

Die experimentelle Prüfung der mentalen
Größenrepräsentation auditiver Stimuli nach
A Theory of Magnitude

Dissertation

zur Erlangung des
Doktorgrades der Philosophie (Dr. phil.)

vorgelegt

der Philosophischen Fakultät I
Sozialwissenschaften und historische Kulturwissenschaften

der Martin-Luther-Universität
Halle-Wittenberg,

von Frau Sarah Koch

Gutachter: apl. Prof. Dr. Sven Blankenberger
Prof. Dr. Torsten Schubert
apl. Prof. Dr. Peter Wühr

Tag der Verteidigung: 10.10.2024

Danksagung

Auf dem Weg zum erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit haben mich viele Menschen begleitet. Diesen möchte an dieser Stelle meinen Dank aussprechen.

Der mit Abstand größte Dank gilt meinem Betreuer Prof. Dr. Sven Blankenberger - für seine Bereitschaft, diese Arbeit zu betreuen, für die Freiheit, die ich bei der Bearbeitung des Themas hatte und für das Wissen und die methodische Kompetenz, die ich bei ihm erwerben durfte. Ich danke dir für deine Unterstützung und wertvollen Ratschläge, für deine Anmerkungen, die mich stets motiviert haben, meine wissenschaftliche Arbeit weiterzuentwickeln und nicht zuletzt für die Zeit, die du dir stets genommen hast.

Prof. Dr. Torsten Schubert danke ich für die Möglichkeit, meine Experimente in den Laborräumen des Lehrstuhls durchführen zu können und meine Arbeit im Forschungskolloquium der Allgemeinen Psychologie präsentieren und diskutieren zu können. Ich danke dir für unsere Gespräche über meine Arbeit und deine hilfreiche Rückmeldungen zu den Manuskripten.

Ebenfalls bedanke ich mich bei Prof. Dr. Peter Wühr für seine Bereitschaft, diese Arbeit zu begutachten.

Danke an die wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Abteilung Allgemeine Psychologie für den wissenschaftlichen Austausch sowie gelegentliche Zerstreuung bei gemeinsamen Mittagspausen und Kaffeetrinken.

Ebenfalls danke ich der Landesgraduiertenförderung des Landes Sachsen-Anhalt für die Bewilligung eines Graduiertenstipendiums und insbesondere für die Bewilligung eines zusätzlichen vierten Förderjahres.

Ein großer Dank gilt meinen Freundinnen. Danke für unsere tollen Gespräche auch, aber nicht nur, über meine Forschung, die schöne gemeinsame Zeit und dass ihr stets da wart und mich unterstützt habt. Besonders danken möchte ich Katti und Miri, die sich die Zeit für das Lesen einer früheren Version dieser Arbeit genommen haben. Ich danke euch für eure Kommentare, Verständnisfragen und Anmerkungen!

Schließlich danke ich von ganzem Herzen meiner Mama. Danke für deine aufbauenden Worte bei Rückschlägen, deine Freude bei Erfolgen und dass du stets Interesse an meiner Arbeit gezeigt hast.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	7
Abstract	8
Liste der Original-Forschungsartikel	9
1 Einleitung	11
2 A Theory of Magnitude	13
2.1 Die Annahme einer gemeinsamen Größenrepräsentation	13
2.2 Größenkriterien gemäß ATOM	14
2.2.1 Prothetische Dimensionen	14
2.2.2 Neuronale Implementierung	15
2.2.3 Handlungsrelevanz und Handlungsassoziation	16
2.3 Empirische Vorhersagen aus ATOM	17
2.3.1 Der SQUARC-Effekt als Indikator einer räumlichen Assoziation	17
2.3.2 Interaktionen zwischen Größendimensionen	20
3 Lautheit und Tonhöhe im Kontext von ATOM	24
3.1 Grundlagen auditiver Verarbeitung	24
3.1.1 Psychophysikalische Grundlagen	24
3.1.2 Verarbeitung auditiver Reize	25
3.2 Erfüllung der Größenkriterien	26
3.3 Erfüllung der empirischen Vorhersagen	29
3.3.1 Der SQUARC-Effekt für auditive Dimensionen	29
3.3.2 Interaktionen zwischen auditiven Dimensionen und Größendimensionen	33
4 Fragestellung	37
5 Studien	40
5.1 The spatial representation of loudness in a timbre discrimination task (Studie 1)	40

5.2	Simultaneous but independent spatial associations for pitch and loudness (Studie 2) . . .	55
5.3	Large sounds and loud numbers? Investigating the bidirectionality and automaticity of cross-modal loudness-number interactions (Studie 3)	70
6	Diskussion	128
6.1	Rekapitulation der Fragestellung der Dissertation	128
6.2	Diskussion und Interpretation der Befunde	129
6.2.1	Der SLARC-Effekt: Eine Instanz des SQUARC-Effektes	129
6.2.2	Cross-modale Größeninteraktionen	131
6.3	Lautheit: Eine Größendimension gemäß ATOM	133
6.4	Limitationen der vorliegenden Arbeit	136
6.5	Ausblick auf zukünftige Forschungsrichtungen	138
6.5.1	Tonhöhe im Kontext von Größenrepräsentationen	138
6.5.2	Zur Zukunft eines generalisierten Größensystems	140
7	Fazit	142
	Literaturverzeichnis	143
	Eidesstattliche Erklärung	158

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde untersucht, ob die auditive Dimension Lautheit eine Größendimension im Sinne der *A Theory of Magnitude* (ATOM, Walsh, 2003) ist. Gemäß ATOM werden die drei Domänen Zeit, Raum und Quantität auf einem generalisierten Größensystem repräsentiert. Lautheit wurde in bisherigen Konzeptionen ATOMs nicht als Größendimension aufgeführt (Bueti & Walsh, 2009). Allerdings deuten die Befunde bisheriger Studien an, dass für Lautheit zwei Effekte auftreten, die für Größendimensionen postuliert werden. Dies ist zum einen der SQUARC-Effekt (*Spatial-Quantity Association of Response Codes*), welcher eine räumliche Assoziation der Größendimension andeutet. Ebenfalls wird postuliert, dass die gleichzeitige Verarbeitung zweier Größendimensionen mit Interferenz- und *priming*-Effekten assoziiert sein sollte. Beide Effekte konnten für Lautheit gezeigt werden, aufgrund der unvollständigen empirischen Befundlage ist jedoch unklar, ob die Effekte als Indikatoren einer Größenrepräsentation von Lautheit interpretiert werden können. Eine Untersuchung dessen erfolgte in fünf Experimenten, die in drei Studien gegliedert wurden. In Studie 1 wurde das Auftreten des SQUARC-Effekts für Lautheit in einer Klangfarbendiskriminationsaufgabe untersucht. Obwohl Lautheit irrelevant für die Bearbeitung der Aufgabe war, zeigte sich eine räumliche Assoziation, angezeigt durch einen SQUARC-Effekt. In Studie 2 wurde der Zusammenhang zwischen den räumlichen Assoziationen für Lautheit und Tonhöhe, ebenfalls in einer Klangfarbendiskriminationsaufgabe, untersucht. Für beide Dimensionen trat ein SQUARC-Effekt auf, die Effekte interagierten jedoch nicht miteinander, was im Einklang mit der Annahme zweier unabhängiger Repräsentationen für Lautheit und Tonhöhe steht. Studie 3 umfasste drei Experimente, in denen der Einfluss von Lautheit auf die Verarbeitung visuell präsentierter Zahlen in Klassifikationsaufgaben untersucht wurde. In allen drei Experimenten zeigte sich ein Einfluss der Lautheit, angezeigt durch kürzere Reaktionszeiten in kongruenten Bedingungen (z. B. wenn eine große Zahl gemeinsam mit einem lauten Ton präsentiert wurde) im Vergleich zu inkongruenten Bedingungen. Dieser Einfluss erfolgte zudem automatisch und bidirektional. Insgesamt betrachtet unterstützen die Befunde der drei Studien die Annahme, dass Lautheit eine Größendimension gemäß ATOM ist. Unter dieser Annahme müsste die Theorie eines generalisierten Größensystems explizit um die Repräsentation von Größen in der auditiven Modalität erweitert werden. Die daraus folgenden Implikationen für eine potenzielle Weiterentwicklung ATOMs werden diskutiert.

Abstract

In this work, the assumption that loudness might be a magnitude dimension according to A Theory of Magnitude (ATOM, Walsh, 2003) was investigated. According to ATOM, the three domains time, space, and quantity are represented on a generalized magnitude system. Loudness has not been mentioned as magnitude dimension so far (Buetti & Walsh, 2009). However, results from previous studies indicate, that loudness exhibits two effects which are postulated for magnitude dimensions. First, the SQUARC effect (Spatial-Quantity Association of Response Codes) which indicates a spatial association. In addition, it is assumed that the simultaneous processing of two magnitude dimensions should lead to interference and priming effects. Both effects could be shown for loudness. However, due to incomplete empirical evidence it is not clear whether the effects can be interpreted as indicator of a magnitude representation for loudness. This assumption was investigated in three studies, which comprised five experiments in total. In study 1, the occurrence of the SQUARC effect for loudness in a timbre discrimination was investigated. Although loudness was not relevant for the task, a SQUARC effect occurred indicating a spatial association. In study 2, the interrelation between the spatial associations for loudness and pitch were investigated again in a timbre discrimination task. A SQUARC effect occurred in both dimensions but the effects did not interact. These results are in line with the assumption of two independent representations for loudness and pitch. Study 3 comprised three experiments, in which the influence of loudness on the processing of visually presented numbers in classification tasks was investigated. In all three experiments, loudness influenced number processing, which was indicated by shorter reaction times in congruent conditions (e.g. a large number simultaneously presented with a loud tone) compared to incongruent conditions. This influence also seemed to be automatic and bidirectional. Taken together, the results from all three studies support the assumption that loudness may be a magnitude dimension according to ATOM. This implies the extension of a generalized magnitude system to magnitude representations in the auditory modality. The implications for a theoretical development of ATOM are discussed.

Liste der Original-Forschungsartikel

Die Dissertation basiert auf drei Original-Forschungsartikeln:

Studie 1

Koch, S., Schubert, T., & Blankenberger, S. (2023). The spatial representation of loudness in a timbre discrimination task. *I-Perception*, 14(6), 1–14. <https://doi.org/10.1177/20416695231213213>

Studie 2

Koch, S., Schubert, T., & Blankenberger, S. (2024). Simultaneous but independent spatial associations for pitch and loudness. *Psychological Research*, 88, 1602–1615. <https://doi.org/10.1007/s00426-024-01970-9>

Studie 3

Koch, S., Schubert, T., & Blankenberger, S. (2025). Large sounds and loud numbers? Investigating the bidirectionality and automaticity of cross-modal loudness-number interactions. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 0(0) <https://doi.org/10.1177/17470218251325417>

1 Einleitung

Größe stellt ein allgegenwärtiges Konzept in unserer Umgebung dar. Es ist daher wenig verwunderlich, dass größenassoziierte Operationen für gesunde Personen in der Regel keine Schwierigkeit darstellen, seien sie motorischer Art wie die Anpassung einer Greifbewegung an die Größe eines Objektes, oder mentaler Art wie der Größenvergleich zweier Objekte. Interessanter ist bereits, dass Personen in der Lage zu sein scheinen, die Größeninformation unterschiedlicher Dimensionen und sogar unterschiedlicher Modalitäten zueinander in Bezug zu setzen. In frühen psychophysikalischen Studien wurden beispielsweise Personen aufgefordert, die Lautheit eines Tones so einzustellen, dass sie anderen Größendimensionen entsprach (u. a. Stevens, 1966). Selbst Aufforderungen wie “Stell das Licht so ein, dass es dreimal so hell ist, wie der vorherige Ton laut war” (Ellermeier et al., 2021) können Personen ohne Probleme nachkommen. Insbesondere die Beobachtung, dass Lautheit und Helligkeit zueinander in Bezug gesetzt werden können war maßgeblich für die Annahme einer amodalen Intensitätskala (Heller, 2021; Luce et al., 2010) verantwortlich.

Aber auch auf Ebene höherer kognitiver Verarbeitung gab es Bestrebungen, dimensionsunspezifische Größenverarbeitungsprozesse zu formulieren. Einer der bekanntesten Vertreter dieses theoretischen Ansatzes stellt die *A Theory of Magnitude*, kurz ATOM, von Walsh (2003, 2015) dar. Ziel dieser Theorie war es, einen integrativen Ansatz in Bezug auf die Repräsentation der drei kognitiven Domänen Zeit, Raum und Quantität zu entwickeln. Den Ausgangspunkt stellten Untersuchungen dar, deren vergleichbare behaviorale und neurowissenschaftliche Befundmuster auf Gemeinsamkeiten in den zugrundeliegenden Verarbeitungsprozessen der drei Domänen hinwiesen. Walsh (2003) postulierte darauf aufbauend die Annahme eines generalisierten Größensystems, auf dem Zeit, Raum und Quantität abgebildet werden. Mittlerweile wird für eine Reihe unterschiedlicher Reizdimensionen angenommen, dass diese auf dem in ATOM postulierten Größensystem repräsentiert würden (Buetti & Walsh, 2009; Walsh, 2015).

Trotz der eingangs erwähnten Befunde, dass Lautheit zu anderen Größendimensionen in Bezug gesetzt werden kann, wurde Lautheit im Gegensatz zu Helligkeit nicht explizit in die Konzeption ATOMs aufgenommen (Buetti & Walsh, 2009). Auch die empirische Forschung bezüglich der Größenrepräsentation von auditiven Reizen ist lückenhaft. In vereinzelten Studien wurde auf die Annahme Bezug genommen, dass Lautheit als Größendimension gemäß ATOM repräsentiert sein könnte (z. B. Bruzzi et al., 2017; Hartmann & Mast, 2017; Heinemann et al., 2013). Eine systematische Untersuchung dieser Annahme

unter gleichzeitiger Berücksichtigung unterschiedlicher Effekte blieb jedoch bisher aus und soll mit dieser Dissertation erfolgen.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die experimentelle Prüfung, ob die auditive Dimension Lautheit eine Größendimension nach der Definition von ATOM ist. Der Fokus der experimentellen Arbeiten wurde auf die auditive Dimension Lautheit gelegt, da diese gemäß frühen psychophysikalischen Studien tatsächlich eine quantitative Dimension darstelle (Stevens, 1957; Stevens & Galanter, 1957). Innerhalb der theoretischen Ausführungen dieser Arbeit wird zudem Bezug auf eine zweite auditive Dimension, Tonhöhe, genommen. Als qualitative Dimension (Stevens, 1957; Stevens & Galanter, 1957) kann Tonhöhe keine Größendimension gemäß ATOM darstellen (Walsh, 2003, 2015). Auffällig ist jedoch, dass die Befunde einzelner Studien darauf hindeuten, dass auch Tonhöhe bestimmte Vorhersagen von ATOM erfüllt (Oriet et al., 2005; Rinaldi et al., 2016; Rusconi et al., 2006). Um eine ganzheitliche Diskussion über die potenzielle Größenrepräsentation auditiver Reize zu ermöglichen, soll daher auch eine nähere Skizzierung der Dimension Tonhöhe erfolgen.

Die experimentelle Untersuchung der Fragestellung der Dissertation erfolgte anhand von fünf Experimenten, welche in drei Studien gegliedert wurden. In allen Experimenten bildete die Reaktionszeit in Wahlreaktionsparadigmen die entscheidende abhängige Variable. Anhand dessen wurden zwei empirische Vorhersagen geprüft, welche für Größendimensionen auftreten müssen: Die Existenz einer räumlichen Assoziation (Walsh, 2003) sowie das Auftreten von Erleichterungs- und Interferenzeffekten mit einer anderen Größendimension (Buetti & Walsh, 2009). Diese Effekte sollen im Rahmen des theoretischen Teils ausführlicher dargestellt werden. Es werden zuerst die Grundannahmen ATOMs sowie die daraus resultierenden empirischen Vorhersagen für Größendimensionen dargestellt. Anschließend wird der aktuelle Forschungsstand in Bezug auf die Erfüllung der Größenkriterien und empirischen Vorhersagen für Lautheit und Tonhöhe diskutiert.

2 A Theory of Magnitude

2.1 Die Annahme einer gemeinsamen Größenrepräsentation

Ausgang für die Entwicklung von ATOM stellte eine Vielzahl an behavioralen, bildgebenden und neuropsychologischen Befunden aus den Domänen Zeit, Raum und Quantität dar, welche auf Gemeinsamkeiten in der Verarbeitung aller drei Domänen hinwiesen. Bereits frühe tierexperimentelle Studien deuteten einen dimensionsunspezifischen Zählmechanismus zur Bestimmung von Menge und zeitlicher Dauer an (Cordes et al., 2007; Meck et al., 1985; Meck & Church, 1983). In ATOM werden jedoch nicht Gemeinsamkeiten in den einzelnen Verarbeitungsprozessen angenommen. Stattdessen wird postuliert, dass die drei Domänen Zeit, Raum und Quantität auf einer gemeinsamen Metrik abgebildet werden (Walsh, 2003). Aufgrund der Abbildung auf einer gemeinsamen Metrik stehen die einzelnen Domänen in einer monotonen Beziehung (*monotonic mapping*) zueinander (Buetti & Walsh, 2009). Das bedeutet, dass eine Größenzunahme oder -abnahme in einer Domäne mit der entsprechenden Veränderung in einer anderen Domäne assoziiert ist. Neben der gemeinsamen Metrik wird auch der Begriff eines generalisierten Größensystems (*generalized magnitude system*, GMS) verwendet (Bonn & Cantlon, 2012; Holmes & Lourenco, 2011; Lourenco et al., 2016; Van Opstal & Verguts, 2013; Walsh, 2003). Das generalisierte Größensystem kann als mentales Repräsentationssystem verstanden werden, auf dem Größeninformationen unterschiedlicher Dimensionen einheitlich abgebildet werden. Dies impliziert die Existenz eines Skalierungsfaktors, der die einheitliche Abbildung unterschiedlich skalierte Größeninformationen auf einem gemeinsamen Repräsentationssystem erlaubt (Van Opstal & Verguts, 2013).

Auffällig ist, dass die Domäne Quantität eine konzeptuelle Erweiterung durchlief, welche sich auch auf sprachlicher Ebene widerspiegelt. So spricht Walsh (2003) in der Beschreibung von ATOM ganz allgemein von der Domäne *quantity*, beschreibt jedoch das Ziel von ATOM als „to bring together, as A Theory Of Magnitude (ATOM) disparate literatures on time, space, and number“ (S. 1). Die synonyme Verwendung der Konzepte Quantität und numerischer Wert wurde in späteren Konzeptionen ATOMs aufgehoben. Stattdessen werden der Domäne Quantität mittlerweile mehrere unterschiedliche Stimulusdimensionen zugeordnet. So werden neben der symbolischen und nicht-symbolischen Numerosität (d. h. die Anzahl von Objekten) auch die physikalische Größe eines Objektes sowie in einigen Studien auch

Luminanz bzw. der Luminanzkontrast als Größendimensionen im Sinne von ATOM interpretiert (Buetti & Walsh, 2009). Aus der Beschreibung ATOMs lassen sich sowohl Größenkriterien als auch empirische Vorhersagen identifizieren (Walsh, 2003), die eine Dimension erfüllen muss, damit sie als Größendimension interpretiert werden kann.

2.2 Größenkriterien gemäß ATOM

2.2.1 Prothetische Dimensionen

Grundlegende Voraussetzung einer Größendimension ist nach Walsh (2003), dass es sich um eine prothetische Dimension nach Stevens (1957; Stevens & Galanter, 1957) und damit um eine quantitative Dimension handeln muss. Prothetischen Dimensionen stehen die metathetischen oder auch qualitativen Dimensionen gegenüber. Auf visueller Ebene wäre beispielsweise die Helligkeit eines Lichts eine prothetische Dimension, wohingegen die Farbe eines Objektes eine metathetische Dimension darstellen würde. Die Differenzierung zwischen prothetischen und metathetischen Dimensionen erfolgte anhand einer Reihe experimenteller Arbeiten in denen systematische Unterschiede zwischen verschiedenen Reizdimensionen bezüglich klassischer psychophysikalischer Effekte, wie beispielsweise Unterschiede in der Größe des *just noticeable difference* oder Unterschiede im Auftreten des *time-order errors* gezeigt wurden (Stevens, 1957). Basierend auf diesen Unterschieden wurden Reizdimensionen als Kontinuum I oder Kontinuum II kategorisiert. Unter Kontinuum I fielen Reizdimensionen wie Gewicht, zeitliche Dauer oder Lautheit, diese wurden daher als prothetisch oder quantitativ bezeichnet. Kontinuum II, welches dagegen Reizdimensionen wie Winkelausrichtung oder Tonhöhe umfasste, wurde als metathetische Dimension bezeichnet.

Die Begriffe prothetisch und metathetisch sollen den angenommenen neuronalen Entstehungsmechanismus reflektieren, welcher der psychologischen Empfindung der jeweiligen Reizdimension zugrunde liegt (Stevens & Galanter, 1957). Die Wahrnehmung prothetischer Dimensionen basiere auf additiven, neuronalen Prozessen. Mit zunehmender physikalischer Intensität eines wahrgenommenen Reizes erhöhe sich die neuronale Aktivierung, angezeigt durch eine erhöhte Feuerrate der Neuronen, was wiederum zu einer Zunahme des psychologischen Empfindens führe. Wird beispielsweise der Schalldruckpegel eines Tons erhöht, hat dies eine erhöhte Feuerrate der damit assoziierten Neurone zur Folge, was wiederum zu einer Zunahme des Lautstärkeindrucks führe (Stevens & Galanter, 1957). Entsprechend stellt der Begriff „prothetisch“ eine sprachliche Ableitung des griechischen Begriffes für „etwas dazu geben“ dar. Der Begriff „metathetisch“ entspräche dagegen einem Begriff, der als „etwas ändern oder umstellen“ verstanden werden kann (Stevens & Galanter, 1957). Bei metathetischen Dimensionen führe eine Erhöhung der physikalischen Dimension nicht zu einer Zunahme des Wahrnehmungseindrucks, sondern zu einer qualitativen Veränderung. Beispielsweise führt die Zunahme der Wellenlänge nicht zu einer Zunahme des Farbeindrucks, im Sinne von „mehr Farbe“, sondern zu einem qualitativ anderen Farbeindruck.

Die Unterteilung nach prothetischen und metathetischen Dimensionen ist empirisch begründet und die Interpretation der Reizdimensionen als quantitativ und qualitativ mag intuitiv erscheinen. Es ist jedoch unklar, durch welche psychologischen Eigenschaften sich quantitative und qualitative Dimensionen unterscheiden. Es soll daher auf eine formale Beschreibung quantitativer Dimensionen nach Smith und Sera (1992) eingegangen werden. Demnach zeichnet sich eine quantitative Dimension durch eine lineare Syntax und eindimensionale Anordnung aus. Daraus folgen die beiden Prinzipien der Reziprozität und Transitivität. Man stelle sich die lineare Syntax als eindimensionale, räumliche Linie von links nach rechts vor, auf der die einzelnen Ausprägungen der quantitativen Dimension abgebildet werden. Reziprozität bezieht sich auf die Beziehung zweier Punkte zueinander: Wenn A links von B liegt, muss B rechts von A liegen. Für die Transitivität gilt, dass wenn A links von B liegt und C links von A liegt, C links von B liegen muss. Diese räumliche Struktur lässt sich auf quantitativer Ebene ausdrücken als: Wenn $a < b$ und $c < a$, dann gilt $c < b$. Vergleicht man beispielsweise zwei Objekte in Bezug auf ihre physikalische Größe, so lässt sich eine Aussage darüber treffen, ob Objekt A relativ zu Objekt B größer, kleiner oder gleich groß ist. Vergleicht man dagegen zwei Objekte unterschiedlicher Farbe, beispielsweise rot und grün, dann kann zwar eine Aussage darüber getroffen werden, ob die Objekte qualitativ gleich oder verschieden sind, aber keine Aussage darüber, ob das rote Objekt „mehr Farbe“ oder „weniger Farbe“ als das grüne Objekt hat, vorausgesetzt die Luminanz und Sättigung beider Farben ist identisch.

2.2.2 Neuronale Implementierung

Das zweite Größenkriterium bezieht sich auf die neuronale Implementierung des generalisierten Größensystems. Nach ATOM ist das zentrale Areal hierfür die intraparietale sulcus (IPS) innerhalb des parietalen Kortex (Walsh, 2003). Die IPS wurde bereits im Bereich der numerischen Kognition als Areal für die neuronale Kodierung numerischer Größe diskutiert (Cohen Kadosh et al., 2005; Cohen Kadosh & Walsh, 2009; Dehaene, 1992, 2007; Libertus et al., 2007; Nieder & Dehaene, 2009; Pinel et al., 2004). Insbesondere der linksseitigen IPS wird eine wichtige Rolle in der Verarbeitung numerischer Information zugeschrieben (Brannon, 2006; Dehaene et al., 2003). Dabei wird ferner diskutiert, ob die IPS eine abstrakte Repräsentation numerischer Information kodiert oder ob innerhalb der IPS verschiedene neuronale Verbände vorliegen, die spezifisch auf die unterschiedlichen Darstellungsformen numerischer Information reagieren (Cohen Kadosh & Walsh, 2009).

In Bezug auf die Bedeutung der IPS für die Verarbeitung und Repräsentation einer generalisierten Größeninformation deuten Studien darauf hin, dass kein Unterschied in der Aktivierungsverteilung zwischen Zahlen und physikalischer Größe besteht (Cohen Kadosh, Lammertyn, et al., 2008). Dennoch wiesen die Autoren daraufhin, dass innerhalb der IPS sowohl domänenspezifische als auch domänenübergreifende neurale Repräsentationen eine Rolle spielen würden. Einen ähnlichen Schluss lassen die Befunde einer quantitativen Meta-Analyse von Sokolowski et al. (2017) zu. Die Autoren gingen explizit der Frage nach, ob die neuronale Repräsentation von Zahlen auf der neuronalen Repräsentation eines generalisierten Größensystems basiert. In die Analyse gingen 93 Studien ein, welche bildgebenden

Verfahren anwendeten und in denen die Aktivierungsverteilung unterschiedlicher größenassoziierter Reize untersucht wurden. Differenziert wurde zwischen symbolischer, numerischer Information (Zahlen), nicht-symbolischer, numerischer Information (z. B. die Anzahl an Kreisen) und nicht-numerischer Größeninformation (z. B. die Größe eines Reizes). Insgesamt zeigten sich für Zahlen spezifische Areale, die nur mit der Verarbeitung symbolischer, numerischer Information assoziiert waren. Umgekehrt und für die Annahme eines generalisierten Größensystems weitaus bedeutsamer, zeigten sich keine spezifischen Areale, die ausschließlich mit der Verarbeitung nicht-numerischer Größeninformation assoziiert waren. Das bedeutet, dass Areale die bei der Verarbeitung nicht-numerischer Größen aktiviert waren, auch für die Verarbeitung von symbolischer, numerischer Information eine Aktivierung zeigten (Sokolowski et al., 2017). Insgesamt unterstützen die meta-analytischen Befundmuster die Annahme eines generalisierten Größensystems, dessen neuronale Implementierung innerhalb der IPS angesiedelt ist.

2.2.3 Handlungsrelevanz und Handlungsassoziation

Größendimensionen müssen ferner einen direkten Bezug zu Handlungen (*actions*) aufweisen (Buetti & Walsh, 2009). Diese Handlungsrelevanz stellt das dritte Größenkriterium gemäß ATOM dar und ergibt sich unmittelbar aus der angenommenen Funktion eines generalisierten Größensystems. Funktionaler Link einer gemeinsamen Metrik sei demnach die Notwendigkeit, unterschiedliche Größeninformationen der Umwelt zu verarbeiten und zu integrieren, um Handlungen erfolgreich ausführen zu können (Buetti & Walsh, 2009; Walsh, 2003, 2015). Beispielsweise müssen für das Ergreifen einer Flasche verschiedene Informationen integriert werden: die Größe der Flasche, der Abstand der Flasche zu einem selbst oder die Position der eigenen Hand im Raum. Die Größeninformationen der Umwelt stellen hierbei einen *event input* dar. Das generalisierte Größensystem verarbeite diesen *input* und transformiere ihn in motorische Informationen, die für das Ausführen der Handlung relevant seien (*motor output*) (Walsh, 2003). In dem oben genannten Beispiel müsste die Größe der Flasche in eine adäquate Griffweite transformiert werden, sowie der räumliche Abstand der Flasche in die Strecke, welche mit der Hand zurückgelegt werden muss. Die Interaktion mit der Umwelt spiele ferner eine wichtige Rolle bei der Entwicklung des generalisierten Größensystems. Während Säuglinge kurz nach der Geburt die Information Größe noch als undifferenzierte Einheit repräsentieren würden, differenziere sich diese mit zunehmender Erfahrung in unterschiedliche Dimensionen aus (Buetti & Walsh, 2009; Walsh, 2003). Größendimensionen müssen daher eine Handlungsrelevanz (*action relevance*) aufweisen. Davon ausgehend postulierten Buetti und Walsh (2009), dass sich Effekte eines Größensystems nicht in Aufgaben widerspiegeln sollten, die keinen Handlungsbezug aufweisen, wie beispielsweise Aufgaben die das episoden Gedächtnis betreffen.

Als empirischen Beleg für die Annahme der Handlungsrelevanz können Studien angesehen werden, in denen sich eine Assoziation zwischen der Größeninformation eines zu verarbeitenden Reizes und einem motorischen Handlungsparameter zeigt. Ein Beispiel für einen derartigen Parameter stellt die Greifbewegung dar, die typischerweise in zwei Kategorien klassifiziert wird. Der *precision grip* stellt eine zangenhafte Greifbewegung mit Daumen und Zeigefinger dar und wird typischerweise auf kleine Objekte

angewendet. Demgegenüber steht der *power grip* mit welchem typischerweise große Objekte mit der gesamten Hand umschlossen werden (Van Dijck et al., 2015). In den entsprechenden Studien wurde den Versuchspersonen eine Zahl auf dem Monitor präsentiert und sie sollten die Zahl als numerisch größer oder kleiner als den Wert fünf klassifizieren. Die Antwortgabe erfolgte über die Greifbewegung an einem Objekt fixer Größe. Es zeigte sich, dass Versuchspersonen ihre Bewegung schneller initiierten, wenn sie auf numerisch kleine Zahlen mit einem *precision grip* und auf numerisch große Zahlen mit einem *power grip* reagieren sollten (Lindemann et al., 2007; Van Dijck et al., 2015). Auch wenn Versuchspersonen nach unterschiedlich großen Objekten greifen müssen, um damit eine visuell präsentierte Zahl als größer oder kleiner als fünf zu klassifizieren, zeigt sich ein vergleichbarer Effekt (Andres et al., 2008; Namdar et al., 2014). Eine vergleichbare Assoziation fand sich auch zwischen numerischen Wert und der Stärke des ausgeübten Tastendrucks (*response force*), mit kürzeren Reaktionszeiten, wenn auf numerisch große Zahlen ein starker Tastendruck aufgewendet werden musste (Vierck & Kiesel, 2010). Ebenfalls beeinflusste die Beobachtung einer schließenden oder öffnenden Handbewegung die zufällige Generierung eines numerischen Wertes (Badets et al., 2007).

Die Befunde zeigen, dass eine Assoziation zwischen Größe und Handlungsparametern besteht. In den beschriebenen Studien besteht jedoch eine Differenzierung zwischen dem Objekt mit dem tatsächlich interagiert wird (Objekte, die mittels *precision grip* oder *power grip* ergriffen werden) und der Größeninformation auf die reagiert wird (numerischer Wert der Zahl). Die Handlungsparameter werden auf das tatsächlich existierende Objekt abgestimmt. Das bedeutet, dass der numerische Wert als solcher in der konkreten Situation nicht handlungsrelevant ist, aber dennoch die Ausführung der motorischen Bewegung beeinflusst. Dieser Einfluss mag am Transformationsprozess des *inputs* zum *output*, welcher über das generalisierte Größensystem erfolgt (Walsh, 2003), ansetzen.

Neben den drei Größenkriterien – Prothetik, neuronale Implementierung, Handlungsrelevanz – wurden spezifische Effekte postuliert, welche für Größendimensionen auftreten müssen. Der SQUARC-Effekt (*Spatial-Quantity Association of Response Codes*) als Indikator einer räumlichen Assoziation sowie Interferenz- und *priming*-Effekte zwischen verschiedenen Größendimensionen (Buetti & Walsh, 2009; Walsh, 2003, 2015). Im nachfolgenden Abschnitt sollen die Befunde zum Auftreten der Effekte für unterschiedliche Größendimensionen skizziert werden. Ziel ist die Darstellung, ob die empirischen Befunde die Validität der postulierten Effektvorhersagen unterstützen. Daher erfolgt lediglich für Studien, die für das Verständnis der experimentellen Arbeiten der Dissertation notwendig sind, eine ausführliche Darstellung und Diskussion der Methode.

2.3 Empirische Vorhersagen aus ATOM

2.3.1 Der SQUARC-Effekt als Indikator einer räumlichen Assoziation

Der SQUARC-Effekt stellt eine Generalisierung des bereits länger in der numerischen Kognition etablierten SNARC-Effekts (*Spatial-Numerical Association of Response Codes*) dar, welcher erstmals von Dehaene

et al. (1993) untersucht wurde. In dieser Studie mussten die Versuchspersonen mittels Tastendruck entscheiden, ob eine präsentierte Zahl gerade oder ungerade war. Die Tastenzuweisung wurde innerhalb der Versuchspersonen variiert, sodass für jede Zahl eine linksseitige und rechtsseitige Reaktion vorlag. Der SNARC-Effekt beschreibt den Befund, dass eine rechtsseitige Reaktion auf numerisch große Zahlen schneller erfolgt als eine linksseitige Reaktion und umgekehrt, dass eine linksseitige Reaktion auf numerisch kleine Zahlen schneller erfolgt als eine rechtsseitige Reaktion.

Der SNARC-Effekt stellt einen robusten Effekt dar, welcher in den letzten Dekaden vielfach untersucht und repliziert wurde (Didino et al., 2019; Fias et al., 1996; Fias, 2001; Gevers et al., 2006; Huber et al., 2016; Nathan et al., 2009; Santiago & Lakens, 2015; Cipora et al., 2019; Müller & Schwarz, 2007; Nuerk et al., 2005; für eine Meta-Analyse siehe Wood et al., 2008). Der Effekt wird häufig als Indikator einer räumlichen Assoziation von Zahlen gesehen und unterstützt die Annahme eines mentalen Zahlenstrahls, auf dem Zahlen in aufsteigender Folge räumlich von links nach rechts repräsentiert werden (Dehaene, 1992, 2003, 2011; Feigenson et al., 2004; Moyer & Landauer, 1967; Restle, 1970; Sekuler et al., 1971). Da der Effekt auch dann auftritt, wenn die numerische Information einer Zahl für die Bearbeitung der Aufgabe irrelevant ist (Didino et al., 2019; Fias et al., 1996; Fias, 2001; Wood et al., 2008), wird der SNARC-Effekt darüber hinaus als Beleg für die automatische Aktivierung der numerischen Größe einer Zahl interpretiert. Gemäß dem Zwei-Routen-Verarbeitungsmodell nach Müller und Schwarz (2007) würde die automatisch aktivierte räumliche Information der Zahl mit dem räumlichen Code der Antwort interferieren und zu den beobachteten Reaktionszeitunterschieden führen. Neuere Arbeiten verwerfen dagegen die Annahme eines Zahlenstrahls und postulieren stattdessen eine ordinale Anordnung des Reizmaterials im Arbeitsgedächtnis als ausschlaggebend (Van Dijck et al., 2014, 2015; Van Dijck & Fias, 2011).

Ausgehend von den oben genannten Befunden postulierte Walsh (2003), dass eine vergleichbare räumliche Assoziation für alle Größendimensionen des generalisierten Größensystems gelte und sich in einem SQUARC-Effekt äußern sollte. Konkret sollten rechtsseitige Reaktionen auf große Größenausprägungen schneller erfolgen als linksseitige Reaktionen und ein umgekehrtes Muster sollte sich für kleine Größenausprägungen zeigen. Tatsächlich konnte ein solcher Effekt für eine Reihe von ATOM-assozierten Größendimensionen nachgewiesen werden, allen voran für die physikalische Größe von Objekten (Prpic et al., 2020; Ren et al., 2011; Shaki et al., 2012; Wühr & Richter, 2022; Wühr & Seegelke, 2018) oder nicht-symbolische Numerosität in Form von Punktmustern (Cleland et al., 2020; Cleland & Bull, 2019; Mitchell et al., 2012; Nemeh et al., 2018; Patro & Shaki, 2016). Nicht eindeutig sind dagegen die Befunde für die Dauer von Ereignissen (Macnamara et al., 2018) sowie für Luminanz (Fumarola et al., 2014; Ren et al., 2011).

Obwohl der SQUARC-Effekt eine Generalisierung des SNARC-Effektes darstellt ist unklar, inwieweit beispielsweise die zugrunde liegende theoretische Annahme einer mentalen räumlichen Repräsentation übernommen wird. Während Walsh (2003, 2015) ausschließlich von einer räumlichen Assoziation spricht, wurde in einer nachfolgenden Studie die Annahme eines mentalen Größenstrahls

- analog zu einem mentalen Zahlenstrahl - formuliert, auf dem ein Größenkontinuum aufsteigend von links nach rechts räumlich repräsentiert würde (Holmes & Lourenco, 2011). Die Differenzierung zwischen räumlicher Assoziation und räumlicher Repräsentation ist für die bloße Vorhersage des Effektes von untergeordneter Bedeutung. Allerdings würde eine Generalisierung der Zahlenstrahlannahme auf ein generalisiertes Größensystem eine Weiterentwicklung der theoretischen Fundierung ATOMs ermöglichen. Gleichzeitig müsste bei Ablehnung einer räumlichen Repräsentation die Assoziation zwischen räumlicher Position und Größe anderweitig erklärt werden. Diese Erklärung ergibt sich nicht direkt aus den Annahmen ATOMs, was im nächsten Abschnitt näher skizziert werden soll.

Das Vorliegen des SQUARC-Effektes allein sei gemäß Casasanto und Pitt (2019; Pitt & Casasanto, 2022) kein ausreichender Indikator für eine zugrunde liegende Größenrepräsentation. Wenn eine Dimension als Größe gemäß ATOM repräsentiert wird, müsse zwar für diese Dimension ein SQUARC-Effekt auftreten, umgekehrt kann jedoch von dem Auftreten eines SQUARC-Effektes für eine Dimension nicht auf eine Größenrepräsentation geschlossen werden. So zeigt sich eine räumliche Assoziation auch für Reizdimensionen, die nicht als Größendimension im Sinne von ATOM interpretiert werden können, wie beispielsweise Buchstaben und Monate im Jahr (Gevers et al., 2003). Diese Befunde deuten darauf hin, dass eine räumliche Assoziation auch für Reize vorliegen kann, die lediglich eine sequentielle Struktur aufweisen. Ferner sei gemäß Casasanto und Pitt (2019) der SQUARC-Effekt nicht durch die Annahmen ATOMs erklärbar. Größendimensionen stehen in einer monotonen Beziehung zueinander, weshalb „mehr“ in einer Dimension mit „mehr“ in einer anderen Dimension assoziiert ist (Buetti & Walsh, 2009). Dies gilt aber nur für Dimensionen, die sich tatsächlich im Sinne eines „mehr“-„weniger“-Kontinuum beschreiben lassen, sprich, die prothetische Dimensionen sind. Wie jedoch Casasanto und Pitt (2019) korrekt anmerken, ist die räumliche Position im Sinne einer Links-Rechts-Ausrichtung nicht prothetisch, sondern metathetisch. So postulierten Stevens und Galanter (1957): „Judgements based on position actually provide some of the clearest examples of Class II continua. In short then, class II continua seem to concern what and where, as opposed to how much“ (S. 401). Daher ließe sich der SQUARC-Effekt nicht durch die Annahme eines generalisierten Größensystems erklären (Pitt & Casasanto, 2022). Diese Argumentation wäre dann problematisch, wenn man den SQUARC-Effekt über die monotone Beziehung zwischen Größendimension erklären müsste. Im Falle einer angenommenen räumlichen Struktur des generalisierten Größensystems in Form eines mentalen Größenstrahls würde dieses Argument dagegen weniger ins Gewicht fallen.

Als Alternativerklärung für das Auftreten von SQUARC-Effekten wird postuliert, dass nicht die Größeninformation einer Dimension entscheidend ist, sondern die ordinale Struktur, welche wiederum auf einer räumlichen Ordnung abgebildet wird (Casasanto, 2008; Casasanto & Pitt, 2019; Pitt & Casasanto, 2018, 2022). Dabei orientieren sich die Autoren an der Annahme der *Conceptual Metaphor Theory* (CMT, Lakoff & Johnson, 2003). Gemäß dieser Theorie werden abstrakte Konzepte wie Zeit oder Menge auf dem konkreten Konzept Raum abgebildet, um dadurch mentale Operationen auf abstrakten Konzepten zu ermöglichen. Auch die Arbeiten um Fias und Van Dijck (Fias & Van Dijck, 2016; Van Dijck et al., 2014,

2015) deuten auf einen Einfluss der Ordinalität für den SNARC-Effekt hin. Die Befunde sind jedoch nicht eindeutig interpretierbar, da Ordinalität mit der zeitlichen Folge der Zahlen konfundiert war und diese wiederum einen Einfluss auf das Auftreten des SNARC-Effektes haben kann (Müller & Schwarz, 2008).

Zusammenfassend kann die Existenz einer räumlichen Assoziation für verschiedene Größendimensionen als gesichert betrachtet werden. Dies alleine stellt jedoch keinen ausreichenden Indikator einer Größenrepräsentation dar. Neben dem SQUARC-Effekt ist daher eine weitere empirische Vorhersage essentiell: Das Auftreten von Interferenz- und *priming*-Effekten zwischen verschiedenen Größendimensionen (Bueti & Walsh, 2009).

2.3.2 Interaktionen zwischen Größendimensionen

Aufgrund der gemeinsamen Abbildung auf einem generalisierten Größensystem sollten sich Größendimensionen in ihrer Verarbeitung beeinflussen (Bueti & Walsh, 2009). Die sollte sich wiederum in Interferenz- und *priming*-Effekten äußern. Da, wie nachfolgend dargestellt, sich diese Effekte auf Datenebene häufig in einem Interaktionsmuster zeigen, soll diese empirische Vorhersage im Verlauf der weiteren Arbeit als Interaktion zwischen Größendimension bzw. Größeninteraktionen adressiert werden. Dieser Begriff soll zum einen reaktionszeitbasierte Effekte umfassen, in denen das Vorliegen übereinstimmender Größeninformationen in zwei Dimensionen (kongruente Bedingung) zu einem Reaktionszeitvorteil gegenüber inkongruenten Bedingungen führt. Zum anderen sollen darunter auch antwortbasierte Effekte verstanden werden, wie beispielsweise die Verzerrung von Schätzurteilen bezüglich der Größenausprägung eines Reizes.

Ein früher Befund bezüglich Interaktionen zwischen Größendimensionen stammt erneut aus dem Bereich numerischer Kognition: Der *size congruity effect*, welcher die wechselseitige Beeinflussung zwischen physikalischer und numerischer Größe beschreibt (Arend & Henik, 2015; Beldzik et al., 2018; Cohen Kadosh, Henik, et al., 2008; Foltz et al., 1984; Henik & Tzelgov, 1982; Kochari, 2019; Schwarz & Ischebeck, 2003; Tzelgov et al., 1992). In Experimenten zur Untersuchung dieses Effektes wurden den Versuchspersonen gleichzeitig zwei Zahlen präsentiert und sie mussten per Tastendruck auswählen, welche der beiden Zahlen die numerisch oder physikalisch größere Zahl ist. Numerische und physikalische Größe wurden unabhängig voneinander variiert. Dadurch konnte ein Zahlenpaar kongruent (die numerisch größere Zahl ist die physikalisch größere Zahl), inkongruent (die numerisch kleinere Zahl ist die physikalisch größere Zahl) oder neutral (beide Zahlen sind physikalisch gleich groß oder beide Zahlen haben den gleichen numerischen Wert) sein. In inkongruenten Bedingungen zeigten sich längere Reaktionszeiten im Vergleich zu neutralen und kongruenten Bedingungen und zusätzlich kürzere Reaktionszeiten in kongruenten Bedingungen im Vergleich zu neutralen Bedingungen (Arend & Henik, 2015; Beldzik et al., 2018; Cohen Kadosh, Henik, et al., 2008; Foltz et al., 1984; Henik & Tzelgov, 1982; Kochari, 2019; Schwarz & Ischebeck, 2003; Tzelgov et al., 1992).

In den darauffolgenden Jahren konnten in vergleichbaren Paradigmen aber auch mit anderen experimentellen Ansätzen wechselseitige Beeinflussungen zwischen Größendimensionen gezeigt werden.

So zeigte sich eine Beeinflussung in der Verarbeitung zwischen nicht-symbolischer Numerosität und physikalischer Größe (Hurewitz et al., 2006), zwischen der zeitlichen Dauer eines Reizes und seiner physikalischen Größe (Alards-Tomalin et al., 2014; Birngruber & Ulrich, 2019; Xuan et al., 2007), sowie zwischen der Präsentationsdauer und dem numerischen Wert einer Zahl (Alards-Tomalin et al., 2014; A. Y.-C. Chang et al., 2011; Xuan et al., 2009). Inkonsistente Befunde liegen dagegen bezüglich der Beeinflussung zwischen Dauer und nicht-symbolischer Numerosität (Agrillo et al., 2010; Roitman et al., 2007; Yates et al., 2012) sowie bezüglich der Interaktion zwischen Luminanz und numerischen Wert (Cohen Kadosh, Cohen Kadosh, et al., 2008; Cohen Kadosh & Henik, 2006) vor. Mit anderen Reizdimensionen scheint die Interaktion mit Luminanz dagegen eindeutiger zu sein. So konnte in späteren Studien eine Beeinflussung zwischen Luminanz und physikalischer Größe (Walker & Walker, 2012), Numerosität (Ranzini & Girelli, 2012) und Präsentationsdauer eines Reizes (Bonn et al., 2019; Xuan et al., 2007) gefunden werden. Folgestudien deuten allerdings darauf hin, dass nicht die absolute Luminanz, sondern der Luminanzkontrast ausschlaggebend sei (Gebuis & Smagt, 2011; Matthews et al., 2011).

Neben der direkten Vorhersage von Größeninteraktionen, lassen sich aus der Konzeptualisierung ATOMs weitere Annahmen zur Charakterisierung dieser Größeninteraktionen ableiten. Die Annahme einer gemeinsamen Repräsentation auf einem generalisierten Größensystem impliziert, dass Interaktionen zwischen allen Größendimensionen auftreten sollten, die auf eben jenem Größensystem abgebildet werden. Dies wird auch als Domänensymmetrie bezeichnet (Winter, Marghetis, et al., 2015). Demgegenüber steht die Annahme der bereits aufgeführten CMT (Lakoff & Johnson, 2003), welche eine Domänenasymmetrie vorhersagt. Da abstrakte Konzepte auf dem Konzept Raum abgebildet werden, sollte zwischen den abstrakten Konzepten keine wechselseitige Beeinflussung stattfinden (Winter, Marghetis, et al., 2015). Bisherige Befunde stehen weder im Einklang mit einer Domänensymmetrie noch mit einer vollständigen Domänenasymmetrie. Wie im vorherigen Abschnitt dargestellt, treten Interaktionen zwischen nicht-räumlichen Größendimensionen auf, was der seitens CMT postulierten Domänenasymmetrie widerspricht. Dennoch liegt keine vollständige Domänensymmetrie vor. Beispielsweise interagieren nicht-symbolische Numerosität und physikalische Größe (Hurewitz et al., 2006) sowie physikalische Größe und zeitliche Dauer (Alards-Tomalin et al., 2014; Birngruber & Ulrich, 2019; Xuan et al., 2007), es zeigt sich jedoch keine Größeninteraktion zwischen nicht-symbolischer Numerosität und zeitlicher Dauer (Agrillo et al., 2010; Roitman et al., 2007). Auch als der gleichzeitige Einfluss zwischen numerischen Wert, physikalischer Größe und Luminanz untersucht wurde, zeigte sich eine Domänenasymmetrie (Pinel et al., 2004).

Ferner lassen sich Größeninteraktionen entsprechend ihrer direktionalen Symmetrie charakterisieren (Winter, Marghetis, et al., 2015), welche sich auf das Verhältnis zweier Dimensionen zueinander bezieht. Direktionale Symmetrie beschreibt eine wechselseitige oder auch bidirektionale Beeinflussung zweier Dimensionen: Wenn Größendimension A die Verarbeitung der Größendimension B beeinflusst, muss umgekehrt Größendimension B die Verarbeitung von Größendimension A beeinflussen. Direktionale Asymmetrie liegt dagegen vor, wenn sich lediglich eine einseitige Beeinflussung zeigt. Bezüglich der Interaktionen zwischen Größendimensionen zeigt sich erneut ein differenziertes Ergebnismuster. So tritt

der *size congruity effect* sowohl für numerische als auch physikalische Größenklassifikationsaufgaben auf, was einen bidirektionalen Einfluss nahelegt (Cohen Kadosh, Henik, et al., 2008; Foltz et al., 1984; Schwarz & Ischebeck, 2003; Tzelgov et al., 1992). Demgegenüber stehen Befunde, die lediglich eine einseitige Beeinflussung zwischen verschiedenen Größendimensionen fanden (Bottini & Casasanto, 2013; Cappelletti et al., 2009; Casasanto, 2008; Hurewitz et al., 2006).

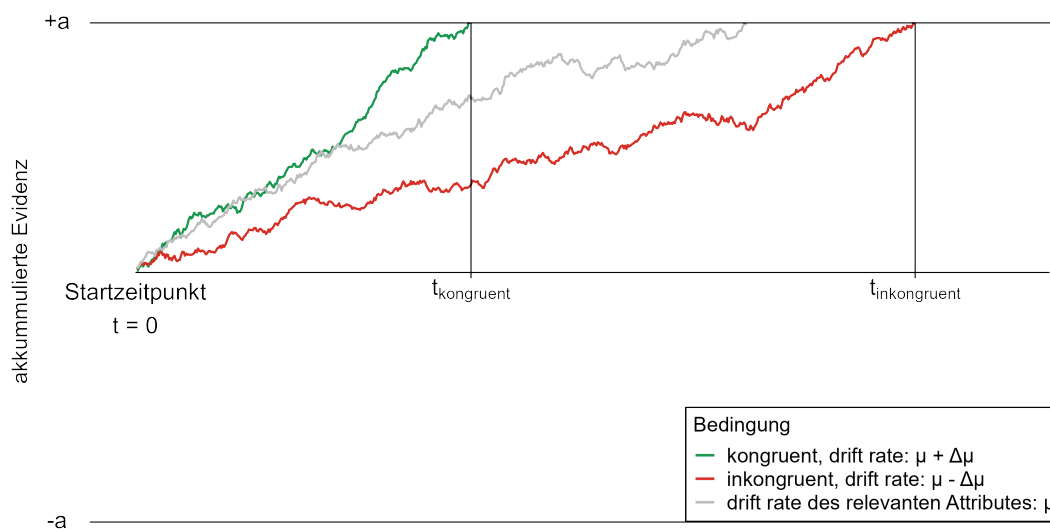
Das Auftreten direktonaler Asymmetrie wird als Hinweis auf die Ungültigkeit eines generalisierten Größensystems interpretiert (Bottini & Casasanto, 2013; Casasanto, 2008). Allerdings wird in späteren Konzeptualisierungen von ATOM explizit davon abgewichen, einen symmetrischen Einfluss zwischen verschiedenen Größendimensionen anzunehmen (Bueti & Walsh, 2009; Walsh, 2015). Stattdessen begründen die Autoren, dass asymmetrische Einflüsse durch die Eigenschaften der Reizdimensionen erklärt werden können, beispielsweise durch Unterschiede in der Verbalisierung von Größendimensionen oder durch unterschiedliche Bedeutungen in der Handlungsrelevanz. Auch Hurewitz et al. (2006) führten in diesem Zusammenhang an, dass der dominantere Einfluss einer Dimension durch die gewählte Aufgabe oder Eigenschaften der Dimension bedingt werden könne. Ferner konnte für den *size congruity effect* gezeigt werden, dass ein symmetrischer Einfluss von der Diskriminierbarkeit und Variabilität der interferierenden Dimension relativ zu der aufgabenrelevanten Dimension abhängt (Algom et al., 1996; Pansky & Algom, 1999).

Wie bereits für den SQUARC-Effekt werden im Rahmen ATOMs keine Annahmen darüber getroffen, welche konkreten Mechanismen für die Entstehung der Größeninteraktionen verantwortlich sind. Ebenfalls ist unklar, inwiefern bestehende Erklärungsmodelle zu etablierten Größeninteraktionen generalisiert werden können. So existiert beispielsweise für den *size congruity effect* ein formales Modell zur Erklärung der Interaktion zwischen numerischer und physikalischer Größe. Dieses *coalescence model* von Schwarz und Ischebeck (2003) ist bedeutsam für die Vorhersagen in Studie 3 der vorliegenden Arbeit und soll daher an dieser Stelle näher beschrieben werden. Das *coalescence model* stellt eine Variante der *random walk* Modelle dar. Dabei wird angenommen, dass die Information auf deren Basis eine Entscheidung getroffen wird, über die Zeit akkumuliert wird (siehe Abbildung 2.1). Sobald die akkumulierte Evidenz einen *threshold* a überschreitet, wird eine Entscheidung getroffen und eine Reaktion abgegeben. Die Geschwindigkeit des Akkumulationsprozesses wird anhand der *drift rate* modelliert. Im *coalescence model* wird davon ausgegangen, dass für einen numerischen Wert i und eine physikalische Größe j jeweils eine eigene *drift rate* α_i und β_j vorliegt, die beide in die Berechnung der gesamten *drift rate* μ_{ij} eingehen. Diese sei in der numerischen Aufgabe definiert als $\mu_{ij} = \alpha_i + \Theta_N \beta_j$. Wie in der Formel ersichtlich, wird der Einfluss der interferierenden Dimension durch den Parameter Θ_N gewichtet. Qualitativ lässt sich dieser Faktor dahingehend interpretieren, dass ein größerer Wert einen stärkeren Einfluss der interferierenden Dimension darstellt. Der *size congruity effect* lässt sich anhand des Modells folgendermaßen erklären: Im Falle einer kongruenten Bedingungen weisen α_i und β_j dasselbe Vorzeichen auf, was zu einer Erhöhung der *drift rate* μ_{ij} führt. Im Falle eines inkongruenten Durchgangs weisen die beiden *drift rates* dagegen unterschiedliche Vorzeichen auf, was eine Verringerung der *drift rate* μ_{ij}

zur Folge hat (siehe Abbildung 2.1). Die besondere Bedeutung des *coalescence models* besteht zusätzlich darin, dass das Modell differenzierte Vorhersagen bezüglich des *size congruity effects* erlaubt, z. B. über den Einfluss der numerischen Distanz bzw. Größendifferenz der zu vergleichenden Reize auf die Größe des *size congruity effects* (Schwarz & Ischebeck, 2003).

Abbildung 2.1

Schematische Visualisierung des Akkumulationsprozesses des coalescence models in Anlehnung an Schwarz und Ischebeck (2003)



3 Lautheit und Tonhöhe im Kontext von ATOM

3.1 Grundlagen auditiver Verarbeitung

3.1.1 Psychophysikalische Grundlagen

In diesem Kapitel sollen die Dimensionen Lautheit und Tonhöhe in Bezug auf eine Größenrepräsentation gemäß ATOM diskutiert werden. Dafür soll zunächst ein Überblick über die wichtigsten psychophysikalischen Grundlagen sowie die grundlegenden Prozesse der Verarbeitung auditiver Reize gegeben werden.

Physikalische Grundlage auditiver Reize sind Schallwellen, welche eine kontinuierliche, sich in einem Medium fortpflanzende Druckveränderungen darstellen (Moore, 2012). Diese Druckveränderungen entstehen durch freigesetzte Energie ausgehend von einem schwingenden Schallkörper. Die einfachste aller Schwingungen ist eine Sinusschwingung, welche anhand ihrer Amplitude und Frequenz charakterisiert werden kann. Das Ausmaß der Amplitude reflektiert dabei die Stärke der Schallintensität. Die Schallintensität eines akustischen Signals wird typischerweise über den Schalldruckpegel L_p in Dezibel ausgedrückt (Moore, 2012). Die Frequenz f beschreibt dagegen die Häufigkeit der Wiederholung einer Schwingung in einem definierten Zeitintervall (Moore, 2012).

Amplitude und Frequenz sind physikalisch messbare Größen. Demgegenüber stehen die psychophysikalischen Größen Lautheit und Tonhöhe, welche das perzeptuelle Korrelat der jeweiligen physikalischen Dimension darstellen (Hermes, 2023) und damit nicht physikalisch messbar sind. Lautheit stellt hierbei v. a. ein perzeptuelles Korrelat der Schallintensität dar (Florentine, 2011) während eine höhere Frequenz mit der Wahrnehmung eines höheren Tones assoziiert ist (Oxenham, 2012). Die Wahrnehmung beider Dimensionen können jedoch durch andere akustische Eigenschaften beeinflusst werden. So hängt die Lautheit eines Tones nicht nur von seinem Schalldruckpegel L_p sondern auch von der Frequenz eines Tones ab (Fletcher & Munson, 1933). Umgekehrt beeinflusst die Schallintensität in extremen Frequenzbereichen die Tonhöhenwahrnehmung von Sinustönen (Morgan et al., 1951; Stevens, 1935; Zheng & Brette, 2017).

Das American National Standards Institute (ANSI) definiert Lautheit und Tonhöhe unabhängig von ihren zugrunde liegenden physikalischen Dimensionen. So ist Lautheit definiert als die Eigenschaft

eines auditiven Wahrnehmungsereignisses, die eine Anordnung von Tönen auf einer Skala von leise zu laut erlaubt (Moore, 2012). Analog dazu wird Tonhöhe definiert als die Eigenschaft eines auditiven Wahrnehmungsereignisses, dass eine Anordnung von Tönen auf einer Skala von tief zu hoch erlaubt (Moore, 2012). Diese Definitionen ermöglichen jedoch nicht den Vergleich akustischer Phänomene anhand ihrer Lautheit und Tonhöhe. Dies ermöglichen akustische Maßeinheiten, die zum Ziel haben, den subjektiven Wahrnehmungseindruck von Lautheit und Tonhöhe zu quantifizieren. So wird zur Beschreibung des Lautstärkepegels L_N die logarithmische Maßeinheit Phon verwendet. Dieser Wert gibt an, welchen Schalldruckpegel ein Sinuston mit einer Frequenz von 1000 Hz aufweist, damit dieser Sinuston als gleich laut wie das zu beschreibende Schallereignis wahrgenommen wird (Florentine, 2011). Zwei Töne mit einer Frequenz von z. B. 100 Hz und 1000 Hz, welche beide einen Lautstärkepegel von 40 Phon aufweisen, werden also als gleich laut empfunden obwohl die zugrunde liegenden Schalldruckpegel L_p unterschiedlich ausgeprägt sind. Aufbauend auf dieser Maßeinheit wurden sogenannte Kurven gleicher Lautheit entwickelt (Fletcher & Munson, 1933; International Organization for Standardization, 2003), was den Vergleich von Tönen unterschiedlicher Frequenzen in Bezug auf ihre Lautheit ermöglicht. Nicht zu verwechseln ist der Lautstärkepegel mit der subjektiven Lautheit eines Schallereignisses, welches in der Maßeinheit Sone ausgedrückt wird (Stevens, 1936). Die Lautheit 1 Sone entspricht dabei einem Lautstärkepegel von 40 Phon, jede Erhöhung des Lautstärkepegels um 10 Phon hat eine Verdopplung der Lautheit zufolge. Analog wird auch für die wahrgenommene Tonhöhe eine spezielle akustische Maßeinheit verwendet, die Tonheit in Mel (Stevens et al., 1937). Da Tonhöhe für diese Arbeit lediglich eine untergeordnete Rolle spielt, soll jedoch auf diese Maßeinheit hier nicht näher eingegangen werden.

3.1.2 Verarbeitung auditiver Reize

Trifft ein Schallereignis auf das Ohr, wird das Trommelfell in Schwingung versetzt. Diese Schwingung wird an das Innenohr und die darin befindliche Cochlea weitergeleitet. Die Cochlea besteht aus einer Reihe unterschiedlicher Strukturen, unter anderem der Basilarmembran, auf der sich die Rezeptorzellen (Haarnerven) befinden, welche wiederum die Schwingung der Basilarmembran als neuronales Signal an die anknüpfenden Nervenzellen weitergeben (Moore, 2012). Eine Besonderheit der Basilarmembran ist, dass bei einem Ton mit gegebener Frequenz nur ein örtlich begrenzter Abschnitt der Membran ein Schwingungsmaximum erreicht. Die Lage des Maximums hängt dabei von der Frequenz des eingehenden Tones ab. Hohe Frequenzen gehen mit einer maximalen Schwingung der Membran nahe des Eingangs (Basis) einher wohingegen tiefe Töne zu maximalen Schwingungen nahe des Apex führen (Moore, 2012). Ferner stehen Schallintensität und die Rate an Aktionspotenzialen die von den Rezeptorzellen abgegeben werden in einem positiven Zusammenhang (Palmer, 1995).

Auf kortikaler Ebene erfolgt die Verarbeitung auditiver Reize im primären und sekundären auditiven Kortex, für wobei Lautheit und Tonhöhe zwei Areale hierbei von besonderer Bedeutung sind: Der transverse temporale gyrus (GTT oder Heschl's gyrus) sowie der superior temporale gyrus (GTS) (Griffiths & Hall, 2012; Uppenkamp & Röhl, 2014). Sowohl für Lautheit als auch Tonhöhe scheint jedoch der GTT

eine übergeordnete Rolle in der Verarbeitung zu spielen (Griffiths, 2003; Griffiths & Hall, 2012; Hart et al., 2002).

Neben der kortikalen Lokalisierung stellt sich ferner die Frage, ob die Verarbeitung von Lautheit und Tonhöhe innerhalb des auditiven Kortex räumlich organisiert ist. Für Tonhöhe scheint dies der Fall zu sein. So setzt sich die tonotope Organisation, wie sie bereits für die Basilarmembran zu finden ist, auf Ebene des primären auditiven Kortex im GTT fort: Neuronen des GTT, die weiter außen verortet sind, reagieren spezifisch auf tiefe Frequenzen, wohingegen Neuronen innerhalb des GTT auf höhere Frequenzen reagieren (Griffiths & Hall, 2012; Oxenham, 2012). Unklar ist, ob eine vergleichbare räumliche Organisation auch für Lautheit vorliegt. In einer Studie von Bilecen et al. (2002), führte die Veränderung des Schalldruckpegels zu einer räumlichen Verschiebung der Aktivierung innerhalb der GTT von dorsal zu medial. Leise Töne waren mit einer Aktivierung des dorsalen GTT assoziiert, wohingegen Töne mit einem hohen Schalldruckpegel eine Aktivierung im äußersten medialen Rand des GTT zur Folge hatten. Spätere Studien konnten dieses Befundmuster jedoch nicht replizieren (Uppenkamp & Röhl, 2014). Stattdessen scheint die neuronale Kodierung von Lautheit im Kortex nach dem gleichen Mechanismus wie bereits auf Ebene der Cochlea zu erfolgen. Demnach sind höhere Schalldruckpegel mit einer stärkeren Aktivierung der entsprechenden Areale im auditiven Kortex assoziiert (Hart et al., 2002; Uppenkamp & Röhl, 2014). Eine Studie von Röhl und Uppenkamp (2012) legt zudem nahe, dass die neuronale Aktivierung mit dem subjektiven Lautheitsempfinden anstatt dem Schalldruckpegel zusammenhängt.

3.2 Erfüllung der Größenkriterien

Im Folgenden soll dargestellt werden, inwiefern Lautheit und Tonhöhe die in ATOM postulierten Kriterien einer Größendimension erfüllen. Die Klassifikation von Lautheit und Tonhöhe als prothetische bzw. metathetische Dimension ist eindeutig. Lautheit stellt eine prothetische und damit quantitative Dimension dar, wohingegen Tonhöhe eine metathetische und damit qualitative Dimension ist (Stevens, 1957, 1975; Stevens & Galanter, 1957). Diese Klassifikation steht auch im Einklang mit den neuronalen Entstehungsmechanismen für Lautheit und Tonhöhe. Die Erhöhung des Schalldruckpegels geht mit einer erhöhten neuronalen Aktivität (Palmer, 1995) und damit mit einer Zunahme des Lautheitseindrucks einher, was dem angenommenen additiven Prozess prothetischer Dimensionen entspricht. Dagegen führt die Erhöhung der Frequenz zu einer Verschiebung des lokalen Aktivierungsmaximums auf der Basilarmembran (Moore, 2012) und damit einer Veränderung des Tönhöheneindrucks.

Da ATOM nur die Repräsentation prothetischer Dimensionen umfasst (Walsh, 2003, 2015), kann Tonhöhe als metathetische Dimension keine Größendimension gemäß ATOM sein. Dennoch wird diese Dimension stellenweise als Größe interpretiert. Beispielsweise argumentieren Bonn und Cantlon (2012), dass Tonhöhe eine Dimension sei, deren qualitative Änderungen als Mengenänderungen interpretiert würden. Eine empirische Prüfung dieser Behauptung blieb jedoch aus. Gleichzeitig sei an dieser Stelle angemerkt, dass die Definition von Tonhöhe als das Attribut auditiver Wahrnehmungereignisse,

nach welchem Töne auf einer Skala von niedrig zu hoch angeordnet werden können (Moore, 2012), die geforderten Kriterien Reziprozität und Transitivität quantitativer Dimensionen nach Smith und Sera (1992) erfüllt. Fraglich ist jedoch, ob sich diese Anordnung auch im Sinne eines quantitativen Vergleichs interpretieren lässt, das heißt, ob für zwei Töne mit $f_1 = 220\text{Hz}$ und $f_2 = 440\text{Hz}$ gilt, dass f_1 *weniger* ist als f_2 . Umso bedeutsamer ist es, dass auch Tonhöhe als metathetische Dimension vereinzelte Größenkriterien und empirische Vorhersagen seitens ATOM erfüllt.

Die Verarbeitung von Lautheit und Tonhöhe ist primär mit einer neuronalen Aktivierung des auditiven Kortex assoziiert. In Bezug auf eine angenommene Größenrepräsentation auditiver Reize stellt sich die Frage, ob deren Verarbeitung mit einer zusätzlichen Aktivierung der IPS assoziiert ist. Die Befundlage hierzu ist insgesamt als lückenhaft zu bewerten. Rinne et al. (2007) untersuchten die fMRI-Aktivität in einer Lautheitsklassifikationsaufgabe. Der Schalldruckpegel der Töne variierte zwischen 70 dB und 75 dB. Zusätzlich wurde die Frequenz der präsentierten Töne variiert. In 80% der Durchgänge wurde der Ton mit einer Fundamentalfrequenz von 238 Hz präsentiert, in den verbliebenen Durchgängen wurde ein um 10 bis 50 Hz tieferer Ton präsentiert. Für große Tonhöhenänderungen zeigte sich eine Aktivierung u. a. in und um die IPS. Für Änderungen im Schalldruckpegel zeigte sich keine Aktivierungsänderung spezifisch in der IPS, allerdings zeigten sich Aktivierungsüberlappungen mit Tonhöhenänderungen in linken, inferioren parietalen Kortex. Darüber hinaus konnten auch andere Studien eine Assoziation der Aktivierung in der IPS mit Tonhöhenverarbeitung zeigen (Foster et al., 2013; Foster & Zatorre, 2010; Schwenzer & Mathiak, 2011).

Eine Vielzahl an Studien konnte bereits eine Assoziation zwischen Lautheit und dem Handlungsparameter *response force* nachweisen. Versuchspersonen betätigten eine Taste mit einer höheren Druckstärke, wenn sie auf Töne mit einem hohen Schalldruckpegel reagierten, als wenn sie auf Töne mit einem geringen Schalldruckpegel reagierten (Angel, 1973; Miller et al., 1999). In einer Studie von Stahl und Rammsayer (2005) konnte zudem ein Einfluss des Schalldruckpegels aufgaben-irrelevanter Töne auf die *response force* in einer Klassifikationsaufgabe mit visuell präsentierten Reizen gezeigt werden. Ebenfalls zeigten sich Kompatibilitätseffekte zwischen der instruierten Druckstärke und Lautheit (Mattes et al., 2002; Romaiguère et al., 1993). In kompatiblen Bedingungen mussten die Versuchspersonen mit einem schwachen Tastendruck auf wenig intensive Reize und mit einem starken Tastendruck auf intensive Reize reagieren. In der inkompatiblen Bedingung war diese Zuordnung umgekehrt. Es zeigten sich kürzere Reaktionszeiten in der kompatiblen Bedingung im Vergleich zu der inkompatiblen Bedingung. Die Befunde entsprechen der bereits untersuchten Assoziation zwischen Tastendruck und numerischen Wert (Vierck & Kiesel, 2010).

Schließlich deuten auch Studien aus dem Bereich der Ideomotorik auf eine Assoziation zwischen Lautheit und der Stärke eines Tastendrucks hin. Grundlegende Annahme ideomotorischer Theorien ist, dass die antizipierten Effekte einer Handlung die Handlungsausführung beeinflussen (Greenwald, 1970). Ein wichtiger Effekt stellt der *response-effect compatibility effect* dar. Dieser beschreibt ein Befundmuster, dass Versuchspersonen schneller auf einen Reiz reagieren, wenn ihre Reaktion und ein darauffolgender Reiz

in ihren Eigenschaften übereinstimmen (Kunde, 2001; Kunde et al., 2004). Dieser Zusammenhang wurde unter anderem von Kunde (2001) für Lautheit und der Stärke des Tastendrucks untersucht. Aufgabe der Versuchspersonen war es, die Farbe eines Kreises per Tastendruck zu klassifizieren, wobei die Antwortgabe über einen schwachen oder starken Tastendruck erfolgte. Nach der Reaktion wurde ein lauter oder leiser Ton präsentiert. In kongruenten Blöcken folgte auf einen starken Tastendruck ein lauter Ton und auf einen schwachen Tastendruck ein leiser Ton. In inkongruenten Blöcken war die Zuordnung umgekehrt. Es zeigte sich ein *response-effect compatibility effect*, mit kürzeren Reaktionszeiten in kongruenten Blöcken im Vergleich zu inkongruenten Blöcken. Die Befunde wurden als Hinweis darauf interpretiert, dass bereits vor der Reaktion der Ton antizipiert wurde und dessen Eigenschaften Einfluss auf die Handlungsdurchführung hatten (Kunde, 2001). Die skizzierten Studien lassen den Schluss zu, dass Lautheit und *response force* eine stabile Assoziation aufweisen. Diese ließe sich allerdings auch dadurch erklären, dass beiden Aspekten das Konzept Intensität zugrunde liegt (Angel, 1973; Miller et al., 1999). Keine Befunde liegen dagegen für den Zusammenhang zwischen Lautheit und dem Handlungsparameter Griffweite vor, welcher einen direkteren Bezug zur tatsächlichen größenbasierten Interaktion darstellen würde.

Obwohl Tonhöhe als metathetische Dimension nicht als Größe gemäß ATOM gelten kann (Walsh, 2003, 2015) zeigt sich auch für diese Dimension ein Einfluss auf die Handlungsausführung (Rinaldi et al., 2016). Versuchspersonen initiierten ihre Greifbewegung nach einem kleinen Objekt schneller, wenn zuvor ein hoher Ton präsentiert worden war und umgekehrt führte die Präsentation eines tiefen Tones zu einer schnelleren Greifinitiierung für große Objekte. Die in der Studie nachgewiesene Assoziation entspricht damit der cross-modalen Korrespondenz zwischen Tonhöhe und Objektgröße, bei der kleine Objekte mit hohen Tönen und große Objekte mit tiefen Tönen assoziiert sind (Eitan et al., 2014; Evans & Treisman, 2011; Gallace & Spence, 2006; Parise & Spence, 2009; für eine Übersicht siehe Spence, 2019). Diese Assoziation wird jedoch als Produkt einer internalisierten Korrelation zwischen dem natürlichen Auftreten von Objektgröße und Frequenz angesehen (Spence, 2011).

Lautheit als prothetische Dimension erfüllt die theoretischen Voraussetzungen um als Größe gemäß ATOM interpretiert zu werden. Bezüglich der Handlungsrelevanz stehen die Befunde bisheriger Studien (Kunde, 2001; Mattes et al., 2002; Miller et al., 1999; Romainguère et al., 1993) im Einklang mit einer Größeninterpretation von Lautheit, wohingegen die fehlende Aktivierung im IPS (Rinne et al., 2007) dagegen spricht, wobei hier auf die geringe Anzahl an Studien hingewiesen sei. Letzteres Kriterium wird dagegen von Tonhöhe erfüllt (Foster et al., 2013; Foster & Zatorre, 2010; Schwenzer & Mathiak, 2011), welche als metathetische Dimension jedoch nicht zu ATOM gehören kann (Walsh, 2003, 2015). Im Folgenden sollen daher das Auftreten des SQUARC-Effektes sowie Größeninteraktionen für beide Dimensionen näher betrachtet werden um zu prüfen, inwiefern die empirischen Vorhersagen erfüllt werden.

3.3 Erfüllung der empirischen Vorhersagen

3.3.1 Der SQUARC-Effekt für auditive Dimensionen

Lautheit weist eine räumliche Assoziation in Form eines SQUARC-Effektes auf (Bruzzi et al., 2017; S. Chang & Cho, 2015; Fairhurst & Deroy, 2017; Fernandez-Prieto et al., 2017; Hartmann & Mast, 2017). Zur besseren Differenzierung wird dieser Effekt nachfolgend als SLARC-Effekt (*Spatial-Loudness Association of Response Codes*) bezeichnet. Der SLARC-Effekt wurde sowohl in der horizontalen als auch vertikalen Dimension nachgewiesen. In der horizontalen Dimension erfolgten rechtsseitige Reaktionen auf laute Töne schneller als linksseitige Reaktionen, wohingegen auf leise Töne linksseitige Reaktionen schneller erfolgten (S. Chang & Cho, 2015; Fairhurst & Deroy, 2017; Hartmann & Mast, 2017). In einer frühen Studie von Ren et al. (2011) konnte allerdings kein horizontaler SLARC-Effekt nachgewiesen werden, was jedoch eventuell durch die Aufgabe des Experimentes bedingt sein mag. Den Versuchspersonen wurden nacheinander zwei Töne unterschiedlicher Lautheit präsentiert und sie mussten per linken oder rechten Tastendruck angeben, ob der zweite Ton lauter oder leiser als der erste Ton sei. Sowohl die Lautheit des ersten als auch des zweiten Tones wurden pro Durchgang variiert. Daher war es möglich, dass ein Ton, welcher in Durchgang $n - 1$ lauter als der erste Ton war, im Durchgang n dagegen der leisere der beiden Töne war. Töne der mittleren Lautheitsausprägungen wiesen somit sowohl eine absolute Lautheitsinformation auf, welche über das Experiment hinweg konstant blieb, als auch eine relative Lautheitsinformation, welche über die unterschiedlichen Durchgänge hinweg variierte. Da SQUARC-Effekte von der relativen Größe der Reize abhängen (Dehaene et al., 1993; Wühr & Richter, 2022), mag die über Durchgänge hinweg variierende relative Größe Ausschlag für den fehlenden Effekt gewesen sein. Diese Interpretation wird dadurch gestützt, dass der SLARC-Effekt bei Präsentation eines einzelnen Tones, welcher relativ zu einem impliziten Lautheitslevel klassifiziert werden soll, auftrat (Hartmann & Mast, 2017). Ferner zeigte sich der Effekt auch dann, wenn Lautheit nicht das aufgabenrelevante Merkmal war, sondern die Klangfarbe eines Tones klassifiziert werden sollte (S. Chang & Cho, 2015).

Spätere Studien untersuchten den SLARC-Effekt zudem mit vertikal angeordneten Tasten (Bruzzi et al., 2017; Fernandez-Prieto et al., 2017). Exemplarisch soll an dieser Stelle die Studie von Bruzzi et al. (2017) näher skizziert werden. In dieser Studie mussten die Versuchspersonen entscheiden, ob ein Ton lauter oder leiser als ein zuvor präsentierter Standardton war. Während der Standardton eine fixe Lautheit aufwies, wurde die Lautheit des zweiten Tones sechsstufig variiert, mit jeweils drei lauterem und drei leiseren Tönen. Es zeigte sich ein signifikanter Effekt der Distanz mit schnelleren Reaktionszeiten für Töne, die eine größere Lautheitsdistanz zum Standardton aufwiesen. Die inferenzstatistische Absicherung des SLARC-Effektes erfolgte über den Faktor Kompatibilität, wobei ein Durchgang als kompatibel bewertet wurde, wenn die Versuchspersonen mit der oberen Taste auf laute bzw. mit der unteren Taste auf leise Töne reagieren mussten. Auch für Kompatibilität zeigte sich ein signifikanter Effekt mit kürzeren Reaktionszeiten in kompatiblen Durchgängen. Die Existenz einer vertikalen räumlichen Assoziation für Lautheit wird auch durch Kompatibilitätseffekte in anderen experimentellen Paradigmen gestützt

(Puigcerver et al., 2019).

Das Auftreten eines SLARC-Effektes erfüllt prinzipiell die erste empirische Vorhersage gemäß ATOM (Walsh, 2003). Auch interpretierten bisweilen die aufgeführten Studien den SLARC-Effekt bereits als Indikator, dass Lautheit als Größe im Sinne von ATOM repräsentiert sei (Bruzzi et al., 2017). Allerdings erlauben bisherige Experimente nicht den Ausschluss einer alternativen Theorie. So wird das *polarity correspondence principle* (Proctor & Cho, 2006) ebenfalls als Erklärung für den SLARC-Effekt herangezogen (S. Chang & Cho, 2015). In dieser Theorie wird angenommen, dass in binären Klassifikationsaufgaben die Pole der Reiz- und Antwortdimension mit einer negativen und positiven Polarität kodiert werden. Auf Reaktionsebene würden dabei linksseitige Reaktionen negativ, rechtsseitige Reaktionen dagegen positiv kodiert werden (Proctor & Cho, 2006), auf Reizebene seien laute Töne positiv und leise Töne negativ kodiert (S. Chang & Cho, 2015). Wenn Reiz- und Reaktionspolarität übereinstimmen - beispielsweise, wenn Versuchspersonen mit einer rechten Taste auf einen lauten Ton reagieren müssen - führe dies zu einem Reaktionszeitvorteil wohingegen nicht übereinstimmende Polaritäten eine Reaktionszeitverlangsamung zur Folge hätten.

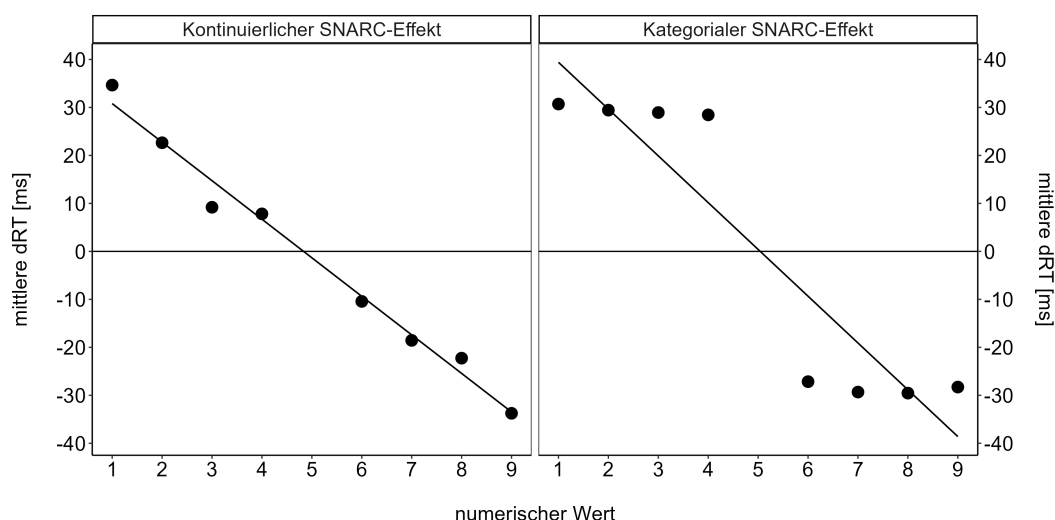
Die Befunde bisheriger Studien stehen sowohl mit dem *polarity correspondence principle* als auch der Annahme einer Größenrepräsentation von Lautheit im Sinne von ATOM und einer daraus folgenden räumlichen Assoziation im Einklang. Gemäß *polarity correspondence principle* muss eine Reizdimension in zwei Polaritäten dichotomisiert werden, insbesondere, wenn auf Reizebene mehr als zwei Reizausprägung vorliegen (Cho et al., 2012; Proctor & Cho, 2006). Diese Dichotomisierung erfolgt durch die Anforderung einer binären Klassifikationsaufgabe, in der die Reize explizit dichotomisiert werden müssen oder durch die Präsentation eines Referenzreizes, anhand dessen die Klassifikation der Reize erfolgt (Cho et al., 2012). Da der SLARC-Effekt in bisherigen Studien ausschließlich in Lautheitsklassifikationsaufgaben (Bruzzi et al., 2017; Hartmann & Mast, 2017) oder mit der Präsentation eines Standardreizes (S. Chang & Cho, 2015) untersucht wurde, lässt sich das *polarity correspondence principle* als Erklärung nicht ausschließen.

Das *polarity correspondence principle* impliziert zudem ein spezifisches Ergebnismuster des SLARC-Effektes. Typischerweise erfolgt die statistische Analyse des SLARC-Effektes über die Auswertung der *difference of reaction time* (dRT) (Fias et al., 1996). Pro Zahl wird die Differenz zwischen den Reaktionszeiten für links- und rechtsseitige Reaktionen berechnet ($dRT = RT_{rechts} - RT_{links}$). Visualisiert man das Ergebnismuster zeigt sich typischerweise ein linearer, negativer Zusammenhang zwischen dRT und numerischen Wert, wie er in Abbildung 3.1, links zu sehen ist. Das *polarity correspondence principle* impliziert dagegen das Auftreten eines kategorialen Effektes (Abbildung 3.1, rechts). Bei Übereinstimmung der Antwort- und Reizpolarität tritt ein Reaktionszeitvorteil auf (Proctor & Cho, 2006). Da keine weitere Abstufung der Polarität angenommen wird, ist das Ausmaß des Reaktionszeitvorteils vergleichbar für alle Bedingungen, in denen eine Übereinstimmung auftritt. Umgekehrt sollte das gleiche Ausmaß an Verlangsamung auftreten, sofern Antwortpolarität und Reizpolarität nicht übereinstimmen. Die Befunde aus der Studie von Bruzzi et al. (2017) deuten darauf hin, dass der SLARC-Effekt in Lautheitsklassifikationsaufgaben kategorial auftritt. Allerdings

sind die Befunde aufgrund der Aufgabe nur eingeschränkt interpretierbar. So zeigte sich auch für den SNARC-Effekt ein kategoriales Muster in Größenklassifikationsaufgaben (Gevers et al., 2006; Wood et al., 2008).

Abbildung 3.1

Simulierte Daten zur Visualisierung des hypothetischen Ergebnismuster eines kontinuierlichen SNARC-Effekts (links) und eines kategorialen SNARC-Effektes (rechts)



Anmerkung. Regressionsgerade entsprechend einer linearen Regression mit dRT als Kriterium und numerischer Wert als Prädiktor

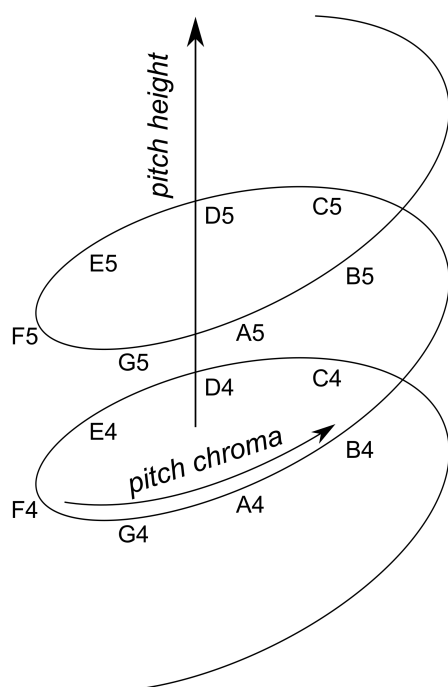
Auch für Tonhöhe konnten Studien eine räumliche Assoziation zeigen (Fernandez-Prieto et al., 2017; Guilbert, 2020; Lega et al., 2020; Lidji et al., 2007; Pitteri et al., 2017, 2021; Rusconi et al., 2006), angezeigt durch den SPARC-Effekt (*Spatial-Pitch Association of Response Codes*). Das Auftreten des Effektes wurde allerdings maßgeblich durch die räumliche Anordnung der Tasten, der durchzuführenden Aufgabe sowie der musikalischen Erfahrung der Versuchspersonen beeinflusst. Erforderte die Aufgabe der Versuchspersonen, die Tonhöhe eines präsentierten Tons relativ zu einem Standardton oder einer impliziten Tonhöhe zu klassifizieren, zeigte sich ein SPARC-Effekt unabhängig von der räumlichen Anordnung der Tasten und der musikalischen Erfahrung. Erforderte die Aufgabe dagegen die Klassifikation eines anderen Attributes, z. B. der Klangfarbe des Tones, so zeigte sich bei musikalisch nicht-erfahrenen Versuchspersonen der SPARC-Effekt nur mit einer vertikalen Tastenanordnung, nicht jedoch mit einer horizontalen Tastenordnung (Lega et al., 2020; Lidji et al., 2007; Rusconi et al., 2006). Für musikalisch erfahrene Personen zeigte sich dagegen in dieser Aufgabe in beiden räumlichen Dimensionen ein SPARC-Effekt.

Aufgrund der Unterschiede im automatischen Auftreten des horizontalen und vertikalen SPARC-Effektes liegen beiden Effekten unterschiedliche Erklärungen zugrunde. Da der Fokus der Dissertation auf der Untersuchung des vertikalen SPARC-Effektes liegt, soll nur dieser im weiteren Verlauf detaillierter

skizziert werden. Da der vertikale SPARC-Effekt in einer Klangfarbendiskriminationsaufgabe selbst für musikalisch unerfahrene Versuchspersonen auftrat, (Lidji et al., 2007; Rusconi et al., 2006), wurde der Effekt durch eine internale, räumliche Repräsentation von Tonhöhe erklärt (z. B. Lidji et al., 2007) gemäß früheren mentalen Repräsentationsmodellen von Tonhöhe (Shepard, 1982; Ueda & Ohgushi, 1987). Diese räumliche Repräsentation entspräche einer sich nach oben schraubenden Helixstruktur (Abbildung 3.2).

Abbildung 3.2

Schematische Darstellung der angenommenen räumlichen Repräsentation von Tonhöhe nach Shepard (1982) für die Ganztöne der vierten und fünften Oktave



Diese Repräsentationsform soll dem Umstand Rechnung tragen, dass das Konzept Tonhöhe typischerweise zwei unterschiedliche psychologische Dimensionen umfasst: Die Tonhöhe als solche (*pitch height*) und die Tonfarbe (*pitch chroma*). Zur besseren Differenzierung werden nachfolgend die englischen Begriffe verwendet. Wie bereits in vorherigen Abschnitten dieser Arbeit erwähnt, stellt Tonhöhe das perzeptuelle Korrelat der Frequenz eines Tones dar. *Pitch height* als solche ist dabei direkt mit der Frequenz korreliert. Eine Zunahme der Frequenz entspricht einer Zunahme der *pitch height*. Gleichzeitig verändert sich mit Zunahme der Frequenz auch die *pitch chroma* also die wahrgenommene Qualität des Tones. Diese ist jedoch zirkulär angeordnet, weshalb sich mit zunehmender Frequenz die Ausprägung der *pitch chroma* wiederholt (Shepard, 1982). Töne gleicher *pitch chroma*, wie beispielsweise F4 und F5, würden daher als ähnlicher empfunden werden, als Töne unterschiedlicher *pitch chroma*, beispielsweise F4 und C4, obwohl die absolute Frequenzdifferenz in ersterem Fall höher ist. Diese empfundene Ähnlichkeit

scheint jedoch durch die Aufgabenanforderungen beeinflusst zu werden (Cohen Kadosh, Brodsky, et al., 2008). In einem *same-different*-Paradigma zeigten sich erhöhte Reaktionszeiten für Tonpaare mit einer Frequenzdifferenz von zwölf Halbtonschritten und damit gleicher *pitch chroma* im Vergleich zu Tonpaare mit einer Frequenz von elf Halbtonschritten. Musste dagegen die Tonhöhe eines zweiten Tones relativ zu einem vorherigen Standardton klassifiziert werden, waren die Reaktionszeiten eine negative Funktion der absoluten Frequenzdifferenz (Cohen Kadosh, Brodsky, et al., 2008).

Lautheit und Tonhöhe erfüllen damit beide die empirische Vorhersage einer räumlichen Assoziation. Da Tonhöhe explizit nicht als Größe gemäß ATOM angesehen wird (Walsh, 2003, 2015), unterstützt das Auftreten des SPARC-Effektes den Kritikpunkt, dass SQUARC-Effekte alleine nicht als Indikatoren einer Größenrepräsentation angesehen werden können (Casasanto & Pitt, 2019; Pitt & Casasanto, 2022). Gleichzeitig implizieren die unterschiedlichen Erklärungen zur Entstehung der Effekte (Bruzzi et al., 2017; Lidji et al., 2007), dass dem SLARC-Effekt und SPARC-Effekt unterschiedliche Repräsentationssysteme zugrunde liegen sollten. Eine empirische Prüfung dieser Annahme blieb jedoch bisher aus. Betrachtet man ferner das Verhältnis des SPARC-Effektes und SLARC-Effektes zu SQUARC-Effekten etablierter Größendimensionen, so zeigt sich ein Befundmuster, welches nicht mit theoretischen Annahmen vereinbar ist. Im Falle einer gemeinsamen Repräsentation sollten SQUARC-Effekte interagieren. Zwar zeigte sich in einer Studie von Hartmann und Mast (2017) mit gesprochenen Zahlwörtern unterschiedlicher Lautheit eine Interaktion zwischen Lautheit und numerischen Wert, nicht jedoch zwischen dem SLARC-Effekt und dem SNARC-Effekt. Ferner traten beide Effekte in der genannten Studie nicht gleichzeitig auf, sondern waren von der Aufgabe abhängig: Der SLARC-Effekt trat exklusiv in einer Lautheitsklassifikationsaufgabe auf, der SNARC-Effekt war auf die Zahlen- und Paritätsklassifikationsaufgabe beschränkt. Die ausbleibende Interaktion zwischen dem SNARC- und SLARC-Effekt ließe sich dadurch erklären, dass aus einer gemeinsamen Repräsentation nicht zwangsläufig eine Interaktion folgen muss, sprich auch additive Effekte mit der Annahme eines gemeinsamen Ursprungs vereinbar sind (Sternberg, 1969). Allerdings zeigte sich in vergleichbaren experimentellen Paradigmen ein Interaktionseffekt zwischen SNARC-Kompatibilität und SPARC-Kompatibilität (Weis et al., 2015, 2016). Dieses Interaktionsmuster ist nicht mit theoretischen Annahmen über die unterschiedlichen räumlichen Repräsentationen, die Zahlen und Tonhöhe zugrunde liegen, erklärbar. Die Befunde sind jedoch nur eingeschränkt interpretierbar, da die Auswertung lediglich über die Kompatibilitätsfaktoren für beide Dimensionen erfolgte (Weis et al., 2015, 2016).

3.3.2 Interaktionen zwischen auditiven Dimensionen und Größendimensionen

Mehrere Studien konnten zeigen, dass Lautheit mit unterschiedlichen Größendimensionen entsprechend der postulierten monotonen Beziehung interagiert (Alards-Tomalin et al., 2015, 2017; Hartmann & Mast, 2017; Heinemann et al., 2013; Marks, 1987; Takeshima & Gyoba, 2013). Eine Studie zu cross-modalen Korrespondenzen konnten eine Assoziation zwischen Lautheit und der Helligkeit eines Objektes zeigen (Marks, 1987). In einer Lautheitsklassifikationsaufgabe zeigten sich kürzere Reaktionszeiten, wenn ein

lauter Ton gleichzeitig mit einem hellen Objekt präsentiert wurde. Auch wenn die Versuchspersonen auf die Helligkeit des Reizes reagieren sollten, zeigte sich ein vergleichbarer Effekt der Lautheit des aufgabenirrelevanten Tones. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass Lautheit einen Einfluss auf die Größenwahrnehmung zu haben scheint (Takeshima & Gyoba, 2013). In dieser Studie wurden den Versuchspersonen nacheinander zwei Kreise für jeweils 50 ms mit einem konstanten ISI von 500 ms dargeboten. Aufgabe der Versuchspersonen war es zu entscheiden, ob der erste oder zweite Kreis der größere von beiden war. Variiert wurde, ob der Standardkreis (Durchmesser: 4° Schwinkel) als erstes oder zweites präsentiert wurde. Ferner wurde gleichzeitig mit dem Zielkreis ein Ton mit einem Schalldruckpegel von 55 dB oder 85 dB präsentiert. Bei Präsentation des Tones mit einem höheren Schalldruckpegel wurde der Zielkreis signifikant häufiger als größer als der Standardkreis klassifiziert. In einem anschließenden Folgeexperiment wurde zusätzlich die *stimulus-onset asynchrony* (SOA) zwischen Präsentationsbeginn des Tons und des Zielreizes variiert. Bei einem zeitlichen Versatz von über 100 ms zeigte sich kein signifikanter Effekt der Lautheit des begleitenden Tones auf das Größurteil. In einer späteren Studie konnte jedoch der Effekt von statisch lauten und leisen Tönen auf die Größenwahrnehmung nicht nachgewiesen werden (Sutherland et al., 2014). Stattdessen zeigte sich lediglich ein signifikanter Effekt dynamisch anschwellender Töne auf die Größen- und Helligkeitswahrnehmung.

Auch zwischen Lautheit und dem numerischen Wert einer Zahl wurde eine gegenseitige Beeinflussung festgestellt (Alards-Tomalain et al., 2015, 2017; Hartmann & Mast, 2017; Heinemann et al., 2013). In einer Studie von Heinemann et al. (2013) wurde den Versuchspersonen zunächst ein Ton präsentiert, welcher sowohl in seiner Lautheit (leise vs. laut) als auch Präsentationsdauer (200 ms vs. 800 ms) variieren konnte. In 25% der Durchgänge mussten die Versuchspersonen nach Präsentation des Tones eine zufällige Zahl generieren. In allen weiteren Durchgängen mussten sie den Ton entweder bezüglich seiner Lautheit oder seiner Dauer klassifizieren. Die potenziell aufgabenrelevante Dimension wurde vor Präsentation des Tones anhand eines *cues* angezeigt. Tatsächlich fand sich sowohl ein Einfluss der Lautheit als auch der Dauer des Tones: Versuchspersonen nannten im Mittel größere numerische Werte, wenn ihnen zuvor ein lauter oder langer Ton präsentiert wurde. Dieser Effekt zeigte sich jedoch nur für die Dimension, welche zuvor anhand des *cues* als potenziell aufgabenrelevant angezeigt worden war. Dies deutet daraufhin, dass Lautheit die Verarbeitung des numerischen Wertes nicht automatisch beeinflusst.

Demgegenüber stehen die Befunde einer Studie von Hartmann und Mast (2017). In ihrer Studie präsentierten die Autoren ihren Versuchspersonen gesprochene Zahlwörter, die sowohl in ihrem numerischen Wert als auch in ihrem Lautheitslevel variiert wurden. Den Versuchspersonen wurde auf dem jeweils linken und rechten Ohr ein Zahlwort präsentiert und sie mussten per Tastendruck entscheiden, ob das linke oder rechte Zahlwort das numerisch größere (Experiment 1a) bzw. das lautere (Experiment 1b) war. In beiden Aufgaben zeigte sich ein Interaktionseffekt zwischen Lautheit und numerischer Größe: Versuchspersonen reagierten schneller auf numerisch große, laut gesprochene Zahlen und numerisch kleine, leise gesprochene Zahlen (kongruente Bedingung) als auf die umgekehrte Reizkombination

(inkongruente Bedingung). Da die interferierende Dimension in beiden Experimenten aufgabenirrelevant war, kann von einem automatischen Einfluss, vergleichbar mit dem *size congruity effect* (Kochari & Schriefers, 2021; Tzelgov et al., 1992) gesprochen werden. Die Interaktion tat auch dann auf, wenn nur ein einzelnes Zahlwort pro Durchgang präsentiert wurde und für dieses entschieden werden musste, ob der numerische Wert größer oder kleiner als 5 sei oder ob das Wort lauter oder leiser als ein vorgegebener Lautheitslevel war.

Die Befunde von Hartmann und Mast (2017) deuten auf einen automatischen und direktional symmetrischen Einfluss zwischen Lautheit und numerischen Wert. Allerdings wurden beide Dimensionen in derselben Modalität realisiert. Gemäß ATOM werden Größeninteraktionen durch eine gemeinsame Abbildung auf einem generalisierten Größensystem erklärt (Buetti & Walsh, 2009; Walsh, 2003, 2015). Daher sollten sich uni-modale und cross-modale Größeninteraktionen nicht unterscheiden, da in beiden Fällen dieselbe zugrunde liegende generalisierte Größeninformation verantwortlich für die wechselseitige Beeinflussung ist. Aufgrund der wenigen empirischen Arbeiten lässt sich dies zum jetzigen Zeitpunkt jedoch für die Interaktion zwischen Lautheit und numerischen Wert nicht eindeutig beantworten. So lassen sich nur bedingt Aussagen über einen direktional symmetrischen sowie automatischen cross-modalen Einfluss treffen. In einer Reihe von Experimenten wurde der Einfluss visuell präsentierter Zahlen auf die Wahrnehmung von Lautheit untersucht (Alards-Tomalin et al., 2015, 2017). In der Studie von Alards-Tomalin et al. (2015) sollten Versuchspersonen entscheiden, ob ein Zielton lauter oder leiser als ein zuvor präsentierter Standardton war. Gemeinsam mit dem zweiten Ton wurde eine Zahl präsentiert, deren numerischer Wert 1, 4, 6 oder 9 betragen konnte. Neben der Lautheit der Vergleichstöne und dem numerischen Wert der interferierenden Zahlen variierten die Autoren den Präsentationszeitpunkt der Zahl. Diese wurde entweder gleichzeitig mit dem Zielton (Experiment 1), vor dem Zielton ohne weitere Instruktion (Experiment 2) oder vor dem Zielton aber mit der Instruktion, die Zahl im Arbeitsgedächtnis zu behalten (Experiment 3), präsentiert. Lediglich in Experiment 1 und Experiment 3 zeigte sich ein Einfluss der Zahl dahingehend, dass der Zielton signifikant häufiger als lauter als der Standardton beurteilt wurde, wenn eine numerisch große Zahl präsentiert worden war. Die Befunde aus Experiment 1 deuten dennoch auf einen automatischen Einfluss hin, da die Zahl nicht aufgabenrelevant war. Für die directionale Symmetrie wäre jedoch ein umgekehrter Einfluss von Lautheit auf die Verarbeitung visuell präsentierter Zahlen notwendig. Hierzu gibt es jedoch zum jetzigen Zeitpunkt keine empirischen Untersuchungen.

Neben der Vergleichbarkeit uni-modaler und cross-modaler Größeninteraktionen sollten auch Größeninteraktionen unterschiedlicher Dimensionspaare vergleichbare Ergebnismuster aufweisen. Sollten Größeninteraktionen durch eine gemeinsame Repräsentation auf einem generalisierten Größensystem zurückzuführen sein (Buetti & Walsh, 2009; Walsh, 2003, 2015), sollte der Beeinflussung ein vergleichbarer Mechanismus zugrunde liegen, was sich in vergleichbaren Ergebnismustern für unterschiedliche Größeninteraktionen äußern sollte. Ob die Interaktion zwischen Lautheit und numerischen Wert vergleichbar ist mit Interaktionen zwischen etablierten Größendimensionen kann nur eingeschränkt bewertet werden. Zwar ähnelt die uni-modale Interaktion zwischen Lautheit und numerischen Wert

(Hartmann & Mast, 2017) dem *size congruity effect* in Bezug auf einen automatischen und bidirektionalen Einfluss (Foltz et al., 1984; Henik & Tzelgov, 1982; Kochari & Schriefers, 2021; Schwarz & Ischebeck, 2003; Tzelgov et al., 1992). Allerdings ließen sich für den *size congruity effect* differenzierte Ergebnismuster in Bezug auf den Einfluss der Salienz der interferierenden Dimension (Algom et al., 1996; Pansky & Algom, 1999) oder der Verarbeitungsgeschwindigkeit, operationalisiert über die Distanz zwischen zwei zu vergleichenden Reizen (Schwarz & Ischebeck, 2003), zeigen. Letztere können zudem durch das bereits in Kapitel 2 skizzierte *coalescence model* (Schwarz & Ischebeck, 2003) erklärt werden. Eine derartig differenzierte Charakterisierung ist aufgrund der wenigen Studien für die Interaktion zwischen Lautheit und numerischen Wert nicht möglich, wenngleich vereinzelte Befunde auf einen Einfluss der Distanz auf die Größe der Interaktion zwischen Lautheit und numerischen Wert hindeuten (Hartmann & Mast, 2017).

Wie bereits angeführt, konnten verschiedene Studien eine cross-modale Korrespondenz zwischen Tonhöhe und Objektgröße zeigen, gemäß derer große Objekte mit tiefen und kleine Objekte mit hohen Tönen assoziiert werden (Eitan et al., 2014; Evans & Treisman, 2011; Gallace & Spence, 2006; Parise & Spence, 2009; Spence, 2011, 2019). Auch wurde bereits vereinzelt der Zusammenhang zwischen numerischen Wert und Tonhöhe untersucht (Campbell & Scheepers, 2015; Oriet et al., 2005; Vainio et al., 2019). Die Befunde sind hier jedoch weniger eindeutig. So zeigte sich für zwei nacheinander präsentierte, gesprochene Zahlwörter unterschiedlicher Frequenzen kein Effekt der Überstimmung zwischen Zahl- und Frequenzänderung auf die Reaktionszeit (Campbell & Scheepers, 2015). Demgegenüber stehen die Befunde aus einer Studie von Oriet et al. (2005). Bei dieser Studie handelte es sich um ein Doppelaufgabenexperiment, d. h. die Versuchspersonen führten nacheinander mit einem kurzen zeitlichen Abstand eine Tonhöhenklassifikationsaufgabe und eine Zahlenklassifikationsaufgabe. Variiert wurde die SOA zwischen dem Präsentationsbeginn des Reizes der ersten Aufgabe und des Reizes der zweiten Aufgabe, wobei die Tonhöhenklassifikationsaufgabe immer die erste Aufgabe darstellte. Für kurze SOA zeigte sich ein rückwärtsgerichteter Effekt des numerischen Wertes auf die Performanz in der Tonhöhenklassifikationsaufgabe – ein *backward crosstalk compatibility effect* (BCE). So reagierten Versuchspersonen schneller auf hohe Töne, wenn in der Zahlenklassifikationsaufgabe eine numerisch große Zahl präsentiert wurde. Da die Versuchspersonen in beiden Aufgaben unterschiedliche Tasten betätigten, schlossen die Autoren einen *response overlap* aus und führten den Kompatibilitätseffekt stattdessen auf die übereinstimmenden Stimuluseigenschaften zurück (Oriet et al., 2005). Diese Assoziationsrichtung ist somit gegenläufig zu der cross-modalen Korrespondenz zwischen Tonhöhe und Objektgröße.

4 Fragestellung

Vergleicht man Größenkriterien und geforderte Effekte mit den Befunden bisheriger Untersuchungen zu Lautheit, zeigt sich ein größtenteils kohärentes, wenngleich lückenhaftes Befundmuster. Befunde bisheriger Studien sind prinzipiell mit der Annahme vereinbar, dass Lautheit eine Größendimension im Sinne von ATOM darstellt. Lautheit ist eine prothetische Dimension (Stevens, 1957, 1975; Stevens & Galanter, 1957), welche mit dem Handlungsparameter Stärke des Tastendrucks assoziiert ist (Kunde, 2001; Kunde et al., 2004; Mattes et al., 2002; Miller et al., 1999; Romaiguère et al., 1993). Die wenigen Befunde zur neuronalen Implementierung in der IPS sind dagegen nicht eindeutig (Rinne et al., 2007), aufgrund der geringen Anzahl an Studien kann jedoch keine abschließende Aussage getroffen werden. In Bezug auf die empirischen Vorhersagen seitens ATOM deuten bisherige Studien auf einen SQUARC-Effekt für Lautheit hin (Bruzzi et al., 2017; S. Chang & Cho, 2015; Fairhurst & Deroy, 2017; Fernandez-Prieto et al., 2017; Hartmann & Mast, 2017), wenngleich das *polarity correspondence principle* (S. Chang & Cho, 2015; Proctor & Cho, 2006) als Alternativerklärung nicht ausgeschlossen werden kann. Ferner konnten vereinzelte Studien Interaktionen zwischen Lautheit und dem numerischen Wert einer Zahl zeigen (Alards-Tomalin et al., 2015, 2017; Hartmann & Mast, 2017; Heinemann et al., 2013). Allerdings ist unklar, ob die cross-modale Interaktion zwischen Lautheit und numerischen Wert in Bezug auf einen bidirektionalen und automatischen Einfluss mit der uni-modalen Interaktion (Hartmann & Mast, 2017) vergleichbar ist. Darüber hinaus mangelt es an Untersuchungen, welche es ermöglichen, Annahmen über die zugrunde liegenden Mechanismen der Interaktion zwischen Lautheit und numerischen Wert zu treffen und zu entscheiden, ob diese den angenommenen Mechanismen für Interaktionen zwischen etablierten Größendimensionen entsprechen. Zusammengefasst kann zum jetzigen Zeitpunkt nicht beurteilt werden, ob die gefundenen Effekte als Indikatoren einer Größenrepräsentation von Lautheit interpretiert werden können. Für den SLARC-Effekt ist unklar, ob er das Resultat übereinstimmender Antwort- und Reizpolaritäten gemäß *polarity correspondence principle* (Proctor & Cho, 2006) ist. Für die cross-modale Interaktion zwischen Lautheit und numerischen Wert ist unklar, inwiefern diese in ihrem Befundmuster der uni-modalen Interaktion und Interaktionen zwischen etablierten Größendimensionen entspricht.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die skizzierten Lücken bezüglich des SLARC-Effektes und der Interaktion zwischen Lautheit und dem numerischen Wert zu schließen und dadurch folgende Frage zu beantworten: Ist Lautheit eine Größendimension gemäß der Definition nach ATOM (Bueti & Walsh, 2009;

Walsh, 2003, 2015)? Die Fragestellung wurde in fünf Experimenten untersucht, welche wiederum in drei Studien gegliedert wurden. Im Folgenden werden die einzelnen Studien mit ihrer jeweiligen Fragestellung kurz skizziert und in Relation zur übergeordneten Fragestellungen der Dissertation gesetzt.

Studie 1 widmete sich der Untersuchung, ob der SLARC-Effekt auch dann auftritt, wenn Lautheit nicht die aufgabenrelevante Reizdimension darstellt und kein zusätzlicher Standardton präsentiert wird. Gemäß *polarity correspondence principle* erfordert eine mehrstufige Reizdimension die Dichotomisierung des Reizmaterials, damit jeder Reiz eindeutig als positiv oder negativ kodiert werden kann (Cho et al., 2012; Proctor & Cho, 2006). Diese Dichotomisierung kann über eine externe Referenz in Form eines Standardtons erfolgen oder implizit wenn die Aufgabe eine binäre Kategorisierung des Reizmaterials erfordert. Dies wäre beispielsweise der Fall, wenn Versuchspersonen einen Ton als lauter oder leiser relativ zu einem impliziten Lautheitslevel klassifizieren müssten. Um zwischen dem *polarity correspondence principle* (Proctor & Cho, 2006) und der Annahme einer räumlichen Assoziation aufgrund einer Größenrepräsentation von Lautheit (Bruzzi et al., 2017) zu differenzieren, wurde in Studie 1 wurde eine Klangfarbendiskriminationsaufgabe ohne zusätzliche Präsentation eines Standardtons durchgeführt. Dadurch war weder ein impliziter noch expliziter Referenzpunkt gegeben. Sollte der SLARC-Effekt lediglich das Ergebnis einer übereinstimmenden Antwort- und Reaktionspolarität sein, sollte sich kein SLARC-Effekt zeigen. Dagegen würde das automatische Auftreten SLARC-Effektes darauf hindeuten, dass dieser durch eine räumliche Assoziation entsteht.

In Studie 2 wurde das Verhältnis zwischen dem SLARC-Effekt und SPARC-Effekt untersucht. Konkret wurde in diesem Experiment der Frage nachgegangen, ob die beiden Effekte simultan und unabhängig voneinander auftreten. Tonhöhe stellt keine Größe gemäß ATOM dar (Walsh, 2003, 2015) und das Auftreten des SPARC-Effektes wurde in bisherigen Studien (z. B. Lidji et al., 2007) durch die räumliche Repräsentation von Tonhöhe in Form einer Helixstruktur erklärt (Shepard, 1982; Ueda & Ohgushi, 1987). Der SLARC-Effekt wurde dagegen bereits als Indikator einer Größenrepräsentation von Lautheit im Sinne von ATOM interpretiert (z. B. Bruzzi et al., 2017). Dem SLARC-Effekt und SPARC-Effekt liegen damit unterschiedliche Ursprünge zugrunde, weshalb beide Effekte unabhängig voneinander auftreten sollten. Ziel war die empirische Prüfung dieser Vorhersage. Dies erscheint auch dahingehend wichtig, da die Interaktionsmuster zwischen auditiven SQUARC-Effekten und visuellen SQUARC-Effekten den theoretischen Vorhersagen von ATOM widersprechen. Während der SLARC-Effekt und SNARC-Effekt nicht interagierten (Hartmann & Mast, 2017), zeigte sich in vereinzelt Studien eine Interaktion zwischen SPARC-Kompatibilität und SNARC-Kompatibilität (Weis et al., 2015, 2016). In Studie 2 wurde daher erneut ein Experiment mit einer Klangfarbendiskriminationsaufgabe durchgeführt, in der diesmal jedoch Lautheit und Tonhöhe unabhängig voneinander variiert wurden.

Schließlich widmete sich Studie 3 der Untersuchung der Interaktion zwischen Lautheit und numerischen Wert. Bisherige Befunde deuten an, dass ein automatischer und bidirektionaler Einfluss zwischen Lautheit und numerischen Wert auftritt, wenn beide Dimension innerhalb derselben Modalität realisiert wurden (Hartmann & Mast, 2017). Nur bedingt nachgewiesen wurde ein vergleichbarer

Einfluss für eine cross-modale Interaktion zwischen Lautheit und numerischen Wert (Alards-Tomalin et al., 2015). Studie 3 stellte eine Synthese der experimentellen Ansätze beider erwähnter Studien dar. In allen Experimenten aus Studie 3 wurden den Versuchspersonen visuelle Zahlen sowie gleichzeitig Töne über Kopfhörer präsentiert. Untersucht wurde, ob sich ein automatischer, cross-modaler Einfluss der Lautheit auf die Verarbeitung visueller Zahlen zeigt. Ferner wurde untersucht, ob eine derartige cross-modale Interaktion direktional symmetrisch ist. Schließlich hatte Studie 3 zum Ziel, zu prüfen, ob der cross-modalen Interaktion zwischen Lautheit und numerischen Wert vergleichbare Mechanismen wie in etablierten Größeninteraktionen zugrunde liegen. Hierfür wurde sich am *size congruity effect* orientiert, für den gezeigt werden konnte, dass die numerische Distanz bzw. physikalische Differenz zwischen den zu vergleichenden Zahlen die Größe des *size congruity effects* beeinflusst (Schwarz & Ischebeck, 2003). Ausgehend von der Annahme, dass diese Interaktion ebenfalls durch eine gemeinsame Größenrepräsentation erklärt wird, sollte sich dieses Befundmuster auf die Interaktion zwischen Lautheit und numerischen Wert generalisieren lassen.

Bei der vorliegenden Dissertation handelt es sich um eine kumulative Dissertation. Daher erfolgt die Darstellung der experimentellen Arbeiten in einem bereits publizierten Originalartikel bzw. in zwei eingereichten Manuskripten. Studie 1 wird in einem bereits publizierten Artikel dargestellt. Studie 2 und Studie 3 werden in zwei Manuskripten dargestellt, wobei das Manuskript für Studie 2 bereits ein *peer-review* durchlaufen hat und zur Publikation angenommen wurde. Das Manuskript für Studie 3 wurde in einem *journal* mit *peer-review* eingereicht.

5 Studien

5.1 The spatial representation of loudness in a timbre discrimination task (Studie 1)

Die Darstellung der Fragestellung, Methode, Ergebnisse sowie Diskussion der Befunde von Studie 1 erfolgt in einem Originalartikel, welcher gleichzeitig das Kapitel 5.1 bildet. Die Seiten 41–54 der Dissertation umfassen den folgenden Originalartikel:

Koch, S., Schubert, T., & Blankenberger, S. (2023). The spatial representation of loudness in a timbre discrimination task. *I-Perception*, 14(6), 1–14. <https://doi.org/10.1177/20416695231213213>

Creative Commons CC BY: This article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) which permits any use, reproduction and distribution of the work without further permission provided the original work is attributed as specified on the SAGE and Open Access page (<https://us.sagepub.com/en-us/nam/open-access-at-sage>).

Die Publikation erfolgte über SAGE Publishing Inc. Die Originalpublikation ist verfügbar unter <https://doi.org/10.1177/20416695231213213>

Standard Article

i-PERCEPTION

The spatial representation of loudness in a timbre discrimination task

i-Perception

2023, Vol. 14(6), 1–14

© The Author(s) 2023

DOI: 10.1177/20416695231213213

journals.sagepub.com/home/ipe



Sarah Koch , **Torsten Schubert,**
and Sven Blankenberger

Department of Psychology, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg,
Halle, Germany

Abstract

When participants decide whether a presented tone is loud or soft they react faster to loud tones with a top-sided response key in comparison to a bottom-sided response key and vice versa for soft tones. This effect is comparable to the well-established horizontal Spatial-Numerical Association of Response Codes (SNARC) effect and is often referred to as Spatial-Musical Association of Response Codes (SMARC) effect for loudness. The SMARC effect for loudness is typically explained by the assumption of a spatial representation or by the polarity correspondence principle. Crucially, both theories differ in the prediction of the SMARC effect when loudness is task-irrelevant. Therefore, we investigated whether the SMARC effect still occurs in a timbre discrimination task: Participants ($N = 36$) heard a single tone and classified its timbre with vertically arranged response keys. Additionally, the tone's loudness level varied in six levels. In case of a spatial representation, the SMARC effect should still occur while in case of polarity corresponding principle, the effect should be absent. Results showed that the SMARC effect was still present and that the differences between top-sided and bottom-sided responses were a linear function of loudness level indicating a continuous spatial representation of loudness.

Keywords

SMARC effect, ATOM, cognition, audition, polarity correspondence principle

Date received: 24 February 2023; accepted: 25 October 2023

Several studies indicated that magnitude dimensions might be spatially represented. This close link between space and magnitude was first investigated in the domain of numbers, leading to the observation of the Spatial-Numerical Association of Response Codes effect (SNARC; Dehaene et al., 1993). In that study, participants classified numbers as odd or even by pressing a left-sided or right-sided response key. Reaction times were shorter when participants responded with a left-sided

Corresponding author:

Sarah Koch, Department of Psychology, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Wittenberg, Germany.

Email: sarah.koch@psych.uni-halle.de



Creative Commons CC BY: This article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) which permits any use, reproduction and distribution of the work without further permission provided the original work is attributed as specified on the SAGE and Open Access page (<https://us.sagepub.com/en-us/nam/open-access-at-sage>).

response key to small numbers compared to a right-sided response key and vice versa for large numbers. The SNARC effect is usually explained by a spatial representation of numbers in the form of a mental number line with small numbers represented on the left and large numbers represented on the right (Dehaene et al., 1993; Feigenson et al., 2004; Restle, 1970). This spatial representation is assumed to interfere with the spatial code of the motor responses (Keus & Schwarz, 2005). In recent decades, SNARC-like effects were found for other magnitude dimensions (for a review, see Macnamara et al., 2018) as well as for auditory dimensions like pitch (Lega et al., 2020; Lidji et al., 2007; Rusconi et al., 2006) and loudness (Fairhurst & Deroy, 2017; Hartmann & Mast, 2017). Due to the wide range of various dimensions with spatial associations, the general term Spatial-Association of Response Codes effect (SARC; Macnamara et al., 2018) was proposed to refer to the effect for any of these dimensions.

Despite numerous studies investigating the SARC effect for different dimensions, little is known whether the general SARC effect derives from the same origin as the SNARC effect, for example, a spatial representation of the respective magnitude. This is especially the case for dimensions which do not bear a magnitude information in explicit manner as is the case for auditory dimensions like pitch and loudness. This article aims to investigate the occurrence of the SARC effect for loudness, to which we will refer as Spatial-Musical Association of Response Codes (SMARC) effect. This term was originally introduced to refer to spatial associations for pitch by Rusconi et al. (2006) but has been extended to loudness by Bruzzi et al. (2017).

The occurrence of the SMARC effect is usually explained by two different theoretical approaches: the polarity correspondence principle (Chang & Cho, 2015; Proctor & Cho, 2006) and the assumption of a generalized magnitude representation system as described in A Theory of Magnitude, short ATOM (Buetti & Walsh, 2009; Walsh, 2003, 2015). According to the polarity correspondence principle, the SMARC effect occurs due to a match between the polarity codes of the response and the stimulus dimension. These polarity codes are assumed to be categorical with a positive and negative polarity and formed in binary classification tasks for both the response and the stimulus dimension. Right-sided responses are coded as “+ polarity” while left-sided responses are coded as “– polarity” (Cho et al., 2012; Proctor & Cho, 2006). In case of a continuous stimulus dimension, such as loudness, polarity correspondence principle implies that the dimension must be dichotomized into two distinct categories. The polarity codes are formed either due to an external reference point or due to task demands (Cho et al., 2012). With regard to loudness, loud and soft tones are assumed to have a “+ polarity” and a “– polarity,” respectively (Chang & Cho, 2015). If participants have to respond to a loud tone with a right-sided response key, the polarity codes of the response and the stimulus dimension are compatible and, therefore, participants respond faster. Likewise, when the polarity codes of the two dimensions do not match, as it is the case when reacting with the left-sided response key to a loud tone, participants are slower.

This prediction was investigated in a study of Chang and Cho (2015) with two different experiments. Participants either judged the loudness of a second tone (the probe tone) relative to the first tone (the reference tone) or they judged the timbre of the second tone. Crucially, there was still a reference tone in the timbre discrimination task serving as external reference point so that the continuous loudness dimension could still be dichotomized. A significant interaction between loudness level and response side was found in both tasks indicating the occurrence of the SMARC effect. However, to test the polarity correspondence principle as an explanation for the SMARC effect, it is crucial to investigate the occurrence of the effect when loudness is not relevant for the task and no reference point is given as done in a study by Cho et al. (2012). The authors investigated the SARC effect for pitch and assumed that “if the SMARC effect is based on categorical codes for pitch height, no SMARC effect would be obtained under conditions in which such categorical codes of the target tone pitch are not formed” (Cho et al., 2012, p. 727). They investigated this assumption in a series of different binary classification tasks. In the pitch discrimination tasks,

participants had either to decide whether a second tone was higher or lower than a first tone or they had to decide whether a single tone was high or low. In the timbre discrimination tasks, participants had to classify a tone with regard to its timbre. The tone was either presented alone or was preceded by a reference tone. When pitch was the task-relevant dimension, a SARC effect for pitch was observed independently of whether or not a reference tone was presented, probably due to task demands. In contrast, when participants had to judge the timbre of the tone, the SARC effect for pitch was only present when a reference tone was presented. The authors concluded that “nonmusicians need a context, provided by the referent tone, which causes the irrelevant pitch height to be coded” (Cho et al., 2012, p. 733).

In contrast to the polarity correspondence principle, other authors explain the SMARC effect with the assumption that loudness might be represented as magnitude in the context of ATOM (Bruzzi et al., 2017; Hartmann & Mast, 2017). According to ATOM, space, time, and quantity are represented on a common metric (Buetti & Walsh, 2009; Walsh, 2003, 2015). Due to this shared representation, Walsh (2003) concluded that every magnitude dimension in ATOM should show a SARC effect (SQUARC effect for Spatial-Quantity Association of Response Codes), with faster left-sided responses to small magnitudes compared to right-sided responses and vice versa for large magnitudes. As already mentioned, this pattern was found for various magnitude dimensions (Macnamara et al., 2018). The assumption of spatial associations for various magnitude dimensions was further developed to the assumption that ATOM-related magnitudes might be spatially organized on a mental magnitude line (Holmes & Lourenco, 2011) comparable to the idea of a mental number line (Dehaene et al., 1993). We will refer to this assumption of a spatial representation as second account to explain the SMARC effect.

However, to explain the SMARC effect by ATOM or in general by the assumption of a spatially organized magnitude representation, one has to assume that loudness is represented as a magnitude. Although loudness is often referred to as auditory magnitude (Fairhurst & Deroy, 2017; Ren et al., 2011), the dimension was not included in the theoretical conceptualization of ATOM (Buetti & Walsh, 2009; Walsh, 2003). Nevertheless, loudness fulfills one of ATOM's core assumptions, namely being a quantitative dimension in contrast to a qualitative dimension (Stevens & Galanter, 1957). Furthermore, loudness interacts with numerical value as well as physical size, two dimensions which are considered to be part of ATOM (Alards-Tomalin et al., 2015; Hartmann & Mast, 2017; Heinemann et al., 2013; Takeshima & Gyoba, 2013). Altogether, this is consistent with the assumption that loudness might be represented as magnitude according to ATOM.

It is important to note that some studies, which interpreted the SMARC effect in terms of ATOM investigated the SMARC effect only in the vertical dimension (Bruzzi et al., 2017; Fernandez-Prieto et al., 2017). For example, in the study of Bruzzi et al. (2017), participants had to judge whether a probe tone was louder or softer than the reference tone by pressing a top-sided or bottom-sided response key. A SMARC effect occurred, which indicated that loud tones are represented top and soft tones are represented bottom. One might argue that a vertical representation is not in line with the assumption of a horizontal spatial representation of magnitude. However, neither the spatial associations by ATOM nor the assumed spatial representation of magnitudes are explicitly restricted to the horizontal dimension. Furthermore, several other ATOM-related magnitudes seem to have a vertical representation (for a review regarding numbers, see Winter et al., 2015). With regard to the SMARC effect, neither the vertical nor the horizontal dimension seem to be a “preferred” axis. Although the horizontal SMARC effect was absent in some earlier studies (Ren et al., 2011), it was found by later studies (Chang & Cho, 2015; Fairhurst & Deroy, 2017; Hartmann & Mast, 2017). The same is true for the vertical SMARC effect, which was found in most studies (Bruzzi et al., 2017; Fernandez-Prieto et al., 2017) but not in the study of Fairhurst and Deroy (2017). To summarize, the vertical direction of a SMARC effect does not necessarily contradict a spatial representation as explanation.

Although not explicitly mentioned in the context of the SMARC effect, other explanations can also be considered. One theoretical approach aims to explain the SNARC effect by the assumption of a spatial organization of stimuli in the working memory due to task demands (van Dijck & Fias, 2011; Gevers et al., 2003). However, because there is no empirical evidence for the working memory account as explanation for the SMARC effect we will focus on the distinction between the polarity correspondence principle and the assumption of a spatial representation as possible explanations.

The SMARC effect as observed in prior studies was previously explained by the assumption of a spatial representation of loudness or by the polarity correspondence principle. Crucially, the methods of previous studies allow for both interpretations. Most studies, which investigated the SMARC effect, either conducted a loudness discrimination task (Bruzzi et al., 2017; Fairhurst & Deroy, 2017; Fernandez-Prieto et al., 2017; Hartmann & Mast, 2017) or presented a reference tone in the timbre judgment task (Chang & Cho, 2015) and, therefore, the creation of polarity codes for the stimulus dimension can not be excluded. Additionally, most studies only presented one loud tone and one soft tone so that the auditory material was already dichotomized (e.g., Chang & Cho, 2015). However, the results from these studies are also in line with the assumption of a spatial representation of loudness and due to its quantitative nature, loudness could be also part of ATOM.

The results from prior studies lead to the question whether the SMARC effect still occurs when loudness is not relevant for the task and no external reference point is given. Therefore, in the current study, we investigated the occurrence of the SMARC effect in a timbre discrimination task without a reference tone. Participants heard one single tone and classified the tone with regard to its timbre with a top-sided or a bottom-sided response key. We chose the vertical dimension instead of the horizontal dimension due to the lack of studies investigating the SMARC effect in a timbre discrimination task in the vertical dimension. Furthermore, we used a real vertical arrangement of response keys, that is, the top-sided response key was spatially above the bottom-sided response key as used by other studies (Bruzzi et al., 2017; Fernandez-Prieto et al., 2017). Some authors claim, that arrangements in which the response keys are near and far to the subject are comparable to a real vertical arrangement in the context of spatial compatibility effects (e.g., Rusconi et al., 2006). However, the distinction is important in the context of this study. In an arrangement with near and far response keys, a potential SMARC effect might be explained by the magnitude association between loud and large distance as well as soft and small spatial distance.¹ In contrast, in a real vertical arrangement, the spatial distance to the subject is the same for both response keys.

Crucially, the assumption of a spatial representation and the polarity correspondence principle differ in the prediction of a SMARC effect when loudness is irrelevant for the task and when no reference tone is presented. According to the polarity correspondence principle, loudness must be coded into two polarities, so that stimulus and response codes can match and a SMARC effect can occur (Proctor & Cho, 2006). In line with the results from Cho et al. (2012), we assume that this dichotomization can either occur due to task demands or due to an external reference point such as a reference tone (Cho et al., 2012). Both are not given in the current study and therefore, the coding of loudness into two distinct polarities seems unlikely. In contrast, the assumption of a spatially organized magnitude representation for loudness predicts that the SMARC effect should be present in a timbre discrimination task even without a reference tone. Due to the intrinsic spatial representation of loudness, the mere presentation of a tone with a specific loudness level should lead to an activation of the corresponding spatial information. This in turn should lead to the occurrence of interference effects, which would occur due to compatible or incompatible relations between the spatial representation of loudness and the response codes, comparable as for the SNARC effect (Keus & Schwarz, 2005).

It might be, that participants are able to form an internal reference point as it seems to be the case with pitch for professional musicians (Cho et al., 2012). However, in this case, the two accounts

would predict different patterns for the SMARC effect. The polarity correspondence principle implies a categorical SMARC effect, that is, the difference between reaction times for top-sided and bottom-sided responses is roughly the same for all loudness levels with the same polarity. Contrary, a continuous spatial representation would lead to a SMARC effect with larger differences for extreme stimulus values, comparable to the SNARC effect (Dehaene et al., 1993).

Because loudness is a quantitative dimension (Stevens & Galanter, 1957) and due to its interaction with other magnitudes (Alards-Tomalin et al., 2015; Hartmann & Mast, 2017; Heinemann et al., 2013; Takeshima & Gyoba, 2013) we assume that loudness is represented as a magnitude and that the SMARC effect is due to a spatial representation. Therefore, we hypothesized that the effect would still be present in a timbre discrimination task without a reference tone. If, in contrast, the SMARC effect originates from the match of polarity codes no effect should occur due to the missing external reference point.

Methods

The study's design as well as the statistical analyses were preregistered on [aspredicted.org](https://aspredicted.org/8KV_4FB) (https://aspredicted.org/8KV_4FB).

Participants

$N = 37$ healthy students of Martin Luther University Halle-Wittenberg participated for course credit. Age was restricted to a range between 18 and 35 years to ensure, that participants had no age-related decline in their hearing ability. Furthermore, no professional musicians (i.e., people who study or have studied music or work fulltime or part-time as musician) were allowed to participate in the study. The mean age was $M = 22.86$ years ($SD = 3.1$). 30 participants reported having a female gender. All participants reported being right-handed, that they had either no vision impairments or used a correction in the experiment, and that they had no hearing impairments. 31 participants reported playing or have played an instrument for more than a year. All participants gave written informed consent to participate. The study was conducted in accordance with the declaration of Helsinki and has been approved by the ethics committee of the DGPs (Deutsche Gesellschaft für Psychologie). The planned sample size was $N = 36$ based on a power analysis for a one-tailed one-sample t -test with $\alpha = .05$, power $1 - \beta = .9$ and an effect size of $d = -0.5$. After we reached our planned sample size, we checked the mean error rates for each participant and excluded one participant due to an overall error rate exceeding 15%. According to our preregistration, we collected data from one additional participant. Therefore, $N = 36$ participants were included in the final data analysis.

Material

The auditory stimuli consisted of six sawtooth wave tones and six rectangle wave tones. For each timbre, six different sound pressure levels ranging from approximately 40–65 dBA in 5 dBA steps were realized. All tones had a frequency of 440 Hz. Tones were generated with Audacity (Version 3.1.0; The Audacity Team, 2019) with a sampling rate of 48 kHz and presented via headphones (Sennheiser HD471). Each sound file had a duration of 800 ms. Participants responded to the tones by pressing a top-sided or a bottom-sided response key; both keys were vertically aligned on a response box with the bottom-sided response key and top-sided response key being approximately 1 and 16 cm above the table surface, respectively. Stimulus presentation and data recording were realized with PsychoPy (Version 2021.2.3; Peirce et al., 2019).

Design and Procedure

The study followed a $6 \times 2 \times 2$ within-subjects design with the following factors, sound pressure level (6 levels, from 40 to 65 dBA), timbre (2 levels, a sawtooth wave tone or a rectangle wave tone), and response mapping (2 levels, top-sided response key for sawtooth wave tones and bottom-sided response key for rectangle wave tones and vice versa), which resulted, altogether, in 24 within-subjects conditions.

Each trial started with the presentation of a fixation cross in the middle of the screen for 500 ms. After a fixed foreperiod of 500 ms, the tone was presented for a maximum of 800 ms or until participants made a response. There was no time window for responses, that is participants could still react after the tone had ended. After participants made their response, an inter-trial interval (ITI) with a random, uniform-distributed duration between 1 and 2 s was presented before the next trial started. Participants were instructed to classify the presented tone as sawtooth wave tone or rectangle wave tone as fast and correct as possible by pressing a top-sided or bottom-sided response key. They were not told that the tones could vary in loudness but in order to make them familiar with the auditory material they heard all tones during instruction phase.

Response mapping varied between two sessions. Half of the participants responded in the first session with the top-sided response key to the sawtooth wave tone and with the bottom-sided response key to the rectangle wave tone and vice versa in the second session. The other half of the participants had the opposite order of response mapping. Additionally, key-hand mapping was varied between participants. Half of the participants pressed the top-sided response key with their right thumb and the bottom-sided response key with their left thumb, the other half had the opposite arrangement. Participants were randomly assigned to one of the four condition groups.

In both sessions, each tone was presented 56 times, resulting in 672 experimental trials in each session. Each session consisted of 14 blocks à 48 experimental trials plus 3 warm-up trials at the beginning of a block. Additionally, participants performed 48 training trials at the beginning of each session in which they received feedback about their reaction time and correctness of their response. Both sessions took approximately 50 min.

Data Analyses

We used R (Version 4.1.2; R Core Team, 2021) and the R-packages *ez* (Version 4.4; Lawrence, 2016), *papaja* (Version 0.1.1; Aust & Barth, 2020), and *tidyverse* (Version 1.3.1; Wickham et al., 2019) for all our analyses. Reaction times from incorrect trials (7.5%) were discarded from further analyses. We calculated the trimmed mean reaction times with a trimming amount of 20% (Rosenberger & Gasko, 1983) and the mean error rate for each participant and within-subject condition. Additionally, we calculated the difference of reaction times ($dRT = RT_{top} - RT_{bottom}$) for each participant, loudness level, and timbre (Fias et al., 1996).

In a first step, we conducted a mixed $6 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2$ ANOVA with sound pressure level, timbre, and response side as within-subject factors as well as order of response mapping, and key-hand mapping as between-subject factors. In case of violations against the assumption of sphericity, corrected p -values according to the Greenhouse–Geisser adjustment (GG) will be reported. For the effect sizes in the ANOVA analyses, we will report generalized eta-squared η_G^2 because it allows comparisons of effect sizes across studies and its reporting is recommended to facilitate cumulative statistics (Bakeman, 2005; Lakens, 2013).

Results

Overall, reaction time decreased with increasing loudness level, as can be seen in Figure 1. The main effect of loudness was significant, $F(5, 160) = 39.47$, $MSE = 344.54$, $p < .001$ (GG), $\eta_G^2 = .024$.

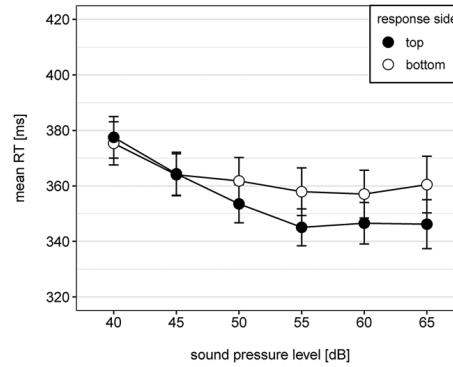


Figure 1. Mean reaction time as a function of sound pressure level and response side. Note. Error bars represent 95% within CI (Morey, 2008).

Furthermore, participants responded faster when they made a top-sided response compared to a bottom-sided response (356 vs. 363 ms), $F(1, 32) = 9.38$, $MSE = 1, 201.77$, $p = .004$, $\hat{\eta}_G^2 = .004$ and participants who pressed the top-sided response key with their left thumb were faster compared to participants who pressed the top-sided response key with their right thumb (338 vs. 380 ms), $F(1, 32) = 5.55$, $MSE = 70, 815.15$, $p = .025$, $\hat{\eta}_G^2 = .122$. Reaction time differences between both timbres were small (360 ms for the rectangle wave tone vs. 358 ms for the sawtooth wave tone) and did not differ significantly, $F(1, 32) = 0.94$, $MSE = 1, 476.04$, $p = .338$, $\hat{\eta}_G^2 < .001$.

The SMARC effect is indicated by the interaction between sound pressure level and response side, which is shown in Figure 1. Descriptively, participants responded faster to loud tones when pressing a top-sided response key compared to pressing a bottom-sided response key but for the soft tones there was only a small difference in reaction times between both response sides. Nevertheless, the interaction was significant, $F(5, 160) = 8.97$, $MSE = 191.63$, $p < .001$ (GG), $\hat{\eta}_G^2 = .003$. Because we later analyzed the SMARC effect in a linear regression analysis, we refrained from testing the differences between reaction times for the bottom-sided and top-sided response key via post hoc tests at this point.

There was also a significant interaction between loudness level and timbre, $F(5, 160) = 11.83$, $MSE = 535.83$, $p < .001$ (GG), $\hat{\eta}_G^2 = .011$ which is illustrated in Figure 2. For the sawtooth wave tone, reaction time decreased with increasing sound pressure level. For the rectangle wave tone, reaction time first decreased with increasing sound pressure level and then increased for the loudest tones.

There was also a significant interaction between response side and key-hand mapping, $F(1, 32) = 18.76$, $MSE = 1, 201.77$, $p < .001$, $\hat{\eta}_G^2 = .008$. Participants who pressed the top-sided response key with their right thumb were faster when they responded with the top-sided response key compared to the bottom-sided response key (372 vs. 389 ms). This difference was smaller and reversed for participants who pressed the top-sided response key with their left thumb (339 vs. 336 ms). Additionally, the three-way interaction between order of mapping, timbre, and response side was significant, $F(1, 32) = 30.83$, $MSE = 8, 328.03$, $p < .001$, $\hat{\eta}_G^2 = .083$. All other interactions were non-significant ($p > .07$).

For a more detailed analysis of the SMARC effect, we ran a linear regression analysis with sound pressure level as predictor and mean dRT as dependent variable separately for each participant. The resulting regression coefficients were then tested against zero via a one-tailed (preregistered) one-sample t -test (Fias et al., 1996; Lorch & Myers, 1990). According to our preregistration procedure, we estimated and tested the linear regression coefficients for the overall mean dRT and separately for each timbre due to the significant interaction between sound pressure level and timbre. Mean dRT as a function of sound pressure level is illustrated in Figure 3. For each timbre, mean dRT decreased

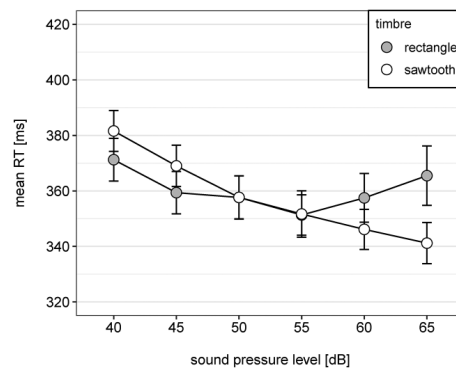


Figure 2. Mean reaction time as a function of sound pressure level and timbre. Note. Error bars represent 95% within CI (Morey, 2008).

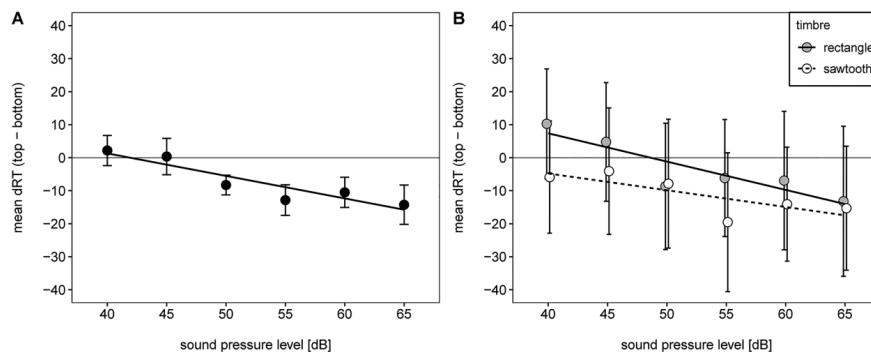


Figure 3. Mean dRT and regression line as a function of sound pressure level for the overall data (A) and separate for each timbre (B). Note. Error bars represent 95% within CI (Morey, 2008).

with increasing sound pressure level. Mean regression coefficients were significantly smaller than zero in all three analyses, $M_{\text{overall}} = -0.68$, 95% CI $[-\infty, -0.42]$, $t(35) = -4.38$, $p < .001$, $M_{\text{sawtooth}} = -0.51$, 95% CI $[-\infty, -0.24]$, $t(35) = -3.26$, $p = .001$ and $M_{\text{rectangle}} = -0.86$, 95% CI $[-\infty, -0.47]$, $t(35) = -3.78$, $p < .001$. A two-tailed, paired t -test showed that there was no significant difference between the regression coefficients for sawtooth wave tone and rectangle wave tone, $M_D = 0.35$, 95% CI $[-0.12, 0.82]$, $t(35) = 1.50$, $p = .142$.

The results from the ANOVA as well as from the linear regression analysis indicate an interaction between response side and sound pressure level. However, participants might have used the tone of the previous trial as a reference to dichotomize the loudness of the tone in the ongoing trial. In order to investigate the influence of the loudness level of the preceding trial, we categorized each trial as having a higher, lower, or the same sound pressure level compared to the tone of the previous trial.² Then, we calculated the trimmed mean (trimming amount = 20%) of reaction times for each participant, sound pressure level, response side, timbre, and loudness change. If the SMARC effect were mainly due to the relative loudness change, participants should be always faster with the top-sided response key when responding to a louder tone compared to when responding with the bottom-sided response key irrespective of its total loudness level. Please note, that in our experimental design, there is an unequal number of observations for each sound pressure level and loudness change combination because we did not control the probability of being a louder or softer tone for each sound pressure level. Furthermore, the loudest tone could never be softer and the softest tone could never

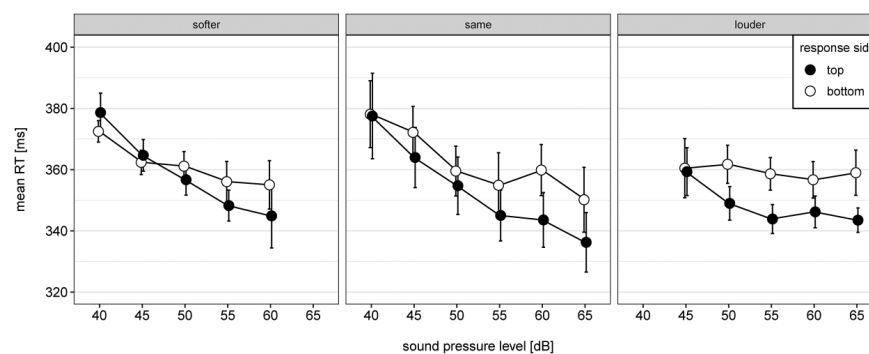


Figure 4. Mean RT as a function of sound pressure level, response side, and loudness change relative to the tone's loudness of the previous trial. Note. Error bars represent 95% within CI (Morey, 2008).

be louder compared to previous trial. Due to these missing observations, we relied on a descriptive investigation of the influence of loudness change.

As can be seen in Figure 4, roughly similar interactions between sound pressure level and response side emerged for all three loudness changes. While the relative loudness change seemed to influence the asymmetry of the interaction pattern, it did not change the overall effect and the interaction patterns mirrored the overall interaction effect visualized in Figure 1.

Discussion

The aim of the current study was to investigate whether the vertical SMARC effect for loudness occurs in a timbre discrimination task, that is, when loudness is not relevant for the task. Indeed, we found a significant interaction between response side and sound pressure level which was supported by the results from the linear regression analysis: For loud tones, participants responded faster with a top-sided response key in comparison to a bottom-sided response key. In contrast, there was no difference between reaction times for the soft tones. Despite this asymmetry, the results from the linear regression analysis indicate that the difference of reaction time was a linear function of sound pressure level. The results are in line with our hypothesis that the vertical SMARC effect still occurs in a timbre discrimination task.

A comparable asymmetric interaction was also found in other studies investigating the horizontal SMARC effect (Chang & Cho, 2015; Hartmann & Mast, 2017) and might be due to a perceptual and neural processing bias for loud tones (Neuhoff, 1998; Puigcerver et al., 2019). Furthermore, loud sounds or sounds with increasing loudness indicate higher proximity to a potential threat and are therefore probably more likely to trigger a response (Puigcerver et al., 2019). This could be an explanation, why the difference between the different response sides is more pronounced for loud tones. Another possible explanation is the main effect of response side with overall faster reactions for the top-sided responses. This was not the case in other studies investigating the SMARC effect in the vertical dimension in which the difference of reaction times were comparable for loud and soft tones (e.g., Bruzzi et al., 2017).

We counterbalanced the assignment between response side and responding hand. Crucially, key-response mapping did not interact with the SMARC effect, that is, the three-way interaction between response side, sound pressure level, and key-hand mapping was not significant. This indicates that the SMARC effect is due to a spatial association between the vertical response side and sound pressure level and is independent from the spatial features of the effectors comparable to the SNARC effect (Dehaene et al., 1993).

The observation of the SMARC effect in a timbre discrimination task without a reference tone is in line with the assumption of a spatial representation of loudness but not in line with the polarity correspondence principle. There was neither an external reference tone nor had participants to categorize loudness due to task demands. Therefore, it seems unlikely that loudness was coded into two distinct polarities.

It might be possible that participants created an internal reference point as it was found for professional musicians with the SARC effect for pitch (Cho et al., 2012). However, there is no empirical evidence supporting this assumption for non-musicians with regard to loudness. Furthermore, even in case of using the average loudness as internal reference point, the SMARC effect would have been categorical, with the same negative dRTs for all loud tones and the same positive dRTs for all soft tones. Instead, dRT was a linear function of sound pressure level indicating a continuous spatial representation. Additionally, the SMARC effect was mainly driven by the absolute loudness level of the tones and not by the loudness change which would be the case, if participants would have used the loudness level of the previous trial as reference point. However, because we did not systematically control for loudness change, we relied on a descriptive analysis. Furthermore, the relative loudness change seemed to have an influence on the symmetry of the interaction. Future studies should therefore address this issue and entangle the influence of loudness change on the one hand and the absolute sound pressure level on the other hand.

In brief, while polarity correspondence principle can not be fully ruled out as an explanation, the results are more in line with the assumption of a spatial representation of loudness. According to this assumption, the processing of loudness results in an activation of the corresponding spatial position on a spatial representation, which then interferes with the spatial position of the response keys (Dehaene et al., 1993; Holmes & Lourenco, 2011; Keus & Schwarz, 2005).

The question remains whether this spatial representation is due to the representation of loudness as a magnitude in terms of ATOM (Walsh, 2003) as suggested in other studies (Bruzzi et al., 2017; Hartmann & Mast, 2017). As already mentioned by other authors, SARC effects cannot be interpreted as magnitude indicator and the spatial representation of stimuli might also rely on the concept of order (Casasanto & Pitt, 2019; Pitt & Casasanto, 2022) or spatial organization of stimuli in the working memory due to task demands (van Dijck & Fias, 2011; Gevers et al., 2003). Could the SMARC effect found in the current study be explained by these alternative explanations? Due to the fact that, in the present study, loudness was not relevant to the task it seems implausible that a spatial arrangement of loudness was built and maintained as a primary representation for task processing in working memory. Nevertheless, the effect could still occur assuming that loudness is associated with a specific order information. The design of the study does not allow us to disentangle order information from magnitude information and, therefore, the question remains open.

However, besides these theoretical considerations, there are several other empirical findings beyond the SMARC effect, which indicate that loudness is represented as magnitude dimension. Loudness is a quantitative dimension (Stevens & Galanter, 1957), which is one criterion for being considered as ATOM-related magnitude (Walsh, 2003, 2015). Furthermore, loudness interacts with ATOM-related magnitude dimensions like numbers (Alards-Tomalain et al., 2015; Hartmann & Mast, 2017; Heinemann et al., 2013) or object size (Takeshima & Gyoba, 2013). Hartmann and Mast (2017) found that participants respond faster to numerically large numbers in a loud-spoken voice compared to a soft-spoken voice and vice versa for small numbers. This was the case either when participants had to judge the loudness or had to judge the numerical value. The authors also investigated the occurrence of both the SNARC effect and the SMARC effect and their possible interrelation. The authors found that both effects exclusively occurred, when the associated dimension was task-relevant. Furthermore, although a loudness-magnitude interaction was observed in both tasks, the interaction did not interact with neither the SNARC effect

in the number discrimination task nor the SMARC effect in the loudness discrimination task. Therefore, the authors concluded that magnitude interactions and spatial associations might originate from different mechanisms. This interpretation would be in line with the assumption that loudness is processed as a magnitude but that the SMARC effect relies on a spatial representation probably due to its order information (Pitt & Casasanto, 2022).

The direction of the vertical SMARC effect, as observed in the current study, is in line with the vertical spatial representation of the ATOM-related magnitude numbers. Small numbers are assumed to be represented bottom while large numbers are represented top (Aleotti et al., 2022; Schwarz & Keus, 2004; Wiemers et al., 2017; Winter et al., 2015). This direction of a spatial association for magnitudes might be due to the natural association between verticality and quantity in our environment (Lakoff & Johnson, 2003; Winter et al., 2015). In general, an increasing amount of something is typically accompanied by an increasing level in verticality, for example, the rising of water level when a glass is filled. However, although neither ATOM nor the assumption of spatially magnitude representations do explicitly narrow the spatial representation to the horizontal dimension, it remains unclear how vertical and horizontal representations of magnitude dimensions might relate to each other.

We found a significant interaction between timbre and sound pressure level, which might indicate that both timbres were processed differently on different loudness levels, which might influence the SMARC effect. However, there was no significant difference between the two regression coefficients and they were both significantly smaller than zero, indicating the occurrence of the SMARC effect for both timbres. The interaction between timbre and sound pressure level in the current study resembles the results from Melara and Marks (1990) investigating crossmodal correspondences between different auditory dimensions. In their third experiment, the authors varied the loudness level and duty cycle of rectangle wave tones the latter leading to a “twangy” and a “hollow” sound impression. Loud “twangy” sounds as well as soft “hollow” sounds lead to a reaction time benefit compared to “twangy” soft and loud “hollow” sounds. This is comparable to faster reaction times for loud sawtooth wave tones and soft rectangle wave tones compared to the reversed combination of loudness and sound timbre as we observed in this study. Whether crossmodal correspondences between loudness and timbre exist and whether they can have an influence on spatial-loudness associations, as it is the case for pitch (Pitteri et al., 2017, 2021) needs further investigation.

In sum, our study showed that the vertical SMARC effect is present even when loudness is not task relevant, which speaks against the polarity correspondence principle as explanation for the observed effect. Instead, the current findings are consistent with the assumption that the effect is due to a continuous spatial representation of loudness which interacts with the spatial code of the vertical aligned motor responses. This spatial representation might be due to a magnitude representation of loudness in terms of ATOM but further empirical validation of this claim is needed. The investigation of interdependences between the SMARC effect and SARC effects of ATOM-related magnitudes like numbers as done by Hartmann and Mast (2017) could help to understand whether the effects rely on the same representation system. Additionally, further research is required to understand how the vertical and horizontal representation of loudness relate to each other and whether they form a common mental magnitude space.

Author contribution(s)

Sarah Koch: Conceptualization; Formal analysis; Investigation; Methodology; Visualization; Writing – original draft.

Torsten Schubert: Methodology; Writing – review & editing.

Sven Blankenberger: Conceptualization; Methodology; Supervision; Writing – review & editing.

Declaration of Conflicting Interests

The authors declared no potential conflicts of interest with respect to the research, authorship, and/or publication of this article.

Funding

The authors disclosed receipt of the following financial support for the research, authorship, and/or publication of this article: This work was supported by the Landesgraduiertenförderung Sachsen-Anhalt to S.K., T.S. was supported by a grant of the Deutsche Forschungsgemeinschaft (grant number Schu 1397/7-2). We acknowledge the financial support of the Open Access Publication Fund of the Martin Luther University Halle-Wittenberg.

ORCID iD

Sarah Koch  <https://orcid.org/0000-0003-2435-1756>

Notes

1. We thank one anonymous reviewer for pointing this out.
2. We thank Nathan Van der Stoep for suggesting this additional analysis.

References

- Alards-Tomalin, D., Walker, A. C., Shaw, J. D. M., & Leboe-McGowan, L. C. (2015). Is 9 louder than 1? Audiovisual cross-modal interactions between number magnitude and judged sound loudness. *Acta Psychologica*, 160, 95–103. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2015.07.004>
- Aleotti, S., Massacesi, S., & Priftis, K. (2022). The SNARC effect: A preregistered study on the interaction of horizontal, vertical, and sagittal spatial numerical associations. *Psychological Research*, 87(4), 1256–1266. <https://doi.org/10.1007/s00426-022-01721-8>
- Aust, F., & Barth, M. (2020). *papaja: Prepare reproducible APA journal articles with R Markdown*. <https://github.com/crsh/papaja>.
- Bakeman, R. (2005). Recommended effect size statistics for repeated measures designs. *Behavior Research Methods*, 37(3), 379–384. <https://doi.org/10.3758/BF03192707>
- Bruzzi, E., Talamini, F., Priftis, K., & Grassi, M. (2017). A SMARC effect for loudness. *i-Perception*, 8(6), Article 204166951774217. <https://doi.org/10.1177/2041669517742175>
- Bueti, D., & Walsh, V. (2009). The parietal cortex and the representation of time, space, number and other magnitudes. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1525), 1831–1840. <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0028>
- Casasanto, D., & Pitt, B. (2019). The faulty magnitude detector: Why SNARC-like tasks cannot support a generalized magnitude system. *Cognitive Science*, 43(10), Article e12794. <https://doi.org/10.1111/cogs.12794>
- Chang, S., & Cho, Y. S. (2015). Polarity correspondence effect between loudness and lateralized response set. *Frontiers in Psychology*, 6, Article 683. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00683>
- Cho, Y. S., Bae, G. Y., & Proctor, R. W. (2012). Referential coding contributes to the horizontal SMARC effect. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 38(3), 726–734. <https://doi.org/10.1037/a0026157>
- Dehaene, S., Bossini, S., & Giraux, P. (1993). The mental representation of parity and number magnitude. *Journal of Experimental Psychology: General*, 122(3), 371–396. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.122.3.371>
- Fairhurst, M. T., & Deroy, O. (2017). Testing the shared spatial representation of magnitude of auditory and visual intensity. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 43(3), 629–637. <https://doi.org/10.1037/xhp0000332>
- Feigenson, L., Dehaene, S., & Spelke, E. (2004). Core systems of number. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(7), 307–314. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2004.05.002>

- Fernandez-Prieto, I., Spence, C., Pons, F., & Navarra, J. (2017). Does language influence the vertical representation of auditory pitch and loudness? *i-Perception*, 8(3), Article 204166951771618. <https://doi.org/10.1177/2041669517716183>
- Fias, W., Brysbaert, M., Geypens, F., & d'Ydewalle, G. (1996). The importance of magnitude information in numerical processing: Evidence from the SNARC effect. *Mathematical Cognition*, 2(1), 95–110. <https://doi.org/10.1080/135467996387552>
- Gevers, W., Reynvoet, B., & Fias, W. (2003). The mental representation of ordinal sequences is spatially organized. *Cognition*, 87(3), B87–B95. [https://doi.org/10.1016/S0010-0277\(02\)00234-2](https://doi.org/10.1016/S0010-0277(02)00234-2)
- Hartmann, M., & Mast, F. W. (2017). Loudness counts: Interactions between loudness, number magnitude, and space. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 70(7), 1305–1322. <https://doi.org/10.1080/17470218.2016.1182194>
- Heinemann, A., Pfister, R., & Janczyk, M. (2013). Manipulating number generation: Loud + long = large? *Consciousness and Cognition*, 22(4), 1332–1339. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2013.08.014>
- Holmes, K. J., & Lourenco, S. F. (2011). Common spatial organization of number and emotional expression: A mental magnitude line. *Brain and Cognition*, 77(2), 315–323. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2011.07.002>
- Keus, I. M., & Schwarz, W. (2005). Searching for the functional locus of the SNARC effect: Evidence for a response-related origin. *Memory & Cognition*, 33(4), 681–695. <https://doi.org/10.3758/BF03195335>
- Lakens, D. (2013). Calculating and reporting effect sizes to facilitate cumulative science: A practical primer for t-tests and ANOVAs. *Frontiers in Psychology*, 4, 1–12. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00863>
- Lakoff, G., & Johnson, M. (2003). *Metaphors we live by*. University of Chicago Press.
- Lawrence, M. A. (2016). *ez: Easy analysis and visualization of factorial experiments*. <https://CRAN.R-project.org/package=ez>.
- Lega, C., Cattaneo, Z., Ancona, N., Vecchi, T., & Rinaldi, L. (2020). Instrumental expertise and musical timbre modulate the spatial representation of pitch. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 73(8), 1162–1172. <https://doi.org/10.1177/1747021819897779>
- Lidji, P., Kolinsky, R., Lochy, A., & Morais, J. (2007). Spatial associations for musical stimuli: A piano in the head? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 33(5), 1189–1207. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.33.5.1189>
- Lorch, R. F., & Myers, J. L. (1990). Regression analyses of repeated measures data in cognitive research. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 16(1), 149–157. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.16.1.149>
- Macnamara, A., Keage, H. A. D., & Loetscher, T. (2018). Mapping of non-numerical domains on space: A systematic review and meta-analysis. *Experimental Brain Research*, 236(2), 335–346. <https://doi.org/10.1007/s00221-017-5154-6>
- Melara, R. D., & Marks, L. E. (1990). Interaction among auditory dimensions: Timbre, pitch, and loudness. *Perception & Psychophysics*, 48(2), 169–178. <https://doi.org/10.3758/BF03207084>
- Morey, R. D. (2008). Confidence intervals from normalized data: A correction to Cousineau (2005). *Tutorials in Quantitative Methods for Psychology*, 4(2), 61–64. <https://doi.org/10.20982/tqmp.04.2.p061>
- Neuhoff, J. G. (1998). Perceptual bias for rising tones. *Nature*, 395(6698), 123–124. <https://doi.org/10.1038/25862>
- Peirce, J., Gray, J. R., Simpson, S., MacAskill, M., Höchenberger, R., Sogo, H., Kastman, E., & Lindeløv, J. K. (2019). Psychopy2: Experiments in behavior made easy. *Behavior Research Methods*, 51(1), 195–203. <https://doi.org/10.3758/s13428-018-01193-y>
- Pitt, B., & Casasanto, D. (2022). The order of magnitude: Why SNARC-like tasks (still) cannot support a generalized magnitude system. *Cognitive Science*, 46(2), Article e13108. <https://doi.org/10.1111/cogs.13108>
- Pitteri, M., Marchetti, M., Grassi, M., & Priftis, K. (2021). Pitch height and brightness both contribute to elicit the SMARC effect: A replication study with expert musicians. *Psychological Research*, 85(6), 2213–2222. <https://doi.org/10.1007/s00426-020-01395-0>
- Pitteri, M., Marchetti, M., Priftis, K., & Grassi, M. (2017). Naturally together: Pitch-height and brightness as coupled factors for eliciting the SMARC effect in non-musicians. *Psychological Research*, 81(1), 243–254. <https://doi.org/10.1007/s00426-015-0713-6>
- Proctor, R. W., & Cho, Y. S. (2006). Polarity correspondence: A general principle for performance of speeded binary classification tasks. *Psychological Bulletin*, 132(3), 416–442. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.132.3.416>

- Puigcerver, L., Rodríguez-Cuadrado, S., Gómez-Tapia, V., & Navarra, J. (2019). Vertical mapping of auditory loudness: Loud is high, but quiet is not always low. *Psicológica Journal*, 40(2), 85–104. <https://doi.org/10.2478/psicolj-2019-0006>
- R Core Team (2021). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>.
- Ren, P., Nicholls, M. E. R., Ma, Y., & Chen, L. (2011). Size matters: Non-numerical magnitude affects the spatial coding of response. *PLoS ONE*, 6(8), Article e23553. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0023553>
- Restle, F. (1970). Speed of adding and comparing numbers. *Journal of Experimental Psychology*, 83(2, Pt.1), 274–278. <https://doi.org/10.1037/h0028573>
- Rosenberger, J. L., & Gasko, M. (1983). Comparing location estimators: Trimmed means, medians, and trim-mean. In D. C. Hoaglin, F. Mosteller, & J. W. Tukey (Eds.), *Understanding robust and exploratory data analysis* (pp. 297–338). Wiley.
- Rusconi, E., Kwan, B., Giordano, B., Umiltà, C., & Butterworth, B. (2006). Spatial representation of pitch height: The SMARC effect. *Cognition*, 99(2), 113–129. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2005.01.004>
- Schwarz, W., & Keus, I. M. (2004). Moving the eyes along the mental number line: Comparing SNARC effects with saccadic and manual responses. *Perception & Psychophysics*, 66(4), 651–664. <https://doi.org/10.3758/BF03194909>
- Stevens, S. S., & Galanter, E. H. (1957). Ratio scales and category scales for a dozen perceptual continua. *Journal of Experimental Psychology*, 54(6), 377–411. <https://doi.org/10.1037/h0043680>
- Takeshima, Y., & Gyoba, J. (2013). High-intensity sound increases the size of visually perceived objects. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 75(3), 501–507. <https://doi.org/10.3758/s13414-012-0403-z>
- The Audacity Team (2019). *Audacity*. <https://www.audacityteam.org/>.
- van Dijck, J.-P., & Fias, W. (2011). A working memory account for spatial numerical associations. *Cognition*, 119(1), 114–119. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2010.12.013>
- Walsh, V. (2003). A theory of magnitude: Common cortical metrics of time, space and quantity. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(11), 483–488. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2003.09.002>
- Walsh, V. (2015). A theory of magnitude: The parts that sum to number. In R. Cohen Kadosh & A. Dowker (Eds.), *The Oxford handbook of numerical cognition* (Vol. 1, pp. 552–565). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780199642342.013.64>
- Wickham, H., Averick, M., Bryan, J., Chang, W., McGowan, L. D., François, R., Grolemund, G., Hayes, A., Henry, L., Hester, J., Kuhn, M., Pedersen, T. L., Miller, E., Bache, S. M., Müller, K., Ooms, J., Robinson, D., Seidel, D. P., Spinu, V., & ... Yutani, H. (2019). Welcome to the tidyverse. *Journal of Open Source Software*, 4(43), 1686. <https://doi.org/10.21105/joss.01686>
- Wiemers, M., Bekkering, H., & Lindemann, O. (2017). Is more always up? Evidence for a preference of hand-based associations over vertical number mappings. *Journal of Cognitive Psychology*, 29(5), 642–652. <https://doi.org/10.1080/20445911.2017.1302451>
- Winter, B., Matlock, T., Shaki, S., & Fischer, M. H. (2015). Mental number space in three dimensions. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 57, 209–219. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2015.09.005>

How to cite this article

Koch, S., Schubert, T., & Blankenberger, S. (2023). The spatial representation of loudness in a timbre discrimination task. *i-Perception*, 14, 1–14. <https://doi.org/10.1177/10.1177/20416695231213213>

5.2 Simultaneous but independent spatial associations for pitch and loudness (Studie 2)

In Kapitel 5.2 werden Fragestellung, Methode, Ergebnisse sowie Diskussion der Befunde von Studie 2 dargestellt. Das Kapitel 5.2 besteht aus einem publizierten Originalartikel welcher auf den Seiten 56–69 der Dissertation enthalten ist.

Koch, S., Schubert, T., & Blankenberger, S. (2024). Simultaneous but independent spatial associations for pitch and loudness. *Psychological Research*, 88, 1602–1615. <https://doi.org/10.1007/s00426-024-01970-9>

Creative Commons CC BY: This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material.

Die Publikation erfolgte über Springer Nature Publishing. Die Originalpublikation ist verfügbar unter <https://doi.org/10.1007/s00426-024-01970-9>

Psychological Research (2024) 88:1602–1615
<https://doi.org/10.1007/s00426-024-01970-9>

RESEARCH



Simultaneous but independent spatial associations for pitch and loudness

Sarah Koch¹ · Torsten Schubert¹ · Sven Blankenberger¹

Received: 5 January 2024 / Accepted: 22 April 2024 / Published online: 9 May 2024
 © The Author(s) 2024

Abstract

For the auditory dimensions loudness and pitch a vertical SARC effect (Spatial Association of Response Codes) exists: When responding to loud (high) tones, participants are faster with top-sided responses compared to bottom-sided responses and vice versa for soft (low) tones. These effects are typically explained by two different spatial representations for both dimensions with pitch being represented on a helix structure and loudness being represented as spatially associated magnitude. Prior studies show incoherent results with regard to the question whether two SARC effects can occur at the same time as well as whether SARC effects interact with each other. Therefore, this study aimed to investigate the interrelation between the SARC effect for pitch and the SARC effect for loudness in a timbre discrimination task. Participants ($N=36$) heard one tone per trial and had to decide whether the presented tone was a violin tone or an organ tone by pressing a top-sided or bottom-sided response key. Loudness and pitch were varied orthogonally. We tested the occurrence of SARC effects for pitch and loudness as well as their potential interaction by conducting a multiple linear regression with difference of reaction time (dRT) as dependent variable, and loudness and pitch as predictors. Frequentist and Bayesian analyses revealed that the regression coefficients of pitch and loudness were smaller than zero indicating the simultaneous occurrence of a SARC effects for both dimensions. In contrast, the interaction coefficient was not different from zero indicating an additive effect of both predictors.

Introduction

Several stimulus dimensions show a horizontal, spatial association (Macnamara et al., 2018). Probably one of the most prominent examples are numbers: Small numbers are assumed to be represented left while large numbers are assumed to be represented right on a spatial mental number line (Dehaene et al., 1993; Feigenson et al., 2004; Restle, 1970). Empirical evidence for this assumption stems from the SNARC effect (Spatial-Numerical Association of Response Codes) first investigated by Dehaene et al. (1993). In that study, participants decided whether a presented number was odd or even by pressing a left-sided or right-sided response key. Participants responded faster to small numbers with the left-sided response key compared to responding with a right-sided response key and vice versa for large numbers. In recent decades, a comparable effect has been found for other stimulus dimensions which lead to the general term

SARC effect (Spatial Association of Response Codes, Macnamara et al., 2018).

Another term widely used is the abbreviation SQUARC effect (Spatial-Quantity Association of Response Codes) introduced by Walsh (2003) in the proposal of A Theory of Magnitude (ATOM; Buetti & Walsh, 2009). According to ATOM, the three domains of time, space, and quantity are represented on a common cortical metric, which can also be interpreted as a generalized magnitude representation system (Bonn & Cantlon, 2012). An important prediction of ATOM is the existence of spatial associations for each magnitude dimension. This association is reflected in the SQUARC effect, that is, shorter reaction times to small quantities with a left-sided response than with a right-sided response and vice versa for large quantities (Walsh, 2003, 2015).

In addition, SARC effects have also been shown for the auditory dimensions loudness and pitch. In general, participants respond faster to soft or low tones with a left-sided response key compared to a right-sided response key and vice versa for loud or high tones (Fairhurst & Deroy, 2017; Guilbert, 2020; Hartmann & Mast, 2017; Lega et al., 2020; Lidji et al., 2007; Rusconi et al., 2006). The SARC effects for loudness and pitch also occur in the vertical dimension

✉ Sarah Koch
sarah.koch@psych.uni-halle.de

¹ Department of Psychology, Martin Luther University Halle-Wittenberg, Halle (Saale), Germany

indicating that soft or low tones are associated with the spatial information ‘bottom’ while loud or high tones are associated with the spatial information ‘top’ (Bruzzi et al., 2017; Fernandez-Prieto et al., 2017; Lega et al., 2020; Lidji et al., 2007; Pitteri et al., 2017; Rusconi et al., 2006). This is in line with the observation, that spatial associations for different stimulus dimensions can occur in several spatial axes such as vertical or radial (i.e. near-far) axes (see Winter et al., 2015 for a review).

SARC effects for pitch and loudness are typically explained by assuming a spatial representation of the corresponding auditory dimension. However, the structure of the assumed spatial representation differs between pitch and loudness. Pitch is assumed to be represented on a two-dimensional spatial helix structure (Shepard, 1982; Ueda & Ohgushi, 1987). Contrary, the SARC effect for loudness is explained by loudness being represented as a magnitude dimension with a linear spatial association (e.g. Bruzzi et al., 2017). This indicates that the effects rely on similar mechanisms but separated representations with different spatial structures. However, little is known how these assumed separated representations relate to each other, that is whether the SARC effects for pitch and loudness can occur simultaneously and independently from each other. Therefore, this study aimed to investigate the interrelation between the SARC effects for pitch and for loudness. For this, we tested whether both SARC effects interact with each other, which would be reflected in a larger SARC effect for pitch for loud tones compared to soft tones and a larger SARC effect for loudness for high tones compared to low tones. For a better distinction between both effects, we will refer to the effects as SPARC effect (Spatial-Pitch Association of Response Codes, Lidji et al., 2007) and as SLARC effect (Spatial-Loudness Association of Response Codes).¹

Before outlining the assumed interrelation in more detail, we will first describe the main findings for the SPARC and SLARC effects, separately. The SPARC effect depends on the interplay of various factors, namely, musical experience of the participants, the spatial arrangement of response keys, and whether pitch is the task relevant dimension or not. When participants have to classify the pitch of a presented tone relative to a standard pitch, a SPARC effect occurs regardless of the spatial arrangement of the response keys and musical experience (Guilbert, 2020; Lega et al., 2020; Lidji et al., 2007; Rusconi et al., 2006). In contrast, when pitch is not relevant for the task and participants have to respond to another attribute of the tone, for example its timbre, non-musicians show only a SPARC effect with

vertically but not with horizontally aligned response keys. Contrary, musicians still show a SPARC effect in a timbre discrimination task in the horizontal dimension as well as in the vertical dimension (Lega et al., 2020; Lidji et al., 2007; Rusconi et al., 2006).

The occurrence of the vertical SPARC effect is typically explained by the assumption of a mental spatial representation of pitch on a bottom-to-top helix structure (Shepard, 1982; Ueda & Ohgushi, 1987). Low pitches are assumed to be represented bottom while high pitches are assumed to be represented top. Additionally, the assumed representation model takes into account that the relationship between the physical dimension frequency and the perception of pitch is non-linear: An increasing frequency does not only lead to the impression of an increasing pitch height but does also change the perceived quality of the tone. This is referred to as pitch chroma and is indicated by the circular organization of tones within a helix plane. The occurrence of the vertical SPARC effect even under conditions in which pitch is not relevant for the task further indicates that the spatial information is automatically co-activated comparable to the automatic activation in case of the SNARC effect in a parity judgment task (Dehaene et al., 1993), which is in line with the assumption of an innate spatial representation of pitch. Note that an alternative explanation could be the semantic overlap between the response codes and the stimulus codes, as pitch is described in spatial terms in some languages. However, the SPARC effect also occurs in participants whose native language does not describe pitch via spatial terms (Fernandez-Prieto et al., 2017), thus invalidating the semantic overlap explanation.

Contrary to the SPARC effect, the SLARC effect does not depend on the arrangement of response keys or the relevance of loudness for the task. Although earlier studies did not find a SLARC effect in the horizontal dimension (Ren et al., 2011), the effect was later found by other studies (Chang & Cho, 2015; Fairhurst & Deroy, 2017; Hartmann & Mast, 2017). Furthermore, several studies found the SLARC effect in the vertical dimension (Bruzzi et al., 2017; Fernandez-Prieto et al., 2017). The SLARC effect is not only present when participants have to judge the loudness of a tone relative to a standard tone (Bruzzi et al., 2017; Hartmann & Mast, 2017) but does also occur in timbre discrimination tasks with horizontally (Chang & Cho, 2015) and vertically arranged response keys (Koch et al., 2023). This indicates an automatic activation of the spatial information of loudness comparable to the automatic activation of the spatial information in the case of pitch.

Typically, the SLARC effect is explained by assuming that loudness is represented as a magnitude according to ATOM (Buetti & Walsh, 2009; Walsh, 2003), as suggested for instance by Bruzzi et al. (2017). The SLARC effect found in previous studies is in line with this prediction as loud

¹ Please note, that the term SLARC effect is also used in the context of spatial associations for linguistic material (Abbondanza et al., 2021).

tones, that is tones with high intensity, are associated with right and soft tones associated with left (Hartmann & Mast, 2017). Furthermore, ATOM predicts interactions between magnitude dimensions (Walsh, 2003, 2015) and several studies found that loudness interacts with other magnitude dimensions like numerical magnitude (Alards-Tomalín et al., 2015; Hartmann & Mast, 2017; Heinemann et al., 2013) or physical size (Smith & Sera, 1992; Sutherland et al., 2014; Takeshima & Gyoba, 2013) which also supports the assumption that loudness is represented as a magnitude. Furthermore, loudness is a prothetic or quantitative dimension (Stevens, 1957; Stevens & Galanter, 1957), which is an important theoretical prerequisite for a dimension to be considered part of ATOM (Walsh, 2003, 2015). Taken together, assuming that loudness is represented as a magnitude in the sense of ATOM, the SLARC effect could be considered as an instance of the general SQUARC effect. This assumption is also supported by the notion that the SLARC effect seems to be continuous (Koch et al., 2023) which contradicts the most prominent alternative explanation, namely the polarity correspondence principle (Chang & Cho, 2015; Proctor & Cho, 2006).

So far, empirical evidence suggests that the SPARC and SLARC effects are due to two different spatial representations but a direct empirical test of this assumption is still missing. In addition, previous studies investigating spatial associations for spoken number words have found that the SPARC and SLARC effects interact with the already mentioned SNARC effect in a way that contradicts several theoretical assumptions. Numbers are assumed to be represented as a magnitude in terms of ATOM (Bueti & Walsh, 2009; Walsh, 2003, 2015) and therefore would share a magnitude representation with loudness. Pitch, on the other hand, is explicitly excluded from the conceptualization of ATOM because it is a metathetic or qualitative dimension (Stevens, 1957; Stevens & Galanter, 1957). Based on these assumptions, two interaction patterns between the SLARC, SPARC, and SNARC effects are plausible. First, from the premise that an interaction between spatial associations indicates a common origin, one would expect that the SLARC and SNARC effects should interact. This interaction could be reflected in a larger SLARC effect for large spoken numbers compared to small numbers as well as a larger SNARC effect for loud spoken number words compared to soft spoken number words. The SPARC and SNARC effects should be independent of each other. Alternatively, since a shared representation does not rule out purely additive effects (Sternberg, 1969), a second possible scenario could be that loudness and numbers share a common representation, but that the SLARC and SNARC effect simply do not interact. Importantly, the SPARC and SNARC effects should still not interact. Results from previous studies contradict both scenarios: While the SLARC effect does not interact with the

SNARC effect (Hartmann & Mast, 2017), the SPARC effect does interact with the SNARC effect (Fischer et al., 2013; Weis et al., 2015, 2016).

In a study by Hartmann and Mast (2017), participants heard spoken number words and had to classify the numerical value, loudness level, or parity. There was no interaction between the SPARC effect and the SLARC effect. Additionally, both effects were limited to the dimension-related task. The SNARC effect only occurred in the parity and number judgment task while the SLARC effect was limited to the loudness judgment task. However, both effects are known to occur even when number magnitude or loudness are irrelevant (Chang & Cho, 2015; Fias, 2001; Koch et al., 2023; for a review for the SNARC effect see Wood et al., 2008). This raises the question of whether two SARC effects can generally occur simultaneously.

Indeed, studies that found an interaction between the SPARC effect and the SNARC effect also found a simultaneous occurrence of both effects (Weis et al., 2015, 2016). However, the results are not entirely consistent, which might be due to different experimental setups. For example, Fischer et al. (2013) investigated the SPARC effect and the SNARC effect in a pitch discrimination task and a number discrimination task with diagonally arranged response keys. Both effects only occurred when the corresponding dimension was task-relevant. Crucially, there was a reversed SNARC effect for the SPARC incompatible trials but not for the SPARC compatible trials. In the studies conducted by Weis and colleagues (Weis et al., 2015, 2016), participants had to classify either the numerical value, pitch, or parity. Participants responded faster in SNARC compatible and SPARC compatible trials compared to incompatible trials regardless of the task. Furthermore, there was a significant interaction between SPARC compatibility and SNARC compatibility. The authors concluded that both effects share a common automatic decision mechanism and further suggested that this mechanism might be based on a common representation of pitch and numbers in the sense of ATOM (Weis et al., 2016). However, as already mentioned, pitch is explicitly excluded from the conceptualization of ATOM due to its metathetic or qualitative characteristic (Walsh, 2003, 2015). From a theoretical point of view, the interaction between SPARC and SNARC compatibility cannot be explained in terms of a common representation in the sense of ATOM.

Taken together, previous findings contradict predictions regarding potential interactions between SARC effects. In addition, it is unclear under which circumstances and for which dimensions two SARC effects can occur simultaneously. Therefore, the aim of our study was twofold. First, we wanted to investigate whether the SLARC effect occurs simultaneously with another spatial association, namely the SPARC effect. We used a timbre discrimination task in which participants had to decide whether a single tone

was a violin tone or an organ tone while pitch and loudness were varied orthogonally. Neither loudness nor pitch were relevant for the task, which allowed us to investigate whether both effects would show an automatic, simultaneous occurrence. Furthermore, timbre is equally strong related to both task-irrelevant dimensions, which is not the case for parity as used in previous studies (Hartmann & Mast, 2017; Weis et al., 2015, 2016), which is stronger related to the numerical value than to pitch or loudness. As a second aim, we wanted to test whether the interaction between the SPARC and SNARC effects (Weis et al., 2015, 2016) generalizes to the interrelation between the SLARC and the SPARC effects. The interaction between the SPARC and SNARC effects is explained by a shared representation according to ATOM (Weis et al., 2016). If this is the case, then the interaction should generalize to other magnitude dimensions as well. The SLARC effect is explained by an assumed magnitude representation of loudness (Bruzzi et al., 2017), and therefore one would also expect an interaction between the SLARC effect and the SPARC effect. This would be reflected in a larger SPARC effect for loud tones compared to soft tones as well as a larger SLARC effect for high tones compared to low tones.

To test the simultaneous occurrence as well as a possible interaction between both effects, we conducted a multiple linear regression, with the difference of reaction time between top-sided and bottom-sided responses (dRT) as dependent variable and loudness and pitch as predictors (Fias et al., 1996). We predicted that the SPARC effect and the SLARC effect would occur simultaneously indicated by a negative regression coefficient for loudness as well as for pitch. Previous studies found that SARC effects for two prothetic dimensions did not occur simultaneously (Hartmann & Mast, 2017; Vellan & Leth-Steensen, 2022; Weis et al., 2018) whereas SARC effects for one prothetic and one metathetic dimension occurred simultaneously (Weis et al., 2015, 2016). Because pitch and loudness are regarded as metathetic and prothetic dimensions, respectively (Stevens & Galanter, 1957), SARC effects for both dimensions should occur at the same time. With regard to our second research aim, we predicted that if an interaction between both effects occurred, it should be reflected in larger dRT differences between soft and loud tones which are high in pitch compared to tones which are low in pitch.

Methods

The study's design as well as our hypothesis and analysis plan were preregistered on aspredicted.org (https://aspredicted.org/CG8_V9Q).

Participants

$N = 38$ healthy students from Martin Luther University Halle-Wittenberg participated for course credit. Age was restricted to a range from 18 to 35 years to ensure that age-related hearing impairments were negligible between participants. Professional musicians (i.e. people who study or have studied music or work full-time or part-time as musician) were not allowed to participate in the study. The planned sample size was $N = 36$ based on a power analysis for a one-tailed one-sample t -test with a significance level of $\alpha = 0.05$, Power $1 - \beta = 0.9$ and a medium effect size of $d_z = -0.5$. After we reached our determined sample size, we checked the mean error rate and excluded two participants because their error rate exceeded 15%. In line with our preregistration, we collected data from two additional participants. Therefore, data from $N = 36$ participants ($N = 31$ female) were included in the final data analysis. The mean age was $M = 21.8$ years ($SD = 3$). $N = 33$ participants reported being right-handed. All participants reported having normal or corrected-to-normal vision and no participant reported any hearing impairments. Informed written consent was obtained from all individual participants included in the study.

Materials

The auditory material consisted of 50 different tones with five pitch levels, five loudness levels, and two timbres. Pitch was operationalized by frequency in Hertz and pitch levels ranged from 261 Hz (F#3) to 523 Hz (C5) with 3 half-tone steps between each pitch level. Loudness levels ranged from 45 to 65 phon with 5 phon between each level. All pitch-loudness combinations were realized as violin tone and as organ tone. Auditory stimuli were first synthesized with the software LMMS (Version, 1.2.0, Junghans & Giblock, 2019). Pitch levels of the tones were then analyzed via spectral analyses in Audacity (Version 3.2.0, The Audacity Team, 2019) and adjusted to the aimed fundamental frequency if necessary. Because the subjective loudness perception depends on sound pressure level and frequency (Fletcher & Munson, 1933), we controlled the loudness level for each frequency as followed. First, we adjusted the sound pressure level for each pitch level according to the isophone curves from the ISO norm for pure tones (International Organization for Standardization, 2003). Afterwards, tones were presented to $N = 4$ independent participants, who adjusted the amplitude of the tones according to their subjective loudness impression, so that all tones from one loudness level sounded equally loud to them regardless of pitch and timbre. Tone presentation and amplitude adjustment was done directly in Audacity. Participants could repeat the tones and adjust the amplitude of each tone as often as they

wished. Each final sound file had a sample rate of 48 kHz and a duration of 800 ms.

In the experiment, tones were presented via headphones (Sennheiser HD471). Participants responded to the tones by pressing a top-sided or bottom-sided response key, which were vertically aligned on a custom-built response box. Keys were 1 cm and 16 cm above the table surface. Keys were vertically aligned because several studies found the SPARC and SLARC effects occur for non-musicians in a timbre discrimination task with vertically aligned response keys (Koch et al., 2023; Lega et al., 2020; Lidji et al., 2007; Rusconi et al., 2006). Stimulus presentation and data recording was realized via the software PsychoPy (Version 2021.2.3, Peirce et al., 2019).

Procedure

Each trial started with the presentation of a fixation cross in the middle of the screen for 500 ms. After a foreperiod of 500 ms, the tone was presented for a maximum of 800 ms or until participants made a response. Because there was no time window, participants could press the response key after the tone ended. After participants gave their response, an inter-trial interval (ITI) of a uniformly distributed duration between 1 and 2 s was presented before the next trial started. Participants were instructed to classify the presented tone as violin tone or organ tone as fast and accurate as possible by pressing the top-sided or bottom-sided response key. They were not told that the tones had different loudness and pitch levels but to make them familiar with the auditory material, participants heard the combinations of the loudest, softest, highest, and lowest tones in both timbres during the instruction phase.

Response mapping was varied within participants and between four sessions. Order of response mapping was counterbalanced across participants. Half of the participants responded in the first and second session with the top-sided response key to the violin tone and with the bottom-sided response key to the organ tone and vice versa in the third and fourth session. The other half of participants had the opposite order of response mapping. Key-hand mapping was also varied between participants. Half of the participants pressed the top-sided response key with their right thumb and the bottom-sided response key with their left thumb, the other half had the opposite mapping. Participants were randomly assigned to one of the four condition groups with $N=9$ participants in each group.

In each session, all 50 tones were presented 12 times resulting in 600 experimental trials divided into 12 blocks à 50 experimental trials plus three warm-up trials in the beginning of each block. Participants performed 50 training trials in the beginning of each session in which they received

feedback about their reaction time and correctness of the response. Each session took between 45 and 50 min.

At the end of the fourth session, participants completed two subscales from the German version of the Goldsmith's Musical-Sophistication Index (Gold-MSI, Müllensiefen et al., 2014; Schaal et al., 2014). Although professional musicians were not allowed to participate in the study, we assumed that some participants might be familiar with playing an instrument. Some studies rely on cut-off criteria to define non-musicality, for example not playing an instrument for a certain amount of years (e.g. Lidji et al., 2007; Weis et al., 2016). However, these cut-off criteria are often not theoretical or empirical justified. Therefore, we assessed musical experience with a standardized questionnaire to investigate potential influences on the SPARC effect or SLARC effect. For our study, we used the subscales “perception” (9 items) and “musical training” (7 items) with a Cronbach's α of $\alpha = 0.8$ for the perception scale and $\alpha = 0.91$ for the musical training scale ($\alpha = 0.83$ and $\alpha = 0.88$ in the study of Schaal et al. (2014), respectively).

Data analysis

We used R (Version 4.1.2; R Core Team, 2021) and the R-packages *afex* (Version 1.1.1; Singmann et al., 2022), *BayesFactor* (Version 0.9.12.4.4; Morey & Rouder, 2022), *papaja* (Version 0.1.1; Aust & Barth, 2022), and *tidyverse* (Version 1.3.1; Wickham et al., 2019) for all our analyses. Reaction times from incorrect trials (6.9%) were discarded from further analyses. We calculated the trimmed mean reaction times with a trimming amount of 20% (Rosenberger & Gasko, 1983) and the mean error rate for each participant and within-subject condition. In addition, we calculated the mean difference of reaction times ($dRT = RT_{top} - RT_{bottom}$) for each participant, loudness, frequency, and timbre (Fias et al., 1996). For the ANOVA results, p -values corrected according to Geisser-Greenhouse (GG) will be reported in case of violations of the sphericity assumption. For the dRT analyses, we will report results from frequentist and Bayesian analyses.

Results

ANOVA results

In a first step, we conducted a mixed 5 (loudness) $\times$ 5 (frequency) $\times$ 2 (timbre) $\times$ 2 (response side) $\times$ 2 (order of response side) $\times$ 2 (key-hand mapping) ANOVA with order of response mapping and key-hand mapping as between-subjects factors and the remaining factors as within-subjects factors. Overall, mean reaction time decreased with increasing loudness with 402 ms, 393 ms, 389 ms, 385 ms,

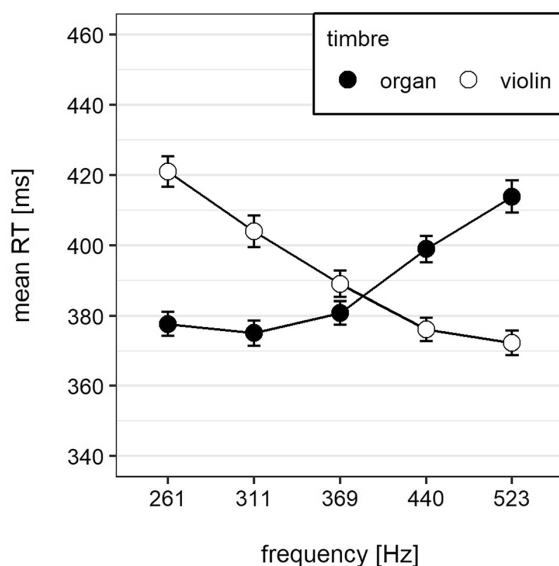


Fig. 1 Mean reaction time as a function of frequency and timbre. Error bars represent 95% within-subjects CI (Morey, 2008)

and 384 ms from softest to loudest loudness level. This main effect of loudness was significant, $F(4, 128) = 44.14$, $MSE = 1211.94$, $p < 0.001$ (GG), $\eta_G^2 = 0.007$. There was also a significant main effect of frequency, $F(4, 128) = 22.16$, $MSE = 1807.04$, $p < 0.001$ (GG), $\eta_G^2 = 0.004$: Participants responded fastest to tones with a frequency of 369 Hz (385 ms) and their reaction time increased with decreasing (389–399 ms) and increasing frequency (387–393 ms). Additionally, there was also a significant interaction between frequency and timbre, $F(4, 128) = 81.16$, $MSE = 7074.73$, $p < 0.001$ (GG), $\eta_G^2 = 0.040$. Participants responded faster to high violin and low organ tones compared to low violin tones and high organ tones (see Fig. 1).

With regard to our hypothesis, there was a significant interaction between loudness and response side, $F(4, 128) = 5.07$, $MSE = 697.48$, $p = 0.002$ (GG), $\eta_G^2 = 0.001$ as well as a significant interaction between frequency and response side, $F(4, 128) = 12.07$, $MSE = 1988.93$, $p < 0.001$ (GG), $\eta_G^2 = 0.002$. Both interactions are depicted in Fig. 2. Participants responded faster to soft or low tones with the bottom-sided response key compared to the top-sided response key. The opposite holds true for loud and high tones, respectively. For both dimensions, there was also a significant three-way interaction with timbre, with $F(4, 128) = 3.04$, $MSE = 848.39$, $p = 0.037$ (GG), $\eta_G^2 = 0.000$ for the loudness $\times$ response side $\times$ timbre interaction and $F(4, 128) = 3.49$, $MSE = 670.29$, $p = 0.017$ (GG), $\eta_G^2 = 0.000$ for the frequency $\times$ response side $\times$ timbre interaction. A more detailed analysis of both effects is carried out in the dRT analyses in the next section.

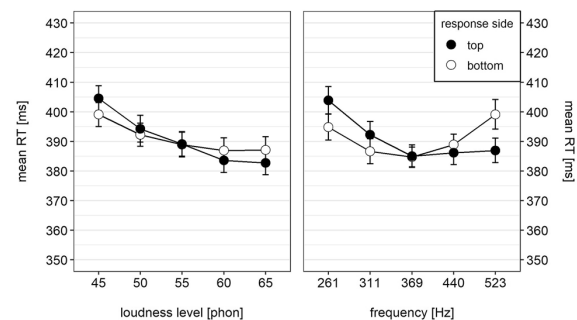


Fig. 2 Mean reaction time as a function of response side and loudness (left panel) and response side and pitch (right panel). Error bars represent 95% within-subjects CI (Morey, 2008)

Response side interacted with both between-subject factors, order of response mapping, $F(1, 32) = 5.28$, $MSE = 3,309.02$, $p = 0.028$, $\eta_G^2 = 0.001$, and key-hand-assignment, $F(1, 32) = 6.14$, $MSE = 3309.02$, $p = 0.019$, $\eta_G^2 = 0.001$. Participants who responded in the first two sessions to the violin tone with the top-sided response key were in general faster when responding with the top-sided response key (393 ms vs. 396 ms). Contrary, participants who started with the opposite mapping were in general faster when they pressed the bottom-sided response key compared to a top-sided response key (385 ms vs. 389 ms). Additionally, participants who pressed the bottom-sided response key with their right thumb were faster when pressing the bottom-sided response key compared to the top-sided response key (388 ms vs. 393 ms) and vice versa for participants who had the opposite key-hand mapping (387 ms vs. 392 ms). Because 33 out of 36 participants reported being right-handed, this interaction probably reflects the effect of the dominant hand on reaction times. There was also a significant interaction between timbre, response side, and order of response mapping, $F(1, 32) = 31.22$, $MSE = 24,385.61$, $p < 0.001$, $\eta_G^2 = 0.034$. Participants were in general faster in the response mapping of the third and fourth sessions compared to the response mapping of the first and second session, which lead to the significant three-way interaction. Lastly, the three-way interaction between response side, frequency, and order of response mapping was significant, $F(4, 128) = 4.21$, $MSE = 1988.93$, $p = 0.019$ (GG), $\eta_G^2 = 0.001$. All other main effects and interactions were non-significant, $p > 0.05$.

Results from dRT analyses

Mean dRT as a function of loudness and frequency averaged across the other predictor is illustrated in Fig. 3. For both dimensions, mean dRT decreased with an increasing value of the predictor. This holds true when visualizing the

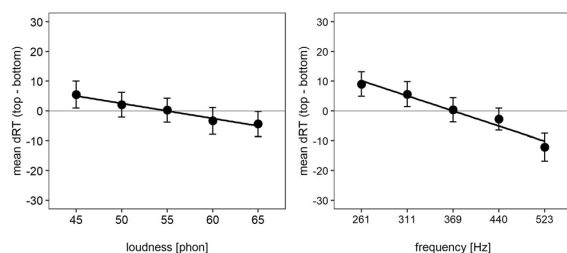


Fig. 3 Mean dRT and regression line as a function of loudness (left panel) and frequency (right panel) averaged over the other dimension. Error bars represent 95% within-subjects CI (Morey, 2008)

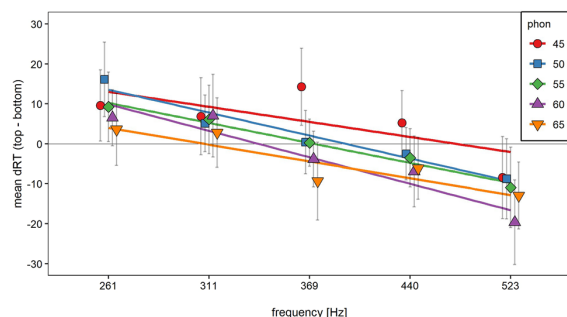


Fig. 4 Mean dRT and regression lines as a function of loudness and frequency. Error bars represent 95% within-subjects CI (Morey, 2008)

relationship between dRT and the loudness $\times$ frequency interaction (see Fig. 4). Mean dRT decreased with increasing loudness level for all frequencies and mean dRT decreased with increasing frequency for all loudness levels. From a visual inspection, there was no clear interaction trend visible.

To test the main and interaction effects, we conducted a multiple linear regression with loudness and frequency as predictors and dRT as dependent variable. We allowed the predictors to interact, although the non-significant interaction between response side, loudness, and frequency already indicated an additive effect. Because of

the different scales for loudness and frequency, we first standardized the predictors and the dependent variable to facilitate comparisons between the regression coefficients. Regression coefficients were estimated separately for each participant and timbre and then tested against zero via one-sample t -tests (Lorch & Myers, 1990). We used one-tailed (preregistered), one-sample t -tests for the main effects and two-tailed (preregistered), one-sample t -test for the interaction coefficients. Because timbre significantly interacted with several factors in the previously conducted ANOVA, we followed our preregistration protocol and tested the overall regression coefficients as well as regression coefficients separated for both timbres. This procedure led to nine one-sample t -tests in total. To avoid multiple comparison problems, we conducted a sequential Bonferroni correction, namely Rom's procedure to adjust significance levels (Olejnik et al., 1997). Results of the t -tests as well as the adjusted significance levels are depicted in Table 1. Regression coefficients of the interaction term were not significantly different from zero in all three conditions. The regression coefficients for frequency were significantly smaller than zero in all three conditions. Results for the regression coefficients for loudness were mixed. While in the overall and organ condition, regression coefficients were significantly smaller than zero, this was not the case in the violin condition.

Results from the frequentist analysis indicate that there was no significant interaction between loudness and frequency. To further support the interpretation of an absent effect, we also conducted Bayesian one-sample t -tests with a Cauchy prior distribution with a prior width of $r = 1/\sqrt{2}$ (Rouder et al., 2009). To resemble the preregistered one-tailed and two-tailed testing, we used a truncated distribution for testing the regression coefficients of loudness and frequency, and the full distribution for testing the interaction coefficients (for a detailed description of this approach, see Morey & Rouder, 2011). Due to multiple testing, we corrected the prior probability of the H_0 according to Westfall et al. (1997)

Table 1 Results from nine one-sample t -tests and corrected significance levels for the overall condition as well as separated for each timbre

Condition	Predictor	M	95% CI	$t(35)$	p	$\alpha_{corrected}$
Violin	Interaction	0.01	[-0.04, 0.05]	0.30	0.768	0.05
Overall	Interaction	-0.01	[-0.06, 0.04]	-0.32	0.749	0.02
Organ	Interaction	-0.02	[-0.05, 0.02]	-0.99	0.330	0.02
Violin	Loudness	-0.06	[- ∞ , -0.01]	-2.10	0.021	0.01
Organ	Loudness	-0.07	[- ∞ , -0.03]	-3.03	0.002	0.01
Overall	Loudness	-0.12	[- ∞ , -0.06]	-3.19	0.001	0.01
Organ	Frequency	-0.12	[- ∞ , -0.06]	-3.46	0.001	0.01
Overall	Frequency	-0.25	[- ∞ , -0.14]	-3.90	<0.001	0.01
Violin	Frequency	-0.14	[- ∞ , -0.08]	-3.92	<0.001	0.00

Table 2 Results from the Bayesian one-sample *t*-tests for the overall condition as well as separated for each timbre

Condition	Predictor	<i>M</i>	95% HDI	BF_{10}/BF_{-0}	Prior odds _{corr}	Posterior odds _{corr}
Violin	Interaction	0.01	[−0.04, 0.05]	0.19	0.26	0.05
Overall	Interaction	−0.01	[−0.06, 0.04]	0.19	0.26	0.05
Organ	Interaction	−0.01	[−0.04, 0.02]	0.28	0.26	0.07
Violin	Loudness	−0.05	[−0.10, 0.00]	2.47	0.1	0.25
Organ	Loudness	−0.07	[−0.11, −0.02]	16.6	0.1	1.67
Overall	Loudness	−0.11	[−0.19, −0.04]	24.2	0.1	2.43
Organ	Frequency	−0.12	[−0.19, −0.05]	45.2	0.1	4.55
Overall	Frequency	−0.23	[−0.36, −0.11]	138	0.1	13.88
Violin	Frequency	−0.13	[−0.20, −0.06]	146	0.1	14.70

HDI=Highest Density Interval. Estimation errors of the Bayes factors were all smaller than 5% and are therefore not reported. Prior odds and posterior odds are based on the corrected prior probability for H_{0i}

leading to $p(H_{0i}) = 0.5^{1/3} = 0.79$ for two-sided tests and $p(H_{0i}) = 1/3^{1/6} = 0.83$ for one-sided tests.²

Mean regression coefficients as well as the corresponding Bayes factors (BF_{10} for two-sided, BF_{-0} for one-sided tests) and posterior odds are depicted in Table 2. Note that *M* reports a point estimate based on the resulting posterior distribution and can therefore differ from the empirical means. For all interaction coefficients, BF_{10} was smaller than 0.3 indicating that the data was more likely under the H_0 , that is, that the regression coefficient is not different from zero. For the main effects, all BF_{-0} but one were larger than 10 indicating that the data was more likely under H_1 , that is, that the regression coefficient is smaller than zero. For the regression coefficient for loudness in the violin condition, BF_{-0} was smaller than 3 and therefore indicated that data was 2.47 times more likely under the H_1 . Additional robustness checks further showed that the Bayes Factors remained comparable for a range of different prior widths (see “Appendix” for the full robustness check).

To investigate whether musical training or perceptual abilities had an influence on the SPARC effect or the SLARC effect, we calculated Pearson’s correlation coefficients between the mean score for each scale and the overall regression coefficients. Mean scores were $M_{perception} = 5.11$ ($SD = 0.81$) and $M_{training} = 3.20$ ($SD = 1.58$). There was a significant correlation between mean scores for both scales, $r = 0.70$, 95% CI [0.49, 0.84], $t(34) = 5.76$, $p < 0.001$. Neither the mean score of perception nor the mean score of musical training did significantly correlate with any of the regression coefficients ($ps > 0.05$). Therefore, we resigned from further analysis.

Discussion

The first aim of this study was to investigate whether the SPARC effect and the SLARC effect occur simultaneously in a timbre discrimination task, that is, when loudness and pitch are irrelevant for the task. Indeed, loudness as well as pitch interacted with response side: Participants responded faster to high and loud tones when responding with the top-sided response key compared to the bottom-sided response key and vice versa for soft and low tones. The dRT analyses further revealed, that mean dRT linearly decreased with increasing loudness as well as with increasing pitch. These results show that both the SPARC effect and the SLARC effect occurred, supporting our first hypothesis regarding the simultaneous occurrence of both effects. A second aim of this study was the investigation of a potential interrelation between the SPARC effect and the SLARC effect indicated by an interaction between both effects. Contrary to our second hypothesis, the predictors loudness and pitch did not interact in the dRT analyses and the effects were purely additive.

Previous studies investigated either the SLARC effect or the SPARC effect in a timbre discrimination task (Koch et al., 2023; Lega et al., 2020; Lidji et al., 2007; Rusconi et al., 2006). The results from our study did not only replicate these effects, but also showed that both effects can occur simultaneously. Our SPARC effect was numerically smaller compared to results from other studies. This can easily be explained by the use of a limited pitch range in our experiment compared to the pitch ranges used in previous studies (e.g. Lidji et al., 2007; Rusconi et al., 2006). As loudness and pitch were both task-irrelevant, the results indicate a simultaneous and automatic activation of the spatial information in both dimensions. Additionally, the continuous linear decrease of dRT with increasing loudness level indicates a continuous spatial representation rather than a categorization as it would be predicted by, for example, the polarity correspondence principle (Proctor & Cho, 2006).

² Please note, that the approach for one-sided leads to two rival hypotheses (van Doorn et al., 2020).

The occurrence of SARC effects even when the corresponding dimension is not relevant for the task, is generally considered an indication of automatic activation of the implicit spatial information for the corresponding dimension (Dehaene et al., 1993; Weis et al., 2015). However, the use of bimanual responses may induce a spatial bias, and the processing of the spatial information would no longer be considered implicit (Shaki & Fischer, 2018; Sixtus et al., 2019). These studies used non-lateralized responses, meaning participants responded with a single response key in a go/no-go task, and therefore processed the magnitude information and spatial information implicitly. In these paradigms, participants did not respond faster when the number magnitude and horizontal spatial information matched. Therefore, it was interpreted that the horizontal SNARC effect may not reflect a spatial representation but rather a spatial processing bias. In contrast to the horizontal spatial information, a reaction time benefit was observed when number magnitude and vertical spatial information matched. This suggests that the vertical association may be inherently linked to the concept of magnitude (Shaki & Fischer, 2018; Sixtus et al., 2019). Regarding pitch and loudness, a next step may be to investigate, whether the vertical associations of these auditory dimensions still occur, when the spatial information is processed implicitly in a setting with non-lateralized responses.

The results show that the SLARC effect can indeed occur simultaneously with another SARC effect, in this case the SPARC effect. The question remains why this was not the case when investigating the SLARC effect and the SNARC effect (Hartmann & Mast, 2017). One possible explanation might be an influence of the task. Fischer et al. (2013) argued, that in the case of two competing dimensions, a potential SARC effect might only arise for the dimension which is relevant for the task. Although loudness and number magnitude are both irrelevant in a parity judgment task as used by Hartmann and Mast (2017), parity is stronger related to the numerical value of a number than to loudness. However, in the present experiment, the task-relevant dimension timbre might be equally strong related to pitch and loudness and therefore a comparable strong automatic activation of the spatial information in both dimensions might have been possible. On the other hand, Weis and colleagues (2015, 2016) also used a parity judgment task and did find simultaneous SARC effects.

For our study, separate frequentist and Bayesian analyses showed that timbre had only a negligible influence on the SPARC and SLARC effect: Both effects occurred in most of the timbre conditions. Nevertheless, the interaction patterns involving timbre partially differed for pitch and loudness.

There was a significant interaction between timbre and pitch with shorter reaction times for high violin and low organ tones compared to low violin and high organ tones. This interaction pattern is comparable to the timbre-pitch interaction found by Melara and Marks (1990). Loudness and timbre did not interact in our study, indicating a slightly different influence of timbre on the processing of pitch and loudness. However, even though timbre might not be completely equally related to pitch and loudness in our study, it did not influence the SPARC and SLARC effect.

Another explanation for discrepancies with regard to the simultaneous occurrences of SARC effect could be that SARC effects for prothetic dimensions do not occur simultaneously in general. Previous studies suggest that this is at least the case for the SNARC effect and the SARC effect for physical size (Vellan & Leth-Steensen, 2022; Weis et al., 2018). However, as these studies used either a number or a size discrimination task, the non-simultaneous occurrence might be due to the different relevance of the dimensions for the task (Fischer et al., 2013). Therefore, and because empirical evidence of concurrent SARC effects is rare, this explanation should be taken with caution. Further research is needed on the simultaneous occurrence of different SARC effects and how this relates to metathetic and prothetic dimensions.

The interaction between the SPARC effect and SNARC effect found by prior studies (Fischer et al., 2013; Weis et al., 2015, 2016) did not generalize to the SLARC effect in our study. This indicates that the interaction between the SPARC effect and the SNARC effect was not due to a shared representation in the sense of ATOM as some authors suggested (Weis et al., 2016). If this would have been the case, the interaction should have generalized to the SLARC effect, as loudness is suggested to be represented as a magnitude in the sense of ATOM (Bruzzi et al., 2017; Hartmann & Mast, 2017). Instead, other mechanisms might have been responsible for the interdependence between the SPARC effect and SNARC effect, for example, sharing a common central processes as already mentioned by Weis et al. (2016).

The lack of an interaction between the SPARC and the SLARC effect supports the assumption that loudness and pitch are represented separately. In addition, the continuous linear decrease of dRT with increasing pitch and loudness indicates that both distinct representations may be continuous. According to Lidji et al. (2007), the SPARC effect may rely on a spatial representation as proposed in former representational models of musical pitch (Shepard, 1982; Ueda & Ohgushi, 1987); while Bruzzi et al. (2017) suggest that the

SLARC effect is due to a generalized magnitude representation of loudness according to ATOM (Walsh, 2003).

Models aiming to describe the mental representation of pitch assume that pitch is represented spatially on a helix structure (Shepard, 1982; Ueda & Ohgushi, 1987). This assumption takes into account that an increase in frequency does not only lead to an increase in perceived pitch height but also to a change of the perceived pitch chroma. Two pitches with the same pitch chroma but from different octaves, for example C4 (261 Hz) and C5 (523 Hz), are considered subjectively more similar than two pitches with different chromas but closer frequencies, such as C4 (261 Hz) and F4 (349 Hz). Nevertheless, while pitch chroma is assumed to be represented circular, the helix structure comprises a constant vertical increase in pitch height. Therefore, even musical tones with the same pitch chroma differ in their pitch height. Thus, a spatial helix representation would still predict a continuous decrease of dRT with increasing frequency, similar to the result pattern in the current study.

A continuous decrease of dRT would be also in line with the assumption of a one-dimensional, linear spatial representation of pitch, comparable to the representation of loudness. However, this representation would not be considered a magnitude representation according to ATOM, because pitch is a metathetic dimension (Stevens, 1957; Stevens & Galanter, 1957), and therefore not part of the generalized magnitude representation system according to ATOM (Walsh, 2003, 2015). Nevertheless, the question whether the SPARC effect relies on a helix structure, or another one-dimensional spatial representation remains, and results from the current study do not allow to distinguish these spatial representation structures. Future studies should address the question whether reaction times indicating a SPARC effect also indicate a spatially organized helix structure of the underlying representation, for example by taking into account the influence of pitch similarity on reaction times in same-different judgments (Cohen Kadosh et al., 2008).

In contrast to pitch, loudness may be represented as a magnitude in the sense of ATOM (Buetti & Walsh, 2009; Walsh, 2003). In this case, the SLARC effect would be an

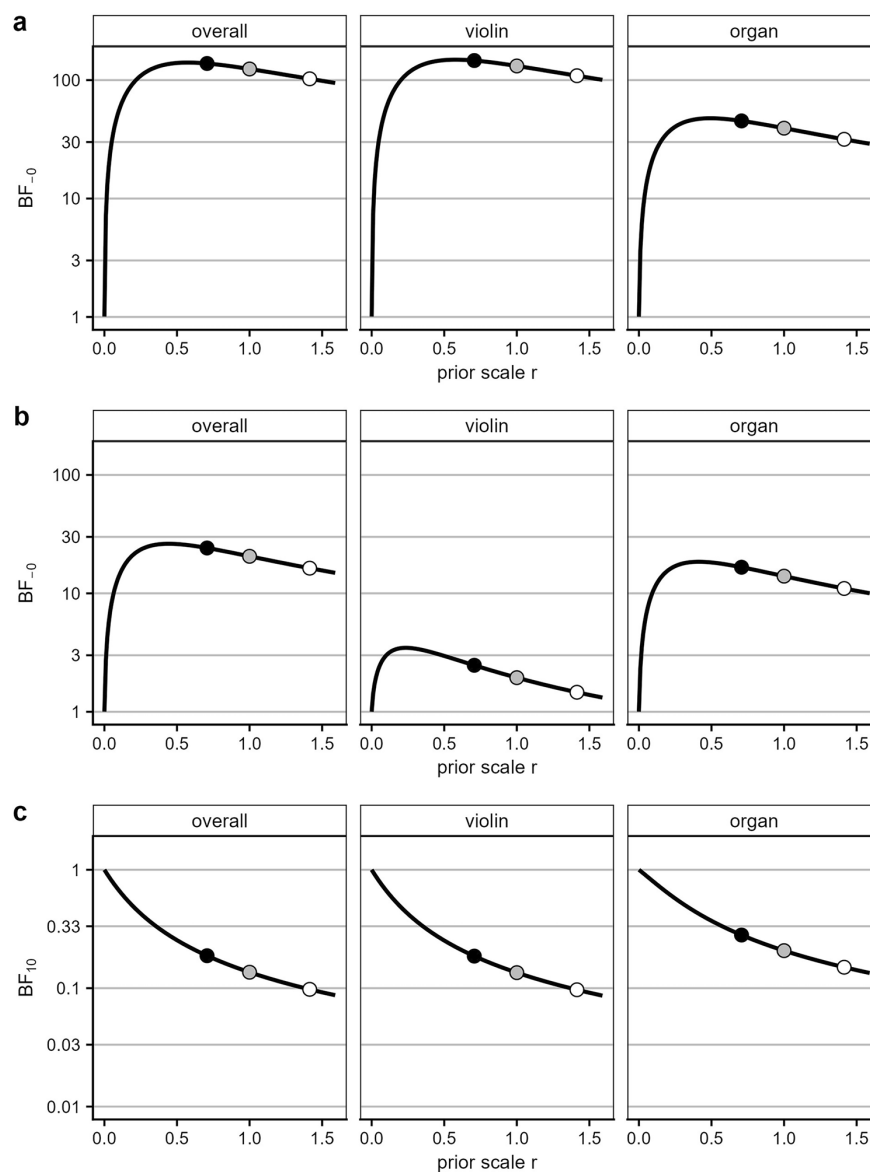
instance of the more general SQUARC effect. This assumption is supported by the prothetic character of loudness (Stevens, 1957; Stevens & Galanter, 1957) and by interactions between loudness and other ATOM-related magnitudes (Alards-Tomalin et al., 2015; Hartmann & Mast, 2017; Heinemann et al., 2013; Takeshima & Gyoba, 2013). The question remains whether a vertical SLARC effect is in line with this interpretation. The direction of the spatial association in the context of ATOM is not narrowed to the horizontal dimension. Furthermore, it is assumed that numbers—one of ATOM's most prominent quantity dimension—are also spatially represented in the vertical dimension (Aleotti et al., 2023; Ito & Hatta, 2004; see Winter et al., 2015 for a review). This vertical spatial association might be present in other magnitudes as well.

In conclusion, our study has shown that the SPARC effect and the SLARC effect occur simultaneously, but appear to be independent of each other. This supports the interpretation that both effects are due to separate spatial representations. Furthermore, our study extended the findings on simultaneous SARC effects and showed that the implicit spatial information of two dimensions can be automatically activated simultaneously. Whether and how this is influenced by task characteristics or by specific characteristics of the dimensions (e. g. the distinction between prothetic and metathetic dimensions) needs to be investigated in further research. In addition, future research could help to understand the complex patterns of interaction between different SARC effects and what leads to interdependencies between spatial associations in different dimensions.

Appendix

See Fig. 5.

Fig. 5 Bayes Factors as a function of prior scale of the Cauchy distribution for the regression coefficients of pitch (a), loudness (b), and interaction (c). Note: Points indicate Bayes Factors at prior scale $r = \sqrt{1/2}$ (black), $r = 1$ (grey), and $r = \sqrt{2}$ (white)



Author contributions All authors contributed to the study conception and design. Material preparation, data collection, and analysis were performed by SK. SK wrote the manuscript, SB and TS commented on previous versions of the manuscript. All authors read and approved the final manuscript.

Funding Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL. This research was supported by a scholarship from the Federal State of Saxony-Anhalt to S.K. (first author). T.S. (second author) was supported by a grant from the German Research Council DFG Schu 1397/7-2. Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

Availability of data and materials The data generated and/or analysed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Declarations

Conflict of interest The authors report no conflict of interest.

Ethical approval The study was conducted according to the criteria set by the declaration of Helsinki and has been approved by the national

ethic committee of the DGPs („Deutsche Gesellschaft für Psychologie“).

Informed consent Informed written consent was obtained from all individual participants included in the study.

Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

References

- Abbondanza, M., Rinaldi, L., Foppolo, F., & Marelli, M. (2021). The mental representation of nonnumerical quantifiers: The Spatial-Linguistic Association of Response Codes (SLARC) effect. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 47(12), 2021–2028. <https://doi.org/10.1037/xlm0001037>
- Alards-Tomalain, D., Walker, A. C., Shaw, J. D. M., & Leboe-McGowan, L. C. (2015). Is 9 louder than 1? Audiovisual cross-modal interactions between number magnitude and judged sound loudness. *Acta Psychologica*, 160, 95–103. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2015.07.004>
- Aleotti, S., Massaccesi, S., & Priftis, K. (2023). The SNARC effect: A preregistered study on the interaction of horizontal, vertical, and sagittal spatial-numerical associations. *Psychological Research Psychologische Forschung*, 87(4), 1256–1266. <https://doi.org/10.1007/s00426-022-01721-8>
- Aust, F., & Barth, M. (2022). *papaja: Prepare reproducible APA journal articles with R Markdown*. <https://github.com/crsb/papaja>
- Bonn, C. D., & Cantlon, J. F. (2012). The origins and structure of quantitative concepts. *Cognitive Neuropsychology*, 29(1–2), 149–173. <https://doi.org/10.1080/02643294.2012.707122>
- Bruzzi, E., Talamini, F., Priftis, K., & Grassi, M. (2017). A SMARC effect for loudness. *I-Perception*, 8(6), 204166951774217. <https://doi.org/10.1177/2041669517742175>
- Bueti, D., & Walsh, V. (2009). The parietal cortex and the representation of time, space, number and other magnitudes. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1525), 1831–1840. <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0028>
- Chang, S., & Cho, Y. S. (2015). Polarity correspondence effect between loudness and lateralized response set. *Frontiers in Psychology*. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00683>
- Cohen Kadosh, R., Brodsky, W., Levin, M., & Henik, A. (2008). Mental representation: What can pitch tell us about the distance effect? *Cortex*, 44(4), 470–477. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2007.08.002>
- Dehaene, S., Bossini, S., & Giraux, P. (1993). The mental representation of parity and number magnitude. *Journal of Experimental Psychology: General*, 122(3), 371–396. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.122.3.371>
- Fairhurst, M. T., & Deroy, O. (2017). Testing the shared spatial representation of magnitude of auditory and visual intensity. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 43(3), 629–637. <https://doi.org/10.1037/xhp0000332>
- Feigenson, L., Dehaene, S., & Spelke, E. (2004). Core systems of number. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(7), 307–314. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2004.05.002>
- Fernandez-Prieto, I., Spence, C., Pons, F., & Navarra, J. (2017). Does language influence the vertical representation of auditory pitch and loudness? *I-Perception*, 8(3), 204166951771618. <https://doi.org/10.1177/2041669517716183>
- Fias, W. (2001). Two routes for the processing of verbal numbers: Evidence from the SNARC effect. *Psychological Research Psychologische Forschung*, 65(4), 250–259. <https://doi.org/10.1007/s004260100065>
- Fias, W., Brysbaert, M., Geypens, F., & d'Ydewalle, G. (1996). The importance of magnitude information in numerical processing: Evidence from the SNARC effect. *Mathematical Cognition*, 2(1), 95–110. <https://doi.org/10.1080/135467996387552>
- Fischer, M. H., Riello, M., Giordano, B. L., & Rusconi, E. (2013). Singing numbers... in cognitive space—A dual-task study of the link between pitch, space, and numbers. *Topics in Cognitive Science*, 5(2), 354–366. <https://doi.org/10.1111/tops.12017>
- Fletcher, H., & Munson, W. A. (1933). Loudness, its definition, measurement and calculation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 5(2), 82–108. <https://doi.org/10.1121/1.1915637>
- Guilbert, A. (2020). About the existence of a horizontal mental pitch line in non-musicians. *Laterality*, 25(2), 215–228. <https://doi.org/10.1080/1357650X.2019.1646756>
- Hartmann, M., & Mast, F. W. (2017). Loudness counts: Interactions between loudness, number magnitude, and space. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 70(7), 1305–1322. <https://doi.org/10.1080/17470218.2016.1182194>
- Heinemann, A., Pfister, R., & Janczyk, M. (2013). Manipulating number generation: Loud+long=large? *Consciousness and Cognition*, 22(4), 1332–1339. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2013.08.014>
- International Organization for Standardization. (2003). *Acoustics—Normal equal-loudness-level contours*. (ISO Standard No. 226:2003). <https://www.iso.org/standard/34222.html>
- Ito, Y., & Hatta, T. (2004). Spatial structure of quantitative representation of numbers: Evidence from the SNARC effect. *Memory & Cognition*, 32(4), 662–673. <https://doi.org/10.3758/BF03195857>
- Junghans, T., & Giblock, P. (2019). *LMMS: Linux MultiMedia studio*. <https://lmms.io/>
- Koch, S., Schubert, T., & Blankenberger, S. (2023). The spatial representation of loudness in a timbre discrimination task. *I-Perception*, 14(6), 20416695231213212. <https://doi.org/10.1177/20416695231213213>
- Lega, C., Cattaneo, Z., Ancona, N., Vecchi, T., & Rinaldi, L. (2020). Instrumental expertise and musical timbre modulate the spatial representation of pitch. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 73(8), 1162–1172. <https://doi.org/10.1177/1747021819897779>
- Lidji, P., Kolinsky, R., Lochy, A., & Morais, J. (2007). Spatial associations for musical stimuli: A piano in the head? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 33(5), 1189–1207. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.33.5.1189>
- Lorch, R. F., & Myers, J. L. (1990). Regression analyses of repeated measures data in cognitive research. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 16(1), 149–157. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.16.1.149>
- Macnamara, A., Keage, H. A. D., & Loetscher, T. (2018). Mapping of non-numerical domains on space: A systematic review and meta-analysis. *Experimental Brain Research*, 236(2), 335–346. <https://doi.org/10.1007/s00221-017-5154-6>
- Melara, R. D., & Marks, L. E. (1990). Interaction among auditory dimensions: Timbre, pitch, and loudness. *Perception & Psychophysics*, 48(2), 169–178. <https://doi.org/10.3758/BF03207084>

- Morey, R. D., & Rouder, J. N. (2022). *BayesFactor: Computation of bayes factors for common designs*. <https://CRAN.R-project.org/package=BayesFactor>
- Morey, R. D. (2008). Confidence intervals from normalized data: A correction to Cousineau (2005). *Tutorials in Quantitative Methods for Psychology*, 4(2), 61–64. <https://doi.org/10.20982/tqmp.04.2.p061>
- Morey, R. D., & Rouder, J. N. (2011). Bayes factor approaches for testing interval null hypotheses. *Psychological Methods*, 16(4), 406–419. <https://doi.org/10.1037/a0024377>
- Müllensiefen, D., Gingras, B., Musil, J., & Stewart, L. (2014). The musicality of non-musicians: An index for assessing musical sophistication in the general population. *PLoS ONE*, 9(2), e89642. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0089642>
- Olejnik, S., Li, J., Supattathum, S., & Huberty, C. J. (1997). Multiple testing and statistical power with modified Bonferroni procedures. *Journal of Educational and Behavioral Statistics*, 22(4), 389–406. <https://doi.org/10.3102/10769986022004389>
- Peirce, J., Gray, J. R., Simpson, S., MacAskill, M., Höchenberger, R., Sogo, H., Kastman, E., & Lindeløv, J. K. (2019). PsychoPy2: Experiments in behavior made easy. *Behavior Research Methods*, 51(1), 195–203. <https://doi.org/10.3758/s13428-018-01193-y>
- Pitteri, M., Marchetti, M., Piftis, K., & Grassi, M. (2017). Naturally together: Pitch-height and brightness as coupled factors for eliciting the SMARC effect in non-musicians. *Psychological Research Psychologische Forschung*, 81(1), 243–254. <https://doi.org/10.1007/s00426-015-0713-6>
- Proctor, R. W., & Cho, Y. S. (2006). Polarity correspondence: A general principle for performance of speeded binary classification tasks. *Psychological Bulletin*, 132(3), 416–442. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.132.3.416>
- R Core Team. (2021). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Ren, P., Nicholls, M. E. R., Ma, Y., & Chen, L. (2011). Size matters: Non-numerical magnitude affects the spatial coding of response. *PLoS ONE*, 6(8), e23553. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0023553>
- Restle, F. (1970). Speed of adding and comparing numbers. *Journal of Experimental Psychology*, 83(2, Pt. 1), 274–278. <https://doi.org/10.1037/h0028573>
- Rosenberger, J. L., & Gasko, M. (1983). Comparing location estimators: Trimmed means, medians, and trimmean. In D. C. Hoaglin, F. Mosteller, & J. W. Tukey (Eds.), *Understanding robust and exploratory data analysis* (pp. 297–338). Wiley.
- Rouder, J. N., Speckman, P. L., Sun, D., Morey, R. D., & Iverson, G. (2009). Bayesian t tests for accepting and rejecting the null hypothesis. *Psychonomic Bulletin & Review*, 16(2), 225–237. <https://doi.org/10.3758/PBR.16.2.225>
- Rusconi, E., Kwan, B., Giordano, B., Umiltà, C., & Butterworth, B. (2006). Spatial representation of pitch height: The SMARC effect. *Cognition*, 99(2), 113–129. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2005.01.004>
- Schaal, N. K., Bauer, A.-K.R., & Müllensiefen, D. (2014). Der Gold-MSI: Replikation und Validierung eines Fragebogeninstrumentes zur Messung Musikalischer Erfahrung anhand einer deutschen Stichprobe [The Gold-MSI: Replication and validation of a questionnaire for measuring musical sophistication in a german-speaking sample]. *Musicae Scientiae*, 18(4), 423–447. <https://doi.org/10.1177/1029864914541851>
- Shaki, S., & Fischer, M. H. (2018). Deconstructing spatial-numerical associations. *Cognition*, 175, 109–113. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2018.02.022>
- Shepard, R. N. (1982). Geometrical approximations to the structure of musical pitch. *Psychological Review*, 89(4), 305–333. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.89.4.305>
- Singmann, H., Bolker, B., Westfall, J., Aust, F., & Ben-Shachar, M. S. (2022). *Afex: Analysis of factorial experiments*. <https://CRAN.R-project.org/package=afex>
- Sixtus, E., Lonnemann, J., Fischer, M. H., & Werner, K. (2019). Mental number representations in 2D space. *Frontiers in Psychology*, 10, 172. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.00172>
- Smith, L. B., & Sera, M. D. (1992). A developmental analysis of the polar structure of dimensions. *Cognitive Psychology*, 24(1), 99–142. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(92\)90004-L](https://doi.org/10.1016/0010-0285(92)90004-L)
- Sternberg, S. (1969). The discovery of processing stages: Extensions of Donders' method. *Acta Psychologica*, 30, 276–315. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(69\)90055-9](https://doi.org/10.1016/0001-6918(69)90055-9)
- Stevens, S. S. (1957). On the psychophysical law. *Psychological Review*, 64(3), 153–181. <https://doi.org/10.1037/h0046162>
- Stevens, S. S., & Galanter, E. H. (1957). Ratio scales and category scales for a dozen perceptual continua. *Journal of Experimental Psychology*, 54(6), 377–411. <https://doi.org/10.1037/h0043680>
- Sutherland, C. A. M., Thut, G., & Romei, V. (2014). Hearing brighter: Changing in-depth visual perception through looming sounds. *Cognition*, 132(3), 312–323. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2014.04.011>
- Takeshima, Y., & Gyoba, J. (2013). High-intensity sound increases the size of visually perceived objects. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 75(3), 501–507. <https://doi.org/10.3758/s13414-012-0403-z>
- The Audacity Team. (2019). *Audacity*. <https://www.audacityteam.org/>
- Ueda, K., & Ohgushi, K. (1987). Perceptual components of pitch: Spatial representation using a multidimensional scaling technique. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 82(4), 1193–1200. <https://doi.org/10.1121/1.395255>
- van Doorn, J., van den Bergh, D., Böhm, U., Dablander, F., Derks, K., Draws, T., Etz, A., Evans, N. J., Gronau, Q. F., Haaf, J. M., Hinne, M., Kucharský, Š., Ly, A., Marsman, M., Matzke, D., Gupta, A. R. K. N., Sarafoglou, A., Stefan, A., Voelkel, J. G., & Wagenmakers, E.-J. (2020). The JASP guidelines for conducting and reporting a Bayesian analysis. *Psychonomic Bulletin & Review*. <https://doi.org/10.3758/s13423-020-01798-5>
- Vellán, J. E., & Leth-Steensen, C. (2022). Separate processing mechanisms for spatial-numerical compatibility and numerical-size congruity. *Canadian Journal of Experimental Psychology/revue Canadienne De Psychologie Expérimentale*, 76(1), 44–56. <https://doi.org/10.1037/cep0000270>
- Walsh, V. (2003). A theory of magnitude: Common cortical metrics of time, space and quantity. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(11), 483–488. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2003.09.002>
- Walsh, V. (2015). A theory of magnitude: The parts that sum to number. In R. Cohen Kadosh & A. Dowker (Eds.), *The Oxford handbook of numerical cognition* (pp. 552–565). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780199642342.013.64>
- Weis, T., Estner, B., Krick, C. M., Reith, W., & Lachmann, T. (2015). SNARC meets SPARC in fMRI—Interdependence of compatibility effects depends on semantic content. *Neuropsychologia*, 77, 331–338. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2015.09.018>
- Weis, T., Estner, B., van Leeuwen, C., & Lachmann, T. (2016). SNARC (spatial-numerical association of response codes) meets SPARC (spatial-pitch association of response codes): Automaticity and interdependency in compatibility effects. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 69(7), 1366–1383. <https://doi.org/10.1080/17470218.2015.1082142>
- Weis, T., Theobald, S., Schmitt, A., van Leeuwen, C., & Lachmann, T. (2018). There's a SNARC in the size congruity task. *Frontiers in Psychology*, 9, 1978. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.01978>

- Westfall, P., Johnson, W., & Utts, J. (1997). A Bayesian perspective on the Bonferroni adjustment. *Biometrika*, 84(2), 419–427. <https://doi.org/10.1093/biomet/84.2.419>
- Wickham, H., Averick, M., Bryan, J., Chang, W., McGowan, L. D., François, R., Grolemund, G., Hayes, A., Henry, L., Hester, J., Kuhn, M., Pedersen, T. L., Miller, E., Bache, S. M., Müller, K., Ooms, J., Robinson, D., Seidel, D. P., Spinu, V., & Yutani, H. (2019). Welcome to the tidyverse. *Journal of Open Source Software*, 4(43), 1686. <https://doi.org/10.21105/joss.01686>
- Winter, B., Matlock, T., Shaki, S., & Fischer, M. H. (2015). Mental number space in three dimensions. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 57, 209–219. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2015.09.005>
- Wood, G., Willmes, K., Nuerk, H.-C., & Fischer, M. H. (2008). On the cognitive link between space and number: A meta-analysis of the SNARC effect. *Psychology Science*, 50(4), 489–525.
- Publisher's Note** Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

5.3 Large sounds and loud numbers? Investigating the bidirectionality and automaticity of cross-modal loudness-number interactions (Studie 3)

In Kapitel 5.3 wird die Fragestellung, Methode, Ergebnisse sowie Diskussion der Befunde von Studie 3 dargestellt. Kapitel 5.3 besteht aus einem akzeptierten Manuskript, welches in *Quarterly Journal of Experimental Psychology* eingereicht wurde. In der gedruckten Fassung der Dissertation ist das akzeptierte Manuskript auf den Seiten 71–127 enthalten.

Koch, S., Schubert, T., & Blankenberger, S. (2025). Large sounds and loud numbers? Investigating the bidirectionality and automaticity of cross-modal loudness-number interactions. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 0(0) <https://doi.org/10.1177/17470218251325417>

Die Publikation erfolgte über SAGE Publishing Inc. Der finale Artikel als Originalpublikation ist verfügbar unter <https://doi.org/10.1177/17470218251325417>.

Koch, S., Schubert, T., & Blankenberger, S. (2025). Large sounds and loud numbers? Investigating the bidirectionality and automaticity of cross-modal loudness-number interactions. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 0(0) <https://doi.org/10.1177/17470218251325417>

Abstract

Magnitude dimensions influence the processing of each other resulting in shorter reaction times in classification tasks when the magnitude information in both dimensions matches. These effects are often explained by a shared magnitude representation as proposed by A Theory of Magnitude (ATOM). Interactions between numbers and loudness indicate that loudness may also be represented as a magnitude. Three experiments were conducted to investigate loudness-number interactions with regard to cross-modality, automaticity, bidirectionality, and the influence of processing speed. In Experiment 1, participants classified the numerical value of visually presented numbers relative to a preceding standard number. Tones at different loudness levels were presented simultaneously with the target number. In Experiment 2, participants switched between a numerical classification task and a loudness classification task randomly between trials. Experiment 3 was similar to Experiment 1 but with reduced salience of the auditory dimension. Across all experiments, there was an interaction between loudness and number magnitude, with shorter reaction times for large (small) numbers when they were accompanied by loud (soft) tones compared to soft (loud) tones. In addition, Experiment 2 showed a bidirectional influence as the interaction occurred also in the loudness classification task. The effect of distance on the cross-modal loudness-number interaction only partially occurred, as only the loudness distance had an effect on the interaction, and this effect was mediated by task-relevance. This may reflect an asymmetry in the influence between numbers and loudness. Overall, the findings support the hypothesis that loudness is represented as a magnitude according to ATOM.

6 Diskussion

6.1 Rekapitulation der Fragestellung der Dissertation

Ziel der vorliegenden Arbeit war die Untersuchung, ob die auditive Dimension Lautheit als Größendimension gemäß ATOM (Walsh, 2003) repräsentiert wird. Die Erfüllung der drei Größenkriterien Prothetik, neuronale Implementierung in der IPS sowie Handlungsrelevanz (Walsh, 2003, 2015) wurde in Kapitel 3 skizziert. Ferner muss eine Größendimension gemäß ATOM einen SQUARC-Effekt sowie Interaktionen mit anderen Größendimensionen aufweisen (Buetti & Walsh, 2009; Walsh, 2003, 2015). Aufbauend auf diesen beiden Vorhersagen wurde in der vorliegenden Arbeit der SLARC-Effekt sowie die Interaktion zwischen Lautheit und numerischen Wert, als Vertreter einer etablierten Größendimension, untersucht. Wenngleich bisherige Studien sowohl einen SLARC-Effekt (Bruzzi et al., 2017; Fairhurst & Deroy, 2017; Fernandez-Prieto et al., 2017; Hartmann & Mast, 2017) sowie Interaktionen mit dem numerischen Wert einer Zahl (Alards-Tomalain et al., 2015, 2017; Hartmann & Mast, 2017; Heinemann et al., 2013) zeigen konnten, ließen bisherige Befunde nicht den Schluss zu, dass die Effekte eindeutig als Indikator einer Größenrepräsentation von Lautheit interpretiert werden können. Die experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit hatten zum Ziel, diese Lücken zu schließen.

In Studie 1 wurde zunächst die Gültigkeit der Alternativerklärung für den SLARC-Effekt - das *polarity correspondence principle* (Cho et al., 2012; Proctor & Cho, 2006; Proctor & Xiong, 2015) - untersucht. In Studie 2 wurde die Beziehung des SLARC-Effektes zu der räumlichen Assoziation der metathetischen Dimension Tonhöhe untersucht, um zu prüfen, ob beide Effekte auf unterschiedlichen Repräsentationssystemen beruhen. Ziel von Studie 3 war die Untersuchung der cross-modalen Interaktion zwischen Lautheit und numerischen Wert und ob diese mit Befunden zu der uni-modalen Interaktion (Hartmann & Mast, 2017) sowie dem *size congruity effect* (Foltz et al., 1984; Kochari & Schriefers, 2021; Schwarz & Ischebeck, 2003; Tzelgov et al., 1992) als etablierte Größeninteraktion vergleichbar ist. Im folgenden Abschnitt werden die Befunde der einzelnen Studien zusammengefasst dargestellt und ihre Bedeutung für die Annahme einer Größenrepräsentation von Lautheit diskutiert.

6.2 Diskussion und Interpretation der Befunde

6.2.1 Der SLARC-Effekt: Eine Instanz des SQUARC-Effektes

In Studie 1 und Studie 2 konnte gezeigt werden, dass ein vertikaler SLARC-Effekt in einer Klangfarbendiskriminationsaufgabe ohne Präsentation eines Standardtons auftritt. Die Befunde unterstützen damit die Annahme, dass Lautheit nicht nur eine vertikale, räumliche Assoziation aufweist, wie sie bereits in anderen Studien gezeigt werden konnte (Bruzzi et al., 2017; Fernandez-Prieto et al., 2017), sondern dass die räumliche Information automatisch aktiviert wird. Der kontinuierliche Verlauf des SLARC-Effektes ist ferner im Einklang mit der Annahme einer kontinuierlichen räumlichen Assoziation von Lautheit.

Das Auftreten eines SLARC-Effektes in einer Klangfarbendiskriminationsaufgabe ohne Standardton spricht zudem gegen das *polarity correspondence principle* (Proctor & Cho, 2006) als alternative Erklärung für das Auftreten des SLARC-Effektes. Damit mehrstufige Ausprägungen einer Reizdimension als positiv bzw. negativ kodiert werden können, sei eine Dichotomisierung der Reizdimension erforderlich (Cho et al., 2012). Dies erfolge entweder direkt durch die Aufgabenanforderungen einer binären Klassifikationsaufgabe oder anhand eines Referenzpunktes der durch einen Standardton vorgegeben werde (Cho et al., 2012). Beides kann in Studie 1 und Studie 2 ausgeschlossen werden, da die Versuchspersonen weder die Lautheit der Töne klassifizieren mussten, noch ein expliziter Referenzpunkt in Form eines Standardtons vorlag. Ferner ist der kontinuierliche SLARC-Effekt ebenfalls nicht mit den Annahmen des *polarity correspondence principle* vereinbar, da dieses einen kategorialen SLARC-Effekt impliziert. Damit kann die bedeutsamste Alternativerklärung des SLARC-Effektes ausgeschlossen werden.

Die Befunde aus Studie 2 zeigen zudem, dass die räumliche Assoziation von Lautheit automatisch und parallel zu der räumlichen Assoziation von Tonhöhe aktiviert wurde. So traten in besagter Studie gleichzeitig sowohl ein SLARC-Effekt als auch ein SPARC-Effekt auf. Die fehlende Interaktion und damit die rein additiven Effekte stehen im Einklang mit der Annahme unabhängiger räumlicher Repräsentationen. Gemäß früherer Studien ließe sich der SPARC-Effekt durch die räumliche Repräsentation von Tonhöhe auf einer vertikalen Helixstruktur (Shepard, 1982; Ueda & Ohgushi, 1987) erklären (Lidji et al., 2007). Der SLARC-Effekt wurde dagegen bereits in früheren Studien als Indikator einer Größenrepräsentation von Lautheit interpretiert (Bruzzi et al., 2017). Die ausbleibende Interaktion der beiden Effekte unterstützt die Annahme getrennter Repräsentationssysteme die dem SLARC-Effekt und SPARC-Effekt zugrunde liegen. Einschränkend ist zu erwähnen, dass ausgehend von der additiven Faktorenlogik additive Effekte mit einer gemeinsamen Repräsentation durchaus vereinbar wären (Sternberg, 1969). Dennoch zeigen die Befunde aus Studie 2, dass die in vorherigen Studien gefundene Interaktion zwischen SNARC-Kompatibilität und SPARC-Inkompatibilität (Weis et al., 2015, 2016) nicht auf die quantitative Dimension Lautheit generalisiert werden konnte. Dies spricht gegen die, von den Autoren geäußerte Annahme, Tonhöhe würde ebenfalls im Sinne ATOMs repräsentiert werden. Die Befunde aus Studie 2 deuten zudem daraufhin, dass das simultane Auftreten räumlicher Assoziationen

möglicherweise dadurch beeinflusst wird, ob es sich um prothetische oder metathetische Dimensionen handelt. Diese Annahme wurde detaillierter in Kapitel 5.2 diskutiert und soll insbesondere aufgrund ihrer mangelnden empirischen Absicherung und geringen Bezug zur Fragestellung der Dissertation an dieser Stelle nicht näher betrachtet werden.

In Studie 1 und Studie 2 wurde ausschließlich der vertikale SLARC-Effekt adressiert. Es stellt sich die Frage, ob einer derartiger Effekt als SQUARC-Effekt interpretiert werden kann oder ob die angenommene räumliche Assoziation in ATOM per se auf die horizontale Ausrichtung beschränkt ist. Dies lässt sich nicht eindeutig beantworten. In Bezug auf ATOM wird keine explizite Einschränkung auf die horizontale Dimension vorgenommen und stattdessen generell von einer „relationship between magnitude and space“ (Walsh, 2003, S. 487) gesprochen. Die explizite Nennung der links- und rechtsseitigen Reaktion erfolgte im Zuge der Beschreibung des SNARC-Effektes, dessen Untersuchung zum Zeitpunkt dieser Aussage weitgehend auf die horizontale Dimension beschränkt war. Allerdings legen neuere Studien nahe, dass auch für Zahlen eine vertikale, räumliche Assoziation in Form eines vertikalen SNARC-Effektes vorliegt (Aleotti et al., 2023; Ito & Hatta, 2004; für eine Übersicht siehe Winter, Matlock, et al., 2015). Diese Befunde wurden allerdings auch in späteren Ausführungen zu ATOM nicht adressiert (Buetti & Walsh, 2009; Walsh, 2015). Dennoch fand auch in diesen Artikeln keine explizite Einschränkung des SQUARC-Effektes auf die horizontale Dimension statt. Dementsprechend besteht die Möglichkeit, dass die in ATOM postulierte Assoziation zwischen Größe und Raum flexibel für die horizontale und vertikale Ausrichtung gelten könnte. Ein vertikaler SQUARC-Effekt ist daher nicht per se mit ATOM unvereinbar, wenngleich die Generalisierung der Befunde aus Studie 1 und Studie 2 auf die horizontale Dimension erforderlich ist. In diesem Kontext wäre insbesondere interessant, wie sich ein horizontaler SLARC-Effekt und SPARC-Effekt in einer Klangfarbendiskriminationsaufgabe verhalten. Für musikalisch unerfahrene Personen tritt in einer solchen Aufgabe typischerweise kein horizontaler SPARC-Effekt auf (Lega et al., 2020; Lidji et al., 2007; Rusconi et al., 2006). Auch für den horizontalen SLARC-Effekt sind die Befunde nicht eindeutig, zwar trat der Effekt in einer Klangfarbendiskriminationsaufgabe mit Präsentation eines Standardtones auf (S. Chang & Cho, 2015), bei der Untersuchung mit gesprochenen Zahlwörtern trat der horizontale SLARC-Effekt dagegen nur in der Lautheitsklassifikationsaufgabe auf (Hartmann & Mast, 2017).

Der in dieser Arbeit gefundene vertikale SLARC-Effekt kann als SQUARC-Effekt interpretiert werden, insbesondere da das *polarity correspondence principle* als Alternativerklärung ausgeschlossen werden kann. Gleichwohl gilt auch für diesen Effekt die bereits in der Einleitung skizzierte Kritik, dass von dem Auftreten eines SQUARC-Effektes nicht automatisch auf eine zugrunde liegende Größendimension geschlossen werden kann (Casasanto & Pitt, 2019; Pitt & Casasanto, 2022; Van Opstal & Verguts, 2013), weshalb im nächsten Abschnitt die Interaktion zwischen Lautheit und numerischen Wert als zweite empirische Vorhersage betrachtet wird.

6.2.2 Cross-modale Größeninteraktionen

In Studie 3 konnte eine cross-modale Interaktion zwischen Lautheit und numerischen Wert gezeigt werden, die darauf hindeutet, dass laute Töne und numerisch große Zahlen sowie leise Töne und numerisch kleine Zahlen assoziiert sind. Die Assoziationsrichtung entspricht damit der von ATOM geforderten monotonen Beziehung zwischen Größendimensionen, in der die Zunahme einer Größendimension mit der Zunahme in einer anderen Größendimension assoziiert ist (Buetti & Walsh, 2009).

In allen drei Experimenten zeigte sich ein reaktionszeitbasierter Kongruenzeffekt, welcher auf einen Einfluss von Lautheit auf die Verarbeitung des numerischen Wertes einer visuell präsentierten Zahl hindeutet. Da Lautheit für die Bearbeitung der Aufgabe nicht relevant war (Experiment 1 und Experiment 3), deuten die Befunde ferner auf einen automatischen Einfluss hin. Gleichzeitig war das Ausmaß des Kongruenzeffektes anfällig für experimentelle Manipulationen. Die Befunde sprechen daher für eine automatische Aktivierung der Lautheitsinformation, nicht jedoch für einen automatischen Prozess, im Sinne einer Unabhängigkeit der Verarbeitungsressourcen (Kochari & Schriefers, 2021). Die Befunde aus Experiment 2 sprechen ferner für einen wechselseitigen Einfluss, da in Experiment 2 sowohl in einer Lautheitsklassifikationsaufgabe als auch einer Zahlenklassifikationsaufgabe eine Interaktion zwischen Lautheit und numerischen Wert auftrat. Die Größe des Effektes war zudem unabhängig von der Aufgabe. Damit schließen diese Befunde eine Lücke bisheriger Arbeiten, die lediglich den automatischen, cross-modalen Einfluss einer visuellen Zahl auf die Verarbeitung von Lautheit untersuchten (Alards-Tomaline et al., 2015, 2017). Die cross-modale Interaktion zwischen Lautheit und numerischen Wert entspricht damit weitgehend der uni-modalen Interaktion (Hartmann & Mast, 2017). Dies ist dahingehend bedeutsam, da Größeninteraktionen gemäß ATOM aufgrund der Abbildung auf einem generalisierten Größensystem auftreten (Buetti & Walsh, 2009; Walsh, 2003). Die aktivierte Größeninformation sollte daher invariant gegenüber der Modalität sein, weshalb das Interaktionsmuster modalitätsübergreifend auftreten sollte.

Die Notwendigkeit wechselseitiger Einflüsse für ATOM wird kontrovers diskutiert (Winter, Marghetis, et al., 2015). So postuliert Walsh (2015; siehe auch Buetti & Walsh, 2009), dass directionale Asymmetrien mit ATOM vereinbar seien und diese durch Unterschiede in den Eigenschaften der involvierten Dimensionen erklärbar seien. Allen voran werden hierbei Unterschiede im Ausmaß der linguistischen Kodierung genannt, wobei für die Dimension numerische Größe eine starke linguistische Kodierung und damit auch ein erhöhter Einfluss auf andere Größendimensionen postuliert wird. Neben der Problematik einer fehlenden objektiven Messbarkeit des Ausmaßes linguistischer Kodierung, widersprechen die Befunde aus Studie 3 dieser Annahme. Der Einfluss zwischen Lautheit und numerischen Wert hätte gemäß Unterschieden in der linguistischen Kodierung asymmetrisch sein sollen (Walsh, 2015), tatsächlich trat jedoch eine wechselseitige Beeinflussung auf. Auch die Befunde bisheriger Studien widersprechen der Annahme eines stärkeren Einflusses des numerischen Wertes auf andere Größendimensionen. Schwarz und Ischebeck (2003) quantifizierten in ihrem *coalescence model* den Einfluss der interferierenden Dimension auf die *drift rate* über den Parameter Θ . Dieser war in der numerischen Größenklassifikationsaufgabe größer ausgeprägt als in der physikalischen Klassifikationsaufgabe, was auf

einen stärkeren Einfluss der physikalischen Größe auf die Verarbeitung der numerischen Größe hindeutet. Ein vergleichbares Ergebnismuster trat für den *size congruity effect* mit nicht-symbolischer Numerosität auf, in der die physikalische Größe einen stärkeren Einfluss auf die Verarbeitung der Objektanzahl hatte (Hurewitz et al., 2006). Allerdings argumentierten die Autoren, dass kontinuierliche Dimensionen (physikalische Größe) einen stärkeren Einfluss auf die Verarbeitung diskreter Dimensionen (Anzahl an Objekten) hätten als umgekehrt. Die vage Formulierung objektiv schwer quantifizierbarer Kriterien, die eine directionale Asymmetrien bedingen sollen, schmälert dennoch deutlich die Vorhersagekraft und damit die potenzielle Falsifizierbarkeit ATOMs.

Vor dem Hintergrund eines bidirektionalen und automatischen Einflusses zwischen Lautheit und numerischen Wert in dieser Arbeit ist außerdem zu klären, warum in einer Zufallszahlengenerierung die Lautheit eines Tones salient sein musste, damit ein Einfluss auf die Generierung des numerischen Wertes auftrat (Heinemann et al., 2013). Dies mag jedoch mit der experimentellen Methodik genannter Studie zusammenhängen. In der Studie von Heinemann et al. (2013) zeigte ein *cue* an, ob entweder die Lautheit oder die Dauer des Tones potenziell aufgabenrelevant war. Zeitliche Dauer stellt ebenfalls eine Größe gemäß ATOM dar (Bueti & Walsh, 2009; Walsh, 2003, 2015). Das bedeutet, dass in Durchgängen in denen Lautheit nicht salient war, stattdessen eine andere Größendimension salient war, die unter Umständen den Einfluss von Lautheit überdeckt haben könnte. Ferner ist das zeitliche Verhältnis zwischen interferierender Dimension und beeinflusster Dimension zu nennen. In der vorliegenden Arbeit wurden Lautheit und numerischer Wert simultan präsentiert. Dagegen mussten die Versuchspersonen bei Heinemann et al. (2013) die Zahl generieren, nachdem der Ton präsentiert worden war. Auch Alards-Tomalain et al. (2015) konnten zeigen, dass eine Zahl keinen Einfluss auf das Lautheitsurteil hat, wenn sie vor dem zu beurteilenden Ton präsentiert wurde und aufgaben-irrelevant war. Somit scheint insbesondere ein zeitlicher Versatz in der Präsentation der interferierenden und beeinflussten Dimension kritisch zu sein und erfordert eine explizite Erhöhung der Salienz der interferierenden Dimension, damit weiterhin ein Einfluss auftritt.

Schließlich soll auf den Einfluss der Distanz auf die Interaktion zwischen Lautheit und numerischen Wert eingegangen werden. Die Größe des *size congruity effects* wird von der numerischen Distanz bzw. physikalischen Differenz der zu vergleichenden Zahlen beeinflusst (Cohen Kadosh, Cohen Kadosh, et al., 2008; Henik & Tzelgov, 1982; Kaufmann et al., 2005; Kochari, 2019; Pinel et al., 2004; Schwarz & Ischebeck, 2003). Sollte die Interaktion zwischen Lautheit und numerischen Wert auf denselben zugrunde liegenden Mechanismen wie der *size congruity effect* basieren, sollte sich ein vergleichbarer Effekt der Distanz auf die Größe der Interaktion zwischen Lautheit und numerischen Wert zeigen. Dies konnte nur stellenweise gezeigt werden und war zudem auf die Dimension Lautheit beschränkt. Gleichzeitig steht die Richtung dieses Einflusses im Einklang mit Befunden bisher Studien (Cohen Kadosh, Cohen Kadosh, et al., 2008; Henik & Tzelgov, 1982; Kaufmann et al., 2005; Kochari, 2019; Pinel et al., 2004; Schwarz & Ischebeck, 2003) sowie den Vorhersagen des *coalescence models* (Schwarz & Ischebeck, 2003). Dies ließe sich dadurch erklären, dass die Interaktion zwischen Lautheit und numerischen Wert zwar auf den

gleichen Mechanismen wie der *size congruity effect* beruht, in Studie 3 jedoch weitere Prozesse involviert waren, welche zusätzlich den Einfluss der Distanz modulierten. So könnte der unterschiedliche Einfluss der Distanz durch unterschiedlich starke interferierende Effekte zwischen den Dimensionen bedingt sein. Damit wäre der inkonsistente Einfluss der Distanz eine differenziertere Form der direktionalen Asymmetrie. Gegen diese Interpretation spricht, dass auch für den *size congruity effect* unterschiedlich starke Einflüsse auftraten (Schwarz & Ischebeck, 2003). Dennoch zeigte sich in besagter Studie ein Einfluss der Distanz beider Dimensionen.

6.3 Lautheit: Eine Größendimension gemäß ATOM

Zusammengefasst zeigen die Befunde der vorliegenden Arbeit, dass für Lautheit beide Vorhersagen - das Auftreten eines SLARC-Effektes sowie Größeninteraktionen - erfüllt sind. Lautheit ist darüber hinaus eine prothetische Dimension (Stevens, 1957; Stevens & Galanter, 1957) und zeigt eine Assoziation mit dem Handlungsparameter Stärke des Tastendrucks (Angel, 1973; Kunde, 2001; Mattes et al., 2002; Miller et al., 1999; Romagnière et al., 1993; Stahl & Rammsayer, 2005), was auf eine potenzielle Handlungsrelevanz hindeutet.

In Hinblick auf die Fragestellung der Dissertation lässt sich postulieren: Die Befunde der vorliegenden Arbeit stehen im Einklang mit der Annahme, dass Lautheit eine Größendimension gemäß ATOM (Walsh, 2003, 2015) ist. Lautheit würde damit eine weitere Reizdimension darstellen, welche auf dem generalisierten Größensystem repräsentiert wird. Dies steht im Gegensatz zu der bisherigen nicht expliziten Nennung Lautheits im Kontext von ATOM (Bueti & Walsh, 2009). Im Gegensatz zum Ausschluss von Tonhöhe als metathetische Dimension (Walsh, 2003, 2015), wird der Ausschluss von Lautheit jedoch nicht begründet und erscheint angesichts des aktuellen Forschungsstandes auch nicht empirisch gerechtfertigt. Der Ausschluss Lautheits ließe sich vor dem Hintergrund der aktuellen Befundlage durch zwei Möglichkeitenerklären: Eine konzeptuelle Änderung ATOMs mit expliziter Beschränkung auf visuelle Größen oder der Nachweis, dass die in dieser Studie untersuchten Effekte eindeutig durch andere Theorien erklärbar sind und damit weiterhin keine eindeutigen Größenindikatoren darstellen.

Das generalisierte Größensystem ATOMs könnte auf die Repräsentation visuell dargestellter Größendimensionen beschränkt sein. Dies wird teilweise durch die angenommene neuronale Repräsentation der Größendimensionen in der IPS (Walsh, 2003) gestützt, da diese primär mit der visuell-räumlichen Verarbeitung assoziiert ist (Colby & Goldberg, 1999; Culham & Kanwisher, 2001). Gleichzeitig hätte dies jedoch Konsequenzen für die Konzeptionslogik von ATOM. Die gleiche Größeninformation lässt sich prinzipiell in unterschiedlichen Modalitäten ausdrücken. Im Falle einer Beschränkung auf die visuelle Modalität müsste daher begründet werden, warum beispielsweise die Dauer eines visuellen Reizes als Größendimension repräsentiert würde, die Dauer eines auditiven Reizes dagegen nicht. Es ließe sich argumentieren, dass Reizdauer modalitätsunabhängig ist. Geht man jedoch davon aus, dass Lautheit

und Helligkeit eine modalitätsunabhängige Intensitätsskala zugrunde liegt (Ellermeier et al., 2021; Heller, 2021; Luce et al., 2010), verhielten sich Lautheit und Helligkeit zu Intensität wie die Dauer eines auditiven und visuellen Reizes zu modalitätsunabhängiger Dauer. Da Helligkeit oder zumindest Helligkeitskontrast jedoch als Größe im Sinne von ATOM angesehen wird (Buetti & Walsh, 2009; Walsh, 2015), würde sich die Frage stellen, warum Lautheit als auditives perzeptuelles Korrelat von Intensität wiederum ausgeschlossen werden müsste. Dies wäre ausgehend von der aktuellen Konzeption ATOMs ebenso wenig gerechtfertigt wie der Ausschluss der Präsentationsdauer eines auditiven Reizes. Dies wäre aber die Konsequenz einer Beschränkung ATOMs auf ausschließlich visuelle Größen. Auch würde die Beschränkung ATOMs auf eine Modalität grundlegend der Annahme eines generalisierten Größensystems widersprechen.

Ebenfalls besteht weiterhin die Möglichkeit, dass der SLARC-Effekt und Größeninteraktionen vollständig durch alternative Theorien erklärbar wären. In diesem Falle wären beide Effekte keine eindeutigen Indikatoren einer Größenrepräsentation von Lautheit. Wenngleich die bereits genannte CMT (Lakoff & Johnson, 2003) in bisherigen Studien nicht als alternative Erklärung des SLARC-Effektes diskutiert wurde, ließe sich der Effekt dennoch durch deren Annahmen erklären. Gemäß CMT werden abstrakte Konzepte auf der konkreten Dimension Raum abgebildet, um die Durchführung mentaler Operationen auf diesen abstrakten Konzepten zu ermöglichen (Lakoff & Johnson, 2003). Demnach sei für das Auftreten der SQUARC-Effekte nicht die räumlich assoziierte Größeninformation entscheidend, sondern die Abbildung der Dimension auf dem Konzept Raum, was eine ordinale Anordnung der Reize und damit einen SQUARC-Effekt zur Folge habe (Casasanto & Pitt, 2019; Pitt & Casasanto, 2022). Allerdings ist die CMT nicht in der Lage, die in dieser Arbeit gefundenen Interaktionen zwischen Lautheit und numerischen Wert zu erklären, da diese Theorie impliziert, dass keine Beeinflussung zwischen den abgebildeten, abstrakten Konzepten auftreten sollte (Winter, Marghetis, et al., 2015). Genau diese konnte jedoch in dieser Arbeit anhand der Interaktion zwischen Lautheit und numerischen Wert gezeigt werden. Die CMT mag daher den in dieser Arbeit gefundenen SLARC-Effekt erklären, scheitert jedoch an der Erklärung der Interaktion zwischen Lautheit und numerischen Wert. Dennoch ließen sich die Befunde aus Studie 3 alternativ zu einer Größenrepräsentation von Lautheit erklären und zwar anhand der Annahme erworbener Assoziationen zwischen unterschiedlichen Größendimensionen (Bonn & Cantlon, 2012; Spence, 2011). ATOM wurde von vornherein als theoretischer Gegenpol zu der Annahme entwickelt, dass den Domänen Zeit, Raum und Quantität jeweils eine eigene Repräsentation zugrunde läge und lediglich Assoziationen zwischen den einzelnen Domänen bestünden (Walsh, 2003). Eine empirische Prüfung dieser Differenzierung blieb jedoch bisher aus, was vor allem dadurch bedingt sein mag, dass ATOM und die Annahme erworbener Assoziationen nahezu die gleichen empirischen Vorhersagen treffen, insbesondere in Bezug auf angenommene Interaktionseffekte zwischen unterschiedlichen Größendimensionen.

Weder CMT noch die Annahme erworbener Assoziationen können ausgehend von bisherigen Befunden vollständig als alternative Erklärung ausgeschlossen werden. Allerdings ermöglicht nur die Kombination beider Ansätze die vollständige Erklärung des Ergebnismusters der vorliegenden Arbeit, wohingegen ATOM von vornherein sowohl die Existenz räumlicher Assoziationen und Größeninteraktionen

vorhersagt und erklärt. Dennoch ist eine fortgeführte Prüfung zur Differenzierung zwischen ATOM und alternativen Theorie weiterhin unabdingbar und wird im Kapitel 6.4 näher skizziert.

Die Annahme einer Größenrepräsentation von Lautheit hätte ferner Konsequenzen in Bezug auf die postulierte Handlungsrelevanz. Handlungen stellen den funktionalen Link des generalisierten Größensystems dar (Walsh, 2003). Zwar konnte bereits eine Vielzahl an Studien eine Assoziation zwischen Lautheit und der Stärke eines Tastendrucks zeigen (Angel, 1973; Kunde, 2001; Mattes et al., 2002; Miller et al., 1999; Romaiguère et al., 1993). Unklar ist jedoch, ob Lautheit der postulierten Handlungsrelevanz gemäß ATOM entspricht. Das generalisierte Größensystem existiere aufgrund der Notwendigkeit, unterschiedliche Größeninformationen der Umwelt (*input*) in ein motorisches Programm (*output*) zu transformieren, um eine Handlung erfolgreich ausführen zu können (Walsh, 2003). Während es ersichtlich ist, inwiefern beispielsweise Objektgröße notwendig ist, um erfolgreich nach einem Objekt zu greifen, so gibt die Lautheit eines Objektes nur bedingt Aufschluss über die notwendigen motorischen Programme, die für eine erfolgreiche Interaktion erforderlich sind. Allerdings kann die Lautheit eines Objektes Aufschluss über seine physikalische Größe geben, da beide Dimensionen in der Umwelt typischerweise miteinander korreliert sind. Dies wiederum mag Einfluss auf die Interaktion mit dem entsprechenden Objekt haben. In die entsprechende Richtung deuten bereits die Ergebnisse von Takeshima und Gyoba (2013), in deren Experimenten Versuchspersonen einen Kreis häufiger als größer klassifizierten, wenn dieser mit einem lauten Ton präsentiert wurde. In einer Reihe von Studien konnte zudem gezeigt werden, dass die Lautheit des Aufpralls eines fallenden Objektes einen systematischen Einfluss auf die Größenschätzung dieses Objektes hatte (Carello et al., 1998; Grassi, 2005; Grassi et al., 2013). Da die Versuchspersonen in besagten Studien ihr Größenurteil jedoch in Form eines numerischen Wertes angeben mussten, ist unklar, ob tatsächlich die Wahrnehmung der Objektgröße durch die Lautheit beeinflusst wurde oder ob es sich um einen Verzerrungseffekt ähnlich wie bei Heinemann et al. (2013) handelte. Die genannten Studien verdeutlichen jedoch, dass eine auditiv kodierte Größeninformation erst dann präsent ist, wenn bereits eine Interaktion mit einem Objekt stattgefunden hat. Jasmin et al. (2019) formulierten diese Beobachtung folgendermaßen:

Unlike visual objects, sounds only exist in our environment because something has happened. That is, sounds are always caused by actions, and when sounds are produced, we hear the properties both of the objects that the sound was made with and the kinds of actions that were made with them. (S. 427)

Lautheit könnte dementsprechend als handlungsrelevant gemäß ATOM interpretiert werden - allerdings nicht als Antezedenz für eine noch auszuführende Handlung, sondern als Konsequenz einer bereits ausgeführten Handlung. Dies würde jedoch eine Erweiterung der ursprünglich angenommenen *input-output* Beziehung zwischen Größeninformationen der Umwelt und motorischen Programmen (Walsh, 2003) erfordern. Geht man davon aus, dass Lautheit als Konsequenz von Handlungen bedeutsam ist und erst nach der Ausgabe der Handlung verfügbar ist, könnte Lautheit einen rückwirkenden Einfluss als *feedback* haben. Im Rahmen dieser Dissertation erfolgte jedoch keine empirische Prüfung dieser Annahme

und auch die Befunde bisheriger Studien stellen keine hinreichende empirische Unterstützung dar. Die Befunde, dass Lautheit einen *response-effect compatibility effect* aufweist (Kunde, 2001) zeigten zwar, dass Versuchspersonen den Ton und seine Eigenschaften antizipieren konnten und sich diese Antizipation auf die auszuführende Handlung auswirkte. Unklar ist jedoch, ob die Lautheit des Tones auch als *feedback* für die Größenwahrnehmung visueller Reize fungiert und darauf aufbauend eine Anpassung der Handlung erfolgt. In diesem Zusammenhang wird auch deutlich, dass die Untersuchung einer Assoziation zwischen Lautheit und Griffweite sinnvoll wäre, da diese tatsächlich eine Handlungsanpassung an die Größe eines Objektes reflektiert. Neben fehlenden empirischen Befunden zur veränderten Rolle der Handlungsrelevanz weist die vorliegende Arbeit weitere Einschränkungen auf, die im Folgenden skizziert werden sollen.

6.4 Limitationen der vorliegenden Arbeit

Nicht in dieser Arbeit erfolgt ist die empirische Prüfung weiterer alternativer Theorien zur Erklärung des SLARC-Effektes und Größeninteraktionen, allen voran der CMT (Lakoff & Johnson, 2003) sowie der Annahme erworbener Assoziationen (Bonn & Cantlon, 2012). Dies wäre jedoch - nicht nur in Bezug auf Lautheit sondern in Bezug auf Größendimensionen generell - notwendig. Daher soll an dieser Stelle auf die Möglichkeiten einer empirischen Differenzierung zwischen ATOM und alternativen Erklärungen eingegangen werden. Als empirische Prüfung, ob SQUARC-Effekte das Ergebnis einer Abbildung gemäß CMT seien, verwendeten Studien die Logik direktonaler Asymmetrie (Janczyk et al., 2023; Richter & Wühr, 2023, 2024). Der SQUARC-Effekt wird als Abbildung der entsprechenden Dimension auf dem konkreten Konzept Raum erklärt. Daher sollte sich ein Effekt zeigen, wenn die Antworten räumlich kodiert sind und auf Reize der abgebildeten Dimension reagiert werden muss. Wenn dagegen die Antworten entsprechend der abgebildeten Dimension kodiert sind und auf räumliche Informationen reagiert werden muss, sollte sich kein Effekt zeigen. Die Anwendung dieser Methode ermöglicht damit eine differenziertere Untersuchung räumlicher Assoziationen. So zeigt sich beispielsweise, dass die Assoziation zwischen physikalischer Größe und Raum nicht direktonal symmetrisch ist (Richter & Wühr, 2023). Eine Anwendung dieser experimentellen Logik auf die Assoziation zwischen Raum und Lautheit wäre wünschenswert, um die in Studie 1 und Studie 2 nachgewiesene räumliche Assoziation näher zu untersuchen.

Weniger eindeutig sind dagegen die empirischen Möglichkeiten in Bezug auf die Differenzierung zwischen ATOM und der Annahme erworbener Assoziationen. Insbesondere die in Studie 3 untersuchte wechselseitige Beeinflussung zwischen Lautheit und numerischen Wert, ließen sich prinzipiell durch beide Theorien erklären. Allerdings unterscheiden sich beide Ansätze in ihrer Vorhersage, ab welchem Zeitpunkt in der Entwicklung Größeninteraktionen beobachtbar sein sollten. Gemäß ATOM liege das generalisierte Größensystem zunächst als undifferenzierte Größeninformation vor (Bueti & Walsh, 2009; Walsh, 2003). Bedeutsam ist hierbei, dass die postulierte monotone Beziehung zwischen Größendimensionen damit von Geburt an vorliegt und damit auch Größeninteraktionen von Geburt an nachweisbar

sein sollten. Demgegenüber stellen erworbene Assoziationen die Internalisierung natürlich auftretender Korrelationen dar, welche in Form einer bedingten Wahrscheinlichkeit repräsentiert würden (Bonn & Cantlon, 2012). Daher sollten Größeninteraktionen erst dann auftreten, wenn die Korrelation durch ausreichende Erfahrung internalisiert wurde. An dieser Stelle soll hervorgehoben werden, dass keine Aussage darüber getroffen wird, ab wann eine Internalisierung der Korrelation stattfindet. Daher erscheint eine unterschiedliche Vorhersage über das Auftreten des Effektes nur für den Zeitpunkt kurz nach der Geburt als aussagekräftig. Untersuchungen mit wenigen Stunden alten Säuglingen (Bonn et al., 2019; De Hevia et al., 2014) deuten an, dass bestimmte Größeninteraktionen bereits ab der Geburt vorliegen. Problem dieser Studien stellt jedoch die Operationalisierung der abhängigen Variable dar, welche in vielen Fällen die Betrachtungszeit in einem Habituationsparadigma ist. Während vereinzelte Studien eine längere Betrachtungsdauer für inkongruente Bedingungen vorhersagen (Bonn et al., 2019; De Hevia et al., 2014), postulieren andere Arbeitsgruppen eine längere Betrachtungsdauer für *kongruente* Bedingungen trotz der gleichen experimentellen Logik (Dolscheid et al., 2014; Fernández-Prieto et al., 2015). Eine empirische Differenzierung zwischen ATOM und erworbenen Assoziationen unabhängig von entwicklungspsychologischen Ansätzen wäre daher weiterhin notwendig.

Ebenfalls soll auf methodische Einschränkungen der experimentellen Arbeiten der Dissertation eingegangen werden. In allen drei Studien war die primäre abhängige Variable die Reaktionszeit und es wurden ausschließlich behaviorale Effekte untersucht. In der Konzeption ATOMs stellen jedoch Befundmuster neuropsychologischer Untersuchungen sowie Befunde aus bildgebenden Verfahren eine wichtige empirische Grundlage dar (Walsh, 2003, 2015). Die Bedeutung neurowissenschaftlicher Erkenntnisse für ATOM zeigt sich nicht zuletzt in der postulierten neuronalen Implementierung eines generalisierten Größensystems in der IPS (Buetti & Walsh, 2009). Weiterführende Untersuchungen in Bezug auf die Größenrepräsentation von Lautheit sollten daher ihren Fokus auf den Aspekt der neuronalen Repräsentation richten. Am offensichtlichsten ist hierbei die explizite Prüfung, inwiefern die Verarbeitung von Lautheit als Größeninformation mit einer Aktivierung der IPS assoziiert ist, da die Befundlage dazu wenig umfangreich ist (Rinne et al., 2007).

In Bezug auf die Untersuchung einer potenziellen Größeninteraktion wurde sich auf das Dimensionspaar Lautheit und numerischer Wert beschränkt. Die Verwendung von Zahlen ermöglichte die Untersuchung mit einer symbolisch kodierten Größeninformation. Dadurch konnte ein wechselseitiger Einfluss für das gefundene Reizmaterial tatsächlich auf die zugrunde liegende Größeninformation zurückgeführt werden und nicht auf die natürlich auftretende Korrelation zwischen beispielsweise beide Lautheit und Objektgröße. Dennoch sollten zur Generalisierung der Befunde aus Studie 3 die Untersuchung auf andere Größendimensionen ausgeweitet werden. Da der Zusammenhang zwischen Lautheit und Objektgröße bisher in *matching*-Aufgaben (Smith & Sera, 1992) oder psychophysikalischen Wahrnehmungsexperimenten (Sutherland et al., 2014; Takeshima & Gyoba, 2013) untersucht wurde, wäre von besonderem Interesse, ob sich eine Interaktion für dieses Dimensionspaar auch in reaktionszeitbasierten Experimenten zeigt. Ebenfalls sollte untersucht werden, ob sich eine Interaktion

zwischen Lautheit und nicht-symbolischer Numerosität zeigt, da für dieses Dimensionspaar zum jetzigen Zeitpunkt keinerlei Befunde vorliegen, nicht-symbolische Numerosität jedoch ebenfalls mit etablierten Größendimensionen interagiert (Dormal et al., 2006; Dormal & Pesenti, 2007; Lourenco & Aulet, 2019; Xuan et al., 2007). Nicht-symbolische Numerosität ist auch dahingehend eine relevante Dimension, da sie eine diskrete Dimension darstellt (Hurewitz et al., 2006), Lautheit dagegen eine kontinuierliche Dimension. Gemäß Hurewitz et al. (2006) hätten kontinuierliche Dimensionen einen stärkeren Einfluss auf die Verarbeitung diskreter Dimensionen. In Studie 3 wurden Unterschiede in der Interferenzstärke als möglicher Grund für den inkonsistenten Einfluss der Distanz genannt. Die Untersuchung der Interaktion zwischen Lautheit und nicht-symbolischer Numerosität als kontinuierliche und diskrete Dimension würde von vornherein einen directionalen, asymmetrischen Einfluss vorhersagen und damit eine empirische Prüfung des Einflusses der Interferenzstärke auf den Effekt der Distanz ermöglichen.

Schließlich wurden in der vorliegenden Arbeit ausschließlich statische Reize verwendet, d. h. Reize die für Dauer eines Durchgangs unverändert blieben. Demgegenüber stehen dynamische Reize, deren Ausprägung sich kontinuierlich verändert, beispielsweise ein Ton der kontinuierlich lauter oder leiser wird. Sutherland et al. (2014) konnten zeigen, dass die Präsentation eines Tones mit kontinuierlich zunehmender Lautheit einen stärkeren Einfluss auf die Wahrnehmung von Objektgröße und Helligkeit hatte, als ein statisch lauter Ton. Ferner scheinen bestimmte Assoziationen zwischen Reizdimensionen von dem Dynamikstatus der präsentierten Reize abzuhängen (Eitan et al., 2014). In dieser Studie zeigte sich in einer *Garner interference task* für Töne mit statischer Frequenz und statischer Kreisgröße ein Kongruenzeffekt, der der bekannten cross-modalen Korrespondenz entsprach, gemäß derer kleine Objekte mit hohen Tönen und große Objekte mit tiefen Frequenzen assoziiert seien (Parise & Spence, 2009; Spence, 2011, 2019). Wurden stattdessen Töne mit ansteigender oder absteigender Tonhöhe sowie zunehmende und abnehmende Kreise präsentiert, kehrte sich die Assoziationsrichtung um: Aufsteigende Frequenzen waren mit zunehmenden Kreisen assoziiert, wohingegen absteigende Frequenzen mit abnehmenden Kreisen assoziiert waren (Eitan et al., 2014).

6.5 Ausblick auf zukünftige Forschungsrichtungen

6.5.1 Tonhöhe im Kontext von Größenrepräsentationen

Die Interpretation Lautheits als Größendimension gemäß ATOM impliziert, dass auditive Dimensionen prinzipiell in das generalisierte Größensystem integrierbar sind. Tonhöhe wurde als metathetische Dimension von vornherein aus der Konzeption ATOMs ausgeschlossen (Walsh, 2003, 2015). Wie jedoch in der Einleitung bereits skizziert, erfüllt selbst Tonhöhe einige der seitens ATOM geforderten Größenkriterien wie eine Aktivierung der IPS (Foster et al., 2013; Foster & Zatorre, 2010; Schwenzer & Mathiak, 2011) oder Handlungsrelevanz (Rinaldi et al., 2016). Einschränkend in Bezug auf letztere Studie ist zu erwähnen, dass die untersuchte Handlungsassoziation in ihrer Richtung der cross-modalen Korrespondenz zwischen Tonhöhe und Objektgröße entsprach (Evans & Treisman, 2011; Spence, 2011,

2019).

Aber auch in Bezug auf die seitens ATOM postulierten empirischen Vorhersagen sprechen die Befunde nicht eindeutig gegen eine potenzielle Größenrepräsentation von Tonhöhe. Der SPARC-Effekt, welcher eine räumliche Assoziation von Tonhöhe anzeigt, ist ein robuster Effekt der in vorherigen Studien (Lega et al., 2020; Lidji et al., 2007; Pitteri et al., 2017; Rusconi et al., 2006) sowie in Studie 2 der vorliegenden Arbeit nachgewiesen werden konnte. Ebenfalls deuteten die Befunde aus Studie 2 jedoch darauf hin, dass dem SPARC-Effekt und SLARC-Effekt unterschiedliche Repräsentationssystem zugrunde liegen. Die Annahme einer separaten räumlichen Repräsentation von Tonhöhe erklärt jedoch nicht das Auftreten von spezifischen Interaktionen zwischen Tonhöhe und numerischen Wert, welche gegensätzlich zu den erwarteten Ergebnismustern einer angenommenen cross-modalen Korrespondenz stehen. So konnten Oriet et al. (2005) in einem Doppelaufgabenparadigma einen *backward cross-talk compatibility effect* zwischen Tonhöhe und Zahlen zeigen, welcher darauf hindeutet, dass numerisch kleine Zahlen und tiefe Töne, sowie numerisch große Zahlen und hohe Töne assoziiert sind. Diese Assoziation verhielt sich damit gegenläufig zu der Assoziationsrichtung zwischen Tonhöhe und Objektgröße, welche jedoch in einer Vielzahl unterschiedlicher Paradigmen nachgewiesen werden konnte (Evans & Treisman, 2011; Gallace & Spence, 2006; Parise & Spence, 2009; Spence, 2011, 2019). Dies wiederum wirft die Frage auf, ob die Größendimensionen Objektgröße und numerischer Wert unterschiedliche Assoziationen zu Tonhöhe aufweisen. An dieser Stelle sei allerdings deutlich hervorgehoben, dass die empirische Befundlage zu Assoziationen zwischen numerischen Wert und Tonhöhe sehr rar und darüber hinaus inkonsistent ist. So konnte in einer späteren Studie mit gesprochenen Zahlwörtern unterschiedlicher Frequenzen und numerischen Werten keine Assoziation zwischen Frequenz- und Zahlenfolgen gezeigt werden (Campbell & Scheepers, 2015).

Anbetracht der Tatsache, dass Tonhöhe eine Reihe von ATOM geforderten Kriterien erfüllt, stellt sich dennoch die Frage nach der Legitimität des Ausschlusses anhand der Klassifikation als metathetische Dimension gemäß Stevens (Stevens, 1957; Stevens & Galanter, 1957). Wie bereits in Kapitel 3.2 dargestellt, entspricht eine Definition von Tonhöhe (Moore, 2012) der formalen Definition quantitativer Dimensionen (Smith & Sera, 1992). Zwar entsprechen etablierte Modelle zur mentalen Repräsentation von Tonhöhe, die eine Helixstruktur annehmen (Shepard, 1982; Ueda & Ohgushi, 1987) nicht der geforderten linearen Syntax und eindimensionalen Struktur quantitativer Dimensionen (Smith & Sera, 1992). Allerdings wird in diesem Modell explizit zwischen *pitch height* und *pitch chroma* unterschieden, wobei *pitch height* als lineare Dimension interpretierbar ist. Die Fokussierung ATOMs auf prothetische Dimensionen lässt sich damit begründen, dass eine Größenrepräsentation auch nur die Repräsentation quantitativer Dimensionen umfassen sollte. Die Frage ist jedoch, ob anstelle der Distinktion zwischen prothetischen und metathetischen Dimensionen nach Stevens (Stevens, 1957) nicht die psychologische Wahrnehmung als quantitative Dimension entscheidend sein sollte. Wie bereits Bonn und Cantlon (2012) anmerkten, könne der Unterschied zwischen Frequenzen als Mengenunterschied interpretiert werden. Für diese Behauptung gibt es bis dato keine direkten empirischen Belege. Allerdings deuten z. B. die Befunde von Cohen Kadosh, Brodsky, et al. (2008) daraufhin, dass der Einfluss der absoluten Distanz - und

nicht mehr *pitch chroma* - in einer direkten Tonhöhenklassifikation für die psychologische Ähnlichkeit entscheidend ist, da sich in dieser Aufgabe ein klassischer Distanzeffekt zeigt.

Dies verdeutlicht, dass die Befundmuster sowie theoretischen Annahmen zu Tonhöhe komplex sind und ein Ausschluss von Tonhöhe trotz der Klassifikation als metathetische Dimension unter Umständen nicht gerechtfertigt ist. Bevor jedoch eine Aussage zur Bedeutung von Tonhöhe für ATOM bzw. Größenrepräsentationen generell getroffen werden kann, ist eine weitere Absicherung der empirischen Befunde, welche für eine Repräsentation von Tonhöhe als Größe sprechen erforderlich, insbesondere bezüglich der Assoziation zwischen Tonhöhe und numerischen Wert.

6.5.2 Zur Zukunft eines generalisierten Größensystems

Schließlich soll im letzten Abschnitt auf konzeptuelle Schwächen ATOMs eingegangen werden. Dies betrifft insbesondere die mangelnde Spezifikation und Formalisierung bestimmter Annahmen und eine daraus resultierende geringe Vorhersagekraft. Bereits in der Einleitung wurde dargestellt, dass der SQUARC-Effekt zwar eine Generalisierung des SNARC-Effektes (Dehaene et al., 1993) darstellt, jedoch unklar ist, inwiefern Annahmen über die zugrundeliegende Struktur der Repräsentation des SNARC-Effektes übernommen wurden. Insbesondere stellt sich die Frage, ob dem SQUARC-Effekt eine räumliche Repräsentation der Größeninformation zugrunde liegt, analog zu der Annahme, dass der SNARC-Effekt das Resultat einer räumlichen Repräsentation von Zahlen in Form eines mentalen Zahlenstrahls sei (Dehaene, 2003, 2007; Feigenson et al., 2004). Wenngleich Walsh ausschließlich von räumlichen Assoziationen spricht (Buetti & Walsh, 2009; Walsh, 2003, 2015), greifen spätere Studien die Idee eines mentalen Größenstrahls auf (Holmes & Lourenco, 2011), auf dem kleine Quantitäten links und große Quantitäten rechts abgebildet würden. Die Annahme einer räumlichen Repräsentation von Größen würde auch die berechtigte Kritik adressieren, dass der SQUARC-Effekt nicht das Ergebnis einer monotonen Beziehung zwischen Größendimensionen und räumlicher Position sein könne, da diese metathetisch sei (Casasanto & Pitt, 2019; Pitt & Casasanto, 2022). Im Falle eines mentalen Größenstrahls wäre der SQUARC-Effekt eine Folge der räumlichen Repräsentation und damit der räumlichen Struktur der gemeinsamen Größenrepräsentation.

Ebenfalls bleibt die Frage offen, wie die Repräsentation von Größeninformationen unterschiedlicher Dimensionen erfolgt, wenn diese gleichzeitig im Größensystem repräsentiert werden müssen. Dass Größeninformationen unterschiedlicher Dimensionen simultan repräsentiert werden müssen, ergibt sich aus der Beobachtung, dass sich Größendimensionen in ihrer Verarbeitung beeinflussen. Die Frage ist jedoch, wie genau die simultane Repräsentation erfolgt. So kritisierten bereits Van Opstal und Verguts (2013), dass die Annahme der Abbildung unterschiedlicher Größen auf einer gemeinsamen Metrik einheitliche Skalierungsfaktoren zwischen unterschiedlichen Größendimensionen erfordert. Wenngleich vereinzelte Studien für spezifische Reizpaare einen Skalierungsfaktor zeigen konnten (z. B. Meck & Church, 1983), ist die Befundlage nicht eindeutig. Ferner würde selbst ein Skalierungsfaktor nicht darüber Aufschluss geben, wie am Ende die gemeinsame Repräsentation strukturell erfolgt.

Ebenfalls offen ist die Frage, welche Mechanismen dafür verantwortlich sind, dass es von einer gemeinsamen Repräsentation zu Effekten auf behavioraler Ebene kommt. Ein erster Ansatz um sich dieser Frage anzunähern, mag eine formale Modellierung angenommener Mechanismen in Form von computationalen Modellen sein. Dies wurde für den *size congruity effect* durch das *coalescence model* (Schwarz & Ischebeck, 2003) bereits adressiert. Wenngleich nicht alle Vorhersagen des Modells in Studie 3 erfüllt wurden, könnte die Klasse des *random walk model* bzw. *drift diffusion model* (Ratcliff et al., 2016; Ratcliff & McKoon, 2008) einen guten Ausgangspunkt für die formale Beschreibung eines Mechanismus zur Erklärung von Größeninteraktionen in binären Klassifikationsaufgaben bilden. Einschränkend sei erwähnt, dass *drift diffusion models* nicht als Beschreibung für alle Formen an Größeninteraktionen dienen können, wie beispielsweise Wahrnehmungsverzerrungen, die primär anhand der Qualität der Antwort erfasst werden (Alards-Tomalin et al., 2015, 2017; Sutherland et al., 2014; Takeshima & Gyoba, 2013). Für diese Art von Effekten müssten andere Modellierungen der angenommenen Mechanismen herangezogen werden.

7 Fazit

Die vorliegende Arbeit ging der Frage nach, ob Lautheit eine Größendimension gemäß ATOM (Walsh, 2003) ist. Eine integrierende Betrachtung der Befunde der experimentellen Untersuchungen legt nahe, dass für Lautheit ein SQUARC-Effekt auftritt, der im Einklang mit den Vorhersagen eines räumlich assoziierten Größensystems steht und dass Lautheit in einer wechselseitigen Beeinflussung mit der numerischen Größe einer Zahl steht, die modalitätsunabhängig auftritt. Diese Befunde unterstützen damit die Annahme, dass Lautheit als Größendimension auf dem generalisierten Größensystem gemäß ATOM repräsentiert wird.

Die Aufnahme Lautheits als weitere Größendimension und damit auch die explizite Erweiterung des generalisierten Größensystems auf die auditive Modalität hat Konsequenzen für die theoretische Entwicklung der Theorie. Dies betrifft insbesondere die angenommene Handlungsrelevanz für Größendimensionen und wie diese für Lautheit als auditive Dimension realisiert sein könnte. Auch stellt sich in Anbetracht der empirischen Befundlage für Tonhöhe die Frage, wie sich die Rolle dieser auditiven Dimension für eine angenommene Größenrepräsentation verhält. Für die zukünftige Entwicklung ATOMs in Bezug auf diese Punkte sollte gleichzeitig eine stärkere Formalisierung der Theorie angestrebt werden.

Literaturverzeichnis

- Agrillo, C., Ranpura, A., & Butterworth, B. (2010). Time and numerosity estimation are independent: Behavioral evidence for two different systems using a conflict paradigm. *Cognitive Neuroscience*, 1(2), 96–101. <https://doi.org/10.1080/17588921003632537>
- Alards-Tomalin, D., Leboe-McGowan, J. P., Shaw, J. D. M., & Leboe-McGowan, L. C. (2014). The effects of numerical magnitude, size, and color saturation on perceived interval duration. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 40(2), 555–566. <https://doi.org/10.1037/a0035031>
- Alards-Tomalin, D., Walker, A. C., Nepon, H., & Leboe-McGowan, L. C. (2017). Dual-task interference effects on cross-modal numerical order and sound intensity judgments: The more the louder? *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 70(9), 1943–1963. <https://doi.org/10.1080/17470218.2016.1216139>
- Alards-Tomalin, D., Walker, A. C., Shaw, J. D. M., & Leboe-McGowan, L. C. (2015). Is 9 louder than 1? Audiovisual cross-modal interactions between number magnitude and judged sound loudness. *Acta Psychologica*, 160, 95–103. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2015.07.004>
- Aleotti, S., Massaccesi, S., & Priftis, K. (2023). The SNARC effect: a preregistered study on the interaction of horizontal, vertical, and sagittal spatial–numerical associations. *Psychological Research*, 87(4), 1256–1266. <https://doi.org/10.1007/s00426-022-01721-8>
- Algom, D., Dekel, A., & Pansky, A. (1996). The perception of number from the separability of the stimulus: The Stroop effect revisited. *Memory & Cognition*, 24(5), 557–572. <https://doi.org/10.3758/BF03201083>
- Andres, M., Ostry, D., Nicol, F., & Paus, T. (2008). Time course of number magnitude interference during grasping. *Cortex*, 44(4), 414–419. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2007.08.007>
- Angel, A. (1973). Input-output relations in simple reaction time experiments. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 25(2), 193–200. <https://doi.org/10.1080/14640747308400338>
- Arend, I., & Henik, A. (2015). Choosing the larger versus choosing the smaller: Asymmetries in the size congruity effect. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 41(6), 1821–1830. <https://doi.org/10.1037/xlm0000135>
- Badets, A., Andres, M., Di Luca, S., & Pesenti, M. (2007). Number magnitude potentiates action judgements. *Experimental Brain Research*, 180(3), 525–534. <https://doi.org/10.1007/s00221-007->

0870-y

- Beldzik, E., Domagalik, A., Gawłowska, M., Marek, T., & Mojsa-Kaja, J. (2018). When three is greater than five: EEG and fMRI signatures of errors in numerical and physical comparisons. *Brain Structure and Function*, 223(2), 805–818. <https://doi.org/10.1007/s00429-017-1527-7>
- Bilecen, D., Seifritz, E., Scheffler, K., Henning, J., & Schulte, A.-C. (2002). Amplitude of the human auditory cortex: An fMRI study. *NeuroImage*, 17(2), 710–718. <https://doi.org/10.1006/nimg.2002.1133>
- Birngruber, T., & Ulrich, R. (2019). Perceived duration increases not only with physical, but also with implicit size. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 45(6), 969–979. <https://doi.org/10.1037/xlm0000628>
- Bonn, C. D., & Cantlon, J. F. (2012). The origins and structure of quantitative concepts. *Cognitive Neuropsychology*, 29(1-2), 149–173. <https://doi.org/10.1080/02643294.2012.707122>
- Bonn, C. D., Netskou, M.-E., Streri, A., & De Hevia, M. D. (2019). The association of brightness with number/duration in human newborns. *PLOS ONE*, 14(10), e0223192. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0223192>
- Bottini, R., & Casasanto, D. (2013). Space and time in the child's mind: Metaphoric or ATOMIC? *Frontiers in Psychology*, 4. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00803>
- Brannon, E. M. (2006). The representation of numerical magnitude. *Current Opinion in Neurobiology*, 16(2), 222–229. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2006.03.002>
- Bruzzi, E., Talamini, F., Priftis, K., & Grassi, M. (2017). A SMARC effect for loudness. *I-Perception*, 8(6), Article 204166951774217. <https://doi.org/10.1177/2041669517742175>
- Bueti, D., & Walsh, V. (2009). The parietal cortex and the representation of time, space, number and other magnitudes. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1525), 1831–1840. <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0028>
- Campbell, J. I. D., & Scheepers, F. (2015). Effects of pitch on auditory number comparisons. *Psychological Research*, 79(3), 389–400. <https://doi.org/10.1007/s00426-014-0571-7>
- Cappelletti, M., Muggleton, N., & Walsh, V. (2009). Quantity without numbers and numbers without quantity in the parietal cortex. *NeuroImage*, 46(2), 522–529. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.02.016>
- Carello, C., Anderson, K. L., & Kunkler-Peck, A. J. (1998). Perception of object length by sound. *Psychological Science*, 9(3), 211–214. <https://doi.org/10.1111/1467-9280.00040>
- Casasanto, D. (2008). Similarity and proximity: When does close in space mean close in mind? *Memory & Cognition*, 36(6), 1047–1056. <https://doi.org/10.3758/MC.36.6.1047>
- Casasanto, D., & Pitt, B. (2019). The faulty magnitude detector: Why SNARC-like tasks cannot support a generalized magnitude system. *Cognitive Science*, 43(10), Article e12794. <https://doi.org/10.1111/cogs.12794>
- Chang, A. Y.-C., Tzeng, O. J. L., Hung, D. L., & Wu, D. H. (2011). Big time is not always long:

- Numerical magnitude automatically affects time reproduction. *Psychological Science*, 22(12), 1567–1573. <https://doi.org/10.1177/0956797611418837>
- Chang, S., & Cho, Y. S. (2015). Polarity correspondence effect between loudness and lateralized response set. *Frontiers in Psychology*, 06, Article 683. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00683>
- Cho, Y. S., Bae, G. Y., & Proctor, R. W. (2012). Referential coding contributes to the horizontal SMARC effect. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 38(3), 726–734. <https://doi.org/10.1037/a0026157>
- Cipora, K., Soltanlou, M., Reips, U.-D., & Nuerk, H.-C. (2019). The SNARC and MARC effects measured online: Large-scale assessment methods in flexible cognitive effects. *Behavior Research Methods*, 51(4), 1676–1692. <https://doi.org/10.3758/s13428-019-01213-5>
- Cleland, A. A., & Bull, R. (2019). Automaticity of access to numerical magnitude and its spatial associations: The role of task and number representation. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 45(2), 333–348. <https://doi.org/10.1037/xlm0000590>
- Cleland, A. A., Corsico, K., White, K., & Bull, R. (2020). Non-symbolic numerosities do not automatically activate spatial-numerical associations: Evidence from the SNARC effect. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 73(2), 295–308. <https://doi.org/10.1177/1747021819875021>
- Cohen Kadosh, R., Brodsky, W., Levin, M., & Henik, A. (2008). Mental representation: What can pitch tell us about the distance effect? *Cortex*, 44(4), 470–477. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2007.08.002>
- Cohen Kadosh, R., Cohen Kadosh, K., & Henik, A. (2008). When brightness counts: The neuronal correlate of numerical-luminance interference. *Cerebral Cortex*, 18(2), 337–343. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhm058>
- Cohen Kadosh, R., & Henik, A. (2006). A common representation for semantic and physical properties: A cognitive-anatomical approach. *Experimental Psychology*, 53(2), 87–94. <https://doi.org/10.1027/1618-3169.53.2.87>
- Cohen Kadosh, R., Henik, A., & Rubinsten, O. (2008). Are Arabic and verbal numbers processed in different ways? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 34(6), 1377–1391. <https://doi.org/10.1037/a0013413>
- Cohen Kadosh, R., Henik, A., Rubinsten, O., Mohr, H., Dori, H., Ven, V. van de, Zorzi, M., Hendler, T., Goebel, R., & Linden, D. E. J. (2005). Are numbers special?: The comparison systems of the human brain investigated by fMRI. *Neuropsychologia*, 43(9), 1238–1248. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2004.12.017>
- Cohen Kadosh, R., Lammertyn, J., & Izard, V. (2008). Are numbers special? An overview of chronometric, neuroimaging, developmental and comparative studies of magnitude representation. *Progress in Neurobiology*, 84(2), 132–147. <https://doi.org/10.1016/j.pneurobio.2007.11.001>
- Cohen Kadosh, R., & Walsh, V. (2009). Numerical representation in the parietal lobes: Abstract or not abstract? *Behavioral and Brain Sciences*, 32(3-4), 313–328. <https://doi.org/10.1017/S0140525X09990938>

- Colby, C. L., & Goldberg, M. E. (1999). Space and attention in parietal cortex. *Annual Review of Neuroscience*, 22(1), 319–349. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.22.1.319>
- Cordes, S., Williams, C. L., & Meck, W. H. (2007). Common representations of abstract quantities. *Current Directions in Psychological Science*, 16(3), 156–161. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8721.2007.00495.x>
- Culham, J. C., & Kanwisher, N. G. (2001). Neuroimaging of cognitive functions in human parietal cortex. *Current Opinion in Neurobiology*, 11(2), 157–163. [https://doi.org/10.1016/S0959-4388\(00\)00191-4](https://doi.org/10.1016/S0959-4388(00)00191-4)
- De Hevia, M. D., Izard, V., Coubart, A., Spelke, E. S., & Streri, A. (2014). Representations of space, time, and number in neonates. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(13), 4809–4813. <https://doi.org/10.1073/pnas.1323628111>
- Dehaene, S. (1992). Varieties of numerical abilities. *Cognition*, 44(1-2), 1–42. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(92\)90049-N](https://doi.org/10.1016/0010-0277(92)90049-N)
- Dehaene, S. (2003). The neural basis of the Weber–Fechner law: a logarithmic mental number line. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(4), 145–147. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(03\)00055-X](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(03)00055-X)
- Dehaene, S. (2007). Symbols and quantities in parietal cortex: Elements of a mathematical theory of number representation and manipulation. In P. Haggard, Y. Rossetti, & M. Kawato (Eds.), *Sensorimotor foundations of higher cognition* (pp. 527–574). Harvard University Press.
- Dehaene, S. (2011). *The number sense: How the mind creates mathematics* (Rev. and updated ed). Oxford University Press.
- Dehaene, S., Bossini, S., & Giraux, P. (1993). The mental representation of parity and number magnitude. *Journal of Experimental Psychology: General*, 122(3), 371–396. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.122.3.371>
- Dehaene, S., Piazza, M., Pinel, P., & Cohen, L. (2003). Three parietal circuits for number processing. *Cognitive Neuropsychology*, 20(3), 487–506. <https://doi.org/10.1080/02643290244000239>
- Didino, D., Breil, C., & Knops, A. (2019). The influence of semantic processing and response latency on the SNARC effect. *Acta Psychologica*, 196, 75–86. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2019.04.008>
- Dolscheid, S., Hunnius, S., Casasanto, D., & Majid, A. (2014). Prelinguistic infants are sensitive to space–pitch associations found across cultures. *Psychological Science*, 25(6), 1256–1261. <https://doi.org/10.1177/0956797614528521>
- Dormal, V., & Pesenti, M. (2007). Numerosity–length interference: A Stroop experiment. *Experimental Psychology*, 54(4), 289–297. <https://doi.org/10.1027/1618-3169.54.4.289>
- Dormal, V., Seron, X., & Pesenti, M. (2006). Numerosity–duration interference: A Stroop experiment. *Acta Psychologica*, 121(2), 109–124. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2005.06.003>
- Eitan, Z., Schupak, A., Gotler, A., & Marks, L. E. (2014). Lower pitch is larger, yet falling pitches shrink: Interaction of pitch change and size change in speeded discrimination. *Experimental Psychology*, 61(4), 273–284. <https://doi.org/10.1027/1618-3169/a000246>
- Ellermeier, W., Kattner, F., & Raum, A. (2021). Cross-modal commutativity of magnitude productions

- of loudness and brightness. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 83(7), 2955–2967. <https://doi.org/10.3758/s13414-021-02324-y>
- Evans, K. K., & Treisman, A. (2011). Natural cross-modal mappings between visual and auditory features. *Journal of Vision*, 10(1), 6–6. <https://doi.org/10.1167/10.1.6>
- Fairhurst, M. T., & Deroy, O. (2017). Testing the shared spatial representation of magnitude of auditory and visual intensity. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 43(3), 629–637. <https://doi.org/10.1037/xhp0000332>
- Feigenson, L., Dehaene, S., & Spelke, E. (2004). Core systems of number. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(7), 307–314. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2004.05.002>
- Fernandez-Prieto, I., Spence, C., Pons, F., & Navarra, J. (2017). Does language influence the vertical representation of auditory pitch and loudness? *I-Perception*, 8(3), Article 204166951771618. <https://doi.org/10.1177/2041669517716183>
- Fernández-Prieto, I., Navarra, J., & Pons, F. (2015). How big is this sound? Crossmodal association between pitch and size in infants. *Infant Behavior and Development*, 38, 77–81. <https://doi.org/10.1016/j.infbeh.2014.12.008>
- Fias, W. (2001). Two routes for the processing of verbal numbers: Evidence from the SNARC effect. *Psychological Research*, 65(4), 250–259. <https://doi.org/10.1007/s004260100065>
- Fias, W., Brysbaert, M., Geypens, F., & d'Ydewalle, G. (1996). The importance of magnitude information in numerical processing: Evidence from the SNARC effect. *Mathematical Cognition*, 2(1), 95–110. <https://doi.org/10.1080/135467996387552>
- Fias, W., & Van Dijck, J.-P. (2016). The temporary nature of number—space interactions. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue Canadienne de Psychologie Expérimentale*, 70(1), 33–40. <https://doi.org/10.1037/cep0000071>
- Fletcher, H., & Munson, W. A. (1933). Loudness, its definition, measurement and calculation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 5(2), 82–108. <https://doi.org/10.1121/1.1915637>
- Florentine, M. (2011). Loudness. In M. Florentine, A. N. Popper, & R. R. Fay (Eds.), *Loudness* (Vol. 37, pp. 1–15). Springer New York.
- Foltz, G. S., Poltrock, S. E., & Potts, G. R. (1984). Mental comparison of size and magnitude: Size congruity effects. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 10(3), 442–453. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.10.3.442>
- Foster, N. E. V., Halpern, A. R., & Zatorre, R. J. (2013). Common parietal activation in musical mental transformations across pitch and time. *NeuroImage*, 75, 27–35. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.02.044>
- Foster, N. E. V., & Zatorre, R. J. (2010). A role for the intraparietal sulcus in transforming musical pitch information. *Cerebral Cortex*, 20(6), 1350–1359. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhp199>
- Fumarola, A., Prpic, V., Da Pos, O., Murgia, M., Umiltà, C., & Agostini, T. (2014). Automatic spatial association for luminance. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 76(3), 759–765. <https://doi.org/>

- 10.3758/s13414-013-0614-y
- Gallace, A., & Spence, C. (2006). Multisensory synesthetic interactions in the speeded classification of visual size. *Perception & Psychophysics*, 68(7), 1191–1203. <https://doi.org/10.3758/BF03193720>
- Gebuis, T., & Smagt, M. J. van der. (2011). Incongruence in number–luminance congruency effects. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 73(1), 259–265. <https://doi.org/10.3758/s13414-010-0002-9>
- Gevers, W., Lammertyn, J., Notebaert, W., Verguts, T., & Fias, W. (2006). Automatic response activation of implicit spatial information: Evidence from the SNARC effect. *Acta Psychologica*, 122(3), 221–233. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2005.11.004>
- Gevers, W., Reynvoet, B., & Fias, W. (2003). The mental representation of ordinal sequences is spatially organized. *Cognition*, 87(3), B87–B95. [https://doi.org/10.1016/S0010-0277\(02\)00234-2](https://doi.org/10.1016/S0010-0277(02)00234-2)
- Grassi, M. (2005). Do we hear size or sound? Balls dropped on plates. *Perception & Psychophysics*, 67(2), 274–284. <https://doi.org/10.3758/BF03206491>
- Grassi, M., Pastore, M., & Lemaitre, G. (2013). Looking at the world with your ears: How do we get the size of an object from its sound? *Acta Psychologica*, 143(1), 96–104. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2013.02.005>
- Greenwald, A. G. (1970). Sensory feedback mechanisms in performance control: With special reference to the ideo-motor mechanism. *Psychological Review*, 77(2), 73–99. <https://doi.org/10.1037/h0028689>
- Griffiths, T. D. (2003). Functional imaging of pitch analysis. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 999(1), 40–49. <https://doi.org/10.1196/annals.1284.004>
- Griffiths, T. D., & Hall, D. A. (2012). Mapping pitch representation in neural ensembles with fMRI. *The Journal of Neuroscience*, 32(39), 13343–13347. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3813-12.2012>
- Guilbert, A. (2020). About the existence of a horizontal mental pitch line in non-musicians. *Laterality*, 25(2), 215–228. <https://doi.org/10.1080/1357650X.2019.1646756>
- Hart, H. C., Palmer, A. R., & Hall, D. A. (2002). Heschl's gyrus is more sensitive to tone level than non-primary auditory cortex. *Hearing Research*, 171(1-2), 177–190. [https://doi.org/10.1016/S0378-5955\(02\)00498-7](https://doi.org/10.1016/S0378-5955(02)00498-7)
- Hartmann, M., & Mast, F. W. (2017). Loudness counts: Interactions between loudness, number magnitude, and space. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 70(7), 1305–1322. <https://doi.org/10.1080/17470218.2016.1182194>
- Heinemann, A., Pfister, R., & Janczyk, M. (2013). Manipulating number generation: Loud+long=large? *Consciousness and Cognition*, 22(4), 1332–1339. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2013.08.014>
- Heller, J. (2021). Internal references in cross-modal judgments: A global psychophysical perspective. *Psychological Review*, 128(3), 509–524. <https://doi.org/10.1037/rev0000280>
- Henik, A., & Tzelgov, J. (1982). Is three greater than five: The relation between physical and semantic size in comparison tasks. *Memory & Cognition*, 10(4), 389–395. <https://doi.org/10.3758/BF03202431>
- Hermes, D. J. (2023). *The Perceptual Structure of Sound* (Vol. 11). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-25566-3>

- Holmes, K. J., & Lourenco, S. F. (2011). Common spatial organization of number and emotional expression: A mental magnitude line. *Brain and Cognition*, 77(2), 315–323. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2011.07.002>
- Huber, S., Klein, E., Moeller, K., & Willmes, K. (2016). Spatial-numerical and ordinal positional associations coexist in parallel. *Frontiers in Psychology*, 7. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00438>
- Hurewitz, F., Gelman, R., & Schnitzer, B. (2006). Sometimes area counts more than number. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(51), 19599–19604. <https://doi.org/10.1073/pnas.0609485103>
- International Organization for Standardization. (2003). *Acoustics — normal equal-loudness-level contours*. (ISO Standard No. 226:2003). <https://doi.org/https://www.iso.org/standard/34222.html>
- Ito, Y., & Hatta, T. (2004). Spatial structure of quantitative representation of numbers: Evidence from the SNARC effect. *Memory & Cognition*, 32(4), 662–673. <https://doi.org/10.3758/BF03195857>
- Janczyk, M., Koch, I., & Ulrich, R. (2023). Is there a cognitive link between the domains of deictic time and number? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 49(3), 493–507. <https://doi.org/10.1037/xlm0001162>
- Jasmin, K., Lima, C. F., & Scott, S. K. (2019). Understanding rostral-caudal auditory cortex contributions to auditory perception. *Nature Reviews Neuroscience*, 20(7), 425–434. <https://doi.org/10.1038/s41583-019-0160-2>
- Kaufmann, L., Koppelstaetter, F., Delazer, M., Siedentopf, C., Rhomberg, P., Golaszewski, S., Felber, S., & Ischebeck, A. (2005). Neural correlates of distance and congruity effects in a numerical Stroop task: An event-related fMRI study. *NeuroImage*, 25(3), 888–898. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2004.12.041>
- Kochari, A. R. (2019). Conducting web-based experiments for numerical cognition research. *Journal of Cognition*, 2(1), 39. <https://doi.org/10.5334/joc.85>
- Kochari, A. R., & Schriefers, H. (2021). Processing symbolic magnitude information conveyed by number words and by scalar adjectives. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, Article 174702182110311. <https://doi.org/10.1177/17470218211031158>
- Kunde, W. (2001). Response-effect compatibility in manual choice reaction tasks. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 27(2), 387–394. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.27.2.387>
- Kunde, W., Koch, I., & Hoffmann, J. (2004). Anticipated action effects affect the selection, initiation, and execution of actions. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 57(1), 87–106. <https://doi.org/10.1080/02724980343000143>
- Lakoff, G., & Johnson, M. (2003). *Metaphors we live by*. University of Chicago Press.
- Lega, C., Cattaneo, Z., Ancona, N., Vecchi, T., & Rinaldi, L. (2020). Instrumental expertise and musical timbre modulate the spatial representation of pitch. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 73(8), 1162–1172. <https://doi.org/10.1177/1747021819897779>
- Libertus, M. E., Woldorff, M. G., & Brannon, E. M. (2007). Electrophysiological evidence for notation

- independence in numerical processing. *Behavioral and Brain Functions*, 3(1), 1. <https://doi.org/10.1186/1744-9081-3-1>
- Lidji, P., Kolinsky, R., Lochy, A., & Morais, J. (2007). Spatial associations for musical stimuli: A piano in the head? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 33(5), 1189–1207. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.33.5.1189>
- Lindemann, O., Abolafia, J. M., Girardi, G., & Bekkering, H. (2007). Getting a grip on numbers: Numerical magnitude priming in object grasping. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 33(6), 1400–1409. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.33.6.1400>
- Lourenco, S. F., & Aulet, L. S. (2019). Cross-magnitude interactions across development: Longitudinal evidence for a general magnitude system. *Developmental Science*, 22(1), e12707. <https://doi.org/10.1111/desc.12707>
- Lourenco, S. F., Ayzenberg, V., & Lyu, J. (2016). A general magnitude system in human adults: Evidence from a subliminal priming paradigm. *Cortex*, 81, 93–103. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2016.04.013>
- Luce, R. D., Steingrimsson, R., & Narens, L. (2010). Are psychophysical scales of intensities the same or different when stimuli vary on other dimensions? Theory with experiments varying loudness and pitch. *Psychological Review*, 117(4), 1247–1258. <https://doi.org/10.1037/a0020174>
- Macnamara, A., Keage, H. A. D., & Loetscher, T. (2018). Mapping of non-numerical domains on space: a systematic review and meta-analysis. *Experimental Brain Research*, 236(2), 335–346. <https://doi.org/10.1007/s00221-017-5154-6>
- Marks, L. E. (1987). On cross-modal similarity: Auditory–visual interactions in speeded discrimination. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 13(3), 384–394. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.13.3.384>
- Mattes, S., Leuthold, H., & Ulrich, R. (2002). Stimulus-response compatibility in intensity-force relations. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 55(4), 1175–1191. <https://doi.org/10.1080/02724980244000152>
- Matthews, W. J., Stewart, N., & Wearden, J. H. (2011). Stimulus intensity and the perception of duration. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 37(1), 303–313. <https://doi.org/10.1037/a0019961>
- Meck, W. H., & Church, R. M. (1983). A mode control model of counting and timing processes. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 9(3), 320–334. <https://doi.org/10.1037/0097-7403.9.3.320>
- Meck, W. H., Church, R. M., & Gibbon, J. (1985). Temporal integration in duration and number discrimination. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 11(4), 591–597. <https://doi.org/10.1037/0097-7403.11.4.591>
- Miller, J., Franz, V., & Ulrich, R. (1999). Effects of auditory stimulus intensity on response force in simple, go/no-go, and choice RT tasks. *Perception & Psychophysics*, 61(1), 107–119. <https://doi.org/10.3758/BF03211952>

- Mitchell, T., Bull, R., & Cleland, A. A. (2012). Implicit response-irrelevant number information triggers the SNARC effect: Evidence using a neural overlap paradigm. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 65(10), 1945–1961. <https://doi.org/10.1080/17470218.2012.673631>
- Moore, B. C. J. (2012). *An introduction to the psychology of hearing* (6th ed). Emerald.
- Morgan, C. T., Garner, W. R., & Galambos, R. (1951). Pitch and intensity. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 23(6), 658–663. <https://doi.org/10.1121/1.1906817>
- Moyer, R. S., & Landauer, T. K. (1967). Time required for judgements of numerical inequality. *Nature*, 215(5109), 1519–1520. <https://doi.org/10.1038/2151519a0>
- Müller, D., & Schwarz, W. (2007). Exploring the mental number line: evidence from a dual-task paradigm. *Psychological Research*, 71(5), 598–613. <https://doi.org/10.1007/s00426-006-0070-6>
- Müller, D., & Schwarz, W. (2008). “1-2-3”: Is there a temporal number line?: Evidence from a serial comparison task. *Experimental Psychology*, 55(3), 143–150. <https://doi.org/10.1027/1618-3169.55.3.143>
- Namdar, G., Tzelgov, J., Algom, D., & Ganel, T. (2014). Grasping numbers: evidence for automatic influence of numerical magnitude on grip aperture. *Psychonomic Bulletin & Review*, 21(3), 830–835. <https://doi.org/10.3758/s13423-013-0550-9>
- Nathan, M. B., Shaki, S., Salti, M., & Algom, D. (2009). Numbers and space: Associations and dissociations. *Psychonomic Bulletin & Review*, 16(3), 578–582. <https://doi.org/10.3758/PBR.16.3.578>
- Nemeh, F., Humberstone, J., Yates, M. J., & Reeve, R. A. (2018). Non-symbolic magnitudes are represented spatially: Evidence from a non-symbolic SNARC task. *PLOS ONE*, 13(8), Article e0203019. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203019>
- Nieder, A., & Dehaene, S. (2009). Representation of number in the brain. *Annual Review of Neuroscience*, 32(1), 185–208. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.051508.135550>
- Nuerk, H.-C., Wood, G., & Willmes, K. (2005). The universal SNARC effect: The association between number magnitude and space is amodal. *Experimental Psychology*, 52(3), 187–194. <https://doi.org/10.1027/1618-3169.52.3.187>
- Oriet, C., Tombu, M., & Jolicoeur, P. (2005). Symbolic distance affects two processing loci in the number comparison task. *Memory & Cognition*, 33(5), 913–926. <https://doi.org/10.3758/BF03193085>
- Oxenham, A. J. (2012). Pitch perception. *The Journal of Neuroscience*, 32(39), 13335–13338. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3815-12.2012>
- Palmer, A. R. (1995). Neural signal processing. In B. C. J. Moore (Ed.), *Hearing* (pp. 75–121). Academic Press.
- Pansky, A., & Algom, D. (1999). Stroop and Garner effects in comparative judgment of numerals: The role of attention. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 25(1), 39–58. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.25.1.39>
- Parise, C. V., & Spence, C. (2009). ‘When birds of a feather flock together’: Synesthetic correspondences

- modulate audiovisual integration in non-synesthetes. *PLoS ONE*, 4(5), e5664. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0005664>
- Patro, K., & Shaki, S. (2016). SNARC for numerosities is modulated by comparative instruction (and resembles some non-numerical effects). *Cognitive Processing*, 17(2), 127–137. <https://doi.org/10.1007/s10339-015-0745-2>
- Pinel, P., Piazza, M., Le Bihan, D., & Dehaene, S. (2004). Distributed and overlapping cerebral representations of number, size, and luminance during comparative judgments. *Neuron*, 41(6), 983–993. [https://doi.org/10.1016/S0896-6273\(04\)00107-2](https://doi.org/10.1016/S0896-6273(04)00107-2)
- Pitt, B., & Casasanto, D. (2018). Spatializing emotion: No evidence for a domain-general magnitude system. *Cognitive Science*, 42(7), 2150–2180. <https://doi.org/10.1111/cogs.12568>
- Pitt, B., & Casasanto, D. (2022). The order of magnitude: Why SNARC-like tasks (still) cannot support a generalized magnitude system. *Cognitive Science*, 46(2), Article e13108. <https://doi.org/10.1111/cogs.13108>
- Pitteri, M., Marchetti, M., Grassi, M., & Priftis, K. (2021). Pitch height and brightness both contribute to elicit the SMARC effect: a replication study with expert musicians. *Psychological Research*, 85(6), 2213–2222. <https://doi.org/10.1007/s00426-020-01395-0>
- Pitteri, M., Marchetti, M., Priftis, K., & Grassi, M. (2017). Naturally together: Pitch-height and brightness as coupled factors for eliciting the SMARC effect in non-musicians. *Psychological Research*, 81(1), 243–254. <https://doi.org/10.1007/s00426-015-0713-6>
- Proctor, R. W., & Cho, Y. S. (2006). Polarity correspondence: A general principle for performance of speeded binary classification tasks. *Psychological Bulletin*, 132(3), 416–442. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.132.3.416>
- Proctor, R. W., & Xiong, A. (2015). Polarity correspondence as a general compatibility principle. *Current Directions in Psychological Science*, 24(6), 446–451. <https://doi.org/10.1177/0963721415607305>
- Prpic, V., Soranzo, A., Santoro, I., Fantoni, C., Galmonte, A., Agostini, T., & Murgia, M. (2020). SNARC-like compatibility effects for physical and phenomenal magnitudes: a study on visual illusions. *Psychological Research*, 84(4), 950–965. <https://doi.org/10.1007/s00426-018-1125-1>
- Puigcerver, L., Rodríguez-Cuadrado, S., Gómez-Tapia, V., & Navarra, J. (2019). Vertical mapping of auditory loudness: Loud is high, but quiet is not always low. *Psicológica Journal*, 40(2), 85–104. <https://doi.org/10.2478/psicolj-2019-0006>
- Ranzini, M., & Girelli, L. (2012). Exploiting illusory effects to disclose similarities in numerical and luminance processing. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 74(5), 1001–1008. <https://doi.org/10.3758/s13414-012-0302-3>
- Ratcliff, R., & McKoon, G. (2008). The diffusion decision model: Theory and data for two-choice decision tasks. *Neural Computation*, 20(4), 873–922. <https://doi.org/10.1162/neco.2008.12-06-420>
- Ratcliff, R., Smith, P. L., Brown, S. D., & McKoon, G. (2016). Diffusion decision model: Current issues and history. *Trends in Cognitive Sciences*, 20(4), 260–281. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2016.01.007>

- Ren, P., Nicholls, M. E. R., Ma, Y., & Chen, L. (2011). Size matters: Non-numerical magnitude affects the spatial coding of response. *PLoS ONE*, 6(8), Article e23553. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0023553>
- Restle, F. (1970). Speed of adding and comparing numbers. *Journal of Experimental Psychology*, 83(2, Pt.1), 274–278. <https://doi.org/10.1037/h0028573>
- Richter, M., & Wühr, P. (2023). Associations between physical size and space are strongly asymmetrical. *Scientific Reports*, 13(1), 16256. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-43313-5>
- Richter, M., & Wühr, P. (2024). The reciprocity of spatial–numerical associations of vocal response codes depends on stimulus mode. *Memory & Cognition*. <https://doi.org/10.3758/s13421-023-01511-6>
- Rinaldi, L., Lega, C., Cattaneo, Z., Girelli, L., & Bernardi, N. F. (2016). Grasping the sound: Auditory pitch influences size processing in motor planning. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 42(1), 11–22. <https://doi.org/10.1037/xhp0000120>
- Rinne, T., Kirjavainen, S., Salonen, O., Degerman, A., Kang, X., Woods, D. L., & Alho, K. (2007). Distributed cortical networks for focused auditory attention and distraction. *Neuroscience Letters*, 416(3), 247–251. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2007.01.077>
- Röhl, M., & Uppenkamp, S. (2012). Neural coding of sound intensity and loudness in the human auditory system. *Journal of the Association for Research in Otolaryngology*, 13(3), 369–379. <https://doi.org/10.1007/s10162-012-0315-6>
- Roitman, J. D., Brannon, E. M., Andrews, J. R., & Platt, M. L. (2007). Nonverbal representation of time and number in adults. *Acta Psychologica*, 124(3), 296–318. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2006.03.008>
- Romaiguère, P., Hasbroucq, T., Possamaï, C.-A., & Seal, J. (1993). Intensity to force translation: a new effect of stimulus-response compatibility revealed by analysis of response time and electromyographic activity of a prime mover. *Cognitive Brain Research*, 1(3), 197–201. [https://doi.org/10.1016/0926-6410\(93\)90028-4](https://doi.org/10.1016/0926-6410(93)90028-4)
- Rusconi, E., Kwan, B., Giordano, B., Umiltà, C., & Butterworth, B. (2006). Spatial representation of pitch height: The SMARC effect. *Cognition*, 99(2), 113–129. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2005.01.004>
- Santiago, J., & Lakens, D. (2015). Can conceptual congruency effects between number, time, and space be accounted for by polarity correspondence? *Acta Psychologica*, 156, 179–191. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2014.09.016>
- Schwarz, W., & Ischebeck, A. (2003). On the relative speed account of number-size interference in comparative judgments of numerals. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 29(3), 507–522. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.29.3.507>
- Schwenzer, M., & Mathiak, K. (2011). Numeric aspects in pitch identification: an fMRI study. *BMC Neuroscience*, 12(1), 26. <https://doi.org/10.1186/1471-2202-12-26>
- Sekuler, R., Rubin, E., & Armstrong, R. (1971). Processing numerical information: A choice time analysis.

- Journal of Experimental Psychology*, 90(1), 75–80. <https://doi.org/10.1037/h0031366>
- Shaki, S., Petrusic, W. M., & Leth-Steensen, C. (2012). SNARC effects with numerical and non-numerical symbolic comparative judgments: Instructional and cultural dependencies. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 38(2), 515–530. <https://doi.org/10.1037/a0026729>
- Shepard, R. N. (1982). Geometrical approximations to the structure of musical pitch. *Psychological Review*, 89(4), 305–333. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.89.4.305>
- Smith, L. B., & Sera, M. D. (1992). A developmental analysis of the polar structure of dimensions. *Cognitive Psychology*, 24(1), 99–142. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(92\)90004-L](https://doi.org/10.1016/0010-0285(92)90004-L)
- Sokolowski, H. M., Fias, W., Bosah Ononye, C., & Ansari, D. (2017). Are numbers grounded in a general magnitude processing system? A functional neuroimaging meta-analysis. *Neuropsychologia*, 105, 50–69. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2017.01.019>
- Spence, C. (2011). Crossmodal correspondences: A tutorial review. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 73(4), 971–995. <https://doi.org/10.3758/s13414-010-0073-7>
- Spence, C. (2019). On the relative nature of (pitch-based) crossmodal correspondences. *Multisensory Research*, 32(3), 235–265. <https://doi.org/10.1163/22134808-20191407>
- Stahl, J., & Rammsayer, T. H. (2005). Accessory stimulation in the time course of visuomotor information processing: Stimulus intensity effects on reaction time and response force. *Acta Psychologica*, 120(1), 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2005.02.003>
- Sternberg, S. (1969). The discovery of processing stages: Extensions of Donders' method. *Acta Psychologica*, 30, 276–315. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(69\)90055-9](https://doi.org/10.1016/0001-6918(69)90055-9)
- Stevens, S. S. (1935). The relation of pitch to intensity. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 6(3), 150–154. <https://doi.org/10.1121/1.1915715>
- Stevens, S. S. (1936). A scale for the measurement of a psychological magnitude: loudness. *Psychological Review*, 43(5), 405–416. <https://doi.org/10.1037/h0058773>
- Stevens, S. S. (1957). On the psychophysical law. *Psychological Review*, 64(3), 153–181. <https://doi.org/10.1037/h0046162>
- Stevens, S. S. (1966). Matching functions between loudness and ten other continua. *Perception & Psychophysics*, 1(1), 5–8. <https://doi.org/10.3758/BF03207813>
- Stevens, S. S. (1975). *Psychophysics: introduction to its perceptual, neural, and social prospects*. Wiley.
- Stevens, S. S., & Galanter, E. H. (1957). Ratio scales and category scales for a dozen perceptual continua. *Journal of Experimental Psychology*, 54(6), 377–411. <https://doi.org/10.1037/h0043680>
- Stevens, S. S., Volkman, J., & Newman, E. B. (1937). A scale for the measurement of the psychological magnitude pitch. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 8(3), 185–190. <https://doi.org/10.1121/1.1915893>
- Sutherland, C. A. M., Thut, G., & Romei, V. (2014). Hearing brighter: Changing in-depth visual perception through looming sounds. *Cognition*, 132(3), 312–323. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2014.04.011>

- Takeshima, Y., & Gyoba, J. (2013). High-intensity sound increases the size of visually perceived objects. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 75(3), 501–507. <https://doi.org/10.3758/s13414-012-0403-z>
- Tzelgov, J., Meyer, J., & Henik, A. (1992). Automatic and intentional processing of numerical information. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 18(1), 166–179. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.18.1.166>
- Ueda, K., & Ohgushi, K. (1987). Perceptual components of pitch: Spatial representation using a multidimensional scaling technique. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 82(4), 1193–1200. <https://doi.org/10.1121/1.395255>
- Uppenkamp, S., & Röhl, M. (2014). Human auditory neuroimaging of intensity and loudness. *Hearing Research*, 307, 65–73. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2013.08.005>
- Vainio, L., Mustonen, T., & Vainio, M. (2019). The influence of number magnitude on vocal responses. *Journal of Motor Behavior*, 51(2), 129–140. <https://doi.org/10.1080/00222895.2018.1440522>
- Van Dijck, J.-P., Abrahamse, E. L., Acar, F., Ketels, B., & Fias, W. (2014). A working memory account of the interaction between numbers and spatial attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 67(8), 1500–1513. <https://doi.org/10.1080/17470218.2014.903984>
- Van Dijck, J.-P., & Fias, W. (2011). A working memory account for spatial–numerical associations. *Cognition*, 119(1), 114–119. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2010.12.013>
- Van Dijck, J.-P., Fias, W., & Andres, M. (2015). Selective interference of grasp and space representations with number magnitude and serial order processing. *Psychonomic Bulletin & Review*, 22(5), 1370–1376. <https://doi.org/10.3758/s13423-014-0788-x>
- Van Opstal, F., & Verguts, T. (2013). Is there a generalized magnitude system in the brain? Behavioral, neuroimaging, and computational evidence. *Frontiers in Psychology*, 4. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00435>
- Vierck, E., & Kiesel, A. (2010). Congruency effects between number magnitude and response force. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 36(1), 204–209. <https://doi.org/10.1037/a0018105>
- Walker, P., & Walker, L. (2012). Size–brightness correspondence: Crosstalk and congruity among dimensions of connotative meaning. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 74(6), 1226–1240. <https://doi.org/10.3758/s13414-012-0297-9>
- Walsh, V. (2003). A Theory of Magnitude: Common cortical metrics of time, space and quantity. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(11), 483–488. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2003.09.002>
- Walsh, V. (2015). A Theory of Magnitude: The parts that sum to number. In R. Cohen Kadosh & A. Dowker (Eds.), *The Oxford Handbook of Numerical Cognition* (Vol. 1, pp. 552–565). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780199642342.013.64>
- Weis, T., Estner, B., Krick, C. M., Reith, W., & Lachmann, T. (2015). SNARC meets SPARC in fMRI—Interdependence of compatibility effects depends on semantic content. *Neuropsychologia*, 77, 331–338. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2015.09.018>

- Weis, T., Estner, B., Leeuwen, C. van, & Lachmann, T. (2016). SNARC (spatial-numerical association of response codes) meets SPARC (spatial-pitch association of response codes): Automaticity and interdependency in compatibility effects. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 69(7), 1366–1383. <https://doi.org/10.1080/17470218.2015.1082142>
- Winter, B., Marghetis, T., & Matlock, T. (2015). Of magnitudes and metaphors: Explaining cognitive interactions between space, time, and number. *Cortex*, 64, 209–224. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2014.10.015>
- Winter, B., Matlock, T., Shaki, S., & Fischer, M. H. (2015). Mental number space in three dimensions. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 57, 209–219. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2015.09.005>
- Wood, G., Willmes, K., Nuerk, H.-C., & Fischer, M. H. (2008). On the cognitive link between space and number: A meta-analysis of the SNARC effect. *Psychology Science*, 50(4), 489–525.
- Wühr, P., & Richter, M. (2022). Relative, not absolute, stimulus size is responsible for a correspondence effect between physical stimulus size and left/right responses. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 84(4), 1342–1358. <https://doi.org/10.3758/s13414-022-02490-7>
- Wühr, P., & Seegelke, C. (2018). Compatibility between physical stimulus size and left-right responses: Small is left and large is right. *Journal of Cognition*, 1(1), 17. <https://doi.org/10.5334/joc.19>
- Xuan, B., Chen, X.-C., He, S., & Zhang, D.-R. (2009). Numerical magnitude modulates temporal comparison: An ERP study. *Brain Research*, 1269, 135–142. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2009.03.016>
- Xuan, B., Zhang, D., He, S., & Chen, X. (2007). Larger stimuli are judged to last longer. *Journal of Vision*, 7(10), 2. <https://doi.org/10.1167/7.10.2>
- Yates, M. J., Loetscher, T., & Nicholls, M. E. R. (2012). A generalized magnitude system for space, time, and quantity? A cautionary note. *Journal of Vision*, 12(7), 9–9. <https://doi.org/10.1167/12.7.9>
- Zheng, Y., & Brette, R. (2017). On the relation between pitch and level. *Hearing Research*, 348, 63–69. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2017.02.014>

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Ich habe bisher keine vergeblichen Promotionsversuche unternommen. Ich habe die vorliegende Dissertation weder in ihrer gegenwärtigen noch in einer anderen Fassung einer anderen Fakultät vorgelegt.

Ort und Datum

Unterschrift