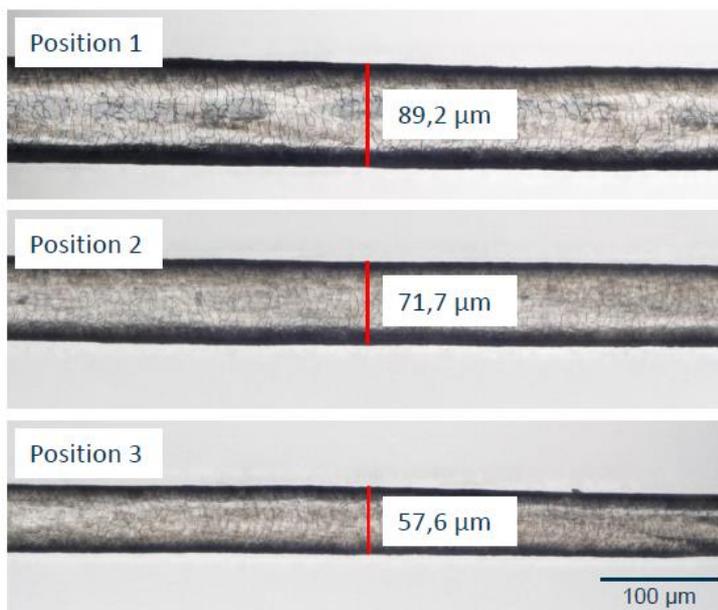
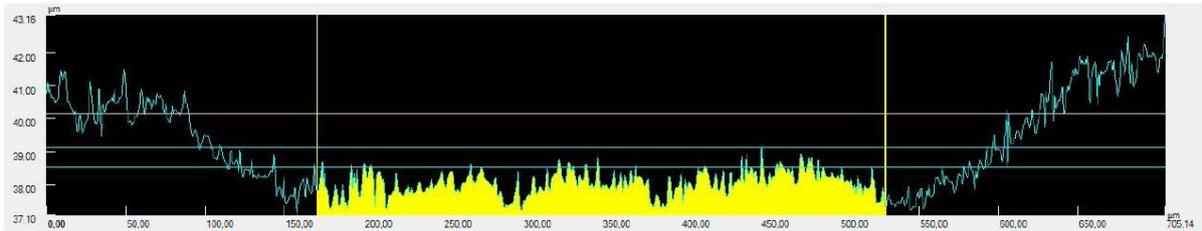
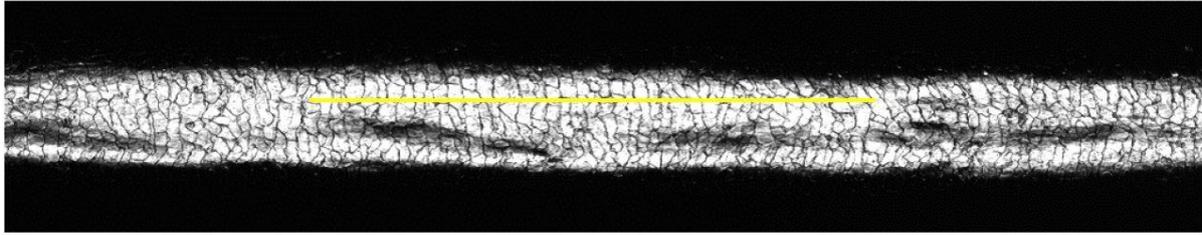


Abbildung 7: Beispiel der lichtmikroskopischen Messung der Haardicke an den drei Positionen nahe der Haarwurzel (1), in der Mitte des Haares (2), sowie nahe der Haarspitze (3).



$$R_z = 1,93 \mu\text{m}$$

Abbildung 8: Beispiel der lasermikroskopischen Messung der Rauheit (R_z) eines Kopfhaares.

4.1.6. Datenauswertung

Die Auswertung der Daten, die Berechnung der Sensitivitäten d' sowie der Schwellenwerte erfolgte analog zum Verfahren aus AP3 (siehe Kapitel 3.1.4.). Es wurden Sensitivitätswerte für jede Testperson und jede Feldstärke bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 % sowie bei der Hälfte der Proband*innen bei 30 % bzw. 70 % gebildet. Die Berechnung der Wahrnehmungsschwellen in Bezug auf die verschiedenen Umgebungsbedingungen erfolgte unter Berücksichtigung plausibler Verläufe (vgl. Abschnitt 3.1.4).

Zur statistischen Betrachtung der Sensitivitäten d' wurde für jede Feldart (AC, DC, Hybrid) eine messwiederholte Varianzanalyse (rm ANOVA) mit den Faktoren *Feldstärke* (DC: 14, 22, 30, 38 kV/m; AC: 8, 16, 24, 30 kV/m; Hybrid: 4,47, 8,94, 16,49, 24,33 kV/m) und *Testtag* (1, 2) gerechnet, wobei hier zunächst nur Testungen bei 50 % relativer Luftfeuchtigkeit einbezogen wurden. Für die gezielte Überprüfung des Einflusses der relativen Luftfeuchtigkeit wurden rm ANOVAs zusätzlich um den Faktor *rel. Luftfeuchtigkeit* (50 %, 30 %, bzw. 50 %, 70 %) ergänzt. Da die relative Luftfeuchtigkeit in zwei Subgruppen (30 % und 50 %, sowie 50 % und 70 %) untersucht wurde, halbierte sich hier die Anzahl der möglichen Proband*innen (jeweils $n = 15$). Für die statistische Auswertung der Schwellenwerte wurden rm ANOVAs für jede Feldart mit dem Faktor *Testtag* (1, 2) gerechnet. Für die Aussagen im Hinblick auf die relative Luftfeuchtigkeit, wurden die Analysen um den Faktor *rel. Luftfeuchtigkeit* (50 %, 30 %, bzw. 50 %, 70 %) ergänzt. Auch hier halbierte sich die mögliche Anzahl der Proband*innen

gemäß den Subgruppen (jeweils $n = 15$). Zur Untersuchung des Einflusses der Wimperntusche während einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 % wurde für jede Feldart eine rm ANOVA mit den Faktoren *Feldstärke* (DC: 14, 22, 30, 38 kV/m; AC: 8, 16, 24, 30 kV/m; Hybrid: 4,47, 8,94, 16,49, 24,33 kV/m), *Testtag* (1, 2) und *Wimperntusche* (mit, ohne) ausschließlich unter Einschluss der Probandinnen ($n = 15$) gerechnet. Dabei wurden aus Gründen der Relevanz nur statistisch signifikante Ergebnisse im Hinblick auf den Faktor *Wimperntusche* berichtet. Ein α -Niveau von $p = 0,05$ wurde für die statistische Signifikanz akzeptiert, und partielle Eta-Quadrat-Werte (η^2) wurden zur Schätzung der Effektstärken angegeben. Wenn die Sphärizität nicht angenommen werden konnte, wurden korrigierte Signifikanzwerte nach Greenhouse-Geisser (Greenhouse & Geisser, 1959) mit unkorrigierten Freiheitsgraden angegeben.

Um Zusammenhänge zwischen den Parametern der mikroskopischen Haaranalysen (Länge, Dicke, Rauheit) und den Wahrnehmungsschwellen zu beleuchten, wurden Korrelationsanalysen durchgeführt. Zusammenhänge zwischen der TGA und den Wahrnehmungsschwellen wurden ebenfalls korrelativ betrachtet. Für die Zusammenhangsanalysen wurden ausschließlich die Wahrnehmungsschwellen von Testtag 1 (mit Haaren) herangezogen, da der Einfluss der Haare mit all seinen Charakteristiken hier gegeben ist. Um den Einfluss der Anzahl der Analysen auf den Alphafehler zu relativieren wurde eine Korrektur nach Bonferroni vorgenommen.

Die Auswertung der Befragungsdaten hinsichtlich des Wahrnehmungsortes wurden numerisch deskriptiv ausgewertet. Es wurden Cluster gebildet für die Region *Kopf*, *Arme*, und *Beine*. *Kopf* umfasste Nennungen wie z. B. Gesicht, Haare, Haaransatz, Nacken, Nase, oder Ohren. Die Region *Arm* umfasste Nennungen wie Oberarm, Unterarm, Finger, oder Handflächen. Unter der Region *Beine* wurden Nennungen wie Oberschenkel, Unterschenkel, oder Fuß zusammengefasst.

4.2. Ergebnisse

4.2.1. Sensitivität

Auf deskriptiver Ebene zeigte sich unabhängig von der Feldart oder der relativen Luftfeuchtigkeit ein Anstieg der Sensitivitätswerte d' mit steigender Feldstärke (siehe Abbildung 9). Dabei konnten Proband*innen bei einer Luftfeuchtigkeit von 50 % Feldstärken ab 22 kV/m DC, 16 kV/m AC sowie ab 16,49 kV/m Hybrid im Mittel erfolgreich wahrnehmen. In einer relativen Luftfeuchtigkeit von 30 % zeigte sich ein geteiltes Bild (siehe Abbildung 10). So konnten DC-Felder im Mittel erst ab 30 kV/m erfolgreich detektiert werden, während AC-Felder insgesamt höhere d' -Werte aufwiesen. Bei hoher relativer Luftfeuchtigkeit (70 %) zeigte sich ein umgekehrtes Bild: Bereits ab 14 kV/m konnten DC-

Felder erfolgreich detektiert werden, AC-Felder hingegen erst ab 24 kV/m. Proband*innen profitierten bei der Wahrnehmung von Hybrid-Feldern insgesamt von hoher relativer Luftfeuchtigkeit. So fand bei 30 % relativer Luftfeuchtigkeit im Mittel eine erfolgreiche Wahrnehmung erst bei einer kombinierten Feldstärke von 24,33 kV/m statt, wohingegen bei 70 % im Mittel eine erfolgreiche Wahrnehmung bei 8,94 kV/m erreicht wurde. Bezogen auf die Anzahl der Proband*innen, die eine erfolgreiche Wahrnehmung ($d' \geq 1$) für eine bestimmte Feldart und Feldstärke aufwiesen, zeichnete sich ein vergleichbares Bild ab (siehe Abbildung 11). Allerdings trat insgesamt der Nachteil hoher relativer Luftfeuchtigkeit (vgl. 70 % vs 50 %) bei AC-Feldern nicht so deutlich hervor. Hinsichtlich der Haarentfernung waren an Testtag 2 über alle Feldstärken hinweg deutlich herabgesetzte Sensitivitätswerte zu beobachten. Dies war unabhängig von der relativen Luftfeuchtigkeit oder der Feldart. So wurden bei 50 % relativer Luftfeuchtigkeit an Testtag 2 erfolgreiche Wahrnehmungen der DC-Felder erst ab 30 kV/m gefunden, bei AC-Feldern ab 24 kV/m und bei Hybrid-Feldern ab einer Feldstärke von 16,49 kV/m. Die Richtung des Einflusses der relativen Luftfeuchtigkeit blieb an Testtag 2 unverändert.

Die statistischen Analysen untermauern das deskriptive Bild. So sind bei Betrachtung der Sensitivitätswerte bei 50 % relativer Luftfeuchtigkeit signifikante Haupteffekte für *Feldstärke* und *Testtag* bei DC und Hybrid, sowie ausschließlich ein signifikanter Haupteffekt für *Feldstärke* bei AC zu finden (Tabelle 5). Dieser nur marginal signifikante Effekt ($p = 0,058$) könnte in der hohen interindividuellen Varianz der Sensitivitätswerte bei AC begründet sein (vgl. Abbildung 10). In den Analysen der Subgruppen mit 30 % und 50 % relativer Luftfeuchtigkeit wurden signifikante Haupteffekte für diesen Faktor für DC und Hybrid, nicht aber für AC, gefunden (siehe Tabelle 6). In der Subgruppe, die 50 % und 70 % relative Luftfeuchtigkeit erlebte, war für DC-, AC- sowie Hybrid-Felder ein signifikanter Effekt hinsichtlich dieses Faktors zu beobachten (Tabelle 7).

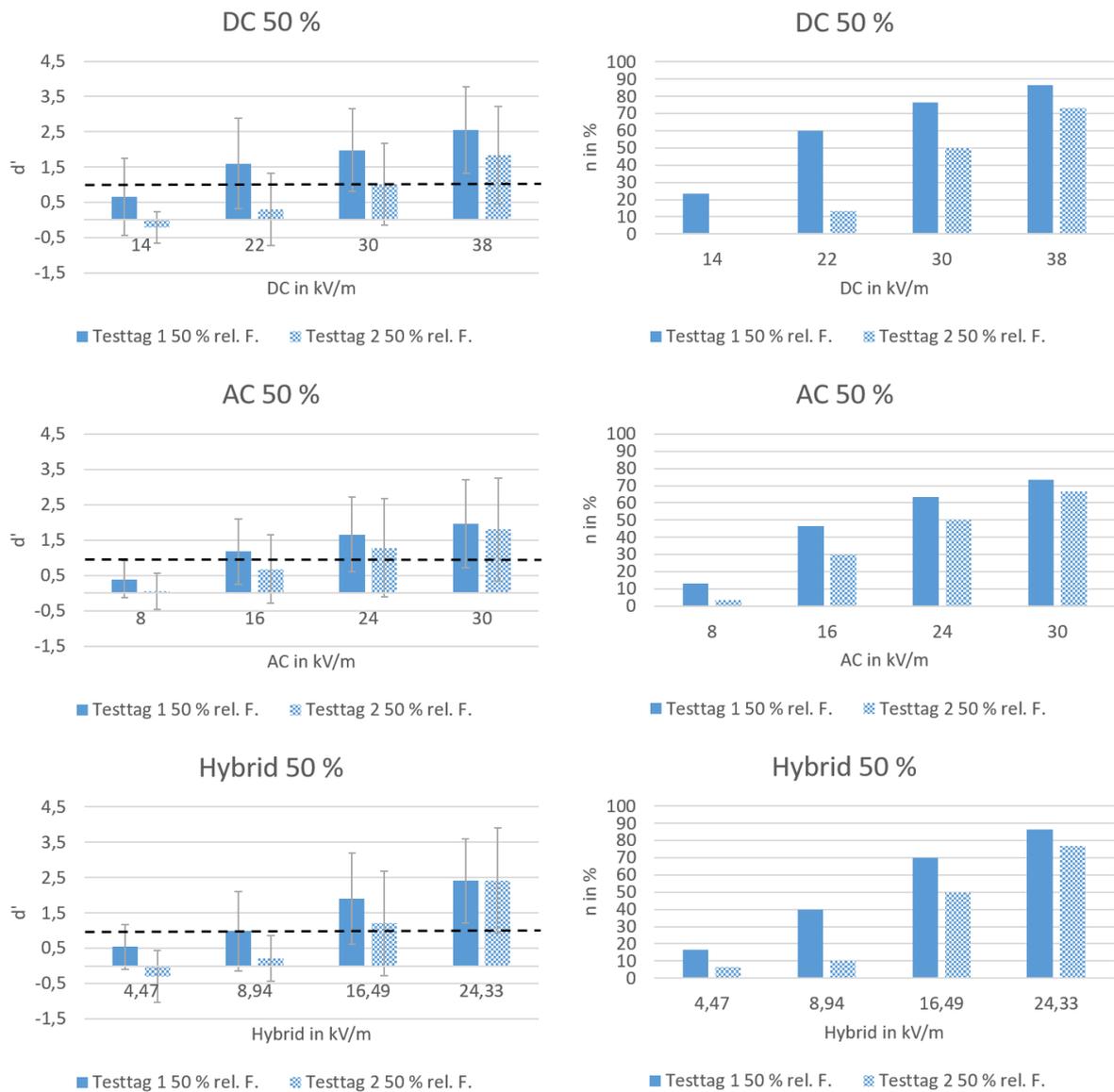


Abbildung 9: Links: Sensitivitäten d' für alle dargebotenen Feldstärken für DC-, AC-, und Hybrid-Felder aufgeteilt nach Testtagen (Testtag 1 mit Haaren und Testtag 2 ohne Haare) für alle Proband*innen ($n = 30$). Balken repräsentieren Standardabweichungen. Die gestrichelte Linie markiert einen d' -Wert = 1, ab dem von einer erfolgreichen Wahrnehmung ausgegangen wird. Rechts: Anteil der Teilnehmenden in Prozent, die eine bestimmte Feldstärke erfolgreich wahrgenommen haben ($d' \geq 1$) für DC-, AC-, und Hybrid-Felder aufgeteilt nach Testtagen (Testtag 1 mit Haaren und Testtag 2 ohne Haare).

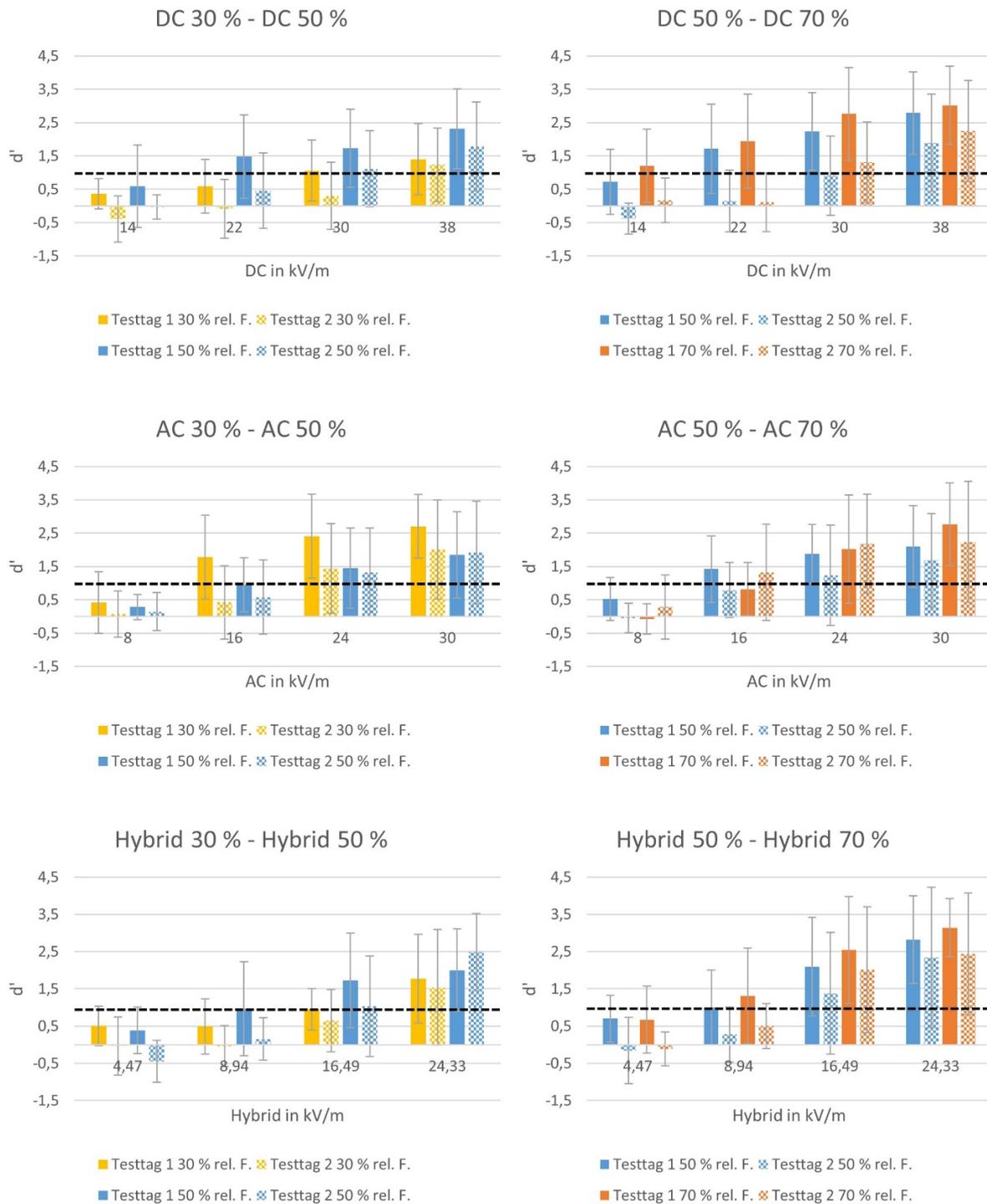


Abbildung 10: Sensitivitäten d' für alle dargebotenen Feldstärken für DC-, AC-, und Hybrid-Felder aufgeteilt nach beiden Probandengruppen, die entweder 30 % und 50 % oder 50 % und 70 % relative Luftfeuchtigkeit erlebten, und beiden Testtagen (Testtag 1 mit Haaren und Testtag 2 ohne Haare). Innerhalb aller Diagramme werden dieselben Probanden in den unterschiedlichen Bedingungen miteinander verglichen ($n = 15$). Balken repräsentieren Standardabweichungen. Die gestrichelte Linie markiert einen d' -Wert = 1, ab dem von einer erfolgreichen Wahrnehmung ausgegangen wird.

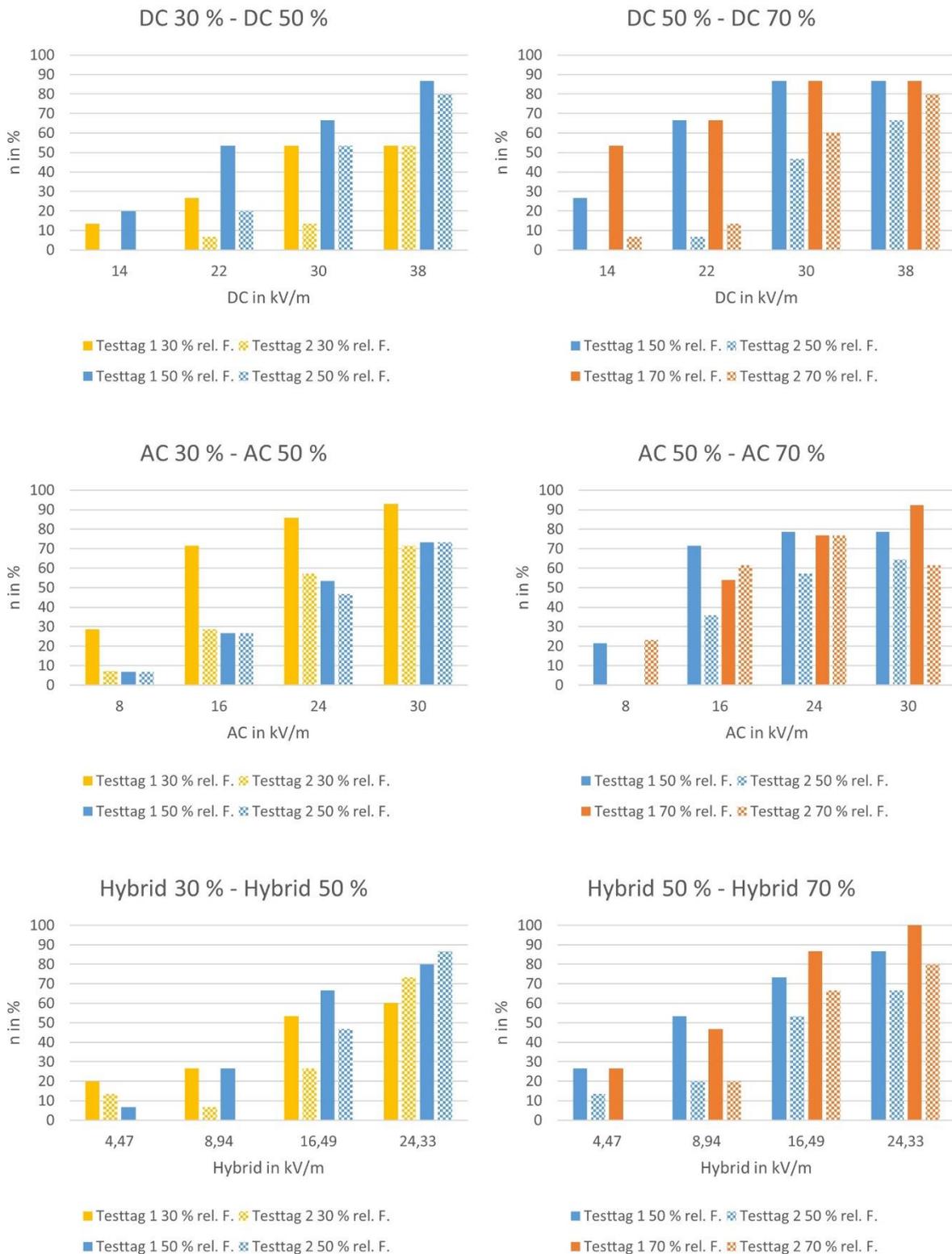


Abbildung 11: Anteil der Teilnehmenden in Prozent, die eine bestimmte Feldstärke erfolgreich wahrgenommen haben ($d' \geq 1$) für DC-, AC-, und Hybrid-Felder aufgeteilt nach den beiden Probandengruppen, die entweder 30 % und 50 % oder 50 % und 70 % relative Luftfeuchtigkeit erlebten, und beiden Testtagen (Testtag 1 mit Haaren und Testtag 2 ohne Haare). Innerhalb aller Diagramme werden dieselben Probanden in den unterschiedlichen Bedingungen miteinander verglichen ($n = 15$).

Tabelle 5: Ergebnisse der 4 × 2 rm ANOVAs der Sensitivitäten d' für DC (n = 30), AC (n = 29) und Hybrid (n = 30) mit den Faktoren *Feldstärke* (DC: 14, 22, 30, 38 kV/m; AC: 8, 16, 24, 30 kV/m; Hybrid: 4,47, 8,94, 16,49, 24,33 kV/m) und *Testtag* (1, 2). Signifikante Effekte ($p \leq 0,05$) sind fett markiert.

Feldart	Faktor	df	F	p	η_p^2
DC	<i>Feldstärke</i>	3, 87	75,4	<0,001	0,72
	<i>Testtag</i>	1, 29	23,44	<0,001	0,45
	<i>Feldstärke*Testtag</i>	3, 87	2,41	0,1	0,08
AC	<i>Feldstärke</i>	3, 84	53,29	<0,001	0,66
	<i>Testtag</i>	1, 28	3,92	0,058	0,12
	<i>Feldstärke*Testtag</i>	3, 84	0,52	0,61	0,02
Hybrid	<i>Feldstärke</i>	3, 87	72,94	<0,001	0,72
	<i>Testtag</i>	1, 29	17,43	<0,001	0,38
	<i>Feldstärke*Testtag</i>	3, 87	3,50	0,025	0,11

Tabelle 6: Ergebnisse der $2 \times 4 \times 2$ rm ANOVAs der Sensitivitäten d' für die Subgruppe, die Variationen der relativen Luftfeuchtigkeit von 30 % und 50 % erfuhren für DC ($n = 15$), AC ($n = 14$) und Hybrid ($n = 15$) mit den Faktoren *rel. Luftfeuchtigkeit* (30 %, 50 %), *Feldstärke* (DC: 14, 22, 30, 38 kV/m; AC: 8, 16, 24, 30 kV/m; Hybrid: 4,47, 8,94, 16,49, 24,33 kV/m) und *Testtag* (1, 2). Signifikante Effekte ($p \leq 0,05$) sind fett markiert.

Feldart	Faktor	df	F	p	η_p^2
DC	<i>Rel. Luftf.</i>	1, 14	23,1	<0,001	0,62
	<i>Feldstärke</i>	3, 42	31,08	<0,001	0,69
	<i>Testtag</i>	1, 14	7,3	0,017	0,34
	<i>Rel. Luftf. *Feldstärke</i>	3, 42	2,69	0,075	0,16
	<i>Rel. Luftf. *Testtag</i>	1, 14	0,23	0,64	0,02
	<i>Feldstärke*Testtag</i>	3, 42	1,88	0,16	0,12
	<i>Rel. Luftf. *Feldstärke*Testtag</i>	3, 42	1,23	0,31	0,08
AC	<i>Rel. Luftf.</i>	1, 13	2,5	0,14	0,16
	<i>Feldstärke</i>	3, 39	54,61	<0,001	0,81
	<i>Testtag</i>	1, 13	8,04	0,014	0,38
	<i>Rel. Luftf. *Feldstärke</i>	3, 39	1,81	0,17	0,12
	<i>Rel. Luftf. *Testtag</i>	1, 13	8,39	0,048	0,27
	<i>Feldstärke*Testtag</i>	3, 39	2,16	0,11	0,14
	<i>Rel. Luftf. *Feldstärke*Testtag</i>	3, 39	1,39	0,27	0,1
Hybrid	<i>Rel. Luftf.</i>	1, 14	5,99	0,028	0,3
	<i>Feldstärke</i>	3, 42	33,83	<0,001	0,71
	<i>Testtag</i>	1, 14	10,65	0,006	0,43
	<i>Rel. Luftf. *Feldstärke</i>	3, 42	5,74	0,005	0,29
	<i>Rel. Luftf. *Testtag</i>	1, 14	0,48	0,5	0,03
	<i>Feldstärke*Testtag</i>	3, 42	1,37	0,1	0,15
	<i>Rel. Luftf. *Feldstärke*Testtag</i>	3, 42	1,74	0,18	0,11

Tabelle 7: Ergebnisse der $2 \times 4 \times 2$ rm ANOVAs der Sensitivitäten d' für die Subgruppe, die Variationen der relativen Luftfeuchtigkeit von 50 % und 70 % erfuhren für DC ($n = 15$), AC ($n = 13$) und Hybrid ($n = 15$) mit den Faktoren *rel. Luftfeuchtigkeit* (50 %, 70 %), *Feldstärke* (DC: 14, 22, 30, 38 kV/m; AC: 8, 16, 24, 30 kV/m; Hybrid: 4,47, 8,94, 16,49, 24,33 kV/m) und *Testtag* (1, 2). Signifikante Effekte ($p \leq 0,05$) sind fett markiert.

Feldart	Faktor	df	F	<i>p</i>	η_p^2
DC	<i>Rel. Luftf.</i>	1, 14	5,28	0,038	0,27
	<i>Feldstärke</i>	3, 42	46,61	<0,001	0,77
	<i>Testtag</i>	1, 14	29,96	<0,001	0,68
	<i>Rel. Luftf.*Feldstärke</i>	3, 42	1,98	0,16	0,12
	<i>Rel. Luftf.*Testtag</i>	1, 14	0,03	0,87	0,00
	<i>Feldstärke*Testtag</i>	3, 42	3,46	0,05	0,2
	<i>Rel. Luftf.*Feldstärke*Testtag</i>	3, 42	0,54	0,61	0,04
AC	<i>Rel. Luftf.</i>	1, 12	13,01	0,004	0,52
	<i>Feldstärke</i>	3, 36	25,98	<0,001	0,68
	<i>Testtag</i>	1, 12	1,05	0,33	0,08
	<i>Rel. Luftf.*Feldstärke</i>	3, 36	8,36	<0,001	0,41
	<i>Rel. Luftf.*Testtag</i>	1, 12	10,41	0,007	0,46
	<i>Feldstärke*Testtag</i>	3, 36	0,82	0,46	0,06
	<i>Rel. Luftf.*Feldstärke*Testtag</i>	3, 36	3,09	0,06	0,21
Hybrid	<i>Rel. Luftf.</i>	1, 14	4,02	0,07	0,22
	<i>Feldstärke</i>	3, 42	48,82	<0,001	0,78
	<i>Testtag</i>	1, 14	14,12	0,002	0,50
	<i>Rel. Luftf.*Feldstärke</i>	3, 42	1,91	0,14	0,12
	<i>Rel. Luftf.*Testtag</i>	1, 14	0,004	0,95	0,0
	<i>Feldstärke*Testtag</i>	3, 42	0,24	0,87	0,02
	<i>Rel. Luftf.*Feldstärke*Testtag</i>	3, 42	0,3	0,8	0,02

4.2.2. Wahrnehmungsschwellen

Die Wahrnehmungsschwellen für die relativen Luftfeuchtigkeiten 30 %, 50 % und 70 % sind in Abbildung 12 dargestellt. In 50 % relativer Luftfeuchtigkeit stiegen die Wahrnehmungsschwellen nach der Entfernung der Haare bei DC- und Hybrid-Feldern an. Obwohl der Effekt in AC-Feldern deskriptiv sichtbar ist, erreichte der Haupteffekt in der statistischen Analyse nicht das Signifikanzniveau (siehe Tabelle 8). In den Subanalysen der Gruppen mit 30 % bzw. 70 % relativer Luftfeuchtigkeit verfehlten die Unterschiede hinsichtlich des Faktors *Testtag* zum Teil das Signifikanzniveau. Hier ist darauf hinzuweisen, dass durch das messwiederholte Design nur Personen eingeschlossen werden konnten, für die in jeder Bedingung ein Wert vorlag, was die Anzahl an eingeschlossenen Testpersonen zum Teil erheblich reduzierte (vgl. Tabelle 9 und Tabelle 10).

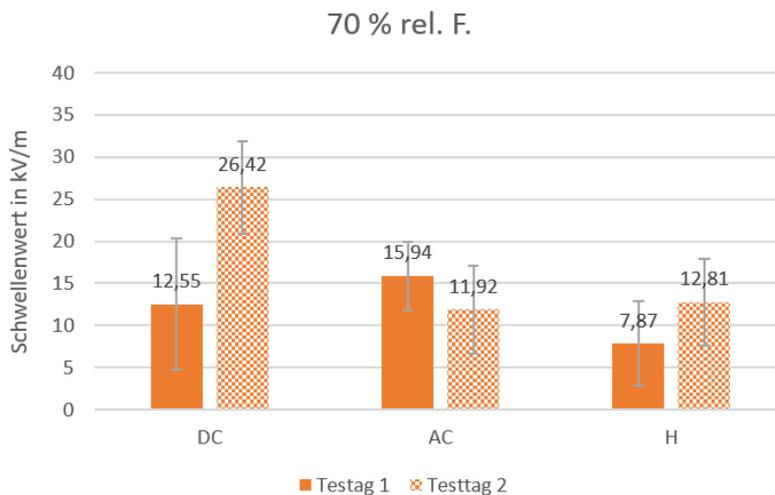
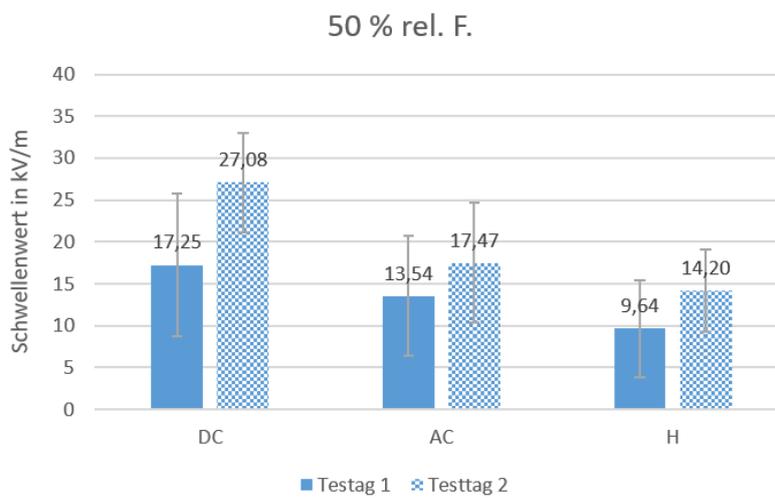
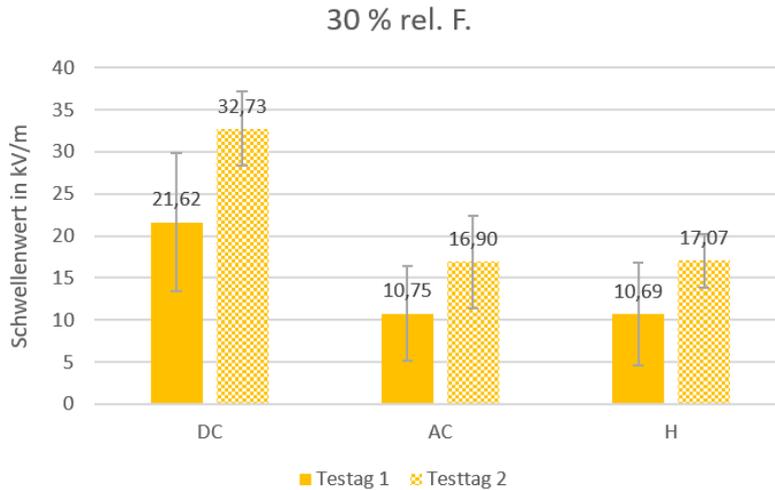


Abbildung 12: Wahrnehmungsschwellen für DC-, AC- und Hybrid-Felder aufgeteilt nach der relativen Luftfeuchtigkeit (30 %, 50 %, 70 %). Die Anzahl der eingeschlossenen Teilnehmenden betrug für 30 % relative Luftfeuchtigkeit 6, 9 und 6 für DC, AC und Hybrid; für 50 % relative Luftfeuchtigkeit 21, 16 und 21 für DC, AC, und Hybrid; für 70 % relative Luftfeuchtigkeit 11, 8 und 12 Teilnehmende für DC, AC und Hybrid. Es wurden innerhalb einer Feuchtigkeitsbedingung nur Teilnehmende eingeschlossen, für die Wahrnehmungsschwellen für beide Testtage berechnet werden konnten.

Tabelle 8: Ergebnisse der einfaktoriellen rm ANOVAs der Schwellenwerte für DC (n = 21), AC (n = 16) und Hybrid (n = 21) mit dem Faktor *Testtag* (1, 2). Signifikante Effekte ($p \leq 0,05$) sind in fett gedruckt.

Feldart	Faktor	df	F	p	η_p^2
DC	<i>Testtag</i>	1, 20	16,46	<0,001	0,45
AC	<i>Testtag</i>	1, 15	2,61	0,13	0,15
Hybrid	<i>Testtag</i>	1, 20	20,63	<0,001	0,51

Tabelle 9: Ergebnisse der 2×2 rm ANOVAs der Schwellenwerte der Subgruppe, die Variationen der relativen Luftfeuchtigkeit von 30 % und 50 % erfuhren für DC (n = 5), AC (n = 6) und Hybrid (n = 6) mit den Faktoren *rel. Luftfeuchtigkeit* (30 %, 50 %) und *Testtag* (1, 2). Signifikante Effekte ($p \leq 0,05$) sind in fett gedruckt.

Feldart	Faktor	df	F	p	η_p^2
DC	<i>Rel. Luftf.</i>	1, 4	21,88	0,009	0,85
	<i>Testtag</i>	1, 4	8,8	0,041	0,69
	<i>Rel. Luftf. *Testtag</i>	1, 4	0,23	0,66	0,06
AC	<i>Rel. Luftf.</i>	1, 5	3,45	0,12	0,41
	<i>Testtag</i>	1, 5	3,59	0,12	0,42
	<i>Rel. Luftf. *Testtag</i>	1, 5	0,48	0,52	0,09
Hybrid	<i>Rel. Luftf.</i>	1, 5	0,04	0,84	0,01
	<i>Testtag</i>	1, 5	5,13	0,07	0,51
	<i>Rel. Luftf. *Testtag</i>	1,5	0,77	0,42	0,13

Zur Untersuchung des Einflusses der Wimperntusche unter 50 % relativer Luftfeuchtigkeit bei Teilnehmerinnen (n = 15) ergab eine rm ANOVA mit den Faktoren *Feldstärke* (DC: 14, 22, 30, 38 kV/m; AC: 8, 16, 24, 30 kV/m; Hybrid: 4,47, 8,94, 16,49, 24,33 kV/m), *Testtag* (1, 2) und *Wimperntusche* (mit, ohne) für DC keinen Haupteffekt für *Wimperntusche* ($p > 0,78$). Allerdings zeigte sich für AC- und Hybrid-Felder jeweils ein statistisch signifikanter Einfluss [(F(1, 12) = 5,37, $p = 0,039$, $\eta_p^2 = 0,31$), (F(1, 14) = 7,78, $p = 0,014$, $\eta_p^2 = 0,36$)]. Signifikante Interaktionen mit dem Faktor *Wimperntusche* wurden

nicht gefunden (alle $p > 0,16$). Somit waren die Sensitivitätswerte in AC- und Hybrid-Feldern höher nachdem Wimpertusche aufgetragen wurde.

Tabelle 10: Ergebnisse der 2×2 rm ANOVAs der Schwellenwerte der Subgruppe, die Variationen der relativen Luftfeuchtigkeit von 50 % und 70 % erfuhren für DC (n = 9), AC (n = 6) und Hybrid (n = 9) mit den Faktoren *rel. Luftfeuchtigkeit* (50 %, 70 %) und *Testtag* (1, 2). Signifikante Effekte ($p \leq 0,05$) sind in fett gedruckt.

Feldart	Faktor	df	F	p	η_p^2
DC	<i>Rel. Luftf.</i>	1, 8	2,01	0,19	0,2
	<i>Testtag</i>	1, 8	22,87	0,001	0,74
	<i>Rel. Luftf.*Testtag</i>	1, 8	0,03	0,86	0,00
AC	<i>Rel. Luftf.</i>	1, 5	1,35	0,3	0,21
	<i>Testtag</i>	1, 5	0,27	0,62	0,05
	<i>Rel. Luftf.*Testtag</i>	1, 5	14,36	0,013	0,74
Hybrid	<i>Rel. Luftf.</i>	1, 8	1,2	0,31	0,13
	<i>Testtag</i>	1, 8	15,26	0,005	0,66
	<i>Rel. Luftf.*Testtag</i>	1, 8	0,0	0,98	0,0

4.2.3. Einfluss der Haare

Die Ergebnisse der Gesamtfeuchtigkeitsmessung für die Haarproben, die bei 50% relativer Luftfeuchtigkeit konditioniert wurden, sowie der Messungen der physikalischen Haareigenschaften sind in Tabelle 11 aufgetragen. Der Feuchtigkeitsgehalt in den Kopfharen schwankte zwischen 6,3 und 12,5 %. Zudem konnten große Varianzen in der Haarlänge, der Haardicke und der Haarstruktur festgestellt werden. Für die Proband*innen, deren Haare bei 30 % bzw. bei 70 % relativer Luftfeuchtigkeit vorkonditioniert wurden sind die Ergebnisse der mikroskopischen Analyse sowie der TGA in den Tabelle 12 und Tabelle 13 dargestellt.

Für jedes Set an Korrelationsanalysen wurde eine Anpassung der α -Fehler-Wahrscheinlichkeit nach Bonferroni vorgenommen. Es zeigte sich ein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen der Wahrnehmungsschwelle für DC und der externen Feuchtigkeit des Kopfhars ($r = -0,59$, $p = 0,016$) sowie zwischen der Wahrnehmungsschwelle für AC und der Rauheit (Rz) des Armhars ($r = 0,56$, $p = 0,014$). Die Korrelationen sind in den Abbildung 13 und Abbildung 14 dargestellt.

Tabelle 11: Übersicht der individuellen Ergebnisse der Analysen aller Kopf- und Armhaare bei einer Vorkonditionierung in 50 % relativer Luftfeuchtigkeit (n = 30).

Proband*in	Gesamt-	Länge	Länge	Dicke	Dicke	Rauheit	Rauheit
	menge	Kopfhaar	Armhaar	Kopfhaar	Armhaar	Rz	Rz
	Wasser	in mm	in mm	in μm	in μm	Kopfhaar	Armhaar
1	9,8	55	16,97	92,39	62,87	2,65	4,34
2	8,8	106,92	8,7	69,41	29,32	3,17	2,78
3	10,5	26,03	9,92	92,77	40,88	3,15	3,73
4	8,4	43,37	15,02	86,3	51,4	3,41	3,15
5	7,5	52,27	8,1	62,38	34,52	3,52	3,13
6	6,3	72,93	10,93	80,61	52,22	2,8	3,07
7	8,7	40,4	8,67	102,7	34,57	2,75	2,99
8	8,1	57,48	15,92	84,9	57,39	2,66	2,51
9	7,7	303,15	7	76,24	30,76	2,95	2,84
10	8	23,5	22,78	76,39	73,56	2,46	3,33
11	11,2	259,67	6,72	68,56	41,6	3,78	4,07
12	10,6	59,37	17,14	87,12	53,31	3,42	3,01
13	10,9	217	16,43	89,88	70,04	3,43	3,89
14	9,7	33,67	13,38	66,73	41,59	2,55	3,62
15	12,1	61,47	10,5	67,49	52,21	2,92	3,33
16	11,4	67,2	5,73	71,42	43,38	2,93	3,82
17	10,5	71,1	11,9	61,7	48,3	2,68	3,58
18	10,6	53,47	14,47	82,84	53,99	2,91	3,53
19	9,9	13,38	16,77	80,11	68,3	5,31	3,47
20	11,2	27,2	15,6	81,48	36,74	3,37	4,2
21	10,9	173,3	14,17	57,67	51,22	3,49	3,56
22	10,9	74,03	13,3	67,13	36,51	2,87	3,01
23	10,7	68,13	10,7	72,51	32,78	2,67	2,9
24	10,4	333,33	11,67	72,9	38,87	3,06	2,89
25	10,2	64,2	12,87	63,93	36,04	5,33	2,73
26	10,2	204,33	16,17	70,91	41,66	3,61	3,34
27	10,2	42,9	7,1	92,14	40,72	4,19	3,34
28	12,5	71,57	10,8	80,83	54,33	2,58	3,21
29	12,1	71,3		67		3,19	
30	12,5	231	7,33	91,32	26,92	2,7	2,64
Mittelwert	10,1	99,29	12,3	77,26	46,07	3,22	3,31
SD	1,5	88,19	4,07	11,31	12,44	0,7	0,47
Min.	6,3	13,38	5,73	57,67	26,92	2,46	2,51
Max.	12,5	333,33	22,78	102,7	73,56	5,33	4,34

Tabelle 12: Übersicht der individuellen Ergebnisse der Analysen der Kopf- und Armhaare bei einer Vorkonditionierung in 30 % relativer Luftfeuchtigkeit (n = 15).

Proband*in	Gesamt-	Länge	Länge	Dicke	Dicke	Rauheit	Rauheit
	menge	Kopfhaar	Armhaar	Kopfhaar	Armhaar	Rz	Rz
	Wasser	in mm	in mm	in μm	in μm	Kopfhaar	Armhaar
1	9,4	55,23	19,07	79,46	67,51	3,86	3,56
3	9,7	31,30	9,38	98,19	41,44	4,07	3,40
5	8,1	41,97	5,10	58,51	30,95	3,19	3,02
7	8,5	38,30	13,62	78,77	33,46	2,81	2,84
9	8,8	410,67	10,33	83,43	39,99	2,78	2,85
11	9,4	409,00	5,28	89,03	32,47	4,72	3,02
12	8,5	70,86	23,98	89,94	69,62	3,39	2,99
14	8,5	238,00	13,97	76,74	47,51	3,50	2,69
16	9,9	59,63	7,57	71,21	36,60	3,09	2,87
18	9,6	53,57	10,75	79,41	55,91	3,79	3,38
20	10,2	25,23	13,80	86,11	46,69	3,72	3,49
26	12,2	233,67	12,50	78,06	36,48	3,49	3,17
27	10,9	58,23	9,27	70,62	44,56	3,78	4,63
28	11,8	67,25	15,63	70,13	62,92	3,95	2,60
30	11,5	216,00	7,87	80,92	29,37	2,80	3,10
Mittelwert	9,80	133,93	11,87	79,37	45,03	3,53	3,17
SD	1,29	134,17	5,10	9,62	13,30	0,54	0,49
Min.	8,10	25,23	5,10	58,51	29,37	2,78	2,60
Max.	12,20	410,67	23,98	98,19	69,62	4,72	4,63

Tabelle 13: Übersicht der individuellen Ergebnisse der Analysen der Kopf- und Armhaare bei einer Vorkonditionierung in 70 % relativer Luftfeuchtigkeit (n = 15).

Proband*in	Gesamt-	Länge	Länge	Dicke	Dicke	Rauheit	Rauheit
	menge	Kopfhaar	Armhaar	Kopfhaar	Armhaar	Rz	Rz
	Wasser	in mm	in mm	in μm	in μm	Kopfhaar	Armhaar
2	7,9	104,73	13,33	68,87	37,83	0,66	3,12
4	9,9	47,00	14,17	79,50	47,18	0,68	3,77
6	9,2	72,17	10,03	76,53	61,51	0,65	3,14
8	12,0	45,43	19,77	67,27	71,79	0,64	3,03
10	12,1	23,30	17,57	84,87	62,19	0,69	2,87
13	8,5	245,33	14,08	84,58	58,53	0,55	3,17
15	10,6	70,77	12,47	78,04	54,60	0,50	2,94
17	9,8	45,53	14,37	62,46	49,87	0,41	2,74
19	9,1	13,97	14,97	85,44	49,11	0,59	2,82
21	11,7	289,83	14,13	67,21	46,34	0,80	3,41
22	11,4	47,62	10,17	57,72	39,92	0,54	3,30
23	11,6	269,50	15,22	87,17	36,37	0,91	3,72
24	11,8	514,00	20,23	90,61	40,84	0,49	2,65
25	11,8	66,67	16,73	66,80	40,86	0,46	3,19
29	12,9	73,17		63,46			
Mittelwert	10,69	128,60	14,80	74,70	49,78	0,61	3,13
SD	1,52	139,71	3,03	10,47	10,65	0,14	0,33
Min.	7,90	13,97	10,03	57,72	36,37	0,41	2,65
Max.	12,90	514,00	20,23	90,61	71,79	0,91	3,77

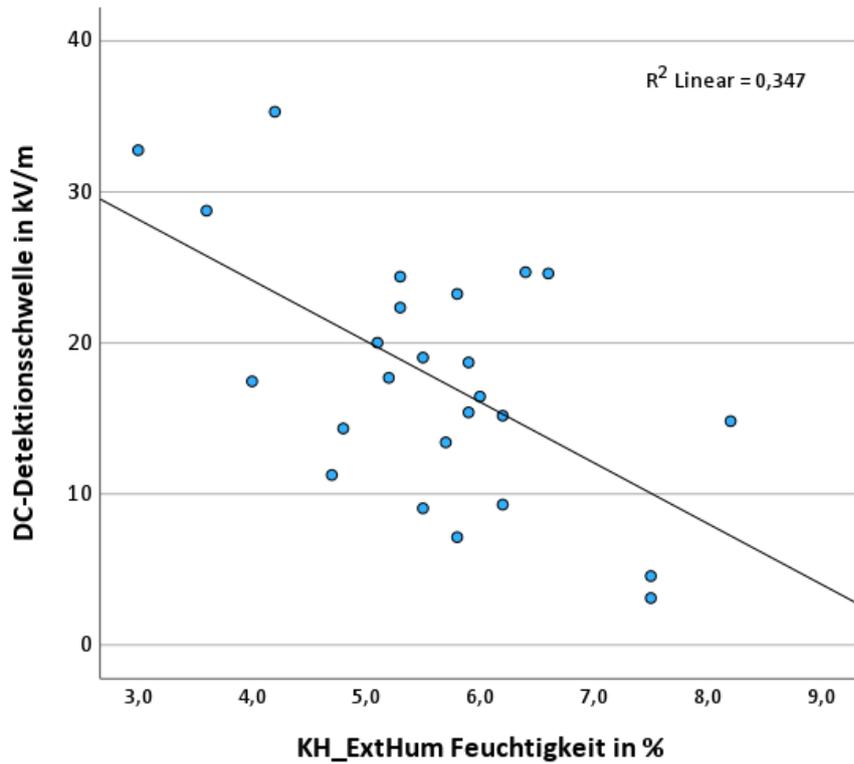


Abbildung 13: Korrelation der DC-Detektionsschwellen an Testtag 1 mit der externen Feuchtigkeit des Kopfhaars (KH_ExtHum) für n = 25 Teilnehmende in 50 % relativer Luftfeuchtigkeit.

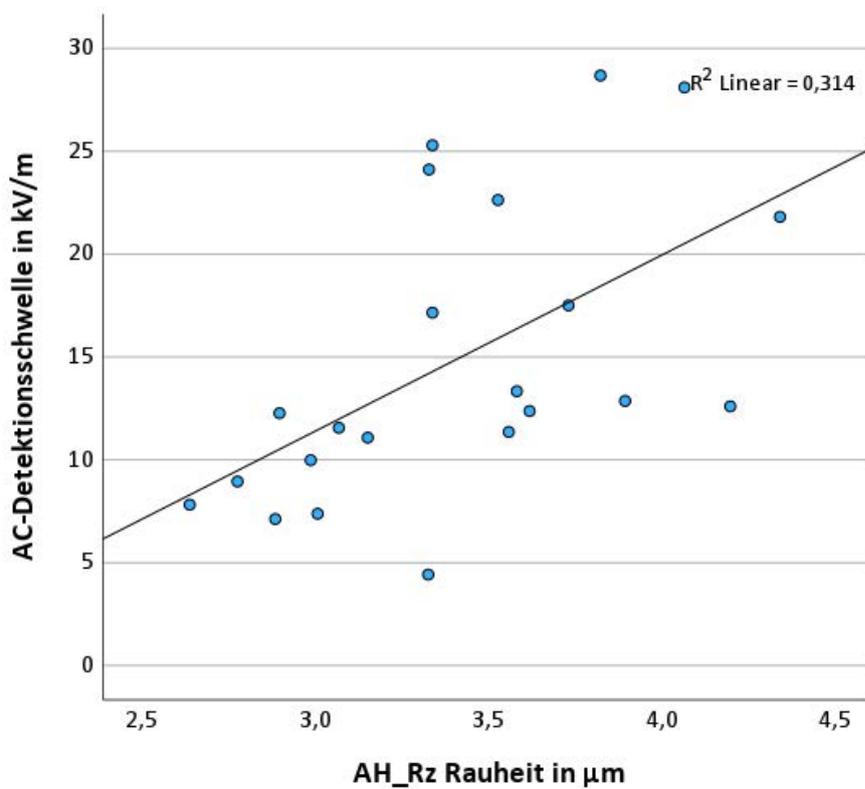


Abbildung 14: Korrelation der AC-Detektionsschwellen an Testtag 1 mit der Rauheit des Armhaars (AH_Rz) für n = 22 Teilnehmende in 50% relativer Luftfeuchtigkeit.

4.2.4. Wahrnehmungsort

Die Wahrnehmungsorte sind in Tabelle 14 dargestellt. Unabhängig von der Feldart haben nahezu alle Proband*innen im Bereich des Kopfes eine Wahrnehmung verortet. Auffällig ist die erhöhte Anzahl der Nennungen im Armbereich bei AC-Feldern. Im Bereich der Beine gab es vereinzelt Nennungen.

Tabelle 14: Anzahl der Nennungen der Wahrnehmungsorte für DC-, AC- und Hybrid-Felder für n = 30 Teilnehmende. Mehrfachnennungen waren möglich.

	DC	AC	Hybrid
Kopf	29	30	29
Arme	7	19	9
Beine	2	2	1

4.3. Diskussion

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie fügen sich hinsichtlich der Wahrnehmungsschwellen sowie der Effekte durch Veränderungen der relativen Luftfeuchtigkeit gut in bereits bekannte Ergebnismuster ein (Jankowiak et al., 2021; Kursawe et al., 2021). Dabei verfolgte sie vorrangig das Ziel, Einflussfaktoren auf die Wahrnehmung elektrischer Felder zu untersuchen mit dem Fokus auf die Rolle der Behaarung. Es zeigte sich, dass die Fähigkeit zur Wahrnehmung elektrischer Felder enorm abnimmt, wenn Haare entfernt werden. Außerdem traten Zusammenhänge zwischen der Wahrnehmungsfähigkeit elektrischer Felder und strukturellen Eigenschaften sowie der Feuchtigkeit des Haars auf.

Die Schwellenwerte bei 50 % relativer Luftfeuchtigkeit ordnen sich in den Rahmen vorheriger Untersuchungen ein. So waren Schwellenwerte von 13,45 kV/m für AC und 17,25 kV/m für DC vergleichbar mit den Werten der früheren Studie an 203 Proband*innen mit 14,16 kV/m für AC und 18,69 kV/m für DC (Kursawe et al., 2021). Verglichen mit dem Schwellenwert in Testbedingung 4 der Studie von Jankowiak et al. (2022) von 5,7 kV/m war die Wahrnehmungsschwelle in der Hybrid-Bedingung mit 9,64 kV/m höher. Allerdings handelte es sich in der früheren Studie um eine selektive Probandengruppe mit überdurchschnittlicher Wahrnehmungsfähigkeit. Dagegen ist der Wahrnehmungsvorteil für AC bei trockener, sowie für DC bei feuchter Umgebungsluft eine Replikation früherer Forschung (Jankowiak et al., 2021; Kursawe et al., 2021). Insgesamt zeigen die Daten der

vorliegenden Untersuchung eine große interindividuelle Varianz, die bereits aus vorherigen Studien bekannt ist (Jankowiak et al., 2021, 2022; Kursawe et al., 2023, 2021). Teile dieser Varianz aufzuklären war das Ziel des hierbeschriebenen Vorhabens.

Die Entfernung der Kopf- und Armbehaarung führte bei der Wahrnehmung von DC-, AC- und Hybrid-Feldern im Durchschnitt zu einem signifikanten Einbruch der Sensitivitätswerte mit einhergehendem Anstieg der Wahrnehmungsschwellen. Besonders deutlich war dies bei DC-Feldern zu beobachten. Hier waren Steigerungen der Schwellenwerte von knapp 10 kV/m bis fast 13 kV/m in Abhängigkeit der unterschiedlichen Luftfechtigkeiten zu beobachten. Dies spiegelt auch die relativ geringe Anzahl der Teilnehmer*innen wider, die DC-Felder von 14 (0 %) und 22 kV/m (16 %) ohne Haare wahrgenommen haben. Die Ergebnisse sind im Einklang mit früheren Befunden zur lokalen Exposition mit DC-Feldern. Hier konnte gezeigt werden, dass eine Entfernung der Behaarung im Bereich des Unterarms zu deutlichen Einschränkungen in der Wahrnehmung führte (Odagiri-Shimizu & Shimizu, 1999). Der Einfluss der Behaarung auf die Wahrnehmung von DC-Feldern war in allen Variationen der Luftfeuchtigkeit zu finden. Hinsichtlich der AC-Felder wurden bei 30 % und 50 % relativer Luftfeuchtigkeit ebenfalls höhere Wahrnehmungsschwellen ohne Behaarung beobachtet im Vergleich zur Testung mit Haaren. Bereits früher konnte gezeigt werden, dass die Entfernung von Haaren bei lokaler Exposition mit AC-Feldern zu starken Einschränkungen führte (Chapman et al., 2005). Die Ergebnisse bestätigen diesen Befund und eine Übertragung auf die Ganzkörper-Testung ist somit möglich. Interessanterweise wurden niedrigere AC-Schwellenwerte an Testtag 2 bei 70 % relativer Luftfeuchtigkeit beobachtet im Vergleich zu Testtag 1. Möglicherweise kann dies auf einen feuchtigkeitsabhängigen Mechanismus in der Wahrnehmung hindeuten: Ohne Haare findet eine AC-Feldwahrnehmung statt, die durch hohe Luftfeuchtigkeit begünstigt ist, während die bekannte Kraftwirkung auf die Haare in AC-Feldern begünstigt wird durch eine Reduktion der relativen Luftfeuchtigkeit (Kursawe et al., 2021; Reilly, 1998). Die gesteigerte Leitfähigkeit, die durch hohe Luftfeuchtigkeit hervorgerufen wird, könnte somit auch die Wahrnehmung der AC-Felder begünstigen, vor allem dann, wenn keine Haare vorhanden sind (Kursawe et al., 2021; Reilly, 1998).

Insgesamt scheint ein Zusammenhang zwischen Parametern der Kopfhaare und der DC-Wahrnehmung, und Parametern der Armbehaarung und der AC-Wahrnehmung plausibel, da bereits gezeigt wurde, dass Arme bei der AC-Wahrnehmung, hingegen der Kopfbereich bei der DC-Wahrnehmung, prominent sind (Jankowiak et al., 2021; Kursawe et al., 2021). Auch in der vorliegenden Studie konnte gezeigt werden, dass die Arme im Bereich der AC-Wahrnehmung eine größere Rolle spielen, als bei der Wahrnehmung von DC- oder Hybrid-Feldern. Die Rauheit als struktureller Parameter scheint somit einen Einfluss auf die Kraftwirkung des AC-Feldes an der Behaarung der Arme

zu haben. Dabei ist ein glatteres Haar der Wahrnehmung insgesamt zuträglicher. Weder die Dicke noch die Haarlänge scheinen hier die Fähigkeit zur Erkennung der AC-Felder zu beeinflussen. Vervollständigt wird dieser Befund außerdem durch den Effekt der Wimperntusche. Eine bessere Wahrnehmbarkeit von AC-Feldern mit aufgetragener Wimperntusche deutet daraufhin, dass ein hinsichtlich der Rauheit geglättetes Haar besser schwingt bzw. die Schwingung besser wahrgenommen werden kann. Möglicherweise spielt auch das durch die Wimperntusche erhöhte Gewicht der Haare eine Rolle. Andererseits geht eine höhere Haarfeuchtigkeit im Kopfbereich mit einer geringeren Detektionsschwelle für DC-Felder einher. Dies unterstützt frühere Erklärungsmodelle, die von einem Vorteil konduktiver Prozesse in höherer Luftfeuchtigkeit und dadurch von einem Vorteil für die Wahrnehmung von DC-Feldern ausgehen (Kursawe et al., 2021; Reilly, 1998).

4.4. Einschränkende Anmerkungen

Die statistischen Analysen der Wahrnehmungsschwellen, die den Faktor Luftfeuchtigkeit beinhalten, sind auf Basis reduzierter Gruppengrößen entstanden und daher mit Einschränkungen zu betrachten. Dies liegt einerseits an der Reduktion der potenziellen Teilnehmer*innen durch das Ausschlusskriterium der unplausiblen Verläufe und daran, dass in einem messwiederholte Design nur Personen eingeschlossen werden können, für die in jeder Bedingung ein Wert vorliegt, was die Anzahl an eingeschlossenen Testpersonen zum Teil erheblich reduzierte. Von letzterer Einschränkung ist Abbildung 12 nicht betroffen, allerdings sind hier auch nur Personen enthalten, für die eine Wahrnehmungsschwelle an beiden Testtagen ermittelt werden konnte.

Bei der Betrachtung der Effekte der relativen Luftfeuchtigkeit wurden zwei Subgruppen gebildet. Daher handelt es sich beim Vergleich der Effekte zwischen den Gruppen mit 30 % und 50 % relativer Luftfeuchtigkeit und 50 % und 70 % relativer Luftfeuchtigkeit um einen zwischen-Personen-Vergleich. Unterschiede, z. B. hinsichtlich des verschiedenen Einflusses der Luftfeuchtigkeit auf die AC-Schwelle könnten somit auch gruppenspezifische Ursachen haben.

Die Entfernung der Kopf- und Armhaare wurde sorgfältig geprüft. Es wurde auch darauf geachtet, dass Haare im Bereich der Finger ebenfalls entfernt wurden. Nicht von der Entfernung betroffen waren Stellen wie Stirn, Ohren, Nase, Wangen, Augenbrauen und Wimpern. Diese zum Teil besonders feinen Härchen waren wahrscheinlich an der Wahrnehmung der Felder beteiligt, vor allem dann, wenn Kopf- und Armhaar entfernt worden waren. Die stark erhöhten Wahrnehmungsschwellen an Testtag 2 deuten allerdings auf den großen Einfluss der entfernten Haare hin. Zudem muss darauf hingewiesen werden, dass die Haare nicht gänzlich entfernt, sondern nur glatt abrasiert, wurden. Demnach waren die Haarwurzel und der Teil des Haares, der sich in der Haut befindet, weiterhin vorhanden. Diese

Tatsache könnte erklären, warum auch an rasierten Körperstellen eine Wahrnehmung des elektrischen Feldes möglich war. Dennoch können die Ergebnisse auch darauf hindeuten, dass neben der Wahrnehmung über die Haare weitere Wirkmechanismen und Rezeptoren existieren, die wir zur Erkennung eines elektrischen Feldes nutzen können.

4.5. Implikationen

Die Fülle an Daten der vorliegenden Studie dient einerseits der Replikation bekannter Schwellenwerte für AC-, DC- und Hybrid-Felder sowie den bekannten Effekten hinsichtlich des Einflusses relativer Luftfeuchtigkeit. Andererseits wird der Einfluss der Behaarung an Kopf und Armen auf die Wahrnehmungsfähigkeit elektrischer Felder deutlich herausgestellt. Es zeigte sich, dass eine Entfernung der Behaarung mit starken Verlusten der Wahrnehmungsleistung einhergeht. Gleichzeitig hat bei vorhandenem Haar auch die Eigenschaft einen Einfluss auf die Wahrnehmbarkeit elektrischer Felder. Feuchtigkeit im Bereich DC und Rauheit bei der AC-Wahrnehmung beeinflussen die Schwellenwerte. Die Ergebnisse ergänzen die bekannten Modelle hinsichtlich der Feldwahrnehmung und deren Erweiterungen (Kursawe et al., 2021; Reilly, 1998). Darüber hinaus helfen die Ergebnisse beim Verständnis, wie elektrische Felder von Menschen wahrgenommen werden. Spannende weitere Forschungsfragen liegen vor allem im Bereich des Einflusses der feinen Härchen an Ohren, Wangen, Stirn und Nase. Hier bleibt zu erforschen, ob eine vollständige Entfernung die Fähigkeit zur Wahrnehmung elektrischer Felder gänzlich eliminieren könnte.

5. Literatur

1999/519/EG. (1999). *Empfehlung des Rates vom 12. Juli 1999 zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz - 300 GHz).*

2013/35/EU. (2013). *Richtlinie 2013/35/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Juni 2013 über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (elektromagnetische Felder).*

26. BImSchV. (2013). *Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder – 26. BImSchV).*

Blondin, J., Nguyen, D., Sbeghen, J., Goulet, D., Cardinal, C., Maruvada, P. S., ... Bailey, W. H. (1996). Human perception of electric fields and ion currents associated with high-voltage DC

- transmission lines. *Bioelectromagnetics*, 17(3), 230–241. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1521-186x\(1996\)17:3<230::aid-bem9>3.3.co;2-h](https://doi.org/10.1002/(sici)1521-186x(1996)17:3<230::aid-bem9>3.3.co;2-h)
- Chapman, C. E., Blondin, J. P., Lapierre, A. M., Nguyen, D. H., Forget, R., Plante, M., & Goulet, D. (2005). Perception of local DC and AC electric fields in humans. *Bioelectromagnetics*, 26(5), 357–366. <https://doi.org/10.1002/bem.20109>
- Clairmont, B. A., Johnson, G. B., Zaffanella, L. E., & Zelingher, S. (1989). The effect of HVAC-HVDC line separation in a hybrid corridor. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 4(2), 1338–1350. <https://doi.org/10.1109/61.25621>
- DGUV IFA Report 1/2019. (2019). *Grenzwerteliste 2019 - Sicherheit und Gesundheitsschutz am Arbeitsplatz*.
- DGUV Vorschrift 15. (2001). *Unfallverhütungsvorschrift Elektromagnetische Felder vom 1. Juni 2001*. <https://doi.org/10.37307/j.2199-7349.2016.06.06>
- Electric Power Research Institute (EPRI). (2010). *Electrical Effects of HVDC Transmission Lines Chapter 8*.
- EMFV. (2016). *Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch elektromagnetische Felder (Arbeitsschutzverordnung zu elektromagnetischen Feldern – EMFV) vom 15. November 2016*.
- Green, D., & Swets, J. (1966). *Signal Detection Theory and Psychophysics*. New York, NY: John Wiley and Sons.
- Greenhouse, S. W., & Geisser, S. (1959). On methods in the analysis of profile data. *Psychometrika*, 24(2), 59–112. <https://doi.org/10.1007/BF02289823>
- Hautus, M. J. (1995). Corrections for extreme proportions and their biasing effects on estimated values of d' . *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 27(1), 46–51. <https://doi.org/10.3758/BF03203619>
- ICNIRP. (1998). ICNIRP Guidelines for Limiting Exposure to Time Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz). *Health Physics*, 74(4), 494–523.
- ICNIRP. (2010). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to

- 100 kHz). *Health Physics*, 99(6), 818–836. <https://doi.org/10.1097/HP.0b013e3181f06c86>
- IEEE Std C95.1™. (2019). *IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electric , Magnetic , and Electromagnetic Fields , 0 Hz to 300 GHz* (Vol. 2019).
- International Electrotechnical Commission. (2007). *Effects of current on human beings and livestock, Part 2: Special aspects*.
- Jankowiak, K., Driessen, S., Kaifie, A., Kimpeler, S., Krampert, T., Kraus, T., ... Kursawe, M. (2021). Identification of Environmental and Experimental Factors Influencing Human Perception of DC and AC Electric Fields. *Bioelectromagnetics*, 42(5), 341–356. <https://doi.org/10.1002/bem.22347>
- Jankowiak, K., Kaifie, A., Krampert, T., Kraus, T., & Kursawe, M. (2022). The role of the AC component in human perception of AC–DC hybrid electric fields. *Scientific Reports*, 12(1), 3391. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-07388-w>
- Kaernbach, C. (1990). A single-interval adjustment-matrix (SIAM) procedure for unbiased adaptive testing. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 88(6), 2645–2655. <https://doi.org/10.1121/1.399985>
- Kato, M., Ohta, S., Shimizu, K., Tsuchida, Y., & Matsumoto, G. (1989). Detection-threshold of 50-Hz electric fields by human subjects. *Bioelectromagnetics*, 10(3), 319–327. <https://doi.org/10.1002/bem.2250100309>
- Krampert, T., Stoffels, M., Mühlbeier, A., Frechen, H., Schnettler, A., & Stunder, D. (2017). Development and Installation of a Test Circuit for the Reproduction of Electric Fields From High Voltage Direct Current Transmission Lines in an Exposure Chamber. In *20th International Symposium on High Voltage Engineering*. Buenos Aires, Argentina.
- Kursawe, M., Kaifie, A., Krabbe, J., Kimpeler, S., Kühn, R., Kraus, T., & Jankowiak, K. (2023). The role of the DC component in human perception of AC–DC hybrid electric fields and a comparison with the AC component. *Scientific Reports*, 13(1), 16320. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-43556-2>
- Kursawe, M., Stunder, D., Krampert, T., Kaifie, A., Drießen, S., Kraus, T., & Jankowiak, K. (2021). Human detection thresholds of DC, AC, and hybrid electric fields: a double-blind study. *Environmental Health*, 20(1), 92. <https://doi.org/10.1186/s12940-021-00781-4>

- Länderausschuss für Imissionsschutz. (2014). *Hinweise zur Durchführung der Verordnung über elektromagnetische Felder (26. BImSchV)*.
- Merzenich, M. M., & Harrington, T. (1969). The sense of flutter-vibration evoked by stimulation of the hairy skin of primates: Comparison of human sensory capacity with the responses of mechanoreceptive afferents innervating the hairy skin of monkeys. *Experimental Brain Research*, *9*(3), 236–260. <https://doi.org/10.1007/BF00234457>
- Nedachi, T., Shimizu, K., Suzuki, H., & Harakawa, S. (2021). Theoretical Increase in the Electric Force Exerted on Body Hair Owing to Superimposed Electric Fields with Optimized AC/DC Ratios. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, *16*(9), 1159–1164. <https://doi.org/10.1002/tee.23413>
- Odagiri-Shimizu, H., & Shimizu, K. (1999). Experimental analysis of the human perception threshold of a DC electric field. *Medical and Biological Engineering and Computing*, *37*(6), 727–732. <https://doi.org/10.1007/BF02513374>
- Petri, A. K., Schmiedchen, K., Stunder, D., Dechent, D., Kraus, T., Bailey, W. H., & Driessen, S. (2017). Biological effects of exposure to static electric fields in humans and vertebrates: A systematic review. *Environmental Health: A Global Access Science Source*, *16*(1), 1–23. <https://doi.org/10.1186/s12940-017-0248-y>
- Reilly, J. P. (1998). *Applied Bioelectricity: from Electrical Stimulation to Electropathology*. Springer. <https://doi.org/10.1088/0967-3334/20/2/701>
- SSK. (2013). Biologische Effekte der Emissionen von Hochspannungs-Gleichstromübertragungsleitungen (HGÜ) - Empfehlungen der Strahlenschutzkommission mit wissenschaftlicher Begründung, (September).
- TREMF. (2021). *Technische Regeln zur Arbeitsschutzverordnung zu elektromagnetischen Feldern (Frequenzbereich bis 10 MHz)*.
- WHO. (2006). *Environmental Health Criteria Series: Static Fields*.
- WHO. (2007). *Environmental Health Criteria 238: Extremely low frequency fields*.