

Aus dem Physiologischen Institut
(Geschäftsführender Vorstand: Prof. Dr. med. Markus Bleich)
der Christian - Albrechts - Universität zu Kiel

Untersuchungen zur Temperatur - Gewichts - Illusion

Inauguraldissertation
zur
Erlangung der Doktorwürde der Medizin
der Medizinischen Fakultät
der Christian - Albrechts - Universität zu Kiel

vorgelegt von
Elena Friesen-Klengel, geb. Friesen
aus Podsosnowo (Russland)

Kiel 2024

Aus dem Physiologischen Institut
(Geschäftsführender Vorstand: Prof. Dr. med. Markus Bleich)
der Christian - Albrechts - Universität zu Kiel

Untersuchungen zur Temperatur - Gewichts - Illusion

Inauguraldissertation
zur
Erlangung der Doktorwürde der Medizin
der Medizinischen Fakultät
der Christian - Albrechts - Universität zu Kiel

vorgelegt von
Elena Friesen-Klengel, geb. Friesen
aus Podsosnowo (Russland)

Kiel 2024

1. Berichtersteller/in: Prof. Dr. med. Johann P. Kuhtz-Buschbeck;
Physiologisches Institut

2. Berichtersteller/in: Prof. Dr. med. Kirsten Zeuner;
Klinik für Neurologie

Tag der mündlichen Prüfung: 21.05.2025

Zum Druck genehmigt, Kiel, den 21.05.2025

gez.: Prof. Dr. med. Franziska Theilig
(Vorsitzende/r der Prüfungskommission)

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis.....	III
Glossar.....	IV
1 Einleitung	- 1 -
1.1 Die Silbertaler-Illusion	- 1 -
1.2 Temperaturempfinden und epikritische Sensibilität	- 5 -
1.3 Fragestellung.....	- 6 -
2 Methoden.....	- 8 -
2.1 Versuchspersonen.....	- 9 -
2.1.1 Bestimmung der Händigkeit	- 9 -
2.2 Versuchsumgebung und Aufbau	- 10 -
2.3 Zahleneinschätzung.....	- 13 -
2.4 Greifen: Einfluss der Temperatur-Gewichts-Illusion auf die Motorik.....	- 14 -
2.5 Quantitative sensorische Testung.....	- 20 -
2.6 Reihenfolge der Versuchsbedingungen.....	- 21 -
2.7 Datenverarbeitung und Auswertung.....	- 23 -
3 Ergebnisse	- 25 -
3.1 Quantitative sensorische Testung.....	- 25 -
3.1.1 Temperaturempfinden	- 25 -
3.2 Numerische Einschätzung	- 25 -
3.3 Greif-Hebe-Experiment: Auswirkung der TGI auf die Motorik.....	- 27 -
3.4 Krafteinsatz beim Greifen und Heben der Distraktoren („Dummys“)......	- 35 -
3.5 Zusammenfassung der Resultate	- 36 -
4 Diskussion.....	- 38 -
4.1 Zahleneinschätzung zur Beurteilung der Schwere	- 38 -
4.2 Greifen / Heben.....	- 40 -
4.3 Mechanismen.....	- 43 -
4.4 Neurophysiologie der Motorik und Sensorik.....	- 45 -
4.5 Methodenkritik.....	- 49 -
5 Zusammenfassung.....	- 51 -
6 Literaturverzeichnis	- 52 -
7 Anhang.....	- 59 -
8 Danksagung	- 60 -
9 Publikationen	- 61 -

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 : Aufbau eines Testobjekts	- 11 -
Abb. 2 : Auswechseln des Testgewichtes.....	- 12 -
Abb. 3 : Messung und Ablauf der Greif- und Hebeaktionen	- 15 -
Abb. 4 : Darstellung Greif- und Hebeaktion in Experiment 2 („Halten“)	- 17 -
Abb. 5 : Kraftverläufe bei drei Greif-Hebeaktionen.	- 18 -
Abb. 6 : Einschätzung der Schwere in Experiment 1 („Spüren“).....	- 26 -
Abb. 7 : Einschätzung der Schwere in Experiment 2 („Halten“)	- 26 -
Abb. 8 : Maxima der Griffkraft und Griffkraftraten in Exp. 1 („Spüren“).	- 28 -
Abb. 9 : Maxima der Hubkraft und der Hubkraftraten in Exp. 1 („Spüren“)...	- 29 -
Abb. 10 : Maxima der Griffkraft und der Griffkraftraten in Exp. 2 („Halten“). -	31 -
Abb. 11 : Maxima der Hubkraft und der Hubkraftraten in Exp. 2 („Halten“) . -	32 -
Abb. 12 : Griffkraft beim statischen Halten in beiden Experimenten.	- 34 -
Abb. 13 : Krafteinsatz beim Fassen und Heben leichter (600 g) und schwerer (800 g) „Dummys“ in Experiment 2 („Halten“).	- 35 -

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 : Zahlenangaben zweier Probanden in Experiment 1 („Spüren“) ..	13 -
Tabelle 2 : Makros und Kraftvariablen	20 -
Tabelle 3 : Pseudo-randomisierte Reihenfolge der Testgewichte	22 -
Tabelle 4 : Pseudo-randomisierte Reihenfolge Variationen	23 -
Tabelle 5 : Beurteilung der Schwere der Gewichte in beiden Experimenten	27 -
Tabelle 6 : Krafteinsatz beim ersten Greif-Hebe-Experiment („Spüren“).....	30 -
Tabelle 7 : Krafteinsatz beim zweiten Greif-Hebe-Experiment („Halten“).....	33 -

Glossar

°C	Grad Celsius
°C/s	Grad Celsius pro Sekunde
AKZ	Akzeleration, maximale vertikale Beschleunigung des Gewichts beim Anheben
ANOVA	<i>engl.</i> analysis of variance; Varianzanalyse
c-LTMR	<i>engl.</i> C-low threshold mechanoreceptors
cm	Zentimeter
g	Gramm
g/s	Gramm pro Sekunde
GK	maximale Griffkraft
GKH	maximale Griffkraft beim statischen Halten
GKR	maximale Griffkrafrate (max. Anstiegsgeschwindigkeit der Griffkraft)
HK	maximale Hubkraft
HKR	maximale Hubkrafrate (max. Anstiegsgeschwindigkeit der Hubkraft)
Hz	Hertz
KCNQ1	<i>engl.</i> Potassium voltage-gated channel subfamily Q member 1
kg	Kilogramm
mm	Millimeter
MW	Mittelwert
MWI	<i>engl.</i> material-weight-illusion; Material-Gewichts-Illusion
n.s.	nicht signifikant
N/s	Newton pro Sekunde
PMv	ventraler prämotorischer Kortex
s	Sekunde
SEM	Standardfehler des Mittelwertes
SWI	<i>engl.</i> size-weight-illusion; Größen-Gewichts-Illusion
TGI	Temperatur-Gewichts-Illusion
TRPA1	<i>engl.</i> Transient receptor potential cation channel subfamily A member 1
TRPM8	<i>engl.</i> Transient receptor potential cation channel subfamily M member 8
TRPV1	<i>engl.</i> Transient receptor potential cation channel subfamily V member 1
TRPV2	<i>engl.</i> Transient receptor potential cation channel subfamily V member 2
V	Volt
ZNS	Zentralnervensystem

1 Einleitung

1.1 Die Silbertaler-Illusion

Ernst Heinrich Weber (geb. 24.06.1795, gest. 26.01.1878) war im 19. Jahrhundert Professor für Anatomie und Physiologie an der Universität Leipzig (Professorenkatalog der Universität Leipzig – Die Professoren-Datenbank für Leipzig, o. J.). Er gehört zu den Begründern der experimentellen Psychologie und gilt als Wegbereiter der Psychophysik. Zudem begründete er eine auf Beobachtungen und Experimente gestützte Sinnesphysiologie und prägte mit seinen Erkenntnissen viele Bereiche der Physiologie und der Medizin nachhaltig. In seiner Schrift „Der Tastsinn und das Gemeingefühl“ beschrieb Weber Beobachtungen zur Druck-, Temperatur- und Schmerzempfindung, zum räumlichen Auflösungsvermögen des Tastsinns („Ortssinn“) und zur Erkennung von Gewichtsunterschieden (Weber, 1846). Jeder Mediziner kennt heutzutage die Untersuchung der Zweipunktdiskrimination mit einem Weberschen Tastzirkel im Rahmen einer Sensibilitätsprüfung und die klinische Hörprüfung nach Weber mittels einer auf den Kopf gesetzten Stimmgabel.

Die vorliegende Arbeit geht näher auf eine Beobachtung Webers ein, die unter verschiedenen Namen bekannt wurde: Silbertaler-Phänomen, Weber-Phänomen, Temperatur-Gewichts-Illusion oder temperature-weight illusion in der englischsprachigen Literatur. Weber legte Versuchspersonen, die auf dem Rücken lagen, gleich schwere Silbermünzen auf die Stirn; solche Münzen wurden im 19. Jahrhundert als Taler bezeichnet. Zuerst platzierte er eine kalte Münze (-4 °C bis -7 °C) und im Anschluss daran eine warme Münze (ca. 37 °C) auf der Haut. Danach fragte er die Teilnehmenden, welche der Münzen sie als schwerer wahrgenommen hatten. Die meisten gaben an, dass sie die kalte Münze als deutlich schwerer empfunden hätten als die warme Münze. Weber berichtete, dass sich ein kalter Taler auf der Stirn ungefähr genauso schwer anfühle wie zwei warme übereinandergestapelte Taler (Weber, 1846). Die Beschreibung dieses Phänomens gab den Anlass für weitere Experimente, die zum Teil dem ursprünglichen Versuch sehr ähnlich waren.

So reproduzierten Stevens und Kollegen etwa 130 Jahre nach der Erstbeschreibung die Temperatur-Gewichts-Illusion (TGI) unter verschiedenen Bedingungen (Stevens, 1979). Während ihrer Experimente wurde den Versuchspersonen auf 0 °C gekühlte oder auf 32 °C bzw. auf 45 °C erwärmte Aluminiumscheiben an verschiedenen Stellen auf die Haut gelegt und dann die Teilnehmenden gebeten, das Gewicht dieser Scheiben zu schätzen. Stevens und Mitarbeiter beobachteten die TGI nicht nur an der Stirn, sondern auch an anderen Körperregionen, wie zum Beispiel am volaren Unterarm, an der Handfläche, am Bauch und Rücken, am Oberschenkel und Oberarm (Stevens & Green, 1978; Stevens & Hooper, 1982).

Allerdings ist mittlerweile durch Untersuchungen an großen Probandenkollektiven bekannt, dass bei Kontakt der Hand mit einer Thermode aus Metall der Medianwert der Kälteschmerzschwelle etwa $+7\text{ }^{\circ}\text{C}$ beträgt, während die Schwelle für Hitzeschmerz bei etwa $+45\text{ }^{\circ}\text{C}$ liegt (Kuhntz-Buschbeck et al., 2010). Andere Körperregionen sind noch etwas empfindlicher (Rolke et al., 2006). Daher kann man davon ausgehen, dass in den Experimenten von Stevens und Kollegen die thermischen Schmerzschwellen teilweise überschritten wurden, sodass die Temperatur der Metallscheiben unangenehme oder schmerzhaft empfindungen hervorrief, was die Einschätzung ihrer Schwere verfälscht haben könnte. In einer neueren Studie zur TGI wurden unterschiedlich temperierte Gewichte gleicher Masse auf die Handfläche von Versuchspersonen gestellt (Kuhntz-Buschbeck & Hagenkamp, 2020). Die verwendeten Temperaturen ($18\text{ }^{\circ}\text{C}$, $32\text{ }^{\circ}\text{C}$, $41\text{ }^{\circ}\text{C}$) waren nicht schmerzhaft. Die Teilnehmenden schätzten einerseits die Schwere der Gewichte durch Angabe von Zahlen ein, andererseits fassten sie die Gewichte mit der anderen Hand und hoben sie an, während die Griff- und Hubkräfte gemessen wurden. Auf diese Weise wurde der Effekt der Temperatur von Objekten auf die Perzeption (Gewichtsempfindung) und auf die Motorik (Greifen und Heben) untersucht. Kalte Objekte ($18\text{ }^{\circ}\text{C}$) erschienen schwerer als neutral temperierte Objekte ($32\text{ }^{\circ}\text{C}$) gleicher Masse (700 g). Ob bereits eine leichte Berührung kalter Gegenstände eine TGI auslösen kann, wurde dabei jedoch nicht untersucht.

Weitere Sinnestäuschungen, die das Gewicht von Objekten betreffen, sind die Größe-Gewichts-Illusion (englisch size-weight-illusion, abgekürzt SWI) und die Material-Gewichts-Illusion (material-weight illusion, abgekürzt MWI). Die MWI beruht darauf, dass die sichtbare Materialbeschaffenheit eines Objekts bekannter Größe dazu führt, dass ein bestimmtes Gewicht erwartet wird. In Experimenten zur MWI wurden den Versuchspersonen identisch große und gleich schwere Würfel angeboten, die jedoch von außen mit unterschiedlichen Materialien wie z.B. Holz, Metall und Styropor verkleidet waren (Baugh et al., 2012; Buckingham et al., 2009). Die Teilnehmenden ergriffen die Würfel, hoben sie an und beurteilten anschließend die Schwere der Gegenstände, die sie gerade gehoben hatten. Sie berichteten, dass sich der Styroporwürfel schwerer anfühlte als die Würfel, die mit Metall oder Holz verkleidet waren, da ihre initiale Erwartung, der Würfel aus leichtem Kunststoff müsse leichter sein, sich nicht erfüllte. Beim Fassen und Heben der Würfel führte diese falsche Erwartung initial zu Fehlplanungen des Krafteinsatzes. Nahm man den Versuchspersonen die visuellen Hinweise, z.B. durch Verdecken der Materialoberfläche, so verschwand die gewichtsbezogene Sinnestäuschung (Buckingham et al., 2009).

Die Größe-Gewichts-Illusion (SWI) wurde erstmals im Jahre 1891 von Augustin Charpentier beschrieben: Er beobachtete, dass zwei gleich schwere Körper mit unterschiedlichem Volumen als unterschiedlich schwer empfunden wurden (Murray et al., 1999). Die

Versuchspersonen beschrieben, dass ein mit Wasser gefüllter 10 Liter-Eimer beim Tragen leichter erschien als ein 10 kg schwerer Ziegelstein (Charpentier, 1891). Besonders deutlich wird diese Täuschung beim Heben gleich schwerer, aber unterschiedlich großer Objekte gleicher Form (z.B. Würfel, Kugel), die scheinbar aus demselben Material sind (Flanagan & Beltzner, 2000). Mit anderen Worten: Verschieden große Gegenstände gleicher Masse, eine ähnliche Form haben und, von außen betrachtet, aus demselben Material zu bestehen scheinen, werden als unterschiedlich schwer wahrgenommen. Dabei wird das kleinere Objekt als unerwartet schwer und größere Objekt als unerwartet leicht empfunden. Vermutlich entsteht die Illusion durch die Diskrepanz zwischen dem erwarteten und dem tatsächlich nötigen Kraftaufwand beim Heben und Halten solcher Objekte (Charpentier, 1891; Müller & Schumann, 1889). Der in erster Linie visuell wahrgenommene Größenunterschied führt zur Erwartungshaltung, dass das größere Objekt schwerer sein müsse, wobei diese Erwartung beim Anheben des Objekts nicht erfüllt wird (Flanagan & Beltzner, 2000). Mithin wird das kleinere Objekt im Vergleich zum größeren Objekt als schwerer empfunden (Murray et al., 1999). Es gibt Hinweise darauf, dass die SWI aus der Diskrepanz zwischen den aktuellen sensorischen Informationen und der im Laufe des Lebens gelernten Korrelation zwischen Volumen und Gewicht von Objekten gleichen Materials resultiert (Brayanov & Smith, 2010) - vollständig und abschließend erklärt ist dieses Phänomen aber noch nicht (Buckingham, 2014).

Dass auch erlernte Kenntnisse bezüglich des Gewichts spezifischer Objekte eine Rolle spielen, wiesen Ellis und Lederman (1998) nach. In ihren Versuchen wurden Übungsgolfbälle, die normalerweise leichter sind, so manipuliert, dass ihr Gewicht dem echter Golfbälle entsprach. Erfahrene Sportgolfer berichteten daraufhin, dass sie die Übungsgolfbälle im Vergleich zu den echten Bällen als schwerer empfanden. Nicht-Golfer nahmen dagegen keinen Unterschied zwischen den Gewichten der Bälle wahr (Ellis & Lederman, 1998). Eine weitere ungewöhnliche Illusion soll an dieser Stelle kurz erwähnt werden: Bei der Farb-Gewichts-Illusion wurde untersucht, ob die Farbe eines Objekts einen Einfluss auf die scheinbare Schwere hat. Es zeigte sich, dass schwarze und rote Objekte von den Teilnehmenden als scheinbar schwerer beurteilt wurden als gelbe oder blaue Objekte (De Camp, 1917).

In Experimenten zu gewichtsbezogenen Illusionen wurden die Versuchspersonen einerseits dazu aufgefordert, ihre Gewichtsempfindungen z.B. durch Zahlenangaben auszudrücken, um quantitative Daten zur Täuschung der Perzeption zu erhalten (Baugh et al., 2012; Buckingham et al., 2009). Andererseits ist der Krafteinsatz beim Fassen und Heben der dargebotenen Objekte aufschlussreich (Flanagan & Beltzner, 2000). Dieser Krafteinsatz wird im Allgemeinen präzise und vorausschauend anhand der erwarteten Masse geplant, um einen möglichst

flüssigen Bewegungsablauf zu gewährleisten (Nowak et al., 2013). Die Erwartung setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen. Visuelle Hinweise, wie Größe, Form und Material, spielen eine Rolle, aber auch bestehende Erfahrungen mit diesem oder ähnlichen Gegenständen fließen in die Kraftplanung mit ein (Gordon et al., 1990; Johansson & Westling, 1988). Erfahrungen, die anhand der Größe und des Gewichts ähnlicher Gegenstände gemacht wurden, werden für die Planung des Krafteinsatzes beim Hantieren mit neuen Objekten verwendet. Mutmaßlich schwere Objekte werden daher von vornherein mit mehr Kraft gefasst und gehoben als vermeintlich leichte Objekte.

Demzufolge werden bei der Größe-Gewichts-Illusion (SWI) die alltagsübliche Erfahrung mit kleinen Gegenständen auf andere, dem Ursprungsgegenstand zwar ähnliche, aber größere Objekte übertragen und die Kräfte ins mutmaßlich richtige Verhältnis gesetzt (Buckingham, 2014). Dies führt dazu, dass die kleinen Objekte initial mit weniger Kraft gegriffen und angehoben werden als die gleich schweren, größeren Objekte (Flanagan & Beltzner, 2000). Die Diskrepanz zwischen Erwartung und aktueller Erfahrung spiegelt sich gemäß den Experimenten dieser Wissenschaftler in der verbalen Rückmeldung der Versuchspersonen wider: Sie haben den Eindruck, dass entgegen der ursprünglichen Erwartung das kleinere Objekt mehr wiegen würde als das größere Objekt. Ähnliches gilt für die MWI: Mit Styropor umkleidete und daher vermeintlich leichte Würfel wurden von den Versuchspersonen initial mit weniger Kraft gefasst und gehoben als gleich schwere und gleich große metallverkleidete Würfel und dann als vergleichsweise schwer beurteilt (Baugh et al., 2012; Buckingham et al., 2009). Nach mehrmaligem Heben passten sich die Griff- und Hubkräfte aber an das tatsächliche identische Gewicht der Objekte an und wurden nicht mehr durch das Material beeinflusst, obwohl die Kunststoffwürfel den Versuchspersonen weiterhin schwerer erschienen. Es kam also zu einer Dissoziation zwischen Perzeption und Aktion, da die Sinnestäuschung nach mehrfachem Heben weiterhin empfunden wurde, obwohl sich der Krafteinsatz inzwischen an die tatsächliche Masse der Objekte angepasst hatte. Ein analoges Ergebnis zeigten Versuche zur SWI (Flanagan & Beltzner, 2000). Die Griff- und Hubkräfte der Finger passten sich auch hier nach wenigen Aktionen an das reale Gewicht der Gegenstände an, aber die Illusion blieb weiterhin bestehen: Das kleine Objekt sei schwerer als das große Objekt, so berichteten die Teilnehmenden.

Die SWI und MWI entstehen vor allem durch visuelle Hinweise (Größe, Material), die zur Erwartung von Gewichtsunterschieden zwischen den Gegenständen führen. Im Gegensatz dazu wird die Temperatur-Gewichts-Illusion (TGI) nicht durch visuelle Eindrücke, wie Größe oder Materialbeschaffenheit, sondern durch kutane Sinnesreize vermittelt: nämlich durch die gespürte Temperatur. Bislang ist nicht bekannt, ob bereits eine leichte Berührung kalter Objekte ausreicht, um eine TGI auszulösen, etwa dadurch, dass Kälte mit schwerem Material

assoziiert wird. Der Druck kalter Gegenstände, die mit ihrem vollen Gewicht auf der Handfläche ruhen, sollte jedoch gemäß einer Vorstudie zur Illusion vermeintlicher Schwere und damit zur TGI führen (Kuhntz-Buschbeck & Hagenkamp, 2020). Ferner ist nicht bekannt, wie die Schwere der temperierten Objekte jeweils nach dem Fassen und Heben beurteilt wird, denn in der genannten Vorarbeit wurden Perzeption und Aktion in getrennten Experimenten untersucht. Schließlich ist offen, ob die TGI in Abhängigkeit von der Kälte der Gegenstände verschieden stark ausgeprägt ist. Diese drei Punkte sollen in der vorliegenden Arbeit geklärt werden.

1.2 Temperaturempfinden und epikritische Sensibilität

Weil sich diese Arbeit mit dem Einfluss der Temperatur auf die Gewichtswahrnehmung beschäftigt, sollen das Temperaturempfinden der Haut und die epikritische Sensibilität näher beleuchtet werden. Temperatur- und Schmerzempfindungen gehören, wie auch die grobe Mechanorezeption, zur protopathischen Sensibilität. Thermorezeptoren sind in der Dermis der Haut gelegene freie Nervenendigungen mit temperaturempfindlichen Kationenkanälen. Es gibt mehr Kalt- als Warmrezeptoren. Ihr Verhältnis liegt bei ungefähr 10:1 und die Rezeptoren sind unterschiedlich dicht im menschlichen Körper verteilt. Die dichteste Verteilung an Sensoren in der Haut findet sich im Gesicht; weniger dicht liegen die Sensoren an Bauch und Rücken. Kaltrezeptoren werden überwiegend von A δ -Nervenfasern, Warmrezeptoren von unmyelinisierten C-Fasern versorgt (Meßlinger, 2019). Molekularbiologisch betrachtet sind die Zellmembranen der Thermorezeptoren mit unterschiedlichen Ionenkanälen ausgestattet: kälteaktivierbare Kanäle sind TRPM8 und TRPA1. Diese reagieren sowohl auf Kälte als auch auf chemische Stoffe wie z.B. Menthol, das einen kühlen Effekt vermittelt, obwohl die Substanz selbst nicht kalt ist. Hitzeaktivierbare Kanäle sind TRPV1 und TRPV2, wobei auch diese nicht nur auf Wärme, sondern auch auf chemische Stoffe wie Capsaicin und Ethanol reagieren. Charakteristisch sind die ausgeprägte Adaptation und das Proportional-Differential-Verhalten der Thermorezeptoren, d.h. sie reagieren bei Temperaturänderung mit einer kurzen phasischen Entladung, gefolgt von einer langandauernden tonischen Aktivität. Webers klassischer Drei-Schalen-Versuch verdeutlicht, dass man vor allem die Änderung der Temperatur spürt (Weber, 1846): Taucht man gleichzeitig die linke Hand in warmes Wasser (z.B. 38 °C) und die rechte Hand in deutlich kühleres Wasser (z.B. 26 °C), so wird nach kurzer Zeit der Temperaturunterschied nicht mehr so stark wahrgenommen, weil die Thermorezeptoren adaptieren. Werden beide Hände danach gemeinsam in eine Schale mit einer Wassertemperatur von 33°C (Indifferenztemperatur) getaucht, so meldet die linke Hand den Temperaturabfall, während die rechte Hand die Erwärmung spürt. Kortikal kommt es zu einer Diskrepanz der Sinneseindrücke, sodass man sich nicht festlegen kann, welche

Temperatur das Wasser in der gemeinsamen Schale hat. Über die beschriebenen A δ - und C-Fasern verlaufen die Temperaturrefferenzen zum Rückenmark, werden im Hinterhorn der grauen Substanz synaptisch umgeschaltet und gelangen über das anterolaterale System, auch als Vorderseitenstränge bekannt, zum Thalamus und von dort nach weiterer synaptischer Verschaltung zum somatosensorischen Kortex und anderen Arealen (Trepel, 2021).

Als epikritische Sensibilität werden Körperempfindungen zusammengefasst, die der diskriminatorischen Wahrnehmung von Berührung, Druck und Vibration dienen. Auch die bewusste Propriozeption, die Wahrnehmung der Stellung und Bewegung des eigenen Körpers im Raum, zählt zur epikritischen Sensibilität (Meßlinger, 2019). Als Mechanosensoren sind hier insbesondere die Merkelzellen, die Vater-Pacini-, die Ruffini- und die Meissner-Körperchen zu nennen. Auch die Haarfollikelrezeptoren vermitteln Berührungsempfindungen. Für die Propriozeption sind die Muskelspindeln, Golgi-Sehnenorgane und Mechanosensoren der Gelenkkapseln von großer Bedeutung (Trepel, 2021). Sie vermitteln den Kraft-, Stellungs- und Bewegungssinn. Die Afferenzen der epikritischen Sensibilität werden über die Hinterstrangbahnen vermittelt und erreichen nach mehrmaliger synaptischer Verschaltung (in Hinterstrangkernen und Thalamus) den Kortex.

Die protopathische Sensibilität (Schmerz- und Temperaturempfinden) und die epikritische Sensibilität werden mithin über voneinander getrennte Rezeptoren und neuroanatomische Bahnsysteme an das Zentralnervensystem vermittelt und dort auch prinzipiell getrennt verarbeitet, sodass sie als zwei unabhängige Systeme erscheinen (Trepel, 2021). Dennoch scheint es so, als würde es bei der TGI eine Interaktion dieser beiden Entitäten geben, da Kälte den Eindruck einer scheinbaren Schwere vermittelt und dem Gehirn so eine Information vortäuscht, die eigentlich durch kutane Mechanosensoren und propriozeptive Afferenzen erfasst und vermittelt werden sollte. Damit ist eine Untersuchung der TGI und ihrer zugrundeliegenden Mechanismen auch aus neuroanatomischer Sicht interessant.

1.3 Fragestellung

Diese Arbeit untersucht, ob eine Temperatur-Gewichts-Illusion (TGI) auch dann auftritt, wenn die Temperatur eines kalten Objekts nur durch leichte Berührung wahrgenommen wird, ohne dass der Gegenstand wesentlichen Druck auf die Haut ausübt. Sollte dies der Fall sein, so könnte die Illusion bereits durch die Assoziation von Kälte mit schwerem Material ausgelöst werden, ohne dass Afferenzen der Mechanosensoren eine bedeutende Rolle spielen. Unterschiedlich temperierte Gewichte gleicher Masse (700 g) werden in einem Versuch („Spüren“) so dargeboten, dass die Teilnehmenden das Objekt mit ihrer nicht-dominanten Hand lediglich leicht berühren, um die Temperatur wahrzunehmen, bevor sie es mit ihrer

dominanten Hand greifen und anheben. In einem weiteren Experiment („Halten“) werden die temperierten Objekte mit ihrem ganzen Gewicht auf die geöffnete, nicht-dominante Hand gesetzt und dann mit der dominanten Hand gefasst und angehoben, so wie es in einer Vorstudie erfolgte (Kuhnz-Buschbeck & Hagenkamp, 2020). In beiden Experimenten wird die Stärke der Illusion jeweils nach dem Anheben mittels numerischer Einschätzungen der perzipierten Schwere quantifiziert. Außerdem wird geprüft, ob die TGI nicht nur die Perzeption, also die „gefühlte Schwere“ temperierter Testgewichte, sondern auch die Motorik beeinflusst: nämlich den Krafteinsatz beim Greifen und Heben dieser Gewichte.

Im Gegensatz zu früheren Arbeiten (Stevens & Green, 1978; Stevens, 1979; Stevens & Hooper, 1982) werden in dieser Arbeit nur Temperaturen genutzt, die nicht schmerzhaft sind. Drei Temperaturabstufungen der Testobjekte werden verwendet, und zwar kalt (16 °C), kühl (24 °C), und neutral (32 °C). Die neutrale Temperatur entspricht etwa der Hauttemperatur und wird als lauwarm empfunden (Indifferenztemperatur).

Folgende Fragen werden bearbeitet:

- Ist eine Temperatur-Gewichts-Illusion (TGI) mit kalten, kühlen und lauwarmen (neutralen) Gewichten an der Handfläche der nicht-dominanten Hand mittels numerischer Beurteilungen der perzipierten Schwere der Objekte nachweisbar?
- Beeinflusst die TGI den Krafteinsatz der dominanten Hand beim Greifen und Heben dieser Gewichte, wenn die nicht-dominante Hand lediglich deren Temperatur spürt?
- Beeinflusst die TGI den Krafteinsatz, wenn die nicht-dominante Hand zusätzlich zur Temperatur auch die Masse der Gewichte als Druck auf die Haut verspürt?
- Ist die Perzeption der Schwere davon abhängig, ob nur die Temperatur oder ob Temperatur *und* Druck der Gewichte auf die Haut spürbar sind?
- Gibt es einen abgestuften Effekt der Kälte auf die Illusion?
- Ist eine TGI nur vorübergehend, oder bleibt sie auch dann nachweisbar, wenn temperierte Gewichte gleicher Masse mehrmals nacheinander angeboten werden?

2 Methoden

Es folgt zunächst ein Überblick über die Methodik, während die Einzelheiten im Folgenden erläutert werden. Die Experimente zur Temperatur-Gewichts-Illusion (TGI) wurden mit 20 gesunden Versuchspersonen durchgeführt. Verwendet wurden Testgewichte von 700 g Masse, deren Temperaturen 16 °C (kalt), 24 °C (kühl) und 32 °C (neutral, etwa der Hauttemperatur entsprechend) betrugen. Als Distraktoren dienten Gewichte anderer Masse. Die Versuche gliederten sich in drei Abschnitte:

Experiment 1 („Spüren“): Die Testgewichte (bzw. Distraktoren) wurden mit der Handfläche der nicht-dominanten Hand nur leicht von unten berührt, um ihre Temperatur zu spüren. Dann wurden sie mit Daumen und Zeigefinger der anderen (dominanten) Hand gefasst, angehoben, kurz in der Luft gehalten und wieder abgesetzt. Danach beurteilte die Versuchsperson die subjektiv gespürte Schwere des jeweiligen Gewichtes durch eine frei wählbare Zahlenangabe. Die Griff- und Hubkräfte der Finger wurden gemessen. In einer Serie wurden 48 solche Einzelversuche („Trials“) durchgeführt.

Sensorische Testung: Nach dem ersten Experiment wurden die thermischen Empfindungs- und Schmerzschwellen der Hand, also die Temperaturempfindlichkeit, mittels quantitativer sensorischer Testung geprüft (Rolke et al., 2006). Außerdem wurde die Hauttemperatur der Handfläche gemessen.

Experiment 2 („Halten“): Nun wurden die Testgewichte (bzw. Distraktoren) direkt auf die Handfläche der nicht-dominanten Hand gesetzt, sodass die Versuchsperson jeweils die Temperatur und den Druck des Gewichtes auf der Haut spürte. Darüber hinaus war der Ablauf so wie in Experiment 1. Es wurde erneut eine Serie von 48 Greif-Hebeversuchen durchgeführt und nach jedem Trial die Schwere des jeweiligen Gewichtes mit einer Zahl bewertet.

Die Experimente fanden in zwei nicht-klimatisierten Labors des Physiologischen Instituts der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel statt. Um Störungen auf ein Mindestmaß zu reduzieren, befanden sich im Raum lediglich die Versuchsperson, die Versuchsleiterin und eine Hilfsperson. Nach Abschluss aller Versuche wurde den Versuchspersonen das klassische Silbertaler-Phänomen demonstriert: Auf die Stirn des nach hinten geneigten Kopfes wurde den Teilnehmenden zuerst eine handwarme, danach eine kalte Silbermünze gelegt - mit der Frage, welche der beiden Münzen schwerer sei. Insgesamt dauerten die Versuche etwa zwei Stunden.

2.1 Versuchspersonen

Das Probandenkollektiv bestand aus insgesamt 20 Personen, zusammengesetzt aus 15 Frauen und 5 Männern im Alter von 20 bis 31 Jahren ($24,5 \pm 2,95$ Jahre; Mittelwert und Standardabweichung). Die Teilnehmenden stammten entweder aus dem Bekanntenkreis der Versuchsleiterin oder sie waren zum Zeitpunkt der Versuchsreihe Studierende der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. Alle Teilnehmenden wurden zu Beginn in mündlicher und schriftlicher Form aufgeklärt, unterzeichneten eine Einverständniserklärung und füllten einen Fragebogen aus. Dieser diente der Feststellung möglicher Ausschlusskriterien, gefragt wurde unter anderem nach Erkrankungen, Medikamenteneinnahme und dem aktuellen Gesundheitszustand. Erkrankungen des Nervensystems, z.B. Neuropathien, Sensibilitätsstörungen und auch das Raynaud-Syndrom waren Ausschlusskriterien, da eine intakte Hautsensibilität, Weiterleitung und Verarbeitung der Sinnesreize eine entscheidende Rolle einnahmen. Die Fragebögen wurden gemäß den Datenschutzrichtlinien behandelt und die medizinischen Angaben sind nicht in die Datenauswertung eingeflossen. Lediglich das Alter und das Geschlecht der Versuchsteilnehmer wurden pseudonymisiert ausgewertet. Die Ethikkommission der Christian-Albrechts-Universität war über die geplanten Versuche verständigt worden und hatte keine Einwände erhoben (Aktenzeichen D442/19). Die zuständige Datenschutzbeauftragte wurde ebenfalls informiert. Alle Versuchsteilnehmenden waren naiv in Bezug auf die TGI und wurden erst am Ende des Experiments darüber in Kenntnis gesetzt, indem ihnen das oben beschriebene Silbertaler-Phänomen demonstriert und erläutert wurde.

2.1.1 Bestimmung der Händigkeit

Vor Beginn der Versuche wurde die Händigkeit der Teilnehmenden erfragt, weil die dominante und die nicht-dominante Hand jeweils verschiedene Aufgaben hatten. Dazu wurde der Händigkeitsfragebogen von Marian Annett hinzugezogen (Annett, 1970). Dieser Fragebogen enthält 20 Aufforderungen (z.B. „Zeige mir, wie Du den Ball wirfst / die Zahnbürste beim Zähneputzen hältst / schreibst.“), welche die Teilnehmenden beantworteten (siehe Anhang). Dabei mussten die ersten sechs Fragen zwingend beantwortet werden, die restlichen waren optional bei genügender Mitarbeit seitens der Probanden oder bei nicht eindeutigem Ergebnis. Wurde eine Tätigkeit immer mit einer bestimmten Hand ausgeführt, wurden dafür zwei Punkte vermerkt. Wurde eine Tätigkeit meistens mit einer bestimmten Hand ausgeführt, gab es dafür einen Punkt. Falls die ersten sechs Aufgaben immer mit derselben Seite ausgeführt wurden, galt diese Seite als dominant. Unterschieden sich die Antworten, wurde am Ende ein

Lateralitätsquotient ermittelt (Oldfield, 1971). Insgesamt haben 18 rechts- und zwei linkshändige Personen an der Studie teilgenommen.

2.2 Versuchsumgebung und Aufbau

Die Teilnehmenden saßen an einem gepolsterten Tisch auf einem höhenverstellbaren Hocker. Dieser wurde so eingestellt, dass die Versuchsperson bequem sitzen und dabei die Unterarme und Hände auf den Tisch legen konnte. Ihr gegenüber saß die Versuchsleiterin. Hinter Vorhängen verborgen befand sich eine Hilfsperson, die der Versuchsleiterin die passenden Testgewichte zureichte. Ebenfalls hinter den Vorhängen verborgen waren drei kleine Kühl- und Wärmeschränke (Pearl-Xcase Thermobox), in denen diese Gewichte erwärmt bzw. gekühlt wurden. Die gewünschten Temperaturen wurden durch Sonden digitaler Thermometer in den Thermoboxen (Arceli Digital LCD Thermometer) ständig überwacht.

Das Testobjekt, mit dem hantiert wurde, war aus mehreren Teilen zusammengesetzt (Abb. 1): einem Griff (Gewicht 100 g) mit zwei Kraftsensoren und einem Akzelerometer, einem Deckel, bestehend aus einem starken Magneten in einem Zylinder aus Kunststoff (275 g), und mit einem auswechselbaren temperierten Testgewicht. Dieses bestand aus einer runden Bodenplatte aus Kunststoff (Durchmesser 12,5 cm), die mit einem zylindrischen Fuß versehen war, welcher mit einem Aluminiumboden abschloss (Durchmesser 7 cm). Dessen Oberfläche war glatt und leicht gewölbt, um der Anatomie der Handfläche besser angepasst zu sein. Der Griff mit dem Akzelerometer und den Kraftsensoren für Daumen und Zeigefinger wurde mittels eines Bajonettverschlusses an den magnetischen Deckel angeflanscht.

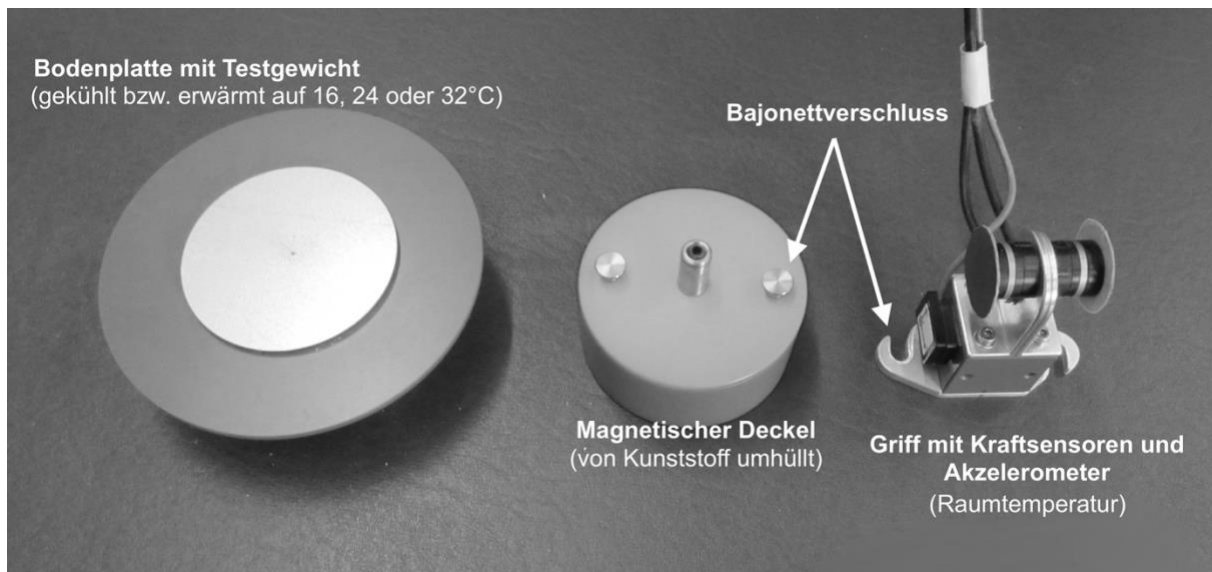


Abb. 1 : Aufbau eines Testobjekts

Im Inneren eines Kunststoffzylinders, der den Deckel darstellt, befindet sich ein starker Magnet. Mittels Magnetkraft wird eine Bodenplatte aus Kunststoff und Metall, die das temperierte Testgewicht bildet, an den Deckel befestigt. Ein Griff, an dem zwei Kraftsensoren und ein Akzelerometer angebracht sind, wird mit einem Bajonettverschluss an dem magnetischen Deckel befestigt. Alle Teile zusammen wiegen 700 g.

In den Kühl- und Wärmeschränken wurden die Testgewichte auf Temperaturen von 16 °C, 24 °C oder 32 °C gebracht. Sie konnten während der Versuchsserie leicht ausgewechselt und an den zylindrischen Magneten (Deckel) befestigt werden, da mittig auf der Oberseite der Bodenplatte ein rundes Eisenblech angebracht war (Abb. 2). Durch Ausbohrungen an verdeckter Stelle waren die Testgewichte so gestaltet, dass die Masse aller drei Teile des Objektes (Griff mit Kraftsensoren, Magnet, Testgewicht mit Aluminiumboden) insgesamt 700 g betrug. Neben den Testobjekten wurden als Distraktoren auch Scheingewichte („Dummys“) verwendet, die 600, 700 oder 800 g wogen. Diese waren so aufgebaut wie die Testgewichte, allerdings bestand der Boden der leichten Dummys (600 g) aus Teflon und nicht aus Aluminium. Diese Distraktoren sorgten dafür, dass die Teilnehmenden außer den handwarmen, kühlen und kalten Testgewichten stets gleicher Masse (700 g) manchmal auch tatsächlich deutlich leichtere oder schwerere Gewichte hoben. Damit wurde der Versuch abwechslungsreicher und es war offenkundig, dass nicht stets Gewichte gleicher Masse dargereicht wurden. Den Teilnehmenden wurde eingangs auch mitgeteilt, dass sie mit Objekten verschiedener Masse und verschiedener Temperatur hantieren würden.

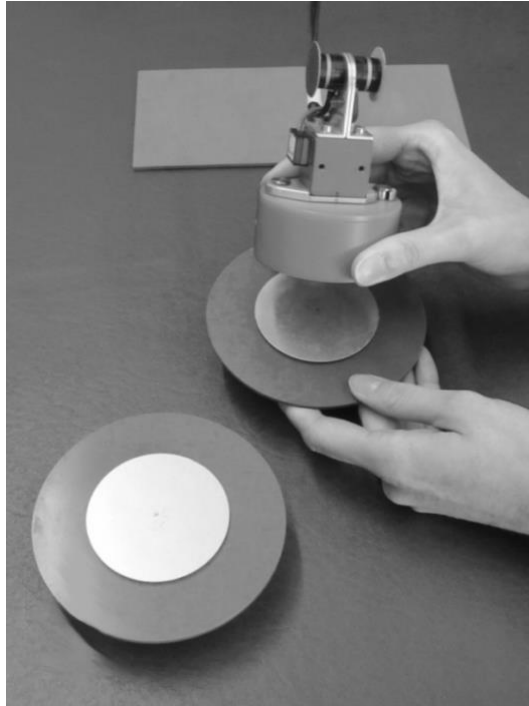


Abb. 2 : Auswechseln des Testgewichtes

Auf das Testgewicht (Bodenplatte aus Kunststoff und Metall) war ein rundes Eisenblech geklebt, das am Kunststoffzylinder mit dem Magneten (Deckel) haftete. So war ein rasches und unkompliziertes Auswechseln der Testgewichte, die verschiedene Temperaturen hatten, während der Versuche möglich. Alle Testgewichte waren identisch aufgebaut.

Die Versuchspersonen sollten möglichst naiv bleiben und das Austauschen der Testgewichte nicht beobachten. Daher trugen sie während der Versuche eine Shutter-Brille, welche die Sicht erst kurz vor und während der Greif-Hebeaktionen freigab (PLATO Goggle, Translucent Technology, Kanada). Dies verhinderte eine Gewichtsinterpretation auf Basis visueller Wahrnehmungen während des Wechsels der Gewichte. Die Gläser der Shutter-Brille enthalten ein flüssiges kristallines Medium, dessen Kristalle in einem elektrischen Feld ihre Ausrichtung verändern. Erhält die Brille keine Spannung (0 V) sind die Gläser milchig-trüb und die Testperson kann bis auf Helligkeitsveränderungen nichts sehen. Ändert sich die Spannung auf 5 V, verändern die Kristalle ihre Ausrichtung und die Gläser werden durchsichtig. Die Sicht wurde computergesteuert jeweils 1,5 s vor dem Fassen und Heben des Testgewichtes freigegeben (Abb. 3, 4) und einige Sekunden später, beim Absetzen des Gewichtes, wieder verdeckt. Die Gläser waren wieder milchig-trüb, während das Testgewicht ausgewechselt wurde.

Vor dem Versuch säuberten sich die Versuchspersonen die Finger mit einem alkoholischen Desinfektionstupfer, damit die Messungen nicht durch veränderte Reibung in Folge von Schweiß, Handcreme o.Ä. beeinflusst wurden. Der Griff mit den Kraftsensoren und der magnetische Deckel hatten stets Raumtemperatur, sodass die fassenden Finger beim Greifen und Anheben der Gewichte keinen wechselnden Temperaturen ausgesetzt waren. Nur die an

den Magneten befestigten Testgewichte, also die Bodenplatten mit den Aluminiumböden, waren temperiert und kamen in Kontakt mit der Handfläche der nicht-dominanten Hand.

2.3 Zahleneinschätzung

Unmittelbar nach jeder Greif-Hebeaktion teilten die Teilnehmenden der Versuchsleiterin durch Nennen einer Zahl auf einer individuellen numerischen Skala (im mehrstelligen Bereich) mit, wie schwer sie das gerade gehobene Gewicht empfunden hatten. Von Interesse war der Gewichtseindruck, Aufgabe war nicht zu schätzen, wie viel Gramm das gehobene Gewicht wog oder wie groß der Gewichtsunterschied zum vorherigen Gewicht war. Die Zahlenangabe sollte den gesamten Eindruck aller bisher gehobenen Gewichte berücksichtigen, nicht nur explizit das zuletzt gehobene Gewicht. Die Skala durfte von den Versuchspersonen frei gewählt werden, es gab keine Begrenzung nach oben, sodass auch Zahlen über 100 genannt werden durften, und auch die Zahlensprünge konnten frei gewählt werden. Die Zahl sollte lediglich größer sein, wenn das Gewicht als schwerer empfunden wurde bzw. kleiner sein, wenn es als leichter empfunden wurde als die anderen Gewichte. Die von den Versuchspersonen im ersten Experiment („Spüren“) benutzte Skala durfte im dritten Experiment („Halten“) erneut verwendet werden, aber auch der Wechsel zu einer anderen individuellen Skala war zulässig. Die geäußerten Zahlenwerte wurden mittels eines Aufnahmegeräts (Sony, Modell ICD-PX240) erfasst, die Auswertung dieser erfolgte zu einem späteren Zeitpunkt im Programm Microsoft Excel. Zum besseren Verständnis zeigt Tabelle 1 einen Auszug der genannten Zahlen zweier Testpersonen.

	Proband X	Proband R
Dummy 600 g	40	10
Dummy 800 g	55	20
Dummy 700 g	55	15
Kalt	55	14
Kühl	60	11
Handwarm	55	17
Kühl	60	15

Tabelle 1 : Zahlenangaben zweier Probanden in Experiment 1 („Spüren“)

Beispielhaft aufgelistet sind die Zahlenangaben zur Gewichtseinschätzung zweier unterschiedlicher Testpersonen (X und R) bei gleicher Abfolge der Testgewichte, nämlich hier gemäß der Variation 3. Die Zahlen wurden von den Testpersonen nach eigenem Empfinden festgelegt. Die Angaben zur Schwereempfindung sind ohne Einheit, sollen also nicht die Masse oder den Gewichtsunterschied in Gramm schätzen.

2.4 Greifen: Einfluss der Temperatur-Gewichts-Illusion auf die Motorik

Es wurde untersucht, welchen Einfluss die Temperatur der Testgewichte auf den Krafteinsatz beim Greifen und Heben der Objekte hatte. Gemessen wurden die Griff- und Hubkräfte von Daumen und Zeigefinger, da der Testgegenstand nur mit diesen beiden Fingern der dominanten Hand gefasst und angehoben wurde. An dem Griff des Objektes waren ein Akzelerometer (Noraxon® 3D 317 A) und zwei Kraftsensoren angebracht (Abb. 3). Es handelte sich um zwei Kraft-Drehmoment-Sensoren (Typ FT Nano 25, ATI Industrial Automation, Garner, NC, USA). Diese maßen die zwischen Daumen und Zeigefinger ausgeübte Griffkraft sowie die vertikal ausgerichtete Hubkraft, während das Akzelerometer die Bewegungen des Testobjektes erfasste. Um eine gute Haftreibung zu ermöglichen und ein versehentliches Abrutschen der Finger beim Anheben des Testgewichts zu vermeiden, waren die Griffflächen der Kraftsensoren mit Sandpapier (Körnung 240) überzogen. Die Analogsignale des Akzelerometers und dessen Kraftsensoren wurden über an einem Kranarm aufgehängte Kabel an Verstärker (Noraxon® MyoSystem 1400L und Schunk Force-Torque System Controller) geleitet und an ein ADInstruments Powerlab 8/30 Datenerfassungssystem weitergegeben. Mit einer zeitlichen Auflösung von 1000 Hz wurden die Analogsignale digitalisiert und über einen USB-Anschluss an einen Computer gesendet, auf welchem die Software zur Datenregistrierung und -analyse lief (LabChart 7 Software, ADI Instruments, Oxford, UK). Die Kraft- und Beschleunigungskurven wurden nach den Versuchen „off-line“ ausgewertet, d.h. die Auswertung erfolgte zu einem späteren Zeitpunkt unabhängig von der Versuchsdurchführung und den Teilnehmenden.

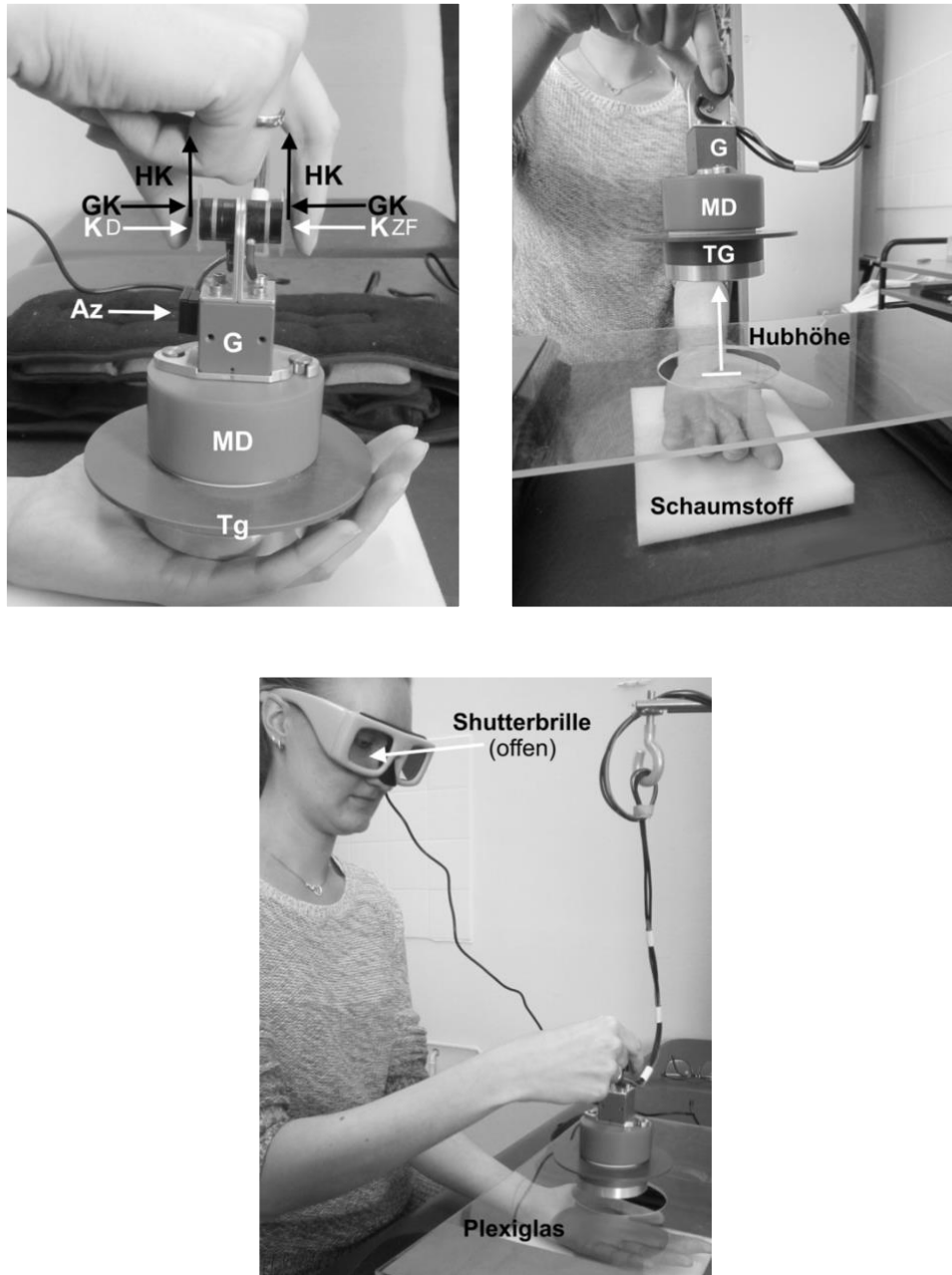


Abb. 3 : Messung und Ablauf der Greif- und Hebeaktionen

Oben links: Das temperierte Testgewicht (Tg) ist an den magnetischen Deckel (MD) befestigt, an dem der Griff (G) angeflanscht ist. An diesem sind Akzelerometer (Az) und Kraftsensoren zur Messung der Kräfte von Daumen (KD) und Zeigefinger (KZF) befestigt. GK: Griffkraft; HK: Hubkraft. Momentaufnahme aus Experiment 2 („Halten“), in dem das Objekt direkt auf die Handfläche gestellt wurde. Der Aluminiumboden des Testgewichts ist in Kontakt mit der Haut.

Oben rechts: Aufnahme aus Experiment 1 („Spüren“). Das Testobjekt wurde hier durch die Plexiglasplatte gehalten und sein Aluminiumboden nur leicht von unten mit der nicht-dominanten Hand berührt. Der Handrücken dieser Hand lag auf einem Schaumstoffkissen. Auf ein akustisches Signal hin wurde das Objekt mit Daumen und Zeigefinger der dominanten Hand gefasst und angehoben. Der Pfeil markiert die Hubhöhe. Diese wurde den Versuchspersonen mittels eines Schaubilds verdeutlicht, das hier, aufgrund der Übersichtlichkeit, nicht abgebildet ist.

Unten: Nur kurz vor und während der Greif-Hebeaktion gab eine Shutter-Brille die Sicht auf die Hände und das Testobjekt frei. Momentaufnahme aus Experiment 1 („Spüren“).

Wie zu Beginn dieses Kapitels erwähnt, wurden zwei Serien mit je 48 Greif-Hebeaktionen durchgeführt. In der ersten Serie (Experiment 1: „Spüren“) wurden die Testobjekte mit der Handfläche nur leicht von unten berührt, denn ihr Gewicht wurde von einer Plexiglasplatte gehalten, auf der die Bodenplatte ruhte (Abb. 3 rechts oben und unten Mitte). Deren zylindrischer Fuß mit dem temperierten Aluminiumboden passte durch eine kreisrunde Aussparung der Plexiglasplatte. Anhand des Akzelerometersignals ließ sich beobachten, ob die Teilnehmenden das Testgewicht wie gewünscht nur leicht berührten, ohne es zu bewegen oder anzuheben. Für die spätere Serie (Experiment 2: „Halten“) wurde die Plexiglasplatte entfernt und die Testobjekte wurden den Versuchspersonen direkt auf die Handfläche der nicht-dominanten Hand gesetzt, sodass sowohl die Temperatur des Aluminiumbodens als auch der volle Druck des Gewichts fühlbar waren (Abb. 3 links oben). Diese Hand ruhte dabei mit dem Handrücken auf einem Schaumstoffkissen, sodass das Testobjekt passiv gehalten wurde (Abb. 4). Es wurde also aufgesetzt, aber nicht aktiv angehoben oder bewegt, denn dies hätte durch propriozeptive Informationen einen unerwünschten Einfluss auf das Gewichtsempfinden und die Kraftsteuerung haben können (Parikh & Cole, 2011). In der zweiten Serie von 48 Greif-Hebeaktionen („Halten“) durften die Teilnehmenden ihre numerische Skala aus dem ersten Experiment von Neuem verwenden oder eine andere benutzen. Es galt herauszufinden, ob sich das Gewichtsempfinden veränderte, wenn außer der Temperatur auch der Druck des Testgewichts auf die Handfläche spürbar war und ob dies Einfluss auf die Motorik der greifenden Finger hatte (Abb. 4).



Abb. 4 : Darstellung Greif- und Hebeaktion in Experiment 2 („Halten“)

Das Testgewicht wurde hier direkt auf die nicht-dominante Hand platziert. Diese lag auf einem Schaumstoffkissen, um Inkongruenzen zwischen Handrücken und gepolstertem Tisch auszugleichen. Beim entsprechenden Signalton gab die Shutter-Brille die Sicht frei, die Kraftsensoren wurden mit Daumen und Zeigefinger der dominanten Hand gefasst und das Testobjekt angehoben. Die Hubhöhe betrug etwa 10 bis 15 cm und wurde mittels eines Schaubilds verdeutlicht, das hier nicht abgebildet ist.

In beiden Experimenten (1 = „Spüren“, 2 = „Halten“) wurde das Testobjekt jeweils 48-mal mit der dominanten Hand gefasst, gehoben, gehalten und wieder abgesetzt und losgelassen. Eine Tonfolge, die mit der Software „Audacity“ erstellt worden war, bestimmte das Tempo jeder einzelnen Aktion. Sie begann mit einem 13 Sekunden langen weißen Rauschen, an dessen Ende die Versuchsleiterin das Objekt in den Halter (Plexiglasplatte) bzw. auf die Hand der Versuchsperson setzte. Es folgte ein 5,5 Sekunden langer Dauerton (Frequenz 392 Hertz), derweil die Versuchsperson die Temperatur des Testgewichtes mit der Handfläche der nicht-dominanten Hand spürte. Die dominante Hand ruhte hierbei bequem auf dem gepolsterten Tisch. Beim nachfolgenden, ansteigenden Ton (392 auf 880 Hz) von 1,5 Sekunden Dauer gab die Shutter-Brille die Sicht frei und die Versuchsperson fasste das Objekt mit Daumen und Zeigefinger der dominanten Hand, um es etwa 10 cm hochzuheben (Abb. 3 und 4). Dies geschah mit einer Armbewegung aus der Schulter heraus, ruhig und gleichmäßig, denn starke Bewegungen des Handgelenkes wären weniger kontrolliert und unruhiger gewesen (Bensmail et al., 2009). Auf der Zielhöhe wurde das Gewicht 4 Sekunden lang gehalten (Dauerton 880 Hz), und in dieser Zeit sollten die Teilnehmer seine Schwere bewusst spüren. Beim folgenden von 880 auf 0 Hz fallenden Ton (Dauer: 2 Sekunden) wurde das Objekt auf einem Schaumstoffquader abgesetzt und losgelassen, die Shutter-Brille schloss, und die Versuchspersonen teilten ihre Gewichtsempfindung durch eine Zahlenangabe mit (siehe Abschnitt 2.3.). Dann folgten wieder 13 Sekunden weißes Rauschen. Die dominante Hand

wurde wieder bequem auf den Tisch gelegt und die Versuchsleiterin befestigte das nächste Testgewicht an den Magneten. Jedes Trial mit Fühlen, Greifen, Heben, Halten, Absetzen und Wechseln des Testgewichtes dauerte insgesamt 26 Sekunden, eine gesamte Serie mit 48 solcher Aktionen etwa 20 Minuten lang.

Der Versuchsablauf wurde den Teilnehmenden initial erklärt und mit Übungsgewichten, die nicht im eigentlichen Experiment benutzt wurden, eingeübt. Die Zielhöhe des Anhebens wurde anhand eines Schaubilds verdeutlicht, das während des gesamten Versuchsablaufes sichtbar blieb. Zwischen Experiment 1 („Spüren“) und Experiment 2 („Halten“) lag eine Pause, in der die sensorische Testung stattfand (siehe Abschnitt 2.5). Die verwendete pseudo-randomisierte Reihenfolge der unterschiedlichen Temperaturen und die Einstreuung von Distraktoren (Dummy-Trials) werden im Abschnitt 2.6 erläutert.

Abbildung 5 zeigt exemplarisch die Verläufe der Kräfte beim dreimaligen Fassen und Anheben eines Testgewichtes (700 g). Die Kraftkurven wurden mit einem triangulären Bartlett-Filter (Fensterbreite 29 Datenpunkte) geglättet und mit der Software LabChart 7 analysiert. Die gesamte Griffkraft wurde als Mittelwert der von Daumen und Zeigefinger auf beide Kraftsensoren ausgeübten Druckkräfte berechnet.

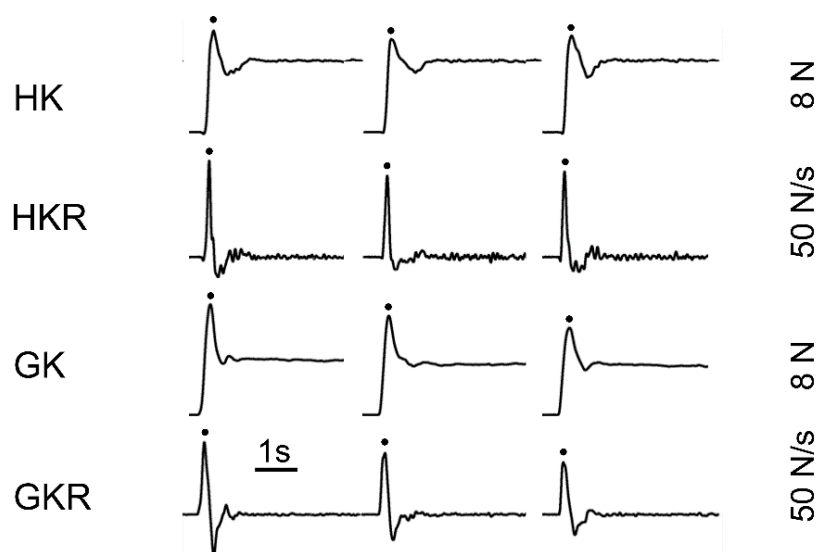


Abb. 5 : Kraftverläufe bei drei Greif-Hebeaktionen.

Exemplarisch dargestellt sind Kurven mit den Maxima der Hubkraft (HK), der Griffkraft (GK) und der Krafraten (HKR, GKR) beim Fassen und Heben eines 700 g schweren Testgewichtes. Die Maxima sind mit Punkten markiert. Als Einheiten werden hier ausnahmsweise Newton [N] für HK und GK, und Newton pro Sekunde [N/s] für die Krafraten HKR und GKR verwendet. Ansonsten wurde in Gramm [g] bzw. Gramm pro Sekunde [g/s] skaliert.

Die Hubkraft war die Summe der vertikal und tangential zu den Griffflächen ausgeübten Kräfte beider Finger. Als Änderungsgeschwindigkeiten (Kraftraten) wurden die ersten Ableitungen der Kraftverläufe berechnet und mit einem Bartlett-Filter (Fensterbreite 13 Datenpunkte) geglättet. Von Interesse waren die maximalen Anstiegsgeschwindigkeiten der Griff- und Hubkräfte, die als Indikator der vorausschauenden Skalierung des Krafteinsatzes gelten (Nowak et al., 2013), da die tatsächliche Masse eines Gegenstandes erst später, nämlich nach dem Hochheben, eindeutig gespürt werden kann. Als abhängige Variablen wurden für jede Aktion die Maxima der Griff- und Hubkräfte (GK, HK; Einheit Gramm [g]) und die Maxima der Griff- und Hubkraftraten bestimmt (GKR, HKR; Einheit Gramm pro Sekunde [g/s]). Diese Einheiten wurden bevorzugt, da die Kraftsensoren zwischen den Experimenten wiederholt durch Auflegen geeichter Messinggewichte mit bekannter Masse justiert wurden.

Weiterhin wurde bestimmt, wann die Kraftmaxima (GK, HK, GKR, HKR), bezogen auf den Beginn der Greifaktion, stattfanden. Dieser Beginn, Zeitpunkt T genannt, wurde als der Moment definiert, an welchem durch die erste Berührung der Kraftsensoren mit den Fingern die Griffkraftrate den Wert von 200 g/s überschritt. Ferner wurden die maximale vertikale Beschleunigung des Gewichts beim Anheben (AKZ, Akzeleration) und zwei Sekunden nach dem Zeitpunkt T die Griffkraft beim statischen Halten (GKH) des Testobjektes bestimmt (Tabelle 2). Jede experimentelle Serie umfasste 48 Greif-Hebeaktionen mit entsprechenden Kraftkurven. Die Variablen wurden mit der Software ADInstruments LabChart 7 und mit programmierten Befehlssequenzen (Makros) aus den Kurven berechnet. Jede Kurve wurde nochmal händisch überprüft, um z.B. Fehler beim Auffinden der Maxima in unruhigen Verläufen zu korrigieren. Die Software stellte die Variablen in einer eigenen Tabelle (DataPad) zusammen. Deren Inhalt wurde in das Programm Microsoft Excel übertragen und weiterverarbeitet. Durch Datensortierung wurde die pseudo-randomisierte Reihenfolge der Versuchsbedingungen berücksichtigt.

Makro	Ermittelte Variable
T	Zeitpunkt der ersten Berührung des Kraftsensors, Beginn des Greifens
GKR	Maximum der Griffkraftänderungsrate [g/s]
GK	Maximum der Griffkraft [g]
GKH	Griffkraft beim Halten des Testgewichts, 2 s nach Zeitpunkt T
HKR	Maximum der Hubkraftänderungsrate [g/s]
HK	Maximum der Hubkraft [g]
AKZ	Maximale Beschleunigung beim Heben [$g = 9,81 \text{ m/s}^2$]

Tabelle 2 : Makros und Kraftvariablen

Mit Befehlssequenzen (Makros) der Software LabChart wurden die Variablen aus den Kraftkurven berechnet. Die Kraftmaxima sind in Gramm [g], die maximalen Krafraten in Gramm pro Sekunde [g/s] angegeben. Die maximale vertikale Beschleunigung AKZ wird als Vielfaches der Erdbeschleunigung [$g=9,81 \text{ m/s}^2$] angegeben. Als zusätzliche Variablen wurden jeweils die Zeitpunkte der Maxima der Kräfte und der Krafraten, bezogen auf den Beginn des Greifens, den Zeitpunkt T, berechnet (hier nicht aufgelistet).

2.5 Quantitative sensorische Testung

Nach der ersten Serie von 48 Greif-Hebe-Aktionen („Spüren“) folgte eine kurze Pause und es wurden in einem anderen Raum die thermischen Empfindungs- und Schmerzschwellen der Teilnehmenden untersucht. Dazu wurde eine computergesteuerte Thermode aus Kupfer verwendet (Firma Bühler, Buchenbach). Sie hatte eine Fläche von 30 x 30 mm und wurde ausgehend von einer Indifferenztemperatur von 32 °C erwärmt oder abgekühlt. Die Thermode enthielt ein Peltier-Element, das für eine Erwärmung oder Abkühlung der Kontaktfläche abhängig von der Richtung des Stromflusses sorgte. Das Gerät war über ein Messsystem (ADInstruments Powerlab 2/25) mit einem Computer verbunden. Die Versuchsleiterin konnte während des gesamten Ablaufs den Temperaturverlauf auf dem Bildschirm verfolgen und diesen später mit Hilfe der Software ADI LabChart 7 analysieren.

Die Versuchspersonen legten den Daumenballen ihrer nicht-dominanten Hand auf die Thermode. In der anderen Hand hielten sie den Antwortschalter. Ausgehend von der Indifferenztemperatur von 32 °C erwärmte oder kühlte das Gerät die Thermode mit einer Geschwindigkeit von 1 °C/s für die Empfindungsschwellen bzw. 1,5 °C/s für die Messung der Schmerzschwellen. Aus Sicherheitsgründen wurden Temperaturen von 0 °C und 52 °C nicht unter- bzw. überschritten. Die Reihenfolge der Tests war bei allen Teilnehmenden gleich: initial Kälte-, dann Wärmewahrnehmung. Danach wurden die Schmerzschwellen für Kälte und für Hitze bestimmt. Um die Schwellen für das Kälte- und Wärmeempfinden zu identifizieren, wurden die Teilnehmenden gebeten, den Antwortknopf zu drücken, sobald sie das erste Mal eine Temperaturveränderung wahrnahmen. Jede Messung wurde dreimal durchgeführt. Direkt

im Anschluss wurden die Schmerzschwellen für Kälte und Wärme ermittelt. Es wurde ausdrücklich darauf hingewiesen, dass das Ziel des Experiments nicht das Aushalten von unangenehmen Temperaturen sei, sondern die Feststellung der Empfindlichkeit. Die Teilnehmenden wurden angehalten den Antwortknopf betätigen, sobald die Temperaturen für sie unangenehm, an der Grenze zum Schmerz, aber noch nicht deutlich schmerzhaft waren. Diese Messungen wurden auch jeweils dreimal durchgeführt. Nach Beendigung der sensorischen Testung wurden mittels der Software LabChart die Mittelwerte der drei Einzelmessungen pro Schwelle ermittelt und notiert. Ferner wurde die Hauttemperatur der Handfläche mit einem Oberflächenthermometer gemessen (Testo Mini, Lenzkirch, Deutschland). Danach folgte das zweite Experiment („Halten“) mit einer weiteren Serie von Greif-Hebe-Aktionen.

2.6 Reihenfolge der Versuchsbedingungen

In jedem Experiment mit jeweils insgesamt 48 Trials mussten die Teilnehmenden die 700 g schweren „echten“ Testobjekte 36-mal greifen und heben, zusätzlich zwölfmal Scheingewichte („Dummys“), die als Distraktoren dienten (Tabelle 3). Nach jeder Aktion bewerteten sie die Schwere des Objektes mit einer Zahlenangabe. Da die Testgewichte drei verschiedene Temperaturen hatten (16 °C kalt, 24 °C kühl, 32 °C neutral/ handwarm), wurde jede Temperatur zwölfmal pro Serie verwendet ($3 \times 12=36$), hierbei gab es sechs mögliche Temperaturabfolgen (kalt – neutral, kühl – neutral, neutral – kalt, neutral – kühl, kühl – kalt, kalt – kühl).

Für das Greifen und Anheben von Gegenständen sind Reihenfolgeeffekte bekannt (Cole et al., 2008). Vorangegangene Handlungen haben Auswirkungen auf darauffolgende Handlungen. Nach mehrmaligem Heben eines schweren Gewichts wird beim darauffolgenden Heben eines Gewichtes, welches unerwartet leicht ist, initial zu viel Kraft eingesetzt. Entsprechendes könnte auch für Gewichte gelten, die auf Grund ihrer kalten Temperatur scheinbar schwer wirken. Um eine systematische Verfälschung der Ergebnisse durch solche Reihenfolgeeffekte zu vermeiden, wurden die unterschiedlich temperierten Testgewichte den Versuchspersonen in pseudo-randomisierten Reihenfolgen dargeboten. Tabelle 3 zeigt beispielhaft eine solche Abfolge für ein Experiment mit 48 Greif-Hebe-Aktionen.

In den Experimenten kamen die sechs möglichen Temperaturabfolgen (siehe oben) insgesamt gleich häufig vor und es folgte niemals die gleiche Temperatur zweimal direkt nacheinander. Während jedes Experiments wurden außer den Testgewichten (700 g) auch viermal Distraktoren in Dreierfolgen präsentiert (siehe D in Tabelle 3; $4 \times 3=12$). In den ersten beiden Trials dieser Dreierfolgen wurden „Dummys“ von 600 g oder 800 g Masse verwendet. Damit

wurde der mögliche Verdacht der kritischen Teilnehmenden zerstreut, dass alle Gewichte gleich schwer sein könnten. Da sich die Masse dieser „Dummys“ deutlich spürbar von jener der Testgewichte unterschied, konnten auch Aufmerksamkeit und Mitarbeit der Personen bei den Zahlenangaben zur Schwereempfindung überprüft werden. Jede Dreierfolge von Distraktoren endete mit einem Gewicht von 700 g Masse (z.B. 600→800→700 g), um im nachfolgenden „Verum-Trial“ mögliche Nacheffekte, bedingt durch einen Massenwechsel, zu vermeiden. Die Distraktoren hatten, ebenso wie die Testobjekte, unterschiedliche Temperaturen – dies wurde nicht in die Auswertung aufgenommen. Es wurden insgesamt drei Variationen pseudo-randomisierter Reihenfolgen verwendet. Von Person zu Person wechselten diese Variationen systematisch, ein Auszug dazu ist in Tabelle 4 dargestellt.

1	D	13	W	25	D	37	K
2	D	14	K	26	D	38	W
3	D	15	Ü	27	D	39	Ü
4	W	16	K	28	W	40	D
5	Ü	17	Ü	29	K	41	D
6	K	18	W	30	Ü	42	D
7	D	19	Ü	31	K	43	Ü
8	D	20	W	32	Ü	44	W
9	D	21	K	33	W	45	K
10	K	22	Ü	34	Ü	46	W
11	W	23	K	35	K	47	Ü
12	Ü	24	W	36	W	48	K

Tabelle 3 : Pseudo-randomisierte Reihenfolge der Testgewichte

Für ein Experiment mit 48 Trials ist die verwendete Folge von Testgewichten und Distraktoren dargestellt (hier Variation Nr. 1). Testgewichte (700 g): W=32 °C handwarm, K=16 °C kalt, Ü=24 °C kühl. Viermal sind kurze Serien von jeweils drei Distraktoren (D) eingeschoben. Die Distraktoren hatten unterschiedliche Massen (600 g, 700 g, 800 g) und Temperaturen.

Experiment:	Experiment 1: „Spüren“	Experiment 2: „Halten“
Versuchsperson Z	Variation 1	Variation 2
Versuchsperson Y	Variation 2	Variation 3
Versuchsperson X	Variation 3	Variation 1
...
Versuchsperson O	Variation 2	Variation 1
Versuchsperson N	Variation 3	Variation 2
Versuchsperson M	Variation 1	Variation 3

Tabelle 4 : Pseudo-randomisierte Reihenfolge Variationen

Drei Variationen pseudo-randomisierter Reihenfolgen der Trials (siehe Beispiel in Tabelle 3) wurden verwendet. Jede Versuchsperson hat im Laufe beider Experimente zwei verschiedene Variationen (Reihenfolgen) durchlaufen. Von Person zu Person wurde deren Auswahl und Abfolge systematisch geändert.

2.7 Datenverarbeitung und Auswertung

Die Auswertung der Daten erfolgte mit den Programmen Microsoft Excel und SPSS (IBM SPSS Statistics Version 23). Für die Quantitative Sensorische Testung wurden die Gruppenmittelwerte (MW) und die Standardfehler der Mittelwerte (SEM) der Schwellen für Wärme- und Kälteempfinden bzw. Hitze- und Kälteschmerz berechnet. Mögliche geschlechtsabhängige Unterschiede wurden mit *t*-Tests für unabhängige Stichproben geprüft.

Die Zahleneinschätzungen der Gewichtsempfindung in den Experimenten 1 und 2 („Spüren“ und „Halten“) wurden mit Hilfe einer Z-Transformation normalisiert. Dadurch wurden die individuellen Angaben der Teilnehmenden standardisiert und besser vergleichbar. Von den einzelnen Messwerten jeder Person wurde der arithmetische Mittelwert abgezogen und die sich daraus ergebende Differenz durch die Standardabweichung dividiert. Arithmetischer Mittelwert und Standardabweichung bezogen sich jeweils auf alle 36 „Verum-Trials“ (Testgewichte 700 g: 12 x neutral, 12 x kühl, 12 x kalt) jeder Testperson in dem betreffenden Experiment („Spüren“, „Halten“). Die Distraktoren wurden bei der Z-Transformation ausgeklammert. Die Bewertung ihrer Schwere lässt sich aber dennoch als Z-Wert angeben, wobei z.B. ein Wert von –2 besagt, dass die verspürte Schwere eines leichten Distraktors (600 g) zwei Standardabweichungen unter dem Mittelwert der Schwere aller 36 temperierten Testgewichte (700 g) liegt.

Die statistische Auswertung erfolgte getrennt für Experiment 1, in welchem das Objekt vor dem Heben nur berührt wurde („Spüren“), und Experiment 2, in dem es auf der Handfläche platziert wurde („Halten“). Die motorischen Variablen GK, HK, GKR, HKR, GKH, AKZ, die Z-Werte (Einschätzung der Schwere) und die Zeiten der Maxima der Griff- und Hubkräfte

(Zusatzvariablen) wurden separat ausgewertet. Verwendet wurden jeweils 3 (Temperatur: kalt, kühl, neutral) x 12 (Messwiederholung: 12 Trials pro Temperatur) Varianzanalysen für wiederholte Messungen (ANOVA). Im Fall signifikanter Ergebnisse der ANOVA wurden zweiseitige post-hoc *t*-Tests für gepaarte Stichproben verwendet, um temperaturabhängige Effekte zu beurteilen (z.B. maximale Griffkraft beim Fassen neutraler vs. kalter Objekte).

Um die Zahl der post-hoc Tests zu begrenzen, wurden nur die Daten des 1., 2., 3., 6., 9. und 12. Trials einbezogen. Für diese sechs post-hoc Vergleiche erfolgte eine Bonferroni-Korrektur, um die Anhäufung von Alpha-Fehlern beim multiplen Testen zu vermeiden. Mithin galten alle *p*-Werte, die (unkorrigiert) kleiner als $0,05 / 6 = 0,0083$ waren, als statistisch signifikant. Zur graphischen Darstellung der Ergebnisse werden die Gruppenmittelwerte der zwölf Trials pro Temperatur (kalt, kühl, neutral) als Verläufe gezeigt. Um geglättete Verlaufskurven zu erhalten, wurden an die Serien der zwölf Mittelwerte Polynome vierten Grades angepasst. Außerdem wurden Durchschnittswerte der Variablen unter Einschluss aller zwölf Messwiederholungen pro Temperatur, also über die gesamte Serie, berechnet und tabellarisch aufgelistet.

Mögliche Unterschiede zwischen beiden Experimenten („Spüren“ vs. „Halten“) wurden in einer weiteren $2 \times 3 \times 12$ ANOVA für wiederholte Messungen ausgewertet, nun mit den Faktoren Experiment (2 Stufen), Temperatur (3 Stufen), Trial (12).

Wie bereits beschrieben, wogen alle kalten, kühlen, und handwarmen (neutralen) Testobjekte 700 g. Die Trials mit den leichteren (600 g) und schwereren (800 g) Distraktoren wurden nicht in die Varianzanalysen einbezogen. Die Auswirkung der Gewichtswechsel wurde jedoch grafisch veranschaulicht und die Daten zum Fassen und Heben der 600 g und 800 g Distraktoren wurden mit *t*-Tests für gepaarte Stichproben verglichen.

3 Ergebnisse

3.1 Quantitative sensorische Testung

3.1.1 Temperaturempfinden

In der quantitativen sensorischen Testung des Temperaturempfindens wurden die Empfindungs- und Schmerzschwellen für Wärme und Kälte überprüft. Die Empfindungsschwelle für Wärme lag bei durchschnittlich $33,7 \pm 0,18$ °C (Mittelwert \pm Standardfehler des Mittelwertes, SEM). Für die Kältempfindungsschwelle ergab sich eine Temperatur von $30,4 \pm 0,24$ °C (MW \pm SEM). Die mittlere Schwelle (\pm SEM) für Hitzeschmerz betrug $42,5 \pm 0,54$ °C, die für den Kälteschmerz lag bei $12,1 \pm 1,1$ °C. Als durchschnittliche Hauttemperatur des Daumenballens wurden $31,5 \pm 0,44$ °C gemessen. Dieser Wert entspricht etwa der Temperatur der neutral temperierten Gewichte (32 °C). Es gab keine signifikanten Unterschiede zwischen Männern und Frauen hinsichtlich der Empfindungs- und Schmerzschwellen und der Hauttemperatur (*t*-Tests n.s.).

3.2 Numerische Einschätzung

Die Temperatur der Objekte hatte in beiden Experimenten („Spüren“ und „Halten“) *keinen* signifikanten Effekt auf die Beurteilung ihrer Schwere, die durch Zahlenangaben direkt nach dem Fassen und Heben der Gewichte erfolgte. Die Ergebnisse der entsprechenden Varianzanalysen sind in Tabelle 5 aufgelistet. Somit empfanden die Teilnehmenden die kühlen und kalten Gewichte nicht als besonders schwer oder ungewöhnlich leicht. Es gab auch keinen signifikanten Effekt des Faktors „Experiment“ auf die Schwereeinschätzung, d.h. in beiden Versuchen („Spüren“ und „Halten“) wurden die Gewichte ähnlich beurteilt. Allerdings zeigte sich in beiden Experimenten ein deutlicher Effekt des Faktors „Messwiederholung“ auf die Schwereempfindung (Tabelle 5). Wie Abbildungen 6 und 7 zeigen, wirkten die Gewichte (700 g) im Laufe der Experimente unabhängig von ihrer Temperatur zunehmend schwerer, bei zwölf Messwiederholungen pro Temperatur in jedem Experiment. Dieser Effekt ist möglicherweise auf eine Ermüdung der Arm- und Handmuskulatur oder auf den monoton wiederholten Bewegungsablauf in den Serien mit 48 Trials zurückzuführen. Es gab keine signifikanten Interaktionen zwischen den Faktoren „Messwiederholung“ und „Temperatur“. Die Teilnehmer empfanden die leichten (600 g) und schweren (800 g) Distraktoren als leichter bzw. schwerer als die 700 g schweren Testgewichte. Die durchschnittlichen Bewertungen dieser „Dummys“ sind in Abbildungen 6 und 7 als waagerechte graue Linien mit Fehlerbalken abgebildet (MW \pm SEM), ohne Darstellung der genauen Messzeitpunkte innerhalb der Versuchsserie.

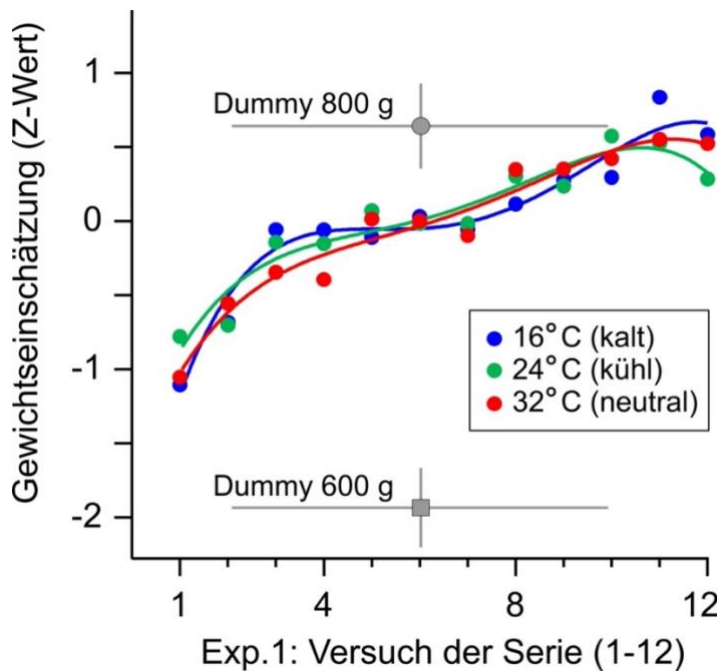


Abb. 6 : Einschätzung der Schwere in Experiment 1 („Spüren“)

Mittelwerte aller Personen im Verlauf. Die als Z-Werte normalisierten Zahlenangaben zeigen die kontinuierliche Zunahme der Gewichtseinschätzung für alle drei Temperaturen, die farblich markiert sind. Verglichen mit den Testgewichten, die alle 700 g wogen, wurden die Distraktoren abweichender Masse („Dummy“, graue Symbole und Linien, MW \pm SEM) von den Teilnehmenden korrekt als schwerer bzw. leichter erkannt. Durchgezogene farbige Linien = Polynomannpassung (s.S. 24).

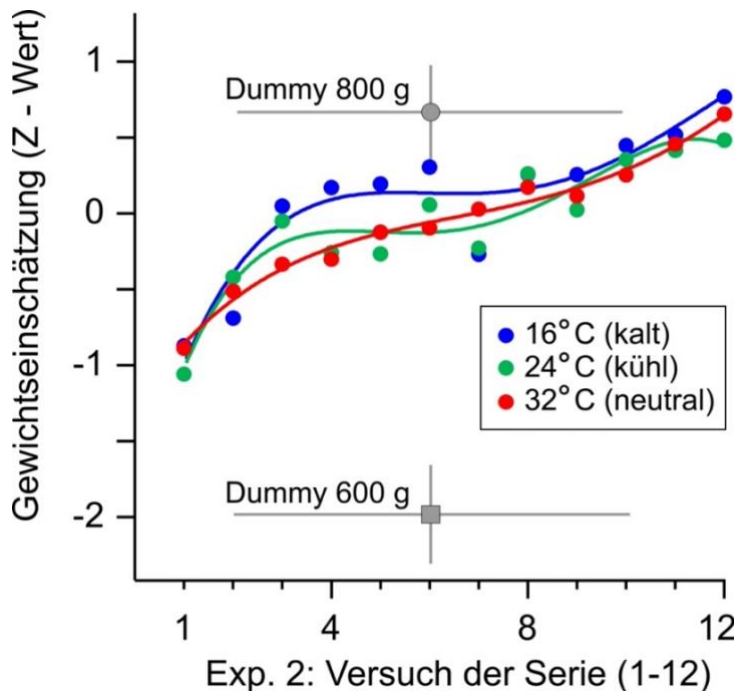


Abb. 7 : Einschätzung der Schwere in Experiment 2 („Halten“)

Auch hier ist die kontinuierliche Zunahme der Gewichtseinschätzung für alle drei Temperaturbereiche deutlich. Die kalten Objekte wurden zeitweilig als etwas schwerer beurteilt, was aber statistisch nicht bedeutsam war. Deutlich sind wieder die „Dummys“ von 800 g und 600 g Masse zu erkennen (graue Symbole und Linien, MW \pm SEM), welche die Teilnehmenden korrekt als schwerer bzw. leichter empfanden als die Testgewichte (700 g). Durchgezogene farbige Linien = Polynomannpassung (s.S. 24).

Zusammenfassend hatte die Temperatur der Testgewichte, entgegen der ursprünglichen Erwartung, keinen bedeutsamen Einfluss auf die Bewertung ihrer Schwere nach dem Anheben (Tabelle 5). Dass die Methode der Bewertung mit freien Zahlenangaben aber prinzipiell geeignet war, zeigen die Distraktoren: Tatsächlich leichtere Scheingewichte (600 g) wurden als leichter, tatsächlich schwerere „Dummys“ (800 g) als schwerer empfunden als die Testgewichte (700 g). Die Abweichungen waren statistisch bedeutsam (t -Tests für verbundene Stichproben) und betrugen ca. -2 bzw. $+0,75$ Z-Werte (Abb. 6, 7). Der Wert Null der Ordinaten in diesen Abbildungen entspricht der mittleren Bewertung aller Testgewichte der Serie.

Experiment 1 („Spüren“): Berühren der Testgewichte vor dem Anheben						
Gespürte Schwere	kalte Gewichte (16 °C)	kühle Gewichte (24 °C)	neutrale Gewichte (32 °C)	Effekt der Temperatur	Effekt der Wiederholungen (Trials)	Interaktion
Z-Werte	-0,020 ± 0,028	0,015 ± 0,029	0,005 ± 0,083	$F_{2,38}=$ 0,22 (n.s.)	$F_{11,209}=$ 8,52 *	$F_{22,418}=$ 0,68 (n.s.)

Experiment 2 („Halten“): Passives Halten der Testgewichte vor dem Anheben						
Gespürte Schwere	kalter Gewichte (16 °C)	kühler Gewichte (24 °C)	neutraler Gewichte (32 °C)	Effekt der Temperatur	Effekt der Wiederholungen (Trials)	Interaktion
Z-Werte	-0,048 ± 0,035	-0,053 ± 0,059	0,099 ± 0,063	$F_{2,38}=$ 1,70 (n.s.)	$F_{11,209}=$ 8,11 *	$F_{22,418}=$ 0,75 (n.s.)

Tabelle 5 : Beurteilung der Schwere der Gewichte in beiden Experimenten

Mittelwerte und Standardfehler (inter-individuelle Streuung, basierend auf n = 20 Werte, entsprechend der Personenzahl) der Beurteilung der verspürten Schwere der Testgewichte (700 g) durch willkürliche Zahlenangaben. Diese Angaben wurden durch eine Z-Transformation standardisiert. Die linken Spalten zeigen die empfundene Schwere (Z-Werte, Null entspricht dem Durchschnittswert über alle Temperaturen) beim Heben kalter, kühler und neutral (handwarm) temperierter Testgewichte. Die Mittelwerte umfassen alle Messwiederholungen (12 Trials pro Temperatur in jedem Experiment). Die rechten drei Spalten beschreiben mit ANOVA F-Werten Effekte der Temperatur, der Messwiederholungen sowie Interaktionen zwischen diesen Faktoren. Signifikante ($p < 0,05$) F-Werte sind fett gedruckt und mit * gekennzeichnet (n.s., nicht signifikant).

3.3 Greif-Hebe-Experiment: Auswirkung der TGI auf die Motorik

Für das erste Experiment („Spüren“) zeigt Abbildung 8 die Maxima der Griffkraft und der Griffkrafttraten und Abbildung 9 die Maxima der Hubkraft und der Hubkrafttraten für die zwölf Messwiederholungen pro Temperatur der Testgewichte, die im Laufe der Serien von 48 Greif-Hebe-Aktionen in pseudo-randomisierter Folge stattfanden. Tabelle 6 listet die arithmetischen Mittelwerte der Variablen mit Standardfehlern und dazu die Ergebnisse der Varianzanalysen auf. Die Temperatur der Testgewichte (in Abb. 8-12 farblich markiert) hatte in Experiment 1 keinen signifikanten Einfluss auf die Griffkraft und die Griffkrafttrate. Die durch Polynomannpassung gewonnenen Mittelwertsverläufe weichen nicht wesentlich voneinander ab (Abb. 8). Die Varianzanalysen ergaben weder signifikante Effekte der Temperatur noch solche der Messwiederholung. Es zeigten sich auch keine signifikanten Interaktionen zwischen diesen Faktoren (Tabelle 6).

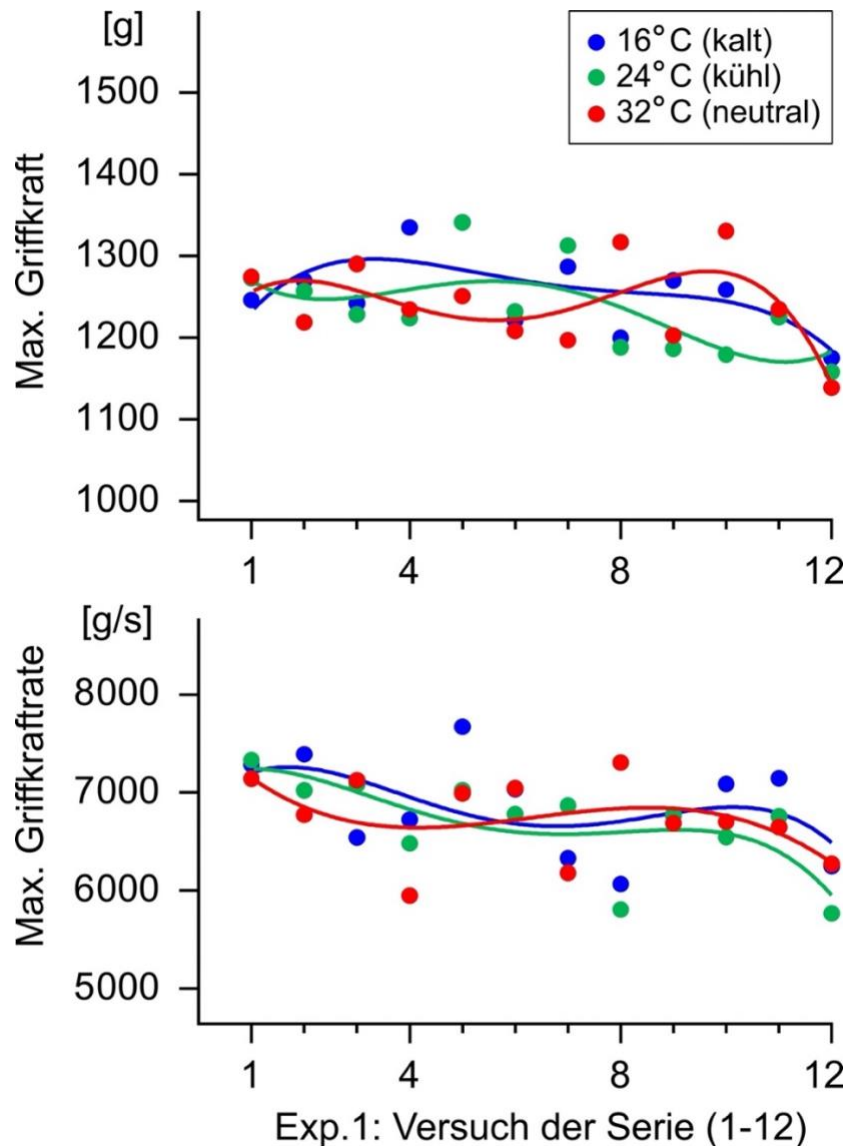


Abb. 8 : Maxima der Griffkraft und Griffkraftraten in Exp. 1 („Spüren“).

Die drei unterschiedlichen Temperaturen der Testgewichte sind farblich markiert. Die durchgezogenen farbigen Linien geben die Gruppenmittelwerte der 12 Trials der Verläufe mit angepassten Polynomen wieder (s.S. 24).

Weder die maximale Griffkraft noch ihre höchste Anstiegsgeschwindigkeit beim Fassen (Abb. 8), noch die Maxima der Hubkraft und der Hubkraftrate (Abb. 9) beim Anheben der Testgewichte wurden in Experiment 1 von der Temperatur beeinflusst. Die maximale Hubkraft war mit rund 820 g etwas höher als die Masse der Testgewichte (700 g), da diese beim Anheben beschleunigt wurden ($\text{Kraft} = \text{Masse} \times \text{Beschleunigung}$). Die zusätzlich berechneten Zeitpunkte der Maxima der Kräfte bzw. Kraftraten wurden nicht von der Temperatur beeinflusst (Tabelle 6). Die maximale vertikale Beschleunigung (AKZ) und die Griffkraft beim statischen Halten (GKH) blieben ebenfalls unbeeinflusst.

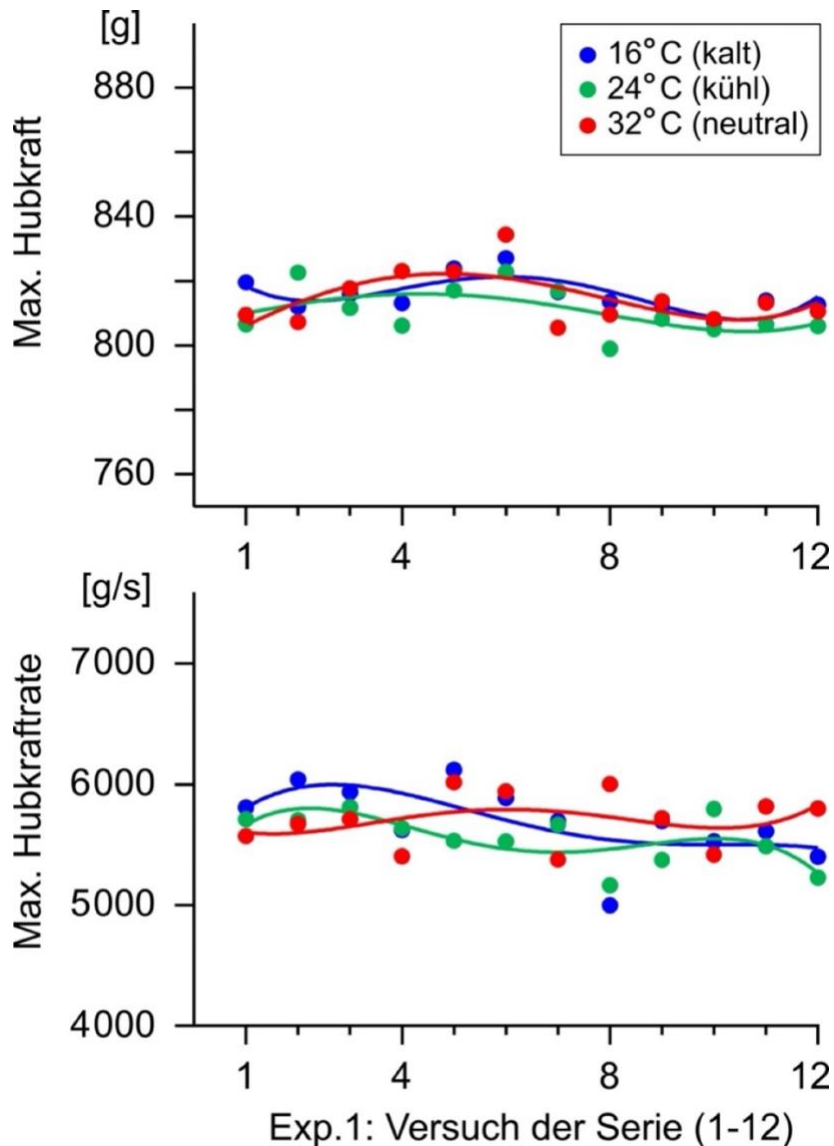


Abb. 9 : Maxima der Hubkraft und der Hubkrafraten in Exp. 1 („Spüren“).

Die durchgezogenen farbigen Linien geben die Gruppenmittelwerte der 12 Trials der Verläufe mit angepassten Polynomen wieder (s.S. 24).

Zusammenfassend hatte die Temperatur der Testgewichte in Experiment 1 weder bedeutsamen Einfluss auf die Schwereempfindung (Perzeption, Abb. 6) noch auf den Krafteinsatz beim Fassen und Heben dieser Gewichte (Motorik, Abb. 8 und 9). Wenn die temperierten Gewichte vor dem Heben nur leicht von unten berührt wurden, ohne dass sie wesentlichen Druck auf die Handfläche ausübten, war daher keine Temperatur-Gewichts-Illusion nachweisbar. Die Versuchspersonen empfanden kalte, kühle und neutrale Testgewichte als ähnlich schwer und verwendeten vergleichbare Kräfte. Alle Gewichte wurden im Laufe der Messwiederholungen als zunehmend schwerer empfunden (Abb. 6), allerdings unabhängig von ihrer Temperatur.

Variable	Kalte Gewichte (16 °C)	Kühle Gewichte (24 °C)	Neutrale Gewichte (32 °C)	Effekt der Temperatur	Effekt der Wiederholungen (Trials)	Interaktion
GK [g]	1256 ± 107	1234 ± 104	1241 ± 101	$F_{2,38}=$ 0,90 (n.s.)	$F_{11,209}=$ 1,32 (n.s.)	$F_{22,418}=$ 1,18 (n.s.)
GKR [g/s]	6858 ± 521	6687 ± 540	6735 ± 507	$F_{2,38}=$ 0,74 (n.s.)	$F_{11,209}=$ 1,45 (n.s.)	$F_{22,418}=$ 0,91 (n.s.)
HK [g]	816 ± 8	811 ± 7	815 ± 7	$F_{2,38}=$ 2,14 (n.s.)	$F_{11,209}=$ 1,55 (n.s.)	$F_{22,418}=$ 0,93 (n.s.)
HKR [g/s]	5696 ± 246	5554 ± 254	5705 ± 252	$F_{2,38}=$ 1,46 (n.s.)	$F_{11,209}=$ 0,66 (n.s.)	$F_{22,418}=$ 0,93 (n.s.)
GKH [g]	904 ± 88	910 ± 84	910 ± 83	$F_{2,38}=$ 0,10 (n.s.)	$F_{11,209}=$ 0,89 (n.s.)	$F_{22,418}=$ 0,88 (n.s.)
AKZ [g-Wert]	0,157 ± 0,010	0,152 ± 0,010	0,156 ± 0,009	$F_{2,38}=$ 1,09 (n.s.)	$F_{11,209}=$ 1,17 (n.s.)	$F_{22,418}=$ 1,07 (n.s.)
Zusatzvariablen						
Zeit GK [ms]	479 ± 33	499 ± 31	489 ± 28	$F_{2,38}=$ 1,41 (n.s.)	$F_{11,209}=$ 1,37 (n.s.)	$F_{22,418}=$ 1,06 (n.s.)
Zeit GKR [ms]	242 ± 23	238 ± 22	248 ± 23	$F_{2,38}=$ 0,69 (n.s.)	$F_{11,209}=$ 1,16 (n.s.)	$F_{22,418}=$ 1,21 (n.s.)
Zeit HK [ms]	448 ± 29	464 ± 30	460 ± 29	$F_{2,38}=$ 1,56 (n.s.)	$F_{11,209}=$ 1,04 (n.s.)	$F_{22,418}=$ 1,01 (n.s.)
Zeit HKR [ms]	276 ± 25	280 ± 25	282 ± 26	$F_{2,38}=$ 0,25 (n.s.)	$F_{11,209}=$ 0,78 (n.s.)	$F_{22,418}=$ 1,06 (n.s.)

Tabelle 6 : Krafteinsatz beim ersten Greif-Hebe-Experiment („Spüren“)

Mittelwerte und Standardfehler (inter-individuelle Streuung, basierend auf n = 20 Werte, entsprechend der Personenzahl) der Variablen zur Motorik: Maxima der Griffkraft (GK), der Griffkraftänderungsrate (GKR), der Hubkraft (HK), der Hubkraftänderungsrate (HKR), ferner die Griffkraft beim statischen Halten des Gewichtes (GKH) und die maximale Beschleunigung (AKZ) des Gewichtes beim Anheben. Die Zusatzvariablen bezeichnen die Zeiten der Maxima relativ zum Beginn der Greifbewegung. Die linken Spalten zeigen Durchschnittswerte für das Heben kalter, kühler und neutraler (handwarmer) Testgewichte, die jeweils über alle Messwiederholungen (12 Trials) gemittelt wurden. Die rechten drei Spalten zeigen ANOVA F-Werte für mögliche Effekte der Temperatur, der Messwiederholungen (12 Trials) sowie für Interaktionen zwischen den Faktoren Temperatur und Messwiederholung. Es gab keine signifikanten Effekte (n.s., nicht signifikant).

In Experiment 2 („Halten“) wurden die Testgewichte direkt auf die Handfläche der nicht-dominanten Hand gesetzt und dann mit der anderen Hand gefasst und gehoben. Dazu zeigt Abbildung 10 die Maxima der Griffkraft und der Griffkraftraten und Abbildung 11 die Maxima der Hubkraft und der Hubkraftraten. Wiederum sind die Gruppenmittelwerte der zwölf Messwiederholungen pro Temperatur mit angepassten Verlaufskurven abgebildet. Tabelle 7 listet die Mittelwerte der Variablen (Durchschnitt aller Messwiederholungen) mit Standardfehlern und die Ergebnisse der Varianzanalysen auf. Die Temperatur hatte im zweiten Experiment („Halten“) einen signifikanten Einfluss auf den Krafteinsatz.

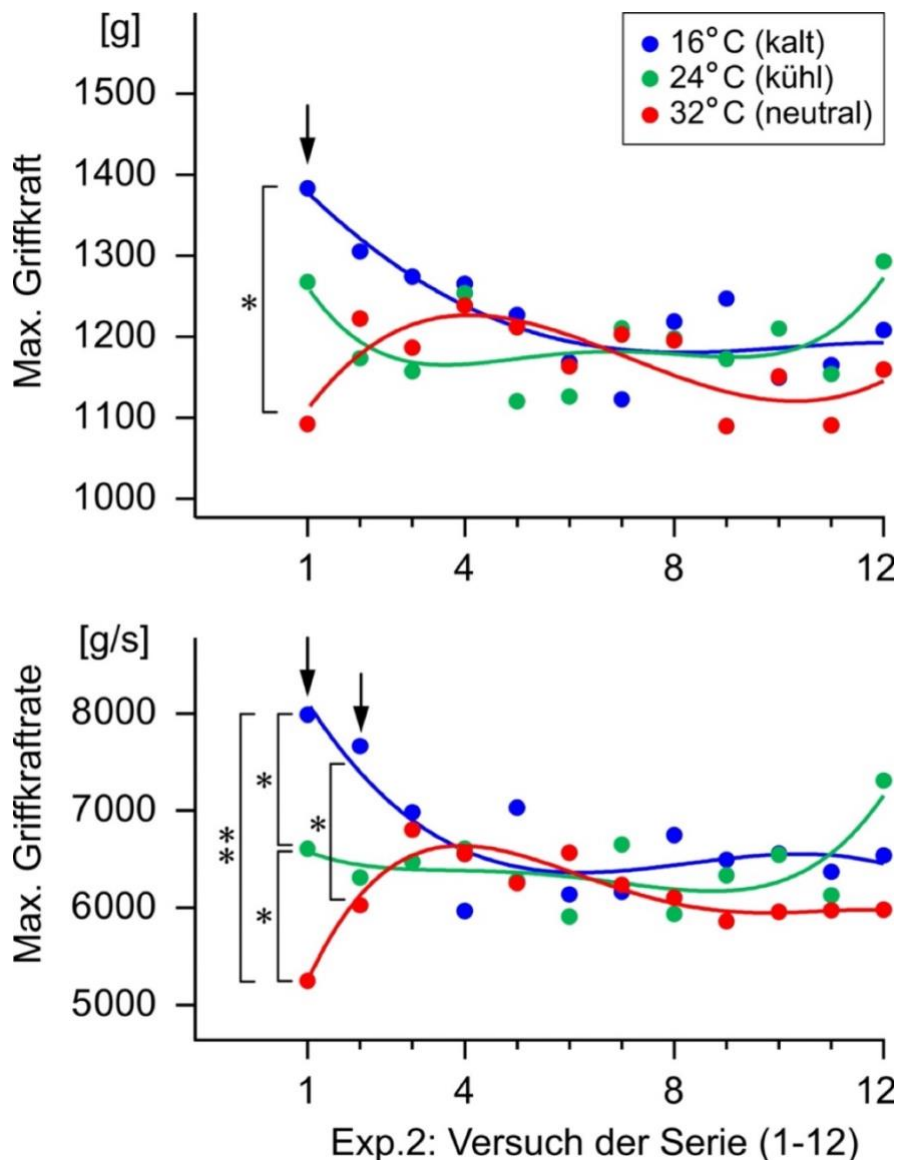


Abb. 10 : Maxima der Griffkraft und der Griffkraftraten in Exp. 2 („Halten“).

Temperaturabhängige Unterschiede traten auf, als die Testgewichte das erste und zweite Mal gefasst und gehoben wurden (Pfeile). Die signifikanten Unterschiede sind mit eckigen Klammern und Sternen markiert (* $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, post-hoc t -Tests für verbundene Stichproben, korrigiert nach Bonferroni). Die durchgezogenen farbigen Linien geben die Gruppenmittelwerte der 12 Trials der Verläufe mit angepassten Polynomen wieder (s.S. 24).

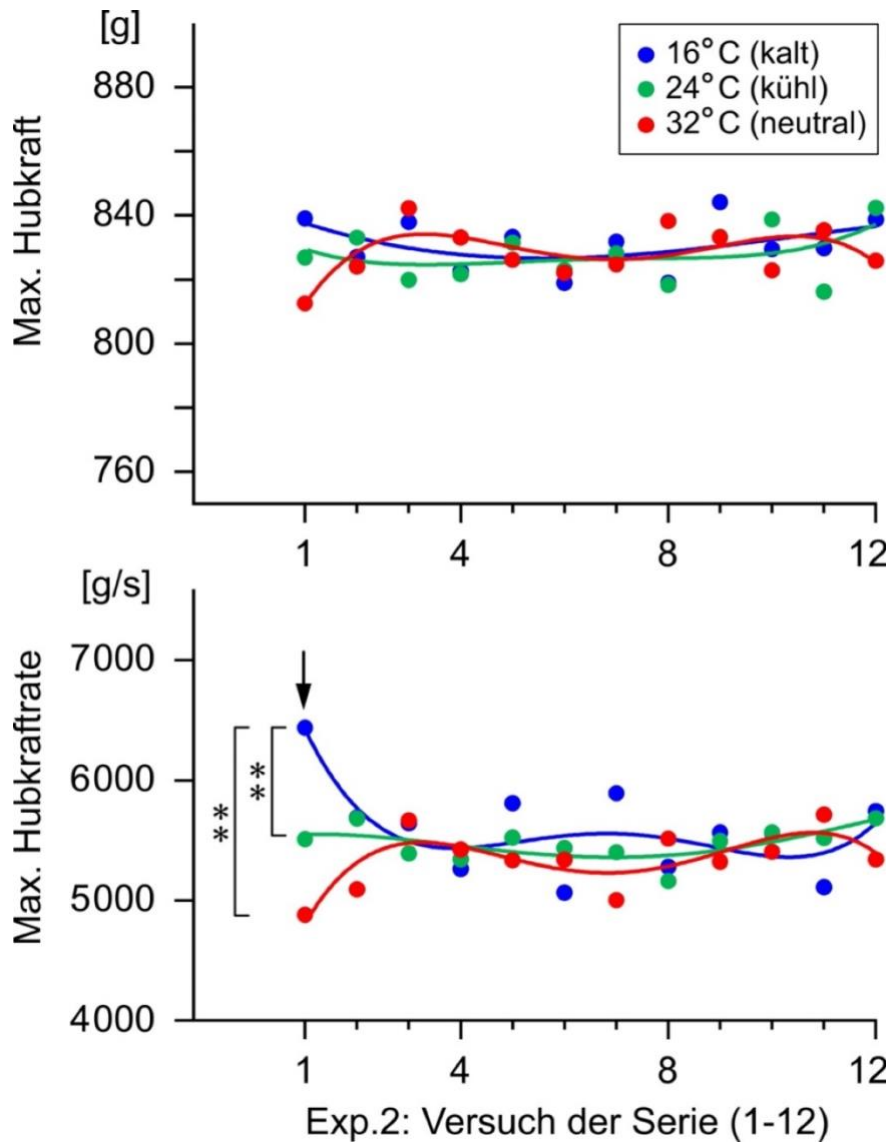


Abb. 11 : Maxima der Hubkraft und der Hubkraftraten in Exp. 2 („Halten“).

Temperaturabhängige Unterschiede der maximalen Hubkraftrate traten auf, als die Testgewichte das erste Mal gefasst und gehoben wurden (Pfeil). Signifikante Unterschiede sind mit eckigen Klammern und Sternen markiert (** $p < 0,01$). Statistik wie in Abb. 10. Die durchgezogenen farbigen Linien geben die Gruppenmittelwerte der 12 Trials der Verläufe mit angepassten Polynomen wieder (s.S. 24).

Beim ersten Greifen und Heben kalter Gewichte wurde signifikant mehr Griffkraft eingesetzt als beim ersten Hantieren neutraler Gewichte (Abb. 10). Auch die initial erreichte maximale Anstiegsgeschwindigkeit der Griffkraft war beim Fassen kalter und kühler Objekte höher als beim Fassen der neutralen Gewichte. Es gab ferner einen Unterschied zwischen 16 °C und 24 °C (kalt und kühl). Bei den kalten Gewichten war die Griffkraftrate noch beim zweiten Trial erhöht (Abb. 10). Die maximale Hubkraftrate war beim ersten Heben kalter Gewichte höher als beim Heben kühler und neutraler Gewichte (Abb. 11). Spätestens ab der dritten Wiederholung waren aber alle temperaturabhängigen Unterschiede abgeklungen (Abb. 10,

11). Tabelle 7 zeigt dazu passend die Ergebnisse der ANOVA mit signifikanten Effekten der Temperatur und Interaktionen zwischen den Faktoren Temperatur und Messwiederholung.

Variable	Kalte Gewichte (16 °C)	Kühle Gewichte (24 °C)	Neutrale Gewichte (32 °C)	Effekt der Temperatur	Effekt der Wiederholungen (Trials)	Interaktion
GK [g]	1228 ± 101	1195 ± 101	1167 ± 93	$F_{2,38}=$ 4,86 *	$F_{11,209}=$ 1,51 (n.s.)	$F_{22,418}=$ 1,87 *
GKR [g/s]	6721 ± 592	6424 ± 548	6131 ± 527	$F_{2,38}=$ 6,98 *	$F_{11,209}=$ 1,05 (n.s.)	$F_{22,418}=$ 2,64 *
HK [g]	831 ± 11	828 ± 10	828 ± 10	$F_{2,38}=$ 0,66 (n.s.)	$F_{11,209}=$ 0,89 (n.s.)	$F_{22,418}=$ 1,44 (n.s.)
HKR [g/s]	5589 ± 266	5478 ± 266	5338 ± 247	$F_{2,38}=$ 2,03 (n.s.)	$F_{11,209}=$ 0,47 (n.s.)	$F_{22,418}=$ 1,85 *
GKH [g]	875 ± 83	855 ± 82	849 ± 80	$F_{2,38}=$ 1,62 (n.s.)	$F_{11,209}=$ 1,16 (n.s.)	$F_{22,418}=$ 1,26 (n.s.)
AKZ [g-Wert]	0,171 ± 0,013	0,164 ± 0,013	0,164 ± 0,012	$F_{2,38}=$ 1,60 (n.s.)	$F_{11,209}=$ 1,83 (n.s.)	$F_{22,418}=$ 1,32 (n.s.)
Zusatzvariablen						
Zeit GK [ms]	455 ± 21	447 ± 20	462 ± 22	$F_{2,38}=$ 0,77 (n.s.)	$F_{11,209}=$ 0,75 (n.s.)	$F_{22,418}=$ 0,66 (n.s.)
Zeit GKR [ms]	224 ± 13	213 ± 13	223 ± 12	$F_{2,38}=$ 1,27 (n.s.)	$F_{11,209}=$ 1,22 (n.s.)	$F_{22,418}=$ 0,50 (n.s.)
Zeit HK [ms]	436 ± 22	428 ± 23	441 ± 24	$F_{2,38}=$ 1,11 (n.s.)	$F_{11,209}=$ 1,73 (n.s.)	$F_{22,418}=$ 0,96 (n.s.)
Zeit HKR [ms]	267 ± 19	253 ± 18	264 ± 20	$F_{2,38}=$ 1,88 (n.s.)	$F_{11,209}=$ 0,83 (n.s.)	$F_{22,418}=$ 0,55 (n.s.)

Tabelle 7 : Krafteinsatz beim zweiten Greif-Hebe-Experiment („Halten“)

Mittelwerte und Standardfehler (inter-individuelle Streuung, basierend auf n = 20 Werte, entsprechend der Personenzahl) der Variablen zur Motorik: Maxima der Griffkraft (GK), der Griffkraftänderungsrate (GKR), der Hubkraft (HK), der Hubkraftänderungsrate (HKR), ferner die Griffkraft beim statischen Halten des Gewichtes (GKH) und die maximale Beschleunigung (AKZ) des Gewichtes beim Anheben. Zusatzvariablen bezeichnen die Zeiten der Maxima relativ zum Beginn der Greifbewegung. Die linken Spalten zeigen Durchschnittswerte für das Heben kalter, kühler und neutraler (handwarmer) Testgewichte, die jeweils über alle Messwiederholungen (12 Trials) gemittelt wurden. Die rechten drei Spalten zeigen ANOVA F-Werte für Effekte der Temperatur, der Messwiederholungen (12 Trials) sowie Interaktionen zwischen den Faktoren Temperatur und Wiederholung. Signifikante ($p < 0,05$) F-Werte sind fett gedruckt und mit * gekennzeichnet (n.s. nicht signifikant).

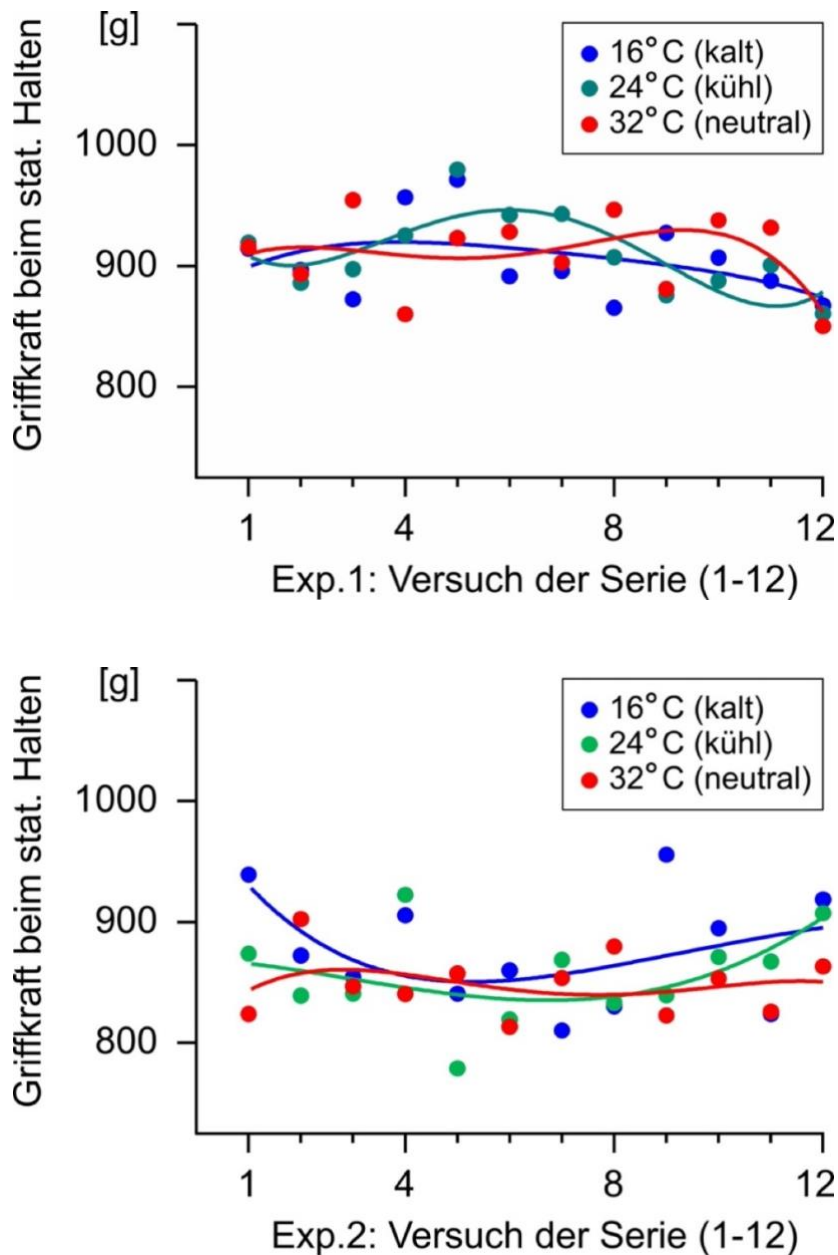


Abb. 12 : Griffkraft beim statischen Halten in beiden Experimenten.

Exp.1= „Spüren“, Exp.2= „Halten“ Es zeigen sich keine signifikanten Einflüsse der Temperatur. Die durchgezogenen farbigen Linien geben die Gruppenmittelwerte der 12 Trials der Verläufe mit angepassten Polynomen wieder (s.S. 24).

Der Vollständigkeit halber verdeutlicht Abbildung 12 für beide Experimente die Griffkräfte, die verwendet wurden, um die Testobjekte nach dem Anheben in der Luft statisch auf einer Höhe zu halten. Diese Kräfte wurden nicht von der Temperatur der Testgewichte beeinflusst. Beim statischen Halten ist die tatsächliche Masse der Objekte eindeutig spürbar, denn der nötige Kraftaufwand wird durch propriozeptive Afferenzen (Kraftsinn, Stellungssinn) vermittelt. Somit zeigte sich eine TGI nur initial bei den ersten Greif-Hebe-Aktionen und auch nur dann, wenn

die Testobjekte vorher auf dem Handteller ruhten, so dass der Druck ihres vollen Gewichtes auf die Haut wirkte und ihre Temperatur verspürt wurde (Experiment 2).

3.4 Krafteinsatz beim Greifen und Heben der Distraktoren („Dummys“)

Methodisch wurde davon ausgegangen, dass der Krafteinsatz beim Greifen und Heben gemäß der erwarteten Schwere eines Gegenstandes antizipatorisch geplant wird. Dieses Konzept lässt sich an den Kräften überprüfen, die die Teilnehmenden zum Fassen und Heben der leichten (600 g) und schweren (800 g) Distraktoren einsetzten. Diese „Dummys“ wurden in kurzen Folgen nacheinander angeboten (siehe Abschnitt 2.6, Tabelle 3). Wenn sie auf die Handfläche der nicht-dominanten Hand platziert wurden (Experiment 2), war ihre Masse eindeutig spürbar und auch der Unterschied zwischen den Gewichten von 600 g und 800 g war deutlich. Dies spiegelte sich im Krafteinsatz wider (Abb. 13) und bestätigte somit das Konzept.

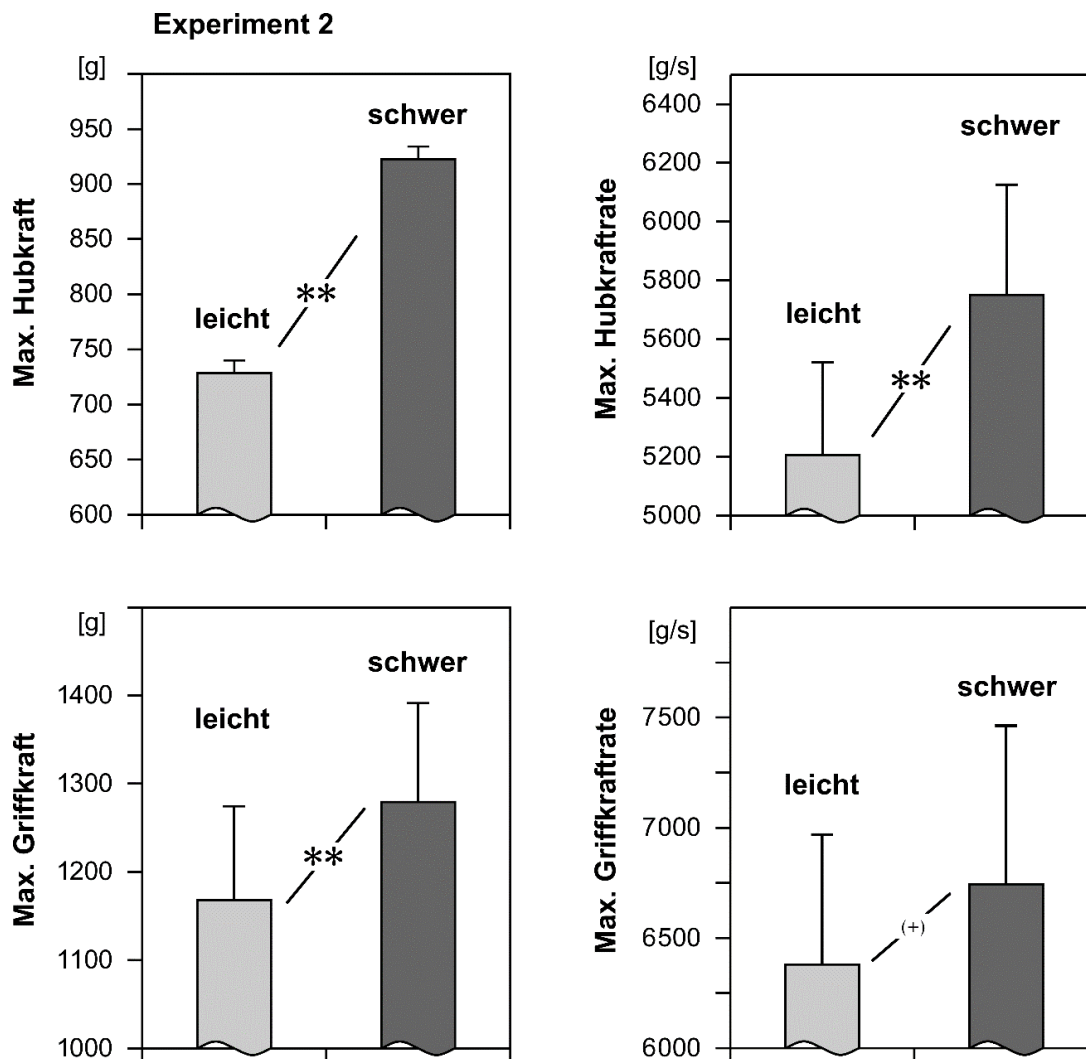


Abb. 13 : Krafteinsatz beim Fassen und Heben leichter (600 g) und schwerer (800 g) „Dummys“ in Experiment 2 („Halten“).

Signifikante Unterschiede (** $p < 0,01$) und eine Tendenz ((+), $p < 0,1$) sind markiert. Dargestellt sind Mittelwerte und Standardfehler.

Die Maxima der Griff- und Hubkräfte und die maximale Hubkraftrate waren beim Heben der schweren Distraktoren signifikant höher (t -Test bei gepaarten Stichproben, $p < 0.01$) als beim Heben der leichten Distraktoren (Abb. 13), die maximale Griffkraftrate (GKR) zeigte zumindest einen tendenziellen Unterschied ($p = 0,065$).

Wurden die 600 g und 800 g schweren Distraktoren hingegen vor dem Heben nur leicht von unten berührt (Experiment 1), konnte ihr jeweiliges Gewicht vor dem Heben nicht gespürt werden. Entsprechend waren auch die Kraftraten (GKR, HKR) und die Griffkraft (GK) ähnlich. Lediglich die maximale Hubkraft unterschied sich, da diese direkt von der tatsächlichen Masse des gehobenen Objektes abhängt ($\text{Kraft} = \text{Masse} \times \text{Beschleunigung}$) und somit erst nach dem Anheben erbracht wird. Um irreführende Assoziationen zu vermeiden, variierte die Temperatur der Distraktoren unabhängig von deren Gewicht, sodass z. B. die schweren „Dummys“ (800 g) gleich häufig handwarm, kühl oder kalt waren. Etwaige Effekte der Temperatur der Distraktoren wurden nicht näher ausgewertet. Insgesamt bestätigen die Greif-Hebe-Versuche mit den Distraktoren das Konzept der antizipatorischen Kraftplanung beim Fassen und Heben, das zur Untersuchung der TGI verwendet wurde (Abschnitt 3.3).

3.5 Zusammenfassung der Resultate

In Experiment 1 („Spüren“) zeigten sich weder signifikante Effekte der unterschiedlichen Temperaturen der Testgewichte auf die maximalen Griff- und Hubkräfte noch auf deren Änderungsraten (siehe Abb. 8 und 9). Auch weitere Variablen wie die Zeitwerte, die Griffkraft beim Halten und die Beschleunigung wurden nicht von der Temperatur beeinflusst (Tabelle 6). Dies verdeutlicht, dass das alleinige Wahrnehmen der Temperatur eines kühlen oder kalten Objekts durch Berührung nicht ausreicht, um eine Temperatur-Gewichts-Illusion auszulösen.

In Experiment 2 („Halten“) hatte die Temperatur der Testgewichte signifikante Effekte auf die maximale Griffkraft und die Anstiegsgeschwindigkeit dieser Kraft (Griffkraftrate, Abb. 10) sowie auf die Hubkraftraten (Abb. 11 unten). Passend zur TGI konnten wir feststellen, dass kalte Objekte (16 °C) initial kraftvoller gegriffen wurden als kühle und neutrale Objekte (24 °C bzw. 32 °C); deutlich zu erkennen war dies an den Kraftraten im ersten Trial. In der Annahme, dass das kalte Objekt schwerer sei, zielten die Teilnehmenden auf ein höheres Kraftniveau ab, als am Ende nötig war, um das Gewicht anzuheben. Im ersten Trial waren die Griffkraft und die Griff- und Hubkraftraten beim Fassen und Heben der kalten Objekte (16 °C) signifikant erhöht im Vergleich zu den neutralen, handwarmen Objekten. Beim zweiten Trial war weiterhin die Griffkraftrate erhöht. Ein signifikanter Effekt der Temperatur der kühlen Objekte (24 °C) konnte nur im ersten Trial für die Griffkraftrate (kühl > neutral) festgestellt werden (Abb. 10).

Diese temperaturabhängigen Unterschiede waren bereits nach zweimaligem Fassen und Heben der Testgewichte nicht mehr nachweisbar. Es kam zu einer Anpassung des Krafteinsatzes an die tatsächliche, gleichbleibende (700 g) Masse der Testobjekte, wodurch die TGI „verschwand“. Die Illusion hatte damit nur vorübergehenden Einfluss auf das Greifen, die auftrat, wenn ein Objekt mit einer noch nicht bekannten Masse erstmals gegriffen und angehoben wurde. Kälter temperierte Gewichte wurden initial mit mehr Kraft zwischen Daumen und Zeigefinger gefasst als wärmere Gewichte. Die Griffkraft beim statischen Halten (Abb. 12) unterlag keinem Einfluss der Temperatur.

Der Unterschied zwischen beiden Experimenten zeigt, dass es für das Auftreten einer TGI wesentlich ist, dass nicht nur die Temperatur eines Objekts durch Berührung gespürt wird, sondern dieses auch durch seine Masse Druck auf die Haut ausübt („Spüren“ vs. „Halten“, vergleiche Abb. 8 und 10). Varianzanalysen ergaben signifikante Effekte des Faktors „Experiment“ auf die Griff- und Hubkraftraten.

Entgegen unserer initialen Erwartung wurden die kalten, kühlen und neutralen Testgewichte (alle wogen 700 g) von den Versuchspersonen als ähnlich schwer beurteilt, nachdem sie angehoben worden waren. Die Temperatur hatte in keinem der beiden Experimente signifikante Auswirkungen auf die Perzeption (Tabelle 5). Die Resultate der eingestreuten Scheinversuche mit leichteren (600 g) und schwereren (800 g) Distraktoren zeigen jedoch (Abb. 6, 7), dass die Methode der Gewichtsbeurteilung durch freie Zahlenangaben für die Fragestellung geeignet war. Außerdem wird anhand dieser Distraktoren deutlich, dass der Krafteinsatz beim Greifen und Heben antizipatorisch entsprechend der zuvor mit der Haltehand gespürten Schwere der Objekte skaliert wird (Abb. 13).

4 Diskussion

4.1 Zahleneinschätzung zur Beurteilung der Schwere

Rekapitulieren wir an dieser Stelle zunächst Webers Silbertaler-Phänomen: Seine Versuchsteilnehmenden berichteten, dass sich eine auf die Stirn gelegte kalte Silbermünze in etwa doppelt so schwer anfühle wie eine warme Silbermünze des gleichen Gewichts (Weber, 1846). In Folgestudien wurde dieses Phänomen auch an anderen Hautarealen reproduziert (Stevens & Green, 1978; Stevens, 1979). Stevens und Kollegen stellten fest, dass die TGI an unterschiedlichen Hautgebieten unterschiedlich stark ausgeprägt ist. Zusätzlich machten sie die Beobachtung, dass auch warme Metallscheiben (45 °C) in einem gewissen Ausmaß eine TGI hervorrufen können (Stevens & Green, 1978). Dass dies nicht bloß ein Zufall war, konnte in einer aktuelleren Untersuchung bestätigt werden (Kuhntz-Buschbeck & Hagenkamp, 2020): Hier wurden unterschiedlich temperierte Gewichte (18 °C, 32 °C und 41 °C) auf die Handfläche der Versuchsteilnehmenden gesetzt, welche deren Schwere durch Zahlenangaben und in einem intermodalen Vergleich bewerteten. Es zeigte sich, dass auch warme Objekte (41 °C) eine TGI auslösten, sodass sie etwas schwerer wirkten als neutrale Gewichte (32 °C). Diese Illusion scheinbarer Schwere warmer Gewichte war jedoch schwächer als die mit kalten (18 °C) Objekten ausgelöste TGI. Erwähnenswert ist, dass die Bewertung der Schwere hier unabhängig von motorischen Aktionen erfolgte, denn die temperierten Gewichte wurden zunächst nur auf die Handfläche gesetzt und ihre Schwere von den Versuchspersonen in Ruhe beurteilt. Erst im nachfolgenden Experiment wurden die Gewichte gefasst und gehoben, dann allerdings ohne nochmalige Einschätzung ihrer Schwere (Kuhntz-Buschbeck & Hagenkamp, 2020).

In der vorliegenden Arbeit hatte die Temperatur der Objekte weder in Experiment 1 noch in Experiment 2 signifikante Auswirkungen auf die Schwerebeurteilungen (Abb. 6 und 7), was den oben genannten Studien zur TGI scheinbar widerspricht. Hervorzuheben ist aber, dass die Versuchsteilnehmenden in dieser Arbeit erst *nach* jeder Greif-Hebeaktion eine Beurteilung der Schwere abgaben. Eine Erklärung für den fehlenden perzeptuellen Effekt könnte sein, dass der Druck kalter Gewichte auf die Handfläche zwar vor dem Anheben als „schwer“ empfunden wurde (Kuhntz-Buschbeck & Hagenkamp, 2020), für das folgende Anheben aber ein unerwartet kleiner Kraftaufwand nötig war, sodass sich diese gegensätzlichen Sinneseindrücke aufhoben.

Diese Erklärung passt zu Studien der Größe-Gewichts-Illusion (SWI) und der Material-Gewichts-Illusion (MWI). Bei einem Versuch von Buckingham und Goodale zur SWI wurde den Teilnehmenden ein kleiner, mittlerer oder großer Holzwürfel präsentiert. Mittels einer

Shutter-Brille wurde dann die Sicht verdeckt und der zuvor gezeigte Würfel gegen eine andere Größe ausgetauscht. Ohne Sicht haben die Versuchspersonen den Würfel gegriffen, angehoben und danach die Schwere beurteilt. Hervorzuheben ist, dass die wahrgenommene Schwere des Würfels variierte, je nachdem welche Größe vorher präsentiert worden war: Wurde vorher ein kleiner Würfel gezeigt, so wurde der gehobene Würfel danach als unerwartet schwer beurteilt. Genau andersherum war es, wenn initial ein großer Würfel gezeigt wurde: der gehobene Würfel wurde dann als unerwartet leicht beschrieben (Buckingham & Goodale, 2010). In den Versuchen zur MWI wurden die Probanden gebeten, Würfel, die alle gleich schwer, aber mit unterschiedlichen Materialien (Styropor, Holz, Metall) verkleidet waren, zu greifen, anzuheben und nach jeder Aktion die Schwere des jeweiligen Würfels zu beurteilen. Hier wurde der Styroporwürfel als unerwartet schwer und der Metallwürfel als unerwartet leicht beurteilt (Buckingham et al., 2009). Zusammengefasst: Die Teilnehmenden glaubten, dass sie für den Metallwürfel (MWI) oder für einen großen Holzwürfel (SWI) mehr Kraft aufwenden müssten, um ihn anzuheben im Vergleich zu einem Styroporwürfel oder einem kleinen Würfel. Während des Anhebens war aber ein geringerer Kraftaufwand nötig als vermutet. Es kam zu einer Dissoziation zwischen Erwartungshaltung und motorischer Aktion.

Entsprechend hatten die Personen in Experiment 2 der vorliegenden Arbeit vermutlich die Erwartung, dass zum Anheben der durch die Kombination von Druck und Kälte schwer wirkenden Testgewichte (Kutzt-Buschbeck & Hagenkamp, 2020) ein hoher Kraftaufwand nötig sein müsse. Diese Erwartung erfüllte sich beim Fassen und Heben dieser Objekte aber nicht, was den perzeptuellen Effekt der TGI auslöschte. Anders als große Würfel (SWI) bzw. metallverkleidete Würfel (MWI) in den vorgenannten Studien wurden die kalten Gewichte nach dem Heben jedoch nicht als ausgesprochen leicht eingeschätzt. Möglicherweise wirkt die TGI schwächer als die SWI und MWI, weil die Temperatur von Gegenständen weniger starke Erwartungen hinsichtlich ihres Gewichtes auslöst als Material und Größe. Außerdem wäre es widersprüchlich, den Druck eines kalten Objektes auf der Handfläche zwar vor dem Heben als „schwer“ zu empfinden, dieses Objekt aber gleich nach dem Heben als „leicht“ zu bezeichnen. Visuelle gewichtsbezogene Hinweise (MWI, SWI) führten zu keinem derartigen Widerspruch.

Der in dieser Arbeit auffällige Anstieg der Schwerebeurteilung der Gewichte über den gesamten Verlauf der Experimente (Abb. 6, 7) lässt sich mit großer Wahrscheinlichkeit auf eine Ermüdung der teilnehmenden Personen zurückführen und wurde auch schon in diversen Vorstudien zur MWI und SWI beobachtet. Beispielhaft sind hier die oben erwähnten Studien von Buckingham (Buckingham & Goodale, 2010; Buckingham et al., 2009) sowie eine Studie zur SWI (Flanagan & Beltzner, 2000) zu nennen, bei denen ebenfalls eine Zunahme der Z-Werte im Verlauf der Experimente beschrieben wurde.

4.2 Greifen / Heben

Der Krafteinsatz beim Greifen und Heben von Gegenständen wird antizipatorisch geplant, also anhand der erwarteten Eigenschaften des jeweiligen Objekts in Abhängigkeit vom vermuteten Gewicht, von der Form und der Griffigkeit (Johansson, 1996). Die Kräfte werden so skaliert, dass sie bestmöglich zu den Objekteigenschaften passen. Je größer das Gewicht eines Gegenstandes und je glatter dessen Oberfläche ist, desto schneller steigen die Griff- und Hubkräfte der Finger zu Beginn der Aktion an und desto höhere Maxima erreichen sie (Nowak et al., 2013). Entsprechende Unterschiede im Krafteinsatz zeigten sich in dieser Arbeit beim Fassen und Heben der 600 g und 800 g schweren Distraktoren (siehe Abb. 13). Die maximale Anstiegssteilheit der Griff- und Hubkräfte der Finger (die sog. Kraftrate) spiegelt die antizipatorische Skalierung wider. Die höchste Anstiegsgeschwindigkeit wird bekanntlich meist erreicht, bevor ein Objekt von seiner Unterlage hochgehoben wird, also noch bevor Information über die tatsächliche Masse des Objekts anhand von propriozeptivem Feedback, wie Muskelspannung und Bewegung, spürbar wird (Gordon et al., 1993; Nowak et al., 2013). Die antizipatorische Skalierung gelingt am besten bei bekannten Gegenständen, bei denen man aufgrund von Hinweisen meist visueller Natur die Objekteigenschaften richtig einschätzen kann. Ein Beispiel: Den meisten Menschen ist hinlänglich bekannt, dass eine Packung mit Knäckebrötchen leicht ist und man daher schon beim ersten Fassen und Heben die passende Kraft einsetzen kann (Gordon et al., 1993). Eine Milch- oder Saftpackung kann dagegen je nach Füllungsgrad leicht oder schwer sein. Daher überrascht es nicht, dass hier die Kräfte anfangs manchmal falsch skaliert werden und eine Packung mit zu wenig oder zu viel („überschießender“) Kraft gehoben wird. Wenn man Erfahrungen im Umgang mit einem bislang unbekannten Gegenstand macht, so werden die Griff- und die Hubkraft innerhalb weniger Versuche an das tatsächliche Gewicht des Objekts angepasst (Flanagan & Beltzner, 2000).

In dieser Arbeit kam es in Experiment 2 („Halten“) bei den ersten Greif-Hebe-Aktionen mit den kalten und kühlen Gegenständen zu einem erhöhten Krafteinsatz (Abb. 10, 11). Dieser ist vermutlich auf die Antizipation einer vermeintlich größeren Schwere der kalten und kühlen Objekte zurückzuführen, deren Druck auf die Handfläche der nicht-dominanten Haltehand wahrscheinlich eine TGI auslöste (Kuhz-Buschbeck & Hagenkamp, 2020). Bemerkenswert ist, dass schon nach ein bis zwei Aktionen die Griff- und Hubkräfte an das tatsächliche Gewicht angepasst waren und auch in den folgenden Trials, aufgrund motorischen Lernens, die Kräfte richtig skaliert wurden. Die Auswirkung der TGI auf den Krafteinsatz war nur vorübergehend.

Eine initiale Fehlskalierung der Griff- und Hubkräfte ist auch für die MWI und SWI beschrieben worden. In den oben erwähnten Experimenten zur MWI griffen und hoben die

Versuchspersonen Würfel, die alle gleich schwer, aber mit unterschiedlichen Materialien (Styropor, Holz und Metall) verkleidet waren (Buckingham et al., 2009). Die Griff- und Hubkräfte von Daumen und Zeigefinger wurden gemessen. In der Erwartung, dass der Metallwürfel schwerer sei als der Styroporwürfel, wurde dieser anfangs mit zu viel Kraft gegriffen. Beim Styroporwürfel war es umgekehrt, denn dieser wurde initial mit zu wenig Kraft gegriffen, da die Annahme bestand, er müsse viel leichter sein als die Holz- oder Metallwürfel. Die Fehlskalierung der Kräfte war nur von kurzer Dauer, denn nach einigen Greif-Hebe-Aktionen passten sich die Kräfte an das tatsächliche Gewicht der Objekte an. Ähnliches wurde in einer Versuchsreihe zur SWI beobachtet (Flanagan & Beltzner, 2000): zwei holzverkleidete Würfel gleichen Gewichts, aber unterschiedlicher Größe, wurden wiederholt gegriffen und gehoben. Auch hier zeigte sich anfänglich eine Fehlplanung der Griff- und Hubkräfte: Der große Würfel wurde in der Annahme, dass er schwer sein müsse, in den ersten Trials mit zu viel Kraft gefasst und angehoben. Nach etwa fünf Trials war der Kraftaufwand der Finger aber an die tatsächliche, stets gleich Masse der Objekte (390 g) angepasst.

Trotz der nun adäquaten Griff- und Hubkräfte blieben die Illusionen aber bestehen, sodass die kleinen Objekte (SWI) bzw. die styroporverkleideten Würfel (MWI) weiterhin als schwer empfunden wurden. Mithin entstand bei der MWI und der SWI eine Dissoziation zwischen der Perzeption und der Aktion, da die Gewichtstäuschung trotz eines alsbald richtig angepassten Krafteinsatzes fortbestand. Bei der TGI in dieser Arbeit gab es keine solche Dissoziation, denn die Schwerebeurteilung wurde unter den Bedingungen von Experiment 1 und 2 durch die Temperatur nicht beeinflusst. Möglicherweise sind die perzeptuellen Effekte der MWI und SWI so stark, dass sie trotz einer an das tatsächliche Gewicht adaptierten Motorik weiter andauern. Bei der MWI und SWI steht der Sinneseindruck im Widerspruch zu alltäglichen Erfahrungen („große metallische Gegenstände sind schwer“), die üblicherweise zutreffen (Buckingham, 2014). Solche geläufigen Assoziationen können nur durch sehr langes und aufwendiges Umlernen abgeschwächt werden (Flanagan et al., 2008). Die Assoziation der Kälte von Objekten mit einer großen Schwere (TGI) ist vermutlich weniger stark ausgeprägt.

Generell sorgt die passende Planung des Krafteinsatzes für einen flüssigen Bewegungsablauf, der keine Korrekturen erfordert. In die Planung wird nicht nur der gewünschte Verlauf einer Bewegung, sondern auch die Erwartung einer bestimmten sensorischen Rückmeldung integriert (z. B. ein großes Objekt wird schwer sein). Man nimmt an, dass das Gehirn über verinnerlichte Muster der Dynamik bekannter Objekte verfügt und deren Bewegungsbahn vorhersagen kann (Flanagan & Wing, 1997), wobei die Voraussage auf einem Vorhersagemodell des agierenden Körperteils beruht (meistens Arm oder Hand). Das ZNS integriert die Objektdynamik in ein inneres Modell des gesamten motorischen Systems, etwa von Ball, Hand, Wurfarm und begleitender Stützmotorik beim Werfen. Die Vorhersage schätzt

beispielsweise bei Greif-Hebe-Aktionen den Krafteinsatz ein, der nötig ist, um ein bekanntes Objekt zu fassen und in einer vorgegebenen Zeit auf eine bestimmte Höhe zu heben, wobei die Griff- und Hubkräfte laufend aufeinander abgestimmt werden (Flanagan & Wing, 1997; Johansson & Westling, 1984; Westling & Johansson, 1984). Während der Handlung werden permanent afferente Informationen aus der Peripherie an das ZNS gesendet, um im Verlauf der Aktion eine exakte Anpassung der Kräfte an die tatsächlichen Erfordernisse zu ermöglichen.

Als anatomisches Korrelat, also als Sitz der internen Modelle zur Objektdynamik, wird das Kleinhirn diskutiert, dessen Aufgabe darin besteht, derartige Modelle kontinuierlich zu aktualisieren, damit der Krafteinsatz antizipiert und gegebenenfalls an wechselnde Anforderungen angepasst wird (Hermsdörfer et al. 2005; Kawato et al. 1987, 1992, 1999, 2003; Nowak et al. 2007). Studien an Menschen mit Kleinhirnläsionen und bildgebende Verfahren gaben Hinweise, dass das Zerebellum für die antizipatorische Kontrolle von Bewegungen und deren Anpassung an Veränderungen in der Umwelt von großer Bedeutung ist (Bastian, 2006). Das Spinozerebellum erhält eine Efferenzkopie des Bewegungsplans vom motorischen Kortex, andererseits wird es über spinozerebelläre Afferenzen über den tatsächlichen Verlauf einer Bewegung informiert (Kuhz-Buschbeck, 2023). Der Vergleich der Efferenzkopie mit dieser Reafferenz lässt Abweichungen, wie z. B. einen ungewollten Kraft- und Bewegungsüberschuss, rasch erkennen.

Im Kontext gewichtsbezogener Sinnestäuschungen ist eine Studie interessant, die prüfte, ob Patienten mit degenerativen Kleinhirnschäden einer SWI unterliegen und ob sie ihre Griff- und Hubkräfte dabei an das tatsächlich identische Gewicht der unterschiedlich großen Objekte anpassen können (Rabe et al., 2009). Der perzeptuelle Effekt der SWI war durchweg nachweisbar und scheint daher unabhängig vom Kleinhirn zu sein. Überraschend war das Ergebnis zur Kraftanpassung: Auch die Patienten mit Kleinhirnschäden zeigten eine erhaltene Antizipation und Adaptation ihrer Griffkräfte, einzig die Skalierung der Hubkraft gelang ihnen etwas schlechter als Kontrollpersonen (siehe Abb. 5 in Rabe et al., 2009). Daher dürfte die Repräsentation und Adaptation interner Modelle von Objekteigenschaften nicht ausschließlich im Kleinhirn angesiedelt sein, sondern sie bezieht auch andere, bisher nicht identifizierte, Hirnareale ein, die Funktionsstörungen des Kleinhirns kompensieren können.

4.3 Mechanismen

An dieser Stelle soll noch einmal das wesentliche Ergebnis dieser Arbeit hervorgehoben werden: Lediglich in Experiment 2 („Halten“) kam es zu einer initialen Fehlskalierung der eingesetzten Kräfte, sodass kalte und kühle Objekte anfangs mit überhöhter Kraft gefasst und gehoben wurden (siehe Abb. 10 und 11). In Experiment 1 („Spüren“) war dies nicht der Fall (Abb. 8 und 9). Die bloße Berührung eines kalten Objekts reichte nicht aus, um eine Temperatur-Gewichts-Illusion hervorzurufen. Oder deutlicher formuliert: Nur die Kombination aus Temperatur und Druck auf der Haut, also das Halten eines Gegenstandes, löste eine TGI aus. Dies bestätigt eine Vorstudie, bei der sich kalte Testgewichte auf der Handfläche schwerer anfühlten als neutrale Gewichte und im späteren Experiment überdies mit mehr Kraft gefasst und angehoben wurden (Kuhnz-Buschbeck & Hagenkamp, 2020).

Als neurophysiologische Erklärung für die TGI wurde bereits vor 45 Jahren eine „ungenauere Stimulusselektivität“ mechanosensibler kutaner Afferenzen angeführt (Stevens & Green, 1978). Demnach werden kutane Mechanosensoren nicht nur durch äußere Druckreize, sondern auch durch Abkühlung erregt, woraus eine Verstärkung der taktilen Empfindung resultiert. Dies gilt insbesondere für leichte und gleichzeitig kalte Objekte (Stevens, 1979). Der Druck eines Gewichtes auf der Haut löst gemäß Stevens eine Grundaktivität der mechanosensiblen Afferenzen aus, die durch den zusätzlichen Kältereiz um einen konstanten Betrag erhöht wird. Wenn die Grundaktivität gering ist (folglich bei einem leichten Gewicht), so macht sich die thermisch bedingte Aktivitätserhöhung stärker bemerkbar, als bei einer von vornherein hohen Grundaktivität (d.h. bei einem schweren Gewicht), da dann die relative Erhöhung verhältnismäßig geringer ist (Stevens, 1979). Warum eine TGI bei einem kalten Gewicht mit großer Auflagefläche stärker ist, erklärten Stevens und Green wie folgt: Der durch eine kleine Auflagefläche punktuell erzeugte höhere Druck führe zu einer höheren Grundaktivität der Mechanosensoren. Dementsprechend würde eine Temperaturkomponente einen geringeren Einfluss bei hoher Grundaktivität haben und die TGI fiel schwächer aus (Stevens & Green 1978). Die Testgewichte der vorliegenden Arbeit waren an die Handfläche angepasst und ihre Auflagefläche war mit 44 cm² größer als die aller Aluminiumscheiben und -zylinder (3 bis 29 cm²), die Stevens und Green (1978) zum Hervorrufen der TGI benutzten.

Eine „ungenauere Stimulusselektivität“ ließ sich insbesondere an gut myelinisierten und langsam adaptierenden Afferenzen von Mechanosensoren nachweisen. Die Merkelzellen und die Ruffini-Körperchen sind langsam adaptierende kutane Mechanosensoren, deren Afferenzen der Faserklasse A β bei Abkühlung eine Zunahme der Aktionspotenzialfrequenz zeigen (Schepers & Ringkamp, 2010). Sie reagieren lebhaft auf mechanische Reize und schwach auf Kältereize. Obwohl diese Mechanosensoren auch auf Kälte reagieren, tragen sie nicht zum

allgemeinen Temperaturempfinden bei (Dunn et al., 2017). Die Untersuchungen von Dunn und Kollegen ergaben, dass nicht nur gut myelinisierte Afferenzen an der Entstehung einer TGI beteiligt sind. Mittels einer Thermode wurde auf den Handrücken von Versuchsteilnehmenden kontrolliert Druck ausgeübt, dabei wurden kühle Reize (28 °C) stärker bzw. schwerer wahrgenommen als neutrale Reize (32 °C). Daran anschließend wurden durch eine gezielte Nervenkompression die schnell leitenden A β - und A δ -Fasern ausgeschaltet, die Funktion der unmyelinisierten C-Fasern blieb jedoch erhalten. Auch wenn sich eine signifikante Reduktion der TGI zeigte, so war diese nicht vollständig aufgehoben. Anscheinend sind nicht nur gut myelinisierte Nervenfasern, sondern auch unmyelinisierte Fasern an der Entstehung der TGI beteiligt. Eventuell handelt es sich um C-Fasern mit sowohl mechano- als auch thermosensiblen Eigenschaften („C-low threshold mechanoreceptors“), deren Rolle noch nicht endgültig geklärt ist (Dunn et al., 2017).

Geht man eine Ebene tiefer und betrachtet die Zellmembranen von Thermosensoren auf ihrer molekularen Ebene, so stößt man schnell auf einige relevante Ionenkanäle. Das Temperaturempfinden wird vor allem durch das Öffnen und Schließen von TRP-Kationenkanälen bewirkt (transient receptor potential). Von diesen TRP-Kationenkanälen gibt es viele Subtypen, für Wärme- und Kältewahrnehmung variieren diese jeweils. Erwähnenswert ist, dass die TRP-Kanäle nicht nur auf verschiedene Temperaturen, sondern auch auf natürlich vorkommende chemische Verbindungen reagieren, z.B. Capsaicin in Chili, Senföl aus Knoblauch oder Menthol aus Minze (Meßlinger, 2019). Dies erklärt, warum beim Verzehr eines Mentholbonbons im Mundraum ein kühlendes Gefühl entsteht und eine scharf gewürzte Speise eine Hitzeempfindung hervorruft. Für die Kälteempfindung sind insbesondere der TRPA1- und der TRPM8-Kanal von großer Bedeutung. Während der TRPA1-Kanal vor allem auf schmerzhaftes Kälte und Senföl reagiert, ist für nicht-schmerzhaftes Kälte vor allem der TRPM8-Kanal relevant (Story et al., 2003). Der TRPM8-Kanal wird bei Temperaturen unterhalb von 26° C aktiviert und auch durch Menthol geöffnet (McKemy et al., 2002). Aber nicht nur TRPM8-Kanäle sind von Bedeutung, sondern auch eine Modulation der Leitfähigkeit für Kaliumionen (Schepers & Ringkamp, 2010). Vor wenigen Jahren wurde der KCNQ1-Kanal, ein Kaliumkanal, auch in der menschlichen Haut und in Spinalganglien nachgewiesen (Kiper et al., 2019). Zuvor war dieser Kanal unter anderem am Herzen und an Zellen des Innenohres bekannt. Die Entdeckung des KCNQ1-Kanals in der Haut und die Feststellung, dass dieser ebenfalls auf Menthol reagiert, stellte eine große Überraschung dar. Der KCNQ1-Kanal ist hochsensitiv für kühle Temperaturen, die sich im Bereich von 25 °C – 35 °C bewegen. Knockout-Mäuse, denen dieser Kanal fehlt, zeigten ein erhebliches Defizit in der Wahrnehmung moderater Kälte in Verhaltensexperimenten (Kiper et al., 2019).

Der molekulare Mechanismus der kutanen Mechanosensoren wurde erst kürzlich aufgeklärt: Es gelang, PIEZO-Ionenkanäle zu identifizieren, die für Kationen durchlässig sind und durch mechanische Reize geöffnet werden (Szczot et al., 2021). Der in der Haut gelegene PIEZO2-Kanal könnte eine bedeutende Stellung bei der Interaktion von Kälte und Berührungen einnehmen. Bei Abkühlung von 22 °C auf 12 °C erhöhte sich der Ionenfluss durch diesen Kanal, wenn gleichzeitig Druck ausgeübt wurde (Zheng et al., 2019). Kälte verstärkte also die Empfindlichkeit des Ionenkanals für mechanische Reize. Dass die PIEZO2-Kanäle sowohl kälte- als auch mechanosensitive Eigenschaften besitzen, bewirkt gemäß Zheng und Kollegen, dass die Funktionalität der Mechanosensoren bei gleichwarmen Lebewesen auch bei einer Abkühlung der Körperschale gewährleistet bleibt. Dies ist bedeutsam für die Wahrnehmung und Interaktion mit der Umwelt, denn die meisten Gegenstände sind deutlich kühler als die Körperoberfläche, dennoch bleibt das Berührungsempfinden erhalten. Der PIEZO2-Kanal kommt auch bei Vögeln vor: so können beispielsweise Enten bei der Futtersuche im kalten Wasser mit den Mechanosensoren in ihren Schnäbeln Nahrung finden.

Eine Assoziation von verspürter Kälte mit schwerem Material (Metall) könnte eine weitere Erklärung der TGI sein (Ho, 2018). Diese ist allerdings wenig plausibel, da in diesem Fall der Krafteinsatz auch in Experiment 1 („Spüren“) dieser Arbeit durch die Illusion beeinflusst worden wäre. Ferner kann Kälte den Eindruck einer scheinbar feucht-glatten Oberfläche von Objekten erwecken, was zu einer Erhöhung der Griffkraft führt (Carnahan et al., 2010). Da die Griffe der in dieser Arbeit verwendeten Testobjekte aber stets Raumtemperatur hatten (siehe Abb. 1), entfällt auch diese Erklärung. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die TGI vermutlich auf mehreren molekularen und neuronalen Mechanismen und deren Interaktionen beruht, wobei es bisher keine endgültige Erklärung gibt. Viele Befunde sprechen für eine kälteinduzierte Erregung von Mechanosensoren. Eine mögliche Beteiligung kortikaler Areale an der Entstehung der Täuschung wird im nächsten Abschnitt diskutiert.

4.4 Neurophysiologie der Motorik und Sensorik

Da in den Experimenten dieser Arbeit die Auswirkungen der TGI auf die Feinmotorik, genauer gesagt auf die Skalierung der Kräfte des Präzisionsgriffs untersucht wurde, sei hier die Neurophysiologie der Sensomotorik zusammenfassend vorgestellt: Es handelt sich um ein komplexes System mit mehreren Ebenen, bestehend aus verschiedenen Nervenbahnen, kortikalen und subkortikalen Zentren und zuletzt den spinalen α -Motoneuronen, welche die ausführende Muskulatur innervieren. All diese Ebenen müssen reibungslos ineinandergreifen und miteinander agieren. Im Gegensatz zu einfachen Reflexen, die prinzipiell von Instanzen des Rückenmarks und des Hirnstamms vermittelt werden, sind an der Planung und

Durchführung gezielter motorischer Aktionen viele kortikale und subkortikale Strukturen beteiligt.

Der primär motorische Kortex (Brodmann-Areal 4) liegt im Gyrus präzentralis direkt vor der Zentralfurche. Von einem Teil seiner Pyramidenzellen gehen direkte monosynaptische efferente Verbindungen zu den α -Motoneuronen aus, die Arm- und Handmuskeln innervieren. Diese direkte kortikomotoneuronale Verbindung gilt als typisch für Primaten und ist wesentlich für die neuronale Kontrolle der geschickten Feinmotorik, welche nach Läsionen der Pyramidenbahn verloren geht (Lemon, 2008). Der primär motorische Kortex bildet durch seine direkte Projektion zu den α -Motoneuronen des Rückenmarks über die Pyramidenbahnen die maßgebende Schaltzentrale und Ausgangsstation bei der Ausführung feinmotorischer Bewegungen, einschließlich des Präzisionsgriffs (Bennett & Lemon, 1996; Muir & Lemon, 1983). Der primär sensorische Kortex, im Gyrus postzentralis gelegen (Brodmann Areale 1-3), steht in sehr enger Verbindung mit dem primär motorischen Kortex. Beide Hirnrindenfelder sind somatotop gegliedert, d.h. alle Körperteile sind kontralateral einem expliziten Abschnitt des Kortex zugeordnet, wobei Körperregionen, die für die Feinmotorik wichtig sind, überproportional groß repräsentiert sind (Trepel, 2021). Eine bildliche Darstellung dieser Verhältnisse ergibt den motorischen und sensorischen Homunkulus.

Vor einer Willkürbewegung entsteht ein „Bewegungswunsch“ unter Beteiligung des limbischen Systems. Nach dem Entschluss folgt die Erstellung eines Bewegungsplans in sekundären motorischen Kortexarealen. Es folgt der Weg über verschiedene Zwischeninstanzen und Rückkopplungsschleifen - die Kleinhirn, Basalganglien und Thalamus inkludieren - zum primär motorischen Kortex. Im Anschluss kommt es über absteigende Bahnen schlussendlich zur Kontraktion der Skelettmuskulatur. Ohne permanente Rückmeldungen aus der Peripherie wären präzise und effiziente Bewegungen nicht möglich. Wesentlich sind propriozeptive Afferenzen (z.B. der Muskelspindeln) und Afferenzen der Mechanosensoren, deren Aktivität beim Fassen und Heben von Objekten relevante Ereignisse markiert, so wie die erste Berührung des Gegenstandes, ein leichtes Kippen beim Anheben oder auch ein ungewolltes Abrutschen der Finger an den Griffflächen (Johansson, 1996).

Rostral des primär motorischen Kortex liegen sekundär motorische Rindenfelder (Brodmann Areal 6). Dazu gehören die medial gelegene supplementär-motorische Area und die weiter lateral gelegenen dorsalen und ventralen prämotorischen Kortexgebiete (Kuhz-Buschbeck, 2023). Die sekundär motorischen Kortizes sind für die Bewegungsplanung zuständig und mit dem primär motorischen Kortex eng vernetzt. Schon etwa eine Sekunde vor einer selbst initiierten Willkürbewegung ist die supplementär-motorische Area aktiv – dies unterstreicht ihre Rolle bei der Einleitung von Aktionen. Erfahrungen und Erwartungen hinsichtlich der

Eigenschaften von Objekten werden, wie mehrfach erwähnt, zur Planung des passenden Krafteinsatzes beim Greifen und Heben berücksichtigt (Johansson, 1996; Westling & Johansson, 1984). Der dorsale prämotorische Kortex hat dabei unter anderem die Funktion, relevante visuelle Hinweise zu nutzen (z.B. „das rot markierte Gewicht ist schwer“) und, zusammen mit räumlichen Informationen, in die Planung von Bewegung und Kraftaufwand einfließen zu lassen (Chouinard & Paus, 2006). Auch der ventral prämotorische Kortex hat visuomotorische Funktionen, zu denen die passende Formung der greifenden Hand während der Annäherung an ein Objekt gehört (Fogassi et al., 2001). Der primär motorische Kortex, der keine visuellen Afferenzen erhält, verwendet die von den prämotorischen Feldern aufbereitete Information für die Steuerung der kontralateralen Arm- und Handmuskeln (Kuhz-Buschbeck, 2023).

Auch bei einer gewichtsbezogenen Sinnestäuschung, der SWI, kam es zu einer spezifischen Aktivität des ventral prämotorischen Kortex. Chouinard und Kollegen untersuchten mittels funktioneller Kernspintomographie Probanden, die im Scanner zylindrische Objekte fassten und hoben, deren Größe, Gewicht und Dichte variierten (Chouinard et al., 2009). Bei der SWI-Bedingung hatten zwei mit Plastik umkleidete Zylinder unterschiedlicher Größe dasselbe Gewicht, sodass sich ihr spezifisches Gewicht (ihre Dichte) unterschied. Die Aktivität des primär motorischen Kortex korrelierte mit der Masse, die Aktivität in sensorischen Hirnrindenfeldern mit der Größe, die Aktivität des ventral prämotorischen Kortex mit der Dichte der verschiedenen Objekte. Das letztgenannte Kortexareal reagierte dann besonders stark, wenn die Versuchspersonen wegen der SWI fälschlicherweise Gewichtsunterschiede wahrnahmen, also getäuscht wurden. Die subjektiv wahrgenommene Schwere eines Objekts, welche von dessen spezifischem Gewicht maßgeblich beeinflusst wird (kleiner Zylinder = besonders dicht = schwer), ist vermutlich im prämotorischen Kortex repräsentiert, der im Kontext der SWI sensorische Informationen über die Größe und das Gewicht von Gegenständen integriert (Chouinard et al., 2009). Ob dabei auch die Temperatur eines Objektes berücksichtigt wird und damit im prämotorischen Kortex repräsentiert wird, ist bislang unbekannt.

Schlagen wir einen Bogen zurück zur vorliegenden Arbeit und betrachten die neuronalen Strukturen, die unverzichtbar für die Verarbeitung und Wahrnehmung von thermischen Reizen sind. Außer den peripheren Thermosensoren und ihren afferenten Bahnen sind dies der Thalamus als Schaltstation und diverse Kortexgebiete. Die zentrale neuronale Verarbeitung von Kältereizen wurde durch die Forschungsgruppe um Poulet durch Experimente mit Mäusen erforscht. Die Wissenschaftler konnten zeigen, dass Kühlen der Vorderpfotenballen zu neuronaler Aktivität des primär somatosensorischen Kortex führt, der auch Berührungsreize verarbeitet (Milenkovic et al., 2014). Dieses Ergebnis war bahnbrechend, da man bis dato

davon ausgegangen war, dass der somatosensorische Kortex zwar mechanische, aber keine thermischen Reize verarbeitet. Die Frage, ob es einen „thermischen Kortex“ gibt, welcher auf die Verarbeitung von Temperaturreizen spezialisiert ist, konnte erst kürzlich beantwortet werden (Vestergaard et al., 2023). Vestergaard und Mitarbeitende führten dazu ebenfalls Experimente mit Mäusen durch: Die Ballen der Vorderpfoten wurden mit auf- und absteigenden Temperaturen zwischen 10 und 42 °C gereizt - mithilfe bildgebender Verfahren (2-Photonen-Kalzium-Imaging) wurde untersucht, welche Hirnareale darauf reagierten. Das Ergebnis: Der primär somatosensorische Kortex reagiert nur auf Kältereize, während die hintere Inselrinde, gelegen in der Falte oberhalb des Temporallappens, bei Erwärmung und Abkühlung aktiv wird und daher als „thermischer Kortex“ in der bildlichen Darstellung aufleuchtet. Zudem scheint die hintere Inselrinde eine somatotopie Gliederung aufzuweisen, d.h. benachbarte Neurone kodieren Information von benachbarten Stellen des Körpers. Es gibt Neurone, die nur auf Kälte oder Wärme und solche, die auf beides reagieren. Die Nervenzellen reagieren unterschiedlich: Die für Kälte zuständigen Neurone sprechen auf relative Temperaturunterschiede mit einer schnellen Reaktion an, da selbst bei geringer Abkühlung nahezu die gesamten Kälteuronen reagieren. Die Wärmeneurone hingegen sprechen eher auf absolute Temperaturen an und reagieren verzögert, d.h. initial reagieren nur wenige Neurone und erst bei höheren Temperaturen werden die restlichen Wärmeneurone aktiv (Vestergaard et al., 2023).

Die gemeinsame Verarbeitung von Kälte- und Berührungsreizen im primär somatosensorischen Kortex (Milenkovic et al., 2014; Vestergaard et al. 2023) ist möglicherweise ein zentrales Korrelat der Temperatur-Gewichts-Illusion (TGI). Falls auch beim Menschen identische Nervenzellen des somatosensorischen Kortex sowohl durch Kühlung als auch durch mechanische Reizung der Haut (Druck, Berührung) aktiviert werden, so könnte dies die Gewichtstäuschung erklären - und zwar auch ohne den peripheren Mechanismus der „ungenauen Stimulusselektivität“ mechanosensibler Afferenzen (siehe Abschnitt 4.3). Die Konvergenz getrennter afferenter Bahnen, die einerseits Temperatur- und andererseits Druck- und Berührungsreize vermitteln, auf gemeinsame kortikale (oder thalamische) Neurone würde als Erklärung der TGI ausreichen. Das Prinzip der Konvergenz begründet bekanntermaßen den auf die Körperoberfläche übertragenen Schmerz (Head-Zonen) bei Schädigung innerer Organe (Meßlinger, 2019), den man auch als eine Art Sinnestäuschung ansehen kann. Beim Menschen sind allerdings direkte, räumlich und zeitlich hochauflösende Messungen der Aktivität kortikaler Neurone wie in den oben genannten Studien nicht möglich.

Mittels funktioneller Kernspintomographie konnte jedoch kürzlich gezeigt werden, dass diverse Kortexgebiete bei thermischer Reizung der Haut aktiv werden. Nagashima und Mitarbeitende applizierten wechselnde, nicht-schmerzhaft stimuli (von 22 bis 40 °C) am linken Unterarm

von Versuchspersonen, die die jeweilige Temperatur zeitweise explizit bewerteten, zeitweise aber auch unbewertet ließen. Unabhängig von der Reizbewertung waren der anteriore cinguläre und der inferiore frontale Kortex aktiv, ferner der Gyrus postcentralis, beide Inselregionen und posterior-parietale Rindenfelder (Nagashima et al., 2022, siehe deren Tabelle 2). Die explizite Reizbewertung führte zu stärkerer Aktivität fronto-parietaler Kortexareale der rechten Hemisphäre. In einer früheren Studie wurden schmerzhafte (46 °C) und nicht-schmerzhafte (41 °C) thermische Reize am Handrücken verabreicht und geprüft, welche Hirnregionen aktiviert werden (Becerra et al., 1999). Neben der Beteiligung der oben genannten Areale zeigte sich zusätzliche Aktivität im Thalamus, dem supplementär-motorischen Kortex und im Kleinhirn, ferner in der Amygdala und im Hypothalamus. Schmerzhafte Reize führten zu stärkerer Aktivität als nicht-noxische Reize. Messungen der spezifisch während einer TGI auftretenden Hirnaktivität mittels funktioneller Kernspintomographie oder anderer geeigneter bildgebender Verfahren fehlen bislang.

4.5 Methodenkritik

Menschliche Bewegungsabläufe sind komplex und abhängig von einer Vielzahl an zentralen und peripheren Instanzen und Einflüssen. Nur wenige Aspekte der TGI wurden mit den Experimenten dieser Arbeit erfasst. Eine Ausweitung, Veränderung und Optimierung zukünftiger Versuchsreihen sind denkbar. Anzumerken wäre, dass die Temperatur der Handflächen von den Teilnehmenden durchschnittlich $31,5 \pm 0,44$ °C betrug. Dies entspricht zwar annähernd der Temperatur der neutralen Testgewichte (32 °C), jedoch konnte die neutrale Temperatur nicht exakt der Hauttemperatur jeder Versuchsperson angepasst werden. In der vorliegenden Arbeit wurden Testgewichte mit einer Masse von 700 g verwendet, die im Vergleich zum ursprünglichen Weber-Phänomen und den nachfolgenden Versuchen von Stevens und Kollegen deutlich größer und schwerer waren. Weber benutzte Silbertaler in seinen Experimenten, die vermutlich etwa 30 g schwer waren (Weber, 1846). Stevens und Green (1978) verwendeten kleine und große Aluminiumzylinder mit einem Gewicht von 4,5 bis 45 g bzw. 10 bis 100 g, die auf die Stirn und den Unterarm von Versuchspersonen gelegt wurden. Es könnte spannend sein, den Versuchsaufbau abzuwandeln, um herauszufinden, wie die TGI sich bei verschiedenen, auch leichteren, Gewichten mit unterschiedlichen Temperaturen verhält.

Die Temperatur der Testobjekte wurde in der vorliegenden Studie ausschließlich mit der Handfläche der nicht-dominanten Hand gespürt. An der Handfläche ist die TGI allerdings schwächer ausgeprägt als an anderen Körperarealen wie Unterarm, Oberarm und Oberschenkel (Stevens, 1979). Die Einbeziehung dieser Gebiete wäre daher interessant.

Beispielsweise könnten Gewichte unterschiedlicher Temperatur vom Unterarm der nicht-dominanten Seite oder vom Oberschenkel gehoben werden, um zu untersuchen, ob die TGI an verschiedenen Körperregionen einen unterschiedlichen Einfluss auf die Motorik hat. In der aktuellen Studie gaben die Teilnehmenden nach jedem Greifen und Heben des Objekts eine Einschätzung der Schwere ab. Wie den Ergebnissen dieser Arbeit zu entnehmen ist, ergaben sich keine signifikanten Resultate im Hinblick auf die Einschätzung der Schwere. Hier könnte in Folgestudien ein separates Experiment zur Perzeption ohne Greif- und Hebeaktionen vorangestellt werden unter der Fragestellung, ob verschiedene Temperaturabstufungen eine abgestufte TGI hervorrufen. Interessant wäre dabei, wie sich die Schwerebeurteilung vor und nach einer motorischen Aktion verhält. Insgesamt dauerten die Experimente pro Teilnehmenden etwa zwei Stunden mit nur kurzen Unterbrechungen. Die Greif-Hebeexperimente waren zeitintensiv und monoton, was die Aufmerksamkeit der Probanden beeinträchtigt haben könnte. Weitere Variationen und Versuchsvariablen hätten die Experimente noch mehr in die Länge gezogen. Eine größere Probandenanzahl mit Einschluss einer weiten Altersstreuung könnte Aufschluss über eine mögliche Ausprägung der TGI in Abhängigkeit von Alter und Geschlecht geben. Die Untersuchung neurologisch erkrankter Patienten, etwa mit Neuropathien unmyelinisierter afferenter Nervenfasern, könnte eventuelle Hinweise auf neuronale Mechanismen geben, die zur kälte- und wärmeinduzierten Gewichtsillusion führen oder die TGI abschwächen.

5 Zusammenfassung

Beim Ergreifen von Gegenständen von unterschiedlicher Beschaffenheit schafft der Mensch es, seine Kräfte genau an die physikalischen Eigenschaften anzupassen. Die Interaktionen von Mensch und Umwelt führen manchmal zu Sinnestäuschungen. In dieser Arbeit wurde die Temperatur-Gewichts-Illusion (TGI) untersucht, eine kognitiv-motorische Illusion. Die TGI besagt, dass sich kalte Objekte auf der Haut schwerer anfühlen als handwarme Objekte des gleichen Gewichts. Bisher wurde nicht untersucht, ob das alleinige Wahrnehmen der Temperatur ausreicht, um eine TGI auszulösen. Zudem war nicht bekannt, ob es einen abgestuften Effekt der TGI gibt, d.h. ob kalte und kühle Objekte mit anderem Krafteinsatz gegriffen werden als handwarme Objekte gleichen Gewichts. 20 gesunde Personen wurden einer Reihe von drei Experimenten unterzogen. Im ersten Versuch „Spüren“ durften die Teilnehmer verschieden temperierte (16°C, 24°C, 32°C) Gewichte gleicher Masse (700g) lediglich mit der Handfläche ihrer nicht-dominanten Hand von unten berühren, um die Temperatur wahrzunehmen. Auf einen Signalton hin wurden die Gewichte gegriffen und angehoben. Zeitgleich wurden mittels Kraftsensoren die Fingerkräfte gemessen. Am Ende der Greif-Hebe-Aktion wurden die Personen gebeten, anhand von Zahleneinschätzungen die Schwere des soeben gehobenen Gewichts zu beurteilen. Im zweiten Versuch wurden die individuellen thermischen Empfindungs- und Schmerzschwellen bestimmt. Im dritten Experiment „Halten“ wurden, anders als im ersten Versuch, den Probanden die Gewichte direkt auf die Handfläche der nicht-dominanten Hand gelegt und dann gefasst und gehoben. Im ersten Experiment („Spüren“) konnte weder anhand der Zahlenangaben noch anhand der gemessenen Fingerkräfte die TGI nachgewiesen werden. Im Gegensatz dazu haben sich im Experiment „Halten“ signifikante Ergebnisse gezeigt: in den initialen Trials wurden die kalten und kühlen Gewichte mit einer höheren Kraft gegriffen. Jedoch bereits nach zweimaligem Fassen und Anheben waren keine signifikanten temperaturabhängigen Unterschiede in den Griffkräften mehr nachweisbar. Es kam zu einer Anpassung des Krafteinsatzes an das tatsächliche Gewicht und die TGI „verschwand“. In beiden Experimenten gab es keine bewusste Wahrnehmung der Illusion, d.h. die kalten und kühlen Objekte wurden nicht als schwerer wahrgenommen. Es gab keinen bedeutsamen Zusammenhang zwischen den individuellen thermischen Empfindungs- und Schmerzschwellen und der Stärke der TGI. Erstmals wurde in dieser Arbeit nachgewiesen, dass zum Auslösen der TGI die bloße Berührung eines Gegenstandes nicht ausreicht: das Objekt muss zeitgleich Druck auf die Haut ausüben. Lediglich dann kommt es in den ersten Greif-Hebe-Aktionen zu einer Fehlskalierung der Fingerkräfte, die sich jedoch rasch an das tatsächliche Gewicht anpassen. Als Erklärungsansatz werden kutane Mechanosensoren und ihre Vielzahl von verschiedenen Ionenkanälen vermutet, die durch Kältereize zusätzlich inadäquat erregt werden.

6 Literaturverzeichnis

- Annett, M. (1970). A Classification of Hand Preference by Association Analysis. *British Journal of Psychology*, 61(3), 303–321. <https://doi.org/10.1111/j.2044-8295.1970.tb01248.x>
- Bastian, A.J. (2006). Learning to predict the future: the cerebellum adapts feedforward movement control. *Current Opinion in Neurobiology*, 16(6), 645–649. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2006.08.016>
- Baugh, L.A., Kao, M., Johansson, R.S., & Flanagan, J.R. (2012). Material evidence: Interaction of well-learned priors and sensorimotor memory when lifting objects. *Journal of Neurophysiology*, 108(5), 1262–1269. <https://doi.org/10.1152/jn.00263.2012>
- Becerra, L.R., Breiter, H.C., Stojanovic, M., Fishman, S., Edwards, A., Comite, A.R, Gonzalez, R.G, & Borsook, D. (1999). Human brain activation under controlled thermal stimulation and habituation to noxious heat: an fMRI study. *Magnetic Resonance in Medicine*, 41(5), 1044–1057. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1522-2594\(199905\)41:5%3C1044::AID-MRM25%3E3.0.CO;2-M](https://doi.org/10.1002/(SICI)1522-2594(199905)41:5%3C1044::AID-MRM25%3E3.0.CO;2-M)
- Bennett, K.M. & Lemon, R.N. (1996). Corticomotoneuronal contribution to the fractionation of muscle activity during precision grip in the monkey. *Journal of Neurophysiology* 75(5), 1826–1842. <https://doi.org/10.1152/jn.1996.75.5.1826>
- Bensmail, D., Sarfeld, A.-S., Fink, G. R., & Nowak, D. A. (2009). Sensorimotor processing in the grip–lift task: The impact of maximum wrist flexion/extension on force scaling. *Clinical Neurophysiology*, 120(8), 1588–1595. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2009.05.007>
- Brayanov, J.B., & Smith, M.A. (2010). Bayesian and “Anti-Bayesian” Biases in Sensory Integration for Action and Perception in the Size–Weight Illusion. *Journal of Neurophysiology*, 103(3), 1518–1531. <https://doi.org/10.1152/jn.00814.2009>
- Buckingham, G., Cant, J.S., & Goodale, M.A. (2009). Living in A Material World: How Visual Cues to Material Properties Affect the Way That We Lift Objects and Perceive Their Weight. *Journal of Neurophysiology*, 102(6), 3111–3118. <https://doi.org/10.1152/jn.00515.2009>
- Buckingham, G., & Goodale, M.A. (2010). Lifting without Seeing: The Role of Vision in Perceiving and Acting upon the Size Weight Illusion. *PLoS ONE*, 5(3), e9709. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0009709>
- Buckingham, G. (2014). Getting a grip on heaviness perception: a review of weight illusions and their probable causes. *Experimental Brain Research*, 232(6), 1623–1629. <https://doi.org/10.1007/s00221-014-3926-9>

Carnahan, H., Dubrowski, A., & Grierson, L.E.M. (2010). Temperature influences both haptic perception and force production when grasping. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 40(1), 55–58. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2009.08.008>

Charpentier, A. (1891). Analyse expérimentale de quelques éléments de la sensation de poids. *Archive de Physiologie normale et pathologiques*, 3, 122–135. Abgerufen am 10.8.23: <https://digitalesammlungen.uni-weimar.de/viewer/fulltext/lit14670/2/>

Chouinard, P.A., Large, M.E., Chang, E.C., & Goodale, M.A. (2009). Dissociable neural mechanisms for determining the perceived heaviness of objects and the predicted weight of objects during lifting: an fMRI investigation of the size-weight illusion. *Neuroimage*, 44(1), 200-212. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2008.08.023>

Chouinard, P.A., & Paus, T. (2006). The Primary Motor and Premotor Areas of the Human Cerebral Cortex. *The Neuroscientist*, 12(2), 143–152. <https://doi.org/10.1177/1073858405284255>

Cole, K. J., Potash, M., & Peterson, C. (2008). Failure to disrupt the ‘sensorimotor’ memory for lifting objects with a precision grip. *Experimental Brain Research*, 184(2), 157–163. <https://doi.org/10.1007/s00221-007-1088-8>

De Camp, J.E. (1917). The influence of color on apparent weight. A preliminary study. *Journal of Experimental Psychology*, 2(5), 347–370. <https://doi.org/10.1037/h0075903>

Dunn, J.S., Mahns, D.A., & Nagi, S.S. (2017). Why does a cooled object feel heavier? Psychophysical investigations into the Weber’s Phenomenon. *BMC Neuroscience*, 18, 4. <https://doi.org/10.1186/s12868-016-0322-3>

Ellis, R.R., & Lederman, S.J. (1998). The Golf-Ball Illusion: Evidence for Top-down Processing in Weight Perception. *Perception*, 27(2), 193–201. <https://doi.org/10.1068%2Fp270193>

Flanagan, J.R., & Beltzner, M.A. (2000). Independence of perceptual and sensorimotor predictions in the size–weight illusion. *Nature Neuroscience*, 3(7), 737–741. <https://doi.org/10.1038/76701>

Flanagan, J.R., Bittner, J.P., & Johansson, R.S. (2008). Experience Can Change Distinct Size-Weight Priors Engaged in Lifting Objects and Judging their Weights. *Current Biology*, 18(22), 1742–1747. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2008.09.042>

Flanagan, J.R., & Wing, A.M. (1997). The Role of Internal Models in Motion Planning and Control: Evidence from Grip Force Adjustments during Movements of Hand-Held Loads. *The Journal of Neuroscience*, 17(4), 1519–1528.

<https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.17-04-01519.1997>

Fogassi, L., Gallese, V., Buccino, G., Craighero, L., Fadiga, L., & Rizzolatti, G. (2001). Cortical mechanism for the visual guidance of hand grasping movements in the monkey: A reversible inactivation study. *Brain*, 124(3), 571–586. <https://doi.org/10.1093/brain/124.3.571>

Gordon, A.M., Forssberg, H., Johansson, R. S., & Westling, G. (1990). Visual size cues in the programming of manipulative forces during precision grip. *Experimental Brain Research* 83, 477-482. <https://doi.org/10.1007/BF00229824>

Gordon, A.M., Westling, G., Cole, K.J., & Johansson, R.S. (1993). Memory representations underlying motor commands used during manipulation of common and novel objects. *Journal of Neurophysiology*, 69(6), 1789–1796. <https://doi.org/10.1152/jn.1993.69.6.1789>

Hermisdörfer, J., Nowak, D.A., Lee, A., Rost, K., Timmann, D., Mühlau, M. & H. Boecker (2005). The representation of predictive force control and internal forward models: evidence from lesion studies and brain imaging. *Cognitive Processing*, 6, 48–58.

<https://doi.org/10.1007/s10339-004-0042-y>

Ho, H.-N. (2018). Material recognition based on thermal cues: Mechanisms and applications. *Temperature*, 5(1), 36–55. <https://doi.org/10.1080/23328940.2017.1372042>

Johansson, R.S., & Westling, G. (1984). Roles of glabrous skin receptors and sensorimotor memory in automatic control of precision grip when lifting rougher or more slippery objects. *Experimental Brain Research*, 56, 550–564. <https://doi.org/10.1007/BF00237997>

Johansson, R. S., & Westling, G. (1988). Coordinated isometric muscle commands adequately and erroneously programmed for the weight during lifting task with precision grip. *Experimental Brain Research*, 71, 59–71. <https://doi.org/10.1007/BF00247522>

Johansson, R.S. (1996). Sensory Control of Dexterous Manipulation in Humans. In: A.M. Wing, P. Haggard, & J.R. Flanagan (Hrsg.), *Hand and Brain. The Neurophysiology and Psychology of Hand Movements*. 1. Auflage, S. 381–414, Academic Press, San Diego.

Kawato, M., Furukawa, K. & Suzuki, R. (1987). A hierarchical neural-network model for control and learning of voluntary movement. *Biological Cybernetics*, 57, 169–185.

<https://doi.org/10.1007/BF00364149>

Kawato, M., & Gomi, H. (1992). A computational model of four regions of the cerebellum based on feedback-error learning. *Biological Cybernetics*, 68, 95–103.

<https://doi.org/10.1007/BF00201431>

Kawato M. (1999). Internal models for motor control and trajectory planning. *Current Opinion in Neurobiology*, 9, 718–727. [https://doi.org/10.1016/S0959-4388\(99\)00028-8](https://doi.org/10.1016/S0959-4388(99)00028-8)

Kawato, M., Kuroda, T., Imamizu, H., Nakano, E., Miyauchi, S., & Yoshioka, T. (2003). Internal forward models in the cerebellum: fMRI study on grip force and load force coupling. *Progress in Brain Research*, 142, 171–188. [https://doi.org/10.1016/S0079-6123\(03\)42013-X](https://doi.org/10.1016/S0079-6123(03)42013-X)

Kiper, A.K., Wegner, S., Kadala, A., Bertoune, M.A.R., Touska, F., Matschke, V., Wrobel, E., Streit, A.K., Rinné, S., Seeböhm, G., Völkl, J., Lang, F., Zimmermann, K., & Decher, N. (2019). KCNQ1 an unexpected mediator of cold avoidance. *Acta Physiologica*, 227, (Special Issue S719), Oral Session 06-05. <https://doi.org/10.1111/apha.13383>

Kuhtz-Buschbeck, J.P. (2023). Sensomotorik. In S. Gründer & K.-D. Schlüter (Hrsg.), *Physiologie hoch2*, 2. Auflage, S. 635–669, Elsevier, München.

Kuhtz-Buschbeck, J.P., Andresen, W., Göbel, S., Gilster, R., & Stick, C. (2010). Thermoreception and nociception of the skin: A classic paper of Bessou and Perl and analyses of thermal sensitivity during a student laboratory exercise. *Advances in Physiology Education*, 34(2), 25–34. <https://doi.org/10.1152/advan.00002.2010>

Kuhtz-Buschbeck, J.P., & Hagenkamp, J. (2020). Cold and heavy: grasping the temperature-weight illusion. *Experimental Brain Research*, 238, 1107–1117.

<https://doi.org/10.1007/s00221-020-05794-y>

Lemon, R.N. (2008). Descending Pathways in Motor Control. *Annual Review of Neuroscience*, 31(1), 195–218. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.31.060407.125547>

McKemy, D.D., Neuhausser, W.M., & Julius, D. (2002). Identification of a cold receptor reveals a general role for TRP channels in thermosensation. *Nature*, 416, 52–58.

<https://doi.org/10.1038/nature719>

Meßlinger, K. (2019). Somatoviszzerale Sensibilität. In H.-C. Pape, A. Kurtz, & S. Silbernagl (Hrsg.), *Physiologie* (9. Aufl.), S. 705–738. Georg Thieme Verlag, Stuttgart.

<https://doi.org/10.1055/b-006-163285>

Milenkovic, N., Zhao, W.J., Walcher, J., Albert, T., Siemens, J., Lewin, G.R., & Poulet, J.F.A. (2014). A somatosensory circuit for cooling perception in mice. *Nature Neuroscience*, 17, 1560–1566. <https://doi.org/10.1038/nn.3828>

- Muir, R.B., & Lemon, R.N. (1983). Corticospinal neurons with a special role in precision grip. *Brain Research*, 261(2), 312-316. [https://doi.org/10.1016/0006-8993\(83\)90635-2](https://doi.org/10.1016/0006-8993(83)90635-2)
- Murray, D.J., Ellis, R.R., Bandomir, C.A., & Ross, H.E. (1999). Charpentier (1891) on the size-weight illusion. *Perception & Psychophysics*, 61(8), 1681–1685. <https://doi.org/10.3758/BF03213127>
- Müller, G.E., & Schumann, F. (1889). Über die psychologischen Grundlagen der Vergleichung gehobener Gewichte. *Pflügers Archiv für die gesamte Physiologie des Menschen und der Tiere*, 45, 37–112. <https://doi.org/10.1007/BF01789714>
- Nagashima, K., Nakata, H., Harada, T., Kato, I., & Sadato, N. (2022) Differences in the neural networks of thermal sensation with and without evaluation process. *IBRO Neuroscience Reports*, 13, 274–283. <https://doi.org/10.1016/j.ibneur.2022.09.006>
- Nowak, D.A., Topka, H., Timmann, D., Boecker, H., & Hermsdörfer, J. (2007). The role of the cerebellum for predictive control of grasping. *Cerebellum*, 6, 7–17. <https://doi.org/10.1080/14734220600776379>
- Nowak, D.A., Glasauer, S., & Hermsdörfer, J. (2013). Force control in object manipulation—A model for the study of sensorimotor control strategies. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 37(8), 1578–1586. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2013.06.003>
- Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9(1), 97–113. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(71\)90067-4](https://doi.org/10.1016/0028-3932(71)90067-4)
- Parikh, P.J., & Cole, K.J. (2011). Limited persistence of the sensorimotor memory when transferred across prehension tasks. *Neuroscience Letters*, 494(2), 94–98. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2011.02.066>
- Professorenkatalog der Universität Leipzig—Die Professoren-Datenbank für Leipzig.* (o. J.). Abgerufen 23.8.2022: https://research.uni-leipzig.de/catalogus-professorum-lipsiensium/leipzig/Weber_1030/
- Rabe, K. Brandauer, B., Li, Y., Gizewski, ER., Timmann, D., & Hermsdörfer, J. (2009). Size-Weight Illusion, Anticipation, and Adaption of Fingertip Forces in Patients With Cerebellar Degeneration. *Journal of Neurophysiology*, 101(2), 569–579. <https://doi.org/10.1152/jn.91068.2008>

- Rolke, R., Baron, R., Maier, C., Tölle, T.R., Treede, D.R., Beyer, A., Binder, A., Birbaumer, N., Birklein, F., Böteler, I.C., Braune, S., Flor, H., Häge, V., & Klug, R. *et al.* (2006). Quantitative sensory testing in the German Research Network on Neuropathic Pain (DFNS): Standardized protocol and reference values: *Pain*, 123(3), 231–243.
<https://doi.org/10.1016/j.pain.2006.01.041>
- Schepers, R.J., & Ringkamp, M. (2010). Thermoreceptors and thermosensitive afferents. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 33(3), 205–212.
<https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2008.07.009>
- Stevens, J.C. (1979). Thermal intensification of touch sensation: Further extensions of the Weber phenomenon. *Sensory Processes*, 3(3), 240–248. PMID: 555553.
- Stevens, J. C., & Green, B. G. (1978). Temperature-Touch Interaction: Weber's phenomenon Revisited. *Sensory Processes*, 2, 206–219. PMID: 749202.
- Stevens, J. C., & Hooper, J. E. (1982). How skin and object temperature influence touch sensation. *Perception & Psychophysics*, 32(3), 282–285.
<https://doi.org/10.3758/BF03206232>
- Story, G.M., Peier, A.M., Reeve, A.J., Eid, S.R., Mosbacher, J., Hricik, T.R., Earley, T.J., Hergarden, A.C., Andersson, D.A., Hwang, S.W., McIntyre, P., Jegla, T., Bevan, S., & Patapoutian, A. (2003). ANKTM1, a TRP-like Channel Expressed in Nociceptive Neurons, Is Activated by Cold Temperatures. *Cell*, 112(6), 819–829.
[https://doi.org/10.1016/S0092-8674\(03\)00158-2](https://doi.org/10.1016/S0092-8674(03)00158-2)
- Szczot, M., Nickolls, A.R., Lam, R.M., & Chesler, A.T. (2021). The Form and Function of PIEZO2. *Annual Review of Biochemistry*, 90, 507–534.
<https://doi.org/10.1146/annurev-biochem-081720-023244>
- Trepel, M. (2021). *Neuroanatomie: Struktur und Funktion*. 8. Auflage, Elsevier, München.
- Vestergaard, M., Carta, M., Güney, G., & Poulet, J.F.A. (2023). The cellular coding of temperature in the mammalian cortex. *Nature*, 614, 725–731.
<https://doi.org/10.1038/s41586-023-05705-5>
- Weber, E. H. (1846). Der Tastsinn und das Gemeingefühl. In R. Wagner, *Handwörterbuch der Physiologie mit Rücksicht auf physiologische Pathologie*, III. Band, 2. Abtheilung, S. 481–588, Vieweg und Sohn, Braunschweig, digitalisierte Ausgabe am 10.8.23 abgerufen unter https://archive.org/details/bub_gb_hGJEAACAAJ_2/page/n487/mode/2up
- Westling, G., & Johansson, R.S. (1984). Factors influencing the force control during precision grip. *Experimental Brain Research*, 53(2), 277–284. <https://doi.org/10.1007/BF00238156>

Zheng, W., Nikolaev, Y.A., Gracheva, E.O., & Bagriantsev, S.N. (2019). Piezo2 integrates mechanical and thermal cues in vertebrate mechanoreceptors. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(35), 17547–17555. <https://doi.org/10.1073/pnas.1910213116>

7 Anhang

8 Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen beteiligten Personen meinen großen Dank aussprechen, die mich bei der Anfertigung dieser Dissertation unterstützt haben.

Zuallererst geht besonderer persönlicher Dank an meinen Doktorvater, Herrn Prof. Dr. med. J. P. Kuhtz-Buschbeck. Ich danke ihm für seine ausgezeichnete Betreuung und die enorme Unterstützung bei der Durchführung und Umsetzung der gesamten Arbeit. Hervorzuheben sind insbesondere seine unermüdliche Hilfe, sein reges Engagement und Unterstützung bei den Experimenten. Ohne seine Hilfestellung, Anregungen und Verbesserungsvorschläge wäre diese Arbeit nie das geworden, was sie jetzt ist.

Zudem möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. med. M. Bleich für die Ermöglichung einer Promotion am Physiologischen Institut der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel bedanken.

Des Weiteren möchte ich mich bei meiner Familie und meinem Ehemann bedanken, die mich auf meinem Weg im Studium vom ersten Tag an tatkräftig mit produktiven Gesprächen und lieben Worten unterstützt haben. Ich danke euch für eure Geduld und Ermutigungen während der Arbeit an dieser Dissertation.

Zu guter Letzt möchte ich gerne einen Dank an alle Freunde, Bekannte und Versuchsteilnehmende aussprechen, ohne deren Mitwirken an den Experimenten wäre diese Doktorarbeit nie zustande gekommen.

9 Publikationen

E.Friesen-Klengel, J.P.Kuhtz-Buschbeck ; P-25 „Thermosensitivity of cutaneous mechanoreceptors: The temperature-weight illusion“, Clinical Neurophysiology, Volume 148, 2023, Page e 20,ISSN1388-2457; <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2023.02.042>

Poster beim 12. Symposium der jungen Physiologen in Kiel, 30./31. März 2023:
„Thermosensitivity of cutaneous mechanoreceptors: the temperature-weight Illusion“