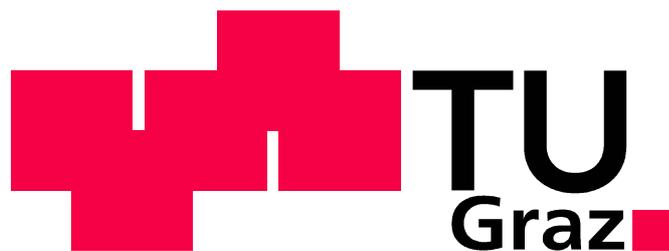


**Josef FRITZ**

# **Die Bedeutung der Kontaktart für sicherheitstechnische Bewertungen elektrischer Ströme**

Diplomarbeit



**Institut für Health Care Engineering**  
Technische Universität Graz  
Kopernikusgasse 24, A - 8010 Graz

Leiter: Univ. Prof. Dr. N. Leitgeb

Betreuer: Assoc. Prof. Dr. J. Schröttner  
Univ. Ass. Dipl. Ing. F. Niedermayr

Begutachter: Assoc. Prof. Dr. J. Schröttner

Graz, (Oktober, 2011)

Deutsche Fassung:  
Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008  
Genehmigung des Senates am 1.12.2008

## **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am .....  
.....  
(Unterschrift)

## **DANKSAGUNG**

An dieser Stelle möchte ich mich ganz besonders bei den Probanden bedanken, die mir die Durchführung der Messungen ermöglichten und damit einen wesentlichen Beitrag zur Erstellung dieser Diplomarbeit geleistet haben.

Weiters möchte ich mich für die Betreuung und Unterstützung am Institut für Health Care Engineering bedanken.

Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei meiner Familie und allen Personen, die mich während meines Studiums unterstützt haben.

## **KURZFASSUNG**

Das Ziel dieser Arbeit war es, den Einfluss unterschiedlicher Kontaktarten zur Bestimmung der elektrischen Wahrnehmbarkeitsschwelle für sinusförmige Wechselströme mit 50 Hz zu untersuchen. Hierzu wurden an 9 männlichen Probanden die Wahrnehmbarkeitsschwellen bestimmt und anschließend statistisch ausgewertet. Als Kontaktarten werden das Umgreifen eines Drahtes, das Umgreifen eines Rohres, das Berühren einer Metallfläche, das Berühren einer Fläche mit der Fingerspitze sowie am Unterarm befestigte Elektroden in dieser Untersuchung herangezogen. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass sich der Medianwert der Wahrnehmbarkeitsschwelle je nach Applikation um das 6,45fache unterscheidet. Es zeigt sich weiters, dass die Streuung der Wahrnehmbarkeitsschwelle vom Ort der Applikation abhängt. Dies ist vor allem in Hinblick auf sicherheitstechnische Überlegungen bezüglich der Wirkung des elektrischen Stromes auf den Menschen von großer Bedeutung.

**Schlüsselwörter:** Wahrnehmbarkeitsschwelle, Kontaktart, Stromdichte, Summenhäufigkeitsverteilung, 50 Hz Wechselstrom

## **ABSTRACT**

The aim of this study was to investigate the influence of different contact conditions to determine the electrical perception threshold for sinusoidal alternating currents at 50 Hz. The perception threshold was determined at 9 male subjects and the results were statistically analyzed. The grip of a wire, the grip of a pipe, touching a metal surface, touching a surface with the finger tip and electrodes fixed on the forearms were selected as contact conditions. The results of this study indicate that the median of the perception threshold differ up to 6.45-fold, depending on the application. Furthermore, it was shown that the variation of the perception threshold depend on the application site. This is of great importance for safety considerations regarding the effect of electrical current on human beings.

**Key Words:** perception threshold, contact type, current density, cumulative probability distribution, 50 Hz alternating current

---

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>AUFGABENSTELLUNG .....</b>	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>METHODEN.....</b>	<b>10</b>
3.1	Auswahl der Kontaktarten .....	10
3.1.1	Handfläche in Kontakt mit einer Metallplatte .....	10
3.1.2	Zeigefinger in Kontakt mit einer Metallplatte .....	11
3.1.3	Umgreifen eines Metallrohres .....	12
3.1.4	Umgreifen eines Metalldrahtes.....	12
3.1.5	Selbstklebende Elektroden am Unterarm .....	13
3.1.6	Kontaktartenbezeichnung.....	14
3.1.7	Referenzelektrode .....	14
3.2	Messeinrichtung .....	15
3.3	Messung der elektrischen Wahrnehmbarkeitsschwelle .....	17
3.4	Ermittlung der Kontaktflächengröße .....	19
3.5	Methoden der Datenauswertung .....	21
3.5.1	Deskriptive Statistik .....	21
3.5.2	Explorative Datenanalyse.....	23
3.6	Ausreißeranalyse .....	26
<b>4</b>	<b>ERGEBNISSE.....</b>	<b>29</b>
4.1	Mittelwertbildung .....	29
4.2	Auswertung der Wahrnehmbarkeitsschwellendaten.....	29
4.3	Ergebnisse der Reizschwellenmessung.....	34
4.4	Zusammenhang der Kontaktfläche mit der Reizschwelle .....	48
<b>5</b>	<b>DISKUSSION.....</b>	<b>54</b>
5.1	Einfluss des Berührungsdrucks auf die Reizschwelle .....	54
5.2	Einfluss der Kontaktart auf die Reizschwelle.....	55
5.3	Vergleich der Reizschwelle mit den Ergebnissen aus der Literatur.....	57
<b>6</b>	<b>SCHLUSSFOLGERUNG .....</b>	<b>59</b>
<b>7</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>60</b>

<b>8</b>	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>62</b>
<b>9</b>	<b>TABELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>66</b>
<b>10</b>	<b>ANHANG .....</b>	<b>69</b>

## 1 EINLEITUNG

Für die Beurteilung der Wirkung des elektrischen Stromes auf den Menschen ist die Wahrnehmbarkeitsschwelle elektrischer Ströme von hoher Bedeutung [2, 13]. Die elektrische Wahrnehmbarkeitsschwelle ist somit eine wichtige Bezugsgröße bei der Festlegung von sicherheitstechnischen Grenzwerten und Schutzmaßnahmen in der Elektrotechnik [6, 8, 14]. Sie ist definiert als der Minimalwert des Stromes, der von einer durchströmten Person noch wahrgenommen wird und ist für sinusförmige Wechselströme mit 500  $\mu\text{A}$  festgelegt [8].

Die in der Literatur publizierten Untersuchungen zur Wahrnehmung elektrischer Wechselströme zeigen zum Teil große Unterschiede sowohl hinsichtlich des Absolutwertes als auch der Streuung der elektrischen Wahrnehmbarkeitsschwelle innerhalb der untersuchten Probandenkollektive. Die hierzu dokumentierten Mittelwerte der Wahrnehmbarkeitsschwelle für Männer liegen im Bereich zwischen 313  $\mu\text{A}$  und 1.200  $\mu\text{A}$  [15, 16]. Es unterscheiden sich dabei nicht nur die Kontaktelektroden sondern auch die Messorte am Körper. Thompson [29] untersuchte im Jahr 1933 an 42 Männern die Wahrnehmungsschwelle für 60 Hz Wechselstrom. Hierzu wurde die linke Hand in eine schwache Salzlösung getaucht während die rechte Hand einen zylindrischen Metallstab mit 1 Zoll Durchmesser hielt oder der rechte Zeigefinger auf eine Metalloberfläche tippte. Dalziel [5] hat in drei Messserien die Wahrnehmbarkeitsschwelle an 167 Probanden über Hand-Hand Messungen für 60 Hz Wechselstrom bestimmt. 1940 führte er hierzu an 114 Männern Messungen durch, wobei die Probanden in jeder Hand einen Kupferdraht der Dimension Nr. 7 (Querschnitt = 10,55 mm<sup>2</sup>) halten mussten. In den Jahren 1948 und 1949 wurde in einer weiteren Untersuchung an 28 Männern die Reizschwelle bestimmt, wobei als Kontaktelektrode ein Kupferdraht der Dimension Nr. 8 (Querschnitt = 8,37 mm<sup>2</sup>) diente und die Referenzelektrode (salzgetränkte Mullbinde) am Oberarm befestigt war.

Weitere Reizschwellenmessungen erfolgten im Jahr 1953 an 25 Männern wobei die Probanden in einer Hand einen Kupferdraht der Dimension Nr. 8 gehalten haben und die andere Hand in eine Salzlösung getaucht wurde. Osypka [22] führte 1963 zur Bestimmung der 50 Hz Wechselstromwahrnehmung Hand-Hand Messungen an 50 Männern durch. Als Kontaktelektroden fungierten Messingkolben mit einer Oberfläche von 90 cm<sup>2</sup>. Batz und Irnich [9] führten 1989 eine Untersuchung zur 50 Hz Wechselstromwahrnehmung an 320 Männern durch. Für die Hand-Hand Messungen wurden Messingstäbe mit einem Durchmesser von 24 mm und einer Länge von 120 mm verwendet. Im Jahr 1996 erfolgte eine weitere Untersuchung [1], in der anstatt der Messingstäbe Aluminiumplatten als Kontaktelektroden zur Bestimmung der Wahrnehmbarkeitsschwelle verwendet wurden. Levin [19] hat im Jahr 1991 zur Bestimmung der 60 Hz Stromwahrnehmung Hand-Hand Messungen an 18 Männern durchgeführt. Dabei berührten die Probanden mit dem Zeigefinger eine Kupferplatte. Die Referenzelektrode (5cm<sup>2</sup> große Kupferplatte) war am gegenüberliegenden Handgelenk fixiert. Leitgeb und Schröttner [15, 17, 18, 25] führten 2002 Untersuchungen zur elektrischen Wahrnehmbarkeitsschwelle für Wechselstrom an den Unterarmen von 349 Probanden durch, wobei als Kontaktelektroden selbstklebende EKG-Elektroden verwendet wurden. Lindenblatt und Silny [20] haben im Jahr 2006 an 8 Männer Untersuchungsreihen durchgeführt, wobei die Reizschwellenmessung am linken Zeigefinger über eine Klebeelektrode erfolgte. Die Referenzelektrode wurde dazu in die linke Handinnenfläche geklebt.

Die Frage inwieweit die Kontaktart bei der Bestimmung der elektrischen Wahrnehmbarkeitsschwelle eine Rolle spielt, soll in dieser Diplomarbeit untersucht werden.

## 2 AUFGABENSTELLUNG

### Ziel dieser Diplomarbeit

Ziel dieser Diplomarbeit ist es, den Einfluss unterschiedlicher Kontaktarten zur Bestimmung der Wahrnehmbarkeitsschwelle für elektrische Ströme zu untersuchen.

### Durchführung der Reizschwellenmessungen

An 9 männlichen Probanden werden die Wahrnehmbarkeitsschwellen für sinusförmigen Wechselstrom mit einer Frequenz von 50 Hz bestimmt. Hierzu werden pro Proband 5 unterschiedliche Kontaktarten untersucht. Es werden jeweils 20 Messserien pro Proband und pro Kontaktart durchgeführt, wobei die Messfolge zufällig erfolgt. Eine Messserie besteht aus 12 einzelnen Stimulationen, wobei der linke und der rechte Arm abwechselnd stimuliert werden. Die Pausenzeit zwischen den einzelnen Stimulationen eines Armes soll drei Minuten betragen. Zwischen den Messserien an einem Probanden ist eine Pausenzeit von wenigstens 30 Minuten einzuhalten. Zusätzlich erfolgt die Erhebung von Co-Faktoren (z.B. Müdigkeit, Empfindlichkeit,...) mittels Fragebogen.

### Statistische Auswertung

Nach Erhebung der Messdaten ist ein möglicher Einfluss der Kontaktart auf die Wahrnehmbarkeitsschwelle statistisch auszuwerten.

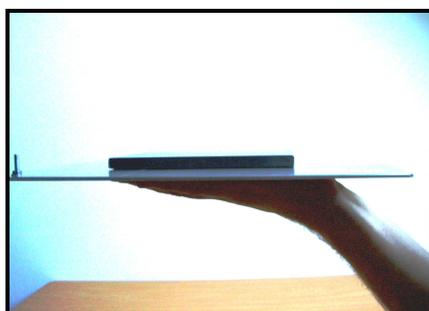
## 3 METHODEN

### 3.1 Auswahl der Kontaktarten

Die Auswahl der zu untersuchenden Kontaktarten erfolgte in Anlehnung an die in der Literatur (siehe Kapitel 1) beschriebenen Messanordnungen. Bei der Umsetzung der Elektrodenkonfiguration zur Messung der Wahrnehmbarkeitsschwelle wurde berücksichtigt, dass die Durchströmung getrennt für jede Armseite des Probanden erfolgt.

#### 3.1.1 Handfläche in Kontakt mit einer Metallplatte

Bei dieser Kontaktart wird die aktive Elektrode auf die waagrecht nach oben gerichtete Handfläche gelegt (Abbildung 3-1). Finger und Daumen werden dabei leicht zur Seite gestreckt, sodass ein satter Kontakt zwischen Handfläche und aktiver Elektrode entsteht. Die aktive Elektrode hat ein Gewicht von 2 kg und setzt sich aus einer Aluminiumplatte (30 cm x 24 cm x 0,3 cm) und einer darauf fixierten Metallplatte zusammen. Die Referenzelektrode wird am zugehörigen Unterarm appliziert (siehe Kapitel 3.1.7).



**Abbildung 3-1:** Waagrecht nach oben gerichtete Handfläche in Kontakt mit der aktiven Elektrode

### 3.1.2 Zeigefinger in Kontakt mit einer Metallplatte

Bei dieser Kontaktart hat nur das Endglied des Zeigefingers einen Kontakt zur aktiven Elektrode (Aluminiumplatte). Der auf die aktive Elektrode ausgeübte Kontaktdruck wird indirekt mit einer handelsüblichen Waage überwacht (Abbildung 3-2). Somit hat der Proband während einer Reizschwellenmessung die Aufgabe mit dem Zeigefinger die aktive Elektrode konstant zu belasten, sodass die Waage dabei annähernd 1 kg anzeigt. Die Referenzelektrode wird am zugehörigen Unterarm appliziert (siehe Kapitel 3.1.7).

Im Vorfeld durchgeführte Impedanzmessungen zu dieser Kontaktart zeigten, dass die Impedanz zwischen aktiver Elektrode und Referenzelektrode Werte über 100 k $\Omega$  annehmen kann. Das Reizschwellenmessgerät RSPC-02 ist für die Messung der Wahrnehmbarkeitsschwelle an Lastimpedanzen in dieser Größenordnung nicht ausgelegt. Um dennoch Reizschwellenmessungen an Probanden zu dieser Art des Kontaktes durchführen zu können, wurde der Übergangswiderstand zwischen Zeigefinger und Metallplatte verringert, indem auf die Metalloberfläche vor einem Messdurchgang ein leitfähiges Elektrodengel (Spectra 360, Parker Laboratories Inc., USA) aufgetragen wurde. Durch diese Maßnahme konnten Impedanzwerte zwischen den Elektroden in der Größenordnung von 25 k $\Omega$  erreicht werden.



**Abbildung 3-2:** Zeigefinger in Kontakt mit der aktiven Elektrode

### 3.1.3 Umgreifen eines Metallrohres

Bei dieser Kontaktart wird die aktive Elektrode mit der Hand umfasst (Abbildung 3-3). Das dazu verwendete Aluminiumrohr hat eine Länge von 17 cm und einen Außendurchmesser von 3,5 cm. Während einer Reizschwellenmessung war der Proband dazu angehalten, die aktive Elektrode vollständig mit der Hand zu umfassen und den dabei mittelmäßig ausgeübten Kontaktdruck annähernd konstant zu halten. Die Referenzelektrode wird am zugehörigen Unterarm appliziert (siehe Kapitel 3.1.7).



**Abbildung 3-3:** Aktive Elektrode (Aluminiumrohr) wird mit der Hand umfasst

### 3.1.4 Umgreifen eines Metalldrahtes

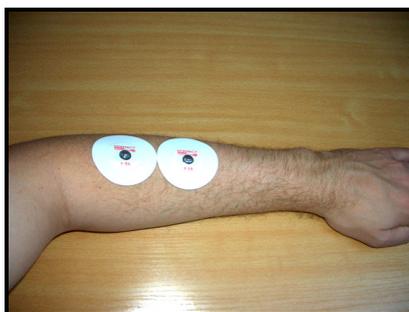
Bei dieser Kontaktart wird die aktive Elektrode mit der Hand umfasst (Abbildung 3-4). Der dazu verwendete Kupferdraht hat einen Querschnitt von 10 mm<sup>2</sup> und eine Länge von 20 cm. Während einer Reizschwellenmessung war der Proband dazu angehalten die aktive Elektrode mit der Hand, im Bereich zwischen proximaler und distaler Hohlhandfurche, zu umfassen und den dabei mittelmäßig ausgeübten Kontaktdruck annähernd konstant zu halten. Die Referenzelektrode wird am zugehörigen Unterarm appliziert (siehe Kapitel 3.1.7).



**Abbildung 3-4:** Aktive Elektrode (Kupferdraht) wird mit der Hand im Bereich zwischen proximaler und distaler Hohlhandfurche umfasst

### 3.1.5 Selbstklebende Elektroden am Unterarm

Für die Umsetzung dieser Kontaktart werden handelsübliche selbstklebende EKG-Elektroden (Skintakt F55, Leonhard Lang GmbH, Innsbruck) an den Unterarmen platziert. Die leitfähige Kontaktfläche besteht aus einem mit Kontaktgel getränkten Schwamm mit einer Fläche von 3,14 cm<sup>2</sup>. Wie in der Abbildung 3-5 zu sehen ist, werden in standardisierten Positionen auf der dorsalen Unterarmseite zwei Ag/AgCl Elektroden nebeneinander aufgeklebt. Beim Aufkleben ist darauf zu achten, dass keine angespannten Haare oder Hautverspannungen entstehen. Ein Vorteil bei der Verwendung dieser Einwegelektroden ist die gleichbleibende Kontaktfläche für jede Messung. Diese Elektrodenkonfiguration wurde bereits in früheren Untersuchungen [4, 11, 26, 30] am Institut für Health Care Engineering der Technischen Universität Graz verwendet.



**Abbildung 3-5:** Selbstklebende Elektroden platziert an der dorsalen Unterarmseite

### 3.1.6 Kontaktartenbezeichnung

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit erfolgt die Kontaktartenbezeichnung, zur leichteren Lesbarkeit, entsprechend den in Tabelle 3-1 angeführten Abkürzungen.

Kontaktart	Abkürzungen	
	im Text	in Abbildungen/Tabellen
Handfläche in Kontakt mit einer Metallplatte	<i>Hand-Platte</i>	<i>H - P</i>
Umgreifen eines Rohres	<i>Hand-Rohr</i>	<i>H - R</i>
Umgreifen eines Drahtes	<i>Hand-Draht</i>	<i>H - D</i>
Zeigefinger in Kontakt mit einer Metallplatte	<i>Zeigefinger-Platte</i>	<i>Z - P</i>
Selbstklebende Elektroden am Unterarm	<i>Unterarm-Elektroden</i>	<i>U - E</i>

**Tabelle 3-1:** Bezeichnungen der Kontaktarten im Text sowie in Abbildungen und Tabellen

### 3.1.7 Referenzelektrode

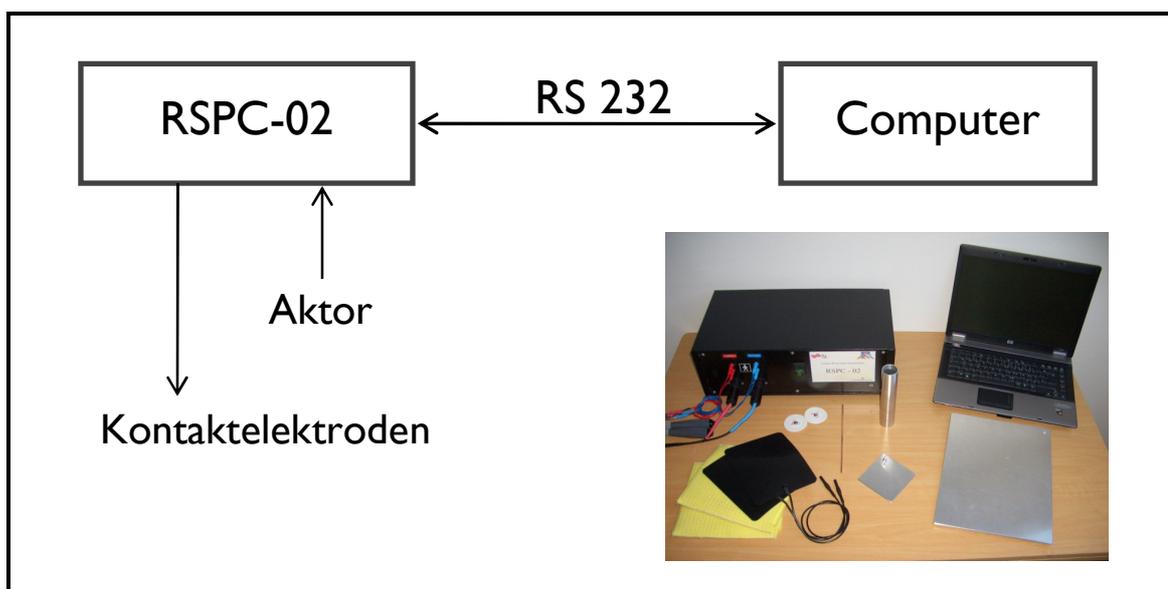
Bei den Kontaktarten *Hand-Platte*, *Zeigefinger-Platte*, *Hand-Rohr* und *Hand-Draht* wird jeweils die Referenzelektrode im proximalen Bereich an der dorsalen Unterarmseite platziert (Abbildung 3-6). Aufgrund der großen Anzahl der Reizschwellenmessungen wurde bei der Auswahl der Referenzelektrode auf eine möglichst einfache und schnelle Applikation geachtet. Wichtig in diesem Zusammenhang ist, dass die Wahrnehmung des Stimulationsstromes an der Berührungsfläche zur aktiven Elektrode erfolgt und nicht im Bereich der Referenzelektrode. Verwendet wurde hierfür eine leitfähige flexible Platten-Elektrode (Palmed GmbH, Deutschland) mit einer Größe von 180 mm x 140 mm. Die Platten-Elektrode wurde in die dazugehörige mit Wasser befeuchtete Schwammtasche gesteckt und mit zwei elastischen Bändern am Unterarm fixiert. Die Applikation erfolgte an beiden Unterarmen für die gesamte Dauer eines Messdurchganges.



**Abbildung 3-6:** Die Referenzelektrode, bestehend aus einer leitfähigen Platten-Elektrode und einer Schwammtasche (linkes Bild), wird im proximalen Bereich an der dorsalen Unterarmseite platziert (rechtes Bild).

### 3.2 Messeinrichtung

Die elektrische Wahrnehmbarkeitsschwelle wurde mit einer vorhandenen mobilen Messeinrichtung [21] bestimmt. Das Messsystem setzt sich aus dem Reizschwellenmessgerät RSPC-02, einem Computer (Notebook) und den Kontaktelektroden zusammen (Abbildung 3-7).



**Abbildung 3-7:** Messsystem zur Bestimmung der elektrischen Wahrnehmbarkeitsschwelle, bestehend aus dem Reizschwellenmessgerät RSPC-02, einem Computer und den Kontaktelektroden

Das Reizschwellenmessgerät RSPC-02 [21] ist ein elektromedizinisches Gerät der Schutzklasse I mit erdfreiem Anwendungsteil (Typ BF). Der zur Reizschwellenmessung verwendete linear ansteigende Stimulationsstrom wird von einer Konstantstromquelle geliefert. Das Reizschwellenmessgerät bietet Anschlüsse für zwei Elektrodenpaare wobei eine interne Schutzlogik die gleichzeitige Stromaufschaltung auf beide Elektrodenpaare verhindert.

Zu Beginn und am Ende der gesamten Messserie wurden die Ableitströme des Reizschwellenmessgerätes bzw. des Messsystems überprüft (mit dem Bender-µp-Sicherheitstester Typ 601). Die in den Sicherheitsvorschriften [6] festgesetzten Grenzwerte wurden dabei nicht überschritten. In Tabelle A-1 im Anhang sind die Ergebnisse der durchgeführten Ableitstrommessungen zusammengefasst.

Das Reizschwellenmessgerät wird über eine serielle Schnittstelle (RS232) von einem Computer (Notebook) angesteuert. Mit Hilfe des Steuerprogrammes werden die Probandendaten erfasst, die Stimulationsparameter eingestellt, der Messdurchgang überwacht, sowie die Messdaten erfasst und abgespeichert. Zur laufenden Messung werden der Ausgangsstrom als Effektivwert [ $\mu\text{A}$ ], die verbleibende Pausenzeit [s], Anzahl der durchgeführten Stimulationen und die stimulierte Armseite angezeigt. Nachdem der Proband den Aktor (Handtaster) betätigt, wird die laufende Stimulation beendet und die Messdaten werden automatisch in einem Textfile abgespeichert. Weiters hat der Versuchsleiter während eines Messdurchganges die Möglichkeit, durch Drücken des Buttons >>Messung abbrechen<<, die laufende Messung zu stoppen.

Für die Bestimmung der elektrischen Wahrnehmbarkeitsschwelle wurde pro Messdurchgang jede Armseite des Probanden, in abwechselnder Reihenfolge, insgesamt sechsmal stimuliert. Zwischen den Stimulationen an einem Arm wurde eine Pausenzeit von 3 Minuten eingehalten. Eine frühere Untersuchung [30] hat gezeigt, dass eine Pausenzeit von 3 Minuten zwischen den

Reizschwellenmessungen an einem Arm zur Erholung der stimulierten Nerven- und Muskelzellen ausreichen sollte.

Da die Versuchsperson verzögert auf die Wahrnehmung des Stimulationsstromes reagiert, wurde eine Reaktionszeit von 800 ms berücksichtigt. Damit wird vom tatsächlichen Messwert das Produkt aus Reaktionszeit mal der Stromanstiegsgeschwindigkeit abgezogen und als Wert für die Wahrnehmbarkeitsschwelle abgespeichert. Diese Einstellung wurde bereits in einer früheren Untersuchung [4] verwendet.

Alle Reizschwellenmessungen wurden unter Einfachblindbedingungen durchgeführt, d.h. nur der Versuchsleiter hatte Einblick auf den aktuell am Bildschirm angezeigten Ausgangsstrom.

Bei dem Reizschwellenmessgerät RSPC-02 können Werte für die Stromanstiegsgeschwindigkeit zwischen 2  $\mu\text{A/s}$  und 50  $\mu\text{A/s}$  ausgewählt werden. Das Auswahlkriterium diesbezüglich war, dass der Stimulationsstrom leicht bzw. eindeutig vom Probanden wahrgenommen werden kann. In Vorversuchen zeigte sich, dass bei höheren Wahrnehmbarkeitsschwellen (ab ca. 1 mA) nur mit dem maximal einstellbaren Wert für die Stromanstiegsgeschwindigkeit (50  $\mu\text{A/s}$ ) der Stimulationsstrom noch eindeutig wahrgenommen werden konnte. Daher wurde für die Kontaktarten *Hand-Platte*, *Hand-Rohr* und *Hand-Draht* ein Wert von 50  $\mu\text{A/s}$  für die Stromanstiegsgeschwindigkeit zur Reizschwellenmessung gewählt und für die Kontaktarten *Zeigefinger-Platte* und *Unterarm-Elektroden* ein Wert von 20  $\mu\text{A/s}$ .

### **3.3 Messung der elektrischen Wahrnehmbarkeitsschwelle**

Vor Beginn der gesamten Wahrnehmbarkeitsschwellenmessungen wurde nicht nur jedem Probanden der gesamte Messablauf genau erklärt, sondern auch

das zu erwartende Gefühl bei einer Durchströmung in Vorversuchen demonstriert.

Für die Reizschwellenmessungen wurden die Kontaktelektroden, entsprechend der zufällig ausgewählten Kontaktart, am Probanden appliziert. Nach dem Starten der Messung ertönt nach Ablauf der eingestellten Pausenzeit ein Signalton und der Ausgangsstrom beginnt linear zu steigen. Der Proband war angehalten bei der ersten Stromwahrnehmung den Aktor (Taster) mit der Hand, der nichtstimulierten Armseite, zu betätigen. Daraufhin wurde die Stimulation beendet und die Pausenzeit begann erneut abzulaufen. Etwa 15 Sekunden vor Ablauf der Pausenzeit wurden die Probanden aufgefordert die aktive Elektrode und den Handtaster, nun in umgekehrter Position, wieder aufzunehmen. Diese Maßnahme war für Messungen an Probanden bei der Kontaktart *Unterarm-Elektroden* nicht notwendig, da hier die Elektrodenpositionierung durchgehend für die Dauer eines Messdurchganges beibehalten wurde. Die jeweils erste Reizschwellenmessung auf der linken und auf der rechten Armseite diente zur Kontrolle der Elektrodenkonfiguration und wurde als Probe gewertet.

Bei der Messung der Wahrnehmbarkeitsschwelle wurde vor und nach einem Messdurchgang die Impedanz zwischen den an den Armen applizierten Kontaktelektroden gemessen (mit LCR Meter, Type 4263A, HP) und diente zur Kontrolle der Elektrodenkonfiguration.

Um die momentane Verfassung des Probanden zum Zeitpunkt der Reizschwellenmessungen zu ermitteln, wurde vor Messbeginn vom Probanden ein Fragebogen ausgefüllt. Hierzu wurde über eine Eigenschaftswörterliste [10] das momentane Befinden hinsichtlich Aktiviertheit, Müdigkeit, Empfindlichkeit und Ängstlichkeit abgefragt. Wurden an einem Probanden über den Tag verteilt mehrere Messungen durchgeführt, ist für jede Tageshälfte ein Fragebogen ausgefüllt worden.

Zusätzlich wurde vor Beginn der gesamten Messserie von jedem Probanden ein Anamnesefragebogen ausgefüllt, der einerseits mit der Freiburger

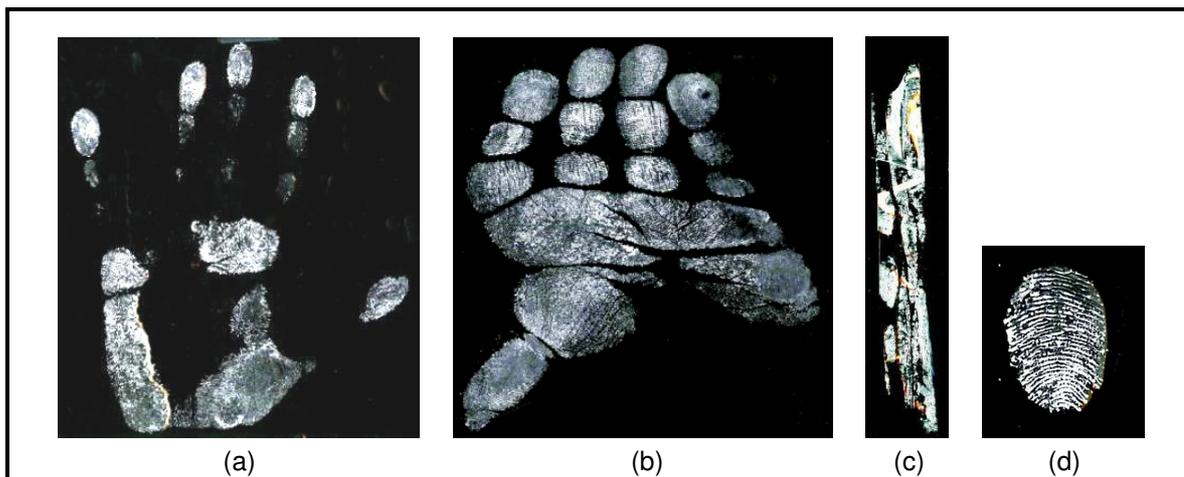
Beschwerdeliste [7] die körperlichen Beschwerden erfasst und andererseits mit Hilfe des Marburger Fragebogens [27] Auskunft über den circadianen Rhythmus gibt.

Die Vorlagen zu den Fragebögen wurden aus einer früheren Untersuchung [27] übernommen.

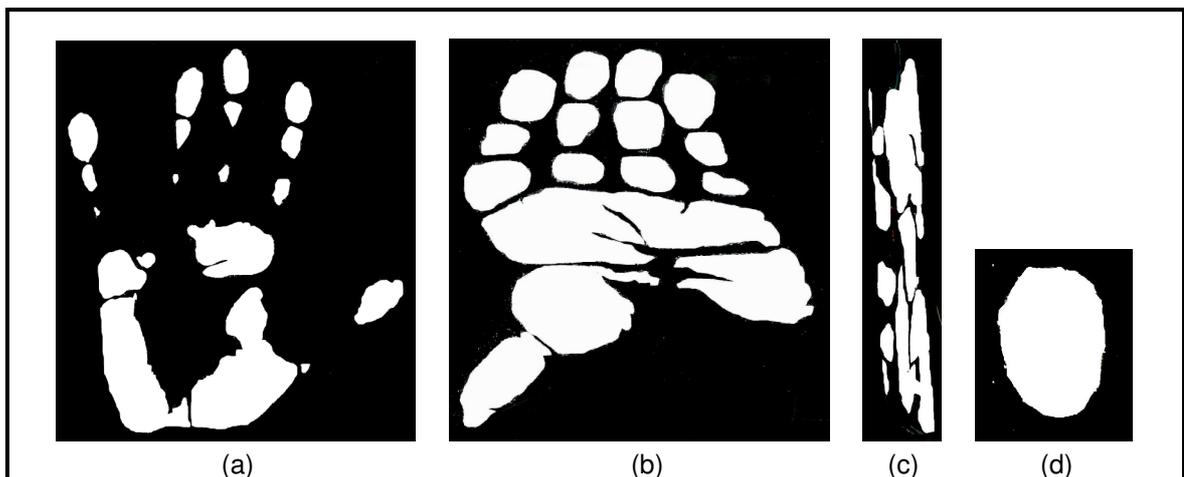
Bei jedem Messdurchgang wurden Raumtemperatur und relative Luftfeuchte notiert. Zudem wurden auch besondere Tagesereignisse der Probanden bzw. Vorkommnisse während der Messdurchgänge dokumentiert. Diese Aufzeichnungen sind bei der Ausreißeranalyse berücksichtigt worden.

### **3.4 Ermittlung der Kontaktflächengröße**

Um mögliche Zusammenhänge über die Stromdichte beschreiben zu können, benötigt man die Größe der durchströmten Kontaktfläche der Haut. Für die Kontaktarten *Hand-Platte*, *Zeigefinger-Platte*, *Hand-Rohr* und *Hand-Draht* erfolgte die Abschätzung der Kontaktflächengrößen jeweils durch Generierung eines Abdruckes von der berührten Fläche auf der aktiven Elektrode. Hierzu wurde an den Händen der Probanden Magnesiumpulver im Bereich der Berührungsflächen aufgetragen. Auf die jeweilige aktive Elektrode wurde eine Klebefolie fixiert, worauf bei Berührung ein Abdruck der Kontaktfläche entstand (Abbildung 3-8). Nach Einscannen der Kontaktflächenabdrücke wurden diese mit Hilfe des Grafikprogrammes Paint (Microsoft Corporation) nachbearbeitet, indem die einzelnen Flächenteile der Abdrücke weiß eingefärbt wurden (Abbildung 3-9). Mit einem weiteren Grafikprogramm (GSA Image Analyser v3.6, Deutschland) wurden die Flächeninhalte der nachbearbeiteten Kontaktflächenabdrücke berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3-2 zusammengefasst.



**Abbildung 3-8:** Kontaktflächenabdrücke - (a) *Hand-Platte* rechts, (b) *Hand-Rohr* links, (c) *Hand-Draht* rechts, (d) *Zeigefinger-Platte* rechts



**Abbildung 3-9:** Nachbearbeitete Kontaktflächenabdrücke - (a) *Hand-Platte* rechts, (b) *Hand-Rohr* links, (c) *Hand-Draht* rechts, (d) *Zeigefinger-Platte* rechts

Proband	<i>Hand-Platte</i>		<i>Hand-Rohr</i>		<i>Hand-Draht</i>		<i>Zeigefinger-Platte</i>	
	links	rechts	links	rechts	links	rechts	links	rechts
1	45	51	73	71	8,9	8,6	2,4	2,3
2	42	44	73	65	9,4	8,7	3,0	2,8
3	39	40	59	61	6,4	6,9	2,0	2,4
4	59	63	62	66	7,1	6,6	3,0	2,9
5	65	62	54	51	8,4	7,8	2,2	2,2
6	47	53	60	65	7,6	8,5	2,1	1,9
7	61	58	72	71	9,0	9,2	2,4	2,0
8	46	45	67	71	7,9	7,2	2,2	2,2
9	53	48	53	54	8,3	8,0	2,3	2,4

**Tabelle 3-2:** Ermittelte Kontaktflächen für jeden Probanden in cm<sup>2</sup>

### 3.5 Methoden der Datenauswertung

Die aus den Reizschwellenmessungen gewonnenen Rohdaten sind in Textfiles abgespeichert und wurden mit den folgenden Programmen ausgewertet:

- Office Excel 2003 (Microsoft Corporation) wurde zur Ausreißeranalyse (Liniendiagramme) und für die Berechnung statistischer Kennzahlen (z.B. Median) verwendet.
- SPSS 14.0 für Windows (SPSS Inc.) wurde für graphische Darstellungen (z.B. Boxplot) und für die Anwendung statistischer Testverfahren verwendet.
- Matlab R2009b (The MathWorks Inc.) wurde zum Anfertigen von Probability-Plots verwendet.

#### 3.5.1 Deskriptive Statistik

In der deskriptiven Statistik lassen sich mit Hilfe statistischer Maßzahlen Werteverteilungen von Daten einer Stichprobe charakterisieren [3, 23 ,28]. Die statistischen Maßzahlen können in folgende Gruppen unterteilt werden:

- Lagemaße
- Streuungsmaße
- Verteilungsmaße

### Lagemaße [3, 23, 28]

Der *arithmetische Mittelwert* ergibt sich aus der Summe aller Beobachtungen geteilt durch die Anzahl dieser Beobachtungen. Ein Nachteil des Mittelwertes ist, dass er sehr empfindlich gegenüber Ausreißern ist.

Der *Median* ist jener Wert, über bzw. unter dem jeweils die Hälfte der Werte liegen. Die Werte können dabei auf- oder absteigend sortiert sein. Er entspricht dem 50 % Perzentil. Der Median ist unempfindlich gegenüber Ausreißern und somit verteilungsunabhängig.

*Perzentile* sind Werte, innerhalb welcher die Werte des angegebenen Prozentsatzes in einem geordneten Datenbündel liegen. Bei einem 95 % Perzentil liegen also 95 % der Daten unterhalb dieses Wertes.

### Streuungsmaße [3, 23, 28]

Die *Varianz* berechnet sich aus der Summe der quadrierten Abweichungen der Einzelwerte vom arithmetischen Mittel, geteilt durch die Gesamtzahl aller Werte. Die *Standardabweichung* ist die Quadratwurzel der Varianz.

Die *Spannweite* ist jener Wert, der den Abstand zwischen dem minimalen und dem maximalen Wert darstellt. Die Spannweite hat als Streuungsmaß den Nachteil, dass sie stark von Ausreißern beeinflussbar ist.

Der *Interquartilsabstand* (auch Interquartilbereich genannt) ist jener Wert, der sich aus der Differenz zwischen dem 75 % Perzentil und dem 25 % Perzentil ergibt. Der Interquartilsabstand stellt also die mittleren 50 % der Werte in einem geordneten Datenbündel dar. Der Interquartilsabstand als Streuungsmaß hat den Vorteil, dass er gegen die Beeinflussung von Ausreißern resistent ist.

### Verteilungsmaße [3, 23, 28]

Die *Schiefe S* stellt ein Maß für die Asymmetrie einer Verteilung dar. Entspricht die Verteilung einer Normalverteilung, hat die Schiefe den Wert Null. Ist der Wert der Schiefe positiv, läuft die Verteilung rechts flach aus (rechts schief bzw.

links steil). Ist der Wert der Schiefe negativ, läuft die Verteilung nach links flach aus (links schief bzw. rechts steil).

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{nS^3}$$

Die *Kurtosis W* ist ein Maß für die Gruppierungen der Werte um einen zentralen Punkt. Entspricht die Verteilung einer Normalverteilung hat die Kurtosis den Wert Null. Ist der Wert der Kurtosis positiv, gruppieren sich die Werte dichter um den zentralen Punkt als bei einer Normalverteilung (spitze Verteilung). Ist der Wert der Kurtosis negativ, gruppieren sich die Werte weniger dicht um den zentralen Punkt als bei einer Normalverteilung (flache Verteilung).

$$W = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{nS^4} - 3$$

### 3.5.2 Explorative Datenanalyse

Mit Hilfe der explorativen Datenanalyse können graphische Darstellungen und Auswertungsstatistiken für alle Fälle oder für separate Fallgruppen erzeugt werden [3]. Verwendet wird sie, um Daten zu sichten, Ausreißer zu erkennen, Daten zu beschreiben und zur Überprüfung von Annahmen bzw. charakterisieren von Unterschieden zwischen einzelner Fallgruppen.

#### Statistische Signifikanz [3]

Der Signifikanzwert  $p$  gibt an wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, dass die Nullhypothese beibehalten werden kann. Je größer dieser Signifikanzwert ist

desto wahrscheinlicher ist es, dass ein Zurückweisen der Nullhypothese ein Irrtum wäre. Im Allgemeinen gilt ein Wert unter 5 % ( $p < 0,05$ ) als statistisch signifikant. Signifikanzwerte von  $p < 0,001$  werden auch als hochsignifikant beurteilt.

### ***Überprüfung des Datenmaterials auf Normalverteilung und Varianzhomogenität [3, 28]***

Für die Analyse der Daten werden parametrische und nichtparametrische statistische Testverfahren verwendet. Parametrische Verfahren setzen voraus, dass die zu untersuchenden Daten einer Normalverteilung unterliegen und eine Varianzhomogenität aufweisen. Die Anwendung von parametrischen Tests hat den Vorteil, dass ihre Ergebnisse statistisch schärfere Aussagen zulassen als jene von nichtparametrischen Tests.

#### *Kolmogorov-Smirnov Test auf Normalverteilung [28]*

Bei diesem Test wird die Nullhypothese „Die zu prüfende Verteilung ist eine Normalverteilung“ geprüft. Der ausgegebene Signifikanzwert entspricht der Irrtumswahrscheinlichkeit für das Zurückweisen der Nullhypothese.

#### *Levene-Test auf Varianzhomogenität [28]*

Einige statistische Verfahren setzen voraus, dass für Vergleiche zwischen verschiedenen Fallgruppen die Varianzen innerhalb dieser Gruppen gleich sind. Bei diesem Test wird die Nullhypothese „Varianzen sind gleich“ überprüft.

## ***Überprüfung der Zusammenhänge der Daten***

### ***T-Test [28]***

Der T-Test vergleicht bei unabhängigen Stichproben die Mittelwerte einer Variablen für zwei Fallgruppen. Es wird die Nullhypothese „Die Daten stammen aus der selben Grundgesamtheit“ überprüft.

### ***Mann-Whitney-U Test [28]***

Der Mann-Whitney-U Test ist ein nichtparametrischer Test zum Vergleich von zwei unabhängigen Stichproben. Dieser Test ist das verteilungsunabhängige Gegenstück zum parametrischen T-Test. Hier wird ebenfalls die Nullhypothese „Die Daten stammen aus der selben Grundgesamtheit“ überprüft.

### ***Kolmogorov-Smirnov-Z Test [28]***

Der Kolmogorov-Smirnov-Z Test ist ein nichtparametrischer Test und vergleicht die Verteilungen von zwei unabhängigen Stichproben. Es wird die Nullhypothese „Die Daten stammen aus der selben Grundgesamtheit“ überprüft. Der Test reagiert empfindlich auf Unterschiede in den Medianwerten.

## ***Grafische Darstellungsformen***

Ein *Histogramm* zeigt die Häufigkeitsverteilung einer Variablen in direkt aneinander angrenzenden Balken. Dabei bezieht sich jeder Balken des Histogramms auf einen Wertebereich. Die überlagert eingezeichnete Kurve entspricht der an die Daten angepassten Normalverteilung.

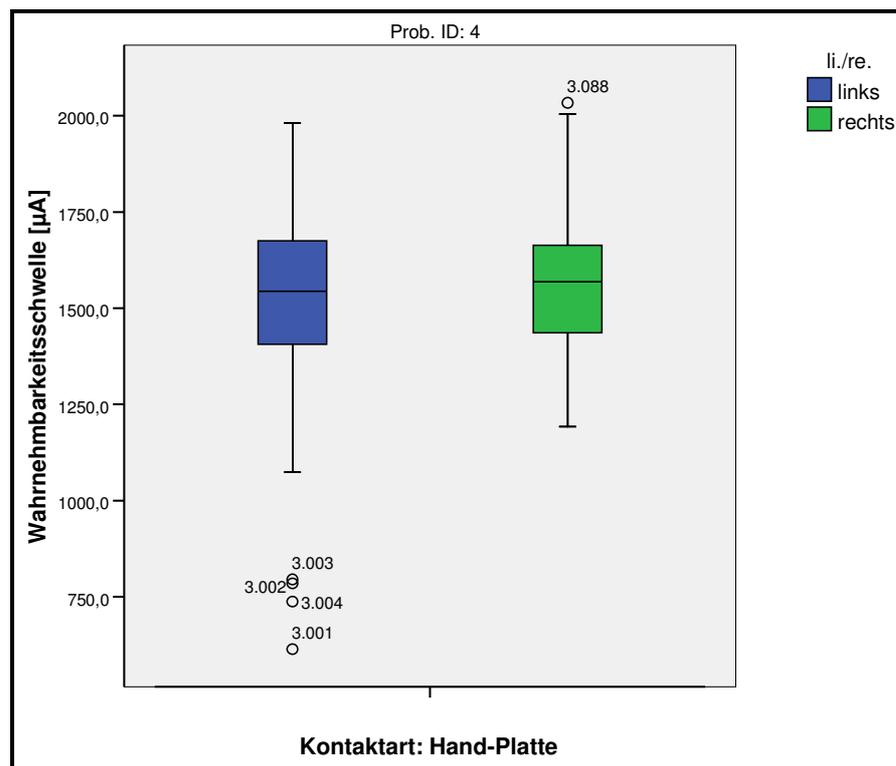
Ein *Boxplot* wird über Rangwerte der vorliegenden Daten gebildet. Die Box entspricht dabei dem Interquartilsabstand, welcher die mittleren 50 % der Werte beinhaltet. Der schwarze Balken in der Box entspricht dem Median. Die

senkrecht gezeichneten Linien außerhalb der Box beinhalten die Werte bis zum größten nicht-extremen bzw. bis zum kleinsten nicht-extremen Wert, begrenzt durch den 1,5-fachen Interquartilsabstand von der Box. Werte die über dem 1,5-fachen bis zum 3-fachen Interquartilsabstand außerhalb der Box liegen werden als Ausreißer bezeichnet. Werte die über diesen 3-fachen Interquartilsabstand hinausgehen werden als Extremwerte bezeichnet. Boxplots stellen sowohl Lage als auch Streuung der Verteilung dar.

Der *Probability-Plot* gibt die Summenhäufigkeit einer Verteilung wieder. In diesen Plots ist die dargestellte Verteilung sowohl in ihrer Lage als auch in der Streuung charakterisierbar.

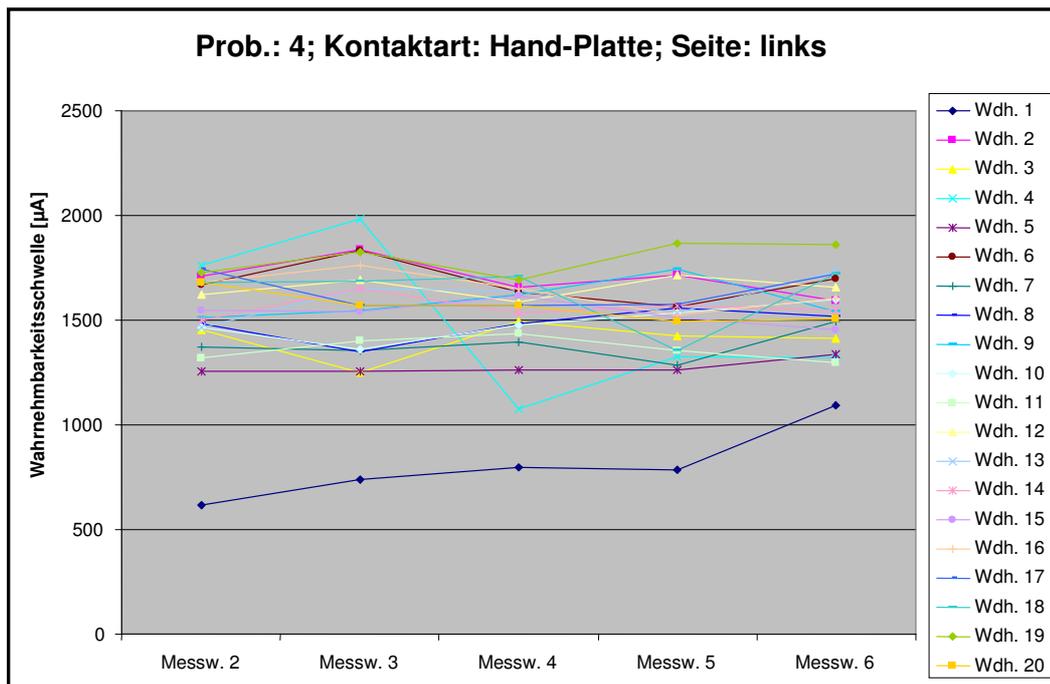
### **3.6 Ausreißeranalyse**

Zur Ausreißeranalyse wurden Boxplots der Messwerte der Wahrnehmbarkeitsschwellen für jede Armseite der Probanden und für jede Kontaktart erstellt. Im folgenden Beispiel zeigt Abbildung 3-10 für die Kontaktart *Hand-Platte* die Boxplots der Wahrnehmbarkeitsschwelle für Proband 4 der linken und rechten Handseite. Die in den Boxplots mit Fallnummer gekennzeichneten Werte, welche als Ausreißer gelten, wurden zur Ausreißeranalyse herangezogen. Hierzu wurde mit Hilfe der zur Reizschwellenmessung erstellten Dokumentation (z.B. Ereignisse während des Messablaufes) versucht die Ursache für die hohe Abweichung dieser Messwerte festzustellen.



**Abbildung 3-10:** Boxplots der Wahrnehmbarkeitsschwelle für die linke und rechte Armseite von Proband 4, Kontaktart: *Hand-Platte*

Weiters wurden Verlaufsdigramme der Messwerte der Wahrnehmbarkeitsschwellen für jede Armseite der Probanden pro Kontaktart erstellt. Die hierzu für alle Messdurchgänge erstellten Verläufe der Messwerte, in Abhängigkeit der Zeit, dienen zur visuellen Trendkontrolle. Im folgenden Beispiel zeigt Abbildung 3-11 für die Kontaktart *Hand-Platte* die Verläufe der Messwerte der Wahrnehmbarkeitsschwelle für Proband 4 der linken Handseite. Die unterste Linie (blau) setzt sich aus jenen Messwerten zusammen die in Abbildung 3-10 im linken Boxplot als Ausreißer (Fallnummer 3.001 bis 3.004) angezeigt werden. Die extremen Abweichungen dieser Ausreißer konnte dadurch begründet werden, dass der Proband die Wahrnehmung des Simulationsstromes im Unterarmbereich zur Referenzelektrode hatte und nicht wie vorgesehen im Handflächenbereich zur aktiven Elektrode. Somit dürfen diese Messwerte nicht zu den Reizschwellendaten für die Kontaktart *Hand-Platte* hinzugefügt werden.



**Abbildung 3-11:** Verlaufsdiagramme der Messwerte 2 bis 6 der Wahrnehmbarkeitsschwelle für die linke Handseite von Proband 4, Kontaktart: *Hand-Platte*

Jene Ausreißer, deren Abweichung begründet werden konnte, wurden aus dem Datensatz entfernt, alle anderen als Ausreißer deklarierten Messwerte sind hingegen im Datensatz verblieben. In Tabelle A-2 im Anhang sind die entsprechenden Ergebnisse zusammengefasst.

## 4 ERGEBNISSE

### 4.1 Mittelwertbildung

Um repräsentative Werte für die Wahrnehmbarkeitsschwelle zu erhalten wurden für jeden Messdurchgang, jeweils aus den letzten 5 Messwerten der Wahrnehmbarkeitsschwelle an einer Armseite, Mittelwerte gebildet. Somit ergeben sich für jede Armseite der Probanden pro Kontaktart 20 Werte für die Wahrnehmbarkeitsschwelle.

### 4.2 Auswertung der Wahrnehmbarkeitsschwellendaten

In den folgenden Tabellen 4-1 bis 4-5 sind Lage-, Streu- und Verteilungsmaße der Wahrnehmbarkeitsschwellen für alle Probanden und pro Kontaktart dargestellt. Hierzu wurde die Wahrnehmbarkeitsschwelle in  $\mu\text{A}$  sowie die logarithmierte Wahrnehmbarkeitsschwelle für jede Armseite gegenübergestellt.

Kontaktart <i>Hand - Platte</i>	Wahrnehmbarkeitsschwelle [ $\mu\text{A}$ ]		Log. Wahrnehmbarkeitsschwelle	
	Armseite		Armseite	
	links	rechts	links	rechts
<b>Mittelwert</b>	1309,8	1434,2	3,107	3,147
<b>Median</b>	1246,3	1421,2	3,096	3,153
<b>5% Perzentil</b>	915,8	985,4	2,962	2,994
<b>95% Perzentil</b>	1784,1	1998,0	3,251	3,301
<b>Varianz</b>	78689,1	93168,3	0,008	0,009
<b>Standardabweichung</b>	280,5	305,2	0,092	0,093
<b>Minimum</b>	821,3	853,7	2,915	2,931
<b>Maximum</b>	2114,5	2146,9	3,325	3,332
<b>Spannweite</b>	1293,1	1293,2	0,411	0,400
<b>Interquartilsabstand</b>	428,5	467,0	0,142	0,145
<b>Schiefe</b>	0,458	0,300	0,081	-0,088
<b>Standardfehler Schiefe</b>	0,183	0,183	0,183	0,183
<b>Kurtosis</b>	-0,584	-0,707	-0,776	-0,743
<b>Standardfehler Kurtosis</b>	0,363	0,363	0,363	0,363

**Tabelle 4-1:** Lage-, Streu- und Verteilungsmaße der Wahrnehmbarkeitsschwelle in  $\mu\text{A}$  sowie der log. Wahrnehmbarkeitsschwelle für die linke und rechte Armseite aller Probanden, Kontaktart: *Hand-Platte*

Kontaktart <i>Hand - Rohr</i>	Wahrnehmbarkeitsschwelle [ $\mu$ A]		Log. Wahrnehmbarkeitsschwelle	
	Armseite		Armseite	
	links	rechts	links	rechts
Mittelwert	1262,5	1389,8	3,092	3,134
Median	1213,4	1354,0	3,084	3,132
5% Perzentil	915,3	974,5	2,962	2,989
95% Perzentil	1745,2	2012,1	3,242	3,304
Varianz	68183,9	86912,4	0,008	0,008
Standardabweichung	261,1	294,8	0,088	0,090
Minimum	766,7	796,6	2,885	2,901
Maximum	1991,9	2269,9	3,299	3,356
Spannweite	1225,2	1473,2	0,415	0,455
Interquartilsabstand	372,0	379,6	0,132	0,121
Schiefe	0,547	0,638	0,200	0,115
Standardfehler Schiefe	0,182	0,182	0,182	0,182
Kurtosis	-0,534	0,152	-0,797	-0,278
Standardfehler Kurtosis	0,362	0,362	0,362	0,362

**Tabelle 4-2:** Lage-, Streu- und Verteilungsmaße der Wahrnehmbarkeitsschwelle in  $\mu$ A sowie der log. Wahrnehmbarkeitsschwelle für die linke und rechte Armseite aller Probanden, Kontaktart: *Hand-Rohr*

Kontaktart <i>Hand - Draht</i>	Wahrnehmbarkeitsschwelle [ $\mu$ A]		Log. Wahrnehmbarkeitsschwelle	
	Armseite		Armseite	
	links	rechts	links	rechts
Mittelwert	1269,1	1345,5	3,091	3,118
Median	1227,0	1282,6	3,089	3,108
5% Perzentil	853,8	904,9	2,931	2,957
95% Perzentil	1806,9	1991,5	3,257	3,299
Varianz	93354,2	95025,7	0,011	0,010
Standardabweichung	305,5	308,3	0,105	0,098
Minimum	770,1	792,8	2,887	2,899
Maximum	2042,0	2130,8	3,310	3,329
Spannweite	1271,9	1338,0	0,423	0,429
Interquartilsabstand	530,4	438,6	0,186	0,145
Schiefe	0,332	0,569	0,027	0,099
Standardfehler Schiefe	0,182	0,182	0,182	0,182
Kurtosis	-0,996	-0,227	-1,173	-0,593
Standardfehler Kurtosis	0,362	0,361	0,362	0,361

**Tabelle 4-3:** Lage-, Streu- und Verteilungsmaße der Wahrnehmbarkeitsschwelle in  $\mu$ A sowie der log. Wahrnehmbarkeitsschwelle für die linke und rechte Armseite aller Probanden, Kontaktart: *Hand-Draht*

Kontaktart <i>Zeigefinger - Platte</i>	Wahrnehmbarkeitsschwelle [ $\mu$ A]		Log. Wahrnehmbarkeitsschwelle	
	Armseite		Armseite	
	links	rechts	links	rechts
Mittelwert	417,2	465,8	2,606	2,653
Median	403,6	452,7	2,606	2,656
5% Perzentil	280,7	283,2	2,448	2,452
95% Perzentil	621,7	680,9	2,794	2,833
Varianz	11872,5	15203,6	0,012	0,014
Standardabweichung	109,0	123,3	0,111	0,117
Minimum	235,0	251,4	2,371	2,400
Maximum	722,4	765,2	2,859	2,884
Spannweite	487,4	513,8	0,488	0,483
Interquartilsabstand	175,1	194,6	0,191	0,187
Schiefe	0,598	0,346	0,172	-0,110
Standardfehler Schiefe	0,182	0,182	0,182	0,182
Kurtosis	-0,371	-0,713	-0,923	-0,838
Standardfehler Kurtosis	0,361	0,361	0,361	0,361

**Tabelle 4-4:** Lage-, Streu- und Verteilungsmaße der Wahrnehmbarkeitsschwelle in  $\mu$ A sowie der log. Wahrnehmbarkeitsschwelle für die linke und rechte Armseite aller Probanden, Kontaktart: *Zeigefinger-Platte*

Kontaktart <i>Unterarm - Elektroden</i>	Wahrnehmbarkeitsschwelle [ $\mu$ A]		Log. Wahrnehmbarkeitsschwelle	
	Armseite		Armseite	
	links	rechts	links	rechts
Mittelwert	256,2	243,8	2,328	2,312
Median	240,9	224,4	2,382	2,351
5% Perzentil	73,6	63,1	1,867	1,800
95% Perzentil	534,9	483,5	2,728	2,684
Varianz	20223,1	17891,4	0,083	0,075
Standardabweichung	142,2	133,8	0,288	0,273
Minimum	24,2	32,1	1,385	1,506
Maximum	616,3	648,5	2,790	2,812
Spannweite	592,0	616,4	1,405	1,306
Interquartilsabstand	218,1	205,8	0,413	0,400
Schiefe	0,508	0,588	-0,738	-0,544
Standardfehler Schiefe	0,183	0,181	0,183	0,181
Kurtosis	-0,585	-0,310	0,342	-0,310
Standardfehler Kurtosis	0,363	0,360	0,363	0,360

**Tabelle 4-5:** Lage-, Streu- und Verteilungsmaße der Wahrnehmbarkeitsschwelle in  $\mu$ A sowie der log. Wahrnehmbarkeitsschwelle für die linke und rechte Armseite aller Probanden, Kontaktart: *Unterarm-Elektroden*

### Überprüfung der Daten auf Normalverteilung

Die Überprüfung der Daten der Wahrnehmbarkeitsschwellen des Probandenkollektives auf Normalverteilung erfolgte mit dem Kolmogorov-Smirnov Test. Hierzu wurden die Daten gepoolt und auch getrennt für jede Armseite der Probanden überprüft. Die Ergebnisse sind in Form von Signifikanzwerten in Tabelle 4-6 zusammengefasst und zeigen, dass bei den Daten der logarithmierten Werte die Nullhypothese „Die zu testende Verteilung ist eine Normalverteilung“ nur für die Kontaktart *Unterarm-Elektroden* mit  $p = 0,045$  auf dem Signifikanzniveau von 5% zurückzuweisen ist.

	Signifikanz $p$					
	Wahrnehmbarkeitsschwelle [ $\mu$ A]			Log. Wahrnehmbarkeitsschwelle		
	Armseite			Armseite		
	links	rechts	gesamt	links	rechts	gesamt
<b>Hand-Platte</b>	<b>0,035</b>	0,365	<b>0,020</b>	0,378	0,827	0,277
<b>Zeigefinger-Platte</b>	0,112	0,231	<b>0,017</b>	0,243	0,504	0,251
<b>Hand-Rohr</b>	<b>0,042</b>	0,303	0,090	0,294	0,931	0,553
<b>Hand-Draht</b>	<b>0,024</b>	0,074	<b>0,014</b>	0,120	0,684	0,147
<b>Unterarm-Elektroden</b>	0,151	0,197	<b>0,019</b>	0,150	0,379	<b>0,045</b>

**Tabelle 4-6:** Signifikanzwerte des Kolmogorov-Smirnov Tests auf Normalverteilung der Wahrnehmbarkeitsschwellendaten des Probandenkollektives

### Zusammenhang der stimulierten Armseite mit der Wahrnehmbarkeitsschwelle

Aus den Lagemaßen der Wahrnehmbarkeitsschwellen für alle Probanden, dargestellt in den Tabellen 4-1 bis 4-5, sind zum Teil deutliche Unterschiede zwischen den Wahrnehmbarkeitsschwellen der linken und rechten Armseite erkennbar. Deshalb wurde überprüft, ob sich die Werte der log. Wahrnehmbarkeitsschwellen jeder Armseite statistisch signifikant voneinander unterscheiden. In Tabelle 4-7 sind die Ergebnisse als Signifikanzwerte der angewendeten Testverfahren angeführt. Es zeigen sich für die Kontaktarten *Hand-Platte*, *Zeigefinger-Platte*, *Hand-Rohr* und *Hand-Draht* Signifikanzwerte von  $p < 0,05$  sowohl beim parametrischen T-Test als auch bei den nichtparametrischen Mann-Whitney-U und Kolmogorov-Smirnov-Z Tests. Die

Nullhypothese, „Die Daten der log. Wahrnehmbarkeitsschwellen, gemessen an der linken und rechten Armseite, stammen aus derselben Grundgesamtheit“, muss somit abgelehnt werden.

Testverfahren	Signifikanz $p$				
	H - P	H - R	H - D	Z - P	U - E
	links - rechts	links - rechts	links - rechts	links - rechts	links - rechts
<b>T - Test</b> Levene Test	<b>0,000</b> 0,895	<b>0,000</b> 0,867	<b>0,013</b> 0,068	<b>0,000</b> 0,664	***
<b>Mann-Whitney-U Test</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,023</b>	<b>0,000</b>	0,455
<b>Kolmogorov-Smirnov-Z Test</b>	<b>0,001</b>	<b>0,000</b>	<b>0,008</b>	<b>0,007</b>	0,844

**Tabelle 4-7:** Signifikanzwerte stat. Testverfahren bezüglich der Zusammenhänge zwischen den log. Wahrnehmbarkeitsschwellen der linken und rechten Armseite aller Probanden  
(\*\*\*...Voraussetzung für T-Test nicht gegeben, da  $p < 0,05$  des Kolmogorov-Smirnov Tests)

Zusätzlich erfolgte die Überprüfung auf signifikante Unterschiede zwischen den Werten der log. Wahrnehmbarkeitsschwellen jeder Armseite auch für jeden einzelnen Probanden. Die Ergebnisse sind in Tabelle A-3 im Anhang als Signifikanzwerte der angewendeten Testverfahren angeführt und zeigen, dass 8 der 9 Probanden zumindest bei einer der Kontaktarten *Hand-Platte*, *Zeigefinger-Platte*, *Hand-Rohr* und *Hand-Draht* einen statistisch signifikanten Unterschied ( $p < 0,05$ ) zwischen den log. Wahrnehmbarkeitsschwellen der linken und rechten Armseite aufweist. Bei der Kontaktart *Unterarm-Elektroden* ergibt sich für keinen der Probanden ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den log. Wahrnehmbarkeitsschwellen der linken und rechten Armseite auf dem 5 % Signifikanzniveau.

Weiters wurde untersucht ob die Wahrnehmbarkeitsschwelle der Probanden von der Händigkeit, Proband 2 und 9 sind Linkshänder, abhängig ist. Hierzu wurde für jede Kontaktart die Nullhypothese überprüft, ob die Reizschwellen der Linkshänder und Rechtshänder aus der gleichen Grundgesamtheit entstammen. Mit dem Mann-Whitney-U Test konnte kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Reizschwellendaten der Links- und Rechtshänder auf dem 5% Signifikanzniveau nachgewiesen werden.

### 4.3 Ergebnisse der Reizschwellenmessung

Die elektrische Wahrnehmbarkeitsschwelle ist definiert als der Minimalwert des Stromes, der von einer durchströmten Person noch wahrgenommen wird [8]. In Bezug auf die in Kapitel 4.2 festgestellten signifikanten Unterschiede zwischen den Wahrnehmbarkeitsschwellen an der linken und rechten Armseite der Probanden wurde als Reizschwelle, für die folgenden Untersuchungen in diesem Kapitel, der jeweils niedrigere Wert der Wahrnehmbarkeitsschwelle des linken oder rechten Armes des Probanden eines Messdurchganges herangezogen. Somit ergeben sich für jeden Probanden 20 Reizschwellenwerte pro Kontaktart.

In den Tabellen 4-8 und 4-9 sind Lage-, Streu- und Verteilungsmaße der Reizschwellen in  $\mu\text{A}$  bzw. der logarithmierten Reizschwellen für alle Probanden pro Kontaktart dargestellt.

	Reizschwelle [ $\mu\text{A}$ ]				
	<i>H - P</i>	<i>H - R</i>	<i>H - D</i>	<i>Z - P</i>	<i>U - E</i>
<b>Mittelwert</b>	1291,8	1234,7	1213,5	408,6	221,0
<b>Median</b>	1238,2	1207,7	1185,7	398,2	192,0
<b>5% Perzentil</b>	897,1	910,4	839,8	271,8	55,2
<b>95% Perzentil</b>	1758,4	1658,0	1663,7	606,3	441,8
<b>Varianz</b>	72954,8	56741,9	67385,6	11826,2	15959,8
<b>Standardabweichung</b>	270,1	238,2	259,6	108,7	126,3
<b>Minimum</b>	821,3	766,7	770,1	235,0	24,2
<b>Maximum</b>	2091,5	1991,9	1869,2	722,4	576,7
<b>Spannweite</b>	1270,2	1225,2	1099,1	487,4	552,5
<b>Interquartilsabstand</b>	428,5	360,2	447,3	182,5	202,6
<b>Schiefe</b>	0,382	0,539	0,323	0,534	0,585
<b>Standardfehler Schiefe</b>	0,181	0,182	0,182	0,182	0,181
<b>Kurtosis</b>	-0,727	-0,043	-0,870	-0,570	-0,461
<b>Standardfehler Kurtosis</b>	0,360	0,362	0,361	0,361	0,360

**Tabelle 4-8:** Lage-, Streu- und Verteilungsmaße der Reizschwelle für alle Probanden pro Kontaktart

	Log. Reizschwelle				
	<i>H - P</i>	<i>H - R</i>	<i>H - D</i>	<i>Z - P</i>	<i>U - E</i>
<b>Mittelwert</b>	3,102	3,084	3,074	2,596	2,262
<b>Median</b>	3,093	3,082	3,074	2,600	2,283
<b>5% Perzentil</b>	2,953	2,959	2,924	2,434	1,742
<b>95% Perzentil</b>	3,245	3,220	3,221	2,783	2,645
<b>Varianz</b>	0,008	0,007	0,009	0,013	0,083
<b>Standardabweichung</b>	0,091	0,083	0,093	0,114	0,288
<b>Minimum</b>	2,915	2,885	2,887	2,371	1,385
<b>Maximum</b>	3,320	3,299	3,272	2,859	2,761
<b>Spannweite</b>	0,406	0,415	0,385	0,488	1,376
<b>Interquartilsabstand</b>	0,144	0,129	0,162	0,202	0,421
<b>Schiefe</b>	0,034	0,114	0,004	0,146	-0,584
<b>Standardfehler Schiefe</b>	0,181	0,182	0,182	0,182	0,181
<b>Kurtosis</b>	-0,854	-0,548	-1,011	-1,057	-0,094
<b>Standardfehler Kurtosis</b>	0,360	0,362	0,361	0,361	0,360

**Tabelle 4-9:** Lage-, Streu- und Verteilungsmaße der log. Reizschwelle für alle Probanden pro Kontaktart

Für jeden einzelnen Probanden sind die Lage-, Streu- und Verteilungsmaße der Reizschwellen in den Tabellen A-4 bis A-12 im Anhang zusammengefasst.

Die Überprüfung auf Normalverteilung der Reizschwellendaten bzw. der logarithmierten Reizschwellendaten mit dem Kolmogorov-Smirnov Test zeigt, dass die Nullhypothese „Die zu testende Verteilung ist eine Normalverteilung“ nur für die logarithmierten Reizschwellendaten auf dem 5% Signifikanzniveau nicht abgelehnt werden kann (Tabelle 4-10). Die Häufigkeitsverteilungen der log. Reizschwellen für alle Probanden und pro Kontaktart sind in den Abbildungen A-1 bis A-5 im Anhang dargestellt.

	Signifikanz <i>p</i>	
	Reizschwelle [ $\mu$ A]	Log. Reizschwelle
<b>Hand-Platte</b>	<b>0,038</b>	0,192
<b>Zeigefinger-Platte</b>	<b>0,036</b>	0,073
<b>Hand-Rohr</b>	0,270	0,644
<b>Hand-Draht</b>	0,163	0,353
<b>Unterarm-Elektroden</b>	0,070	0,250

**Tabelle 4-10:** Signifikanzwerte des Kolmogorov-Smirnov Tests auf Normalverteilung der Reizschwellendaten des Probandenkollektives

### Parameter aus den Fragebögen

Die momentane Verfassung der Probanden, zum Zeitpunkt der Reizschwellenmessungen, wurde mit Hilfe einer Eigenschaftswörterliste beurteilt. Hierzu sind in den Abbildungen A-6 bis A-8 im Anhang zu den Parametern Aktiviertheit, Müdigkeit und Empfindlichkeit die jeweilige prozentuelle Aufteilung der Ausprägungen dargestellt und es ist erkennbar, dass die prozentuelle Aufteilung der Ausprägungen im Schnitt für jede Kontaktart je nach Parameter gleich ist. Somit können Reizschwellenunterschiede der Probanden zwischen den Kontaktarten nicht auf mögliche Einflüsse der Parameter Müdigkeit, Aktiviertheit und Empfindlichkeit zurückgeführt werden. Die Auswertung des Parameters Ängstlichkeit ergab für alle Messungen die Ausprägung „nicht ängstlich“.

Zusätzlich wurden in einem Anamnesefragebogen die Parameter, Allgemeinbefinden, Sensorik, Hautzustand, Wetterfühligkeit, Allergien, circadianer Rhythmus, Raucher, Alter, Größe, Gewicht, Hautfaltendicke und Unterarmabmessungen, einmal pro Proband abgefragt.

### Vergleich der Reizschwellen für alle Probanden

In den Abbildungen 4-1 bis 4-5 sind für jede Kontaktart die Reizschwellen der einzelnen Probanden gegenübergestellt. Hierzu sind die Reizschwellendaten absteigend vom unempfindlichsten bis zum empfindlichsten Probanden geordnet. Die Abbildungen zeigen, dass die Reihenfolge der Probanden, vom unempfindlichsten bis zum empfindlichsten, annähernd für jede der Kontaktarten *Hand-Platte*, *Zeigefinger-Platte*, *Hand-Rohr* und *Hand-Draht* übereinstimmt. Für die Kontaktart *Unterarm-Elektroden* kann diese Feststellung nur zum Teil bestätigt werden.

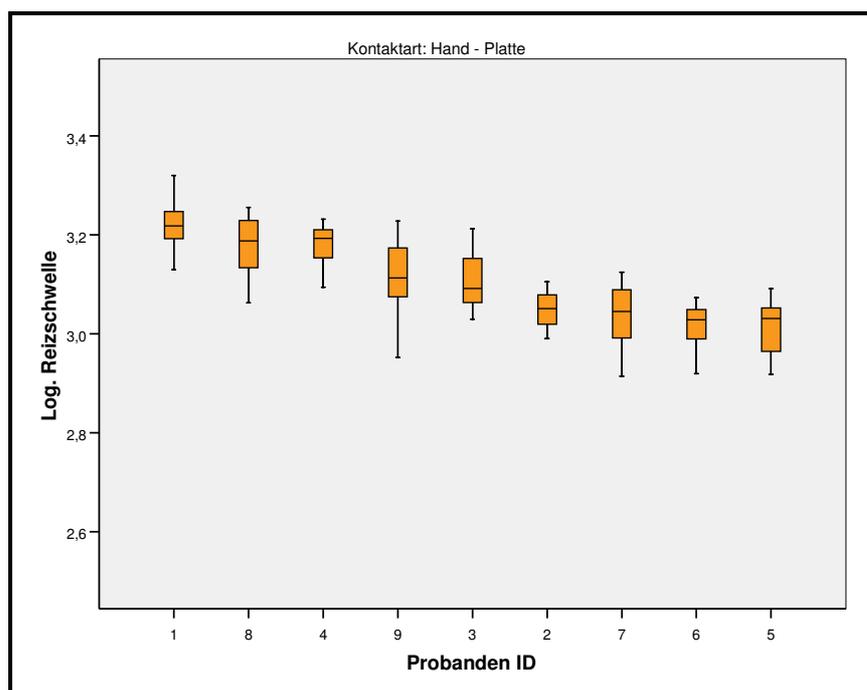


Abbildung 4-1: Boxplots der log. Reizschwelle für die einzelnen Probanden, Kontaktart: *Hand-Platte*

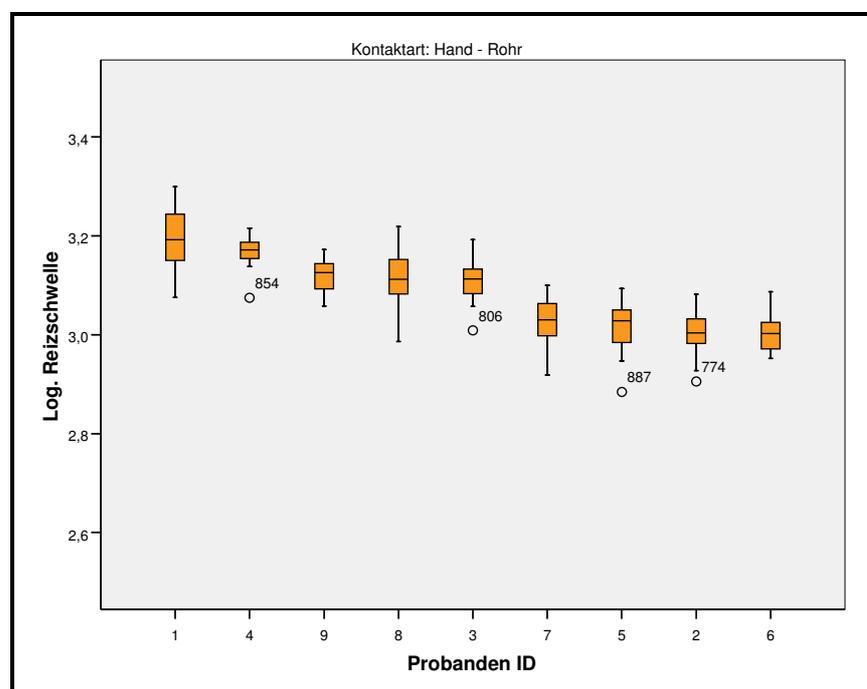


Abbildung 4-2: Boxplots der log. Reizschwelle für die einzelnen Probanden, Kontaktart: *Hand-Rohr*

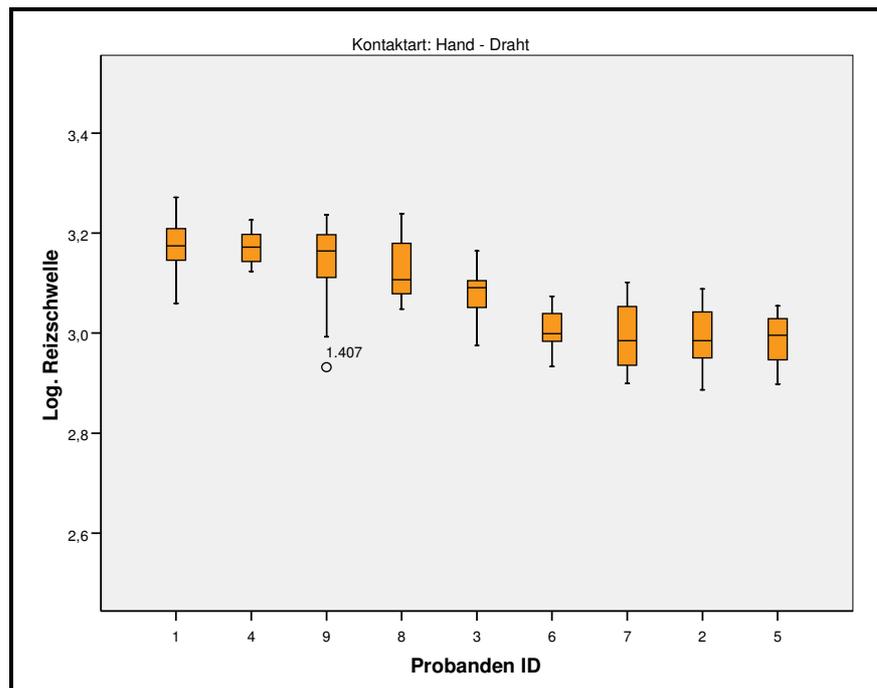


Abbildung 4-3: Boxplots der log. Reizschwelle für die einzelnen Probanden, Kontaktart: *Hand-Draht*

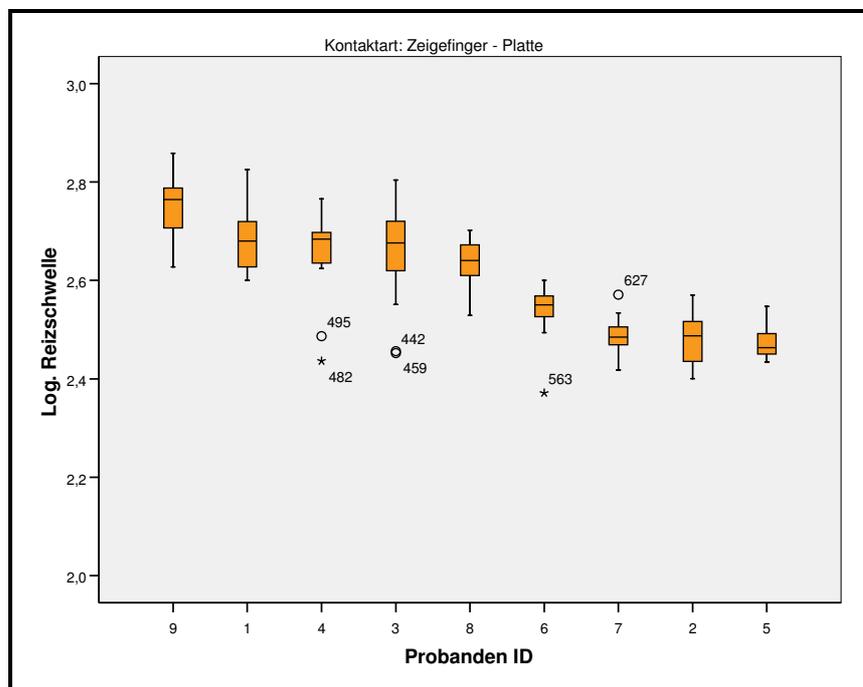
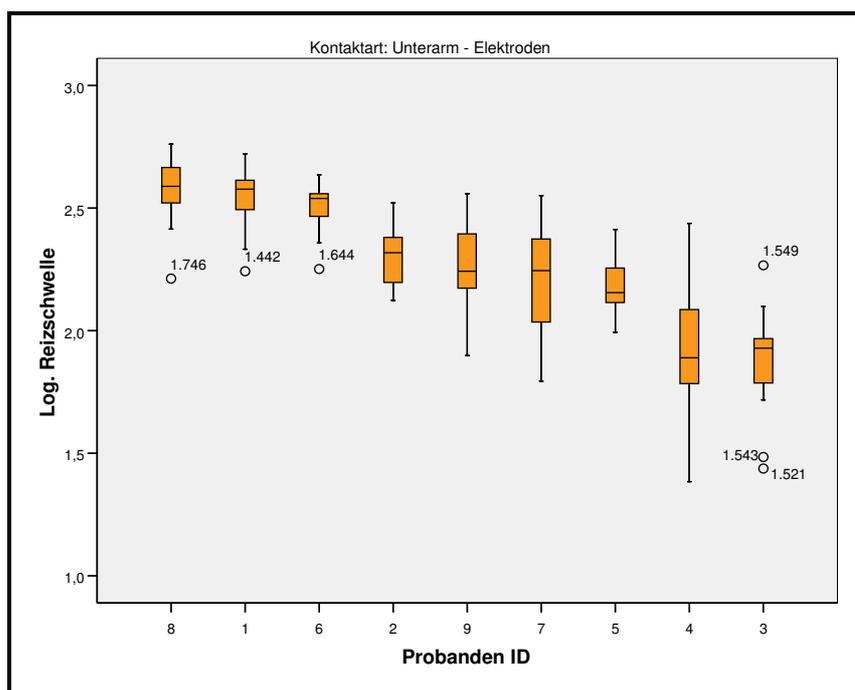


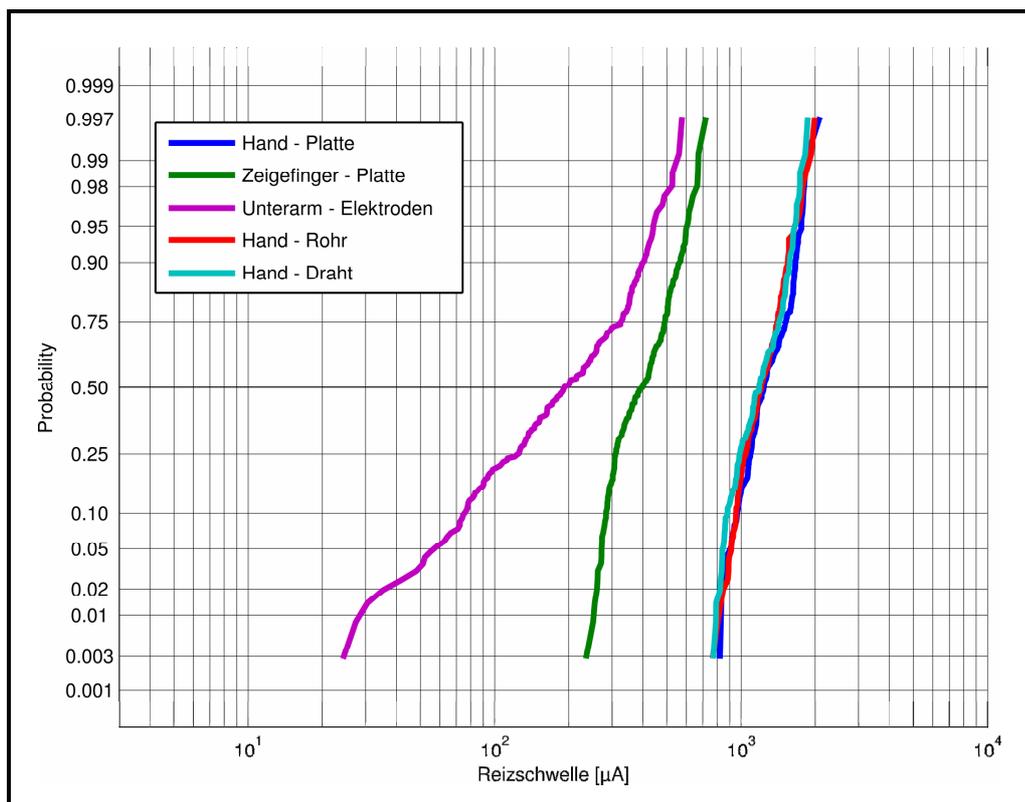
Abbildung 4-4: Boxplots der log. Reizschwelle für die einzelnen Probanden, Kontaktart: *Zeigefinger-Platte*



**Abbildung 4-5:** Boxplots der log. Reizschwelle für die einzelnen Probanden, Kontaktart: *Unterarm-Elektroden*

#### Vergleich der Reizschwelle für alle Probanden gepoolt

Abbildung 4-6 zeigt pro Kontaktart und für die gepoolten Daten aller Probanden die Summenhäufigkeitsverteilung der Reizschwelle. Es zeigt sich, dass die Verteilungen der Reizschwellen über weite Bereiche durch eine Gerade angenähert werden können und somit einer Log-Normalverteilung entsprechen. Für die Kontaktarten *Hand-Platte*, *Zeigefinger-Platte*, *Hand-Rohr* und *Hand-Draht* zeigen die Kurven der Reizschwellenwerte aufgrund gleicher Steigung dieselbe Streuung. Im Vergleich dazu zeigt die Verteilung der Daten für die Kontaktart *Unterarm-Elektroden* eine größere Streuung. Die Summenhäufigkeitsverteilungen der Reizschwellen jedes einzelnen Probanden sind in den Abbildungen A-9 bis A-17 im Anhang dargestellt.



**Abbildung 4-6:** Probability-Plots der Einzelwerte der elektrischen Reizschwelle gepoolt für alle Probanden und alle 5 Kontaktarten (N = 180 pro Kontaktart)

Die Ergebnisse zeigen weiters, dass der Medianwert der Reizschwelle für die Kontaktart *Zeigefinger-Platte* um den Faktor 2,07 höher ist als der Medianwert der Reizschwelle für die Kontaktart *Unterarm-Elektroden*. Zudem sind die Reizschwellenmediane der Probanden für die Kontaktarten *Hand-Draht* um 6,18fach, *Hand-Rohr* um 6,29fach und *Hand-Platte* um 6,45fach höher als der Medianwert der Reizschwellen für die Kontaktart *Unterarm-Elektroden*.

Weiters zeigen sich bezüglich der Werte der log. Reizschwellen signifikante Unterschiede ( $p < 0,001$  mit Mann-Whitney-U und Kolmogorov-Smirnov-Z Test) zwischen den Kontaktarten *Unterarm-Elektroden* und *Zeigefinger-Platte* zu den anderen Kontaktarten. Für die Kontaktarten *Hand-Platte*, *Hand-Rohr* und *Hand-Draht* wurde die Nullhypothese „Die Daten der log. Wahrnehmbarkeitsschwellen stammen aus derselben Grundgesamtheit“, überprüft. In Tabelle 4-11 sind die

Ergebnisse als Signifikanzwerte der angewendeten Testverfahren angeführt. Es zeigt sich nur für die Kontaktarten *Hand-Rohr* und *Hand-Draht* kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den log. Reizschwellendaten. Beim Vergleich der log. Reizschwellen des Probandenkollektives für die Kontaktarten *Hand-Platte* und *Hand-Rohr* zeigt sich ein signifikanter Unterschied, wobei die Signifikanzwerte des T-Tests und des Kolmogorov-Smirnov-Z Tests nur knapp unter dem Signifikanzniveau von 5% liegen.

Testverfahren	Signifikanz $p$		
	H - P / H - R	H - R / H - D	H - D / H - P
<b>T - Test</b> Levene Test	<b>0,049</b> 0,143	*** 0,046	<b>0,005</b> 0,599
<b>Mann-Whitney-U Test</b>	0,056	0,382	<b>0,007</b>
<b>Kolmogorov-Smirnov-Z Test</b>	<b>0,020</b>	0,273	<b>0,032</b>

**Tabelle 4-11:** Signifikanzwerte statistischer Testverfahren bezüglich der Zusammenhänge zwischen den Reizschwellendaten zu *Hand-Platte*, *Hand-Rohr* und *Hand-Draht* (\*\*... Voraussetzung für T-Test nicht gegeben, da  $p < 0,05$  des Levene Tests)

#### Vergleich der Reizschwelle mit den Ergebnissen aus der Literatur

Um einen Vergleich der vorliegenden Daten mit den bisher publizierten Ergebnissen zu ermöglichen, wird ein repräsentativer Wert als Reizschwelle pro Proband und Kontaktart benötigt. Zu diesem Zweck wurde der Medianwert aus den 20 Reizschwellenwerten pro Proband und Kontaktart, welche am Anfang des Kapitels 4.3 bestimmt wurden, gebildet. Somit ergibt sich ein repräsentativer Reizschwellenwert pro Proband und pro Kontaktart.

In Tabelle 4-12 sind die Daten zur Bestimmung der elektrischen Wahrnehmbarkeitsschwelle für Männer jener publizierten Arbeiten zusammengefasst, die mit den Ergebnissen dieser Diplomarbeit verglichen wurden.

Autor	Jahr	Anzahl Probanden	Kontaktelektrode	Stimulationsort	Mittelwert [ $\mu$ A]
Thompson [29]	1933	42	Metalloberfläche	rechter Zeigefinger	400
			zyl. Metallstab mit 1" Durchm.	rechte Hand	1190
Dalziel [5]	1940	114	Kupferdraht Nr. 7	Hand	1086
	1948/49	28	Kupferdraht Nr. 8	Hand	
	1953	25	Kupferdraht Nr. 8	Hand	
Osypka [22]	1963	50	Messingkolben mit 90cm <sup>2</sup> Oberfl.	Hand	1200
Batz und Irnich [1, 9]	1989	320	Messingstab mit 24mm Durchm.	Hand	1134
	1996	388	Aluplatte	Hand	950 *
Levin [19]	1991	20 **	Kupferplatte	Zeigefinger	349
Leitgeb und Schröttner [15]	2002	349	EKG Elektrode A=3,14cm <sup>2</sup>	Unterarm	313
Lindenblatt und Silny [20]	2006	8 ***	Klebelektrode A=1cm <sup>2</sup>	linker Zeigefinger	244

**Tabelle 4-12:** Zusammenfassung bisheriger Arbeiten zur elektr. Wahrnehmbarkeitsschwelle

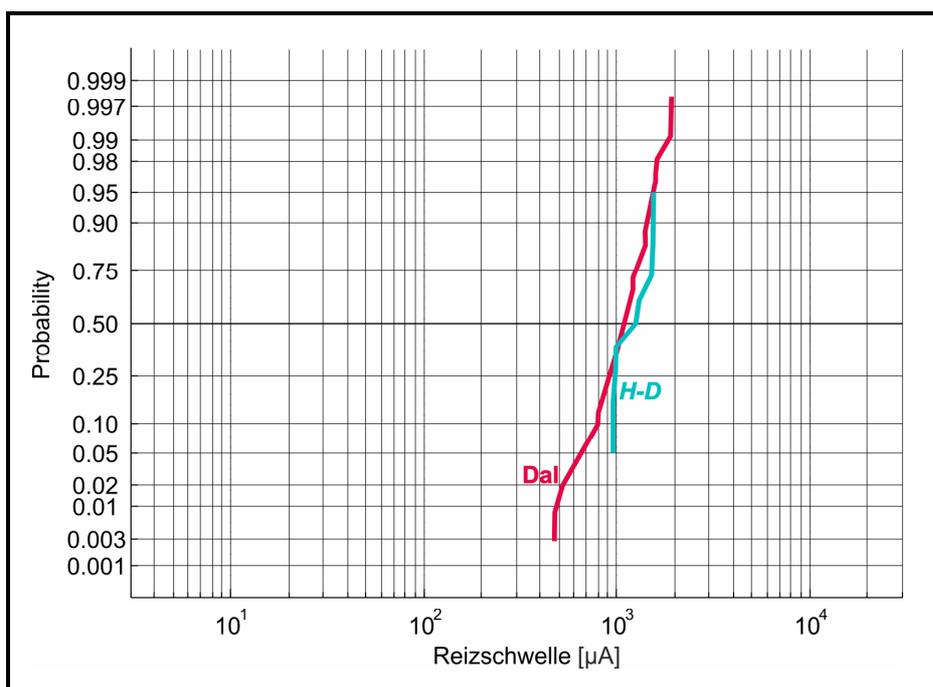
(\*...Es wurden die Ergebnisse aus beiden Untersuchungsreihen gepoolt;

\*\*...Die Reizschwellendaten wurden mit jene von zwei Frauen gepoolt;

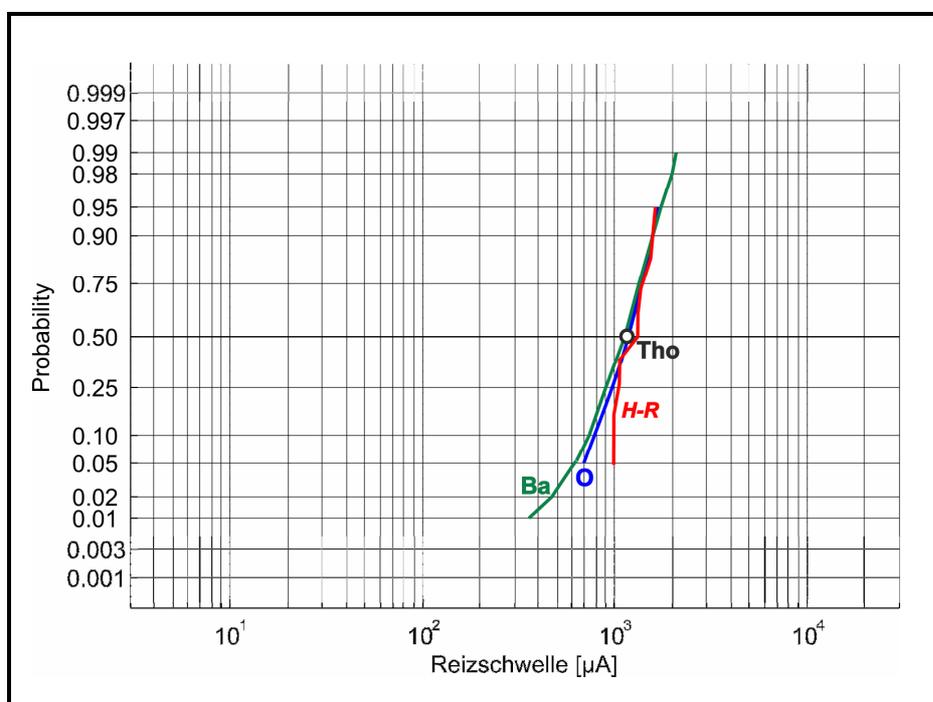
\*\*\*...Von den 8 männlichen Probanden haben nur 3 die gesamte Untersuchungsreihe durchgeführt)

Im Vergleich zu den Ergebnissen von Dalziel [5] zeigt sich, dass die Summenhäufigkeitsverteilung der elektrischen Wahrnehmbarkeitsschwelle der Probanden für die Kontaktart *Hand-Draht* annähernd einen parallelen Verlauf aufweist (Abbildung 4-7). Der Medianwert ist dabei um das 1,14fache höher.

Die Lage des Medianwertes des Probability-Plots für die Kontaktart *Hand-Rohr* (Abbildung 4-8) stimmt weitgehend mit den Ergebnissen von Batz und Irnich [9], Osypka [22] und Thompson [29] überein, allerdings ist die Streuung der Kurve der Reizschwellenwerte der 9 Probanden für die Kontaktart *Hand-Rohr* geringer als jene der anderen Autoren.

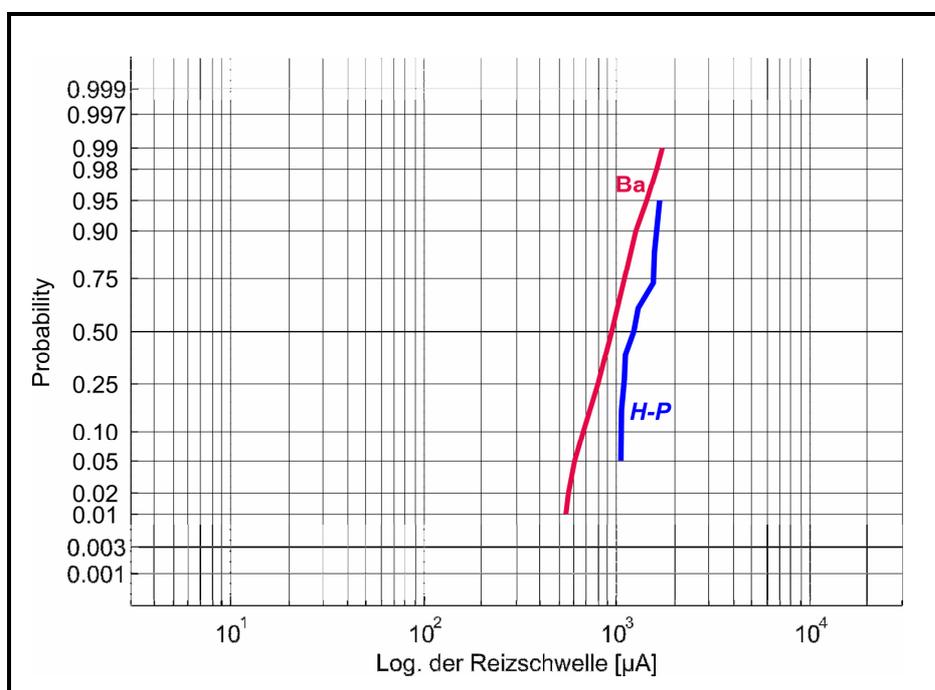


**Abbildung 4-7:** Probability-Plots der Medianwerte der Reizschwellen aller Probanden für die Kontaktart *Hand-Draht* (*H-D*,  $N = 9$ ) im Vergleich mit den Ergebnissen von Dalziel [5] (Dal...Dalziel)



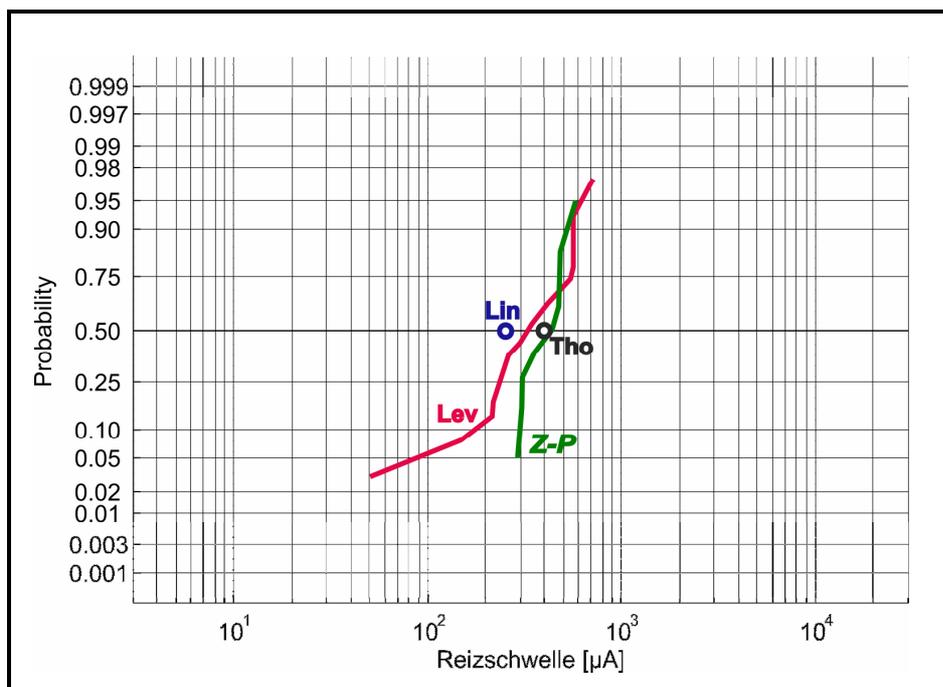
**Abbildung 4-8:** Probability-Plots der Medianwerte der Reizschwellen aller Probanden für die Kontaktart *Hand-Rohr* (*H-R*,  $N = 9$ ) im Vergleich mit den Ergebnissen aus der Literatur (Ba...Batz und Irnich [9], O...Osypka [22], Tho...Thompson [29])

Aus den Messergebnissen zu der Kontaktart *Hand-Platte* (Abbildung 4-9) zeigt der Reizschwellenverlauf der 9 Probanden einen um 1,3fach höheren Medianwert gegenüber den Ergebnissen von Batz und Irnich [1]. Weiters zeigen die Probability-Plots annähernd einen parallelen Verlauf. Allerdings ist hier anzumerken, dass Batz und Irnich [1] die Ergebnisse der ersten Reizschwellenuntersuchung mit den Ergebnissen ihrer nachfolgenden Untersuchung gepoolt haben.



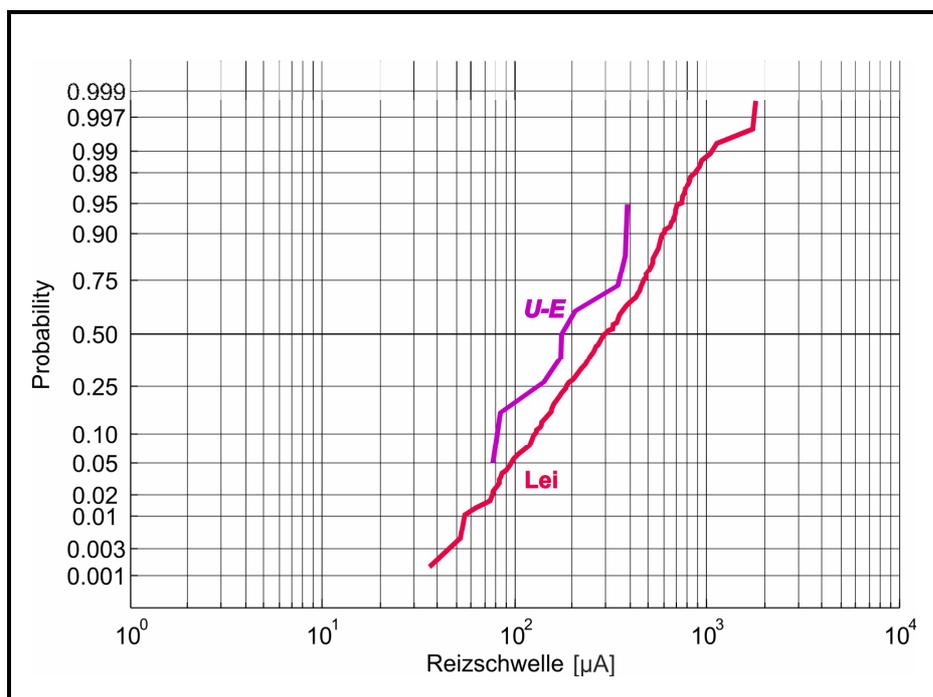
**Abbildung 4-9:** Probability-Plots der Medianwerte der Reizschwellen aller Probanden für die Kontaktart *Hand-Platte* (*H-P*,  $N = 9$ ) im Vergleich mit den Ergebnissen von Batz und Irnich [1] (Ba...Batz und Irnich)

Abbildung 4-10 zeigt die Summenhäufigkeitsverteilung der elektrischen Wahrnehmbarkeitsschwelle der Probanden für die Kontaktart *Zeigefinger-Platte* gemeinsam mit den Ergebnissen von Lindenblatt und Silny [20], Levin [19] und Thompson [29]. Die Ergebnisse zeigen, dass der Medianwert der Reizschwellendaten für die Kontaktart *Zeigefinger-Platte* um 1,79fach bzw. 1,25fach höher ist als jener aus den Ergebnissen von Lindenblatt und Silny [20] bzw. von Levin [19], aber mit dem Medianwert aus den Daten von Thompson [29] übereinstimmt. Weiters kann man erkennen, dass die Summenhäufigkeitskurve der Reizschwellen für die Kontaktart *Zeigefinger-Platte*, im Gegensatz zu jener von Levin [19], eine geringere Streuung aufweist.



**Abbildung 4-10:** Probability-Plots der Medianwerte der Reizschwellen aller Probanden für die Kontaktart *Zeigefinger-Platte* (Z-P, N = 9) im Vergleich mit den Ergebnissen aus der Literatur (Lin...Lindenblatt und Silny [20], Lev...Levin [19], Tho...Thompson [29])

Der Reizschwellenverlauf der 9 Probanden für die Kontaktart *Unterarm-Elektroden* in Abbildung 4-11 zeigt einen um 1,78fach niedrigeren Medianwert gegenüber den bisherigen Ergebnissen von Leitgeb und Schröttner [15]. Weiters ist erkennbar, dass die Summenhäufigkeitskurve für die Kontaktart *Unterarm-Elektroden* einen parallelen Verlauf zu den Reizschwellendaten aus den Untersuchungen von Leitgeb und Schröttner [15] aufweist.



**Abbildung 4-11:** Probability-Plots der Medianwerte der Reizschwellen aller Probanden für die Kontaktart *Unterarm-Elektroden* (*U-E*,  $N = 9$ ) im Vergleich mit den Ergebnissen von Leitgeb und Schröttner [15] (Lei...Leitgeb und Schröttner)

Weiters wurden Umrechnungsfaktoren berechnet, welche die Messwerte der vorliegenden Arbeit mit denen der Literatur in Zusammenhang bringt. Berechnet wurde dabei das Verhältnis zwischen dem Medianwert der Reizschwelle für die Allgemeinbevölkerung (Leitgeb und Schröttner [15]) und dem Medianwert der Messergebnisse für alle Probanden pro Kontaktart (Tabelle 4-13). In Tabelle 4-14 sind die Verhältnisse zwischen dem Medianwert der Reizschwellen für die Allgemeinbevölkerung und den Medianwerten bzw. Mittelwerten der Reizschwellendaten aus der Literatur zusammengefasst.

Verhältnis zwischen den Medianwerten der Reizschwellendaten	Unterarm-Elektroden	Zeigefinger-Platte	Hand-Draht	Hand-Rohr	Hand-Platte
Leitgeb und Schröttner [15]	0,56	1,40	3,94	4,14	3,95

**Tabelle 4-13:** Ermittelte Verhältniszahlen zwischen dem Medianwert der Ergebnisse von Leitgeb und Schröttner [15] und den Medianwerten der Ergebnisse zu den 9 Probanden für die einzelnen Kontaktarten

Verhältnis zwischen den Medianwerten der Reizschwellendaten	Lindenblatt und Silny [20]	Levin [19]	Thompson [29]	Dalziel [5]	Batz und Irnich [1]	Batz und Irnich [9]	Thompson [29]	Osypka [22]
Leitgeb und Schröttner [15]	0,78	1,12	1,28	3,47	3,04	3,62	3,80	3,83

**Tabelle 4-14:** Ermittelte Verhältniszahlen zwischen dem Medianwert der Ergebnisse von Leitgeb und Schröttner [15] und den Medianwerten der Ergebnisse zu bisher publizierten Arbeiten

Die Ergebnisse zeigen, dass im Bezug zu den für die Allgemeinbevölkerung repräsentativen Ergebnissen von Leitgeb und Schröttner [15] die Umrechnungsfaktoren zu den Daten für die Kontaktarten *Zeigefinger-Platte*,

*Hand-Platte*, *Hand-Rohr* und *Hand-Draht* weitgehend mit den Faktoren aus Tabelle 4-14 (mit Ausnahme von Lindenblatt und Silny [20]) übereinstimmen.

#### 4.4 Zusammenhang der Kontaktfläche mit der Reizschwelle

Um den Zusammenhang zwischen der elektrischen Wahrnehmbarkeitsschwelle und der Kontaktfläche beurteilen zu können, wurde die Stromdichte berechnet. Hierzu wurde für jede Armseite der Probanden die Wahrnehmbarkeitsschwelle in  $\mu\text{A}$  durch die zugehörige Kontaktfläche in  $\text{cm}^2$  (vgl. Tabelle 3-2) dividiert. Somit ergeben sich für jede Armseite jedes Probanden pro Kontaktart 20 Werte für die Wahrnehmungsschwelle der Stromdichte.

In den folgenden Tabellen 4-15 bis 4-19 sind Lage-, Streu- und Verteilungsmaße der Wahrnehmungsschwelle der Stromdichte für alle Probanden und pro Kontaktart dargestellt. Hierzu wurde die Stromdichte in  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  sowie die logarithmierte Stromdichte für jede Armseite gegenübergestellt.

Kontaktart <i>Hand - Platte</i>	Stromdichte [ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ]		Log. Stromdichte	
	Armseite		Armseite	
	links	rechts	links	rechts
Mittelwert	26,8	28,5	1,409	1,439
Median	26,6	27,7	1,426	1,443
5% Perzentil	14,8	16,9	1,170	1,227
95% Perzentil	40,1	41,6	1,603	1,619
Varianz	59,8	57,7	0,017	0,014
Standardabweichung	7,7	7,6	0,130	0,120
Minimum	12,8	14,1	1,106	1,150
Maximum	46,6	45,6	1,668	1,659
Spannweite	33,8	31,5	0,562	0,509
Interquartilsabstand	10,8	11,4	0,183	0,177
Schiefe	0,287	0,228	-0,277	-0,280
Standardfehler Schiefe	0,183	0,183	0,183	0,183
Kurtosis	-0,584	-0,784	-0,668	-0,589
Standardfehler Kurtosis	0,363	0,363	0,363	0,363

**Tabelle 4-15:** Lage-, Streu- und Verteilungsmaße der Wahrnehmungsstromdichte in  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  sowie der log. Wahrnehmungsstromdichte für die linke und rechte Armseite aller Probanden, Kontaktart: *Hand-Platte*

Kontaktart <i>Zeigefinger - Platte</i>	Stromdichte [ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ]		Log. Stromdichte	
	Armseite		Armseite	
	links	rechts	links	rechts
Mittelwert	177,4	200,9	2,230	2,286
Median	169,8	209,4	2,230	2,321
5% Perzentil	108,1	100,8	2,034	2,003
95% Perzentil	275,5	292,5	2,440	2,466
Varianz	2788,1	2805,9	0,016	0,016
Standardabweichung	52,8	53,0	0,127	0,128
Minimum	90,8	88,2	1,958	1,945
Maximum	316,8	334,2	2,501	2,524
Spannweite	226,0	246,0	0,543	0,578
Interquartilsabstand	79,2	63,7	0,204	0,140
Schiefe	0,618	-0,137	0,099	-0,857
Standardfehler Schiefe	0,182	0,182	0,182	0,182
Kurtosis	-0,376	-0,174	-0,796	0,347
Standardfehler Kurtosis	0,361	0,361	0,361	0,361

**Tabelle 4-16:** Lage-, Streu- und Verteilungsmaße der Wahrnehmungsstromdichte in  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  sowie der log. Wahrnehmungsstromdichte für die linke und rechte Armseite aller Probanden, Kontaktart: *Zeigefinger-Platte*

Kontaktart <i>Hand - Rohr</i>	Stromdichte [ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ]		Log. Stromdichte	
	Armseite		Armseite	
	links	rechts	links	rechts
Mittelwert	20,1	21,9	1,292	1,331
Median	19,9	21,0	1,300	1,323
5% Perzentil	13,5	15,2	1,129	1,183
95% Perzentil	27,3	32,3	1,436	1,509
Varianz	20,7	23,8	0,010	0,009
Standardabweichung	4,5	4,9	0,100	0,093
Minimum	11,6	12,3	1,063	1,091
Maximum	29,0	36,3	1,462	1,560
Spannweite	17,4	24,0	0,400	0,469
Interquartilsabstand	7,8	5,4	0,171	0,111
Schiefe	0,130	0,830	-0,176	0,318
Standardfehler Schiefe	0,182	0,182	0,182	0,182
Kurtosis	-1,133	0,265	-1,045	-0,218
Standardfehler Kurtosis	0,362	0,362	0,362	0,362

**Tabelle 4-17:** Lage-, Streu- und Verteilungsmaße der Wahrnehmungsstromdichte in  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  sowie der log. Wahrnehmungsstromdichte für die linke und rechte Armseite aller Probanden, Kontaktart: *Hand-Rohr*

Kontaktart <i>Hand - Draht</i>	Stromdichte [ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ]		Log. Stromdichte	
	Armseite		Armseite	
	links	rechts	links	rechts
Mittelwert	159,5	171,3	2,184	2,219
Median	153,1	167,7	2,185	2,225
5% Perzentil	95,8	103,9	1,982	2,016
95% Perzentil	244,1	244,1	2,388	2,388
Varianz	2202,3	1883,5	0,017	0,013
Standardabweichung	46,9	43,4	0,130	0,113
Minimum	81,8	86,5	1,913	1,937
Maximum	266,1	262,5	2,425	2,419
Spannweite	184,3	176,1	0,512	0,482
Interquartilsabstand	76,6	71,2	0,217	0,183
Schiefe	0,334	0,202	-0,045	-0,221
Standardfehler Schiefe	0,182	0,182	0,182	0,182
Kurtosis	-0,986	-0,930	-1,160	-0,790
Standardfehler Kurtosis	0,362	0,361	0,362	0,361

**Tabelle 4-18:** Lage-, Streu- und Verteilungsmaße der Wahrnehmungsstromdichte in  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  sowie der log. Wahrnehmungsstromdichte für die linke und rechte Armseite aller Probanden, Kontaktart: *Hand-Draht*

Kontaktart <i>Unterarm - Elektroden</i>	Stromdichte [ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ]		Log. Stromdichte	
	Armseite		Armseite	
	links	rechts	links	rechts
Mittelwert	81,6	77,6	1,831	1,815
Median	76,7	71,5	1,885	1,854
5% Perzentil	23,4	20,1	1,370	1,303
95% Perzentil	170,4	154,0	2,231	2,187
Varianz	2051,1	1814,6	0,083	0,075
Standardabweichung	45,3	42,6	0,288	0,273
Minimum	7,7	10,2	0,888	1,009
Maximum	196,3	206,5	2,293	2,315
Spannweite	188,5	196,3	1,405	1,306
Interquartilsabstand	69,5	65,5	0,413	0,400
Schiefe	0,508	0,588	-0,738	-0,544
Standardfehler Schiefe	0,183	0,181	0,183	0,181
Kurtosis	-0,585	-0,310	0,342	-0,310
Standardfehler Kurtosis	0,363	0,360	0,363	0,360

**Tabelle 4-19:** Lage-, Streu- und Verteilungsmaße der Wahrnehmungsstromdichte in  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  sowie der log. Wahrnehmungsstromdichte für die linke und rechte Armseite aller Probanden, Kontaktart: *Unterarm-Elektroden*

### Überprüfung der Daten auf Normalverteilung

Die Überprüfung der Daten der Wahrnehmungsschwellen der Stromdichte bzw. der logarithmierten Stromdichte auf Normalverteilung erfolgte mit dem Kolmogorov-Smirnov Test. Hierzu wurden die Daten sowohl gepoolt als auch getrennt für jede Armseite der Probanden überprüft. Die Ergebnisse sind in Form von Signifikanzwerten in Tabelle 4-20 zusammengefasst und zeigen, dass die Nullhypothese „Die zu testende Verteilung ist eine Normalverteilung“ für die gepoolten Daten der Wahrnehmungsschwellen der logarithmierten Stromdichte der Probanden bei den Kontaktarten *Zeigefinger-Platte* und *Unterarm-Elektroden* auf dem Signifikanzniveau von 5% zurückzuweisen ist.

	Signifikanz $p$					
	Stromdichte [ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ]			Log. Stromdichte		
	Armseite			Armseite		
	links	rechts	gesamt	links	rechts	gesamt
<b>Hand-Platte</b>	0,834	0,525	0,523	0,325	0,639	0,486
<b>Zeigefinger-Platte</b>	0,108	0,208	0,326	0,436	<b>0,006</b>	<b>0,049</b>
<b>Hand-Rohr</b>	0,219	<b>0,005</b>	0,327	0,307	0,134	0,866
<b>Hand-Draht</b>	<b>0,015</b>	0,165	<b>0,012</b>	0,125	0,361	0,110
<b>Unterarm-Elektroden</b>	0,151	0,197	<b>0,019</b>	0,150	0,379	<b>0,045</b>

**Tabelle 4-20:** Signifikanzwerte des Kolmogorov-Smirnov Tests auf Normalverteilung der Daten der Wahrnehmungsstromdichte des Probandenkollektives

### Zusammenhang der stimulierten Armseite mit der Wahrnehmungsstromdichte

Aus den Lagemaßen der Werte der Stromdichte für alle Probanden (Tabellen 4-15 bis 4-19) sind zum Teil deutliche Unterschiede zwischen den Wahrnehmungsschwellen der linken und rechten Armseite erkennbar. Deshalb wurde überprüft, ob sich die Werte der log. Stromdichte jeder Armseite statistisch signifikant voneinander unterscheiden. In Tabelle 4-21 sind die Ergebnisse als Signifikanzwerte der angewendeten Testverfahren angeführt. Es zeigen sich für die Kontaktarten *Zeigefinger-Platte*, *Hand-Rohr* und *Hand-Draht* Signifikanzwerte von  $p < 0,05$  bei den nichtparametrischen Mann-Whitney-U und Kolmogorov-Smirnov-Z Tests, womit die Nullhypothese, „Die Daten der

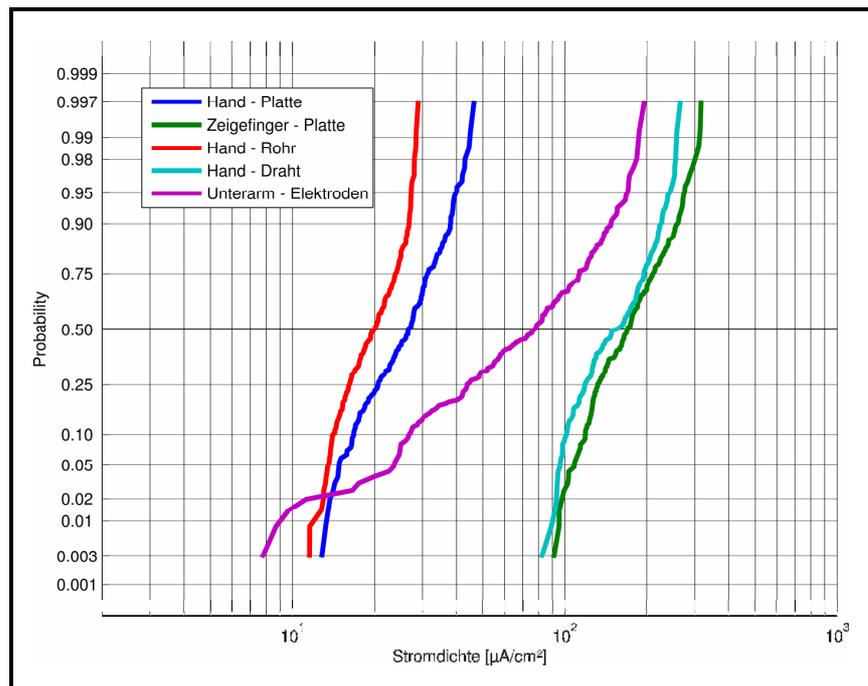
Wahrnehmbarkeitsschwellen der log. Stromdichte beider Arme stammen aus derselben Grundgesamtheit“, abgelehnt werden muss. Für die Kontaktart *Hand-Platte* zeigt nur das Ergebnis des T-Tests einen Signifikanzwert von  $p < 0,05$ , woraufhin die Nullhypothese ebenfalls abgelehnt werden müsste. Für die Kontaktart *Unterarm-Elektroden* ergibt sich kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den log. Stromdichten der linken und rechten Armseite auf dem 5 % Signifikanzniveau.

Testverfahren	Signifikanz $p$				
	H - P	H - R	H - D	Z - P	U - E
	links - rechts	links - rechts	links - rechts	links - rechts	links - rechts
<b>T - Test</b> Levene Test	<b>0,026</b> 0,263	* 0,021	* 0,004	**	**
<b>Mann-Whitney-U Test</b>	0,050	<b>0,002</b>	<b>0,009</b>	<b>0,000</b>	0,455
<b>Kolmogorov-Smirnov-Z Test</b>	0,165	<b>0,004</b>	<b>0,002</b>	<b>0,000</b>	0,844

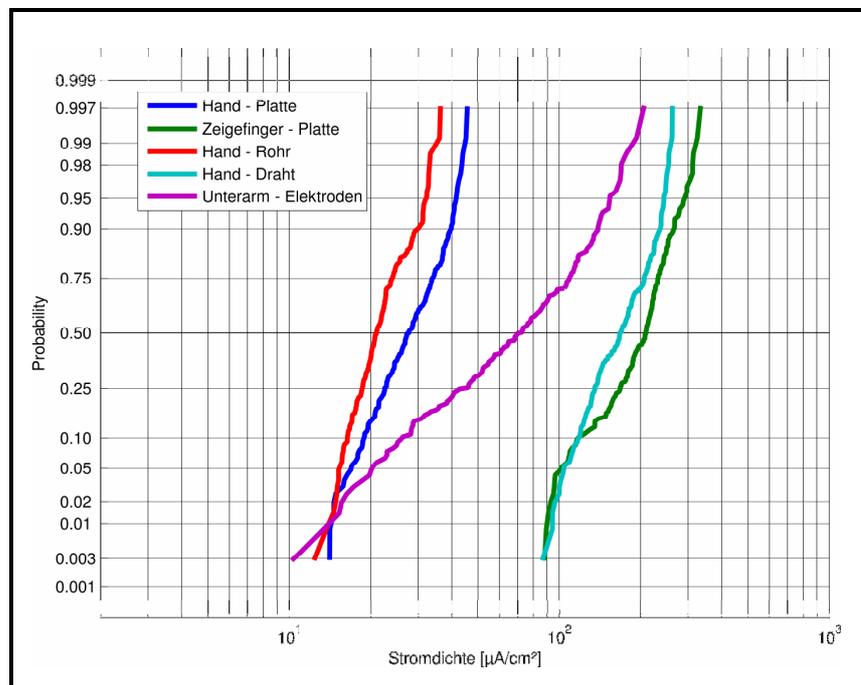
**Tabelle 4-21:** Signifikanzwerte statistischer Testverfahren bezüglich der Zusammenhänge zwischen den log. Wahrnehmungsstromdichten der linken und rechten Armseite aller Probanden (\*...Voraussetzung für T-Test nicht gegeben, da  $p < 0,05$  des Levene Tests; \*\* ...Voraussetzung für T-Test nicht gegeben, da  $p < 0,05$  des Kolmogorov-Smirnov Tests)

#### Vergleich der Wahrnehmungsstromdichte der Probandengruppe bezogen auf die einzelnen Kontaktarten

Die Abbildungen 4-12 und 4-13 zeigen die Summenhäufigkeitsverteilungen der Stromdichten der gesamten Probandengruppe für jede Armseite und jede Kontaktart. Für die Kontaktarten *Hand-Platte*, *Zeigefinger-Platte*, *Hand-Rohr* und *Hand-Draht* zeigen die Kurven der Stromdichtewerte annähernd dieselbe Streuung. Im Vergleich dazu zeigt die Verteilung der Daten für die Kontaktart *Unterarm-Elektroden* eine größere Streuung und liegt über einen weiten Bereich zwischen den Verteilungen für die Kontaktarten *Hand-Platte* und *Hand-Draht*. Die Summenhäufigkeitsverteilungen der Stromdichtewerte für jeden einzelnen Probanden sind in den Abbildungen A-18 bis A-35 im Anhang dargestellt.



**Abbildung 4-12:** Probability-Plots der Wahrnehmungsstromdichte für die linke Armseite der Probanden (N = 180 pro Kontaktart)



**Abbildung 4-13:** Probability-Plots der Wahrnehmungsstromdichte für die rechte Armseite der Probanden (N = 180 pro Kontaktart)

## 5 DISKUSSION

### 5.1 Einfluss des Berührungsdruks auf die Reizschwelle

Der ausgeübte Berührungsdruk auf die aktive Elektrode stellt einen möglichen Einflussparameter auf die Wahrnehmbarkeitsschwelle dar. Durch eine Änderung des Berührungsdruks auf die Kontaktstelle, ändert sich auch die Größe der Berührungsfläche und damit auch die Wahrnehmbarkeitsschwelle des Probanden. Bei Kontaktarten wo der ausgeübte Berührungsdruk auf die aktive Elektrode von Messung zu Messung variieren kann, muss mit einer größeren Streuung der Wahrnehmbarkeitsschwelle gerechnet werden.

Der ausgeübte Berührungsdruk auf die aktive Elektrode bei der Kontaktart *Hand-Platte* kann als konstant angenommen werden, da bei diesen Messungen die Handfläche nach oben gerichtet ist und die aktive Elektrode mit konstantem Gewicht auf der Handfläche aufliegt (vgl. Kapitel 3.1.1). Bei der Kontaktart *Zeigefinger-Platte* wurde der Berührungsdruk auf die aktive Elektrode während der Messungen ebenfalls konstant gehalten, indem dieser indirekt mittels einer Waage überwacht wurde (vgl. Kapitel 3.1.2).

Demnach kann angenommen werden, dass die Streuungen der Reizschwellen der Probanden für die Kontaktarten *Hand-Platte* und *Zeigefinger-Platte* geringer sein müssten als die Streuungen der Reizschwellen für die Kontaktarten *Hand-Draht* und *Hand-Rohr*.

Diese Annahme kann anhand der vorliegenden Ergebnisse nicht bestätigt werden. Abbildung 4-6 zeigt, dass die Verteilungen der Reizschwellen für die Kontaktarten *Hand-Draht*, *Hand-Rohr*, *Hand-Platte* und *Zeigefinger-Platte* dieselbe Streuung aufweisen. Somit kann in dieser Untersuchung ein möglicher Einfluss des Berührungsdruks auf die Reizschwelle ausgeschlossen werden.

## 5.2 Einfluss der Kontaktart auf die Reizschwelle

Aus der Sinnesphysiologie ist bekannt, dass die Größe der Stimulationsfläche ein wesentlicher Parameter für das Auftreten einer Empfindung ist [12, 24]. Die Wahrnehmung von Reizen ist somit auch von der Zahl der Neurone, die von einem Reiz gleichzeitig erregt werden, abhängig. Je mehr Nervenzellen in die Erregung einbezogen sind, desto früher kommt die Erregung zustande. In Zusammenhang mit der Wahrnehmungsstromdichte ergibt sich, dass die Wahrnehmung der Stromdichte sich mit größerer Stimulationsfläche reduziert.

Die zur Erfassung von Reizen dienenden somatosensorischen Rezeptoren in der Haut sind je nach Körperregion unterschiedlich dicht verteilt. Die in dieser Arbeit zur Bestimmung der Wahrnehmbarkeitsschwelle stimulierten Kontaktstellen am Körper können im Prinzip in drei Areale (Unterarm, Handfläche und Zeigefinger) unterteilt werden. Bezogen auf den Tastsinn haben die Handflächen verglichen mit den Unterarmen eine höhere Rezeptorendichte, wobei die Fingerspitzen die höchste Rezeptorendichte aufweisen [12, 24]. Davon ausgehend kann angenommen werden, dass bei jeweils gleich großer Stimulationsfläche dieser drei Körperbereiche die Wahrnehmung der elektrischen Stromdichte im Bereich der Handfläche niedriger ist als im Bereich des Unterarmes wobei die Zeigefingerspitze die niedrigste Wahrnehmungsstromdichte aufweisen müsste.

Da aber in dieser Arbeit zur Bestimmung der elektrischen Wahrnehmbarkeitsschwelle die Größe der Kontaktfläche je nach Art des Kontaktes variiert, muss berücksichtigt werden, dass wenn je mehr Rezeptoren gleichzeitig in die Erregung einbezogen sind, die Wahrnehmungsstromdichte abnimmt. Dies kann anhand der vorliegenden Ergebnisse, dargestellt in den Abbildungen 4-12 und 4-13, für die Kontaktarten *Hand-Rohr*, *Hand-Platte*, *Hand-Draht* und *Zeigefinger-Platte* bestätigt werden. Für die Kontaktart *Hand-Rohr* zeigt sich mit durchschnittlich größter Kontaktfläche (vgl. Tabelle 3-2) zur aktiven Elektrode auch die niedrigste Wahrnehmungsstromdichte der

Probanden bis hin zur höchsten Wahrnehmungsstromdichte der Probanden für die Kontaktart *Zeigefinger-Platte* mit den durchschnittlich kleinsten Stimulationsflächen.

Dieser Zusammenhang kann für die Verteilung der elektrischen Wahrnehmungsstromdichte für die Kontaktart *Unterarm-Elektroden* in den Abbildungen 4-12 und 4-13 nicht bestätigt werden. Bemerkenswert hierbei ist, dass mit kleinerer Stimulationsfläche die Summenhäufigkeitskurve der Wahrnehmungsstromdichte für die Kontaktart *Unterarm-Elektroden* größtenteils zwischen den Stromdichteverläufen für die Kontaktarten *Hand-Platte* und *Hand-Draht* liegt.

In einer vorangegangenen Arbeit [11] konnte nachgewiesen werden, dass die Wahrnehmbarkeitsschwelle der Stromstärke bei Körperstellen mit hoher Schweißdrüsendichte höher ist als bei Stellen mit niedriger Schweißdrüsendichte. Aus der Literatur [11, 12, 24] geht hervor, dass aufgrund des unterschiedlichen Hautaufbaus die Schweißdrüsendichte in der Handfläche durchschnittlich um das ca. 3fache höher ist als im Unterarmbereich.

Davon ausgehend kann angenommen werden, dass bei jeweils gleich großer Stimulationsfläche an diesen Körperbereichen die Wahrnehmung der elektrischen Stromstärke im Bereich des Unterarmes niedriger ist als im Bereich der Handfläche und somit im Bereich des Unterarms auch eine niedrigere Wahrnehmungsstromdichte erwartet werden kann.

Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Schweißdrüsendichten sowie der Kontaktflächengrößen der stimulierten Körperbereiche ist somit erklärbar, dass die jeweils in den Abbildungen 4-12 und 4-13 dargestellte Summenhäufigkeitsverteilung der Wahrnehmungsstromdichte der Probanden für die Kontaktart *Unterarm-Elektroden* zwischen den Verteilungen der Wahrnehmungsstromdichten für die Kontaktarten *Hand-Platte* und *Hand-Draht* liegt.

Weiterführend kann angenommen werden, dass die höhere Streuung der elektrischen Wahrnehmungsstromdichte der Probanden für die Kontaktart *Unterarm-Elektroden* gegenüber den Ergebnissen für die Kontaktarten im Handflächenbereich damit zusammenhängen kann, dass das Verhältnis der Schweißdrüsendichte zwischen Unterarm und Handfläche für jeden Probanden individuell variiert.

Die für die Kontaktarten festgestellten relativen Unterschiede zwischen den Reizschwellenstromdichten der Probanden können einerseits auf die unterschiedlichen Stimulationsorte am Körper zurückgeführt werden und andererseits auf die je nach Kontaktart variierende Größe der Kontaktfläche.

### **5.3 Vergleich der Reizschwelle mit den Ergebnissen aus der Literatur**

In der vorliegenden Arbeit wurde erstmals die elektrische Wahrnehmbarkeitsschwelle für 5 verschiedene Kontaktarten zur aktiven Elektrode an ein und derselben Person untersucht. Es ist beim Vergleich zu den Ergebnissen der Literatur zu berücksichtigen, dass in der vorliegenden Arbeit nur an insgesamt 9 willkürlich ausgewählten Probanden die elektrische Wahrnehmbarkeitsschwelle bestimmt wurde.

Die absoluten Reizschwellenwerte der 9 Probanden für die untersuchten Kontaktarten in dieser Arbeit stimmen nur zum Teil mit den Ergebnissen aus der Literatur überein. Bei der Streuung zeigt sich, dass die Reizschwellendaten über weite Bereiche mit den Ergebnissen aus bisherigen Arbeiten übereinstimmen (vgl. Kapitel 4.3).

Aus der Abbildung 4-11 geht hervor, dass im Vergleich zu den für die Allgemeinbevölkerung repräsentativen Ergebnissen von Leitgeb und Schröttner [15] die untersuchte Probandengruppe der vorliegenden Arbeit eine niedrigere Wahrnehmbarkeitsschwelle aufweist und somit empfindlicher ist gegenüber elektrischer Ströme als die Allgemeinbevölkerung. Aus den Tabellen A-9 bis A-17 im Anhang geht hervor, dass 6 der 9 Probanden mit ihren Reizschwellenmedianwerten für die Kontaktart Unterarm-Elektroden unter dem Medianwert für die Wahrnehmbarkeitsschwelle der Allgemeinbevölkerung aus den Ergebnissen von Leitgeb und Schröttner [15] liegen.

## 6 SCHLUSSFOLGERUNG

Die vorliegenden Ergebnisse haben gezeigt, dass die Streuung der gemessenen Reizschwellenwerte der Probanden bei Kontakt mit den Elektroden über die Handinnenfläche niedriger ist als jene für die Messungen, welche über EKG-Elektroden am Unterarm durchgeführt wurden.

Weiters zeigen sich bezüglich der Werte der elektrischen Reizschwelle signifikante Unterschiede zwischen den Kontaktarten *Unterarm-Elektroden* und *Zeigefinger-Platte* zu den Kontaktarten *Hand-Platte*, *Hand-Rohr* und *Hand-Draht*. Zudem geht hervor, dass sich die Medianwerte der Reizschwellen bis zu das 6,45fache innerhalb der untersuchten Probandengruppe unterscheiden. Aus der Literatur zeigt sich im Vergleich zu den für die Allgemeinbevölkerung repräsentativen Ergebnissen von Leitgeb und Schröttner [15], dass sich die Medianwerte der gemessenen Reizschwellen nur bis zu das 3,83fache unterscheiden. Im Vergleich zu den Ergebnissen aus der Literatur zeigt sich weiters, dass im Gegensatz zur Allgemeinbevölkerung die untersuchte Probandengruppe der vorliegenden Arbeit empfindlicher gegenüber elektrischer Ströme ist, allerdings ist dies nur bei für die Kontaktart *Unterarm-Elektroden* gewonnenen Ergebnissen ersichtlich.

Die höhere Streuung der elektrischen Wahrnehmbarkeitsschwelle der Probanden für die Kontaktart *Unterarm-Elektroden* gegenüber den Ergebnissen für die Kontaktarten im Handflächenbereich könnte damit zusammenhängen, dass das Verhältnis der Schweißdrüsendichte zwischen Unterarm und Handfläche für jeden Probanden individuell variiert. Das bedeutet, dass die Empfindlichkeit gegenüber elektrischer Ströme vom Ort der Applikation abhängt. Dies ist zumindest für die in dieser Arbeit untersuchten Probandengruppe zutreffend, womit festzuhalten ist, dass die Wahrnehmbarkeitsschwelle nicht nur maßgebend von der Zusammensetzung bzw. Anzahl der Probanden abhängt sondern auch die Art des Kontaktes und des Kontaktortes bei der Messung der Wahrnehmbarkeitsschwelle eine bedeutende Rolle spielt.

## 7 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] *Batz, L., Irnich, W.: Untersuchungen zur elektrischen Wahrnehmungsschwelle und Interpretation der Ergebnisse. Biomedizinische Technik 1996, 41: 556 - 557*
- [2] *Biegelmeier, G.: Wirkungen des elektrischen Stroms auf Menschen und Nutztiere. VDE-Verlag Berlin 1986*
- [3] *Brosius, F.: SPSS 8: Professionelle Statistik unter Windows. MITP-Verlag 1998*
- [4] *Cech, R.: Untersuchungen zur elektrischen Wahrnehmbarkeitsschwelle von Kindern. Diplomarbeit 2003, Institut für Health Care Engineering, TU-Graz*
- [5] *Dalziel, C. F.: The Threshold of Perception Currents. Trans. AIEE 1954, 990 - 996*
- [6] *EN 60601-1: Medizinische elektrische Geräte – Teil 1: Allgemeine Festlegungen für die Sicherheit einschließlich wesentlicher Leistungsmerkmale. Ed.3 2006*
- [7] *Fahrenberg, J.: Die Freiburger Beschwerdeliste FBL. Zeitschrift für klinische Psychologie 1989, 4:79-100*
- [8] *IEC/TS 60479-1: Effects of current on human beings and livestock – Part 1: General aspects. Ed. 4.0 2005-07*
- [9] *Irnich, W., Batz, L.: Die Wahrnehmungsempfindlichkeit gegenüber 50 Hz Wechselspannung bzw. Wechselstrom. Biomedizinische Technik 1989, 34: 207 – 209*
- [10] *Janke, W., Debus, G.: Die Eigenschaftswörterliste EWL-K. Ein Verfahren zur Erfassung der Befindlichkeit, Göttingen 1977*
- [11] *Kusatz, H.: Abhängigkeit der Wechselstromwahrnehmungsschwelle vom Hautzustand. Diplomarbeit 1996, Institut für Human-Computer Interfaces, TU-Graz*
- [12] *Lang, F., Lang, P.: Basiswissen Physiologie, 2. Auflage, Springer Medizin Verlag Heidelberg (2007)*
- [13] *Leitgeb, N.: Biologische Wirkungen der Elektrizität. Lehrbehelf, Institut für Health Care Engineering, TU-Graz 2006*
- [14] *Leitgeb, N.: Sicherheit von Medizingeräten, Recht – Risiko - Chancen. Springer Verlag Wien New York (2010)*
- [15] *Leitgeb, N., Schröttner, J.: Electric current perception study challenges electric safety limits. J. Med. Eng. & Technol. 2002, 26: 168 - 172*
- [16] *Leitgeb, N., Schröttner, J.: Stromgefahr größer als angenommen. Biomedizinische Technik 2001, 46: 307 – 310*
- [17] *Leitgeb, N., Schröttner, J., Cech, R.: Electric current perception of children: The role of age and gender. J. Med. Eng. & Technol. 2006, 30: 306 - 309*

- 
- [18] Leitgeb, N., Schröttner, J., Cech, R.: *Electric current perception of the general population including children and elderly*. *J. of Med. Eng. & Technol.* 2005, 29: 215- 218
- [19] Levin, M.: *Perception of Chassis Leakage Current*. *Biomed. Instrum. & Technol.* 1991, 25: 135 – 140
- [20] Lindenblatt, G., Silny, J.: *Evaluation and comparison of 50 Hz current threshold of electrocutaneous sensations using different methods*. *J. of Zhejiang University SCIENCE B* 2006 7 (12): 933-946
- [21] Niedermayr, F.: *Entwicklung eines Reizschwellenmessplatzes*. Diplomarbeit 2007, Institut für Health Care Engineering, TU-Graz
- [22] Osypka, P.: *Messtechnische Untersuchungen über Stromstärke, Einwirkungsdauer und Stromweg bei Wechselstromunfällen an Mensch und Tier. Bedeutung und Auswertung für Starkstromanlagen*. *Elektromedizin* 1963, 8: 153 – 214
- [23] Sachs, L., Hedderich, J.: *Angewandte Statistik, 12. Auflage*, Springer Verlag Berlin Heidelberg (2006)
- [24] Schmidt, R.F., Lang, F.: *Physiologie des Menschen mit Pathophysiologie, 30 Auflage*, Springer Medizin Verlag Heidelberg (2007)
- [25] Schröttner, J., Leitgeb, N.: *Einfluss der Körpermaße auf die elektrische Wahrnehmbarkeitsschwelle*. *Biomedizinische Technik* 2003, 48: 291 - 295
- [26] Schröttner, J., Leitgeb, N.: *Sicherheitstechnische Konsequenzen der Messung von Wahrnehmbarkeitsschwellen für 50 Hz Wechselstrom an der Allgemeinbevölkerung*. *Biomedizinische Technik* 2001, 46: 462 – 463
- [27] Schröttner, J.: *Forschungsprojekt Elektro- und Magnetosensibilität. Probandenfragebogen 2008*, Institut für Health Care Engineering, TU-Graz
- [28] SPSS Inc.: *SPSS 14.0 Base Benutzerhandbuch*. ISBN 1-56827-682-6, 2005
- [29] Thompson, G.: *Shock threshold fixes appliance insulation resistance*. *Electrical World* 1933, 101: 793 - 795
- [30] Wallinger, L.: *Wahrnehmbarkeitsmessungen elektrischer Wechselströme am Menschen*. Diplomarbeit 1995, Institut für Health Care Engineering, TU-Graz

## 8 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

<b>Abbildung 3-1:</b> Waagrecht nach oben gerichtete Handfläche in Kontakt mit der aktiven Elektrode .....	10
<b>Abbildung 3-2:</b> Zeigefinger in Kontakt mit der aktiven Elektrode .....	11
<b>Abbildung 3-3:</b> Aktive Elektrode (Aluminiumrohr) wird mit der Hand umfasst .....	12
<b>Abbildung 3-4:</b> Aktive Elektrode (Kupferdraht) wird mit der Hand im Bereich zwischen proximaler und distaler Hohlhandfurche umfasst.....	13
<b>Abbildung 3-5:</b> Selbstklebende Elektroden platziert an der dorsalen Unterarmseite .....	13
<b>Abbildung 3-6:</b> Die Referenzelektrode, bestehend aus einer leitfähigen Platten-Elektrode und einer Schwammtasche (linkes Bild), wird im proximalen Bereich an der dorsalen Unterarmseite platziert (rechtes Bild).....	15
<b>Abbildung 3-7:</b> Messsystem zur Bestimmung der elektrischen Wahrnehmbarkeitsschwelle, bestehend aus dem Reizschwellenmessgerät RSPC-02, einem Computer und den Kontaktelektroden .....	15
<b>Abbildung 3-8:</b> Kontaktflächenabdrücke - (a) <i>Hand-Platte</i> rechts, (b) <i>Hand-Rohr</i> links, (c) <i>Hand-Draht</i> rechts, (d) <i>Zeigefinger-Platte</i> rechts.....	20
<b>Abbildung 3-9:</b> Nachbearbeitete Kontaktflächenabdrücke - (a) <i>Hand-Platte</i> rechts, (b) <i>Hand-Rohr</i> links, (c) <i>Hand-Draht</i> rechts, (d) <i>Zeigefinger-Platte</i> rechts.....	20
<b>Abbildung 3-10:</b> Boxplots der Wahrnehmbarkeitsschwelle für die linke und rechte Armseite von Proband 4, Kontaktart: <i>Hand-Platte</i> .....	27
<b>Abbildung 3-11:</b> Verlaufsdigramme der Messwerte 2 bis 6 der Wahrnehmbarkeitsschwelle für die linke Handseite von Proband 4, Kontaktart: <i>Hand-Platte</i> .....	28
<b>Abbildung 4-1:</b> Boxplots der log. Reizschwelle für die einzelnen Probanden, Kontaktart: <i>Hand-Platte</i> .....	37
<b>Abbildung 4-2:</b> Boxplots der log. Reizschwelle für die einzelnen Probanden, Kontaktart: <i>Hand-Rohr</i> .....	37
<b>Abbildung 4-3:</b> Boxplots der log. Reizschwelle für die einzelnen Probanden, Kontaktart: <i>Hand-Draht</i> .....	38
<b>Abbildung 4-4:</b> Boxplots der log. Reizschwelle für die einzelnen Probanden, Kontaktart: <i>Zeigefinger-Platte</i> .....	38
<b>Abbildung 4-5:</b> Boxplots der log. Reizschwelle für die einzelnen Probanden, Kontaktart: <i>Unterarm-Elektroden</i> .....	39
<b>Abbildung 4-6:</b> Probability-Plots der Einzelwerte der elektrischen Reizschwelle gepoolt für alle Probanden und alle 5 Kontaktarten (N = 180 pro Kontaktart).....	40

<b>Abbildung 4-7:</b> Probability-Plots der Medianwerte der Reizschwellen aller Probanden für die Kontaktart <i>Hand-Draht</i> ( <i>H-D</i> , N = 9) im Vergleich mit den Ergebnissen von Dalziel [5] (Dal...Dalziel) .....	43
<b>Abbildung 4-8:</b> Probability-Plots der Medianwerte der Reizschwellen aller Probanden für die Kontaktart <i>Hand-Rohr</i> ( <i>H-R</i> , N = 9) im Vergleich mit den Ergebnissen aus der Literatur (Ba...Batz und Irnich [9], O...Osypka [22], Tho...Thompson [29]) .....	43
<b>Abbildung 4-9:</b> Probability-Plots der Medianwerte der Reizschwellen aller Probanden für die Kontaktart <i>Hand-Platte</i> ( <i>H-P</i> , N = 9) im Vergleich mit den Ergebnissen von Batz und Irnich [1] (Ba...Batz und Irnich) .....	44
<b>Abbildung 4-10:</b> Probability-Plots der Medianwerte der Reizschwellen aller Probanden für die Kontaktart <i>Zeigefinger-Platte</i> ( <i>Z-P</i> , N = 9) im Vergleich mit den Ergebnissen aus der Literatur (Lin...Lindenblatt und Silny [20], Lev...Levin [19], Tho...Thompson [29]) .....	45
<b>Abbildung 4-11:</b> Probability-Plots der Medianwerte der Reizschwellen aller Probanden für die Kontaktart <i>Unterarm-Elektroden</i> ( <i>U-E</i> , N = 9) im Vergleich mit den Ergebnissen von Leitgeb und Schröttner [15] (Lei...Leitgeb und Schröttner) .....	46
<b>Abbildung 4-12:</b> Probability-Plots der Wahrnehmungsstromdichte für die linke Armseite der Probanden (N = 180 pro Kontaktart) .....	53
<b>Abbildung 4-13:</b> Probability-Plots der Wahrnehmungsstromdichte für die rechte Armseite der Probanden (N = 180 pro Kontaktart) .....	53
<b>Abbildung A-1:</b> Häufigkeitsverteilung der log. Reizschwelle für alle Probanden, Kontaktart: <i>Hand-Platte</i> .....	76
<b>Abbildung A-2:</b> Häufigkeitsverteilung der log. Reizschwelle für alle Probanden, Kontaktart: <i>Zeigefinger-Platte</i> .....	76
<b>Abbildung A-3:</b> Häufigkeitsverteilung der log. Reizschwelle für alle Probanden, Kontaktart: <i>Hand-Rohr</i> .....	77
<b>Abbildung A-4:</b> Häufigkeitsverteilung der log. Reizschwelle für alle Probanden, Kontaktart: <i>Hand-Draht</i> .....	77
<b>Abbildung A-5:</b> Häufigkeitsverteilung der log. Reizschwelle für alle Probanden, Kontaktart: <i>Unterarm-Elektroden</i> .....	78
<b>Abbildung A-6:</b> Ausprägungen des Parameters Aktiviertheit für alle Probanden pro Kontaktart .....	78
<b>Abbildung A-7:</b> Ausprägungen des Parameters Müdigkeit für alle Probanden pro Kontaktart .....	79
<b>Abbildung A-8:</b> Ausprägungen des Parameters Empfindlichkeit für alle Probanden pro Kontaktart .....	79
<b>Abbildung A-9:</b> Probability-Plots der Einzelwerte der elektrischen Reizschwelle für Proband 1 und alle 5 Kontaktarten (N = 20 pro Kontaktart) .....	80
<b>Abbildung A-10:</b> Probability-Plots der Einzelwerte der elektrischen Reizschwelle für Proband 2 und alle 5 Kontaktarten (N = 20 pro Kontaktart) .....	80

---

<b>Abbildung A-11:</b> Probability-Plots der Einzelwerte der elektrischen Reizschwelle für Proband 3 und alle 5 Kontaktarten (N = 20 pro Kontaktart).....	81
<b>Abbildung A-12:</b> Probability-Plots der Einzelwerte der elektrischen Reizschwelle für Proband 4 und alle 5 Kontaktarten (N = 20 pro Kontaktart).....	81
<b>Abbildung A-13:</b> Probability-Plots der Einzelwerte der elektrischen Reizschwelle für Proband 5 und alle 5 Kontaktarten (N = 20 pro Kontaktart) .....	82
<b>Abbildung A-14:</b> Probability-Plots der Einzelwerte der elektrischen Reizschwelle für Proband 6 und alle 5 Kontaktarten (N = 20 pro Kontaktart) .....	82
<b>Abbildung A-15:</b> Probability-Plots der Einzelwerte der elektrischen Reizschwelle für Proband 7 und alle 5 Kontaktarten (N = 20 pro Kontaktart) .....	83
<b>Abbildung A-16:</b> Probability-Plots der Einzelwerte der elektrischen Reizschwelle für Proband 8 und alle 5 Kontaktarten (N = 20 pro Kontaktart) .....	83
<b>Abbildung A-17:</b> Probability-Plots der Einzelwerte der elektrischen Reizschwelle für Proband 9 und alle 5 Kontaktarten (N = 20 pro Kontaktart) .....	84
<b>Abbildung A-18:</b> Probability-Plots der Wahrnehmungsstromdichte für die linke Armseite von Proband 1 pro Kontaktart (N = 20 pro Kontaktart) .....	85
<b>Abbildung A-19:</b> Probability-Plots der Wahrnehmungsstromdichte für die rechte Armseite von Proband 1 pro Kontaktart (N = 20 pro Kontaktart) .....	85
<b>Abbildung A-20:</b> Probability-Plots der Wahrnehmungsstromdichte für die linke Armseite von Proband 2 pro Kontaktart (N = 20 pro Kontaktart) .....	86
<b>Abbildung A-21:</b> Probability-Plots der Wahrnehmungsstromdichte für die rechte Armseite von Proband 2 pro Kontaktart (N = 20 pro Kontaktart) .....	86
<b>Abbildung A-22:</b> Probability-Plots der Wahrnehmungsstromdichte für die linke Armseite von Proband 3 pro Kontaktart (N = 20 pro Kontaktart) .....	87
<b>Abbildung A-23:</b> Probability-Plots der Wahrnehmungsstromdichte für die rechte Armseite von Proband 3 pro Kontaktart (N = 20 pro Kontaktart) .....	87
<b>Abbildung A-24:</b> Probability-Plots der Wahrnehmungsstromdichte für die linke Armseite von Proband 4 pro Kontaktart (N = 20 pro Kontaktart) .....	88
<b>Abbildung A-25:</b> Probability-Plots der Wahrnehmungsstromdichte für die rechte Armseite von Proband 4 pro Kontaktart (N = 20 pro Kontaktart) .....	88
<b>Abbildung A-26:</b> Probability-Plots der Wahrnehmungsstromdichte für die linke Armseite von Proband 5 pro Kontaktart (N = 20 pro Kontaktart) .....	89
<b>Abbildung A-27:</b> Probability-Plots der Wahrnehmungsstromdichte für die rechte Armseite von Proband 5 pro Kontaktart (N = 20 pro Kontaktart) .....	89
<b>Abbildung A-28:</b> Probability-Plots der Wahrnehmungsstromdichte für die linke Armseite von Proband 6 pro Kontaktart (N = 20 pro Kontaktart) .....	90

---

<b>Abbildung A-29:</b> Probability-Plots der Wahrnehmungsstromdichte für die rechte Armseite von Proband 6 pro Kontaktart (N = 20 pro Kontaktart) .....	90
<b>Abbildung A-30:</b> Probability-Plots der Wahrnehmungsstromdichte für die linke Armseite von Proband 7 pro Kontaktart (N = 20 pro Kontaktart) .....	91
<b>Abbildung A-31:</b> Probability-Plots der Wahrnehmungsstromdichte für die rechte Armseite von Proband 7 pro Kontaktart (N = 20 pro Kontaktart) .....	91
<b>Abbildung A-32:</b> Probability-Plots der Wahrnehmungsstromdichte für die linke Armseite von Proband 8 pro Kontaktart (N = 20 pro Kontaktart) .....	92
<b>Abbildung A-33:</b> Probability-Plots der Wahrnehmungsstromdichte für die rechte Armseite von Proband 8 pro Kontaktart (N = 20 pro Kontaktart) .....	92
<b>Abbildung A-34:</b> Probability-Plots der Wahrnehmungsstromdichte für die linke Armseite von Proband 9 pro Kontaktart (N = 20 pro Kontaktart) .....	93
<b>Abbildung A-35:</b> Probability-Plots der Wahrnehmungsstromdichte für die rechte Armseite von Proband 9 pro Kontaktart (N = 20 pro Kontaktart) .....	93

## 9 TABELLENVERZEICHNIS

<b>Tabelle 3-1:</b> Bezeichnungen der Kontaktarten im Text sowie in Abbildungen und Tabellen.....	14
<b>Tabelle 3-2:</b> Ermittelte Kontaktflächen für jeden Probanden in cm <sup>2</sup> .....	20
<b>Tabelle 4-1:</b> Lage-, Streu- und Verteilungsmaße der Wahrnehmbarkeitsschwelle in $\mu\text{A}$ sowie der log. Wahrnehmbarkeitsschwelle für die linke und rechte Armseite aller Probanden, Kontaktart: <i>Hand-Platte</i> .....	29
<b>Tabelle 4-2:</b> Lage-, Streu- und Verteilungsmaße der Wahrnehmbarkeitsschwelle in $\mu\text{A}$ sowie der log. Wahrnehmbarkeitsschwelle für die linke und rechte Armseite aller Probanden, Kontaktart: <i>Hand-Rohr</i> .....	30
<b>Tabelle 4-3:</b> Lage-, Streu- und Verteilungsmaße der Wahrnehmbarkeitsschwelle in $\mu\text{A}$ sowie der log. Wahrnehmbarkeitsschwelle für die linke und rechte Armseite aller Probanden, Kontaktart: <i>Hand-Draht</i> .....	30
<b>Tabelle 4-4:</b> Lage-, Streu- und Verteilungsmaße der Wahrnehmbarkeitsschwelle in $\mu\text{A}$ sowie der log. Wahrnehmbarkeitsschwelle für die linke und rechte Armseite aller Probanden, Kontaktart: <i>Zeigefinger-Platte</i> .....	31
<b>Tabelle 4-5:</b> Lage-, Streu- und Verteilungsmaße der Wahrnehmbarkeitsschwelle in $\mu\text{A}$ sowie der log. Wahrnehmbarkeitsschwelle für die linke und rechte Armseite aller Probanden, Kontaktart: <i>Unterarm-Elektroden</i> .....	31
<b>Tabelle 4-6:</b> Signifikanzwerte des Kolmogorov-Smirnov Tests auf Normalverteilung der Wahrnehmbarkeitsschwellendaten des Probandenkollektives.....	32
<b>Tabelle 4-7:</b> Signifikanzwerte stat. Testverfahren bezüglich der Zusammenhänge zwischen den log. Wahrnehmbarkeitsschwellen der linken und rechten Armseite aller Probanden (**...Voraussetzung für T-Test nicht gegeben, da $p < 0,05$ des Kolmogorov-Smirnov Tests) ..	33
<b>Tabelle 4-8:</b> Lage-, Streu- und Verteilungsmaße der Reizschwelle für alle Probanden pro Kontaktart.....	34
<b>Tabelle 4-9:</b> Lage-, Streu- und Verteilungsmaße der log. Reizschwelle für alle Probanden pro Kontaktart.....	35
<b>Tabelle 4-10:</b> Signifikanzwerte des Kolmogorov-Smirnov Tests auf Normalverteilung der Reizschwellendaten des Probandenkollektives .....	35
<b>Tabelle 4-11:</b> Signifikanzwerte statistischer Testverfahren bezüglich der Zusammenhänge zwischen den Reizschwellendaten zu <i>Hand-Platte</i> , <i>Hand-Rohr</i> und <i>Hand-Draht</i> (**...Voraussetzung für T-Test nicht gegeben, da $p < 0,05$ des Levene Tests).....	41
<b>Tabelle 4-12:</b> Zusammenfassung bisheriger Arbeiten zur elektr. Wahrnehmbarkeitsschwelle (*...Es wurden die Ergebnisse aus beiden Untersuchungsreihen gepoolt; **...Die Reizschwellendaten wurden mit jene von zwei Frauen gepoolt; ***...Von den 8 männlichen Probanden haben nur 3 die gesamte Untersuchungsreihe durchgeführt).....	42

<b>Tabelle 4-13:</b> Ermittelte Verhältniszahlen zwischen dem Medianwert der Ergebnisse von Leitgeb und Schröttner [15] und den Medianwerten der Ergebnisse zu den 9 Probanden für die einzelnen Kontaktarten .....	47
<b>Tabelle 4-14:</b> Ermittelte Verhältniszahlen zwischen dem Medianwert der Ergebnisse von Leitgeb und Schröttner [15] und den Medianwerten der Ergebnisse zu bisher publizierten Arbeiten .....	47
<b>Tabelle 4-15:</b> Lage-, Streu- und Verteilungsmaße der Wahrnehmungsstromdichte in $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ sowie der log. Wahrnehmungsstromdichte für die linke und rechte Armseite aller Probanden, Kontaktart: <i>Hand-Platte</i> .....	48
<b>Tabelle 4-16:</b> Lage-, Streu- und Verteilungsmaße der Wahrnehmungsstromdichte in $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ sowie der log. Wahrnehmungsstromdichte für die linke und rechte Armseite aller Probanden, Kontaktart: <i>Zeigefinger-Platte</i> .....	49
<b>Tabelle 4-17:</b> Lage-, Streu- und Verteilungsmaße der Wahrnehmungsstromdichte in $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ sowie der log. Wahrnehmungsstromdichte für die linke und rechte Armseite aller Probanden, Kontaktart: <i>Hand-Rohr</i> .....	49
<b>Tabelle 4-18:</b> Lage-, Streu- und Verteilungsmaße der Wahrnehmungsstromdichte in $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ sowie der log. Wahrnehmungsstromdichte für die linke und rechte Armseite aller Probanden, Kontaktart: <i>Hand-Draht</i> .....	50
<b>Tabelle 4-19:</b> Lage-, Streu- und Verteilungsmaße der Wahrnehmungsstromdichte in $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ sowie der log. Wahrnehmungsstromdichte für die linke und rechte Armseite aller Probanden, Kontaktart: <i>Unterarm-Elektroden</i> .....	50
<b>Tabelle 4-20:</b> Signifikanzwerte des Kolmogorov-Smirnov Tests auf Normalverteilung der Daten der Wahrnehmungsstromdichte des Probandenkollektives .....	51
<b>Tabelle 4-21:</b> Signifikanzwerte statistischer Testverfahren bezüglich der Zusammenhänge zwischen den log. Wahrnehmungsstromdichten der linken und rechten Armseite aller Probanden (*...Voraussetzung für T-Test nicht gegeben, da $p < 0,05$ des Levene Tests; **...Voraussetzung für T-Test nicht gegeben, da $p < 0,05$ des Kolmogorov-Smirnov Tests) ....	52
<b>Tabelle A-1:</b> Messergebnisse der Ableitstrommessungen.....	69
<b>Tabelle A-2:</b> Messwerte die aufgrund der Ausreißeranalyse aus dem Datensatz entfernt wurden .....	69
<b>Tabelle A-3:</b> Signifikanzwerte stat. Testverfahren bezüglich der Zusammenhänge zwischen den log. Wahrnehmbarkeitsschwellen der linken und rechten Armseite für jeden Probanden (*...Voraussetzung für T-Test nicht gegeben, da $p < 0,05$ des Kolmogorov-Smirnov Tests; **...Voraussetzung für T-Test nicht gegeben, da $p < 0,05$ des Levene Tests).....	70
<b>Tabelle A-4:</b> Lage-, Streu- und Verteilungsmaße der Reizschwelle für Proband 1 pro Kontaktart .....	71
<b>Tabelle A-5:</b> Lage-, Streu- und Verteilungsmaße der Reizschwelle für Proband 2 pro Kontaktart .....	71

**Tabelle A-6:** Lage-, Streu- und Verteilungsmaße der Reizschwelle für Proband 3 pro Kontaktart .....72

**Tabelle A-7:** Lage-, Streu- und Verteilungsmaße der Reizschwelle für Proband 4 pro Kontaktart .....72

**Tabelle A-8:** Lage-, Streu- und Verteilungsmaße der Reizschwelle für Proband 5 pro Kontaktart .....73

**Tabelle A-9:** Lage-, Streu- und Verteilungsmaße der Reizschwelle für Proband 6 pro Kontaktart .....73

**Tabelle A-10:** Lage-, Streu- und Verteilungsmaße der Reizschwelle für Proband 7 pro Kontaktart .....74

**Tabelle A-11:** Lage-, Streu- und Verteilungsmaße der Reizschwelle für Proband 8 pro Kontaktart .....74

**Tabelle A-12:** Lage-, Streu- und Verteilungsmaße der Reizschwelle für Proband 9 pro Kontaktart .....75

## 10 ANHANG

Parameter	Grenzwerte für Typ BF [6]	zu Beginn der Messserie		am Ende der Messserie	
		Reischwellenmessgerät	System (mit Laptop)	Reischwellenmessgerät	System (mit Laptop)
Erdableitstrom N.C. [ $\mu$ A]	5000	27	112	29	124
Erdableitstrom S.F.C [ $\mu$ A]	10000	51	216	55	234
Berührungstrom N.C [ $\mu$ A]	100	< 1	< 1	< 1	< 1
Berührungstrom S.F.C [ $\mu$ A]	500	27	112	29	123
Patientenableitstrom N.C [ $\mu$ A]	100	< 1	< 1	< 1	< 1
Patientenableitstrom S.F.C [ $\mu$ A]	500	< 1	< 1	< 1	< 1

Tabelle A-1: Messergebnisse der Ableitstrommessungen

Proband	Kontaktart	Wiederholung	Seite	Messwert	Begründung
3	Z - P	2	links	2 bis 6	Sein Hund ist an diesem Tag verstorben
	Z - P	2	rechts	2 bis 6	Sein Hund ist an diesem Tag verstorben
	H - R	1	links	2 bis 6	Wahrnehmung an der Referenzelektrode
	H - R	1	rechts	2 bis 6	Wahrnehmung an der Referenzelektrode
	H - R	2	links	2 bis 6	Sein Hund ist an diesem Tag verstorben
	H - R	2	rechts	2 bis 6	Sein Hund ist an diesem Tag verstorben
	H - D	3	links	2 bis 6	Sein Hund ist an diesem Tag verstorben
	H - D	3	rechts	2 bis 6	Sein Hund ist an diesem Tag verstorben
4	H - P	1	links	2 bis 6	Wahrnehmung an der Referenzelektrode
	H - P	4	links	2 bis 6	Wahrnehmung am Ringfinger (kleine Schnittwunde)
	H - D	1	links	2 bis 6	Wahrnehmung an der Referenzelektrode
5	H - R	1	links	4	Pulswahrnehmung an der Kontaktstelle
7	H - D	13	links	5	Pulswahrnehmung an der Kontaktstelle
8	H - P	2	links	2 bis 6	Pulswahrnehmung an der Kontaktstelle
	U - E	2	links	2 bis 6	Unterarm ist leicht errötet (Sonnenbrand)
	U - E	10	links	2 bis 6	leichte Schürfwunden am Unterarm
	U - E	11	links	2 bis 6	leichte Schürfwunden am Unterarm
	U - E	19	rechts	2	Elektrode ist locker
9	H - P	4	rechts	2 bis 6	Durchblutungsstörungen in der Hand
	H - P	5	rechts	2 bis 6	Durchblutungsstörungen in der Hand
	H - P	6	rechts	2 bis 6	Durchblutungsstörungen in der Hand
	H - R	1	links	3	Pulswahrnehmung an der Kontaktstelle
	H - R	1	rechts	2	Pulswahrnehmung an der Kontaktstelle

Tabelle A-2: Messwerte die aufgrund der Ausreißeranalyse aus dem Datensatz entfernt wurden

Proband	Testverfahren	Signifikanz $p$				
		H - P	H - R	H - D	Z - P	U - E
		links - rechts	links - rechts	links - rechts	links - rechts	links - rechts
1	<b>T - Test</b>	0,143	<b>0,002</b>	0,058	<b>0,000</b>	*
	Levene Test	0,694	0,601	0,427	0,516	
	<b>Mann-Whitney-U Test</b>	0,117	<b>0,002</b>	<b>0,045</b>	<b>0,000</b>	0,058
	<b>Kolmogorov-Smirnov-Z</b>	0,172	<b>0,013</b>	0,172	<b>0,000</b>	0,172
2	<b>T - Test</b>	**	<b>0,041</b>	0,067	<b>0,010</b>	*
	Levene Test		0,292	0,357	0,829	
	<b>Mann-Whitney-U Test</b>	0,317	<b>0,016</b>	0,083	<b>0,016</b>	0,194
	<b>Kolmogorov-Smirnov-Z</b>	0,172	<b>0,035</b>	0,329	<b>0,035</b>	0,329
3	<b>T - Test</b>	0,844	0,989	0,282	0,570	*
	Levene Test	0,623	0,705	0,616	0,974	
	<b>Mann-Whitney-U Test</b>	0,787	0,849	0,226	0,457	0,756
	<b>Kolmogorov-Smirnov-Z</b>	0,978	0,766	0,069	0,794	0,978
4	<b>T - Test</b>	0,843	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,007</b>	*
	Levene Test	0,481	0,371	0,799	0,342	
	<b>Mann-Whitney-U Test</b>	0,977	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	0,925
	<b>Kolmogorov-Smirnov-Z</b>	0,866	<b>0,000</b>	<b>0,001</b>	<b>0,001</b>	0,978
5	<b>T - Test</b>	0,588	0,426	0,138	<b>0,000</b>	*
	Levene Test	0,897	0,866	0,335	0,750	
	<b>Mann-Whitney-U Test</b>	0,534	0,402	0,130	<b>0,000</b>	0,534
	<b>Kolmogorov-Smirnov-Z</b>	0,819	0,329	0,329	<b>0,000</b>	0,560
6	<b>T - Test</b>	<b>0,001</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,007</b>	*
	Levene Test	0,509	0,202	0,258	0,730	
	<b>Mann-Whitney-U Test</b>	<b>0,002</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,007</b>	0,387
	<b>Kolmogorov-Smirnov-Z</b>	<b>0,035</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,013</b>	0,560
7	<b>T - Test</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	**	<b>0,000</b>	*
	Levene Test	0,983	0,147		0,402	
	<b>Mann-Whitney-U Test</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,016</b>	<b>0,000</b>	0,646
	<b>Kolmogorov-Smirnov-Z</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,035</b>	<b>0,000</b>	0,978
8	<b>T - Test</b>	0,094	0,088	<b>0,006</b>	<b>0,035</b>	*
	Levene Test	0,882	0,562	0,063	0,229	
	<b>Mann-Whitney-U Test</b>	0,097	0,058	<b>0,009</b>	<b>0,030</b>	0,139
	<b>Kolmogorov-Smirnov-Z</b>	0,344	0,172	<b>0,013</b>	0,082	0,136
9	<b>T - Test</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	0,949	*
	Levene Test	0,380	0,916	0,385	0,775	
	<b>Mann-Whitney-U Test</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	0,903	0,766
	<b>Kolmogorov-Smirnov-Z</b>	<b>0,003</b>	<b>0,000</b>	<b>0,001</b>	0,978	1,000

**Tabelle A-3:** Signifikanzwerte stat. Testverfahren bezüglich der Zusammenhänge zwischen den log. Wahrnehmbarkeitsschwellen der linken und rechten Armseite für jeden Probanden (\*...Voraussetzung für T-Test nicht gegeben, da  $p < 0,05$  des Kolmogorov-Smirnov Tests; \*\*...Voraussetzung für T-Test nicht gegeben, da  $p < 0,05$  des Levene Tests)

<i>Proband 1</i>	Reizschwelle [ $\mu\text{A}$ ]				
	<i>H - P</i>	<i>H - R</i>	<i>H - D</i>	<i>Z - P</i>	<i>U - E</i>
<b>Mittelwert</b>	1662,5	1578,9	1508,4	486,6	354,9
<b>Median</b>	1652,4	1556,8	1495,3	478,6	377,4
<b>5% Perzentil</b>	1353,2	1194,0	1152,2	398,8	176,7
<b>95% Perzentil</b>	2080,5	1988,5	1867,0	665,9	524,0
<b>Varianz</b>	27335,2	50421,1	33170,8	5536,8	7814,0
<b>Standardabweichung</b>	165,3	224,5	182,1	74,4	88,4
<b>Minimum</b>	1349,1	1189,2	1146,7	398,5	174,7
<b>Maximum</b>	2091,5	1991,9	1869,2	669,1	527,6
<b>Spannweite</b>	742,4	802,6	722,5	270,5	352,9
<b>Interquartilsabstand</b>	226,3	346,7	232,1	109,3	106,8
<b>Schiefe</b>	0,570	0,102	0,172	0,955	-0,421
<b>Standardfehler Schiefe</b>	0,512	0,512	0,512	0,512	0,512
<b>Kurtosis</b>	1,367	-0,883	0,037	0,329	0,008
<b>Standardfehler Kurtosis</b>	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992

Tabelle A-4: Lage-, Streu- und Verteilungsmaße der Reizschwelle für Proband 1 pro Kontaktart

<i>Proband 2</i>	Reizschwelle [ $\mu\text{A}$ ]				
	<i>H - P</i>	<i>H - R</i>	<i>H - D</i>	<i>Z - P</i>	<i>U - E</i>
<b>Mittelwert</b>	1122,3	1016,3	982,6	303,4	204,9
<b>Median</b>	1125,1	1009,0	966,5	306,9	207,9
<b>5% Perzentil</b>	978,1	806,4	773,4	251,6	133,2
<b>95% Perzentil</b>	1274,3	1204,3	1220,0	371,6	327,9
<b>Varianz</b>	9196,3	9177,1	14693,1	1267,6	2678,4
<b>Standardabweichung</b>	95,9	95,8	121,2	35,6	51,8
<b>Minimum</b>	977,8	804,3	770,1	251,4	132,9
<b>Maximum</b>	1275,3	1207,0	1224,7	372,1	331,7
<b>Spannweite</b>	297,5	402,7	454,6	120,7	198,7
<b>Interquartilsabstand</b>	176,6	122,4	218,1	57,1	86,2
<b>Schiefe</b>	-0,045	-0,243	0,221	0,331	0,455
<b>Standardfehler Schiefe</b>	0,512	0,512	0,512	0,512	0,512
<b>Kurtosis</b>	-1,109	0,559	-0,781	-0,760	0,154
<b>Standardfehler Kurtosis</b>	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992

Tabelle A-5: Lage-, Streu- und Verteilungsmaße der Reizschwelle für Proband 2 pro Kontaktart

<i>Proband 3</i>	Reizschwelle [ $\mu\text{A}$ ]				
	<i>H - P</i>	<i>H - R</i>	<i>H - D</i>	<i>Z - P</i>	<i>U - E</i>
<b>Mittelwert</b>	1284,9	1296,5	1204,1	464,5	83,1
<b>Median</b>	1234,9	1296,3	1232,8	474,2	84,8
<b>5% Perzentil</b>	1071,1	1020,3	945,0	283,2	27,5
<b>95% Perzentil</b>	1630,2	1521,6	1408,4	580,4	181,7
<b>Varianz</b>	29466,4	17204,1	15900,3	8757,0	1173,0
<b>Standardabweichung</b>	171,7	131,2	126,1	93,6	34,2
<b>Minimum</b>	1070,8	1020,3	945,0	283,2	27,4
<b>Maximum</b>	1631,3	1557,1	1459,2	637,0	184,7
<b>Spannweite</b>	560,5	536,8	514,2	353,8	157,3
<b>Interquartilsabstand</b>	271,4	156,4	157,1	115,9	33,7
<b>Schiefe</b>	0,732	0,092	-0,168	-0,435	1,110
<b>Standardfehler Schiefe</b>	0,512	0,536	0,524	0,524	0,512
<b>Kurtosis</b>	-0,586	0,448	0,480	-0,098	3,285
<b>Standardfehler Kurtosis</b>	0,992	1,038	1,014	1,014	0,992

Tabelle A-6: Lage-, Streu- und Verteilungsmaße der Reizschwelle für Proband 3 pro Kontaktart

<i>Proband 4</i>	Reizschwelle [ $\mu\text{A}$ ]				
	<i>H - P</i>	<i>H - R</i>	<i>H - D</i>	<i>Z - P</i>	<i>U - E</i>
<b>Mittelwert</b>	1519,8	1471,2	1481,7	465,4	98,1
<b>Median</b>	1559,8	1483,8	1484,8	483,3	77,6
<b>5% Perzentil</b>	1244,2	1196,4	1329,4	274,7	24,8
<b>95% Perzentil</b>	1703,9	1638,7	1683,1	581,6	271,1
<b>Varianz</b>	18268,0	9410,5	11520,6	5259,1	3828,4
<b>Standardabweichung</b>	135,2	97,0	107,3	72,5	61,9
<b>Minimum</b>	1242,5	1187,1	1328,2	273,0	24,2
<b>Maximum</b>	1705,2	1642,4	1683,2	583,0	274,0
<b>Spannweite</b>	462,6	455,3	355,0	310,0	249,8
<b>Interquartilsabstand</b>	203,1	123,8	196,8	70,6	70,9
<b>Schiefe</b>	-0,604	-1,087	0,371	-1,315	1,560
<b>Standardfehler Schiefe</b>	0,512	0,512	0,512	0,512	0,512
<b>Kurtosis</b>	-0,607	2,881	-0,728	2,441	2,567
<b>Standardfehler Kurtosis</b>	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992

Tabelle A-7: Lage-, Streu- und Verteilungsmaße der Reizschwelle für Proband 4 pro Kontaktart

<i>Proband 5</i>	Reizschwelle [ $\mu\text{A}$ ]				
	<i>H - P</i>	<i>H - R</i>	<i>H - D</i>	<i>Z - P</i>	<i>U - E</i>
<b>Mittelwert</b>	1037,6	1040,8	976,3	297,8	155,6
<b>Median</b>	1074,1	1067,1	990,0	290,5	143,0
<b>5% Perzentil</b>	830,2	772,6	792,6	271,8	98,6
<b>95% Perzentil</b>	1233,6	1239,5	1132,4	351,3	258,0
<b>Varianz</b>	16544,1	15403,5	10732,3	459,6	1877,5
<b>Standardabweichung</b>	128,6	124,1	103,6	21,4	43,3
<b>Minimum</b>	828,6	766,7	791,0	271,8	98,4
<b>Maximum</b>	1233,8	1240,1	1133,1	352,2	258,5
<b>Spannweite</b>	405,2	473,4	342,1	80,4	160,1
<b>Interquartilsabstand</b>	212,4	170,2	197,6	30,7	54,4
<b>Schiefe</b>	-0,156	-0,389	-0,258	1,033	1,065
<b>Standardfehler Schiefe</b>	0,512	0,512	0,512	0,512	0,512
<b>Kurtosis</b>	-1,225	-0,249	-1,045	0,739	0,908
<b>Standardfehler Kurtosis</b>	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992

**Tabelle A-8:** Lage-, Streu- und Verteilungsmaße der Reizschwelle für Proband 5 pro Kontaktart

<i>Proband 6</i>	Reizschwelle [ $\mu\text{A}$ ]				
	<i>H - P</i>	<i>H - R</i>	<i>H - D</i>	<i>Z - P</i>	<i>U - E</i>
<b>Mittelwert</b>	1044,4	1011,1	1019,6	348,5	331,5
<b>Median</b>	1067,8	1005,7	997,3	354,8	346,2
<b>5% Perzentil</b>	833,3	896,3	858,0	238,8	180,9
<b>95% Perzentil</b>	1183,6	1217,0	1182,3	397,9	431,8
<b>Varianz</b>	10626,3	7344,4	8096,0	1303,3	3779,7
<b>Standardabweichung</b>	103,1	85,7	90,0	36,1	61,5
<b>Minimum</b>	831,4	895,5	857,6	235,0	178,4
<b>Maximum</b>	1183,6	1221,6	1184,7	398,2	432,2
<b>Spannweite</b>	352,2	326,1	327,1	163,2	253,8
<b>Interquartilsabstand</b>	151,4	128,5	142,7	34,7	75,1
<b>Schiefe</b>	-0,483	0,730	0,097	-1,602	-0,675
<b>Standardfehler Schiefe</b>	0,512	0,512	0,512	0,512	0,512
<b>Kurtosis</b>	-0,562	0,236	-0,566	4,225	0,938
<b>Standardfehler Kurtosis</b>	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992

**Tabelle A-9:** Lage-, Streu- und Verteilungsmaße der Reizschwelle für Proband 6 pro Kontaktart

<i>Proband 7</i>	Reizschwelle [ $\mu\text{A}$ ]				
	<i>H - P</i>	<i>H - R</i>	<i>H - D</i>	<i>Z - P</i>	<i>U - E</i>
<b>Mittelwert</b>	1095,0	1073,5	997,3	307,7	176,0
<b>Median</b>	1110,0	1071,6	965,4	305,1	176,1
<b>5% Perzentil</b>	821,8	833,0	794,5	261,7	62,6
<b>95% Perzentil</b>	1330,4	1256,8	1262,1	370,9	351,6
<b>Varianz</b>	22378,2	12112,1	23006,4	636,5	6628,9
<b>Standardabweichung</b>	149,6	110,1	151,7	25,2	81,4
<b>Minimum</b>	821,3	828,7	792,8	261,6	62,4
<b>Maximum</b>	1332,7	1258,9	1263,8	372,4	355,4
<b>Spannweite</b>	511,4	430,2	471,0	110,8	293,0
<b>Interquartilsabstand</b>	260,3	163,7	268,7	29,0	137,3
<b>Schiefe</b>	-0,306	-0,391	0,406	0,496	0,374
<b>Standardfehler Schiefe</b>	0,512	0,512	0,512	0,512	0,512
<b>Kurtosis</b>	-0,833	-0,282	-1,241	1,562	-0,529
<b>Standardfehler Kurtosis</b>	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992

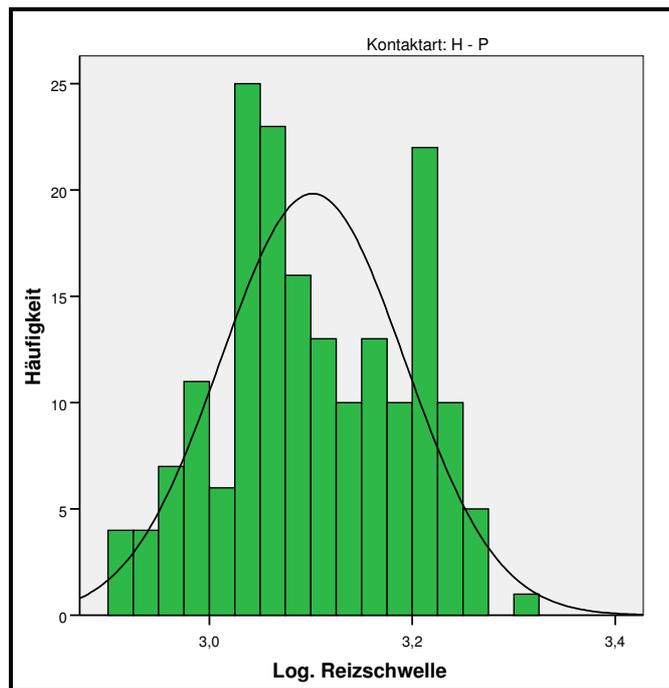
**Tabelle A-10:** Lage-, Streu- und Verteilungsmaße der Reizschwelle für Proband 7 pro Kontaktart

<i>Proband 8</i>	Reizschwelle [ $\mu\text{A}$ ]				
	<i>H - P</i>	<i>H - R</i>	<i>H - D</i>	<i>Z - P</i>	<i>U - E</i>
<b>Mittelwert</b>	1530,0	1311,9	1348,9	437,1	392,4
<b>Median</b>	1540,2	1294,6	1278,1	437,2	387,9
<b>5% Perzentil</b>	1161,6	971,8	1121,0	339,4	167,9
<b>95% Perzentil</b>	1801,1	1650,4	1727,7	503,7	575,9
<b>Varianz</b>	38303,3	28994,3	33095,7	2127,1	11347,5
<b>Standardabweichung</b>	195,7	170,3	181,9	46,1	106,5
<b>Minimum</b>	1155,8	969,4	1117,8	337,8	163,1
<b>Maximum</b>	1802,0	1655,7	1732,3	503,7	576,7
<b>Spannweite</b>	646,2	686,3	614,5	166,0	413,7
<b>Interquartilsabstand</b>	349,0	213,4	317,5	66,0	140,6
<b>Schiefe</b>	-0,244	-0,074	0,686	-0,300	-0,145
<b>Standardfehler Schiefe</b>	0,512	0,512	0,512	0,512	0,512
<b>Kurtosis</b>	-1,142	0,102	-0,789	-0,359	-0,203
<b>Standardfehler Kurtosis</b>	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992

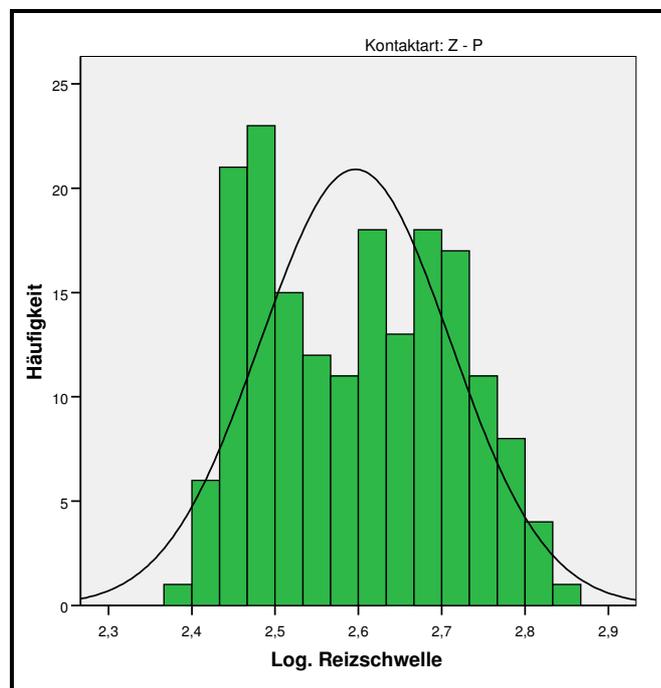
**Tabelle A-11:** Lage-, Streu- und Verteilungsmaße der Reizschwelle für Proband 8 pro Kontaktart

<i>Proband 9</i>	<b>Reizschwelle [<math>\mu\text{A}</math>]</b>				
	<i>H - P</i>	<i>H - R</i>	<i>H - D</i>	<i>Z - P</i>	<i>U - E</i>
<b>Mittelwert</b>	1329,7	1318,5	1402,0	569,8	192,7
<b>Median</b>	1298,3	1335,7	1460,3	581,4	175,0
<b>5% Perzentil</b>	898,4	1144,4	861,2	425,1	80,6
<b>95% Perzentil</b>	1686,7	1484,1	1719,3	719,8	358,9
<b>Varianz</b>	51049,5	9689,7	53742,6	5701,0	4891,9
<b>Standardabweichung</b>	225,9	98,4	231,8	75,5	69,9
<b>Minimum</b>	896,2	1143,6	854,8	424,0	79,1
<b>Maximum</b>	1689,7	1486,4	1722,2	722,4	362,2
<b>Spannweite</b>	793,4	342,8	867,5	298,4	283,0
<b>Interquartilsabstand</b>	315,8	165,8	333,7	105,5	106,8
<b>Schiefe</b>	-0,182	-0,376	-0,910	-0,057	0,722
<b>Standardfehler Schiefe</b>	0,512	0,512	0,512	0,512	0,512
<b>Kurtosis</b>	-0,635	-0,784	0,357	-0,157	0,340
<b>Standardfehler Kurtosis</b>	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992

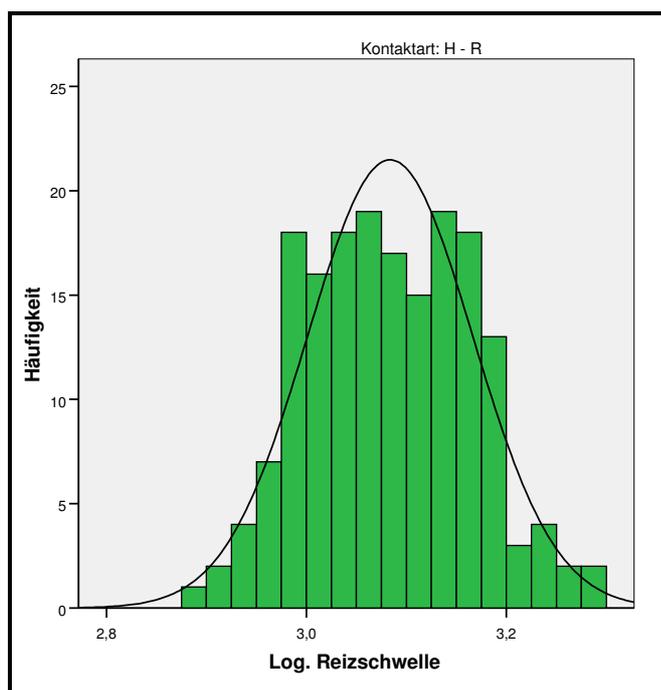
**Tabelle A-12:** Lage-, Streu- und Verteilungsmaße der Reizschwelle für Proband 9 pro Kontaktart



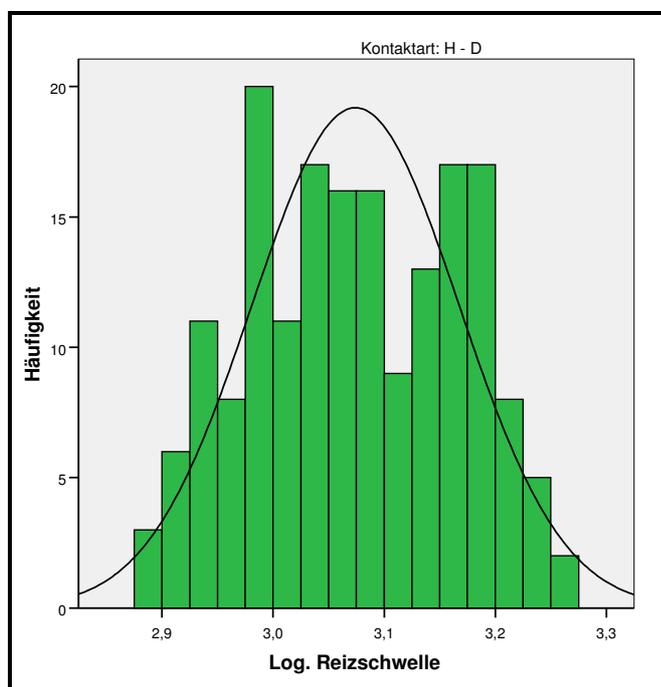
**Abbildung A-1:** Häufigkeitsverteilung der log. Reizschwelle für alle Probanden, Kontaktart: *Hand-Platte*



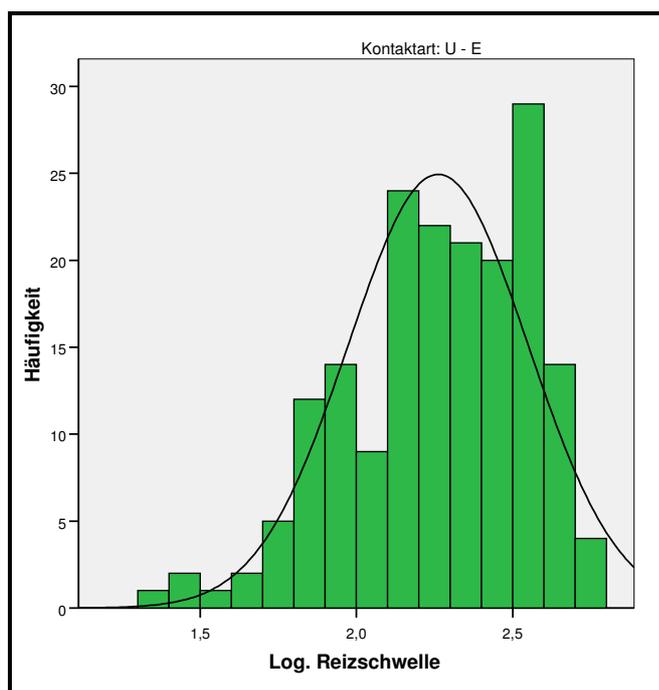
**Abbildung A-2:** Häufigkeitsverteilung der log. Reizschwelle für alle Probanden, Kontaktart: *Zeigefinger-Platte*



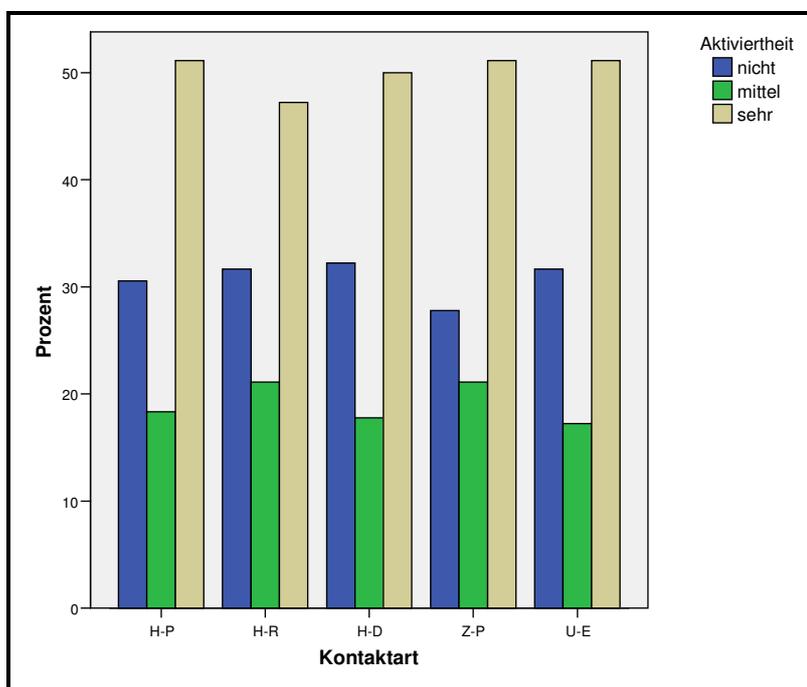
**Abbildung A-3:** Häufigkeitsverteilung der log. Reizschwelle für alle Probanden, Kontaktart: *Hand-Rohr*



**Abbildung A-4:** Häufigkeitsverteilung der log. Reizschwelle für alle Probanden, Kontaktart: *Hand-Draht*



**Abbildung A-5:** Häufigkeitsverteilung der log. Reizschwelle für alle Probanden, Kontaktart: *Unterarm-Elektroden*



**Abbildung A-6:** Ausprägungen des Parameters Aktiviertheit für alle Probanden pro Kontaktart

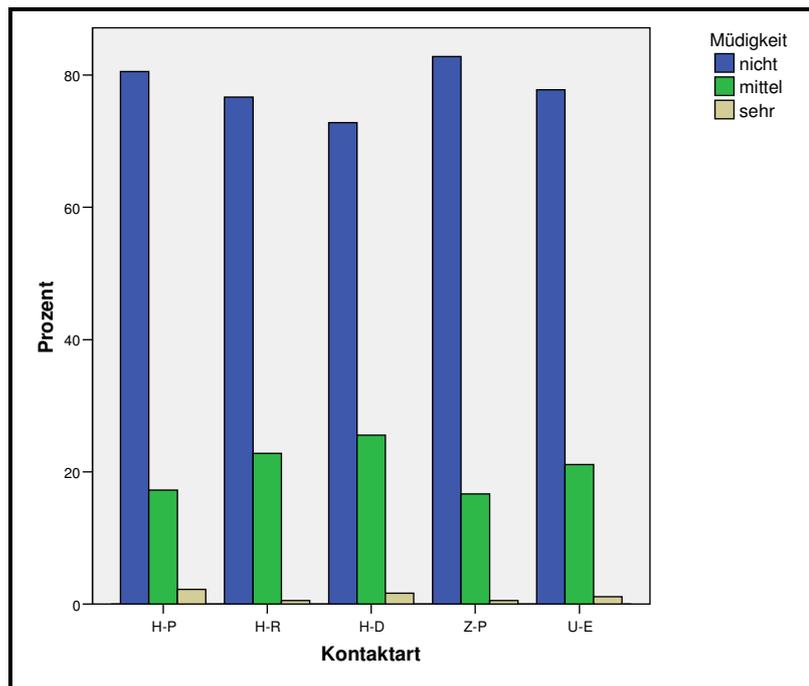


Abbildung A-7: Ausprägungen des Parameters Müdigkeit für alle Probanden pro Kontaktart

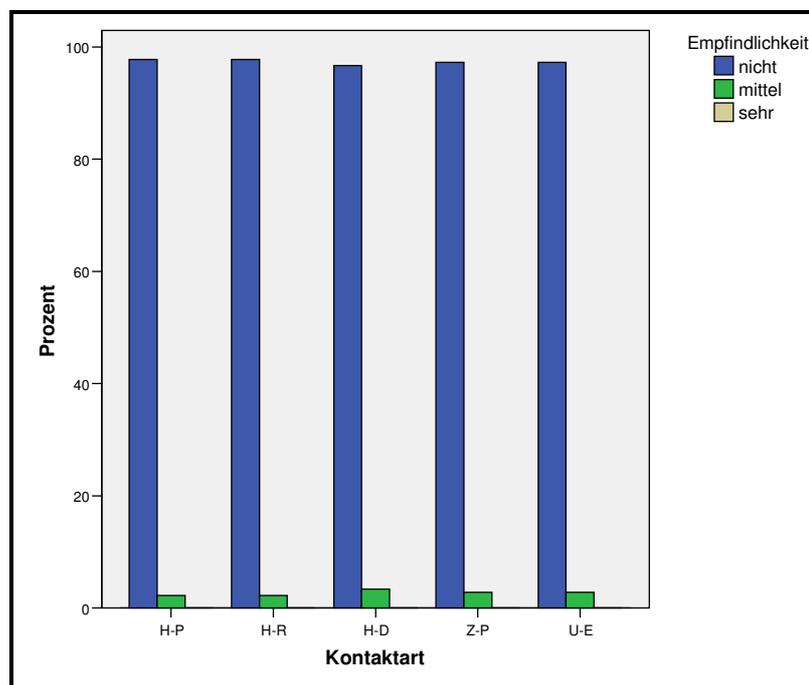
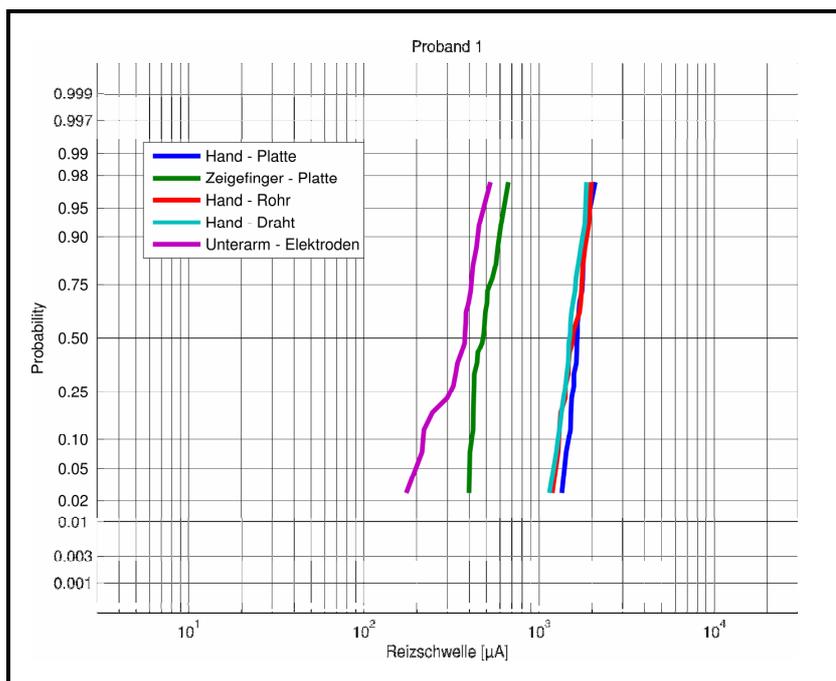
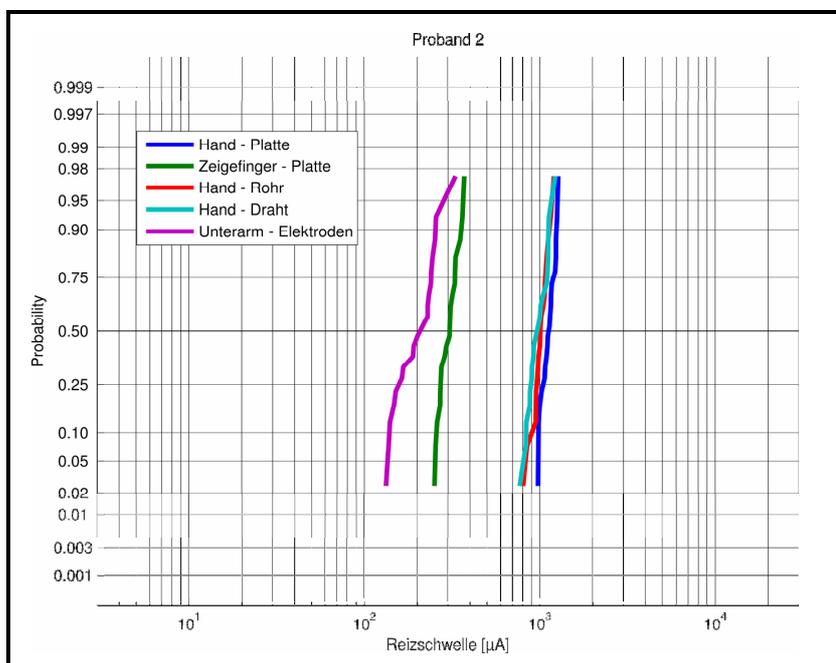


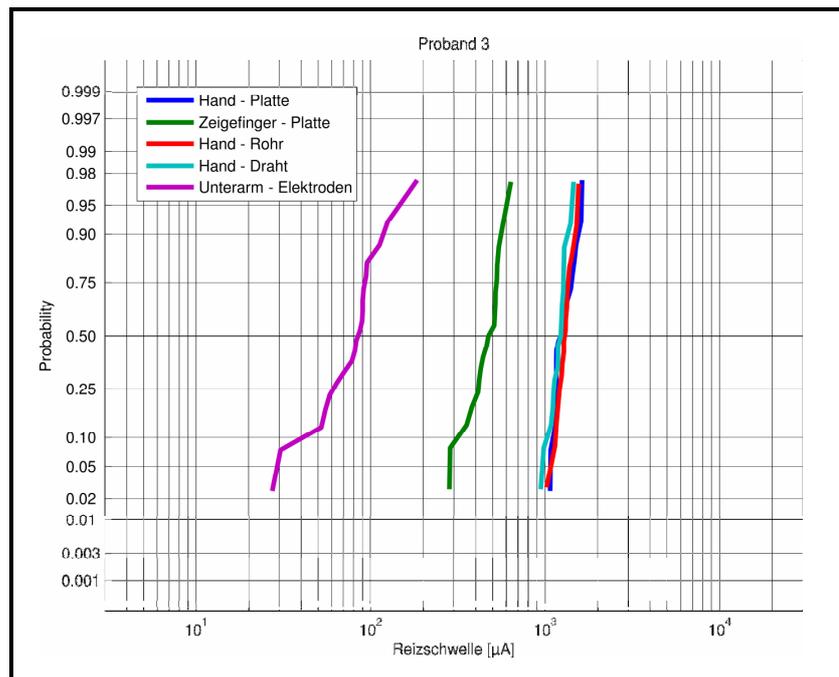
Abbildung A-8: Ausprägungen des Parameters Empfindlichkeit für alle Probanden pro Kontaktart



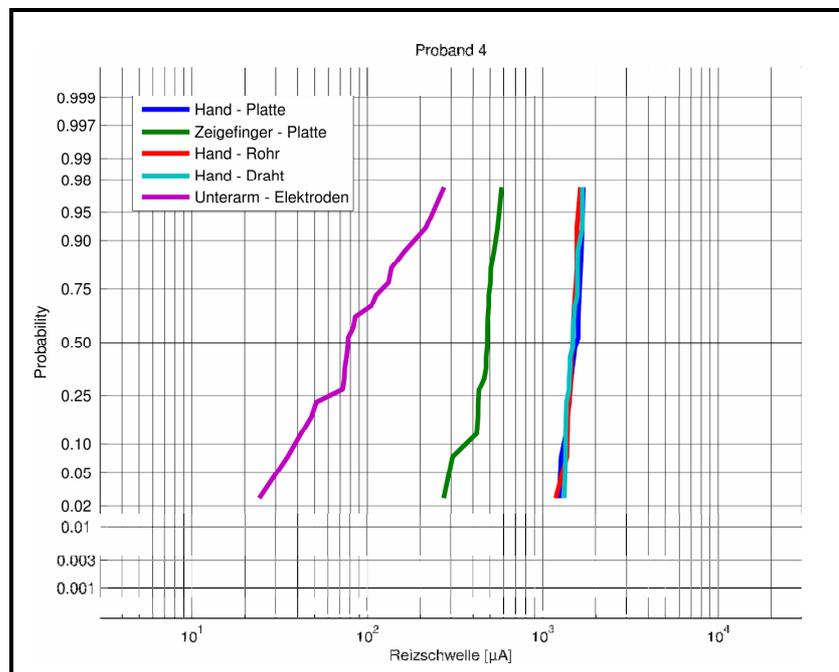
**Abbildung A-9:** Probability-Plots der Einzelwerte der elektrischen Reizschwelle für Proband 1 und alle 5 Kontaktarten (N = 20 pro Kontaktart)



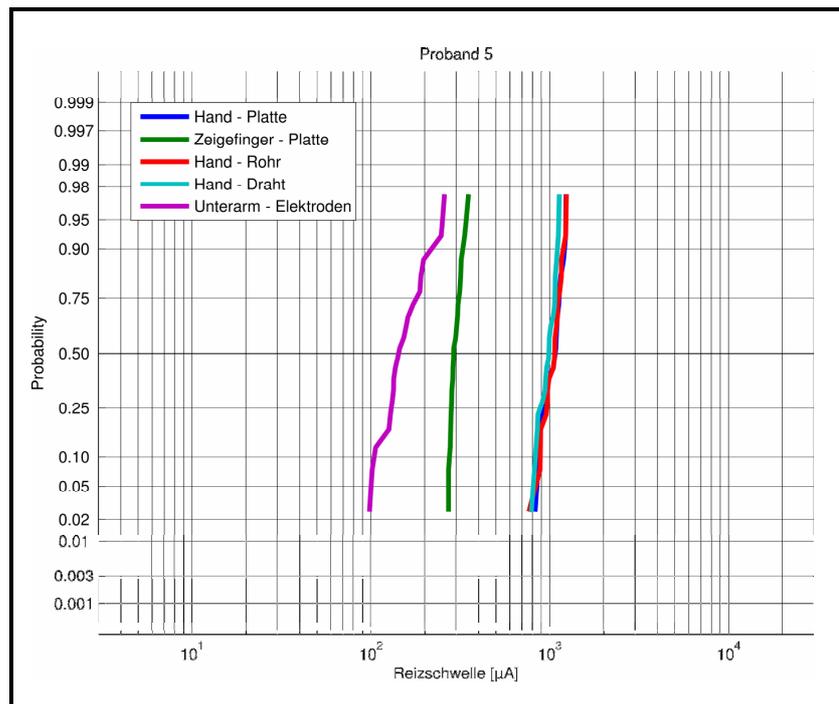
**Abbildung A-10:** Probability-Plots der Einzelwerte der elektrischen Reizschwelle für Proband 2 und alle 5 Kontaktarten (N = 20 pro Kontaktart)



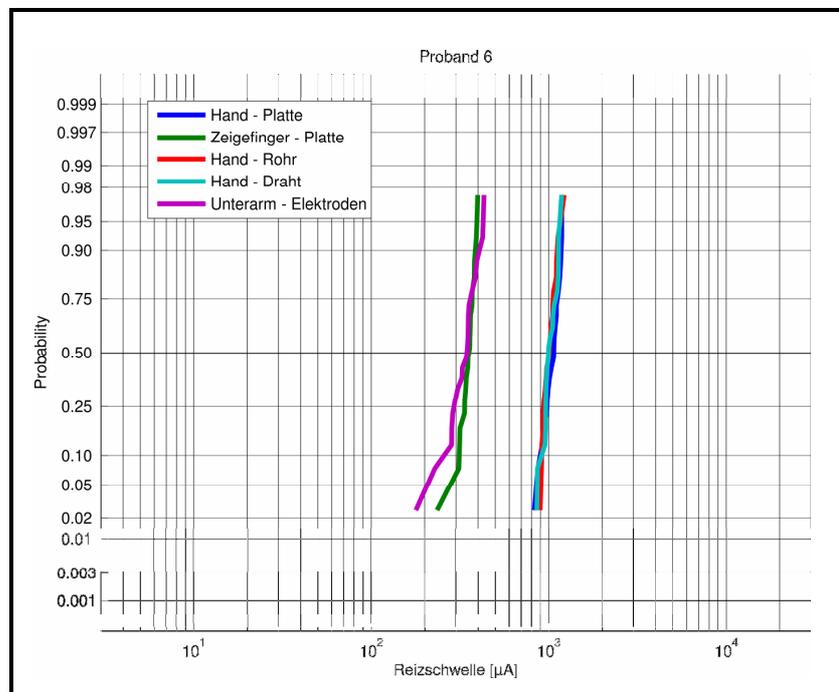
**Abbildung A-11:** Probability-Plots der Einzelwerte der elektrischen Reizschwelle für Proband 3 und alle 5 Kontaktarten (N = 20 pro Kontaktart)



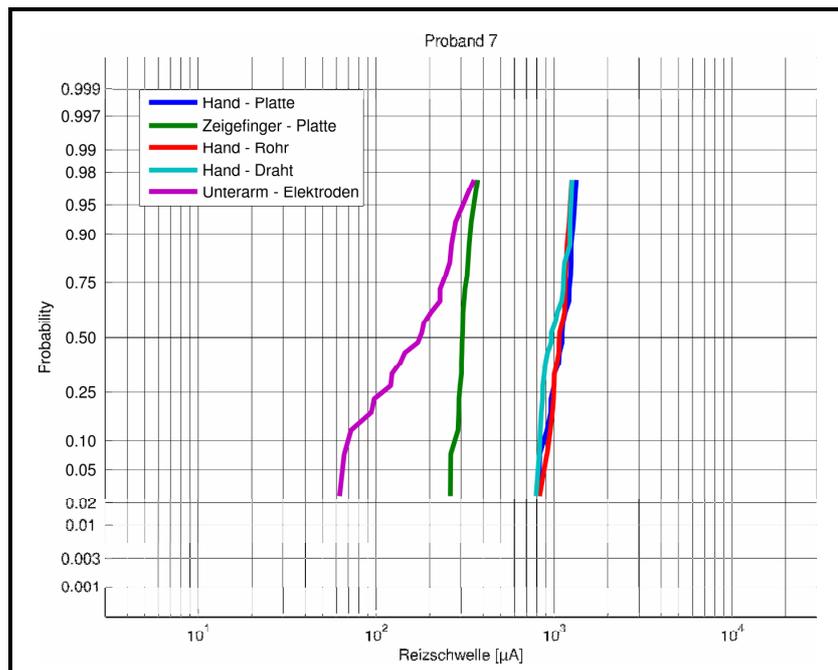
**Abbildung A-12:** Probability-Plots der Einzelwerte der elektrischen Reizschwelle für Proband 4 und alle 5 Kontaktarten (N = 20 pro Kontaktart)



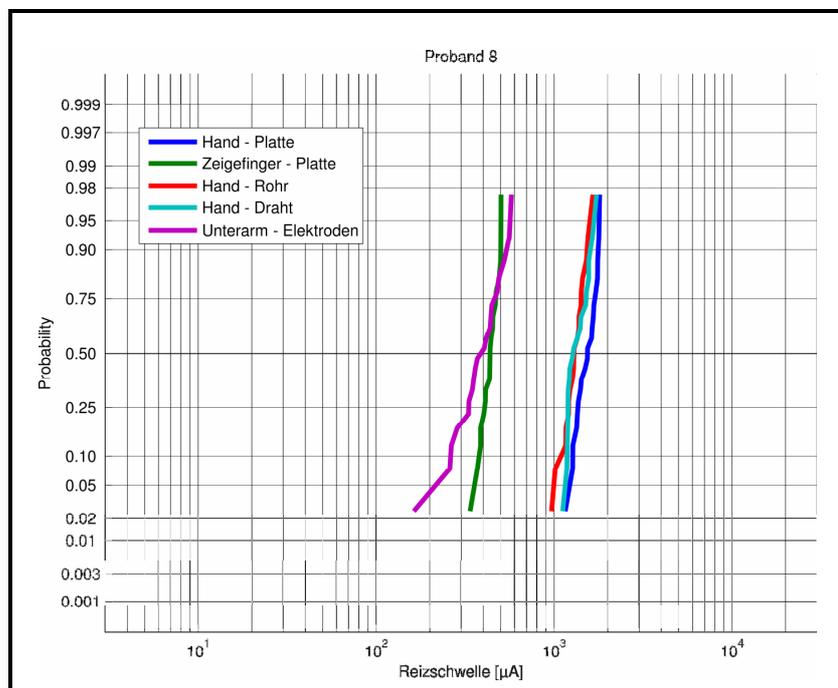
**Abbildung A-13:** Probability-Plots der Einzelwerte der elektrischen Reizschwelle für Proband 5 und alle 5 Kontaktarten (N = 20 pro Kontaktart)



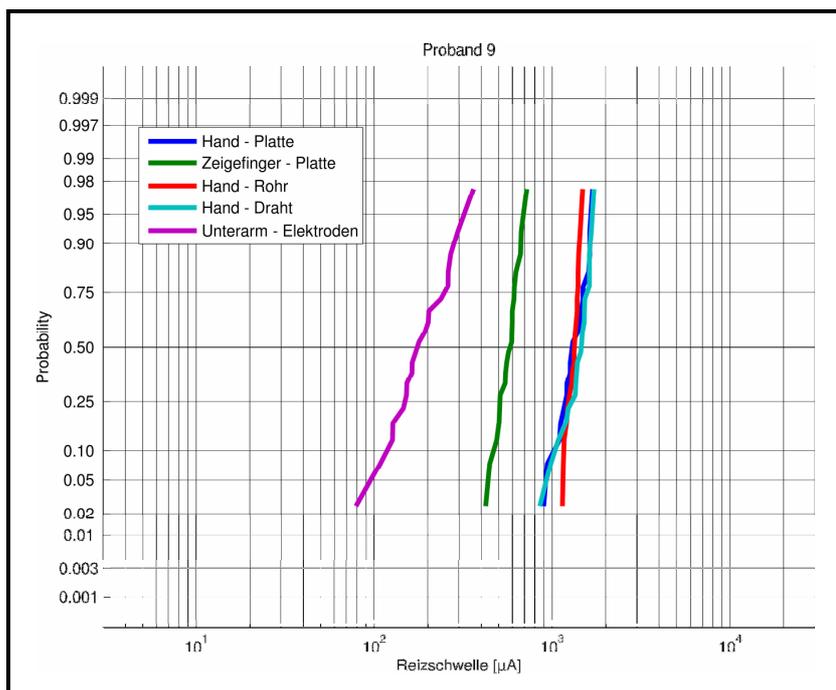
**Abbildung A-14:** Probability-Plots der Einzelwerte der elektrischen Reizschwelle für Proband 6 und alle 5 Kontaktarten (N = 20 pro Kontaktart)



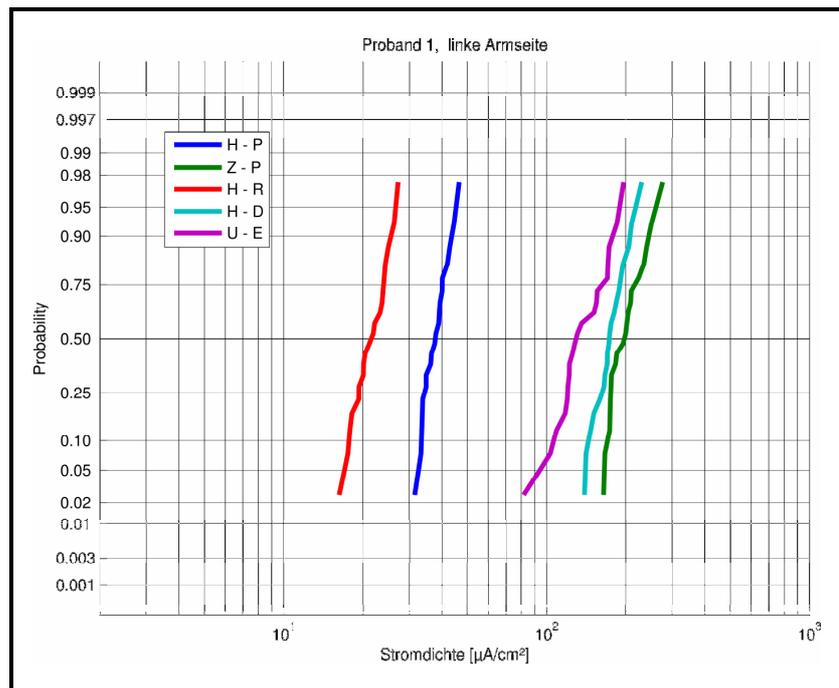
**Abbildung A-15:** Probability-Plots der Einzelwerte der elektrischen Reizschwelle für Proband 7 und alle 5 Kontaktarten (N = 20 pro Kontaktart)



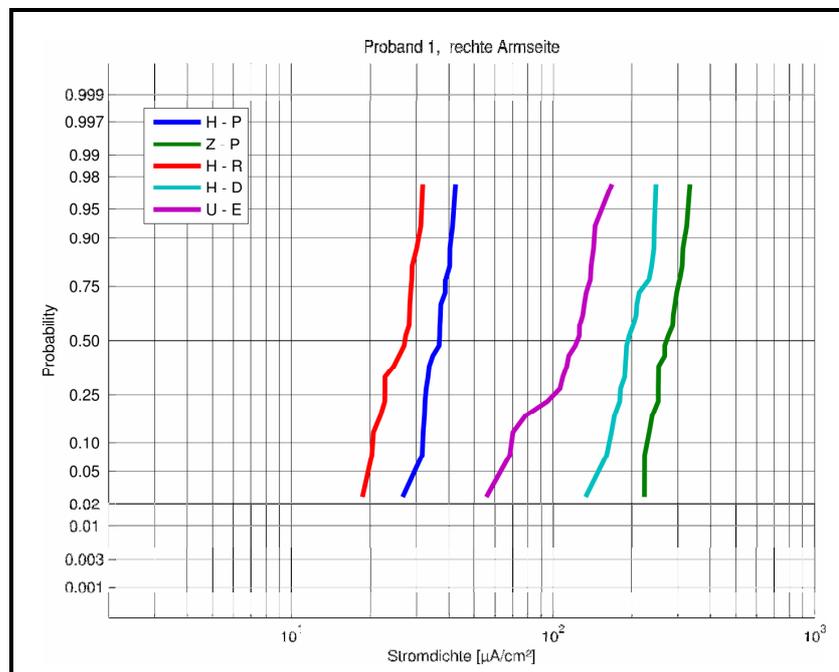
**Abbildung A-16:** Probability-Plots der Einzelwerte der elektrischen Reizschwelle für Proband 8 und alle 5 Kontaktarten (N = 20 pro Kontaktart)



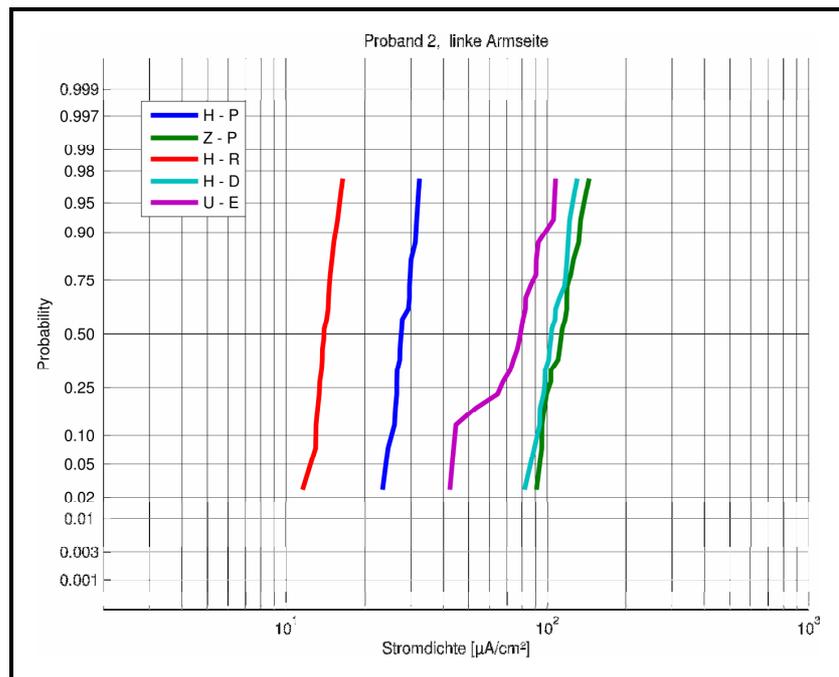
**Abbildung A-17:** Probability-Plots der Einzelwerte der elektrischen Reizschwelle für Proband 9 und alle 5 Kontaktarten (N = 20 pro Kontaktart)



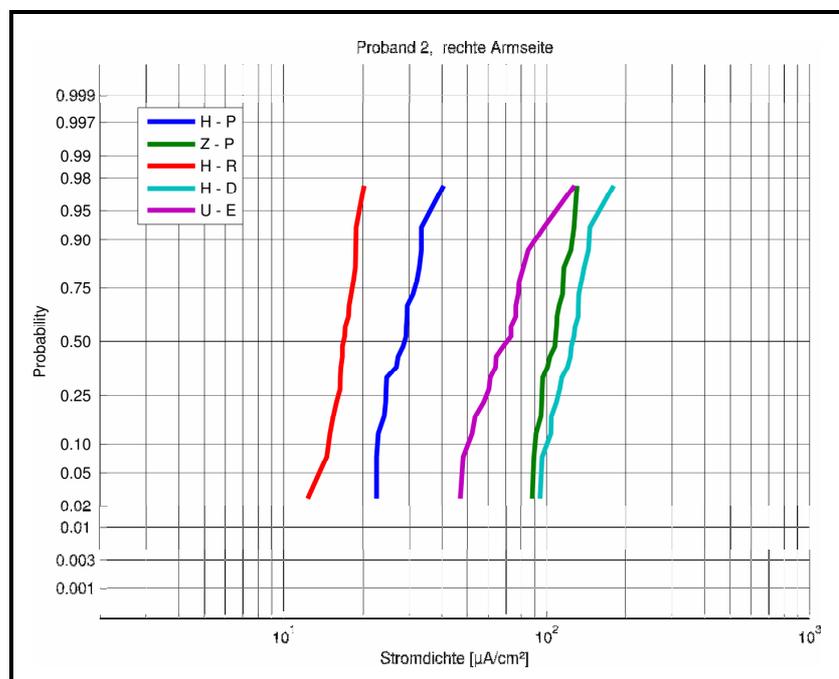
**Abbildung A-18:** Probability-Plots der Wahrnehmungsstromdichte für die linke Armseite von Proband 1 pro Kontaktart (N = 20 pro Kontaktart)



**Abbildung A-19:** Probability-Plots der Wahrnehmungsstromdichte für die rechte Armseite von Proband 1 pro Kontaktart (N = 20 pro Kontaktart)



**Abbildung A-20:** Probability-Plots der Wahrnehmungsstromdichte für die linke Armseite von Proband 2 pro Kontaktart (N = 20 pro Kontaktart)



**Abbildung A-21:** Probability-Plots der Wahrnehmungsstromdichte für die rechte Armseite von Proband 2 pro Kontaktart (N = 20 pro Kontaktart)

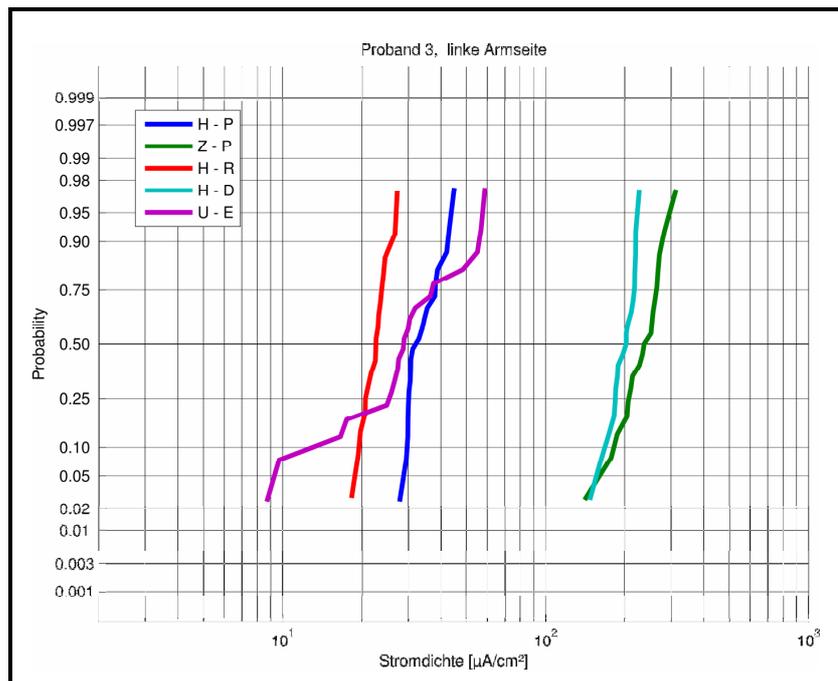


Abbildung A-22: Probability-Plots der Wahrnehmungsstromdichte für die linke Armseite von Proband 3 pro Kontaktart (N = 20 pro Kontaktart)

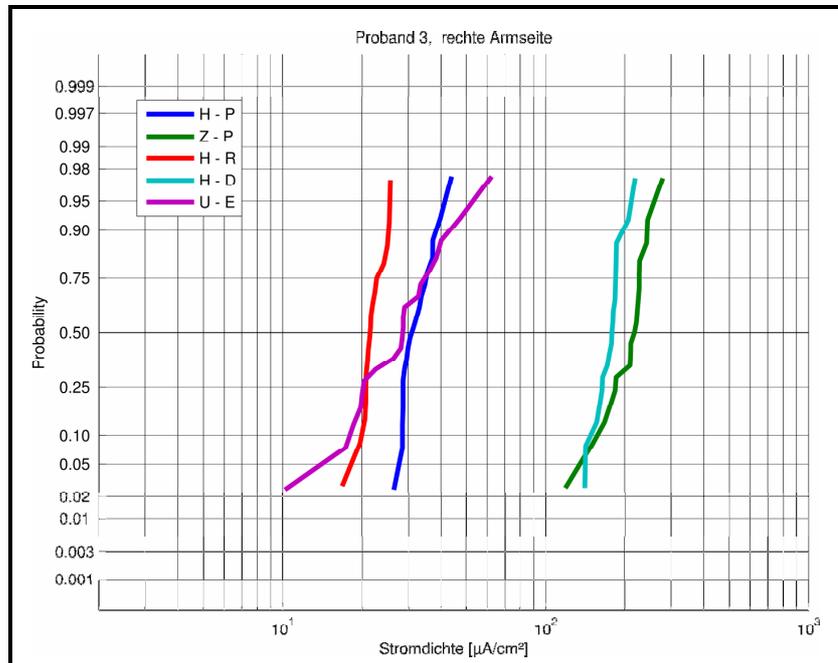


Abbildung A-23: Probability-Plots der Wahrnehmungsstromdichte für die rechte Armseite von Proband 3 pro Kontaktart (N = 20 pro Kontaktart)

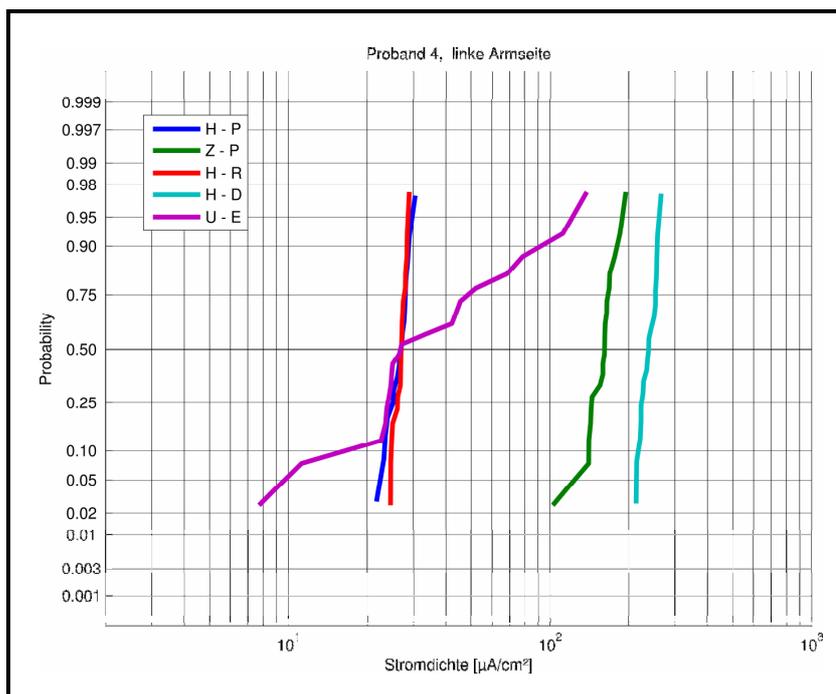


Abbildung A-24: Probability-Plots der Wahrnehmungsstromdichte für die linke Armseite von Proband 4 pro Kontaktart (N = 20 pro Kontaktart)

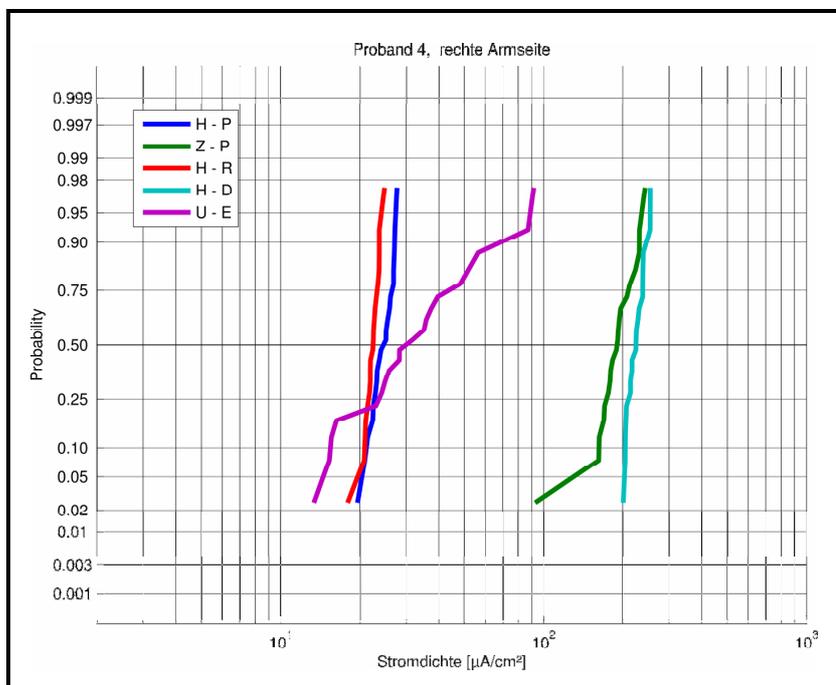
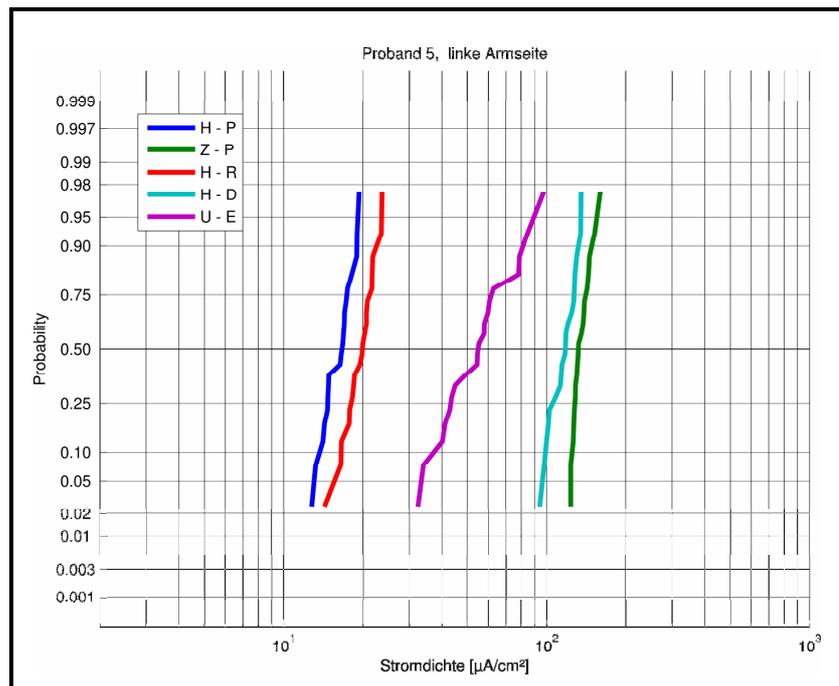
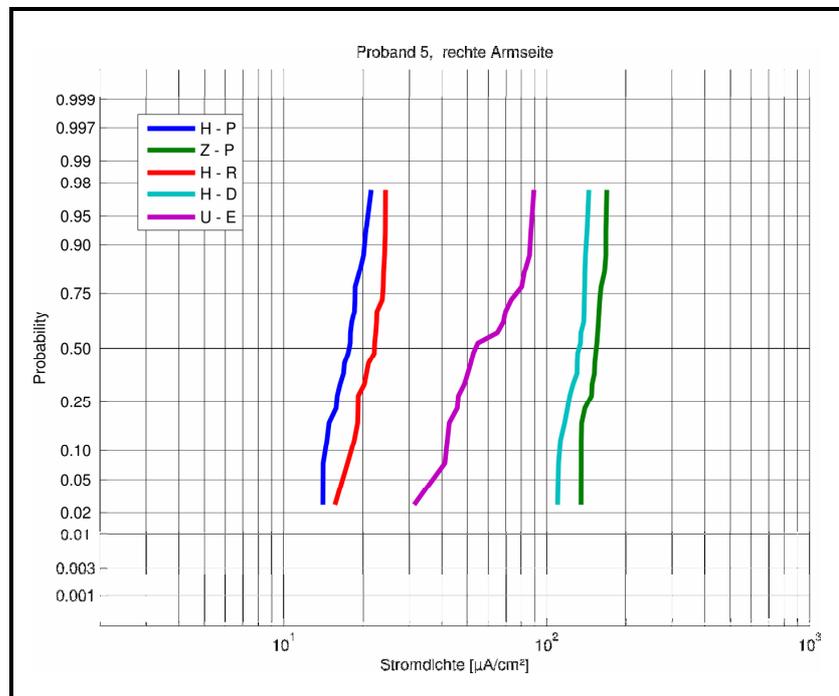


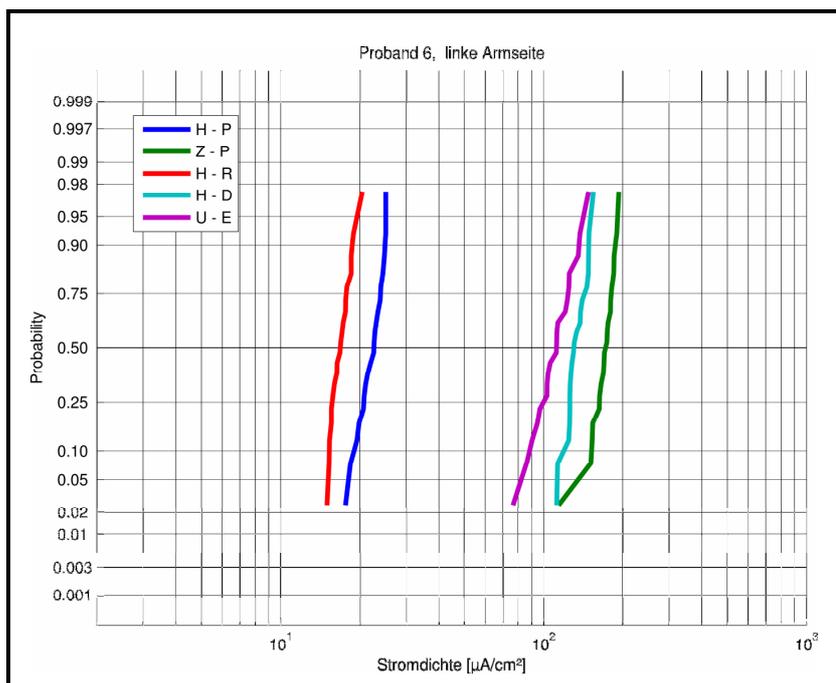
Abbildung A-25: Probability-Plots der Wahrnehmungsstromdichte für die rechte Armseite von Proband 4 pro Kontaktart (N = 20 pro Kontaktart)



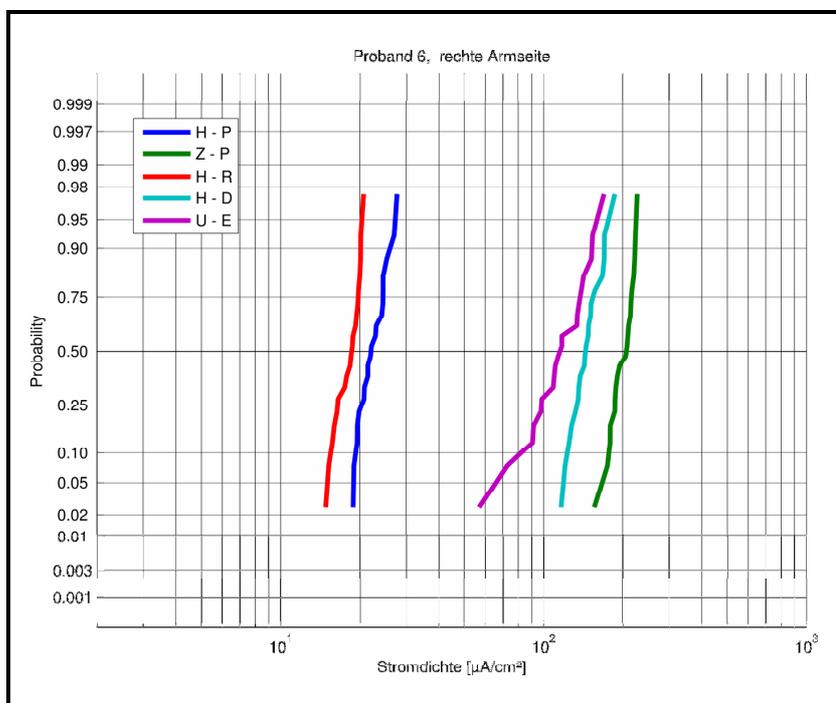
**Abbildung A-26:** Probability-Plots der Wahrnehmungsstromdichte für die linke Armseite von Proband 5 pro Kontaktart (N = 20 pro Kontaktart)



**Abbildung A-27:** Probability-Plots der Wahrnehmungsstromdichte für die rechte Armseite von Proband 5 pro Kontaktart (N = 20 pro Kontaktart)



**Abbildung A-28:** Probability-Plots der Wahrnehmungsstromdichte für die linke Armseite von Proband 6 pro Kontaktart (N = 20 pro Kontaktart)



**Abbildung A-29:** Probability-Plots der Wahrnehmungsstromdichte für die rechte Armseite von Proband 6 pro Kontaktart (N = 20 pro Kontaktart)

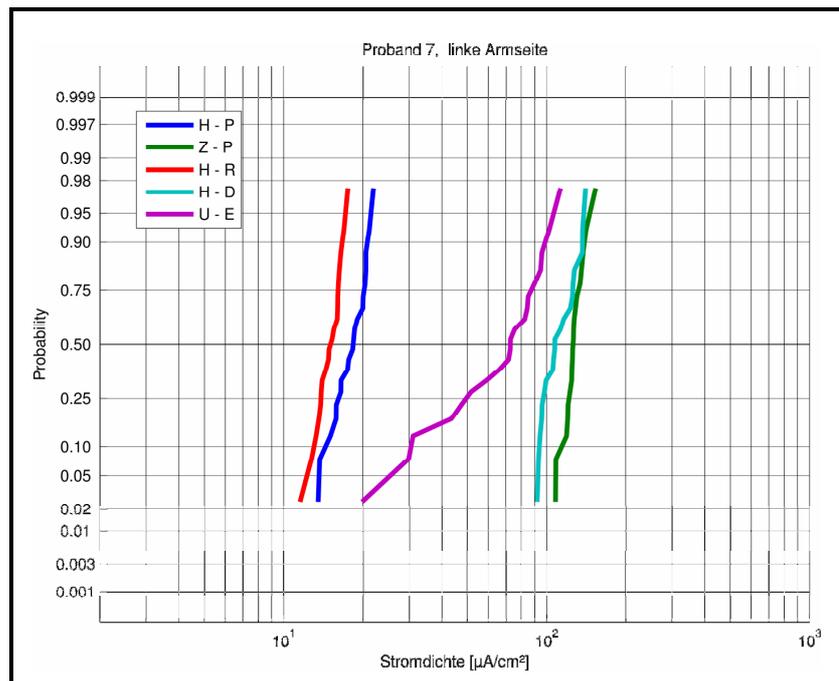


Abbildung A-30: Probability-Plots der Wahrnehmungsstromdichte für die linke Armseite von Probant 7 pro Kontaktart (N = 20 pro Kontaktart)

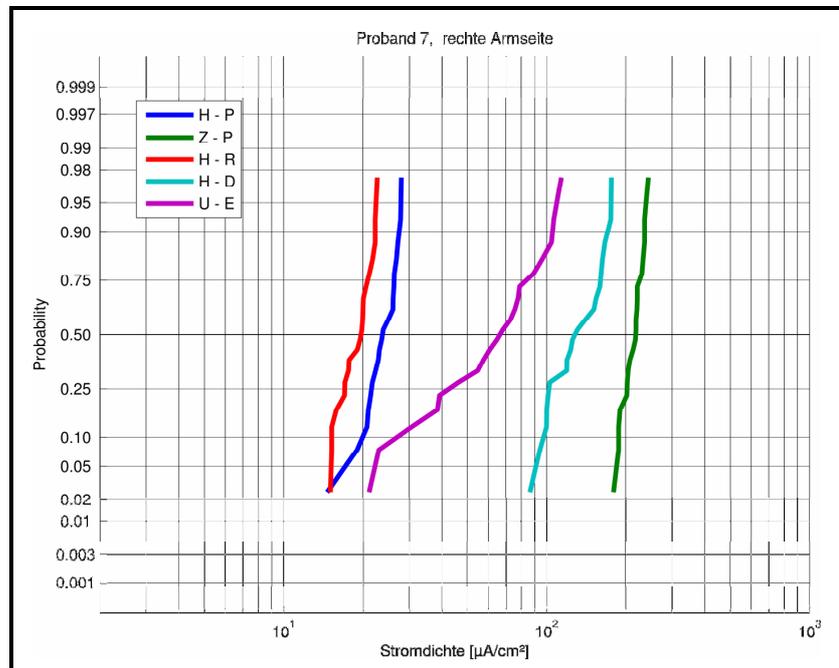
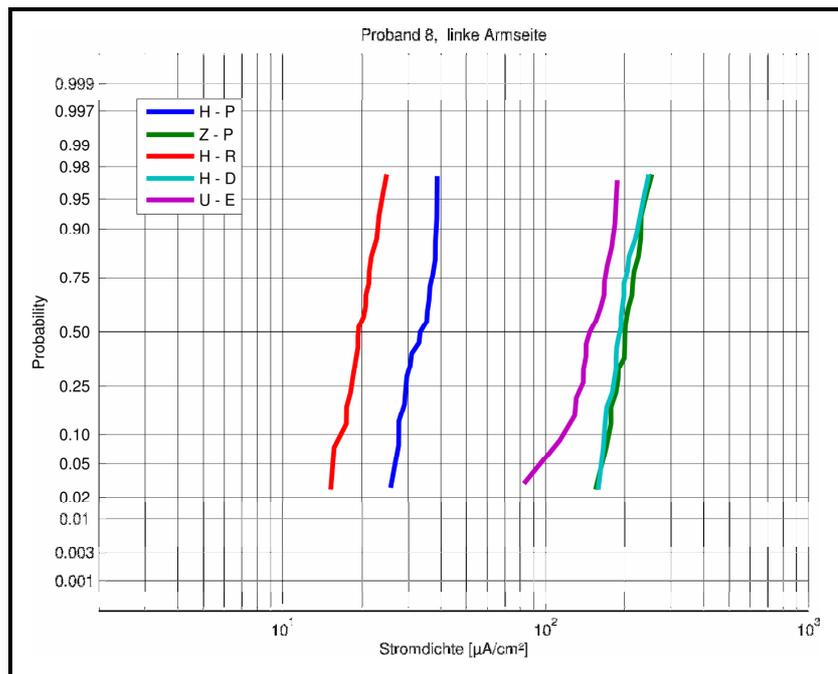
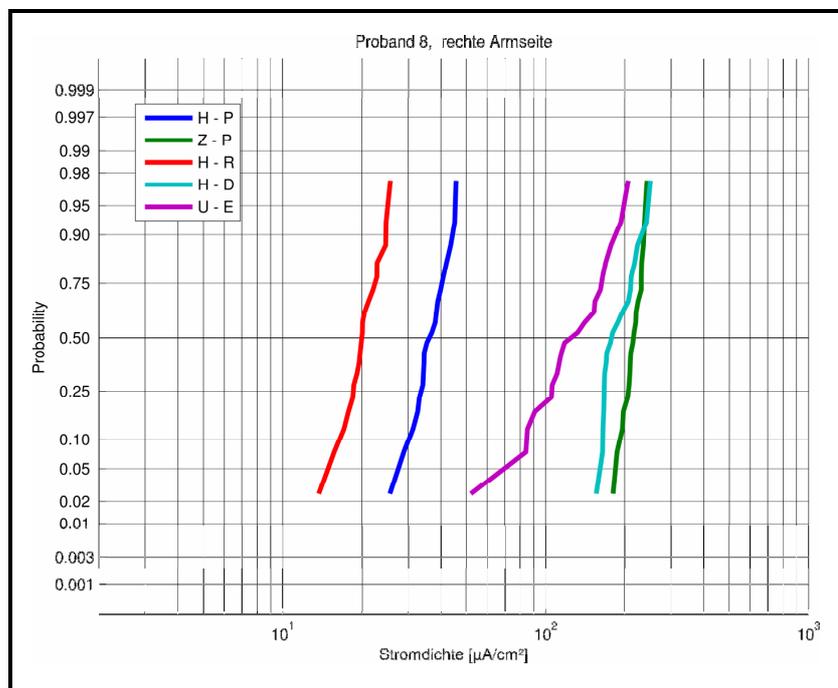


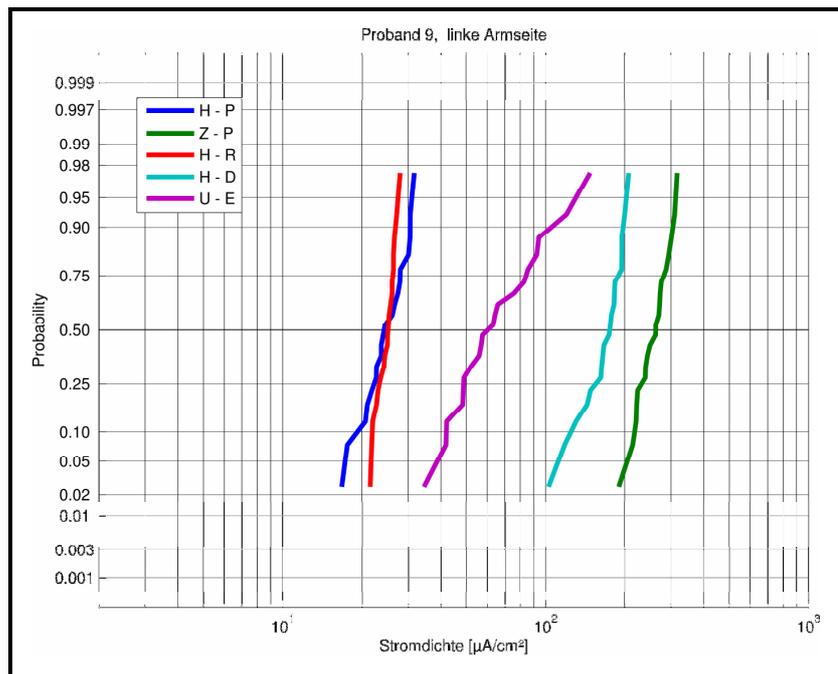
Abbildung A-31: Probability-Plots der Wahrnehmungsstromdichte für die rechte Armseite von Probant 7 pro Kontaktart (N = 20 pro Kontaktart)



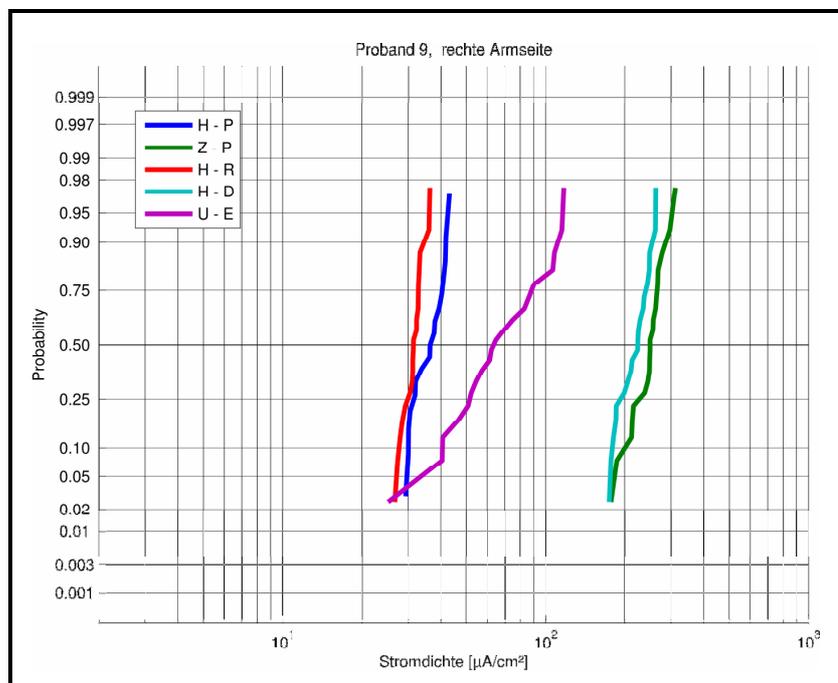
**Abbildung A-32:** Probability-Plots der Wahrnehmungsstromdichte für die linke Armseite von Proband 8 pro Kontaktart (N = 20 pro Kontaktart)



**Abbildung A-33:** Probability-Plots der Wahrnehmungsstromdichte für die rechte Armseite von Proband 8 pro Kontaktart (N = 20 pro Kontaktart)



**Abbildung A-34:** Probability-Plots der Wahrnehmungsstromdichte für die linke Armseite von Probant 9 pro Kontaktart (N = 20 pro Kontaktart)



**Abbildung A-35:** Probability-Plots der Wahrnehmungsstromdichte für die rechte Armseite von Probant 9 pro Kontaktart (N = 20 pro Kontaktart)