

# Die Gewichtung von Heading und lateraler Position bei der Spurhaltung

**Peter Hofmann, Stephan Getzmann und Gerhard Rinke**

*Schlüsselwörter: Spurhaltung, Quickening, Heading, laterale Position*

## Zusammenfassung

Um ein Fahrzeug in der Spur zu halten, ist ein Fahrer auf die Verarbeitung von Informationen aus dem Nah- und dem Fernbereich bzw. von lateraler Position und Heading angewiesen. Er betreibt ein automatisches „Quickening“, indem er sowohl die prädiktive Heading- als auch die aktuelle Positionsinformation integriert und in Lenkbewegungen umsetzt. Aus theoretischer Sicht stellt sich die Frage, welche der beiden Informationen, Heading oder laterale Position, für die erfolgreiche Spurhaltung relevanter ist. In diesem Experiment wurden dem Fahrer eines virtuellen Fahrzeuges in einer Spurhalteaufgabe beide Größen visuell oder akustisch zurückgemeldet. Es wurde angenommen, dass die akustische Präsentation der relevanteren Information zu deutlicheren Fahrleistungsdefiziten führen sollte. Die Ergebnisse unterstützen die „turn and see“-Strategie indem sie darauf hinweisen, dass die Fahrleistung im Hinblick auf die Qualität der Spurhaltung insbesondere von der visuellen Kontrolle des Headings abhängt. Im Hinblick auf angewandte Fragestellungen könnten diese Ergebnisse als Hinweis auf die Relevanz einer Headingunterstützung (z.B. unter schlechten Sichtbedingungen) gewertet werden.

## Abstract

Keeping the lane when driving requires the processing of information from a near and a far region, i.e. control and monitoring of lateral position and heading. Interestingly, a driver executes an automatic “quickening” since he integrates predictive heading and actual lateral position information into adequate steering movements. From a theoretical viewpoint one may ask which information, heading or lateral position, is more relevant for successful lane keeping. In this experiment the drivers of a virtual vehicle received information about both variables either visually or acoustically. We assumed that the acoustic presentation of the more relevant information would lead to stronger deficits in lane keeping performance. The results support the „turn and see“-strategy: lane keeping performance depended stronger on visual heading control than on visual control of lateral position. With regard to applied problems these results may hint to the relevance of heading support systems under degraded visual viewing conditions.

## Einleitung

Um ein Fahrzeug bei konstanter Geschwindigkeit geradeaus in der Spur zu halten ist ein Fahrer in erster Linie auf die Verarbeitung der lateralen Position des Fahrzeuges und der Fahrzeugausrichtung (Heading) angewiesen. Diese beiden beobachtbaren Größen stellen in kompensatorischen Steuerungsmodellen die relevanten Inputvariablen für den Fahrer dar, und werden von ihm in eine Veränderung des Lenkwinkels, als Outputvariable, umgesetzt (Jagacinski & Flach, 2003; McRuer, Allen, Weir, & Klein, 1977). Aus theoretischer Sicht entspricht die Spurhaltung der Steuerung eines Kontrollsystems zweiter Ordnung. Eine Veränderung des Lenkwinkels durch einen Lenkradeinschlag generiert eine Veränderung des Headings, was wiederum eine Veränderung der lateralen Position nach sich zieht. Eine Rückstellung des Lenkrades in die Ausgangsposition beendet zwar die Veränderung des Headings, die Richtungsänderung des Fahrzeuges hat jedoch eine weitergehende Veränderung der lateralen Position zur Folge. Um die zunehmende Veränderung der lateralen Position zu beenden, muss eine zweite Lenkwin-

kelveränderung herbeigeführt werden, welche die Veränderung des Headings rückgängig macht und das Fahrzeug wieder zurück in die Geradeausrichtung dreht. Ein solches Lenkverhalten, bestehend aus Einlenken und Gegenlenken ist beispielsweise notwendig, um einen Spurwechsel oder korrigierende Manöver bei der Spurhaltung auszuführen (Hildreth, Beusmans, Boer, & Royden, 2000; Wallis, Chatziastros, & Bühlhoff, 2002). Das Heading, das ein Fahrer automatisch durch die Ausrichtung seines Fahrzeuges wahrnimmt, liefert ihm demnach Informationen über die Veränderungsrate der lateralen Position. Ohne das Heading bliebe dem Fahrer nur die Veränderung der lateralen Position als Informationsquelle und er müsste deren Veränderungsrate selbst erschließen, um die entsprechend notwendigen Lenkbewegungen für eine stabile Spurhaltung zu generieren (Jagacinski & Flach, 2003).

Interessanterweise sind Autofahrer problemlos in der Lage, geradeaus zu fahren oder die Spur zu wechseln, ohne sich dieser Zusammenhänge bewusst zu sein (Jagacinski & Flach, 2003; Wallis, Chatziastros, & Bühlhoff, 2002; Wallis, Chatziastros, Tresilian, & Tomasevic, 2007). Insofern betreibt jeder Autofahrer ein automatisches „Quickening“, das bedeutet, dass er sowohl die absolute Veränderung (den lateralen Positionsfehler) als auch deren Veränderungsrate (Heading) verarbeitet und beide Informationen in Lenkbewegungen und antizipatorische Gegenlenkbewegungen umsetzt. Quickening ist eine Methode, die Steuerung von Kontrollsystemen zweiter Ordnung zu erleichtern. „Quickened Displays“ stellen nicht nur die absolute Veränderung einer Outputgröße (z.B. den lateralen Positionsfehler), sondern zusätzlich eine darüber hinausgehende Information, z.B. die erste Ableitung der Position nach der Zeit, also die Geschwindigkeit der Veränderung dar (Jagacinski & Flach, 2003).

Quickening stellt einen interessanten Ansatz dar, um die Größen laterale Position und Heading bei der Spurhaltung näher zu untersuchen. Typischerweise sind beide Größen in Fahrexperimenten miteinander konfundiert, da sich aus den vorhandenen Fahrbahnmarkierungen immer Informationen sowohl über die laterale Position als auch über das Heading ableiten lassen (z. B. Land & Horwood, 1995; Macuga, Beall, Kelly, Smith, & Loomis, 2007; Wallis, Chatziastros, & Bühlhoff, 2002). Es ist noch unklar, welche von beiden Größen für die Spurhaltung bzw. für Spurwechsel dominierend ist. Es gibt jedoch Hinweise, dass visuelle Informationen aus dem Nah- und Fernbereich integriert werden, um Spurhalteaufgaben erfolgreich bewältigen zu können (Land & Horwood, 1995). Die Annahme hierbei ist, dass der Nahbereich der Kontrolle der lateralen Position und der Fernbereich der Kontrolle des Fahrzeug-Headings dient. Diese Annahme wurde von Salvucci und Gray (2004) in das Two-Point Visual Control Model of Steering umgesetzt und anhand eines Computermodells erfolgreich für die Manöver Kurvenfahrt, Korrekturbewegungen bei der Spurhaltung und Spurwechsel überprüft. Aus theoretischer Sicht stellt sich aber auch hier die Frage, wie die beiden visuellen Informationsquellen (Nah- oder Fernpunkt) bei der Spurhaltung gewichtet werden. Die experimentelle Variation beider Größen mit Hilfe eines Quickened Displays, das sowohl Heading als auch laterale Position darstellt, und die entsprechende Messung der Fahrleistung in einer Spurhalteaufgabe könnten diese Frage beantworten.

Eine Studie von Wallis et al. (2002) weist darauf hin, dass insbesondere die visuelle Verarbeitung des Headings eine notwendige Voraussetzung für erfolgreiche Spurwechsel ist. Ohne intermittierende visuelle Kontrolle im Sinne einer „turn and see“-Strategie, waren die Versuchspersonen (Vpn) nicht in der Lage, Spurwechsel zu steuern. Gemäß diesem Ergebnis lässt sich annehmen, dass das Heading im Vergleich zur lateralen Position die dominierende Information bei der Spurhaltung ist. Wenn das Heading die relevantere von beiden Informationen ist, dann sollte es den Vpn schwerer fallen, eine qualitative Verschlechterung dieser räumlichen Information zu kompensieren. Das Defizit in der Fahrleistung sollte demnach dann höher ausfallen, wenn die Headinginformation in niedrigerer räumlicher Auflösung dargeboten wird als wenn die laterale Positionsinformation räumlich niedriger aufgelöst präsentiert wird. In der vorliegenden Studie wurde die Qualität von Heading und lateraler Positionsinformation da-

durch manipuliert, dass beide Informationen entweder durch Stimuli in der visuellen oder räumlich schlechter auflösenden akustischen Modalität (Blauert, 1997) dargeboten wurden.

## Methoden

An dem Versuch nahmen 5 Frauen und 9 Männer (alle rechtshändig) im Alter zwischen 19 und 42 Jahren teil ( $M = 25,4$  Jahre,  $SD = 6,7$  Jahre), deren jährliche Fahrleistung bei im Mittel 8982 km lag ( $SD = 10074$  km). Keine der Vpn wies eine Farbsehschwäche auf (Ishihara, 1990). Die Vpn erhielten eine Aufwandsentschädigung von 8€h für ihre Teilnahme.

Als experimentelle Fahraufgabe wurde eine Spurhalteaufgabe entwickelt. Die mehrspurige Fahrbahn verlief geradeaus und das virtuelle Fahrzeug bewegte sich mit konstanter Geschwindigkeit fort (ca. 60 km/h). Die Vpn mussten nur das Lenkrad bedienen, um das virtuelle Fahrzeug aus einer initialen Startposition, die um eine oder zwei Fahrspuren versetzt von der Zielfahrspur lag, schnellstmöglich in die Zielspur zu steuern und das Fahrzeug dann bestmöglich mittig in dieser Fahrspur zu halten. Es wurden vier Fahrbedingungen realisiert: in der Kontrollbedingung wurde die Zielspur mit grünen, alle anderen Fahrspuren mit weißen Fahrbahnmarkierungen gekennzeichnet. In den drei anderen Bedingungen wurden die Fahrbahnmarkierungen ausgeblendet, um den Vpn keine Hinweise aus der Umgebung auf Heading oder laterale Position des Fahrzeuges zu geben. Stattdessen wurden das Heading bzw. die laterale Position visuell oder akustisch rückgemeldet. Die visuelle Rückmeldung erfolgte jeweils über ein kleines gelbes Quadrat, das sich entsprechend der aktuellen lateralen Abweichung bzw. des aktuellen Headings nach links oder rechts von der Zielspurmitte bzw. der Geradeausrichtung, die jeweils in der Mitte des Bildschirms lagen, entfernte. Die Bewegung des jeweiligen Quadrates erfolgte nicht kontinuierlich sondern in jeweils 10 diskreten Stufen nach links bzw. rechts bis zum Bildschirmrand. In Analogie zu der visuellen Darstellung wurde eine akustische Rückmeldung entwickelt, die aus einem weißen Rauschen (53 dB(A)) bestand, das aus zwei seitlich des Bildschirms angeordneten Boxen ertönte. Dieses Rauschen erfolgte zu je 50% aus beiden Boxen, wenn das Heading bzw. die laterale Abweichung optimal (d.h. geradeaus bzw. mittig) waren. Entfernten sich das Heading bzw. die laterale Abweichung vom jeweiligen Optimum, so ertönte das Rauschen in entsprechender 10-facher Stufung stärker aus der jeweilige Abweichungsrichtung bis es, im Fall der maximalen Abweichung, zu 100% aus einer Box ertönte.

Zu Beginn des Experiments wurden allgemeine Daten von den Vpn erhoben und in einem Hörtest überprüft, ob sie in der Lage waren, die akustische räumliche Position zu dekodieren. Dann wurden die Vpn gebeten, das virtuelle Fahrzeug in jedem Durchgang schnellstmöglich in die Zielfahrspur zu lenken und es dort bestmöglich in der Mitte der Spur zu halten. Jede Vp begann den Versuch mit der Kontrollbedingung, danach folgten die drei Feedbackbedingungen, deren Reihenfolge über die Vpn hinweg ausbalanciert wurde. Jede der Bedingungen wurde vor der Datenaufzeichnung trainiert. Sowohl in der Kontrollbedingung als auch in den drei Feedbackbedingungen wurden jeweils 96 zehnstufige einzelne Durchgänge, die in 6 Blöcken zu je 16 Durchgängen präsentiert wurden, gefahren. Nach jedem Block erhielt die Vp ein Feedback über das mittlere Heading und die mittlere laterale Position, die sie während der Fahrt minimieren sollten. Die Gesamtfahrzeit betrug 2-2,5h pro Vp.

Das Versuchsdesign entsprach einem multivariaten  $4 \times 2 \times 2$  Design mit Messwiederholung auf den Faktoren Feedback (Heading visuell/laterale Position visuell, visuell/akustisch, akustisch/visuell), initiale Spurabweichung (eine/zwei Spuren) und Spurwechselrichtung (links/rechts). Als abhängige Variablen wurden die absolute Fehler der lateralen Position und des Headings, sowie die jeweiligen Standardabweichungen dieser Größen berechnet.

Die abhängigen Variablen wurden individuell für die Messstrecke eines jeden Durchgangs bestimmt. Die Messstrecke begann zu dem Zeitpunkt, an dem die Vp das Fahrzeug erstmals in die Zielfahrspur lenkte und endete mit dem Trial. Fehlerhafte und Trainingsdurchgänge wurden vor den statistischen Berechnungen entfernt. Fehlerhaft waren Durchgänge, in denen die Vpn

zu spät oder zu keinem Zeitpunkt des jeweiligen Durchgangs die Zielspur erreichten. Für die arcus-sinus-transformierten Fehlerraten (Winer, 1971) und pro abhängiger Variable wurden univariate zweifaktorielle Varianzanalysen gerechnet, wobei die Daten über den Faktor Spurabweichung zusammengefasst wurden. Das Signifikanzniveau für die Varianzanalysen der Fahrleistungsdaten wurde aufgrund des multivariaten Charakters der Untersuchung auf  $\alpha = 0,01$  festgelegt. Post-hoc durchgeführte paarweise Vergleiche wurden Bonferroni-korrigiert.

## Ergebnisse

7,3% aller Durchgänge wurden als fehlerhaft klassifiziert. Die ANOVA ergab Haupteffekte der Faktoren Feedback ( $F(3,39) = 19,78, p < 0,01$ ) und Spurabweichung ( $F(1,13) = 4,96, p < 0,05$ ). Die anschließenden Vergleiche zeigten, dass in der Kontrollbedingung weniger Fehler als in allen anderen Bedingungen begangen wurden. Ebenso traten in der rein visuellen Feedbackbedingung weniger Fehler als in der visuell-akustischen und tendenziell weniger Fehler als in der akustisch-visuellen Bedingung auf. Zudem entstanden mehr Fehler nach der zweispurigen als nach der einspurigen initialen Abweichung.

Wie aus den Abbildungen 1 und 2 ersichtlich wird, ergaben die Analysen der Fahrleistungsdaten grundsätzlich Vorteile für die Kontrollbedingung. Für die Fragestellung des Experimentes waren vor allem die Vergleiche zwischen den Feedbackbedingungen relevant. Im Hinblick auf die laterale Position wurden Feedback-Haupteffekte sowohl für den absoluten Fehler ( $F(3,39) = 15,79, p < 0,01$ ) als auch für dessen Standardabweichung ( $F(3,39) = 40,09, p < 0,01$ ) festgestellt. Die paarweisen Vergleiche zeigten signifikante Vorteile, d.h. eine geringere laterale Abweichung und eine höhere Stabilität der lateralen Position, für die rein visuelle Bedingung gegenüber der akustisch-visuellen Bedingung.

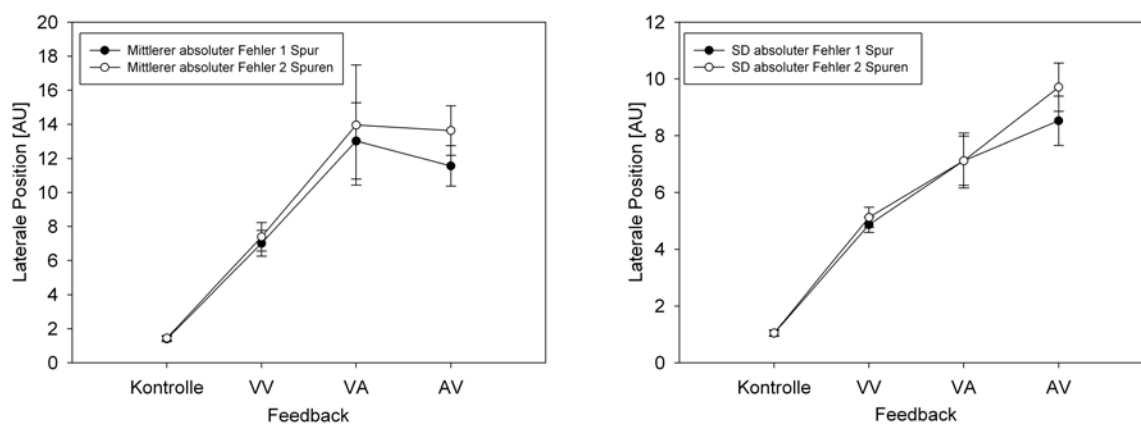


Abb.1: Mittlerer absoluter Fehler der lateralen Position und dessen Standardabweichung. VV: Heading visuell, laterale Position visuell; VA: Heading visuell, laterale Position akustisch; AV: Heading akustisch, laterale Position visuell. AU: arbitrary units.

Auch die Auswertung des absoluten Heading-Fehlers und dessen Standardabweichung ergab Haupteffekte für den Faktor Feedback ( $F(3,39) = 57,83, p < 0,01$  bzw.  $F(3,39) = 62,79, p < 0,01$ ). Die paarweisen Vergleiche zeigten für beide abhängige Variablen das gleiche Ergebnismuster: die rein visuelle und die visuell-akustische Feedbackbedingung lieferten jeweils bessere Fahrleistungen als die akustisch-visuelle Bedingung. Untereinander unterschieden sich die rein visuelle und die visuell-akustische Bedingung nicht. Der Faktor Distanz führte sowohl hinsichtlich des absoluten Heading-Fehlers ( $p < 0,01$ ), als auch hinsichtlich der Stabilität des Headings ( $p < 0,01$ ) zu signifikanten Vorteilen für die einspurige initiale Spurabweichung.

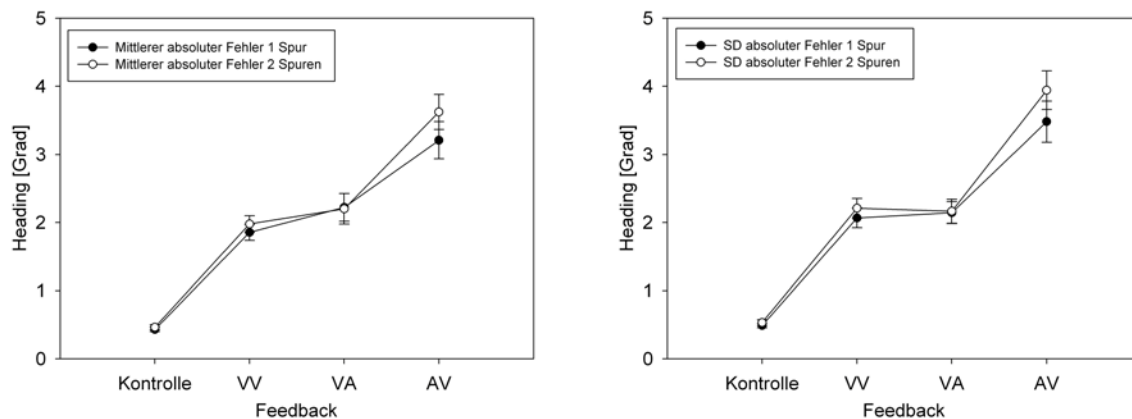


Abb.2: Absoluter Fehler und Standardabweichung des absoluten Fehlers des Headings. Abkürzungen wie in Abbildung 1.

## Diskussion

Ausgehend von der Hypothese, dass Headinginformationen einen größeren Einfluss auf die Fahrleistung bei der Spurhaltung ausüben als laterale Positionsinformationen, wurde eine Spurhalteaufgabe entwickelt, bei der den Vpn Heading oder laterale Position entweder visuell oder akustisch dargeboten wurden. Dabei wurde angenommen, dass die durch die akustische Präsentation bedingte schlechtere räumliche Auflösung für die relevantere der beiden Informationen schlechter zu kompensieren sei. Die Ergebnisse des Experimentes sprechen für die Annahme einer Dominanz der Headinginformation gegenüber der lateralen Positionsinformation.

Erwartungsgemäß wies die Kontrollbedingung die besten Fahrleistungsdaten auf. Der Vergleich der drei Feedbackbedingungen untereinander im Hinblick auf die laterale Position und deren Stabilität ergab, dass sich die Fahrleistung verschlechterte, wenn das Heading akustisch dargeboten wurde. Dies war nicht der Fall, wenn die laterale Position akustisch dargeboten wurde. Die Vpn konnten also die weniger reliable akustische Headinginformation nicht kompensieren, wohingegen ihnen dies für die laterale Position gelang. Ein vergleichbares Ergebnismuster zeigte sich ebenfalls für das Heading und dessen Stabilität: auch hier gelang es den Vpn, das simulierte Fahrzeug stabiler auszurichten, wenn die Headinginformation visuell codiert wurde, wohingegen ein vergleichbarer Leistungseinbruch bei der akustischen Codierung der lateralen Position nicht zu beobachten war. Die Auswertung der fehlerhaften Durchgänge ergab zudem einen Nachteil der visuell-akustischen Bedingung, jedoch nur einen tendenziellen Nachteil der akustisch-visuellen Bedingung gegenüber der rein visuellen Bedingung. Dieses Ergebnis kann einerseits als Beleg für die gelungene Manipulation der Feedbackqualität gewertet werden, andererseits relativiert es die Dominanz des Headings gegenüber der lateralen Position im Hinblick auf die Fahrleistung: offensichtlich führen die Vpn in der visuell-akustischen Bedingung zwar geradeaus, jedoch oft nicht in der gewünschten Zielspur. Dieser Zusammenhang könnte mit der Definition eines Durchgangs als Fehler zusammenhängen: ob ein Durchgang als fehlerhaft klassifiziert wurde oder nicht, war von dem Erreichen einer lateralen Position abhängig. Es gab jedoch kein Kriterium für die Abweichung des Headings. Insofern bleibt offen, ob eine potentielle Fehlerkategorie, die ausschließlich durch ein Heading-Kriterium definiert wäre, ähnliche Defizite für die akustisch-visuelle Bedingung ergeben hätte.

Grundsätzlich unterstützen die Ergebnisse die Annahme, dass Fahrer ihr Fahrzeug nach einer „turn and see“-Strategie steuern (Wallis, Chatziastros, & Bühlhoff, 2002), der zufolge die visuelle Kontrolle des Headings notwendige Voraussetzung für die erfolgreiche Querführung des Fahrzeuges ist. Eine ausschließliche Kontrolle der lateralen Position über den Nahbereich würde diese Steuerung vermutlich nur bei niedrigen Geschwindigkeiten erlauben (Land & Horwood, 1995), da der Fahrer unter dieser Voraussetzung wahrscheinlich in der Lage wäre,

eine fehlende explizite Headinginformation aus der Veränderungsrate der lateralen Position selbst zu erschließen. Im höheren Geschwindigkeitsbereich ist er jedoch auf „Quickening“ angewiesen, das ihm die Prädiktion seiner zukünftigen Position erleichtert (Jagacinski & Flach, 2003). Das Heading kann somit als prospektive, die laterale Position hingegen als aktuelle Informationsquelle interpretiert werden.

Einschränkend muss festgehalten werden, dass die Abstrahierung von Heading- und lateraler Positionsinformation in unserem Versuch dazu führte, dass die Fahraufgabe von den Vpn nicht mehr zwangsläufig als Fahraufgabe, sondern unter Umständen auch als reine Geschicklichkeitsaufgabe verstanden wurde. Diese Einschränkung entsteht durch die Eliminierung jeglichen optischen Flusses, welcher ansonsten Zusatzinformationen über das Heading geliefert hätte (Lappe, Bremmer, & van den Berg, 1999). Zusätzlich muss festgehalten werden, dass sich der Nachteil für die akustisch-visuelle Bedingung gegenüber der rein visuellen Bedingung auch aus der lateralisierten Darbietung der akustischen Headinginformation ergeben haben könnte. Die lateralisierte Darbietung ist wahrscheinlich kompatibler zu einer Positions- als zu einer Richtungsinformation.

Im Hinblick auf angewandte Fragestellungen könnten diese Ergebnisse als Hinweis auf die Relevanz einer Headingunterstützung z.B. unter schlechten Sichtbedingungen (Nebel, Nachtfahrten) gewertet werden. Gleichzeitig unterstreichen sie die Relevanz von Quickened Displays, die zusätzliche prädiktive Informationen über die Fahrzeugposition an den Fahrer weitergeben und seine Steuer- und Kontrollaufgaben erleichtern.

## Literatur

- Blauert, J. (1997). *Spatial Hearing: The Psychophysics of Human Sound Localization*. Cambridge, MA.: MIT Press.
- Hildreth, E. C., Beusmans, J. M. H., Boer, E. R., & Royden, C. S. (2000). From Vision to Action: Experiments and Models of Steering Control During Driving. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 26(3), 1106-1132.
- Ishihara, S. (1990). *The series of plates designed as a test for colour blindness: 24 plates edition*. Tokyo: Kanehara.
- Jagacinski, R. J., & Flach, J. M. (2003). *Control Theory for Humans*. Mahwah, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.
- Land, M., & Horwood, J. (1995). Which parts of the road guide steering? *Nature*, 377, 339-340.
- Lappe, M., Bremmer, F., & van den Berg, A. V. (1999). Perception of self-motion from visual flow. *Trends in Cognitive Sciences*, 3(9), 329-336.
- Macuga, K. L., Beall, A. C., Kelly, J. W., Smith, R. S., & Loomis, J. M. (2007). Changing lanes: inertial cues and explicit path information facilitate steering performance when visual feedback is removed. *Experimental Brain Research*, 178, 141-150.
- McRuer, D. T., Allen, R. W., Weir, D. H., & Klein, R. (1977). New Results in Driver Steering Control Models. *Human Factors*, 19(4), 381-397.
- Wallis, G., Chatziastros, A., & Bühlhoff, H. (2002). An Unexpected Role for Visual Feedback in Vehicle Steering Control. *Current Biology*, 12, 295-299.
- Wallis, G., Chatziastros, A., Tresilian, J., & Tomasevic, N. (2007). The role of visual and non-visual feedback in a vehicle steering task. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 33(5), 1127-1144.
- Winer, B. J. (1971). *Statistical principles in experimental design*. New York: McGraw-Hill.