

1. Einleitung

Zur Hörgeräteanpassung werden verschiedene audiometrische Verfahren verwendet. Die Lautheitsskalierung (oder auch Hörfeldskalierung) erweitert dabei die herkömmlichen Methoden wie Tonschwellen- und Sprachaudiometrie um eine Möglichkeit zur Registrierung des Lautheitsempfindens von der Hör- bis zur Unbehaglichkeitsschwelle, zur Beurteilung der Dynamik und der Erfassung des Recruitmentphänomens (37, 38, 39, 40, 41, 42).

Ziel einer Hörgeräteanpassung sollte neben einer Verbesserung des Sprachverständnisses auch eine möglichst natürliche bzw. normale Lautheitsempfindung mit dem Hörgerät sein, was den Tragekomfort wesentlich erhöht und viel zur Toleranz einer Hörgeräteversorgung beiträgt. Die Lautheitsskalierung liefert hier einen wertvollen Beitrag, da sie die Lautheitsempfindung mit dem Hörgerät dokumentiert.

Schon in den 30iger Jahren hatten Fletcher und Munson (11) versucht die Lautheitsempfindung zu erfassen und darzustellen. Eine Weiterentwicklung der vielen Ansätze stellt das Würzburger Hörfeld (WHF) dar, das 1987 von Moser (59) entwickelt wurde. Es basiert auf seinen zusammen mit Heller (27) und Hellbrück (23) 1985 durchgeführten Studien zur Kategorienunterteilung der Hörfeldskalierung mit einem computergestützten Verfahren. Dem Patienten wird eine pseudorandomisierte Abfolge von Rauschimpulsen vorgespielt, worauf er nach seiner Einschätzung des Höreindrucks befragt wird. Das Würzburger Hörfeld ermöglicht dem Hörer eine Unterscheidung der Lautheitseindrücke mittels 50 Kategorien, die über ein berührungsempfindliches Skalierungstablett auf den Computer übertragen werden. In den vorgegebenen Hörfeldern werden 64 Stimuli mit 4 Frequenzen und jeweils 16 Pegeln dargeboten. Die Anwendung des Verfahrens an Kindern haben Kugler et al. (47) 1995 untersucht. Die untersuchten 15 Kinder im Alter von 6 - 8 Jahren zeigen einen linearen Verlauf der Lautheitseindrücke über alle Frequenzen, es fällt jedoch ein steilerer Lautheitsanstieg als bei Erwachsenen auf. Dies bestätigen auch Meister et al. (53) 1995 mit der Kinder-Methode des Oldenburger Hörfeldskalierungs-Modells. Tepřt et al. (82) beschreiben 1994 bei der Verwendung der Hörfeldskalierung in der Hörgeräteanpassung im Kindesalter eine Optimierung der Anpassung. Ihre Untersuchung zeigt zudem bei 30 hörgesunden Kindern eine gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse auf. Insgesamt stellen alle Autoren fest, dass die Hörfeldskalierung auch bei normal intelligenten Schulkindern und Jugendlichen ein schnell durchzuführendes Verfahren zur Verbesserung der Hörgeräte-

anpassung darstellt. Durchschnittlich beträgt der Zeitaufwand allerdings 30 Minuten. Dieser relativ hohe Zeitaufwand und der hohe Abstraktionsanspruch des Verfahrens bereiten aber erfahrungsgemäß vor allem jüngeren Kindern Schwierigkeiten. Dies verdeutlichen nicht reliable bzw. verwertbare Untersuchungsergebnissen.

Das Ziel der Dissertation ist die Entwicklung des Würzburger Hörfelds Junior als Kurzform der Standardversion zur verbesserten Anwendbarkeit bei Kindern. Ist es möglich bei deutlich verkürzter Messzeit mit weniger Stimuli das Hörfeld in ähnlicher Weise zu erfassen wie bei der konventionellen Hörflächenskalierung? Die Verkürzung soll die Vergleichbarkeit der Messergebnisse bei Kindern erhöhen und das Verfahren dem kindlichen Konzentrations- und Leistungsvermögen anpassen. Dies ermöglicht die Anwendung der Lautheitsskalierung auch bei Kindern im Kindergarten- und Vorschulalter. Bei der ersten Kurzform werden 4 Frequenzen mit jeweils 5 Pegeln als Reize angeboten. In einer zweiten Kurzform werden nach Allens (1) Vorgabe nur 3 Frequenzen mit jeweils 5 Pegeln als Reize präsentiert. Dies stellt eine weitere Zeitersparnis dar, beschränkt aber die Aussagekraft der Methode auf 3 Frequenzen. Die Kurzformen liefern Pegellautheitsfunktionen, die die subjektive Hörempfindung erfassen, analog dem konventionellen Würzburger Hörfeld. Dabei wird der Lautheitsanstieg ebenso als Pegellautheitsdiagramm dargestellt.

1.1. Die Erfassung des Lautheitseindrucks im historischen Überblick

Erstmals beschreiben Fletcher und Munson 1937 (11) eine Methode, mit der die Lautheit eines Klanges abgeschätzt werden kann. Es entstanden die sog. Kurven gleicher Lautstärke (Isophonen, s.u.), die mit einem Vergleichston bei 1000 Hz ermittelt wurden. Anhand eines Potentiometers sollten die Personen den Ton einstellen, den sie in einer anderen Frequenz als gleich laut einstufen.

Die von Stevens 1955 (81) eingeführte sone-Skala beschreibt die Relation zwischen Lautheit und Intensität eines Stimulus. Dazu verwendet er verschiedene Skalierverfahren. Die sone-Skala wird durch die Beurteilung von Tönen zu einem Vergleichston ermittelt. Ein Ton, der zum Vergleichston mit 1000 Hz bei 40 dB SPL als viermal so laut beurteilt wird, hat eine Lautheit von 4 sone. Ein halb so laut empfundener Ton wäre 0,5 sone laut. 1959 erkennt Stevens (80) die Möglichkeit des Recruitmentnachweis mittels des Verfahrens. Auch Zwicker (92) führt 1958 umfangreiche Untersuchungen zur Lautheit durch. Er findet verschiedene Kurvenverläufe der Pegellautheitsfunktionen bei weißem Rauschen und einem 1000 Hz-Ton. Die Abweichungen stellen sich pegelabhängig dar. Zwicker nimmt die Existenz einer grundlegenden Lautheitskurve an. Er vermutet einen einfachen Zusammenhang zwischen der Lautheit und deren Erregung unabhängig vom Abbildungsort auf der Basilmembran des Cortischen Organs. Bei bekannter Funktion wäre es durch Addition von Teillautheiten möglich, die Lautheit eines beliebigen Schalles zu berechnen. Deshalb entwirft er eine Schablone zur graphischen Vorlage der Berechnung der Lautstärke aus dem Frequenzgruppendiagramm (Frequenzgruppe entspricht einer Frequenzbandbreite). 1993/5 liefert Hohmann (30, 33) aufgrund von Zwickers Untersuchungen die Formel für die logarithmische Beziehung zwischen sone-Einheiten und den kategorialen Unterteilungseinheiten (KU) der Lautheitsskalierung. Es ergibt sich ein linearer Zusammenhang zwischen den beiden Größen. Beide zeigen eine Abhängigkeit von der normierten Intensität. Darüber wird ihr Bezug berechnet:

$$KU \approx 18 \cdot \log(2,5 N) \quad (33)$$

In der späteren Zeit entstehen neben der Lautheitsskalierung unterschiedliche Verfahren zur direkten Skalierung. Sander et al. (77) vergleichen 1995 die 3 subjektiven Verfahren zur Lautheitseinschätzung: AME (absolute magnitude estimation), RME (restricted magnitude estimation) und CS (category scaling). Die AME ermöglicht das absolute Zuordnen einer Zahl zu der untersuchten Größe, hier der Lautheitsempfindung. Die RME restringiert die

Auswahl der Zahlen. Die CS unterteilt den Lautheitseindruck in verbal gebräuchliche Ebenen als eine Art natürliche Skala und verringert dadurch die Standardabweichung. Der Kurvenverlauf ist bei CS linearer als bei AME und RME. Collins (7) erörtert 1989 die Anwendung der magnitude estimation bei Kindern. Er lässt 12 Erwachsene und 12 Kinder zwischen 4 und 7 Jahren die Länge von Linien und Lautheiten bei 1000 Hz schätzen. Weiter untersucht er mit „cross modality matching“. Dort wird die Lautheit durch die Längen von Linien geschätzt. Es zeigen sich keine auffälligen Unterschiede zwischen Erwachsenen und Kindern. Die Lautheitsfunktion wird vom Modus und der Präsentationsstärke des Standardreizes bestimmt. Auch übt die Wiederholungshäufigkeit des Standards einen Effekt aus. Fucci et al. (12) finden 1999 bei Kindern bei der ME von Rockmusik einen breiteren Antwortbereich und flexiblerer Skalierung als bei Jugendlichen und Erwachsenen.

Ein Vorläufer der heutigen Methode der Lautheitsskalierung als Verfahren zur Hörgeräteanpassung stellte Pascoe (67, 66) 1978 und 1986 vor. Es basiert auf der Gabe von ansteigenden Lautheiten, beginnend an der Hörschwelle. Pascoe verwendet ein 9+1-stufiges Skalierungstablett. Die Messung untersucht 6 - 8 Frequenzen, was vor allem bei jüngeren Patienten sehr aufwendig ist. Der Autor beschreibt aber 3 Frequenzen als genügend aussagekräftig. Darauf aufbauend stellt Allen 1990 (1) das LGOB Verfahren vor (Loudness growth in $\frac{1}{2}$ octave bands). Die Beurteilung eines Geräusches erfolgt hier durch absolutes Skalieren, randomisiert über 5 Frequenzen und 15 Pegel, jeweils 3x präsentiert (225 Reize). Es zeigt sich wie auch bei Pluvinaud (69) 1989 ein verlässlicher Grad der Wiederholbarkeit. Die vorgestellte Methode der LGOB erlaubt, absolute Lautheit, Lautheitsanstieg und Recruitment als eine Funktion von Frequenz und Isolautheitskurven bei Normalhörenden und Schwerhörigen zu messen. Dieses Verfahren scheint funktional vergleichbar mit der zeit-aufwendigen sone-Messung zu sein. Van Flieths (83) IHAFF (Independent Hearing Aid Fitting Forum) Verfahren, das 1995 vorgestellt wird, findet in den Vereinigten Staaten weite Verbreitung. Es verlangt mindestens 2 Prüffrequenzen zur Einstellung, benutzt eine 7+1-Punkteskala und liefert Informationen über die Schwelle und die Lautheitsempfindung von Schmalbandrauschen. Cox (8) stellt 1997 ein Verfahren zur Erfassung der Lautheitsempfindung mit reinen Tönen in sechs Frequenzen vor, den Contour-Test, er zeigt mit der Literatur vergleichbare Reliabilität.

Im deutschsprachigen Raum wird von Hellbrück und Moser 1985 (23) die Lautheitsskalierung mit Hilfe eines computergestützten psychologischen Verfahrens eingeführt. Als grundlegende Vorstellung fungiert die Annahme, dass der Mensch, um sich rasch zu orientieren, zu einer schnellen Einordnung von Reizen in Kategorien fähig ist. Dieses absolute Urteil basiert auf Erfahrungen und situationalen Besonderheiten (Verknüpfung von Verbalem und hoher Differenzierung von der Lautheitswahrnehmung). Das Verbale ist wichtig, um der Versuchsperson eine Urteilssicherheit zu geben; die Feindifferenzierung erhöht die Aufmerksamkeit und Genauigkeit. Das WHF vereint die vergleichsweise beschränkten semantischen Kategorien der deutschen Sprache in diesem Feld mit den Zahlenwerten und kann sich so der Vielfältigkeit der Unterscheidungsmöglichkeiten annähern. Die verbalen Kategorien helfen, die Urteile interindividuell zu stabilisieren (25). Die kategorialen Einstufungen sollten auf Unterscheidungen zurückgreifen, die auch im Alltag ständig vorgenommen werden (z.B. heiß, warm, lauwarm, kühl, kalt, sehr kalt), die Feinabstufung führt erfahrungsgemäß nicht zu Problemen (21). Das WHF erfüllt diese Voraussetzung. Um eine normale Situation nachzuspielen, wird im freien Feld gemessen. Diese standardisierte Anwendung im Freifeld hat den Vorteil, dass so die Anwendung bei Kindern und Hörgeräteträgern, die nicht mit Kopfhörer gemessen werden können, ermöglicht wird (29). Heller (27) postuliert 1985: Bei einem Verfahren der Kategorienunterteilung sei die Orientiertheit und Isomorphie der Bild- und Realmenge besonders zu beachten. Das Kategorienangebot muss zur Objektmenge passen. Die Anwendung der Lautheitsskalierung bei Kindern untersucht Kugler 1995 mit dem Würzburger Hörfeld (45, 46, 47).

Hohmann (31, 32) stellt Anfang der 90er Jahre zusammen mit Kollmeier eine weitere Entwicklung der Hörfeldskalierung vor: die Oldenburger Hörflächenskalierung. In diesem Verfahren werden den Probanden 10+1 Kategorien als Antwortmöglichkeiten angeboten. In einer Frequenz werden adaptiv zum Dynamikbereich des Patienten 7 Abstufungen als Stimuli dargeboten. Jeder Reiz ertönt pro Messung zweimal.

Bei der Standardisierung der Methode finden sie wie auch Brand (5) 1997 keine Abhängigkeit der Ergebnisse vom Messverfahren und der Folge der Pegel. Es finden sich keine deutlichen Lerneffekte (19). Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse ist gut. Kießling findet zuverlässige Ergebnisse bei der Test-Retest-Reliabilität unabhängig von Hörverlust und Alter. Die Messzeit sei durch eine gröbere Lautheitsskala verkürzbar (37, 40). Kollmeier (44) beschreibt 1997, dass die Zahl unterschiedlicher Pegel nicht größer als die Anzahl der möglichen

Antwortkategorien sein dürfe, weil die Person sonst gezwungen wäre, unterschiedliche Lautheitseindrücke der gleichen Kategorie zuzuordnen. Es würde dann eher eine Zuordnung in die Kategorien erfolgen als eine Beurteilung der subjektiven Empfindung. Eine kindgerechte Methode mit dem Oldenburger Versuchsaufbau stellen Meister et al. (53, 51) erstmals 1995 vor.

Der Nachteil dieser verschiedenen Methoden liegt in der mangelnden Vergleichbarkeit der Ergebnisse der Lautheitsskalierung untereinander (31). Die Verfahren variieren vor allem in der Abfolge der Stimuli, der Auswahl des Pegelbereiches und den verschiedenen Skalierkategorien sowie den verwendeten Reizen. Garnier et al. (14,15) benennt auch den Einfluß der Dauer des Stimulus für die Lautheitsempfindung, einen ebenfalls variierenden Parameter in den verschiedenen Verfahren.

1.2 Die Anwendung in der Hörgeräteanpassung:

Kießling et al. (39) sowie Launer (48, 49) erwähnen die Möglichkeiten der Lautheitsskalierung im Bereich der Hörgeräteanpassung. Hier mache es Sinn, eine Überprüfung in mehreren Frequenzen vorzunehmen, während bei der Topodiagnostik ein verkürztes Procedere ausreichend erscheine. Eine Vorhersage über den Verlauf der Lautheitsfunktion aus der Hörschwelle oder dem Stapedius-Reflex (65) könne nicht getroffen werden, lediglich ein Zusammenhang zwischen Tonschwellenaudiogramm und MCL (most comfortable level) lasse sich aufzeigen (31). Kießling (36) schreibt 1995: *“Für die Anpassung von Hörgeräten ergibt sich, dass weder der Verstärkungsbedarf noch das erforderliche Kompressionsverhältnis aus der Hörschwelle ermittelt werden kann.”* Auch von Wedel et al. (86, 84) sowie andere weisen 1998 und 2000 auf die Bedeutung der Hörflächenskalierung in der Überprüfung von digitalen (13, 52, 78) und anlogenen Hörhilfen hin. Bei der Hörgeräteanpassung zeigt sich bei Untersuchungen von Bachmann et al. (2) 1998 und Elberling (9) 1999 kein einheitlicher Trend, ob eine Anpassung mit Hörflächenskalierung zu einem deutlich besseren Anpassungsergebniss führt.

Auf die besonderen Anforderungen in der Hörgeräteanpassung bei Kindern gehen von Wedel et al. (85) 1989 und Zorowka et al. (90, 91) 1995 ein. Nach Zorowka et al. (91) 1995 verlangen Kinder bei der Anpassung trotz guter Sprachverständlichkeit eine höhere Verstärkung bei leisen Eingangspegeln. Sie zeigen eine andere subjektive Lautheitsempfindung als Erwachsene. Noel et al. (63) 1987 schildern die Integration der Eltern in die

Anpassung als einen wichtigen Faktor. Auch Kiese-Kimmel et al. (35) 1998 beschreibt nicht nur die Optimierung der Anpassung, sondern vor allem die Akzeptanz des Hörgerätes durch die Kinder als einen entscheidenden Faktor.

Weitere Anwendungsmöglichkeiten der Lautheitsskalierung finden sich bei Cochlear-Implant-Trägern (10, 60, 61, 79) und bei Tinnitus (62).

Ein geschlechtsspezifischer Unterschied der Skalierung bei Messungen mit Kopfhörern wird 1983/1984 von Hellbrück (20, 24) beschrieben. Frauen skalieren frequenzunabhängig lauter als Männer. In sehr hohen und sehr tiefen Frequenzen sowie bei sehr geringen Schalldruckpegeln ist der Einfluss des Geschlechts geringer. Im Freifeld werden geschlechtsspezifische Unterschiede nur in zwei Frequenzen (500 und 1000 Hz) deutlich (26). Die systematisch lautere Beurteilung durch die Frauen bei Messungen mit Kopfhörern ist nicht mit dem geringeren Gehörgangsvolumen zu erklären, sondern wird durch ein multifaktorielles Geschehen beeinflusst; so spielt auch die stärkere Lautheitsempfindlichkeit eine Rolle (37, 39). Baumann (3) hingegen stellt 1997 einen zu vernachlässigenden Geschlechtsunterschied fest. Zorowka et al. (91) zeigen 1995 bei ihrem Einsatz der Lautheitsskalierung zur Hörgeräte-Feinanpassung im Kindesalter keine Geschlechtsunterschiede auf.

Die Pegellautheitsfunktion:

Der Kurvenverlauf der Lautheitsempfindung ist in der neueren Literatur ambivalent aufgezeigt worden. Nach Kießling (36) 1995 und Kollmeier (43) 1996 besteht ein linearer Verlauf der Pegellautheitsfunktion. Kießling (39) beschreibt 1994 den Anstieg bei Normalhörenden unter 40 dB flacher und dann steiler werdend. Bis 90 dB ist kein Sättigungsverhalten festzustellen. Nach Kollmeier (43) 1996 ist die Gerade für breitbandige Signale höher als für schmalbandige (Lautheitssummation). Bei Innenohrschwerhörigen ist keine Lautheitssummation zu finden; der Anstieg der Pegellautheitsfunktion ist insgesamt steiler, sie zeigt einen sigmoidalen Kurvenverlauf (42). Robinson et al. (74) hingegen vertreten 1996 die Auffassung, die menschliche Lautheitsempfindung besser mit einer Exponentialfunktion darzustellen. Dies verfechten auch Prosser (70) 1998 und Keidser (34) 1999.

Pierrel-Sorrentino (68) und Raslear (71) (1980 und 1983) haben eine Art Lautheitsskalierung mit Ratten und Chinchillas vorgestellt. Sie postulieren die Exponentialfunktion nach Stevens

($L = kI^{0,3}$ für Normalhörende) (80) als geeignete Darstellung der Lautheitsfunktion. Die Lautheitsempfindung steige bei den Tieren vergleichbar wie bei Menschen (Exponenten von 0,25 und 0,35). Brand et al. (6) beschreiben 1998 einen gekrümmten Verlauf der Pegellautheitsfunktion bei normalhörenden Erwachsenen und schlagen eine Funktion aus 2 Geradenstücken zur Darstellung vor.