

# Lästigkeitsbewertung von Verkehrssituationen im Hinblick auf unterschiedliche Antriebskonzepte

Lisa Steinbach, M. Ercan Altinsoy

Lehrstuhl Kommunikationsakustik, TU Dresden, 01062 Dresden, Deutschland

Email: lisa.steinbach@tu-dresden.de

## Einleitung

Im heutigen städtischen Umfeld sind Bewohner permanent einem erhöhten Geräuschpegel ausgesetzt. Besonders Verkehrsgeräusche prägen die Geräuschkulisse in Städten stark. So fühlt sich mehr als die Hälfte der deutschen Bevölkerung von Verkehrsgeräuschen gestört oder sogar belästigt. Dabei ist zu beachten, dass Lärm ein Stressfaktor ist und sich negativ auf die Gesundheit der Menschen auswirken kann. Durch die derzeitige Elektrifizierung von Fahrzeugen ist von einer Änderung der Verkehrsgeräusche in deutschen Innenstädten auszugehen. Die Untersuchungen dieser Studie zielen zentral darauf ab, dem wachsenden Bedarf zur Bestimmung der akustischen Wahrnehmbarkeit von Fahrzeugaußengeräuschen durch Fußgänger gerecht zu werden. Vorangegangene Studien zeigen, dass reine Elektrofahrzeuge nicht rechtzeitig detektierbar sind und somit ein zusätzliches Geräusch benötigen (vgl. [1],[2],[3]). Durch Messungen der Wahrnehmung von Fußgängern soll ein Informationszuwachs geschaffen werden, der hilft, Fahrzeugaußengeräusche so zu gestalten, dass Fußgänger relevante akustische fahrzeugseitige Informationen wie Fahrtrichtung, Beschleunigung, Verzögerung, Geschwindigkeit oder Betriebszustand erhalten, um so rechtzeitig ein Fahrzeug als solches zu detektieren. Andererseits sollen Elektrofahrzeuge nicht mit mehr Fahrzeugaußengeräusch versehen werden als unbedingt notwendig, sodass die Bevölkerung nicht gestört oder sogar belästigt wird.

## Vorversuch: Detektionsfähigkeit

### Versuchsdurchführung

Um sicher zu stellen, dass die synthetischen Elektrofahrzeuggeräusche rechtzeitig detektierbar sind, wurden Probandenversuche bezüglich der Reaktion auf Vorbeifahrtgeräusche durchgeführt. Dabei beantworteten die Probanden die Frage „Wann bemerken Sie das sich nähernde Fahrzeug?“ und betätigten unmittelbar nach dem Wahrnehmen des herannahenden Fahrzeuges einen Knopf. Hierbei ist wesentlich, in welcher Entfernung die Fahrzeuge mit unterschiedlichem Antriebskonzept auditiv wahrnehmbar sind. Diese Entfernung muss den Mindestabstand zwischen Fahrzeug und einem Fußgänger (kritischer Abstand) einhalten, sodass die Erkennbarkeit früh genug gegeben ist, um einen Unfall zu vermeiden. Der kritische Abstand kann nach Kerber [5] mit folgender

Gleichung (1) berechnet werden:

$$s_{Fzg} = v_{Fzg} \cdot t_{React} + \frac{v_{Fzg}^2}{2 \cdot a_{Brems}} \quad (1)$$

Werden die typischen Reaktionszeiten für konzentrierte ( $t_{React} = 0,7s$ ) und unkonzentrierte Verkehrsteilnehmer ( $t_{React} = 1,5s$ ) nach Green [4] und eine Bremsverzögerung ( $a_{Brems} = 8 m/s^2$ ) angenommen, ergibt sich bei einer Fahrgeschwindigkeit von 20 km/h ein kritischer Abstand von 5,82 m (konzentrierte Verkehrsteilnehmer) bzw. 10,26 m (unkonzentrierte Verkehrsteilnehmer). In dieser Vorstudie wurden Erkennungszeiten herannahender Fahrzeuge bei einer Konstantfahrt von 20 km/h in verschiedenen Hintergrundgeräuschen gemessen. Im urbanen Verkehr sind Nebenstraßen ohne Signalanlagen oder Fußgängerüberwegen und einer Geschwindigkeitsbegrenzung von 30 km/h besonders häufig, sodass die hier untersuchte Situation eine typische Verkehrssituation darstellt, in dem ein Fußgänger eine Querungsentscheidung treffen muss. Um zu verhindern, dass sich die Probanden auf den Startpunkt der Fahrzeuggeräusche einstellen können, wurden diese mit randomisierten Verzögerungszeiten zwischen 1s und 3s gestartet. Aus der Kombination von zwei Hintergrundgeräuschen und fünf Fahrzeuggeräuschen (1 Verbrenner, 3 Elektrofahrzeuge mit Soundgenerator, 1 Elektrofahrzeug ohne Soundgenerator) bei unterschiedlichen Pegeln und einer Wiederholung entstand ein Hörversuch mit insgesamt 36 Stimuli. Die Wiedergabereihenfolge der Paarungen aus Fahrzeug- und Hintergrundgeräusch wurden ebenfalls randomisiert im Hörversuchslabor über einen Kopfhörer der Fa. Sennheiser vom Typ HD 600 kalibriert dargeboten. Im Versuchs-Setup wurden alle determinierten Delays bestimmt und kompensiert. Die Summe der nicht korrigierbaren hardwarebedingten Verzögerungszeiten wurde mit  $< 10ms$  bestimmt. Dieser Betrag stellt den Fehler der Reaktionszeitmessung dar – ist aber vernachlässigbar klein. Die Benutzeroberfläche wurde mit Matlab-GUI implementiert. Dem eigentlichen Hörversuch wurde ein Training vorangestellt, indem sowohl alle Fahrzeuggeräusche einzeln und als auch vor den unterschiedlichen Hintergrundgeräuschen präsentiert wurden. Die Probanden konnten sich somit gut „einhören“ und erhielten zusätzlich vom Versuchsleiter Erläuterungen zur gehörten Verkehrsszene. An den Hörversuchen nahmen insgesamt 15 normalhörende Personen (11 männlich, 4 weiblich) im Alter von 24 bis 66 Jahren teil. Das Durchschnittsalter der Probanden betrug 40,1 Jahre.

Stimuli

Für die Wahrnehmungsuntersuchungen wurden situationsrelevante Vorbeifahrtgeräusche von einem Fahrzeug mit herkömmlichen Verbrennungsmotor („Verbrenner“), einem Elektrofahrzeug ohne Soundgenerator („E-Fzg. o. SG“) und einem Elektrofahrzeug mit Soundgenerator und drei synthetisch generierten Geräuschen („E-Fzg. m. SG1-3“) bei 20 km/h aufgenommen. Dabei wurden zwei der Elektrofahrzeuggeräusche mit der Software Pure Data generiert. Das dritte ist ein bereits existierendes Elektrofahrzeuggeräusch eines deutschen Automobilherstellers. Dafür wurde ein Kunstkopf verwendet, der 2 m von der Fahrzeugmitte entfernt in 1,2 m Höhe aufgestellt wurde (vgl. Abb. 1). Die Audioaufnahmen aller Fahrzeug-

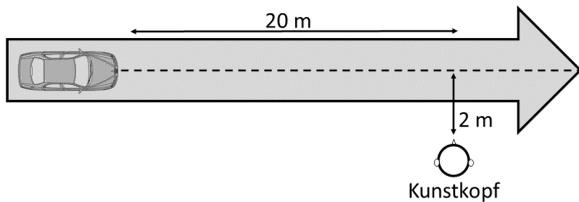


Abbildung 1: Aufnahmesituation: herannahendes Fahrzeug

geräusche entstanden an einem windstillen Tag auf einer trockenen, sauberen Asphaltstraße in einer ruhigen Umgebung im nördlichen Umland von Dresden. Für die synthetischen Geräusche wurde drei Pegel-Variationen erzeugt (bezogen auf den originalen Messpegel des Verbrenners): -7 dB, -2 dB, 0 dB. Die Länge der Vorbeifahrten betrug 8 Sekunden, was eine Anfahrt aus 20 m Entfernung darstellt. Des Weiteren wurden zwei verschiedene Hintergrundgeräusche als Maskierer verwendet:

- Pedersen-Rauschen 55 dB(A)
- „TU Hintergrund“ 55 dB(A)

Zur Erstellung eines realistischen Hintergrundgeräusches („TU Hintergrund“) wurden an unterschiedlichen Orten der Dresdner Innenstadt akustische Aufnahme mit einem Kunstkopf durchgeführt. Nach dem Abhören durch Experten des Lehrstuhles wurde eine Aufnahme für die Verwendung des Experimentes gewählt. Dabei stellte die Homogenität des Geräusches das Hauptkriterium dar, da Dominanzen von Einzelereignissen vermieden werden sollten. In Abbildung 2 ist das Frequenzspektrum über der Zeit der beiden Hintergrundgeräusche dargestellt.

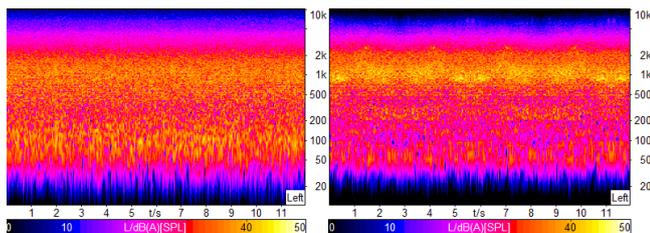


Abbildung 2: Hintergrund-Stimuli, FFT über der Zeit, DFT-Länge 4096, A-Bewertung, Pedersen-Rauschen (links) und TU Hintergrund (rechts)

Ergebnisse

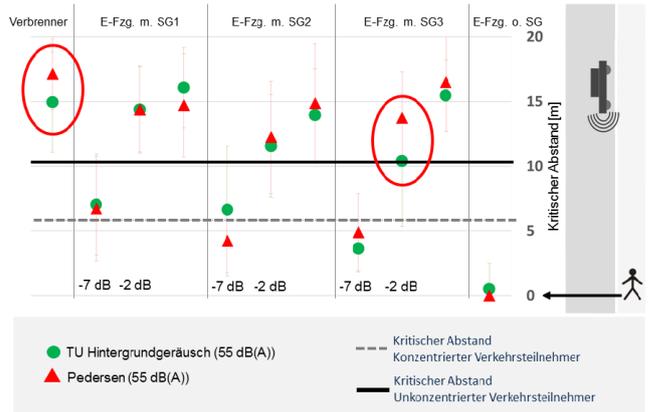


Abbildung 3: Ergebnisse der experimentell ermittelten Wahrnehmungsabstände für herannahende Fahrzeuge als Mittelwerte und Standardabweichungen über die alle Versuchspersonen. Zusätzlich sind die kritischen Abstände für konzentrierte (untere gestrichelte Linie) und unkonzentrierte (obere dicke Linie) Verkehrsteilnehmer eingezeichnet. (Pedersen: rotes Dreieck, TU-Hintergrund: grüner Kreis)

Abbildung 3 zeigt die experimentell ermittelten Wahrnehmungsabstände des Vorversuches als Mittelwerte und Standardabweichung über alle Versuchspersonen. Dabei zeigt die X-Achse die untersuchten Fahrzeuggeräusche und die Y-Achse die kritischen Abstände in Meter. Die beiden waagerechten Linien markieren die kritischen Abstände für unkonzentrierte (schwarz) bzw. unkonzentrierte (grau-gestrichelt) Verkehrsteilnehmer für eine Geschwindigkeit von 20 km/h. Die Geräusche die unterhalb der Linien liegen sind somit erst zu einem zu geringeren Abstand hörbar, sodass ein Unfall hier schwer zu verhindern wäre. Die kritischen Abstände aller Geräusche wurden mit beiden Hintergrundgeräuschen ermittelt. Allgemein zeigt sich, dass das Elektrofahrzeuggeräusch ohne Soundgenerator und die synthetischen Geräusche, welche 7 dB leiser als der Verbrenner sind, nicht rechtzeitig hörbar werden. Die Geräusche, die 2 dB leiser waren, wurden im Mittel rechtzeitig gehört, aber die Standardabweichungen für SG2 und SG3 sind jedoch beträchtlich groß und schließen somit auch den „unsicheren“ Bereich mit ein. Es zeigt sich, dass bestimmte Geräusche (z.B. SG3) rechtzeitig erkannt werden und dabei einen geringeren Pegel als der Verbrenner aufweisen. Des Weiteren zeigen die rot umrandeten Ergebnisse signifikante Unterschiede (Signifikanzniveau  $\alpha = 0,05$ ) in den wahrgenommenen Abständen je nach Hintergrundgeräusch. In den meisten Fällen wurde das Fahrzeuggeräusch in dem Pedersen-Rauschen früher gehört.

Wahrnehmungsstudie I: Lästigkeit unterschiedlicher Szenarien

Versuchsdesign

In der ersten Wahrnehmungsstudie sollten die Probanden die Lästigkeit unterschiedlicher Betrachtungsszenarien bewerten. Die im Vorversuch unter beschriebenen

Geräusche wurden verwendet und daraus unterschiedliche Szenarien erstellt. Die Szenarien betragen jeweils 8 Sekunden und wurden so gewählt, dass sie typische Vorbeifahrtsituationen einer einspurigen Straße abdecken: Vorbeifahrt eines einzelnen Fahrzeugs oder Vorbeifahrt von acht Fahrzeugen (vgl. Abb. 4). Für die acht vor-

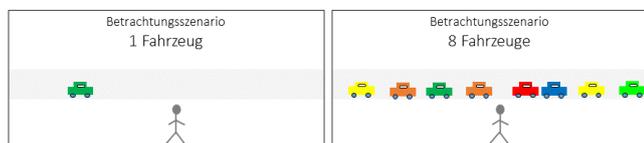


Abbildung 4: Exemplarisch dargestellte Szenarien im Wahrnehmungsversuch I

beifahrenden Fahrzeuge wurden ebenfalls Mischszenarien aus den jeweiligen Fahrzeugtypen erzeugt. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Szenarien realistisch erzeugt werden. Die Abstände zwischen den Fahrzeugen wurden quasi randomisiert erzeugt, d.h. dass diese nicht den gleichen Abstand zueinander aufweisen, jedoch jeweils einen realistischen Abstand bezogen auf die Fahrzeuglänge und den natürlichen Abstand einhalten. Die

Tabelle 1: Übersicht der Mischszenarien

Verbrenner	E-Fzg.SG1	E-Fzg.SG2	E-Fzg.SG3
100% 0% 0% 0%	100%		100%
87,5% 87,5% 87,5%	12,5%	12,5%	12,5%
62,5% 62,5% 62,5%	37,5%	37,5%	37,5%
50% 50% 50%	50%	50%	50%
12,5% 12,5% 12,5%	87,5%	87,5%	87,5%
0% 0% 0%	37,5%	25%	37,5%
	25%	7,5%	7,5%
	37,5%	37,5%	25%

Szenarien wurden ebenfalls im Hörversuchslabor über einen Kopfhörer der Fa. Sennheiser vom Typ HD600 kalibriert über eine Benutzeroberfläche (mit Matlab GUI implementiert) wiedergegeben. Die Versuchspersonen sollten die Lästigkeit der jeweiligen Szenarien über eine kontinuierliche Skala mit der Möglichkeit der analogen Auswahl des Lästigkeitswertes bewerten. Dies bietet die Sicherheit der statistischen Mittelwertbildung. In dieser kontinuierlichen Skala werden die in der Psychometrik üblichen äquidistanten Rohrman-Begriffe [6] verwendet. Um den Probanden ein Gefühl für die Breite der Palette der dargebotenen Geräusche zu vermitteln, wurde dem Versuch ein Training vorangestellt. In diesem Training wurden sowohl die Einzelvorbeifahrten wie auch die komplexeren Situationen präsentiert.

## Ergebnisse

In der Abbildung 5 sind die Mittelwerte der Lästigkeitsbewertungen der untersuchten Szenarien dargestellt. Der obere Teil der Grafik zeigt die Ergebnisse der einzelnen Vorbeifahrten und der untere Teil die Ergebnisse für die acht Fahrzeuge (jeweils gleiches Fahrzeuggeräusch). Im oberen Teil ist zu erkennen, dass der Verbrenner als *gar nicht lästig* bewertet wurde. Dies ist auf den Aspekt der Gewohnheit zurückzuführen. Aber auch für die Elektrofahrzeuge zeigt sich eine Reihenfolge hinsichtlich der Lästigkeit. Aufgrund der unterschiedlichen Lautheit war zu erwarten, dass die acht Fahrzeuge lästiger bewertet werden als das jeweilige einzelnen Fahrzeuge. Interessant ist aber die lautheitsunabhängige Bewertung von *E-Fzg. mit SG2*: das einzelne Fahrzeug wurde als *am wenigsten lästig* von den synthetischen Geräuschen bewertet, während acht Fahrzeuge dieses Typ als *sehr lästig* empfunden wurden. Dieser Unterschied ist auf dem Signifikanzniveau  $\alpha = 0,05$  statistisch signifikant. Die Ergebnisse für die Mischszenarien sind in Abbildung 6 aufgezeigt. Hier lassen sich nur leichte Tendenzen erkennen, dass die Szenarien weniger lästig empfunden wurden, je höher der Verbrennungsfahrzeuganteil ist. Des Weiteren zeigen sich leichte Unterschiede in den Bewertungen je nach Zusammensetzungen. Da die interindividuellen Unterschiede sehr groß sind, zeigen sich hier keine signifikanten Unterschiede.

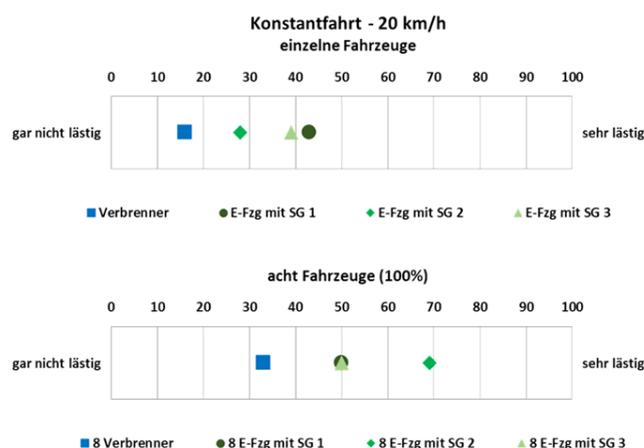


Abbildung 5: Ergebnisse für die Lästigkeitsbewertung für die Einzelvorbeifahrt (oben) und die Vorbeifahrt von acht Fahrzeugen (100%) (unten)

## Wahrnehmungsstudie II: Lästigkeit mit Hintergrundgeräusch

### Versuchsdesign

In der zweiten Wahrnehmungsstudie wurde die Lästigkeit eines vorbeifahrenden Fahrzeugs in unterschiedlichen Hintergrundgeräuschen beurteilt. Es wurden alle Geräusche mit dem Pedersen-Rauschen und dem TU-Hintergrund untersucht. Hierfür wurde den Hintergrundgeräuschen das jeweilige Fahrzeuggeräusch

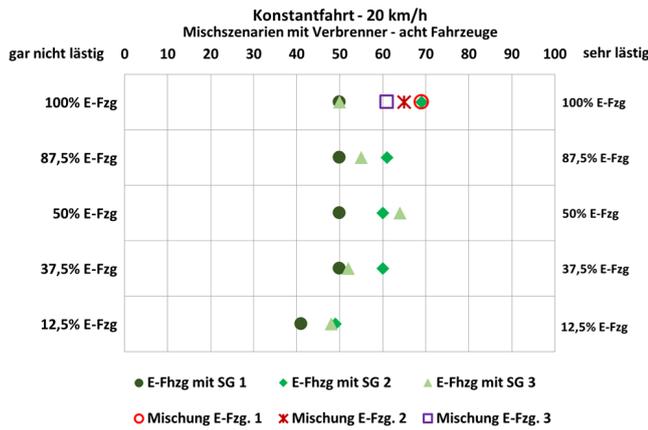


Abbildung 6: Ergebnisse für die Lästigkeitsbewertung für die Mischszenarien von acht Fahrzeugen

überlagert. In einem Hörversuch wurden die Probanden nach der Lästigkeit und der Warnwirkung gefragt. Auch bei diesem Hörversuch wurde eine kontinuierliche Skala nach Rohrman verwendet und über Matlab-GUI präsentiert. Die Reihenfolge wurde ebenfalls randomisiert und es wurde ein Training vorangestellt.

### Ergebnisse

Abbildung 7 zeigt die Ergebnisse für die Bewertung der Lästigkeit und der Warnwirkung einer einzelnen Vorbeifahrt bei unterschiedlichen Hintergrundgeräuschen. Da-

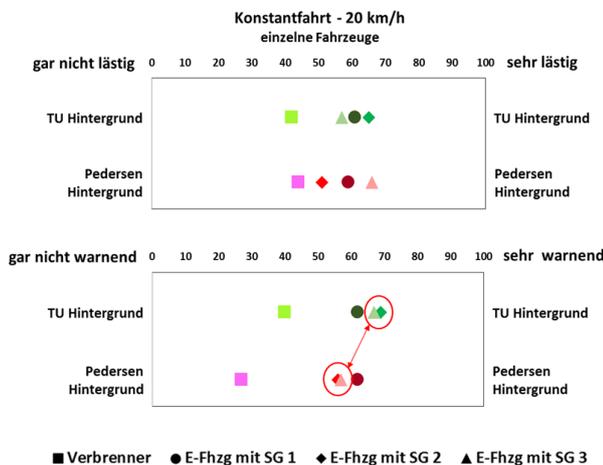


Abbildung 7: Ergebnisse für die Bewertung der Lästigkeit (oben) und Warnwirkung (unten) von einzelnen Vorbeifahrten im Pedersen-Hintergrund (rot) und TU-Hintergrund (grün).

bei zeigen sich bezüglich der Lästigkeit nur geringe Unterschiede je nach Hintergrundgeräusch. Bei den Elektrofahrzeuggeräuschen ist eine Reihenfolgeänderung in der Bewertung zu sehen. Die Warnwirkung weist hingegen deutlicher Unterschiede auf. Alle Geräusche wurden als weniger warnend wahrgenommen, wenn das Pedersen-Rauschen als Hintergrundgeräusch verwendet wurde. Des Weiteren zeigen sich auch hier signifikante Unterschiede in der Bewertung der Geräusche. So wurden die

Geräusche Verbrenner, SG2 und SG3 warnender bewertet wenn der TU-Hintergrund vorhanden war. Für das Geräusch SG1 zeigen sich keine Unterschiede durch die Verwendung verschiedener Hintergründe.

### Zusammenfassung

Es zeigt sich, dass es Reaktionszeitunterschiede für unterschiedliche Fahrzeuggeräusche gibt und somit die Detektionsfähigkeit abhängig von dem Geräusch des Fahrzeugs und dem parallel wahrgenommenen Umgebungsgeräusch beeinflusst wird. Des Weiteren ergeben sich Unterschiede in der Lästigkeitsbewertung hinsichtlich verschiedener Betrachtungsszenarien. Bedingt durch die Lautheit werden acht Fahrzeuge lästiger bewertet als ein einzelnes Fahrzeug. Allerdings ändert sich in einigen Fällen auch die Reihenfolge der Lästigkeitsbewertung: ein Elektrofahrzeuggeräusch welches als einzelne Vorbeifahrt als das am wenigsten lästigsten Elektrofahrzeuggeräusch empfunden wurde, wurde durch die Erhöhung auf acht Fahrzeuge als lästigstes Geräusch bewertet. Die Hintergrundgeräusche haben ebenfalls einen Einfluss auf die Wahrnehmung der Lästigkeit und der Warnwirkung.

### Literatur

- [1] Altinsoy, M.E. et al.: „Wahrnehmung und Bewertung von Fahrzeugaußengeräuschen durch Fußgänger in verschiedenen Verkehrssituationen und unterschiedlichen Betriebszuständen.“ FAT Schriftenreihe, 2015, Nr. 278.
- [2] Altinsoy, M.E.:“The Detectability of Conventional, Hybrid and Electric Vehicle Sounds by Sighted, Visually Impaired and Blind Pedestrians“ in Proceedings of the Internoise 2013, Innsbruck, Austria.
- [3] Altinsoy, M.E. and Landgraf, J.: „Perceptibility of Vehicle Exterior Sounds – Balance between Information and Noise“ ATZ Worldwide, 116 (9), pp. 60-65.
- [4] Green, M.: „How long does it take to stop?“ Methodological analysis of driver perception-brake times. Transportation human factors, 2:195-216, 2000.
- [5] Kerber, Stefan, et al.: Wahrnehmbarkeit von Fahrzeugaußengeräuschen in Hintergrundgeräuschen: psychoakustische Beurteilungen und modellbasierte Prognosen. Verlag Dr. Hut, München, 2008
- [6] Rohrman, B.: „Empirische Studien zur Entwicklung von Antwortskalen für die sozialwissenschaftliche Forschung“, Zeitschrift für Sozialpsychologie 9, 1978